



TÉCNICO  
LISBOA

# **Estruturas de Edifícios em Alvenaria**

## **Concepção e Verificação da Segurança de Estruturas Novas e Existentes**

### **Verificação da Segurança Sísmica de Edifícios de Alvenaria**

**Rita Bento e Ana Simões**

16 de Janeiro de 2014





TÉCNICO  
LISBOA



Associação para a Formação e Desenvolvimento  
em Engenharia Civil e Arquitectura

## 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 lei recente 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: projecto e investigação.



TÉCNICO  
LISBOA

1. Métodos de Análise Sísmica
2. Modelação do Comportamento Não Linear
3. Análises Estáticas Não Lineares
4. Verificação de Segurança
5. Exemplos de Aplicação
  - 5.1. Modelação e análise estática não linear de uma Parede de Alvenaria com o *software* SAP2000
  - 5.2. Apresentação do *software* Tremuri
6. Casos de Estudo



TÉCNICO  
LISBOA

# 1. Métodos de Análise Sísmica

---

## 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**



TÉCNICO  
LISBOA



# 1. Métodos de Análise Sísmica

---

A **análise elástica linear** é o procedimento mais usual numa análise estrutural, onde se assume que o material apresenta um comportamento elástico linear com resistência infinita, tanto à compressão como à tracção.

## **Estruturas de Alvenaria de Pedra Irregular:**

- Material compósito: pedras e argamassa de ligação
- Argamassa elemento mais fraco
- Fendilhação ocorre para níveis de tensão de tracção baixos

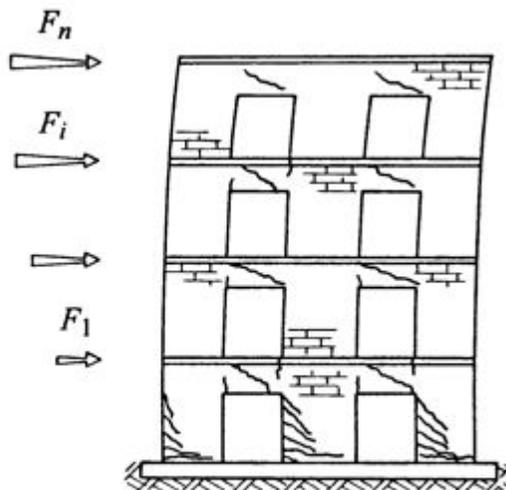
**Análise elástica linear** pode ser aplicada numa primeira fase da análise, pelo menor detalhe na definição do material e estrutura, menos recursos computacionais e tempo disponibilizado.

A **análise não linear** permite traçar a **resposta estrutural completa, desde o troço inicial elástico, fendilhação, cedência, plastificação e rotura.**

# 1. Métodos de Análise Sísmica

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

## 2. Modelação do Comportamento Não Linear

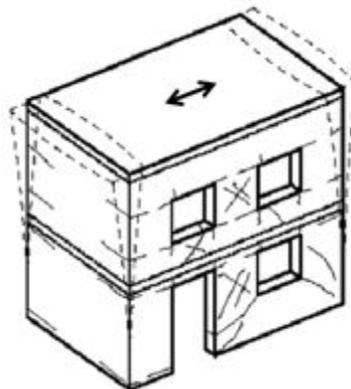
A observação de danos provocados por sismos passados em edifícios de alvenaria mostra que a avaliação do desempenho sísmico pode ser dividido em:

### Resposta Global

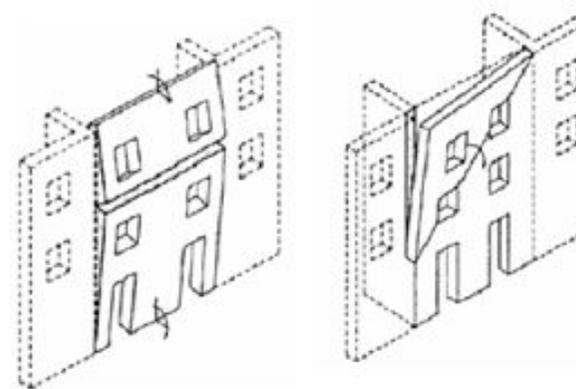
Comportamento das paredes no plano  
Capacidade de transferência de carga entre os pisos e as paredes de alvenaria (ligações)

### Resposta Local

Comportamento das paredes para fora do plano



Resposta Global



Resposta Local

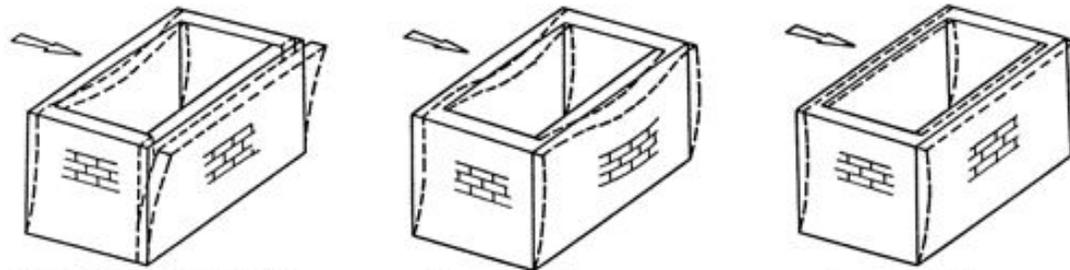


TÉCNICO  
LISBOA

## 2. Modelação do Comportamento Não Linear

### Modos de Colapso

- **Fora do Plano:** quando não existem boas ligações entre os pavimentos e as paredes ou quando os pisos são flexíveis.
- **No Plano:** edifício comporta-se como um todo e não há praticamente colapso para fora do plano.



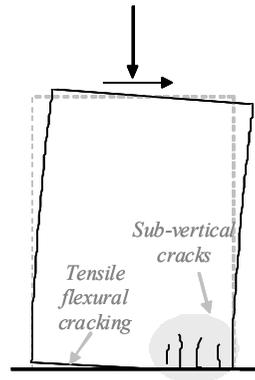
- **Pisos flexíveis:** (i) não há transmissão de forças entre paredes; (ii) resistência global resulta da contribuição individual de cada parede; (iii) a convergência de programas de calculo é mais difícil.
- **Pisos rígidos:** (i) o edifício comporta-se como uma “caixa”; (ii) transmissão de forças entre paredes; (iii) resistência global resulta da contribuição de todos os elementos.



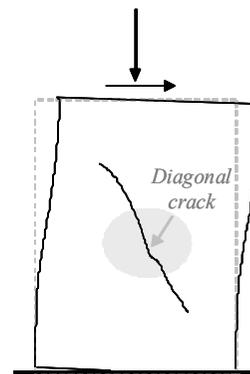
TÉCNICO  
LISBOA

## 2. Modelação do Comportamento Não Linear

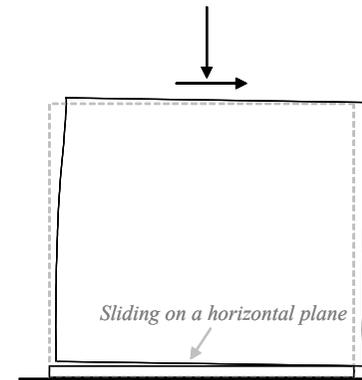
### Modos de Colapso no Plano



**Rotura por Flexão**  
Derrubamento  
Esmagamento



**Rotura por Corte**  
Fendilhação Diagonal



**Rotura por Corte**  
Deslizamento



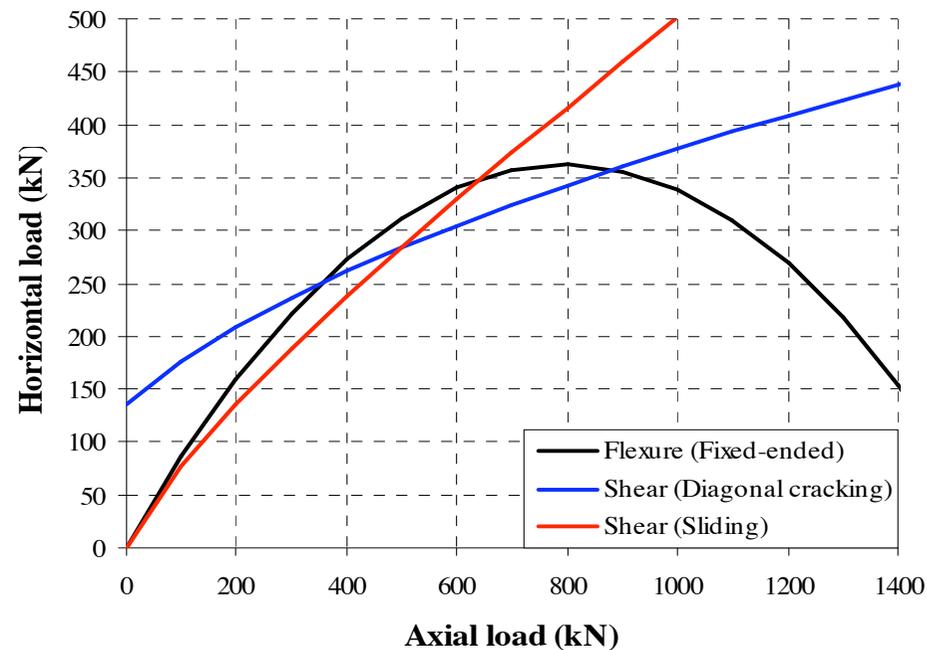


TÉCNICO  
LISBOA

## 2. Modelação do Comportamento Não Linear

### Modos de Colapso No Plano

#### Influência da Força Axial



Para níveis elevados de força axial o comportamento por **flexão composta** condiciona a resposta do elemento.



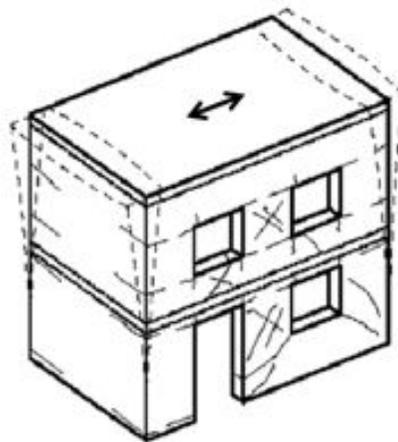
TÉCNICO  
LISBOA

## 2. Modelação do Comportamento Não Linear

### Modos de Colapso No Plano

A fendilhação concentra-se essencialmente nos nembos (colunas) e lintéis (vigas). As zonas de ligação entre os elementos permanecem intactas.

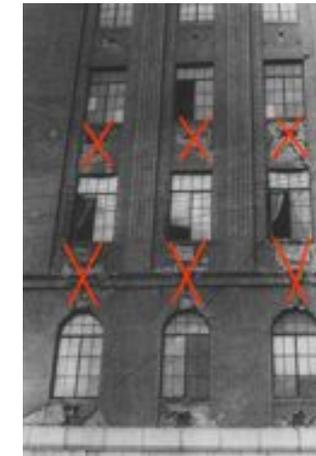
(Tomažević e Weiss, 1990; D'Asdia e Viskovic, 1995; Brencich e Lagomarsino, 1998; Magenes e Della Fontana, 1998; Galasco et al., 2004)



Resposta Global do Edifício



Nembos



Lintéis



TÉCNICO  
LISBOA

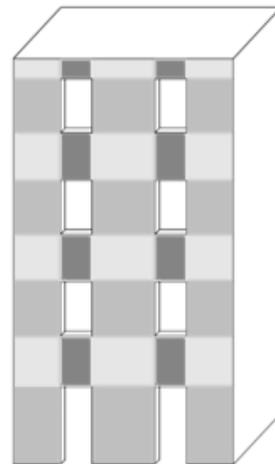
## 2. Modelação do Comportamento Não Linear

### Modos de Colapso No Plano

A fendilhação concentra-se essencialmente nos nembos (colunas) e lintéis (vigas). As zonas de ligação entre os elementos permanecem intactas.



### Método do Pórtico Equivalente macro-elementos

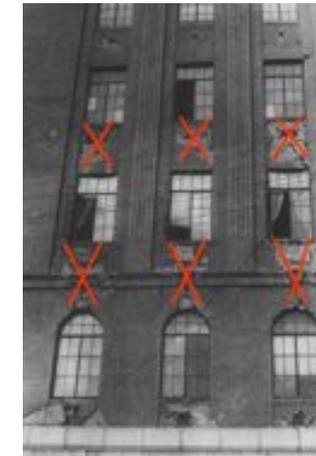


- Piers
- Spandrels
- Rigid nodes

Resposta Global do  
Edifício



Nembos  
(piers)



Lintéis  
(spandrels)



TÉCNICO  
LISBOA



## 2. Modelação do Comportamento Não Linear

---

A **geometria dos elementos** é definida através de critérios convencionais baseados na distribuição das aberturas e propagação de fendilhação (critério empírico – fendas a 30°) e calibrados através da observação de danos em edifícios e ensaios experimentais

(Dolce, 1989; Benedetti et al., 1998; Calvi e Magenes, 1994; Yi et al., 2006).

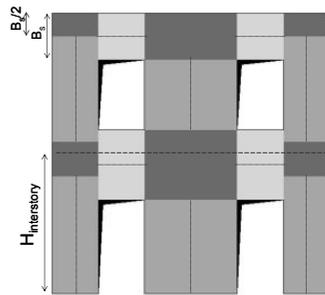


TÉCNICO  
LISBOA

## 2. Modelação do Comportamento Não Linear

A **geometria dos elementos** é definida através de critérios convencionais baseados na distribuição das aberturas e propagação de fendilhação (critério empírico – fendas a  $30^\circ$ ) e calibrados através da observação de danos em edifícios e ensaios experimentais

(Dolce, 1989; Benedetti et al., 1998; Calvi e Magenes, 1994; Yi et al., 2006).



**Aberturas Regulares**

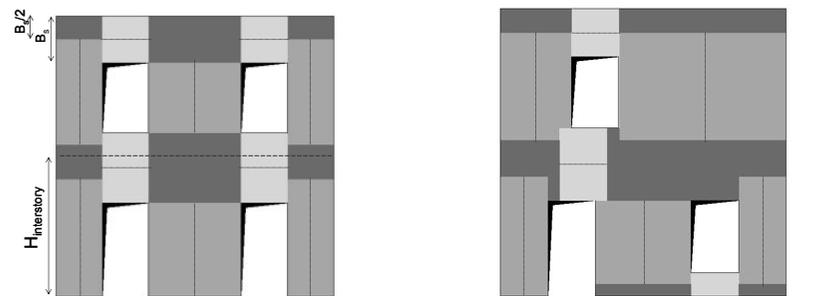


TÉCNICO  
LISBOA

## 2. Modelação do Comportamento Não Linear

A **geometria dos elementos** é definida através de critérios convencionais baseados na distribuição das aberturas e propagação de fendilhação (critério empírico – fendas a  $30^\circ$ ) e calibrados através da observação de danos em edifícios e ensaios experimentais

(Dolce, 1989; Benedetti et al., 1998; Calvi e Magenes, 1994; Yi et al., 2006).



**Aberturas Regulares**

**Aberturas Irregulares**

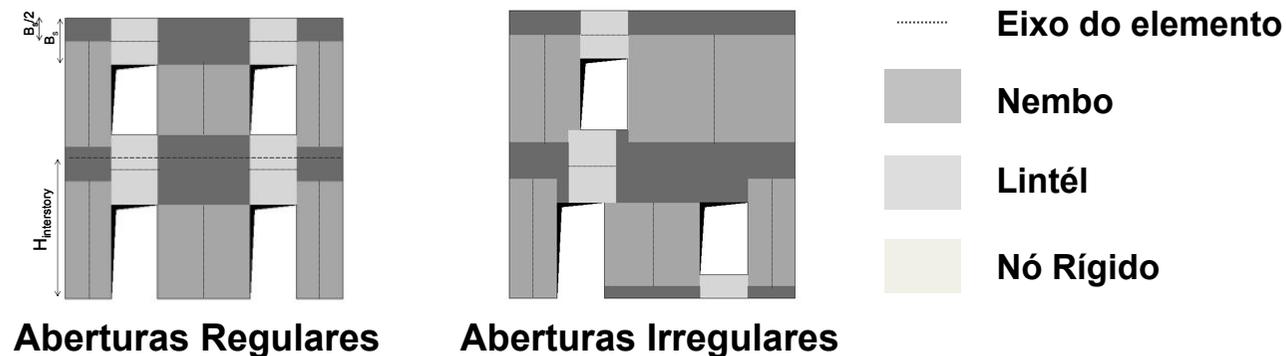


TÉCNICO  
LISBOA

## 2. Modelação do Comportamento Não Linear

A **geometria dos elementos** é definida através de critérios convencionais baseados na distribuição das aberturas e propagação de fendilhação (critério empírico – fendas a 30°) e calibrados através da observação de danos em edifícios e ensaios experimentais

(Dolce, 1989; Benedetti et al., 1998; Calvi e Magenes, 1994; Yi et al., 2006).



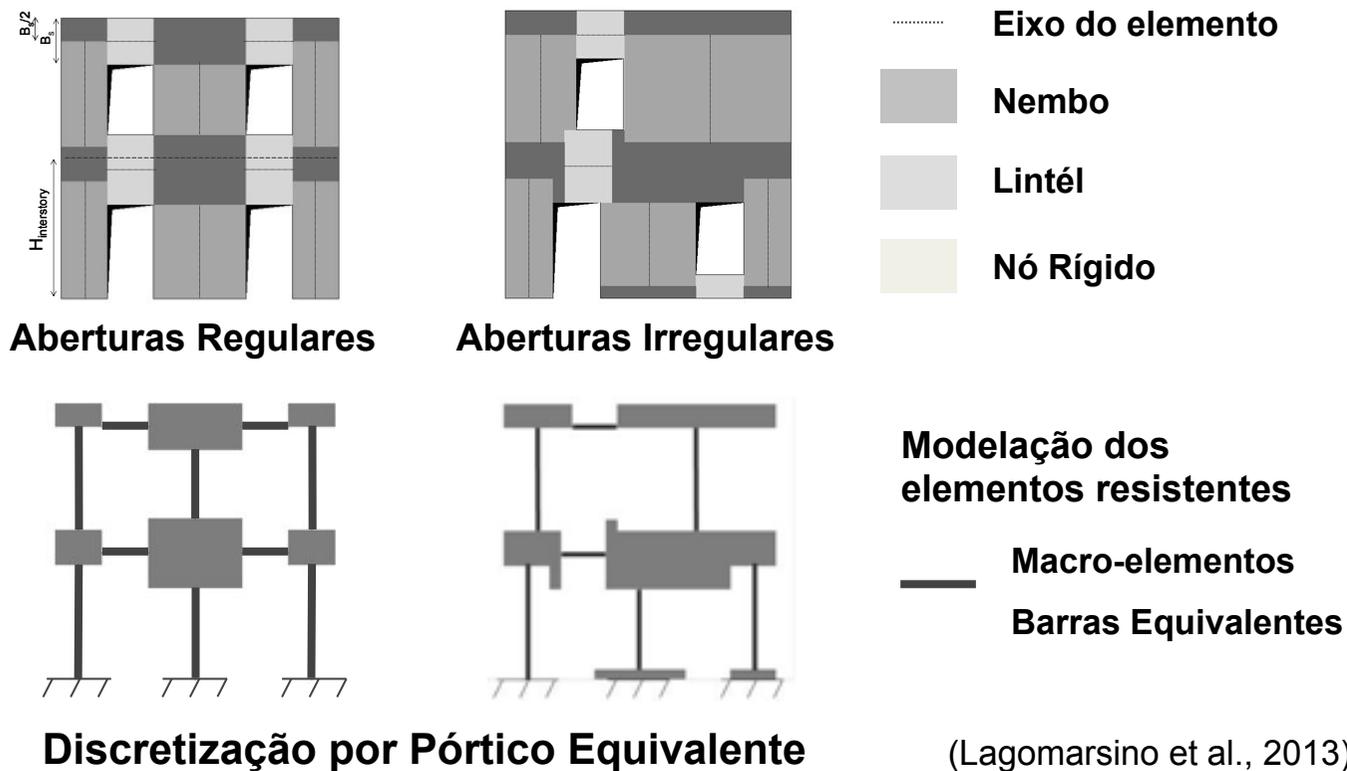


TÉCNICO  
LISBOA

## 2. Modelação do Comportamento Não Linear

A **geometria dos elementos** é definida através de critérios convencionais baseados na distribuição das aberturas e propagação de fendilhação (critério empírico – fendas a 30°) e calibrados através da observação de danos em edifícios e ensaios experimentais

(Dolce, 1989; Benedetti et al., 1998; Calvi e Magenes, 1994; Yi et al., 2006).





TÉCNICO  
LISBOA



### 3. Análises Estáticas Não Lineares

---

**Objectivo (i)** comparação entre a resultante das forças de inércia mobilizadas pelo sismo com a capacidade resistente resultante das reacções de corte nos nembos do piso – **Curva de Capacidade**



TÉCNICO  
LISBOA



### 3. Análises Estáticas Não Lineares

---

**Objectivo (i)** comparação entre a resultante das forças de inércia mobilizadas pelo sismo com a capacidade resistente resultante das reacções de corte nos nembos do piso – **Curva de Capacidade**

#### **Distribuição de Forças Horizontais (EC8)**

- **Uniforme:** proporcional à massa independentemente da altura (resposta de aceleração constante)
- **Modal:** proporcional à massa e ao deslocamento modal normalizado



TÉCNICO  
LISBOA

### 3. Análises Estáticas Não Lineares

---

**Objectivo (i)** comparação entre a resultante das forças de inércia mobilizadas pelo sismo com a capacidade resistente resultante das reacções de corte nos nembos do piso – **Curva de Capacidade**

#### **Distribuição de Forças Horizontais (EC8)**

- **Uniforme:** proporcional à massa independentemente da altura (resposta de aceleração constante)
- **Modal:** proporcional à massa e ao deslocamento modal normalizado



No caso de pisos flexíveis, a participação de massa nos primeiros modos é reduzida. Alternativa, distribuição **Pseudo-Triangular:** proporcional à massa e à altura.



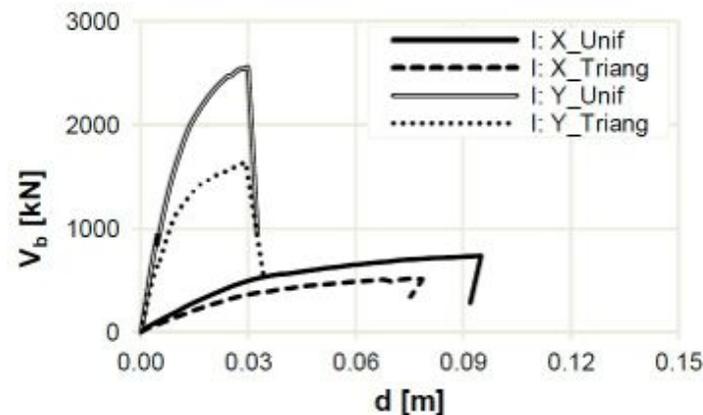
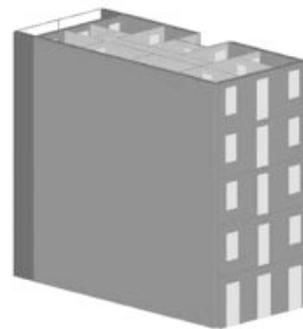
TÉCNICO  
LISBOA

### 3. Análises Estáticas Não Lineares

**Objectivo (i)** comparação entre a resultante das forças de inércia mobilizadas pelo sismo com a capacidade resistente resultante das reacções de corte nos nembos do piso – **Curva de Capacidade**

#### Distribuição de Forças Horizontais

- **Uniforme:** proporcional à massa independentemente da altura (resposta de aceleração constante)
- **Modal:** proporcional à massa e ao deslocamento modal normalizado
- **Pseudo-Triangular:** proporcional à massa e à altura





TÉCNICO  
LISBOA



### 3. Análises Estáticas Não Lineares

---

**Objectivo (i)** comparação entre a resultante das forças de inércia mobilizadas pelo sismo com a capacidade resistente resultante das reacções de corte nos nembos do piso – **Curva de Capacidade**

#### **Distribuição de Forças Horizontais**

- **Uniforme:** proporcional à massa independentemente da altura (resposta de aceleração constante)
- **Modal:** proporcional à massa e ao deslocamento modal normalizado
- **Pseudo-Triangular:** proporcional à massa e à altura

**Objectivo (ii)** comparação da capacidade de deformação da estrutura com a acção sísmica, em coordenadas espectrais, e determinação do **ponto de desempenho** da estrutura

- Método N2 (Fajfar e Fishinger, 1988)
- Método do Espectro de Capacidade Resistente (Freeman, 1998)

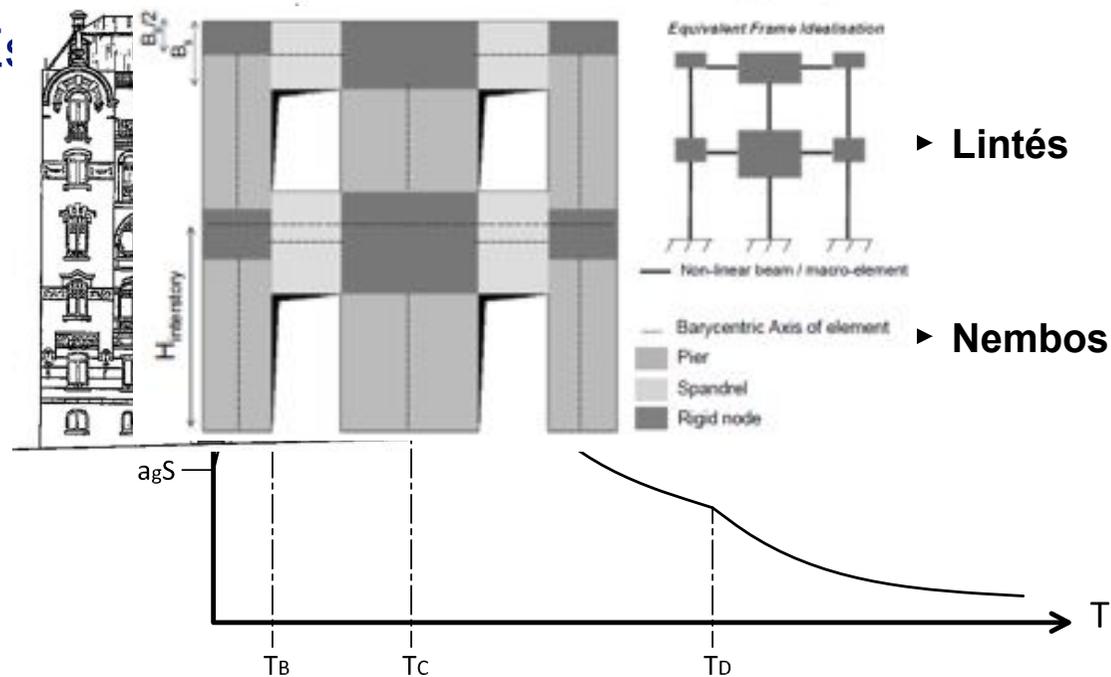
### 3. Análises Estáticas Não Lineares

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

- Passo1 – Dados

- a. Estrutura

- b. Es



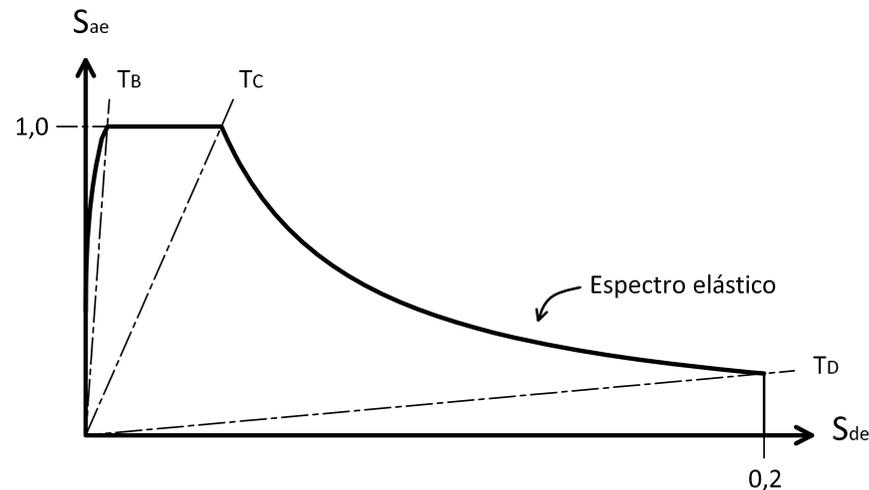


TÉCNICO  
LISBOA

### 3. Análises Estáticas Não Lineares

- **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

### 3. Análises Estáticas Não Lineares

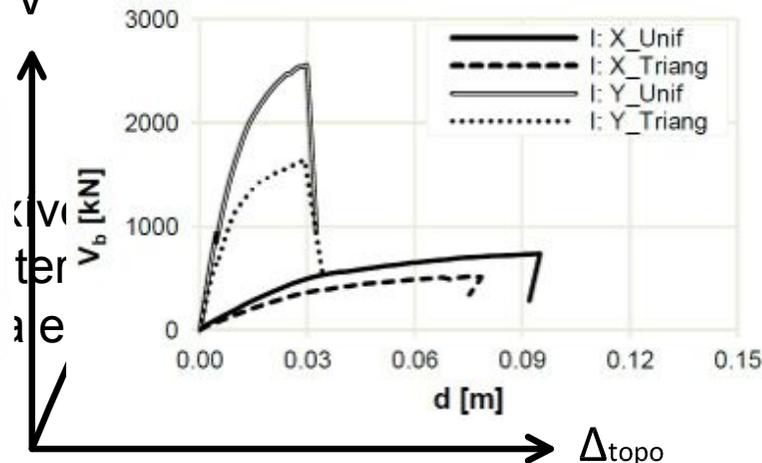
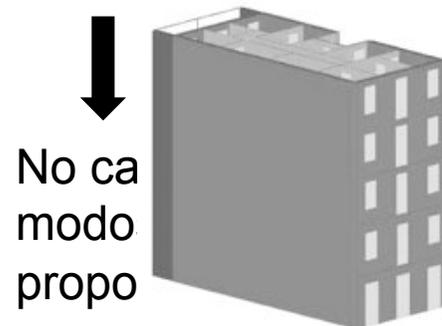
- **Descrição do método passo-a-passo:**

- 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. **Carregamentos Laterais (EC8):**  
Determinar a relação não linear Corte basal (V) - deslocamento de topo ( $\Delta_{topo}$ )  
Uniforme: proporcional à massa independentemente da altura (resposta de aceleração uniforme).

- Modal: proporcional à massa e ao modo fundamental.



primeiros  
ular:



TÉCNICO  
LISBOA

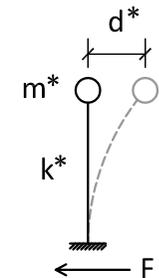
### 3. Análises Estáticas Não Lineares

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

- Passo 4 – Sistema 1 GL equivalente

Conversão

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



$$m^* = \sum_i m_i \phi_i$$
$$\Gamma = \frac{m^*}{\sum_i m_i \phi_i^2} = \frac{m^*}{\sum_i m_i \phi_{i,4_{topo}}^2}$$
$$F^* = \frac{F}{\Gamma} \quad d^* = \frac{d}{\Gamma}$$



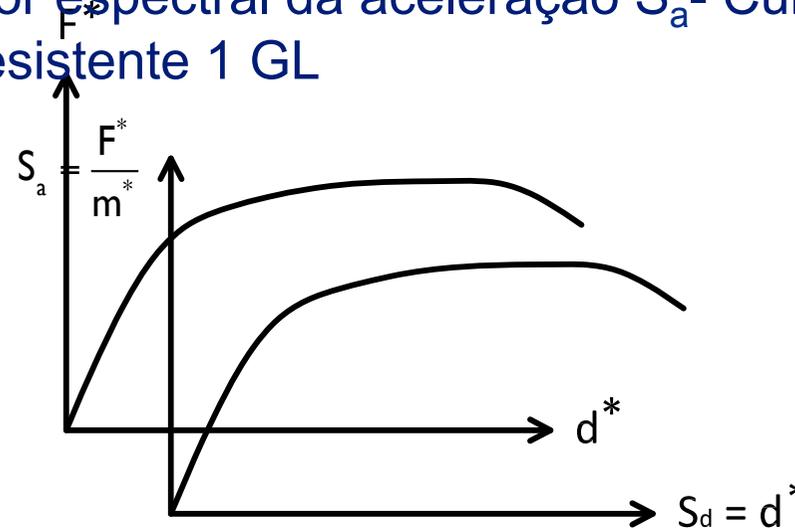
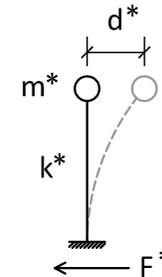
### 3. Análises Estáticas Não Lineares

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

- Passo 4 – Sistema 1 GL equivalente

Conversão

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





TÉCNICO  
LISBOA

### 3. Análises Estáticas Não Lineares

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

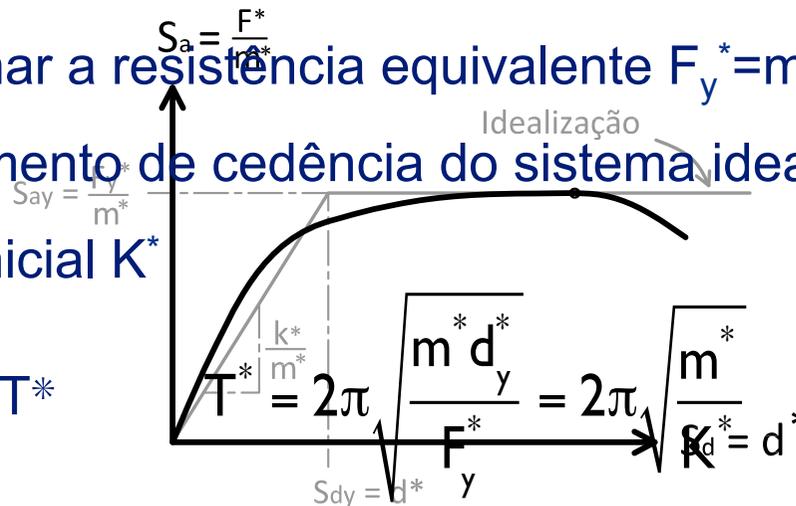
- Passo 4 – Sistema 1 GL equivalente

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  $T^*$





TÉCNICO  
LISBOA

### 3. Análises Estáticas Não Lineares

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

- Passo 5 – Desempenho sísmico do sistema 1 GL equivalente

Definir o desempenho sísmico  $d_t^*$

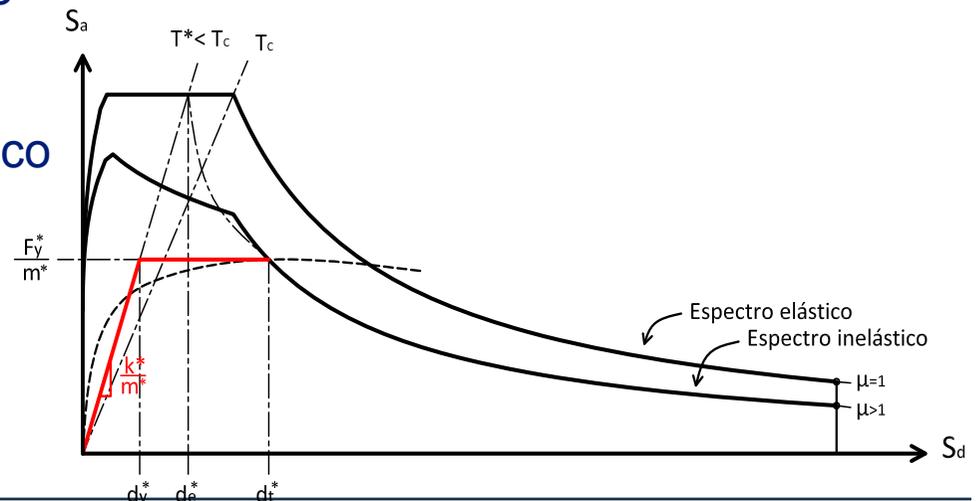
- Períodos baixos  $T^* < T_c$

- Comportamento elástico

$$d_t^* = d_e^*$$

- Comportamento inelástico

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

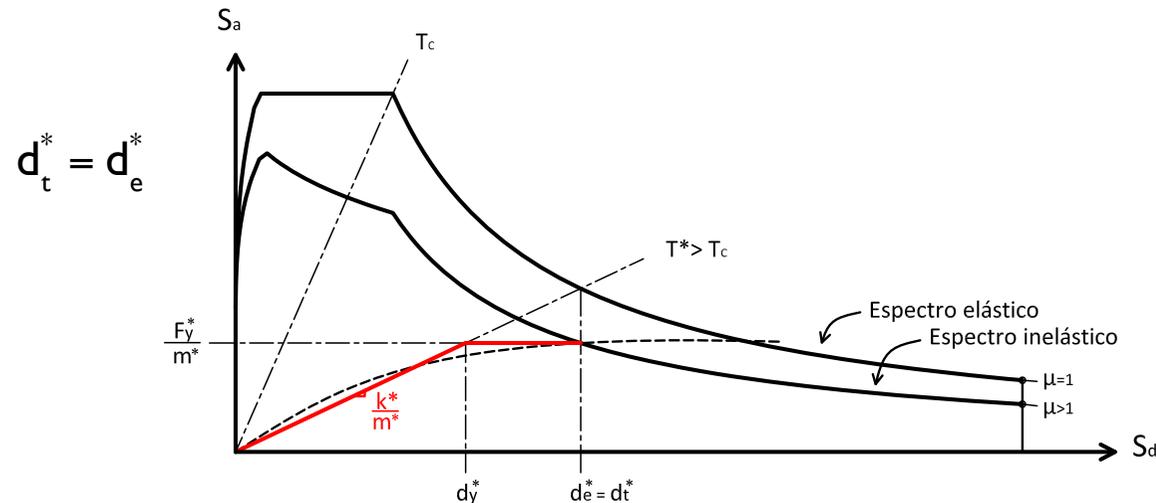




TÉCNICO  
LISBOA

### 3. Análises Estáticas Não Lineares

- **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  $T^* > T_c$

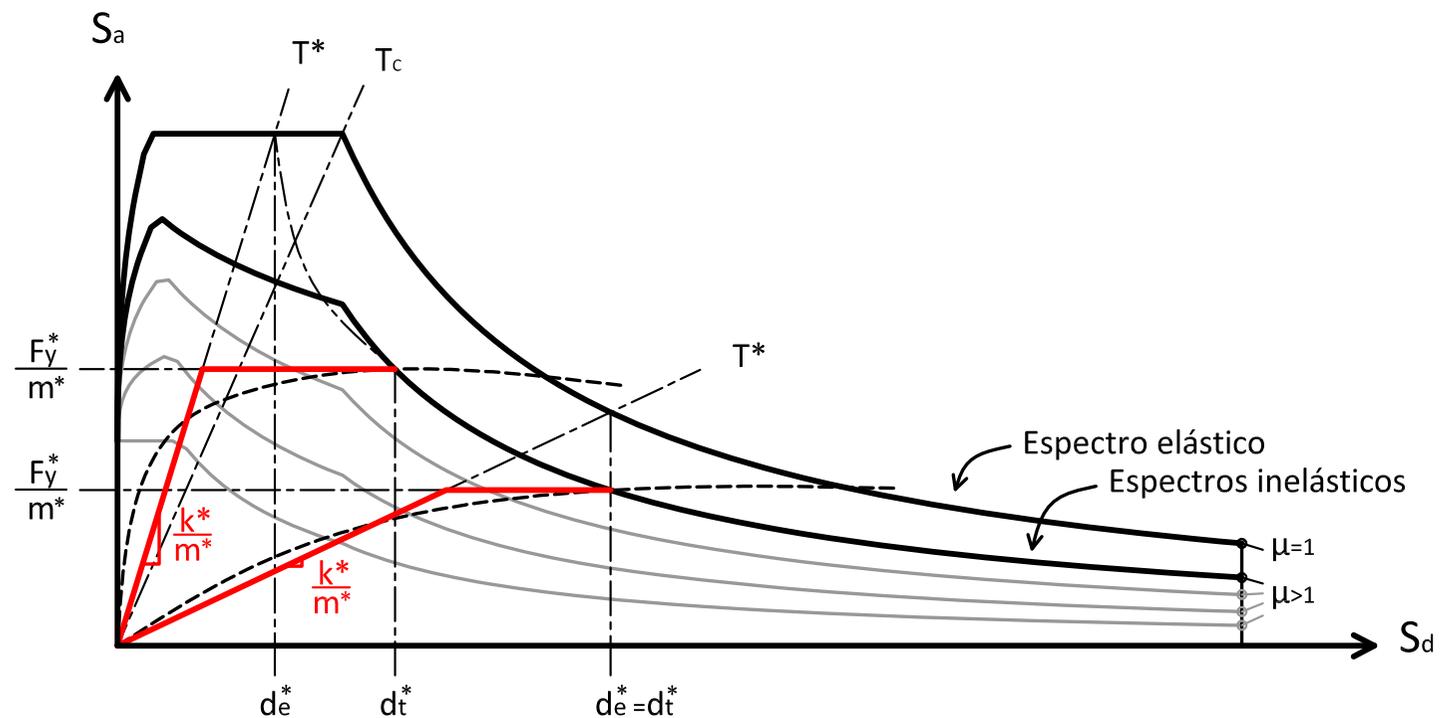




TÉCNICO  
LISBOA

### 3. Análises Estáticas Não Lineares

- **Descrição do método passo-a-passo:**
  - Passo 5 – Desempenho sísmico do sistema 1 GL equivalente





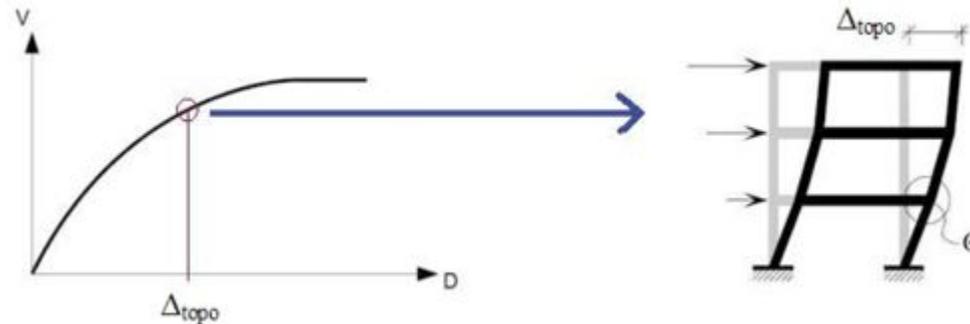
TÉCNICO  
LISBOA

### 3. Análises Estáticas Não Lineares

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

Deslocamento de topo

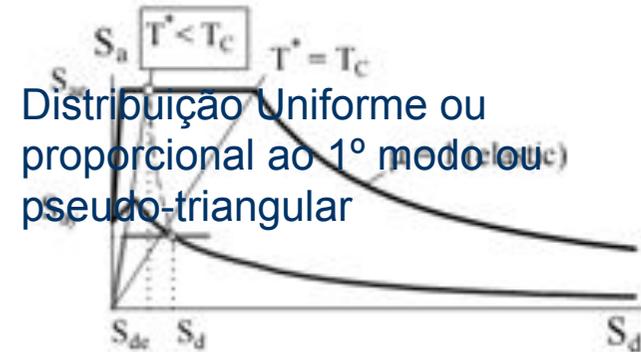
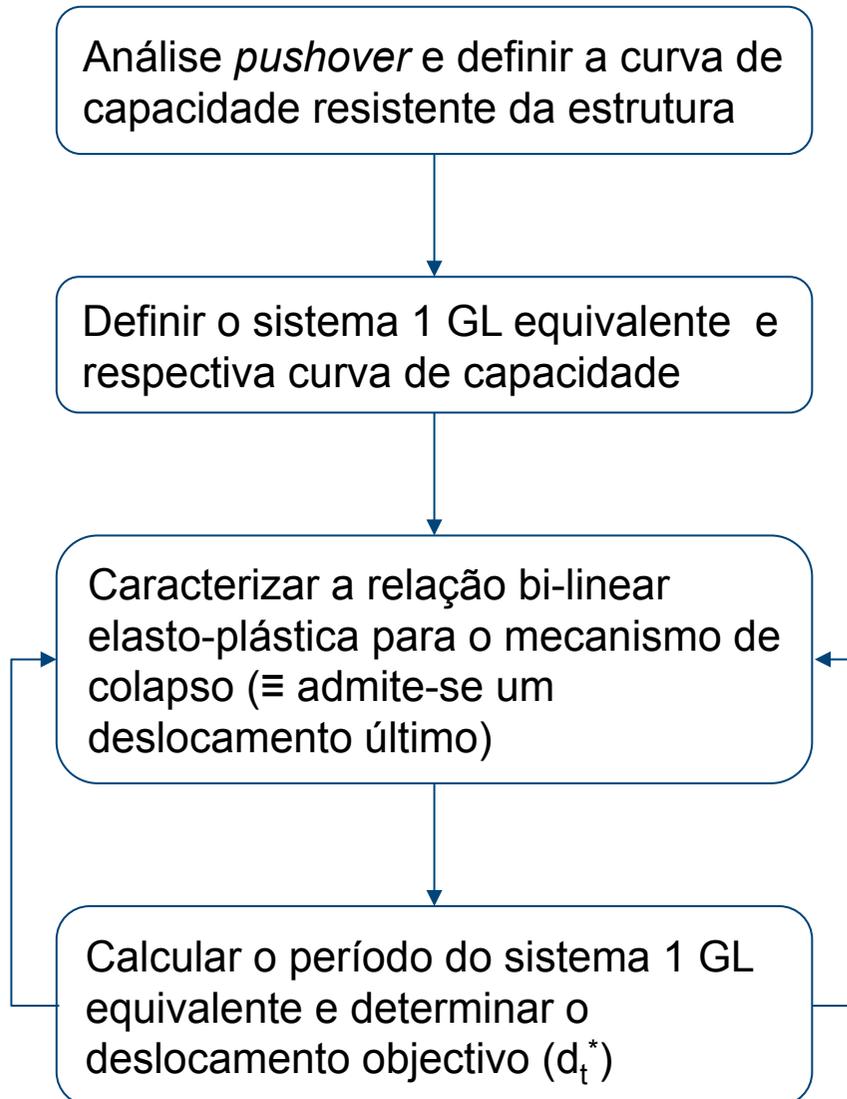
$$\Delta_{\text{topo}} = \Gamma d_t^*$$



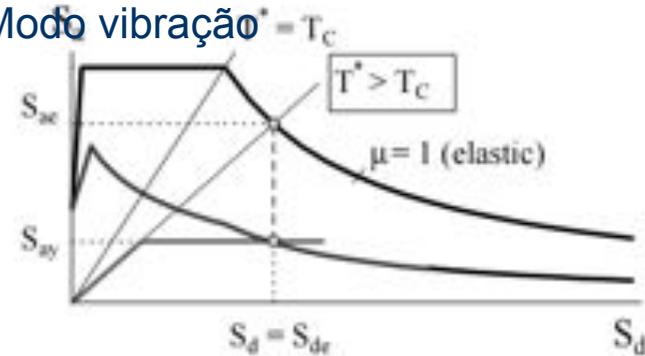


### 3. Análises Estáticas Não Lineares

#### Método N2



Parâmetros função do 1º Modo vibração



(EC8, 2004)

#### Procedimento iterativo opcional

se  $d_t^*$  é muito diferente do valor admitido na bi-linearização



TÉCNICO  
LISBOA

## 3. Análises Estáticas Não Lineares

NP  
EN 1998-1  
2010

p. 192 de 230

### Anexo B (informativo)

#### Determinação do deslocamento-alvo para a análise estática não linear (*pushover*)

##### B.1 Generalidades

O deslocamento-alvo é determinado a partir do espectro de resposta elástica (ver 3.2.2.2). A curva de capacidade, que representa a relação entre a força de corte na base e o deslocamento do nó de controlo, é determinada de acordo com 4.3.3.4.2.3.

Admite-se a seguinte relação entre as forças laterais normalizadas  $\bar{F}_i$  e os deslocamentos normalizados  $\Phi_i$ :

$$\bar{F}_i = m_i \Phi_i \quad (\text{B.1})$$

em que  $m_i$  é a massa do piso  $i$ .

Os deslocamentos são normalizados de tal forma que  $\Phi_n = 1$ , em que  $n$  é o nó de controlo (normalmente  $n$  representa o nível da cobertura). Em consequência, é  $\bar{F}_n = m_n$ .



TÉCNICO  
LISBOA

### 3. Análises Estáticas Não Lineares

#### B.2 Transformação num sistema equivalente de um só grau de liberdade

A massa de um sistema equivalente com um só grau de liberdade,  $m^*$ , é calculada como:

$$m^* = \sum m_i \phi_i^2 = \sum \bar{F}_i \quad (\text{B.2})$$

e o coeficiente de transformação é obtido por:

$$\Gamma = \frac{m^*}{\sum m_i \phi_i^2} = \frac{\sum \bar{F}_i}{\sum \left( \frac{F_i^2}{m_i} \right)} \quad (\text{B.3})$$

A força  $F^*$  e o deslocamento  $d^*$  do sistema equivalente com um só grau de liberdade são calculados por:

$$F^* = \frac{F_b}{\Gamma} \quad (\text{B.4})$$

$$d^* = \frac{d_n}{\Gamma} \quad (\text{B.5})$$

em que  $F_b$  e  $d_n$  são, respectivamente, a força de corte na base e o deslocamento do nó de controlo do sistema com vários graus de liberdade.

### 3. Análises Estáticas Não Lineares

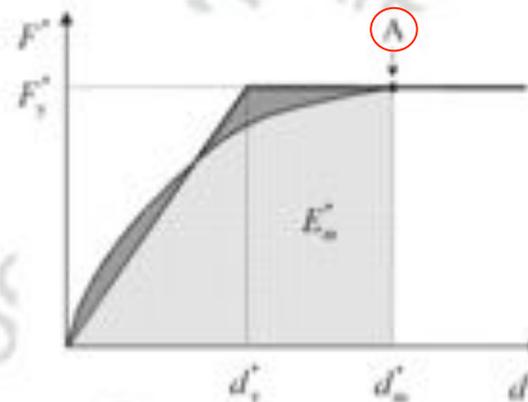
#### B.3 Determinação da relação idealizada força/deslocamento elasto-perfeitamente plástica

A força de cedência  $F_y^*$ , que representa, também, a resistência última do sistema idealizado, é igual à força de corte na base para formação do mecanismo plástico. A rigidez inicial do sistema idealizado é determinada de tal forma que sejam iguais as áreas sob as curvas força/deformação reais e idealizadas (ver a Figura B.1).

Com base nesta hipótese, o deslocamento no limite de plasticidade do sistema idealizado com um só grau de liberdade  $d_y^*$  é obtido por:

$$d_y^* = 2 \left( d_m^* - \frac{E_m^*}{F_y^*} \right) \quad (B.6)$$

em que  $E_m^*$  é a energia de deformação real até à formação do mecanismo plástico.



Legenda:

A mecanismo plástico

Figura B.1 – Determinação da relação idealizada força/deslocamento elasto-perfeitamente plástica



TÉCNICO  
LISBOA

### 3. Análises Estáticas Não Lineares

#### B.4 Determinação do período do sistema idealizado equivalente com um só grau de liberdade

O período  $T^*$  do sistema idealizado equivalente com um só grau de liberdade é determinado por:

$$T^* = 2\pi \sqrt{\frac{m^* d_y^*}{F_y^*}} \quad (\text{B.7})$$

#### B.5 Determinação do deslocamento-alvo para o sistema equivalente com um só grau de liberdade

O deslocamento-alvo da estrutura com um período  $T^*$  e um comportamento elástico ilimitado é obtido por:

$$d_{et}^* = S_c(T^*) \left[ \frac{T^*}{2\pi} \right]^2 \quad (\text{B.8})$$

em que  $S_c(T^*)$  é o valor do espectro de resposta elástica de aceleração para o período  $T^*$ .

Para a determinação do deslocamento-alvo,  $d_i^*$ , para as estruturas de baixo período e para estruturas com períodos médios ou longos, deverão utilizar-se diferentes expressões, como se indica a seguir. O período de transição entre os domínios dos períodos curtos e médios é  $T_c$  (ver a Figura 3.1 e os Quadros 3.2 e 3.3).



### 3. Análises Estáticas Não Lineares

a)  $T^* < T_C$  (períodos curtos)

Se  $F_y^* / m^* \geq S_e(T^*)$ , a resposta é elástica e, portanto:

$$d_t^* = d_{el}^* \quad (B.9)$$

Se  $F_y^* / m^* < S_e(T^*)$ , a resposta é não linear e:

$$d_t^* = \frac{d_{el}^*}{q_u} \left( 1 + (q_u - 1) \frac{T_C}{T^*} \right) \geq d_{el}^* \quad (B.10)$$

em que  $q_u$  é a relação entre a aceleração na estrutura com comportamento elástico ilimitado  $S_e(T^*)$  e na estrutura com resistência limitada  $F_y^* / m^*$ .

$$q_u = \frac{S_e(T^*) m^*}{F_y^*} \quad (B.11)$$

Não é necessário tomar  $d_t^*$  com valor superior a  $3 d_{el}^*$ .

### 3. Análises Estáticas Não Lineares

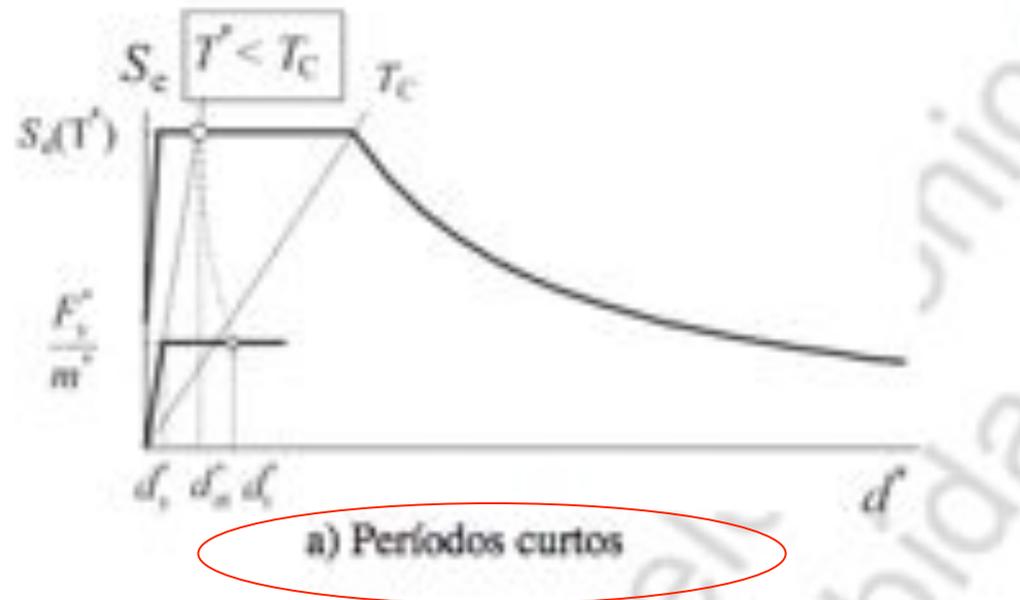


Figura B.2 – Determinação do deslocamento-alvo para o sistema equivalente com um só grau de liberdade



TÉCNICO  
LISBOA

### 3. Análises Estáticas Não Lineares

---

b)  $T^* \geq T_C$  (períodos médios e longos)

$$d_i^* = d_{et}^*$$

(B.12)

A relação entre as diferentes grandezas pode ser visualizada nas Figuras B.2 a) e b). As figuras são representadas no sistema de eixos aceleração – deslocamento. O período  $T^*$  é representado pela linha radial desde a origem do sistema de coordenadas até ao ponto do espectro de resposta elástica definido pelas coordenadas  $d_{et}^* = S_e(T^*)(T^*/2\pi)^2$  e  $S_e(T^*)$ .

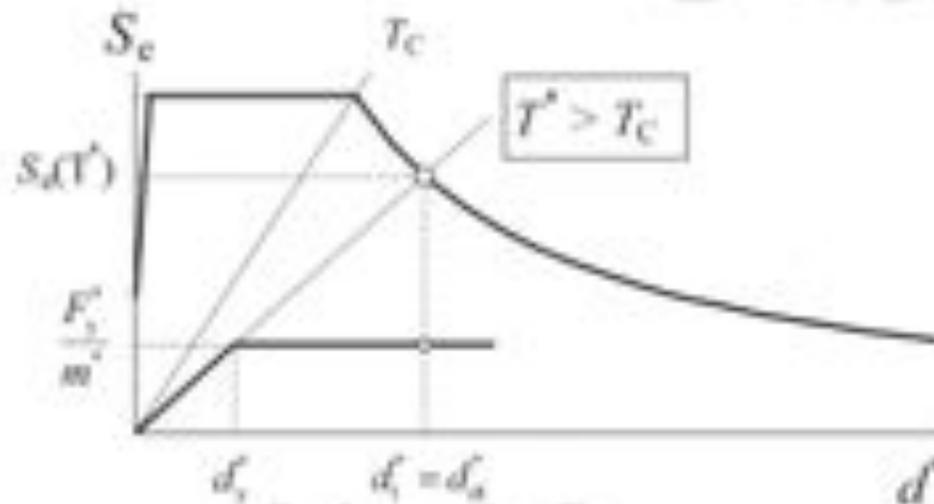
#### Procedimento iterativo (facultativo)

Se o deslocamento-alvo  $d_i^*$  determinado no 4º passo (ver B.5) for muito diferente do deslocamento  $d_m^*$  (ver a Figura B.1) utilizado para a determinação da relação idealizada força/deslocamento elasto-perfeitamente plástica no 2º passo (ver B.3), poderá aplicar-se um processo iterativo, no qual os passos 2 a 4 são repetidos utilizando no 2º passo  $d_i^*$  (e o correspondente valor de  $F_y^*$ ) em vez de  $d_m^*$ .



TÉCNICO  
LISBOA

### 3. Análises Estáticas Não Lineares



b) Períodos médios e longos

Figura B.2 – Determinação do deslocamento-alvo para o sistema equivalente com um só grau de liberdade



TÉCNICO  
LISBOA

### 3. Análises Estáticas Não Lineares

---

#### B.6 Determinação do deslocamento-alvo para o sistema com vários graus de liberdade

O deslocamento-alvo do sistema com vários graus de liberdade é obtido por:

$$d_i = \Gamma d_i^*$$

(B.13)

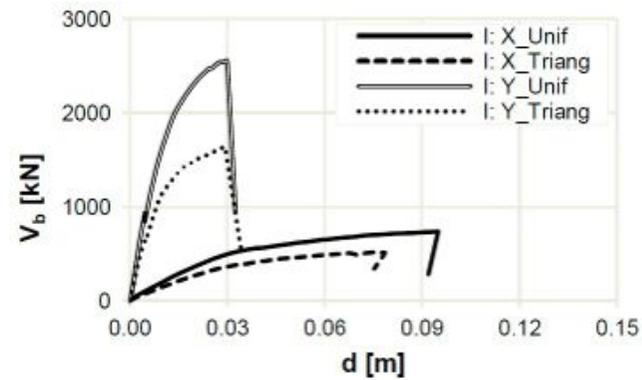
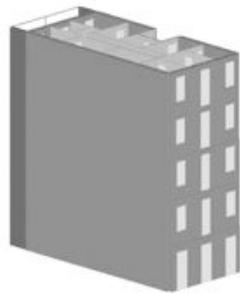
O deslocamento-alvo corresponde ao nó de controlo.



TÉCNICO  
LISBOA

## 4. Verificação de Segurança

### Estado Limite Último

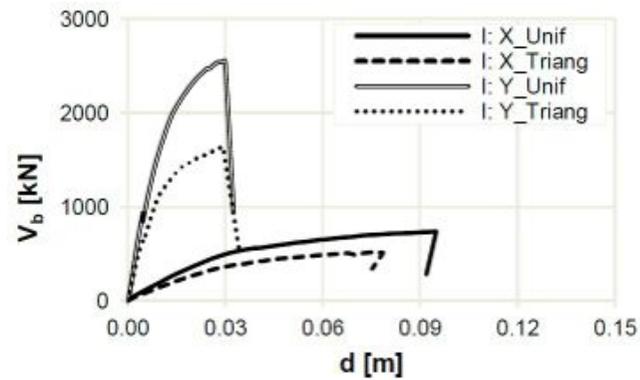
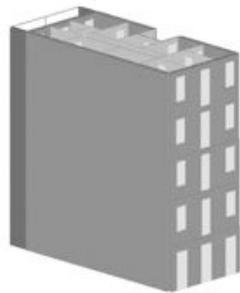




TÉCNICO  
LISBOA

## 4. Verificação de Segurança

### Estado Limite Último



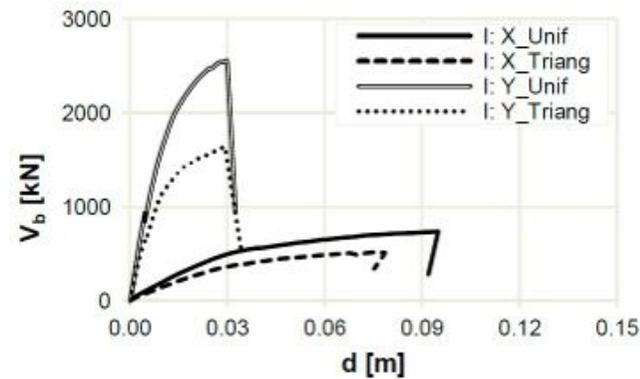
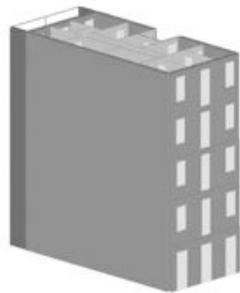
$$d_u \rightarrow 0.8 V_{b,max}$$



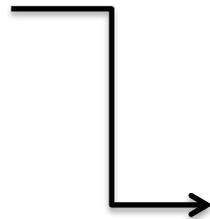
TÉCNICO  
LISBOA

## 4. Verificação de Segurança

### Estado Limite Último



$$d_u \rightarrow 0.8 V_{b,max}$$



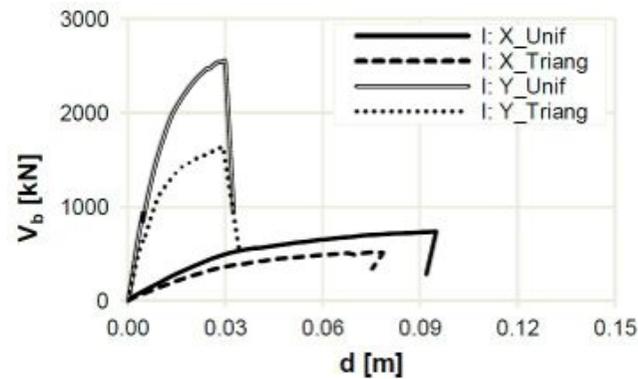
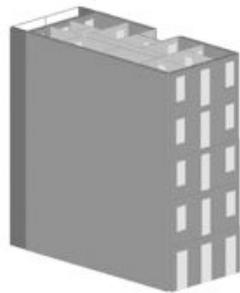
Direcção X



TÉCNICO  
LISBOA

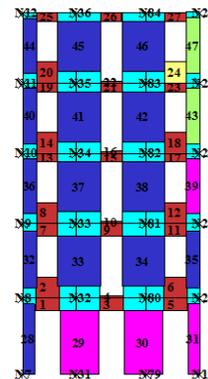
## 4. Verificação de Segurança

### Estado Limite Último

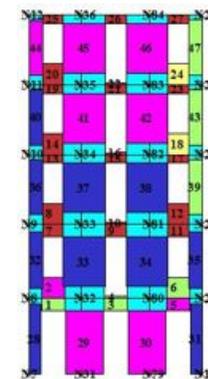


$$d_u \rightarrow 0.8 V_{b,max}$$

Direcção X



Uniforme



Triangular

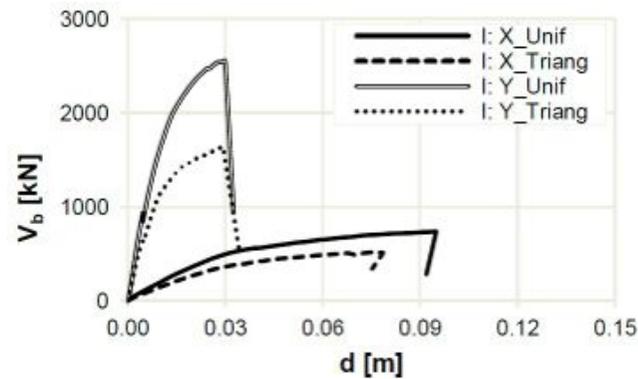
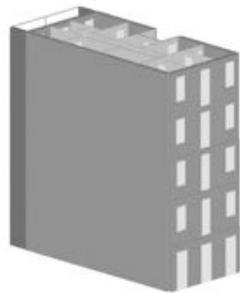
- Rigid node
- Elastic phase
- Shear plastic phase
- Flexural plastic phase
- Shear failure
- Flexural failure
- Non-reactive element



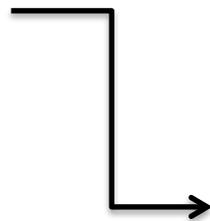
TÉCNICO  
LISBOA

## 4. Verificação de Segurança

### Estado Limite Último



$$d_u \rightarrow 0.8 V_{b,max}$$



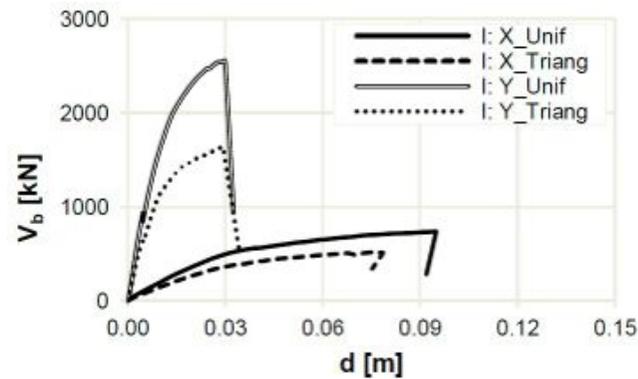
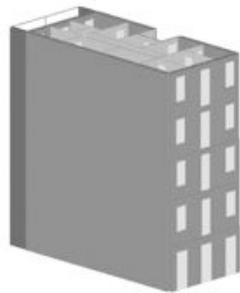
Direcção Y



TÉCNICO  
LISBOA

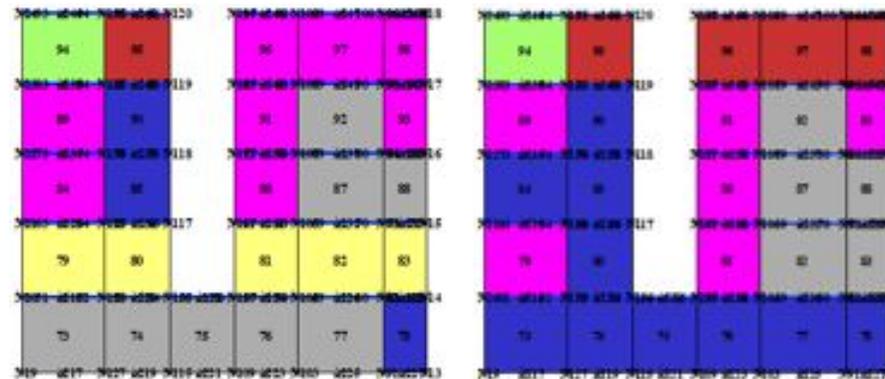
## 4. Verificação de Segurança

### Estado Limite Último



$$d_u \rightarrow 0.8 V_{b,max}$$

Direcção Y



Uniforme

Triangular

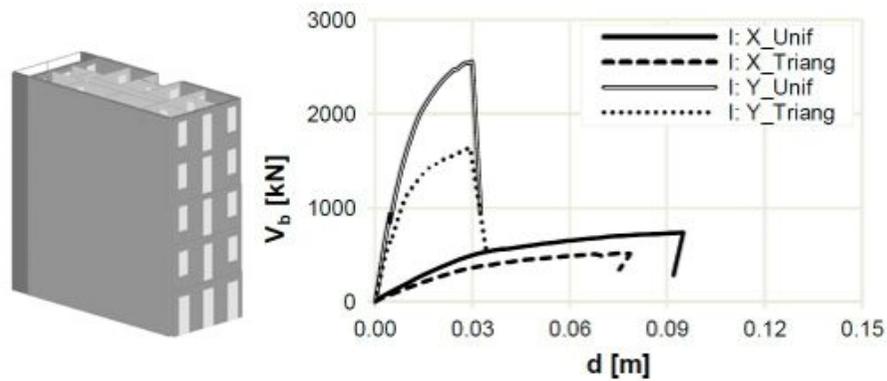
- Rigid node
- Elastic phase
- Shear plastic phase
- Flexural plastic phase
- Shear failure
- Flexural failure
- Non-reactive element



TÉCNICO  
LISBOA

## 4. Verificação de Segurança

### Estado Limite Último



$$d_u \geq d_{\max}$$

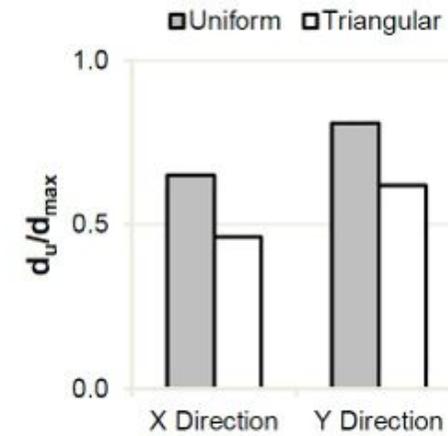
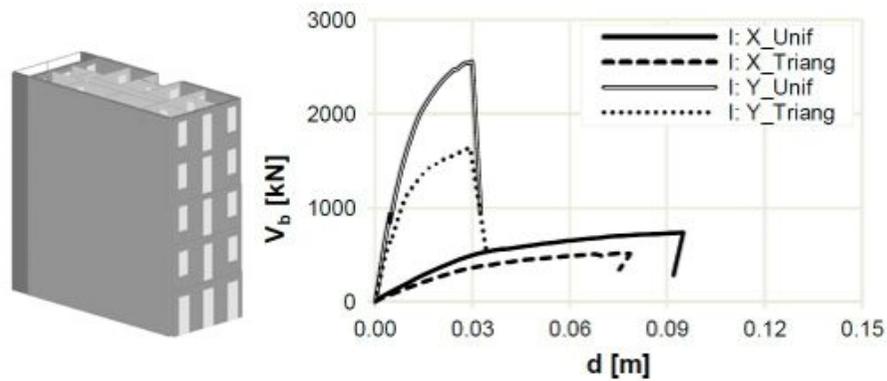
$$q^* < 3$$



TÉCNICO  
LISBOA

## 4. Verificação de Segurança

### Estado Limite Último



$$d_u \geq d_{max}$$

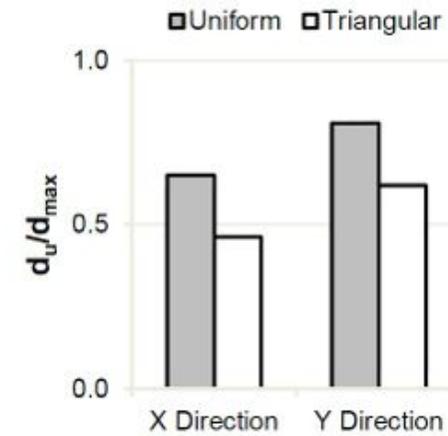
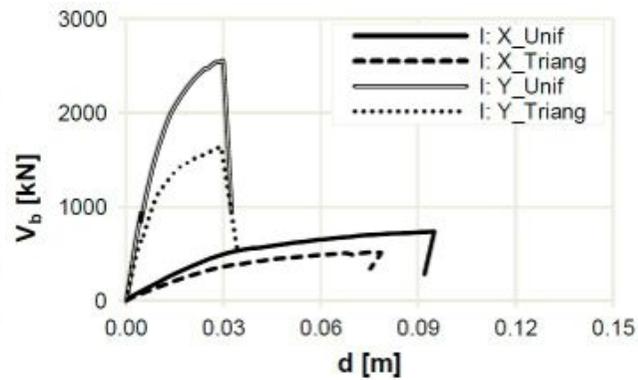
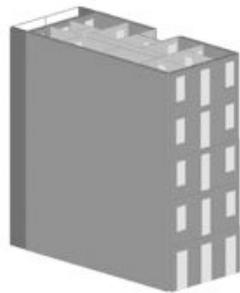
$$q^* < 3$$



TÉCNICO  
LISBOA

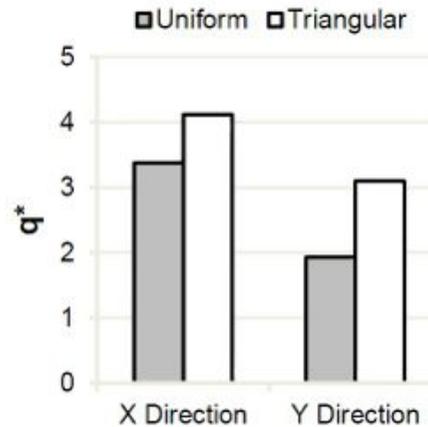
## 4. Verificação de Segurança

### Estado Limite Último



$$d_u \geq d_{max}$$

$$q^* < 3$$

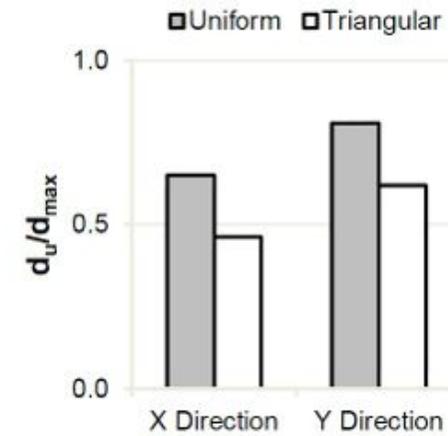
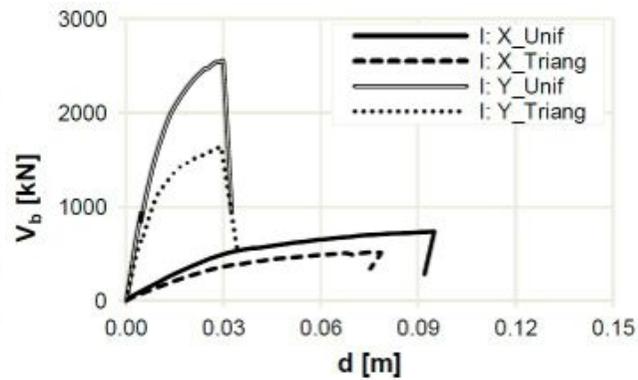
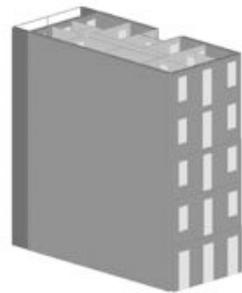




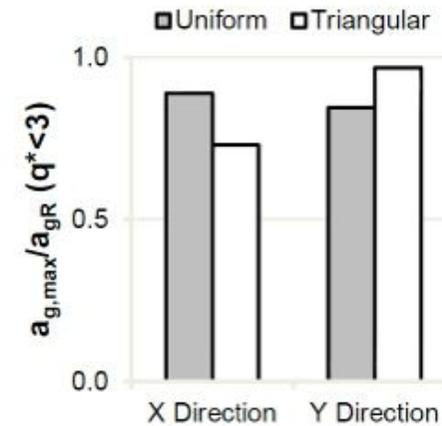
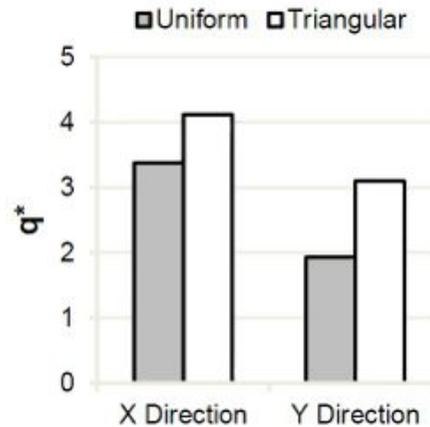
TÉCNICO  
LISBOA

## 4. Verificação de Segurança

### Estado Limite Último



$$d_u \geq d_{max}$$
$$q^* < 3$$

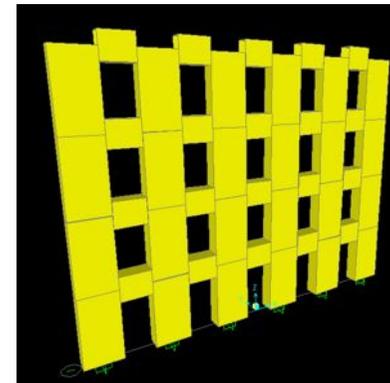
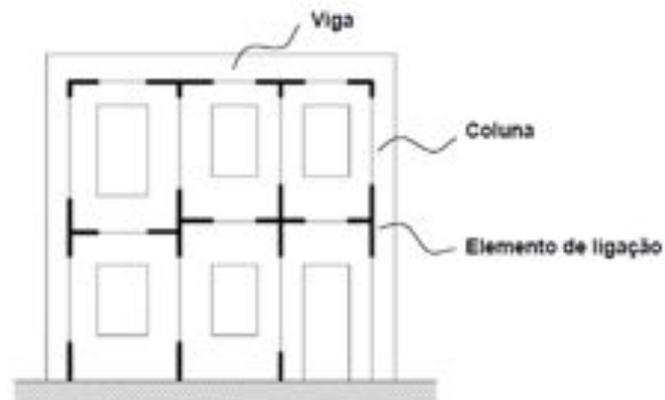




TÉCNICO  
LISBOA

## 5. Exemplos de Aplicação

### 5.1. Modelação e Análise Estática Não Linear de uma Parede de Alvenaria com o *software* SAP2000





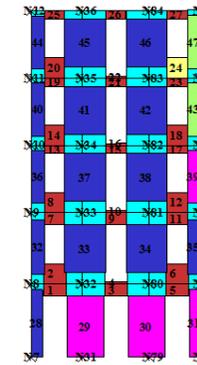
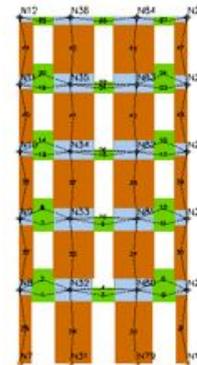
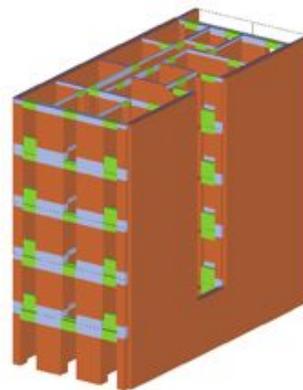
TÉCNICO  
LISBOA

## 5. Exemplos de Aplicação

5.1. Modelação e *Análise Estática Não Linear* de uma Parede de Alvenaria com o software SAP2000

5.2. Apresentação do software Tremuri

**3muri**





TÉCNICO  
LISBOA

## 5. Exemplos de Aplicação

---

### 5.1. Modelação e Análise Estática Não Linear de uma Parede de Alvenaria com o *software* SAP2000

### 5.2. Apresentação do *software* Tremuri

- Definição da Geometria
- Definição do Material
- Comportamento Não Linear
- Análise Estática Não Linear
- Verificação de Segurança

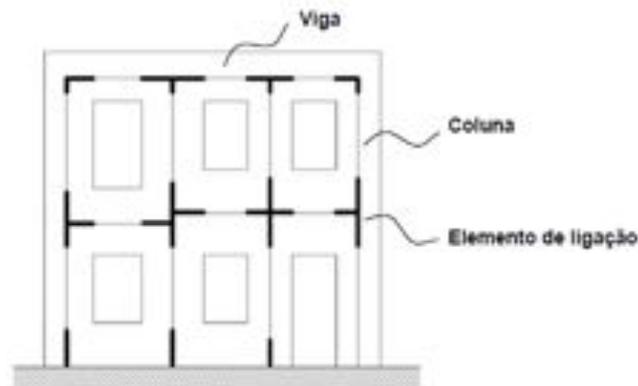


TÉCNICO  
LISBOA

## 5.1. Exemplo de Aplicação – SAP2000

### Objectivos:

1. Modelação de uma parede de alvenaria através de um **pórtico equivalente** constituído por colunas e vigas definidas por elementos de barra susceptíveis de deformações de corte e flexão.
2. Definição do comportamento não linear da alvenaria através de rótulas plásticas (*plastic hinges*).
3. Determinação das curvas de capacidade da estrutura.





TÉCNICO  
LISBOA

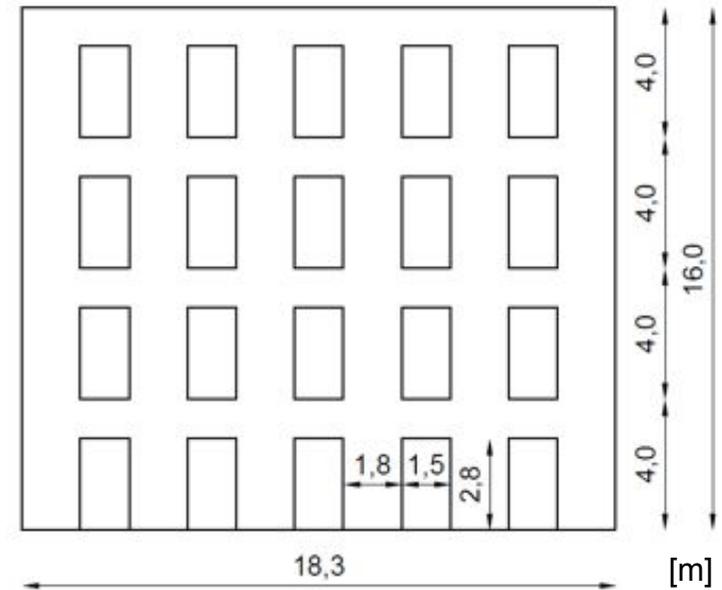
# 1. Definição da Geometria



Pombalino



Gaioleiro





TÉCNICO  
LISBOA

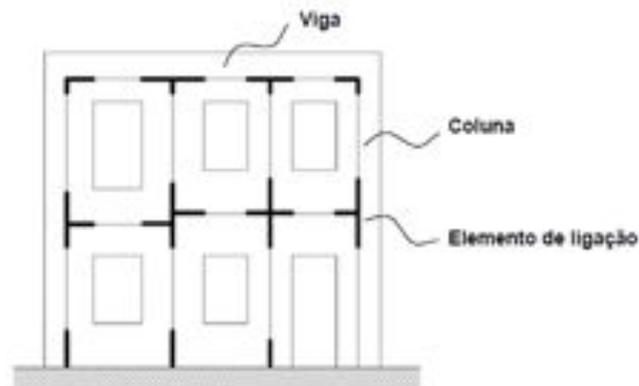
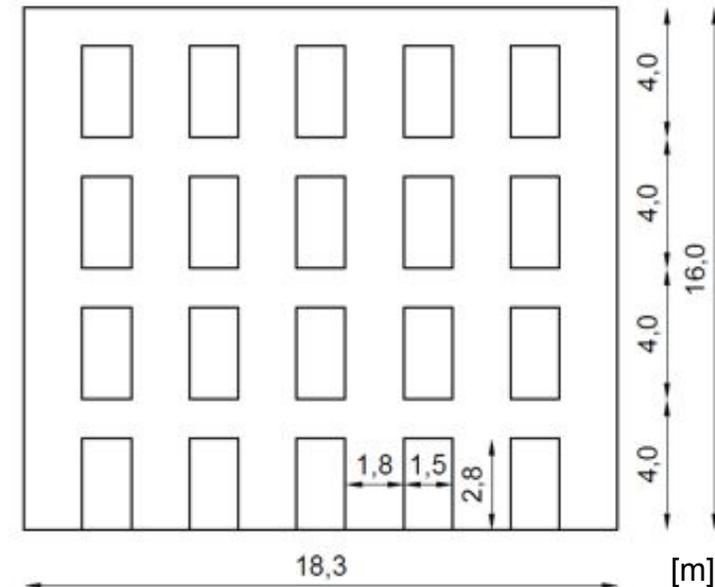
# 1. Definição da Geometria



Pombalino



Gaioleiro



A parede é modelada através de um pórtico equivalente onde cada nêmo e lintél de alvenaria é definido através de um macro-elemento (elemento de barra).

O modelo fica definido por conjunto de **colunas** e **vigas**, ligadas entre si através de **elementos de ligação rígidos**.



TÉCNICO  
LISBOA

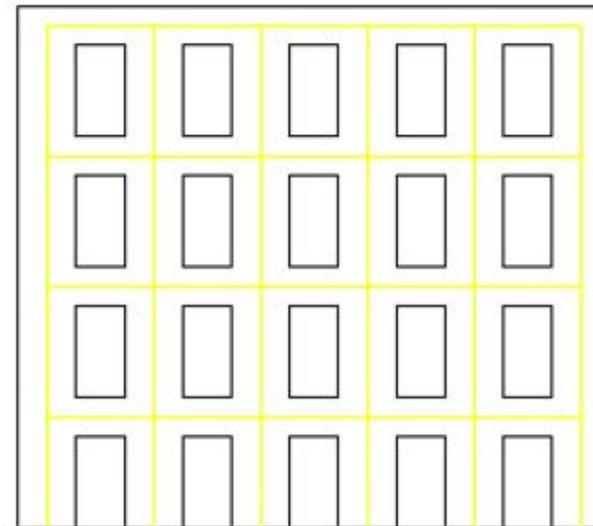
# 1. Definição da Geometria



Pombalino



Gaioleiro



Pórtico Equivalente



TÉCNICO  
LISBOA

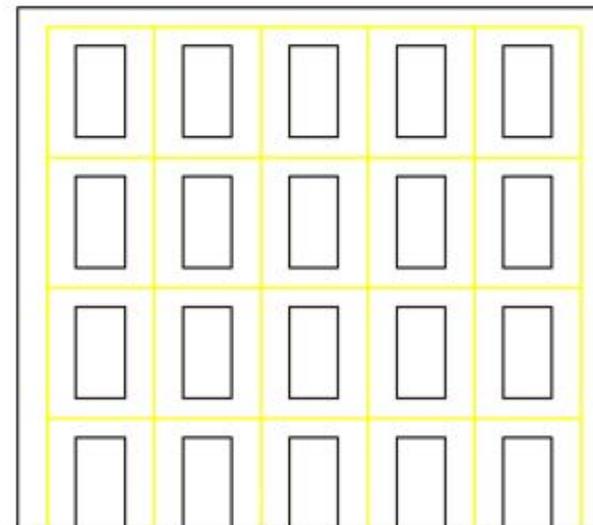
# 1. Definição da Geometria



Pombalino

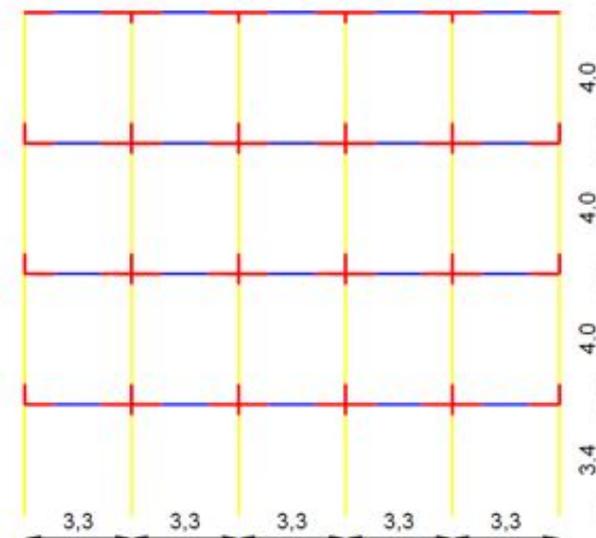


Gaioleiro



Pórtico Equivalente

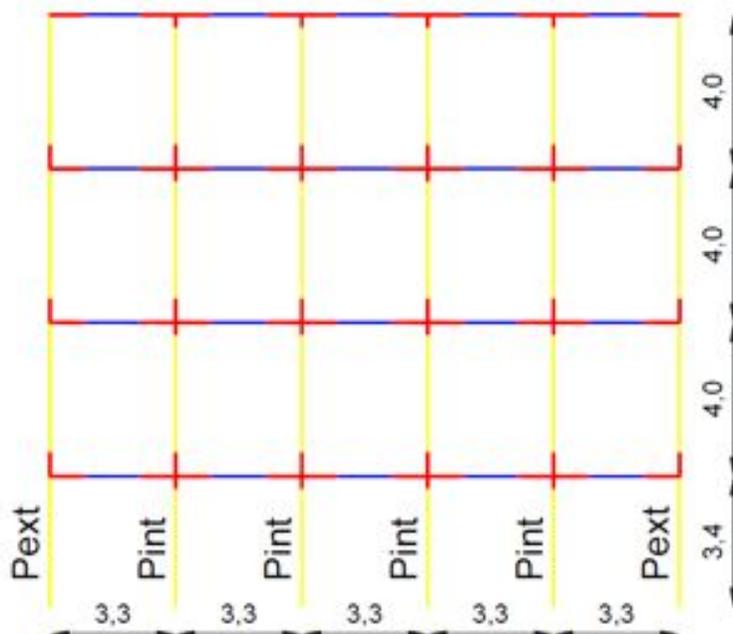
-  Colunas (*Piers*)
-  Vigas (*Spandrels*)
-  Nós Rígidos (*Rigid Nodes*)



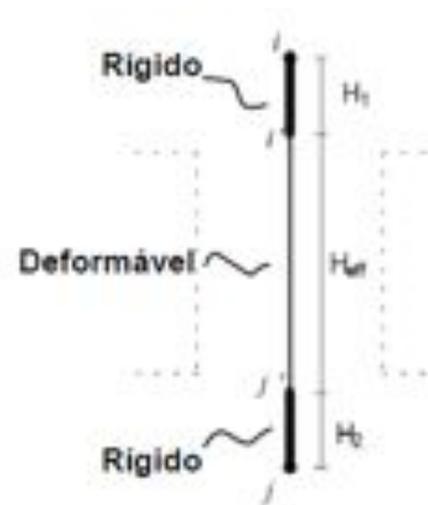


TÉCNICO  
LISBOA

# 1. Definição da Geometria



— Colunas (*Piers*)



Colunas	D (m)	H (m)	h' (m)	H <sub>eff</sub> (m)
P <sub>ext</sub>	1,80	4,00	3,30	3,40
P <sub>int</sub>	1,80	4,00	2,80	3,10

H<sub>eff</sub> – Altura Deformável

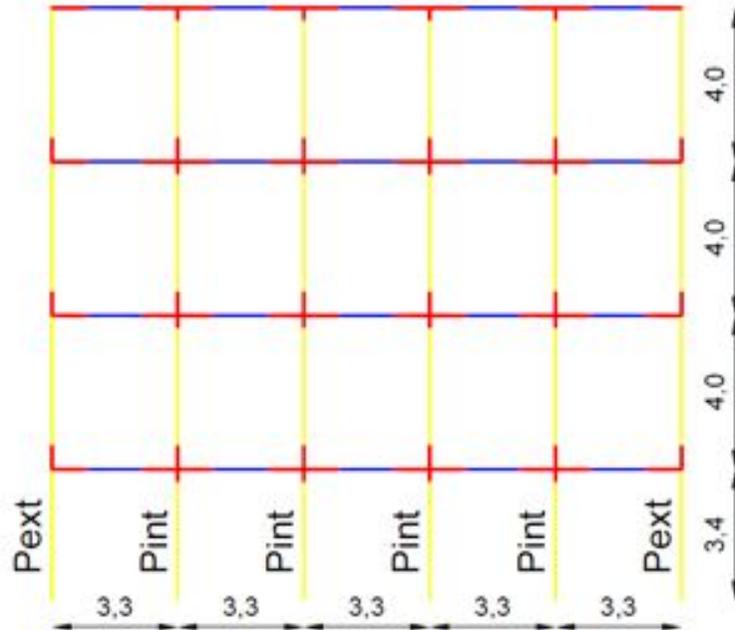
H1 e H2 – Altura Rígida (ligação)

Vigas	h (m)	L (m)	L <sub>eff</sub> (m)
	1,20	3,30	1,50

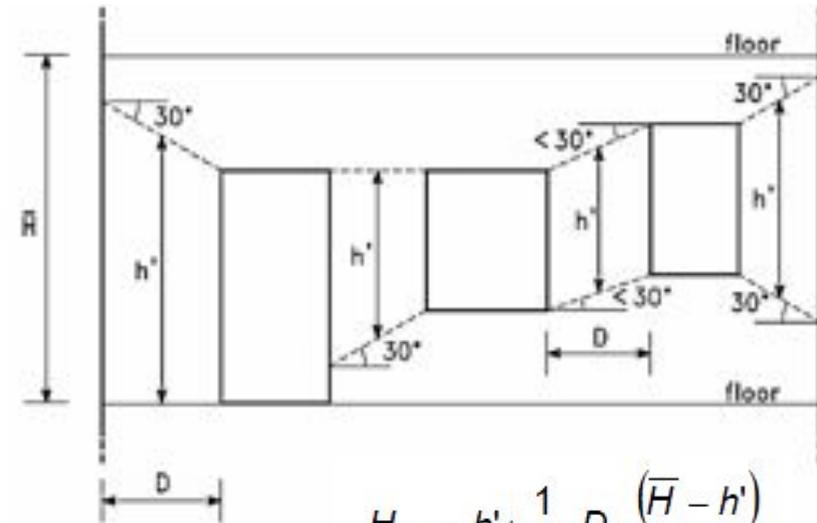


TÉCNICO  
LISBOA

# 1. Definição da Geometria



## Colunas (Piers)



$$H_{eff} = h' + \frac{1}{3} \cdot D \cdot \frac{(H - h')}{h'}$$

Colunas	D (m)	H (m)	h' (m)	H <sub>eff</sub> (m)
P <sub>ext</sub>	1,80	4,00	3,30	3,40
P <sub>int</sub>	1,80	4,00	2,80	3,10

Vigas	h (m)	L (m)	L <sub>eff</sub> (m)
	1,20	3,30	1,50

H<sub>eff</sub> – Altura eficaz

h' – Altura resultante das relações geométricas

H – Altura entre pisos

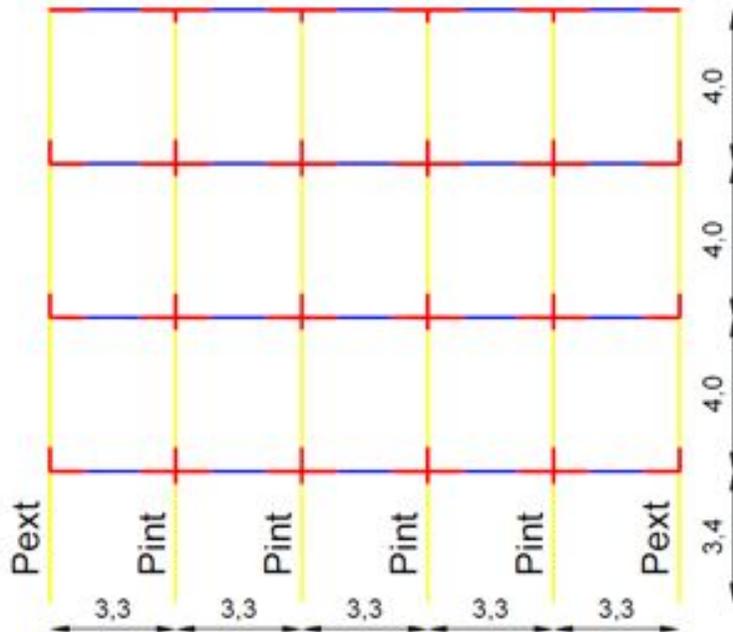
D – Largura da coluna

(Dolce, 1989)



TÉCNICO  
LISBOA

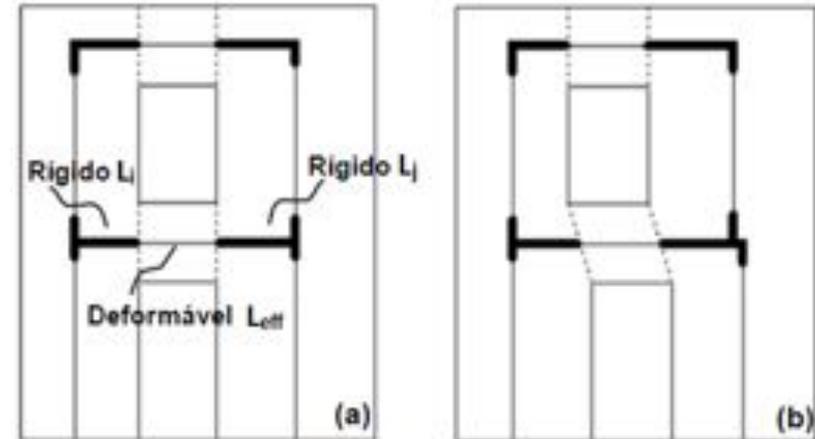
# 1. Definição da Geometria



Colunas	D (m)	H (m)	h' (m)	H <sub>eff</sub> (m)
P <sub>ext</sub>	1,80	4,00	3,30	3,40
P <sub>int</sub>	1,80	4,00	2,80	3,10

Vigas	h (m)	L (m)	L <sub>eff</sub> (m)
	1,20	3,30	1,50

— Vigas (Spandrels)



(a) Aberturas alinhadas

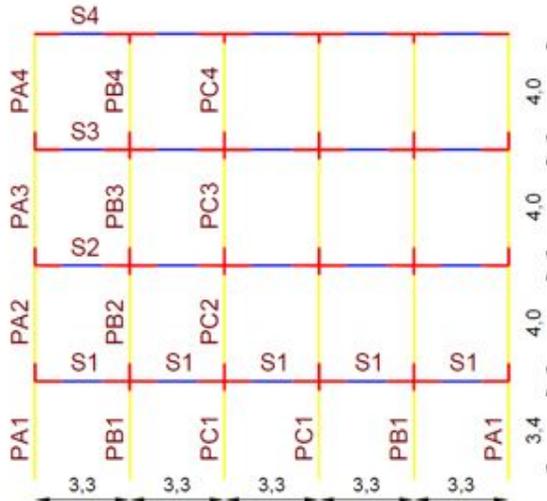
(b) Aberturas desalinhadas

L<sub>eff</sub> – Comprimento Deformável

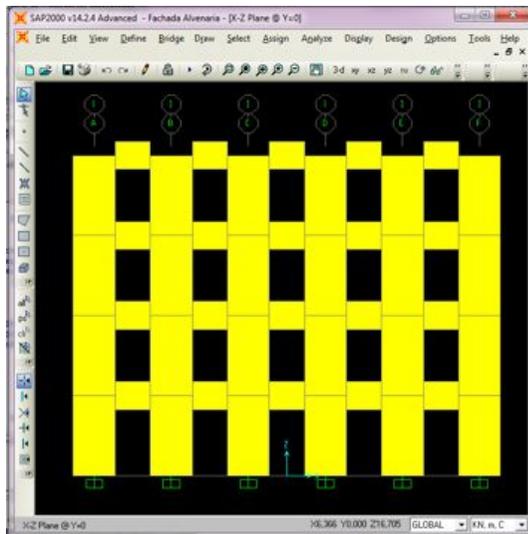


TÉCNICO  
LISBOA

# 1. Definição da Geometria



Colunas	D (m)	H (m)	$h_0$ (m)	$h_1$ (m)	$H_{eff}$ (m)	t (m)
PA4	1,80	4,00	0,6	0	3,40	0,65
PB4	1,80	4,00	0,6	0,3	3,10	0,65
PA3	1,80	4,00	0,6	0	3,40	0,70
PB3	1,80	4,00	0,6	0,3	3,10	0,70
PA2	1,80	4,00	0,6	0	3,40	0,75
PB2	1,80	4,00	0,6	0,3	3,10	0,75
PA1	1,80	3,40	0	0	3,40	0,80
PB1	1,80	3,40	0	0,3	3,10	0,80



Vigas	D (m)	L (m)	$L_1$ (m)	$L_2$ (m)	$L_{eff}$ (m)	t (m)
S4	1,20	3,30	0,9	0,9	1,50	0,65
S3	1,20	3,30	0,9	0,9	1,50	0,70
S2	1,20	3,30	0,9	0,9	1,50	0,75
S1	1,20	3,30	0,9	0,9	1,50	0,80

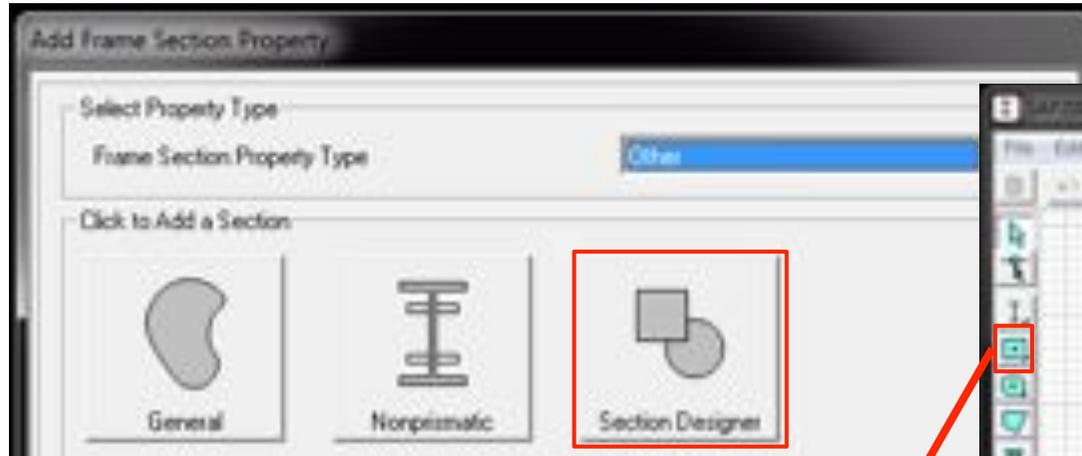
- Definir a geometria do pórtico no programa SAP2000
- Colunas e Vigas modeladas com elementos de barra



TÉCNICO  
LISBOA

# 1. Definição da Geometria

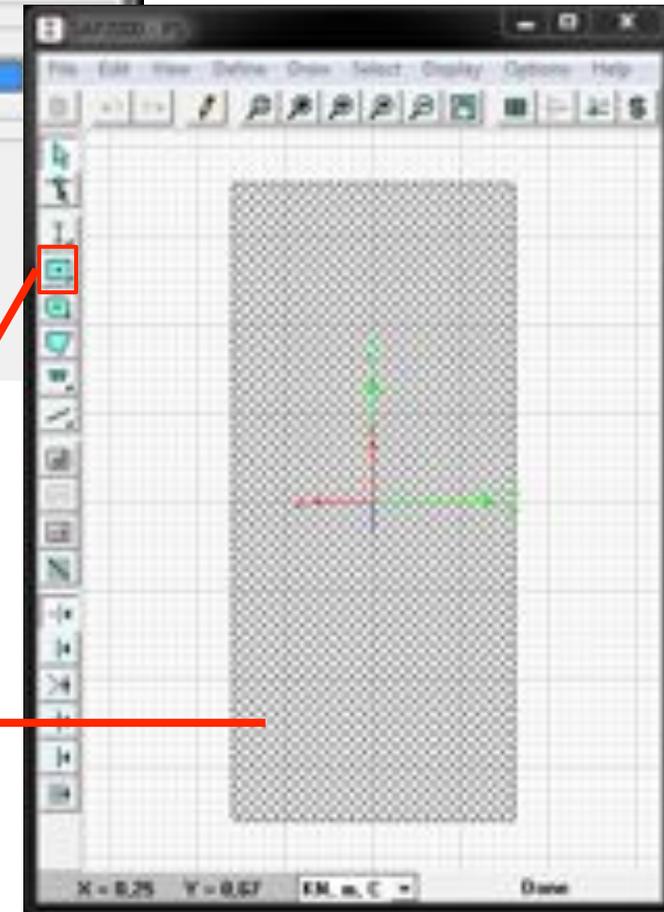
Define > Sections Properties > Frame Sections > Add New Property...



Coluna PA1 e PA2

Draw Solid Shape

Nome	Rectangle1
Material	Alvenaria
Color	
X Center	0
Y Center	0
Height	1.8
Width	0.8
Rotation	0





TÉCNICO  
LISBOA

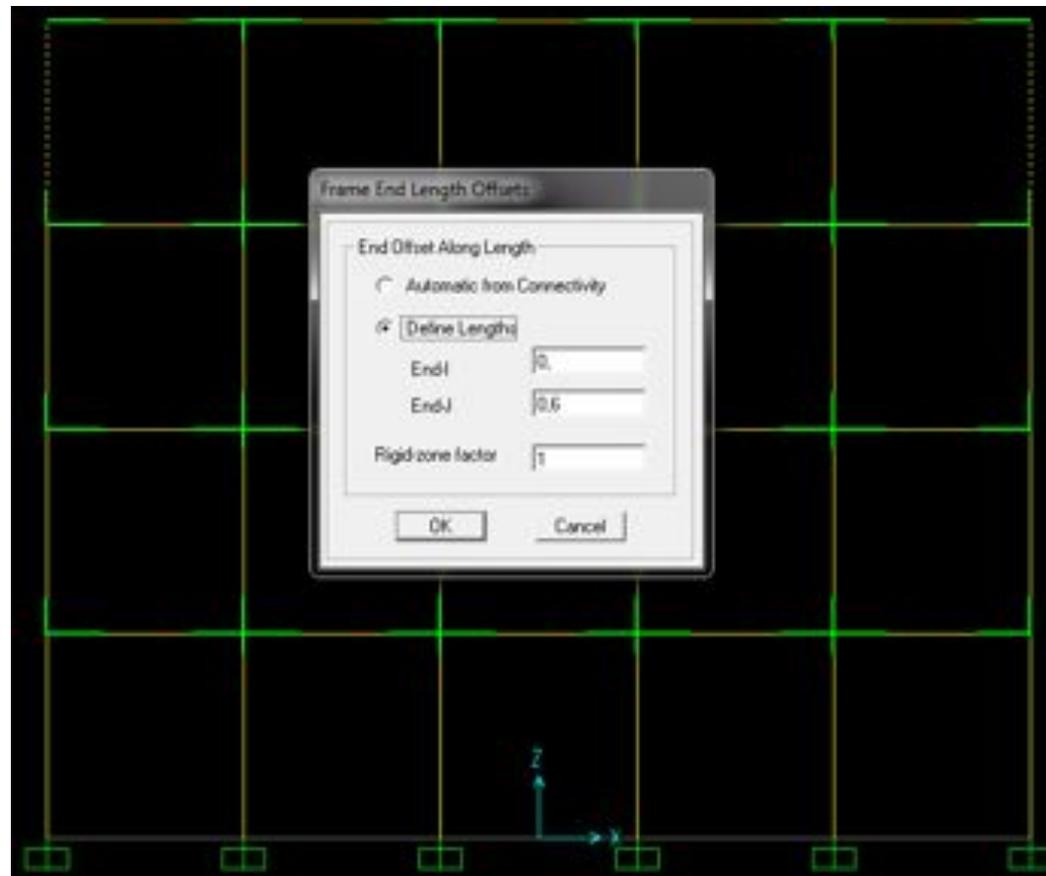
# 1. Definição da Geometria

## — Nós Rígidos (*Rigid Nodes*)

Seleccionar barra > Assign > Frame > End (Length) Offsets...

Colunas:  $h_i$  e  $h_j$

Vigas:  $L_i$  e  $L_j$

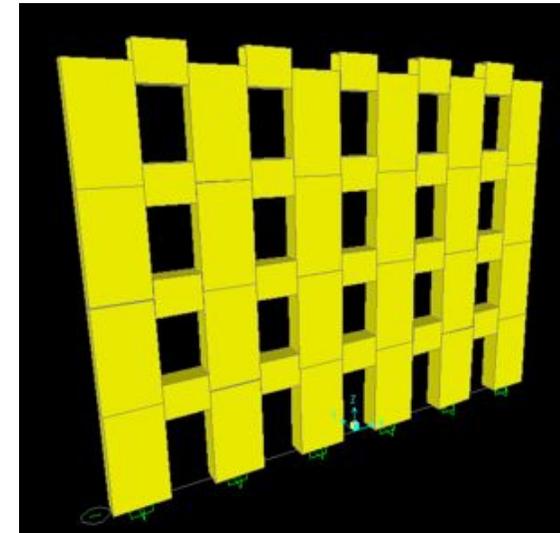
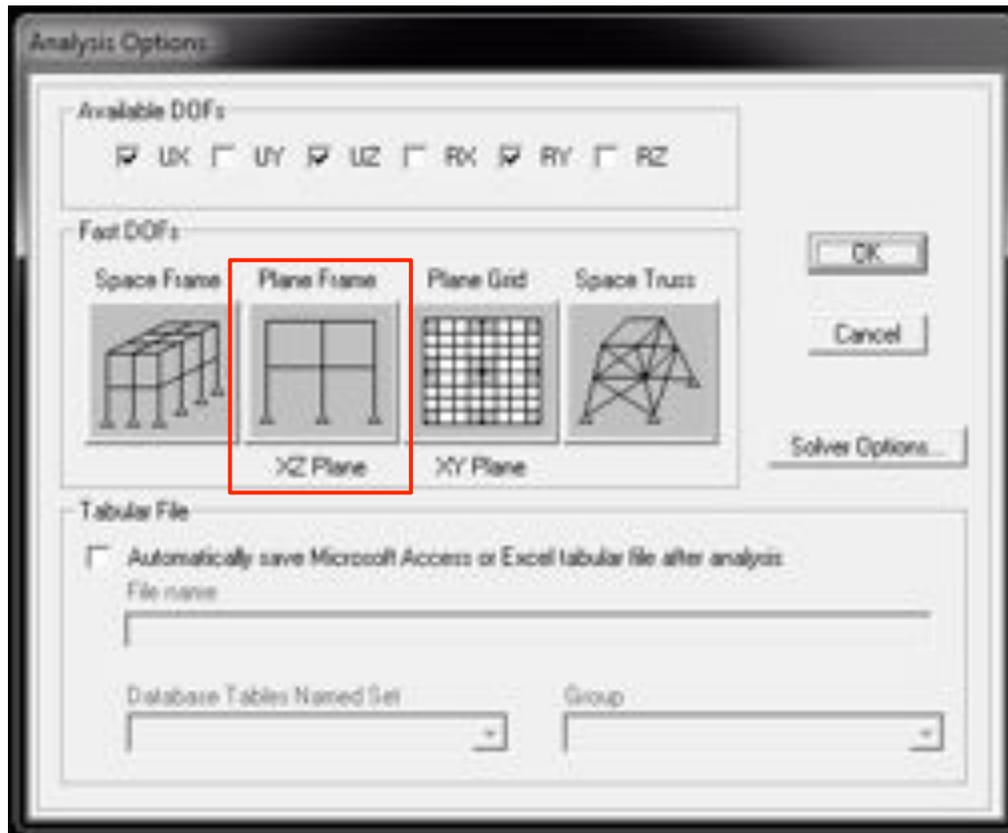




TÉCNICO  
LISBOA

# 1. Definição da Geometria

Analyse > Set Analysis Options...

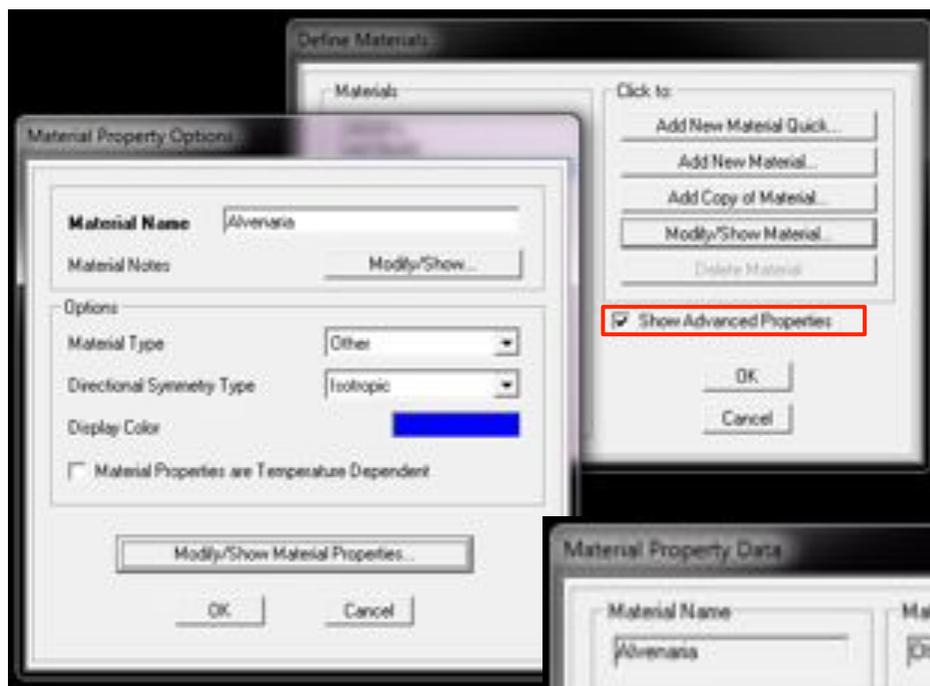




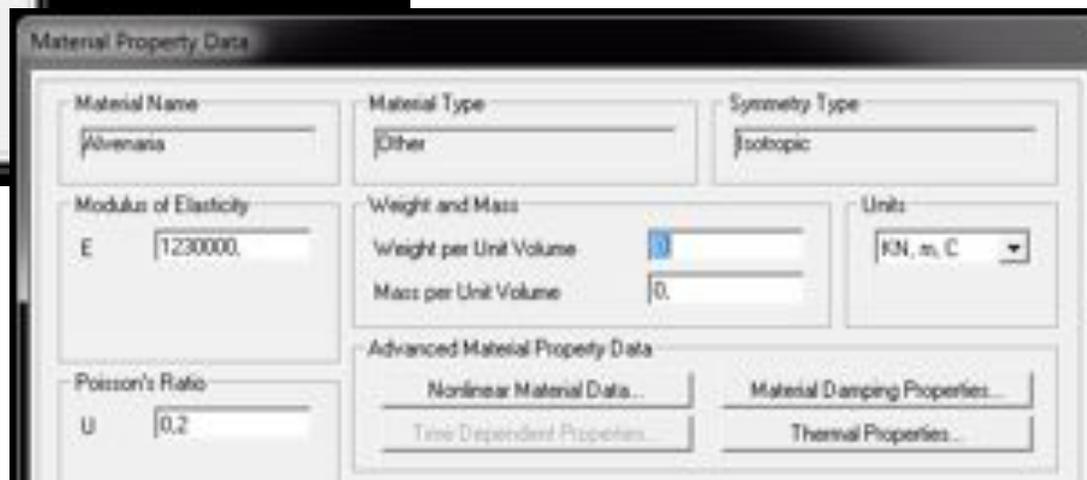
TÉCNICO  
LISBOA

## 2. Definição do Material

Define > Materials > Add New Material



Alvenaria de Pedra Irregular		
Peso Volúmico	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	20
Módulo de Elasticidade	E (kN/m <sup>2</sup> )	1230000
Coefficiente de Poisson	$\nu$	0,2
Resistência Compressão	$f_c$ (kN/m <sup>2</sup> )	2500
Resistência Corte por Fendilhação Diagonal	$\tau_o$ (kN/m <sup>2</sup> )	43
Resistência Corte por Deslizamento	$c_u$ (kN/m <sup>2</sup> )	82
	$\mu$	0,56

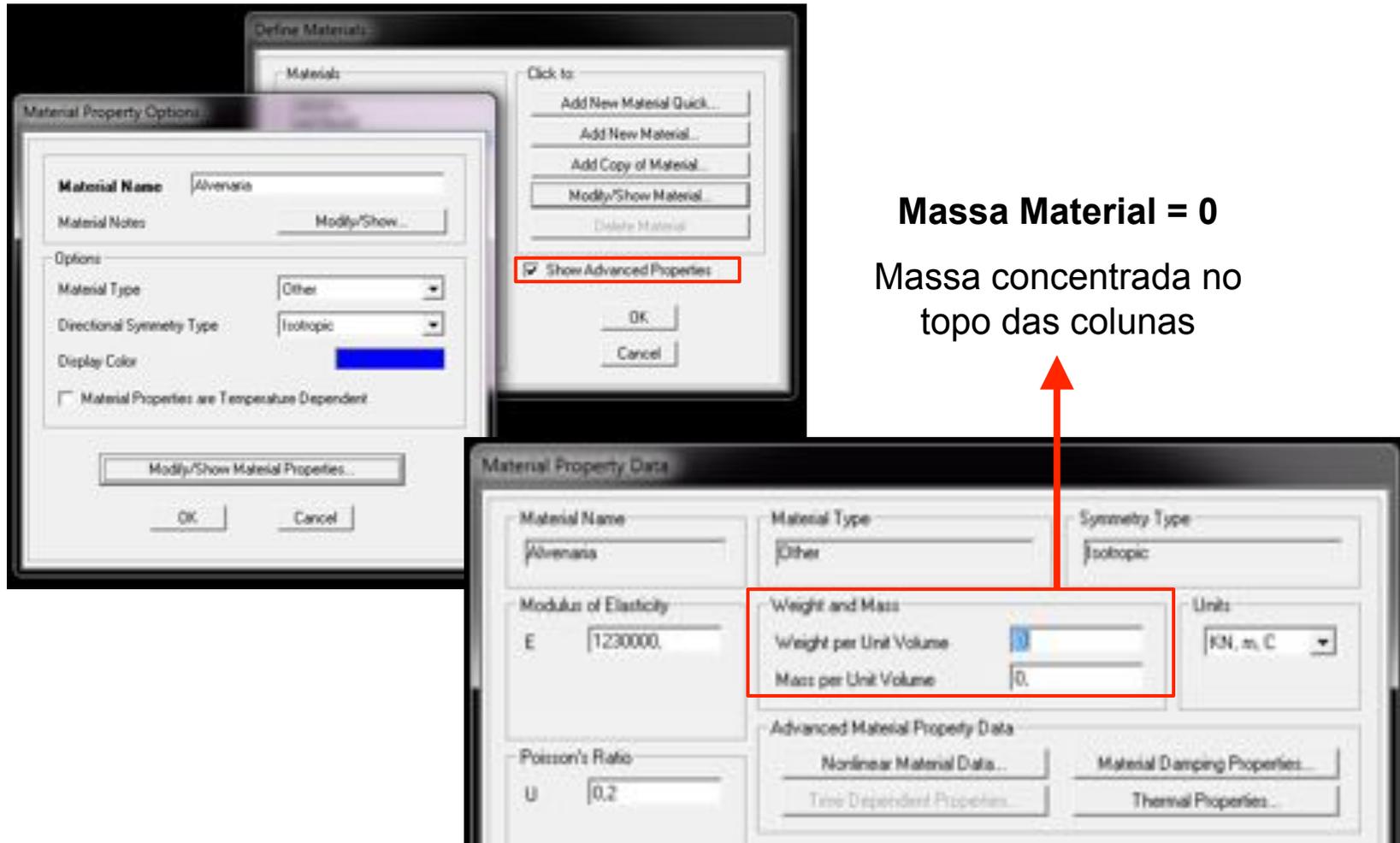




TÉCNICO  
LISBOA

## 2. Definição do Material

Define > Materials > Add New Material

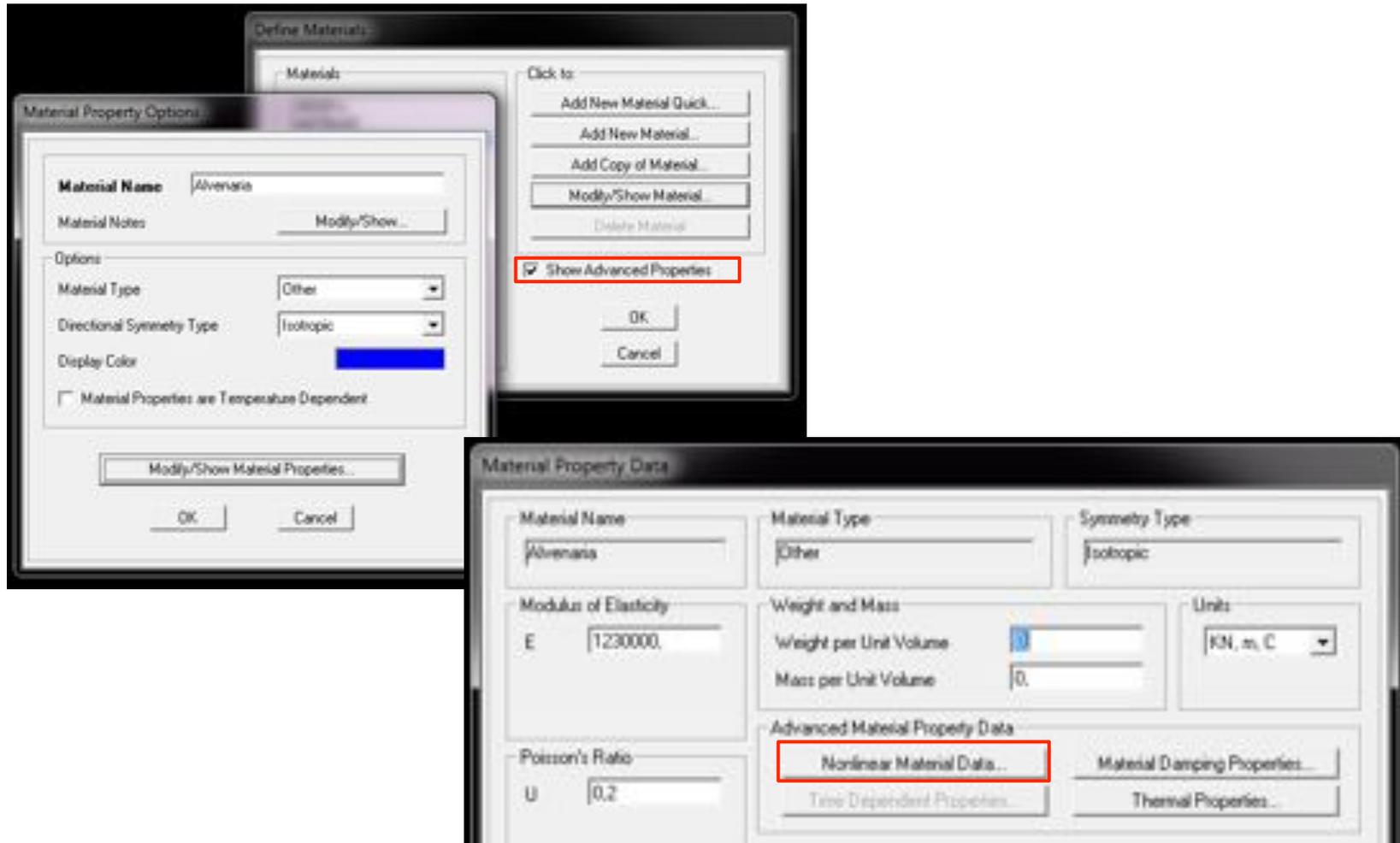




TÉCNICO  
LISBOA

## 2. Definição do Material

Define > Materials > Add New Material > Nonlinear Material Data...

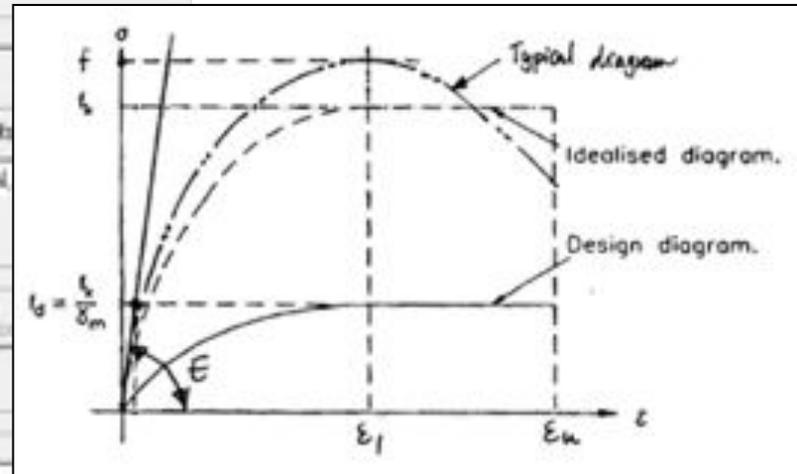
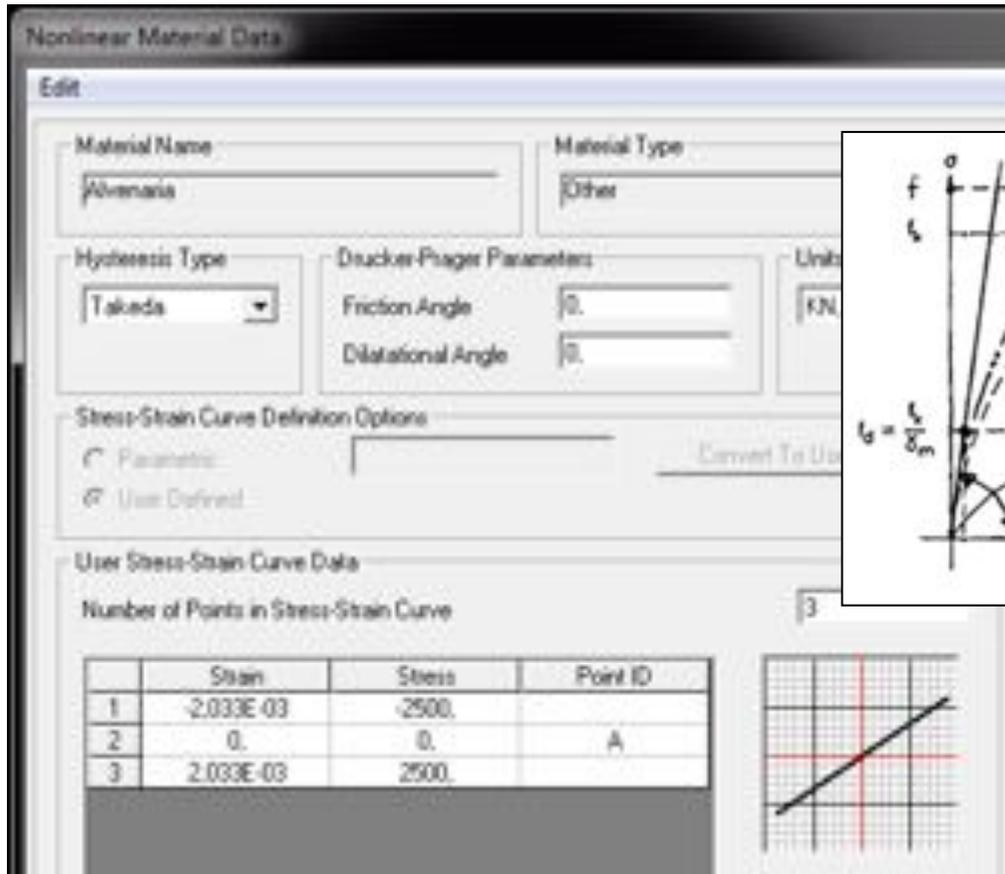




TÉCNICO  
LISBOA

## 2. Definição do Material

Define > Materials > Add New Material > Nonlinear Material Data...



**Relação Tensão –  
Deformação**

Diagrama parábola –  
rectângulo (Eurocódigo 6)

$$\varepsilon = f_d / E = 2500 / 1230000 = 2,033E-03$$

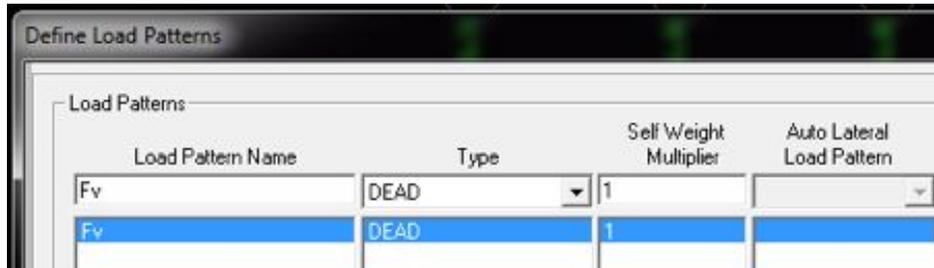


TÉCNICO  
LISBOA

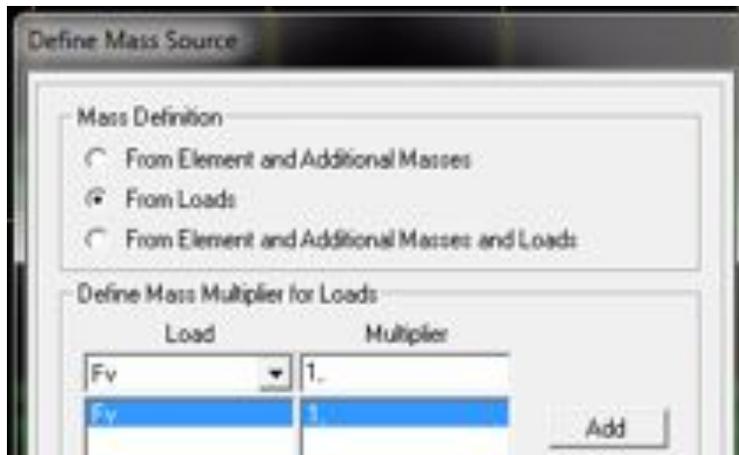
## 2. Definição do Material

Massa Material = 0 > Massa concentrada no topo das colunas

Define > Load Pattern



Define > Mass Source



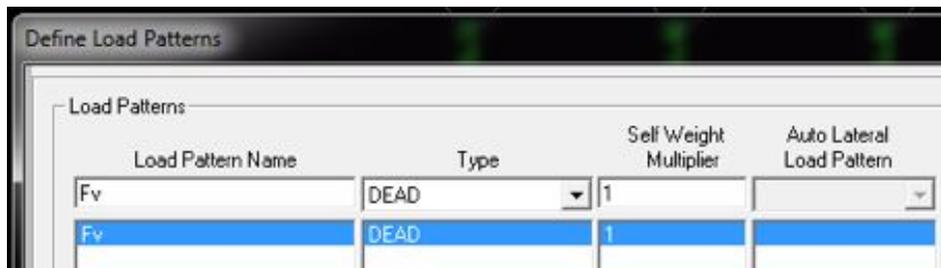


TÉCNICO  
LISBOA

## 2. Definição do Material

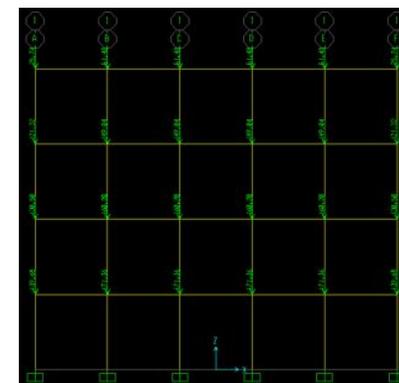
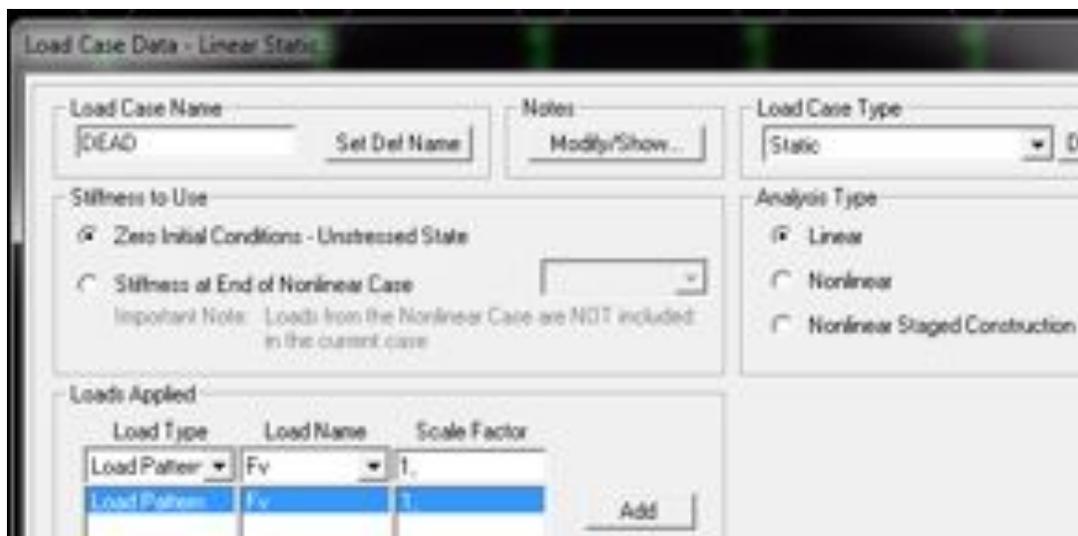
Massa Material = 0 > Massa concentrada no topo das colunas

Define > Load Pattern



Colunas	F <sub>v</sub> (kN)
PA4	25,74
PB4	51,48
PA3	121,32
PB3	149,04
PA2	130,50
PB2	160,20
PA1	139,68
PB1	171,36

Define > Load Cases



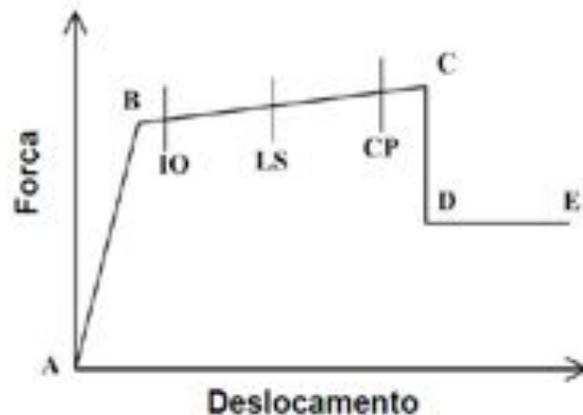


TÉCNICO  
LISBOA

### 3. Comportamento Não Linear

O programa SAP2000 permite modelar o comportamento não linear que resulta das características geométricas da estrutura ou das propriedades mecânicas dos materiais através de rótulas plásticas (*plastic hinges*).

- Modelação do comportamento de cedência e pós-cedência.
- Definidas em qualquer ponto da barra.
- Possível coexistência de rótulas na mesma posição.



A – Origem do referencial

B – Cedência (início das deformações na rótula)

C – Força Última

D – Força Residual

E – Colapso

Deformação (indicativo): IO – Immediate Occupancy; LS – Life Safety; CP – Collapse Prevention

### 3. Comportamento Não Linear

#### Resistência última das colunas (nembos) de alvenaria a acções no plano

ROTURA POR FLEXÃO	ROTURA POR CORTE	
Derrubamento Esmagamento	Fendilhação Diagonal	Deslizamento
$M_u = \frac{\sigma_o D^2 t}{2} \left( 1 - \frac{\sigma_o}{k f_d} \right)$	$V_{u,diag} = \frac{1.5 \tau_o D t}{b} \sqrt{1 + \frac{\sigma_o}{1.5 \tau_o}}$	$V_{u,desl} = \frac{1.5 c_u + \sigma_o \mu}{1 + \frac{3H'}{\sigma_o D}} D t$
	Teoria de Tumsek & Cacovic	Teoria de Mohr-Coulomb

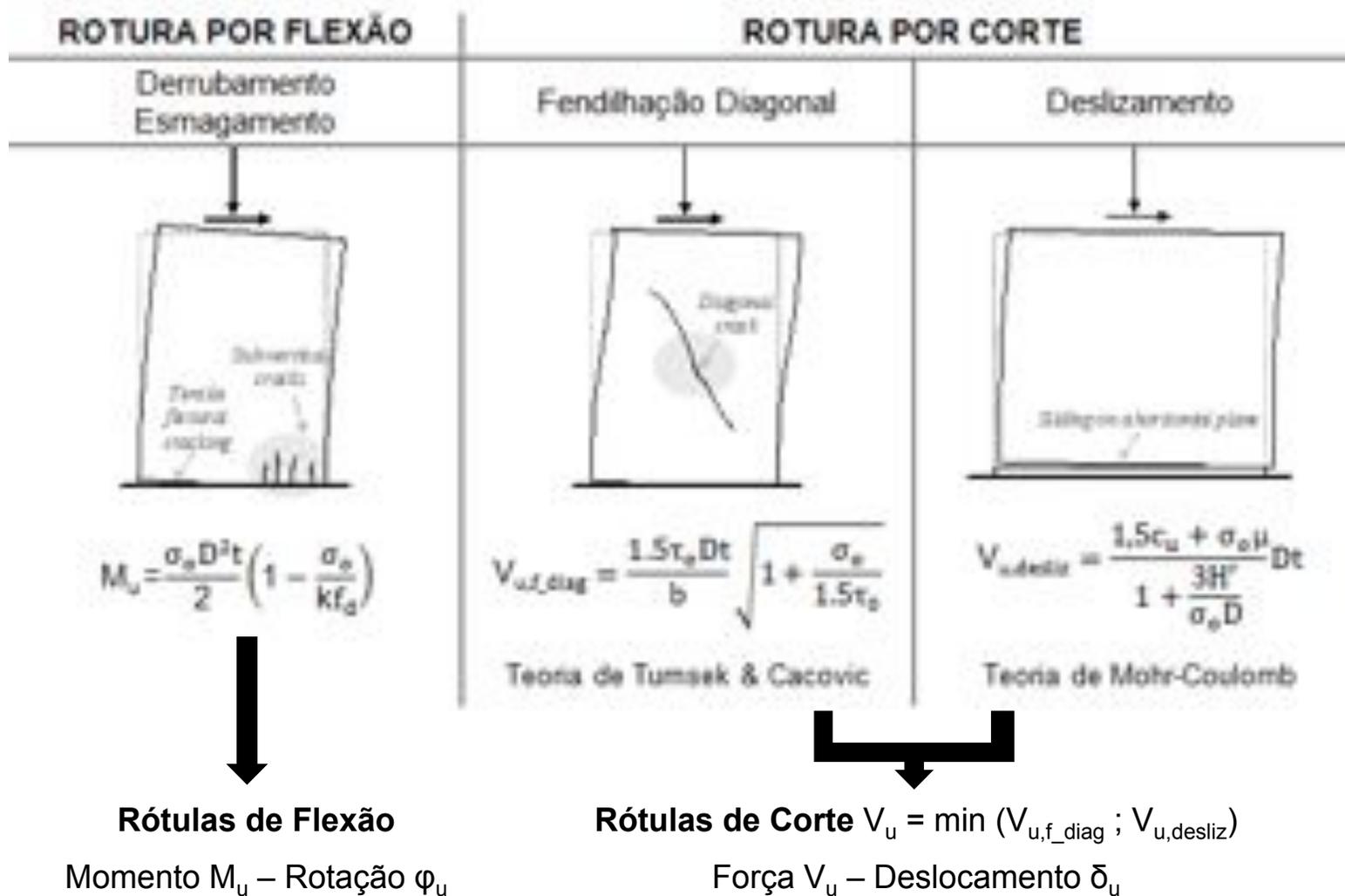
$\sigma_o$  – tensão normal de compressão; D – largura da coluna; t – espessura da coluna;  $f_d$  – tensão máxima de compressão; k – factor de distribuição da tensão normal equivalente a rectângulo (0,85);  $\tau_o$  – tensão de corte diagonal máxima (TC);  $b = H/D$  ( $1 \leq b \leq 1,5$ );  $c_u$  – coesão;  $\mu$  – coeficiente de atrito;  $H'$  – comprimento secção comprimida.



TÉCNICO  
LISBOA

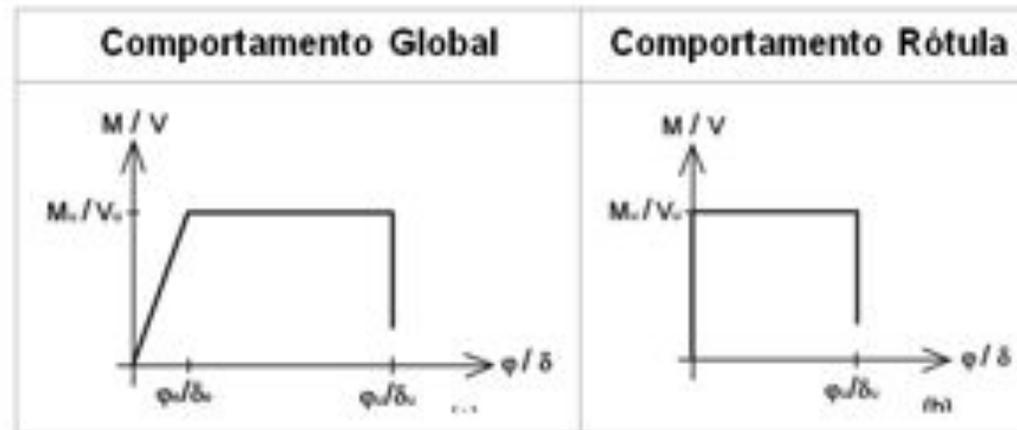
### 3. Comportamento Não Linear

#### Resistência última das colunas (nembos) de alvenaria a acções no plano



### 3. Comportamento Não Linear

#### Resistência última das colunas (nembos) de alvenaria a acções no plano



#### Deformação última, elástica e plástica

- Norma Italiana (NTC 2008) preconiza que a deformação última dos nembos é igual a  $0,006 H_{\text{eff}}$  para a flexão e  $0,004 H_{\text{eff}}$  para o corte (resultados baseados em ensaios experimentais).
- Rótulas Plásticas modelam o comportamento de cedência e pós-cedência.

$$\delta_{\text{plástico}} = \delta_{\text{último}} - \delta_{\text{elástico}}$$

$$\varphi_{\text{plástico}} = \varphi_{\text{último}} - \varphi_{\text{elástico}}$$



TÉCNICO  
LISBOA

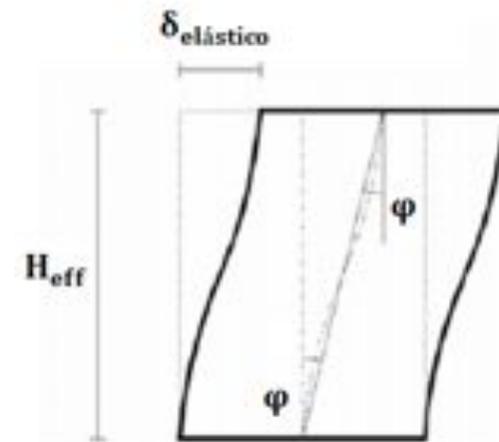
### 3. Comportamento Não Linear

#### Deformação elástica (modelo bi-encastado)

$$K = \frac{1}{\frac{H_{eff}^3}{12EI} + \frac{H_{eff}}{AG}}$$

$$F = K \times \delta \rightarrow V_u = K \times \delta_{elástico} \rightarrow \delta_{elástico} = \frac{V_u}{K}$$

$$\varphi_{elástico} = \frac{\delta_{elástico}}{H_{eff}}$$



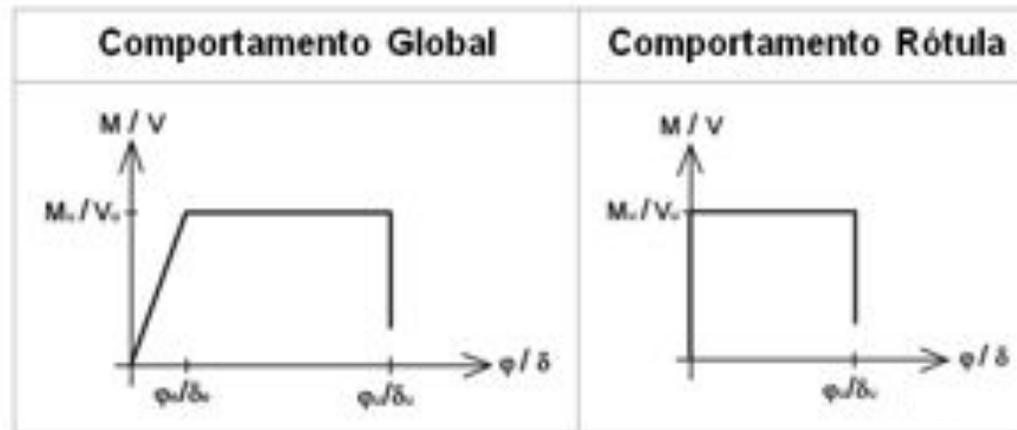
#### Deformação plástica

$$\delta_{plástico} = \delta_{último} - \delta_{elástico}$$

$$\varphi_{plástico} = \varphi_{último} - \varphi_{elástico}$$

### 3. Comportamento Não Linear

Resistência última das colunas (nembos) de alvenaria a acções no plano



Posição das Rótulas de Flexão (Momento  $M_u$  – Rotação  $\varphi_u$ )

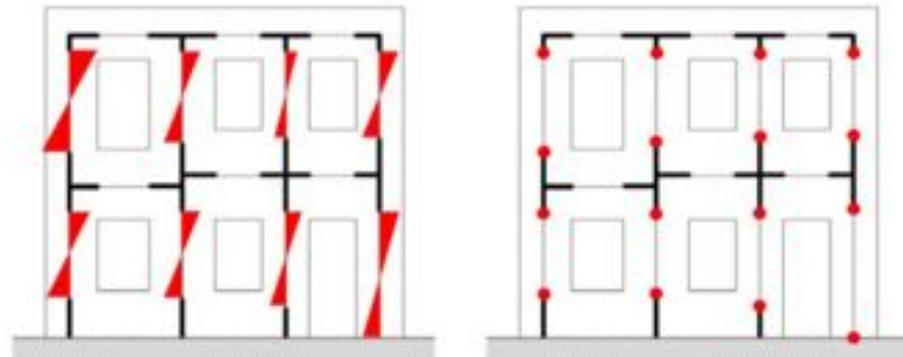


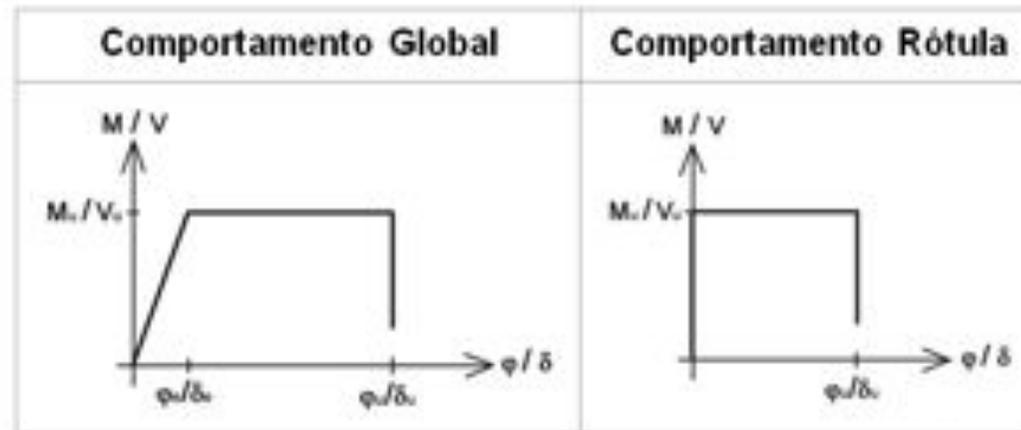
Diagrama de Momento Flector característico.  
Rótula Plástica na secção de momento máximo.



TÉCNICO  
LISBOA

### 3. Comportamento Não Linear

Resistência última das colunas (nembos) de alvenaria a acções no plano



Posição das Rótulas de Corte (Força  $V_u$  – Deslocamento  $\delta_u$ )

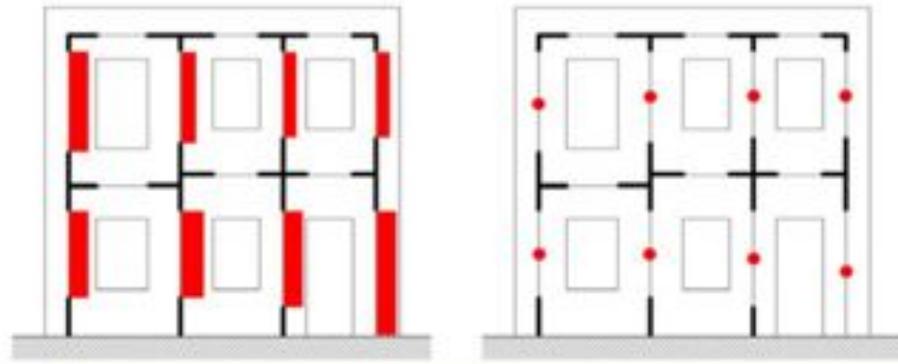


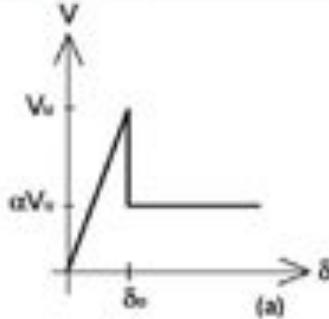
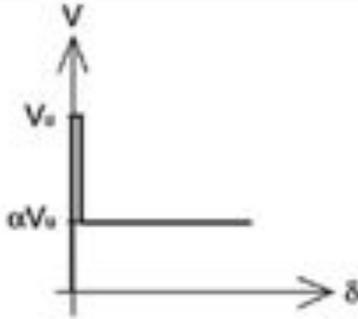
Diagrama de Esforço Transverso característico.  
Rótula Plástica a  $\frac{1}{2} H_{\text{eff}}$ .



TÉCNICO  
LISBOA

### 3. Comportamento Não Linear

#### Resistência última das vigas (lintéis) de alvenaria a acções no plano

CORTE	Comportamento Global	Comportamento Rótula
$V_u = c_u Dt$ $\alpha$ – Resistência Residual (0,25)		

#### Posição das Rótulas de Corte (Força $V_u$ )

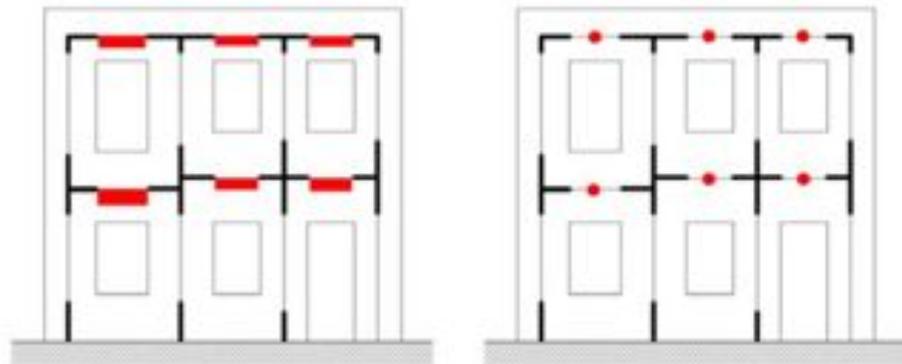


Diagrama de Esforço Transverso característico.  
Rótula Plástica a  $\frac{1}{2} L_{eff}$ .

### 3. Comportamento Não Linear

#### Resistência última das vigas (lintéis) de alvenaria a acções no plano

CORTE	Comportamento Global	Comportamento Rótula
$V_u = c_u Dt$ <p><math>\alpha</math> – Resistência Residual (0,25)</p>	<p><b>Comportamento Frágil</b></p>	

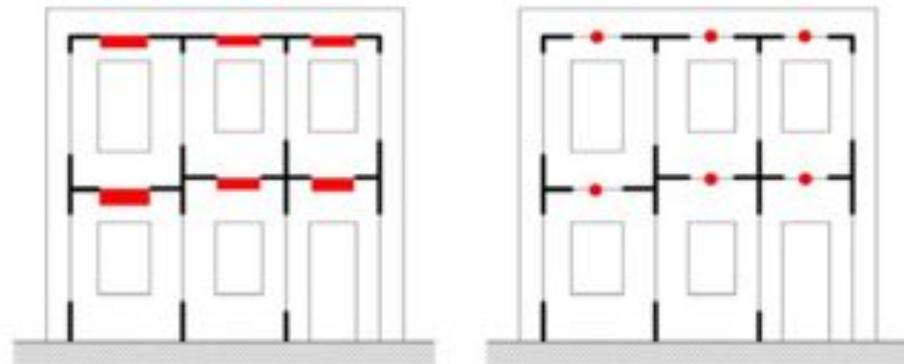


Diagrama de Esforço Transverso característico.  
Rótula Plástica a  $\frac{1}{2} L_{eff}$ .



TÉCNICO  
LISBOA

### 3. Comportamento Não Linear

#### Definição das Rótulas Plásticas:

(1) Determinação das tensões normais de compressão ( $\sigma_0$ ) nas colunas

Load Case: DEAD

(2) Determinação dos esforços resistentes nas colunas e vigas

Colunas	$\sigma_0$ (kN/m <sup>2</sup> )	$M_u$ (kN.m)	$V_{rd,diag}$ (kN)	$V_{u,desiz}$ (kN)	$V_u$ (kN)
PA4	26,76	27,83	59,84	16,68	16,68
PB4	39,56	40,88	63,90	26,72	26,72
PA3	126,59	135,00	93,26	86,16	86,16
PB3	150,41	158,49	98,90	108,41	98,90
PA2	219,36	239,01	121,78	161,18	121,78
PB2	255,23	272,86	129,25	196,18	129,25
PA1	305,46	338,97	148,30	240,51	148,30
PB1	355,91	384,00	158,08	290,95	158,08

Vigas	$V_u$ (kN)
S4	63,96
S3	68,88
S2	73,80
S1	78,72



TÉCNICO  
LISBOA

### 3. Comportamento Não Linear

#### Definição das Rótulas Plásticas:

(3) Determinação das deformações elásticas

Colunas	$V_c$ (kN)	K (kN/m)	$\delta_{elast}$ (m)	$\delta_{plast}$ (m)	$\varphi_{elast}$ (rad)	$\varphi_{plast}$ (rad)
PA4	16,68	14222,15	0,0012	0,0124	0,0002	0,0058
PB4	26,72	18461,54	0,0014	0,0110	0,0002	0,0058
PA3	86,16	17537,18	0,0049	0,0087	0,0007	0,0053
PB3	98,90	22711,70	0,0044	0,0080	0,0007	0,0053
PA2	121,78	21279,25	0,0057	0,0079	0,0010	0,0050
PB2	129,25	27490,91	0,0047	0,0077	0,0010	0,0050
PA1	148,30	25458,33	0,0058	0,0078	0,0012	0,0048
PB1	158,08	32807,02	0,0048	0,0076	0,0012	0,0048

$$\delta_{plástico} = \delta_{último} - \delta_{elástico}$$

$$\varphi_{plástico} = \varphi_{último} - \varphi_{elástico}$$



TÉCNICO  
LISBOA

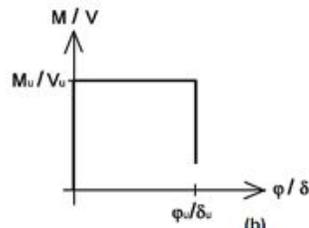
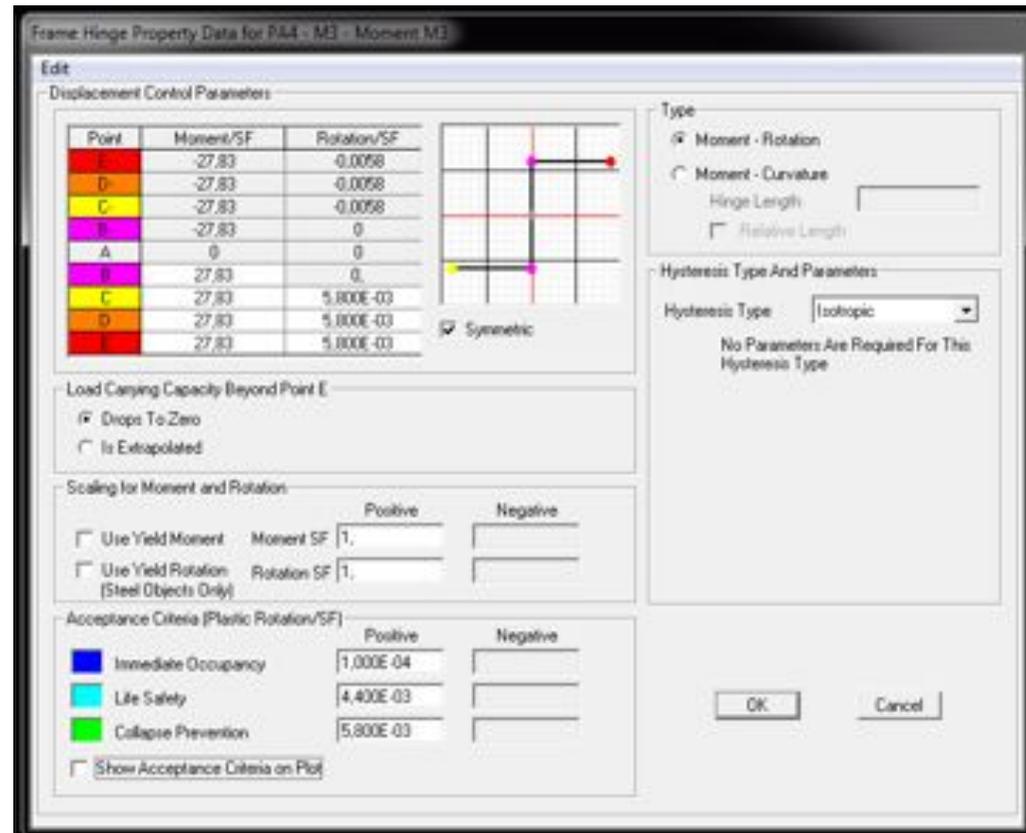
### 3. Comportamento Não Linear

#### Definição das Rótulas Plásticas:

(4) Define > Section Properties > Hinge Properties... > Add New Property...



#### Colunas: Rótulas Momento - Rotação





TÉCNICO  
LISBOA

### 3. Comportamento Não Linear

#### Definição das Rótulas Plásticas:

(4) Define > Section Properties > Hinge Properties... > Add New Property...

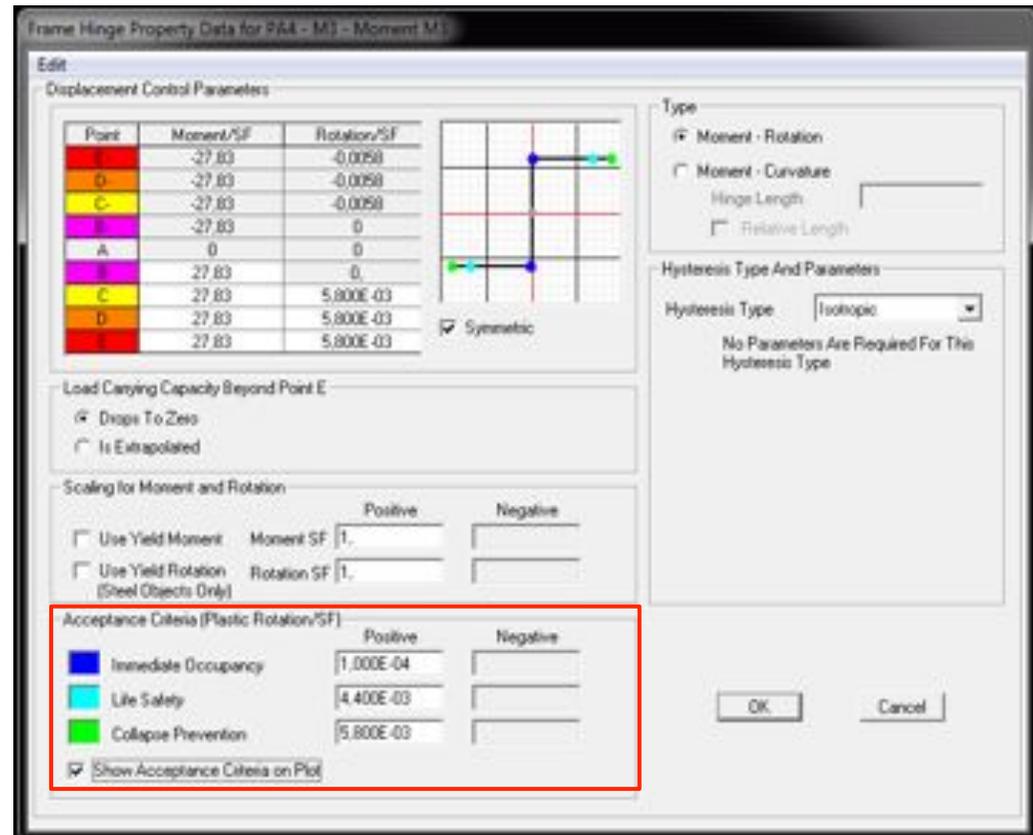


IO – Deformação de cedência

LS – Valor não superior a  $\frac{3}{4}$  da deformação última

CP – Deformação última

#### Colunas: Rótulas Momento - Rotação





TÉCNICO  
LISBOA

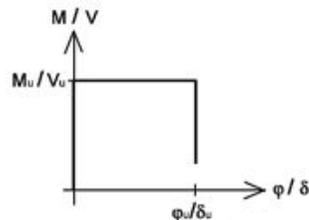
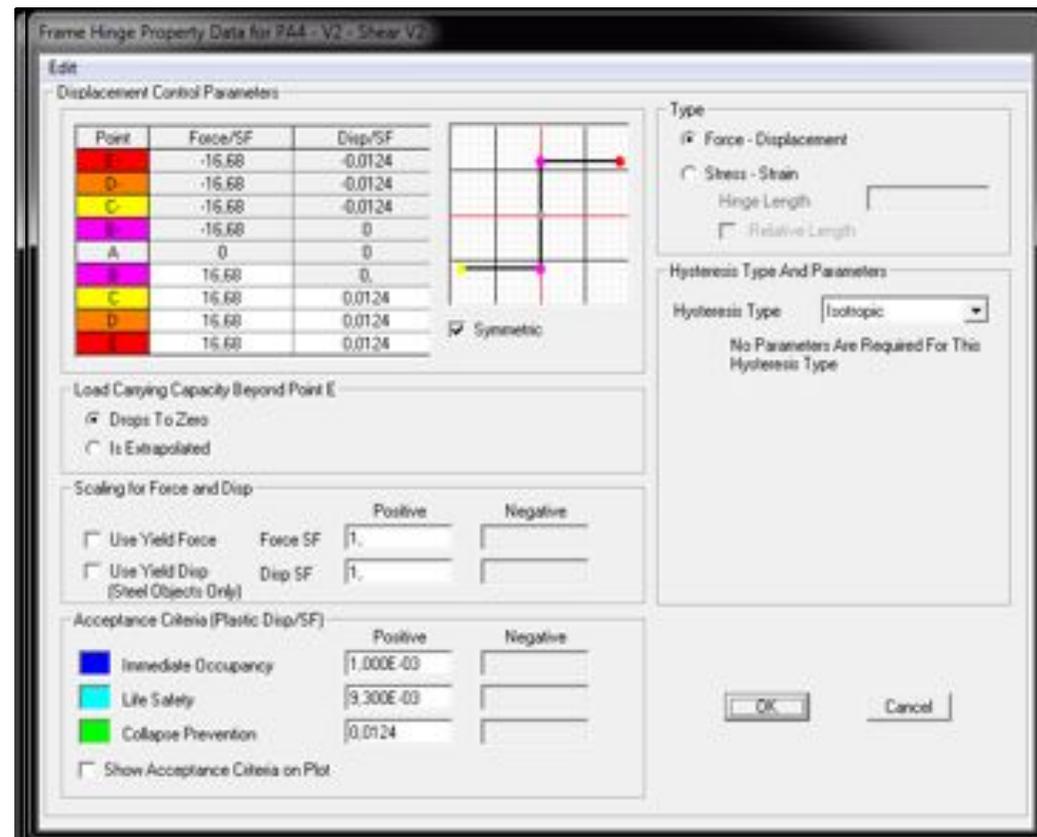
### 3. Comportamento Não Linear

#### Definição das Rótulas Plásticas:

(4) Define > Section Properties > Hinge Properties... > Add New Property...



#### Colunas: Rótulas Força - Deslocamento



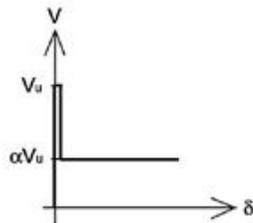


TÉCNICO  
LISBOA

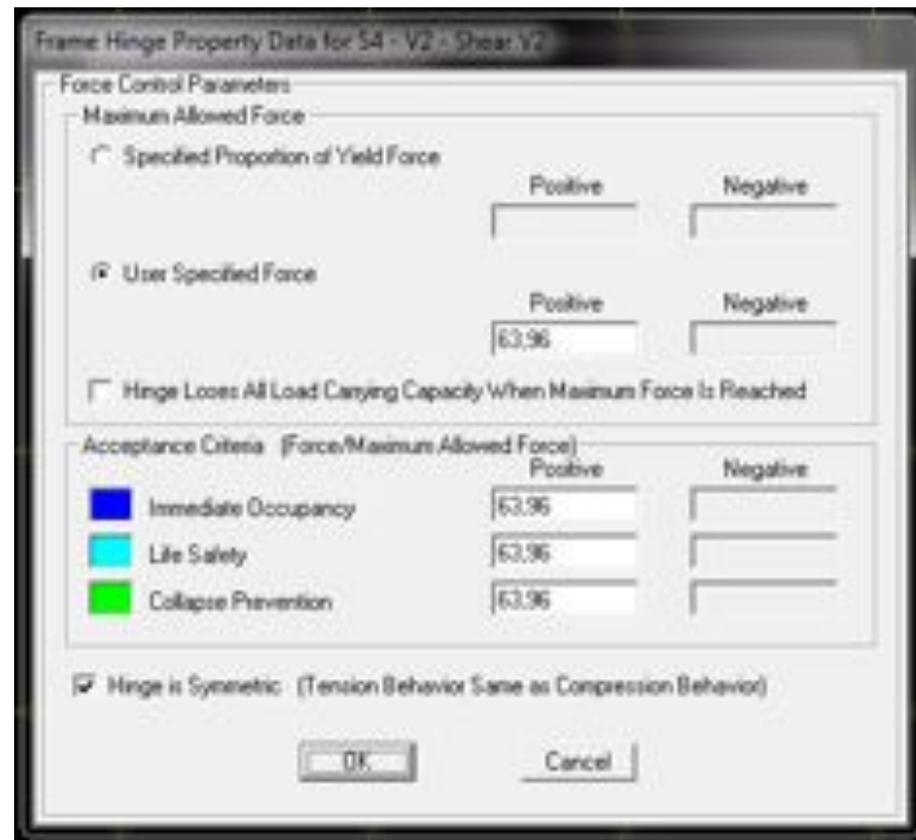
### 3. Comportamento Não Linear

#### Definição das Rótulas Plásticas:

(4) Define > Section Properties > Hinge Properties... > Add New Property...



#### Vigas: Rótulas Força



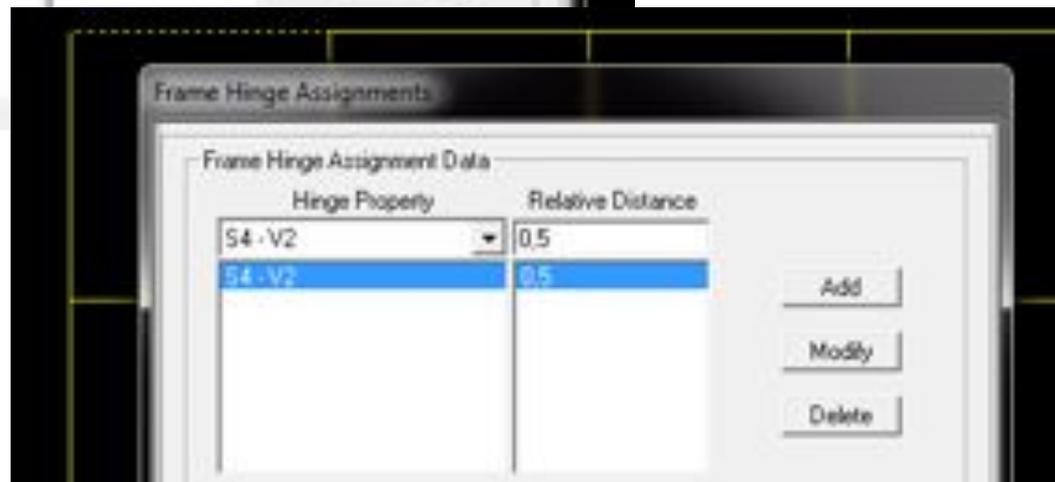
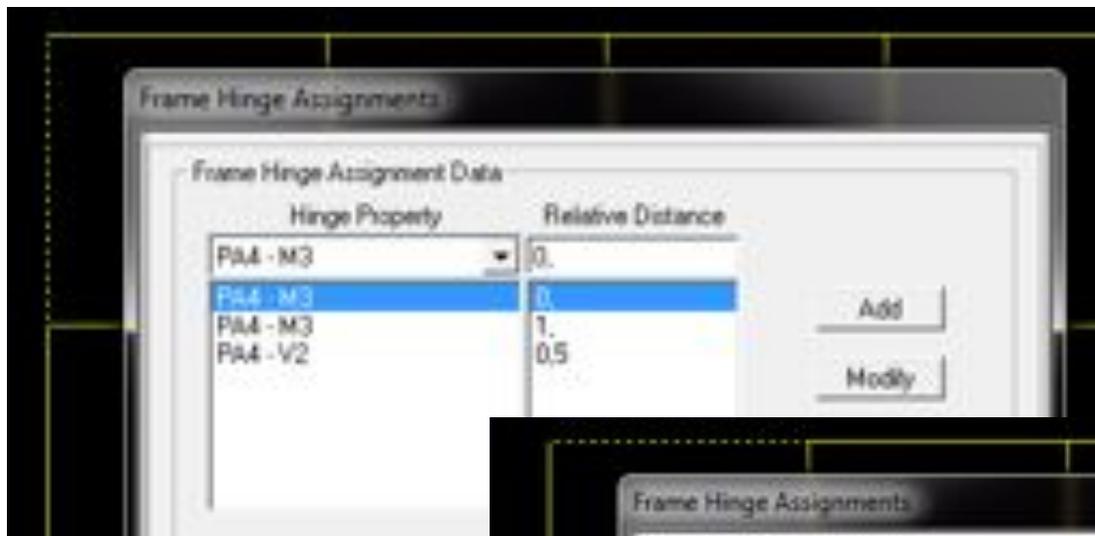


TÉCNICO  
LISBOA

### 3. Comportamento Não Linear

#### Definição das Rótulas Plásticas:

(5) Selecionar barra > Assign > Frame > Hinges...





TÉCNICO  
LISBOA

### 3. Comportamento Não Linear

#### Definição das Rótulas Plásticas:

(5) Display > Show Misc Assigns > Frame/Cable/Tendon... > Hinges





TÉCNICO  
LISBOA



## 4. Análise Estática Não Linear (*Pushover*)

---

A análise estática não linear (*pushover*) consiste na aplicação de incrementos monotónicos de uma solicitação horizontal sobre uma estrutura, com o intuito de avaliar a sua capacidade resistente a acções sísmicas (horizontais).

A resposta de estrutura é traduzida através de curvas de capacidade, que relacionam a força de corte basal com o deslocamento horizontal observado num determinado ponto de controlo (usualmente coincidente com o CM do último nível).



TÉCNICO  
LISBOA



## 4. Análise Estática Não Linear (*Pushover*)

---

A análise estática não linear (*pushover*) consiste na aplicação de incrementos monotónicos de uma solicitação horizontal sobre uma estrutura, com o intuito de avaliar a sua capacidade resistente a acções sísmicas (horizontais).

A resposta de estrutura é traduzida através de curvas de capacidade, que relacionam a força de corte basal com o deslocamento horizontal observado num determinado ponto de controlo (usualmente coincidente com o CM do último nível).

### Carregamentos Laterais (EC8)

- Distribuição Uniforme: proporcional à massa independentemente da altura (resposta de aceleração uniforme).
- Distribuição Modal: proporcional à massa e ao deslocamento modal normalizado.



TÉCNICO  
LISBOA

## 4. Análise Estática Não Linear (*Pushover*)

---

A análise estática não linear (*pushover*) consiste na aplicação de incrementos monotónicos de uma solicitação horizontal sobre uma estrutura, com o intuito de avaliar a sua capacidade resistente a acções sísmicas (horizontais).

A resposta de estrutura é traduzida através de curvas de capacidade, que relacionam a força de corte basal com o deslocamento horizontal observado num determinado ponto de controlo (usualmente coincidente com o CM do último nível).

### Carregamentos Laterais (EC8)

- Distribuição Uniforme: proporcional à massa independentemente da altura (resposta de aceleração uniforme).
- Distribuição Modal: proporcional à massa e ao deslocamento modal normalizado.

### SAP2000

- (a) Introdução manual das forças estáticas equivalentes (distribuição por piso proporcional à massa do nó).
- (b) Definição automática, opção particularmente vantajosa no caso da distribuição modal por considerar o deslocamento em cada nó.

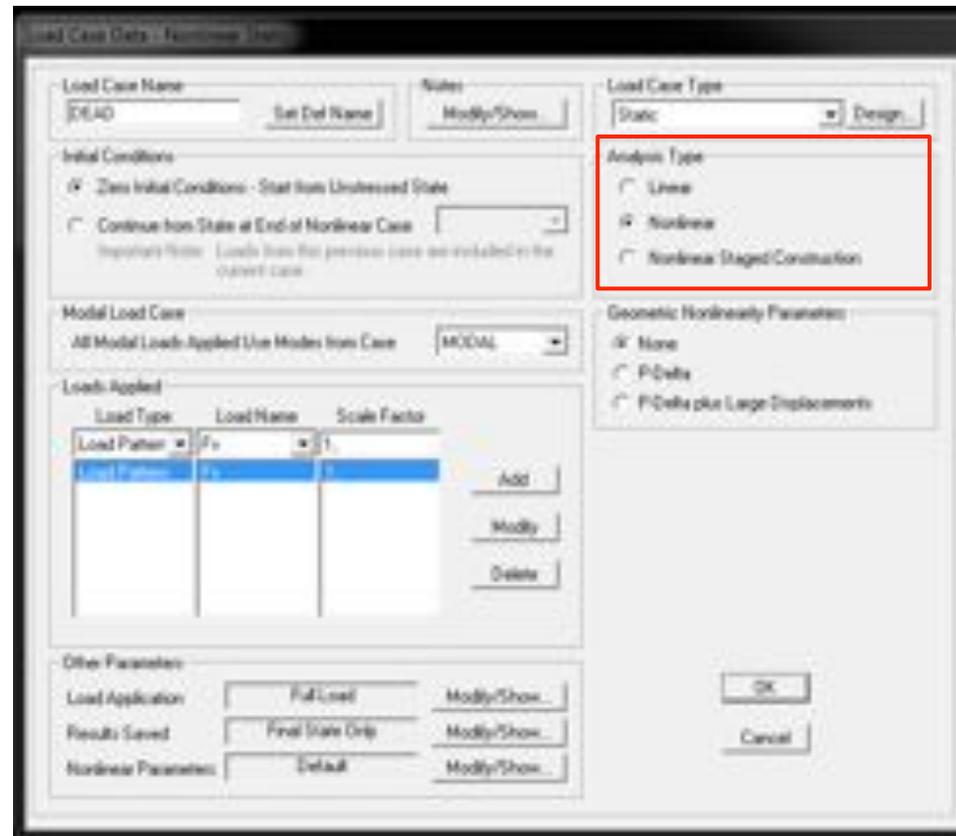


TÉCNICO  
LISBOA

## 4. Análise Estática Não Linear (*Pushover*)

Definir a Load Case DEAD para Análises Não Lineares

Define > Load Cases > DEAD > Nonlinear





TÉCNICO  
LISBOA

## 4. Análise Estática Não Linear (*Pushover*)

Análise *Pushover*: Define > Load Cases

### Distribuição Modal

Load Case Data - Nonlinear Static

Load Case Name: Push\_Modal

Initial Conditions:

- Zero Initial Conditions - Start from Unstressed State
- Continue from State at End of Nonlinear Case

Modal Load Case: All Modal Loads Applied Use Modes from Case

Load Type	Load Name	Scale Factor
Mode	1	-1
Mode	1	-1

### Distribuição Uniforme

Load Case Data - Nonlinear Static

Load Case Name: Push\_Uniforme

Initial Conditions:

- Zero Initial Conditions - Start from Unstressed State
- Continue from State at End of Nonlinear Case

Modal Load Case: All Modal Loads Applied Use Modes from Case

Load Type	Load Name	Scale Factor
Accel	UBC	-1
Accel	UBC	-1



TÉCNICO  
LISBOA

## 4. Análise Estática Não Linear (*Pushover*)

Análise *Pushover*: Define > Load Cases

### Distribuição Modal

Load Case Name: Push\_Modal

Initial Conditions:  
 Zero Initial Conditions - Start from Unstressed State  
 Continue from State at End of Nonlinear Case

Modal Load Case:  
All Modal Loads Applied Use Modes from Case: MODAL

Load Type	Load Name	Scale Factor
Mode	1	-1
Mode	1	-1

Other Parameters:  
Load Application: Displ Control  
Results Saved: Multiple States  
Nonlinear Parameters: User Defined

### Distribuição Uniforme

Load Case Name: Push\_Uniforme

Load Case Type: Static

Analysis Type:  
 Linear  
 Nonlinear  
 Nonlinear Staged Construction

Geometric Nonlinearity Parameters:  
 None  
 P-Delta  
 P-Delta plus Large Displacements

Load Type	Load Name	Scale Factor
Accel	UBC	-1
Accel	UBC	-1

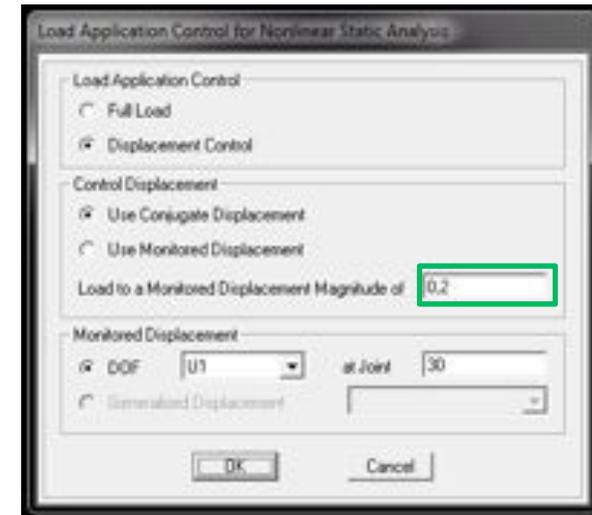
Other Parameters:  
Load Application: Displ Control  
Results Saved: Multiple States  
Nonlinear Parameters: User Defined



TÉCNICO  
LISBOA

## 4. Análise Estática Não Linear (*Pushover*)

Análise *Pushover*: Define > Load Cases



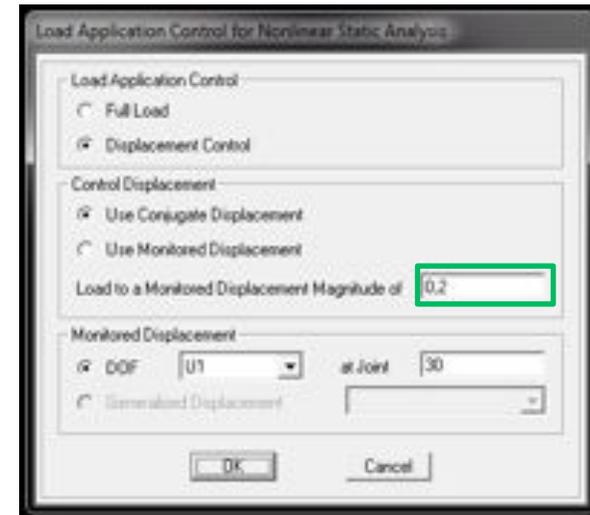
Análise termina quando o nó de controlo atingir o deslocamento definido.



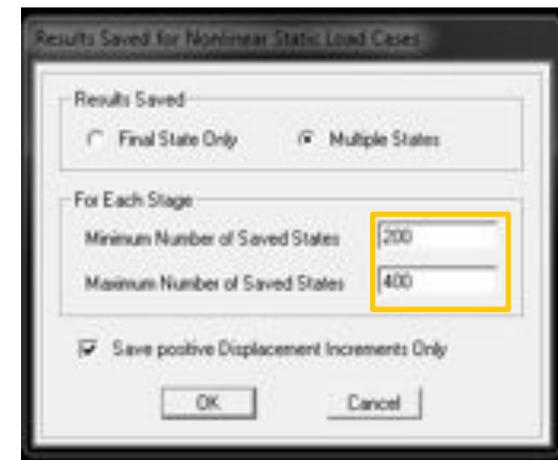
TÉCNICO  
LISBOA

## 4. Análise Estática Não Linear (*Pushover*)

Análise *Pushover*: Define > Load Cases



Análise termina quando o nó de controlo atingir o deslocamento definido.



Quanto maiores os valores indicados, mais refinada será a curva de capacidade e maior será o número de *outputs* da análise



TÉCNICO  
LISBOA

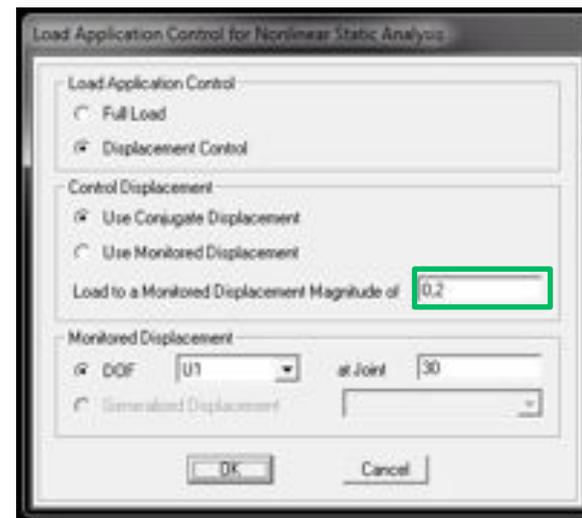
## 4. Análise Estática Não Linear (*Pushover*)

Análise *Pushover*: Define > Load Cases

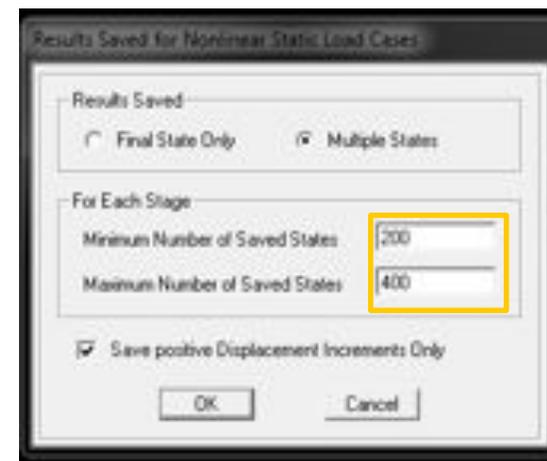


Valores definidos pelo utilizador com o objectivo de otimizar a análise (ex: aumento do número de passos caso ocorram problemas de convergência)

Quanto maiores os valores indicados, mais refinada será a curva de capacidade e maior será o número de *outputs* da análise



Análise termina quando o nó de controlo atingir o deslocamento definido.





TÉCNICO  
LISBOA

## 4. Análise Estática Não Linear (*Pushover*)

### Análise *Pushover*: Define > Load Cases



- Controla o tempo de análise.
- Número excessivo pode indicar que análise parou devido a problemas numéricos.
- Para cada etapa de análise inicia iterações do tipo “*constant-stiffness*”. Se não convergir, adopta iterações do tipo “*Newton-Raphson (tangent-stiffness)*”.
- Tolerância de erro relativamente à intensidade da força aplicada na estrutura.
- É muito eficaz e tende a reduzir o número de iterações necessária.
- Margem de erro usada para determinar os estados de uma rótula plástica.



TÉCNICO  
LISBOA

## 4. Análise Estática Não Linear (*Pushover*)

### Análise *Pushover*: Define > Load Cases



- Controla o tempo de análise.
- Número excessivo pode indicar que análise parou devido a problemas numéricos.
- Para cada etapa de análise inicia iterações do tipo “*constant-stiffness*”. Se não convergir, adopta iterações do tipo “*Newton-Raphson (tangent-stiffness)*”.
- Tolerância de erro relativamente à intensidade da força aplicada na estrutura.
- É muito eficaz e tende a reduzir o número de iterações necessária.
- Margem de erro usada para determinar os estados de uma rótula plástica.
- Não é usado em análises estáticas lineares.
- Deformação é imposta de forma iterativa até corresponder à força pretendida.
- Margem de erro em relação à força pretendida.
- Factor que condiciona a deformação imposta resultante da diferença entre a força pretendida e a força real aplicada na estrutura.

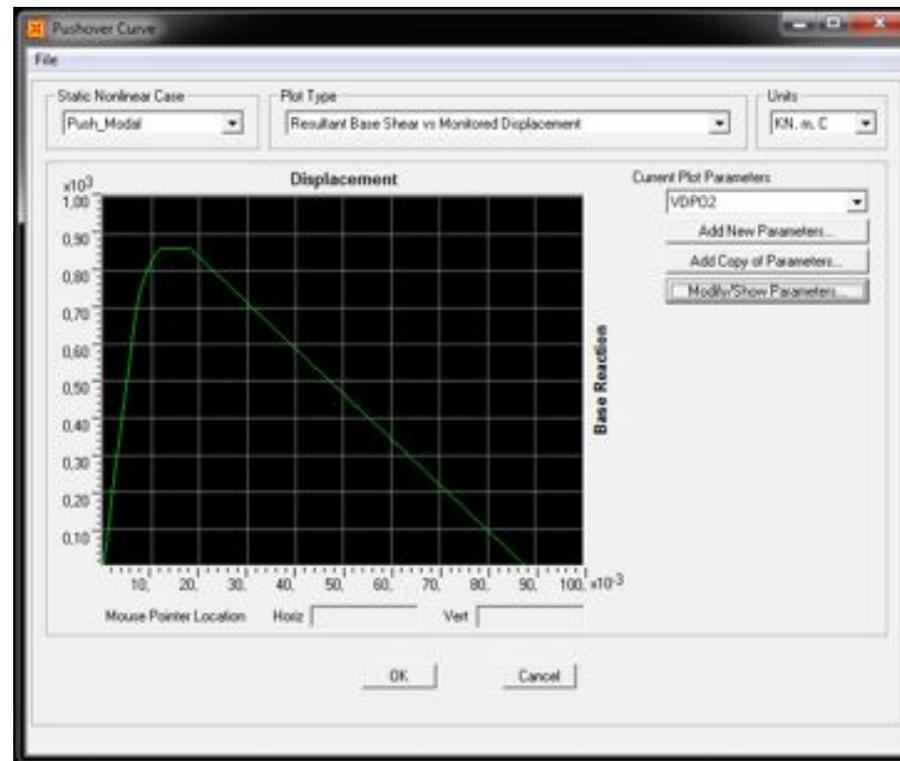
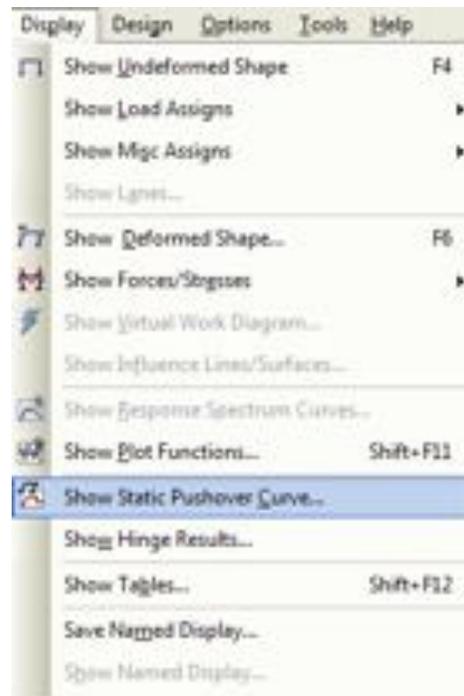


TÉCNICO  
LISBOA

## 4. Análise Estática Não Linear (*Pushover*)

Análise *Pushover*: Analyse > Run Analysis...

Display > Show Static Pushover Curve...





TÉCNICO  
LISBOA

## 4. Análise Estática Não Linear (*Pushover*)

Análise *Pushover*: Analyse > Run Analysis...

Seleccionar Nó de Controlo > Display > Show Tables...

The image shows a software interface for selecting tables to display. The main window is titled "Choose Tables for Display" and has an "Edit" button. It contains a tree view with the following structure:

- MODEL DEFINITION (0 of 70 tables selected)
  - System Data
  - Property Definitions
  - Load Pattern Definitions
  - Other Definitions
  - Load Case Definitions
  - Bridge Data
  - Connectivity Data
  - Joint Assignments
  - Frame Assignments
  - Options/Preferences Data
  - Miscellaneous Data
- ANALYSIS RESULTS (2 of 13 tables selected)
  - Joint Output
    - Displacements
    - Reactions
    - Joint Masses
  - Element Output
  - Structure Output
    - Base Reaction
    - Model Information

On the right side, there are several panels:

- Load Patterns (Model Def.): Select Load Patterns... (1 of 1 Selected)
- Load Cases (Results): Select Load Cases... (1 of 4 Selected)
- Options: Selection Only (checked), Show Unformatted (unchecked)
- Named Sets: Save Named Set..., Show Named Set..., Delete Named Set...

At the bottom, there is a menu with the following options:

- Export Current Table
- Display Current Table
- Print Current Table as Text File
- Export All Tables (To Excel)
- Display All Tables (To Access)

Two sub-dialogs are shown to the right:

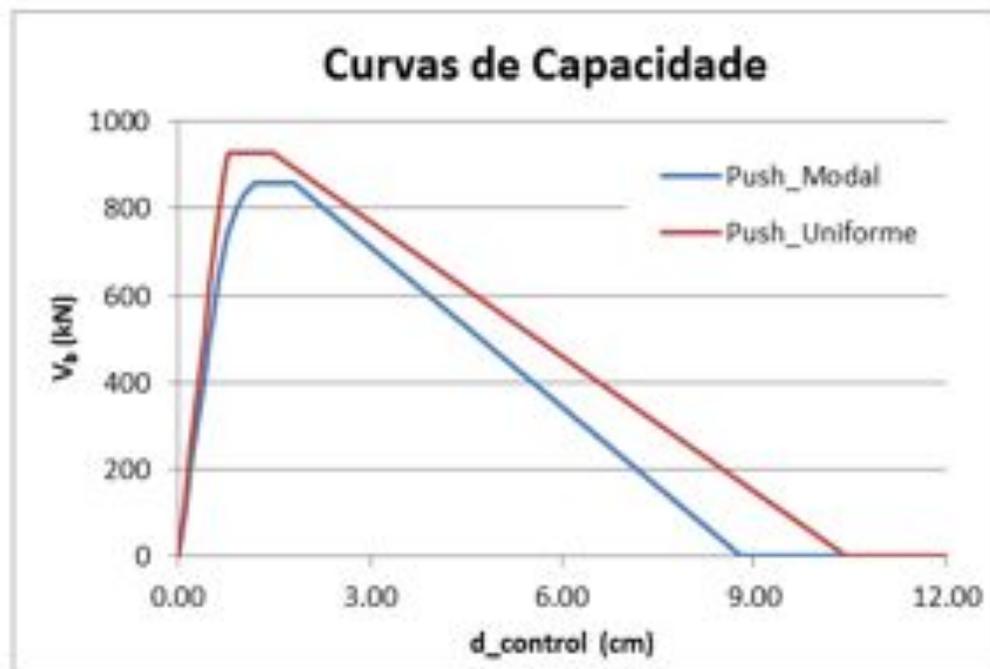
- "Select Load Cases" dialog: Select (DEAD, MODAL, Push Modal, Push Uniform)
- "Nonlinear Static Results" dialog: Envelopes, Step-by-Step (selected), Last Step

Arrows indicate the flow of the process: from the "Select Load Cases" button in the main dialog to the "Select Load Cases" sub-dialog, and from the "Modify/Show Options..." button to the "Nonlinear Static Results" sub-dialog. A red dotted arrow points from the "Export All Tables" menu item to the "OK" button in the main dialog.



TÉCNICO  
LISBOA

## 4. Análise Estática Não Linear (*Pushover*)



Distribuição Modal			Distribuição Uniforme		
StepNum	U1	GlobalFX	StepNum	U1	GlobalFX
Unitless	m	KN	Unitless	m	KN
...	...	...	...	...	...
15	0,02	859,76	15	0,01	927,94
16	0,02	859,76	16	0,01	927,94
17	0,02	859,76	17	0,01	927,94
18	0,02	859,76	18	0,01	927,94
19	0,09	1,18	19	0,10	2,27
20	0,09	1,18	20	0,11	2,27

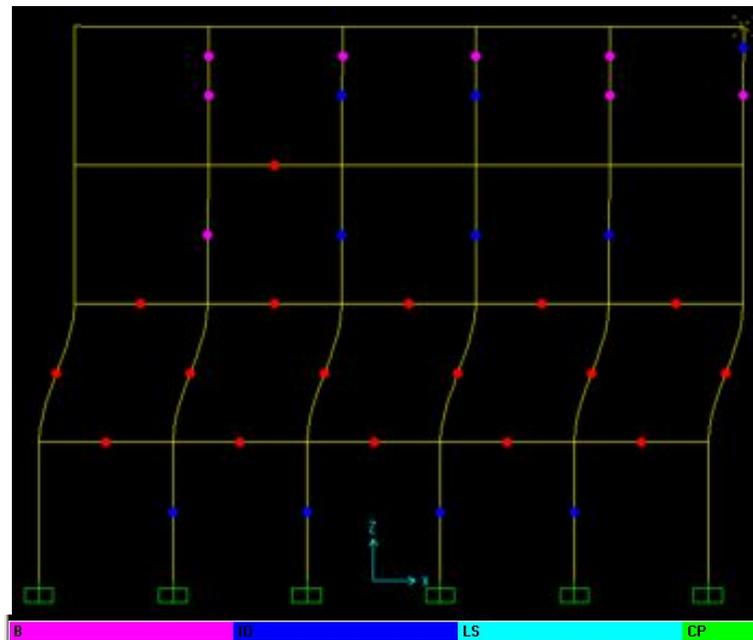


TÉCNICO  
LISBOA

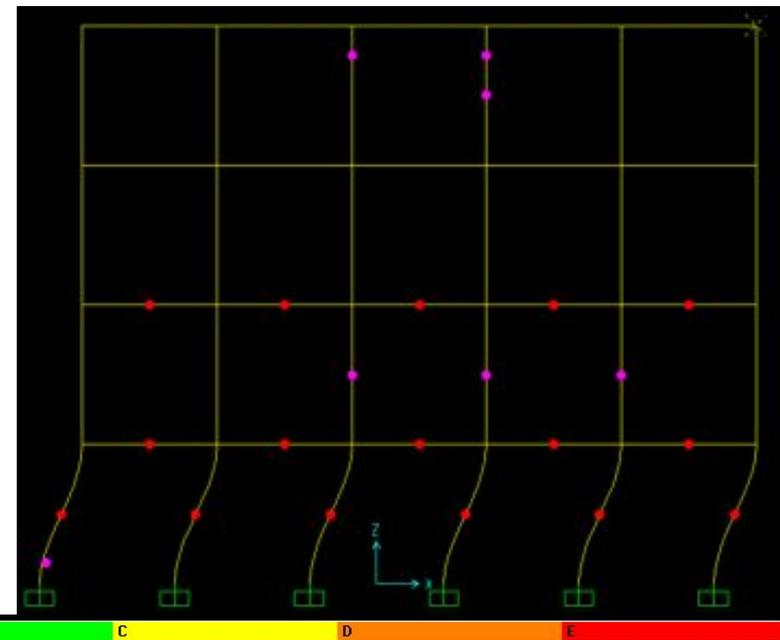
## 4. Análise Estática Não Linear (*Pushover*)

Análise *Pushover*: Analyse > Run Analysis...

Display > Deformed Shape... > **Step 19**



Distribuição Modal



Distribuição Uniforme



TÉCNICO  
LISBOA



## 5.2. Exemplo de Aplicação – Tremuri

---

- Desenvolvido pela *STA Data* ([www.stadata.com](http://www.stadata.com)) em cooperação com a Universidade de Génova (UNIGE, Itália).
- Análise estrutural e verificação da segurança de edifícios de alvenaria simples, armada ou mista com alvenaria/b.a./aço/madeira e reforçados com *FRPs*.

### **3Muri – Versão Comercial**

Verificação da segurança sísmica através de análises estáticas não lineares (*pushover*) e análise modal da estrutura.

### **Tremuri (Galasco et al., 2009) – Versão Científica**

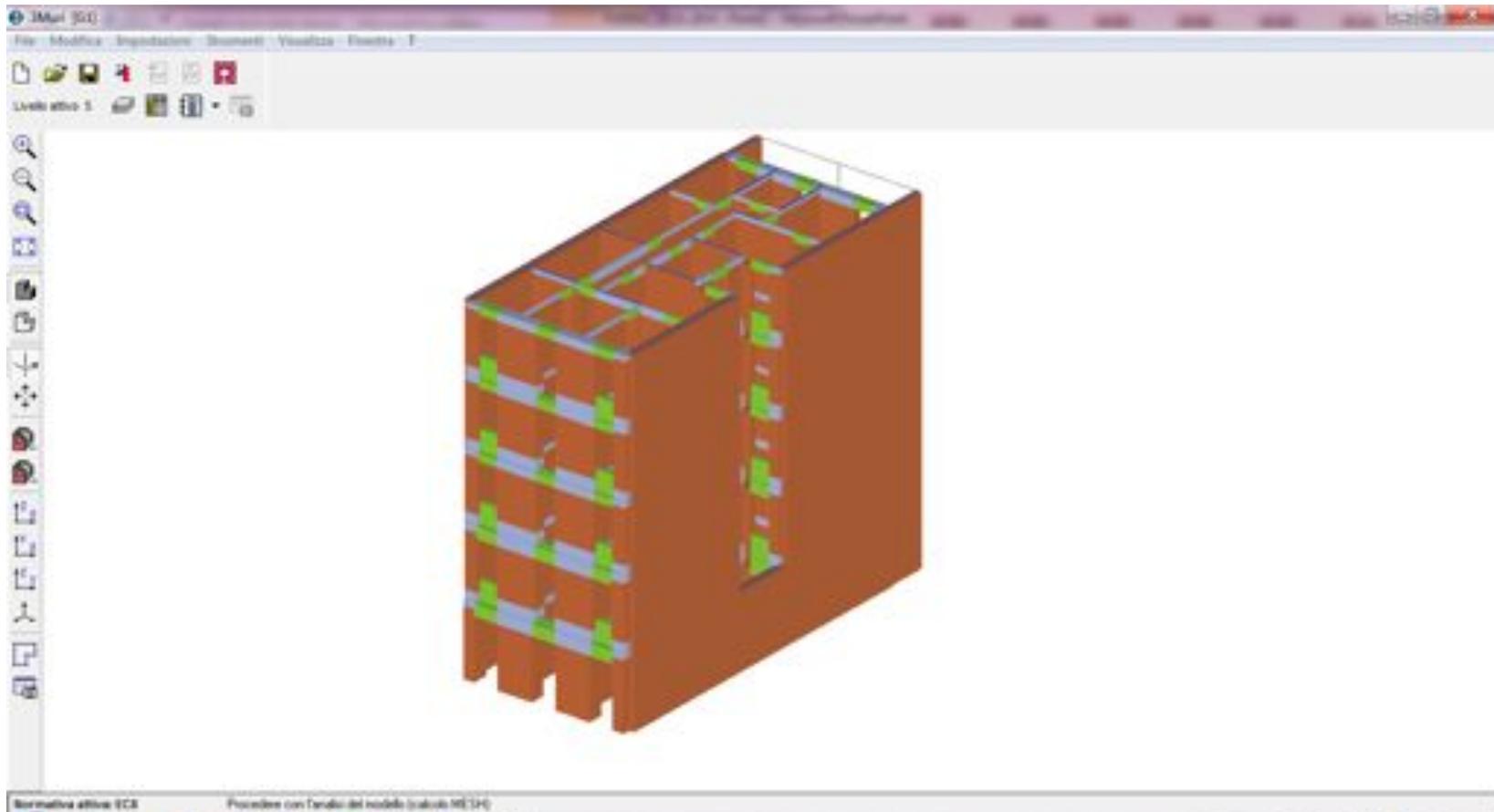
Permite, por exemplo, efectuar análises dinâmicas com integração no tempo.

**Referências Regulamentares:** Eurocódigo 8, Regulamento Italiano NTC08



TÉCNICO  
LISBOA

## 5.2. Exemplo de Aplicação – Tremuri





TÉCNICO  
LISBOA

## 5.2. Exemplo de Aplicação – Tremuri

- Desenvolvido pela *STA Data* ([www.stadata.com](http://www.stadata.com)) em cooperação com a Universidade de Génova (UNIGE, Itália).
- Análise estrutural e verificação da segurança de edifícios de alvenaria simples, armada ou mista com alvenaria/b.a./aço/madeira e reforçados com *FRPs*.

### 3Muri – Versão Comercial

Verificação da segurança sísmica através de análises estáticas não lineares (*pushover*) e análise modal da estrutura.

### Tremuri (Galasco et al., 2009) – Versão Científica

Permite, por exemplo, efectuar análises dinâmicas com integração no tempo.

**Referências Regulamentares:** Eurocódigo 8, Regulamento Italiano NTC08





TÉCNICO  
LISBOA

## 5.2. Exemplo de Aplicação – Tremuri

- Desenvolvido pela *STA Data* ([www.stadata.com](http://www.stadata.com)) em cooperação com a Universidade de Génova (UNIGE, Itália).
- Análise estrutural e verificação da segurança de edifícios de alvenaria simples, armada ou mista com alvenaria/b.a./aço/madeira e reforçados com *FRPs*.

### 3Muri – Versão Comercial

Verificação da segurança sísmica através de análises estáticas não lineares (*pushover*) e análise modal da estrutura.

### Tremuri (Galasco et al., 2009) – Versão Científica

Permite, por exemplo, efectuar análises dinâmicas com integração no tempo.

**Referências Regulamentares:** Eurocódigo 8, Regulamento Italiano NTC08





TÉCNICO  
LISBOA

## 5.2. Exemplo de Aplicação – Tremuri

- Desenvolvido pela *STA Data* ([www.stadata.com](http://www.stadata.com)) em cooperação com a Universidade de Génova (UNIGE, Itália).
- Análise estrutural e verificação da segurança de edifícios de alvenaria simples, armada ou mista com alvenaria/b.a./aço/madeira e reforçados com *FRPs*.

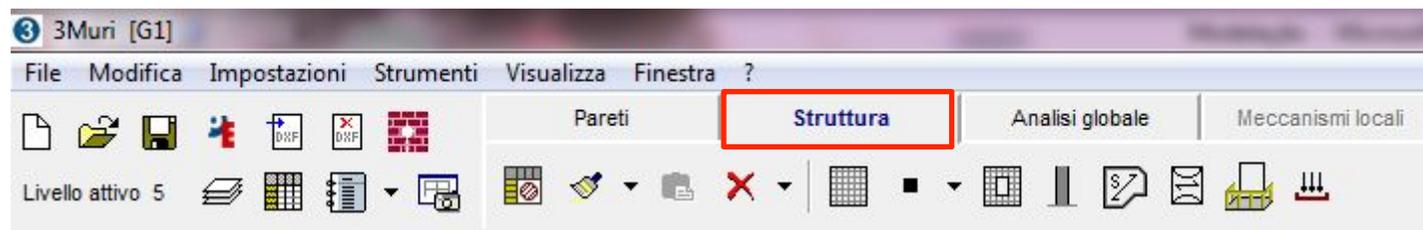
### 3Muri – Versão Comercial

Verificação da segurança sísmica através de análises estáticas não lineares (*pushover*) e análise modal da estrutura.

### Tremuri (Galasco et al., 2009) – Versão Científica

Permite, por exemplo, efectuar análises dinâmicas com integração no tempo.

**Referências Regulamentares:** Eurocódigo 8, Regulamento Italiano NTC08





TÉCNICO  
LISBOA

## 5.2. Exemplo de Aplicação – Tremuri

- Desenvolvido pela *STA Data* ([www.stadata.com](http://www.stadata.com)) em cooperação com a Universidade de Génova (UNIGE, Itália).
- Análise estrutural e verificação da segurança de edifícios de alvenaria simples, armada ou mista com alvenaria/b.a./aço/madeira e reforçados com *FRPs*.

### 3Muri – Versão Comercial

Verificação da segurança sísmica através de análises estáticas não lineares (*pushover*) e análise modal da estrutura.

### Tremuri (Galasco et al., 2009) – Versão Científica

Permite, por exemplo, efectuar análises dinâmicas com integração no tempo.

**Referências Regulamentares:** Eurocódigo 8, Regulamento Italiano NTC08



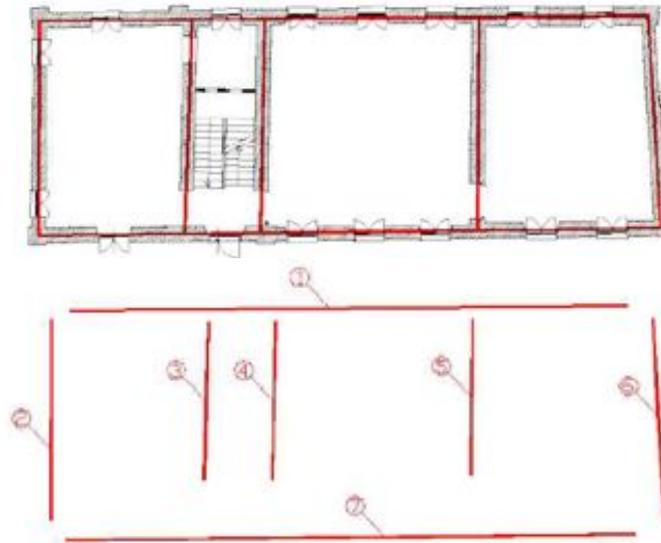


TÉCNICO  
LISBOA

## 5.2. Exemplo de Aplicação – Tremuri

### Discretização da Estrutura – Geometria

- Definição dos alinhamentos de paredes e aberturas por piso.



Definição dos alinhamentos das paredes.

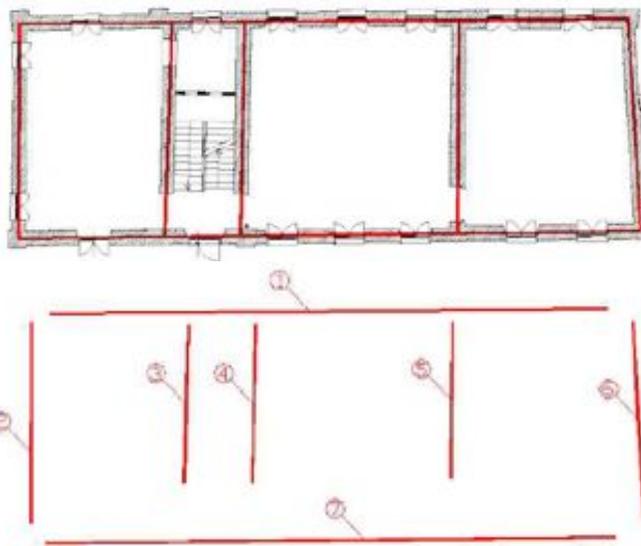


TÉCNICO  
LISBOA

## 5.2. Exemplo de Aplicação – Tremuri

### Discretização da Estrutura – Geometria

- Definição dos alinhamentos de paredes e aberturas por piso.



Importação de  
ficheiros  
DXF ou DWG

Definição dos alinhamentos das paredes.

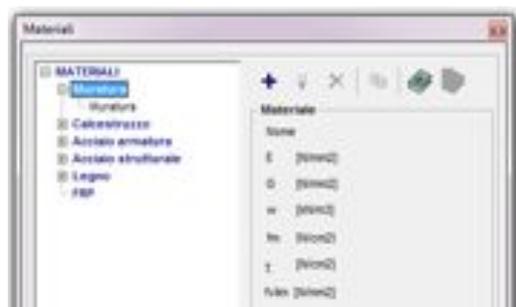
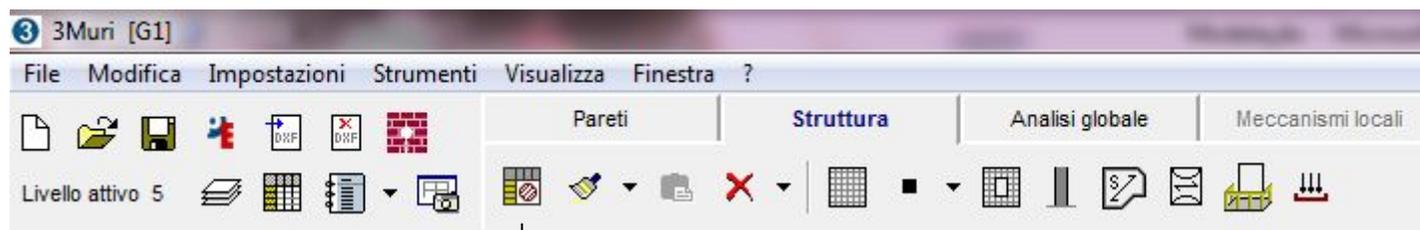




TÉCNICO  
LISBOA

## 5.2. Exemplo de Aplicação – Tremuri

### Discretização da Estrutura – Elementos



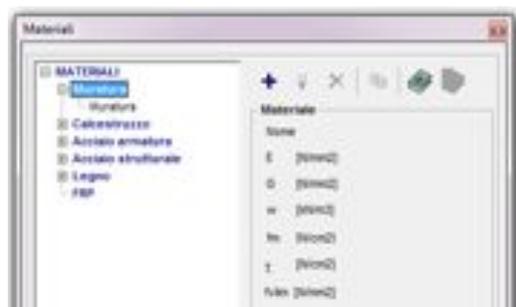
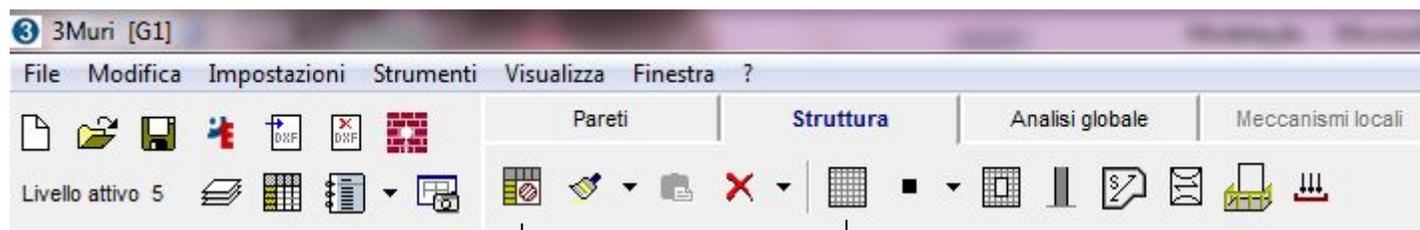
Definição do Material ←



TÉCNICO  
LISBOA

## 5.2. Exemplo de Aplicação – Tremuri

### Discretização da Estrutura – Elementos



Definição do Material

Definição Tipo de Elemento





TÉCNICO  
LISBOA

## 5.2. Exemplo de Aplicação – Tremuri

### Discretização da Estrutura – Elementos

3Muri [G1]

File Modifica Impostazioni Strumenti Visualizza Finestra ?

Pareti **Struttura** Analisi globale Meccanismi locali

Livello attivo 5

Definição do Material

Definição Tipo de Elemento

Introdução de nós

Aberturas

Colunas

Definizione caratteristiche

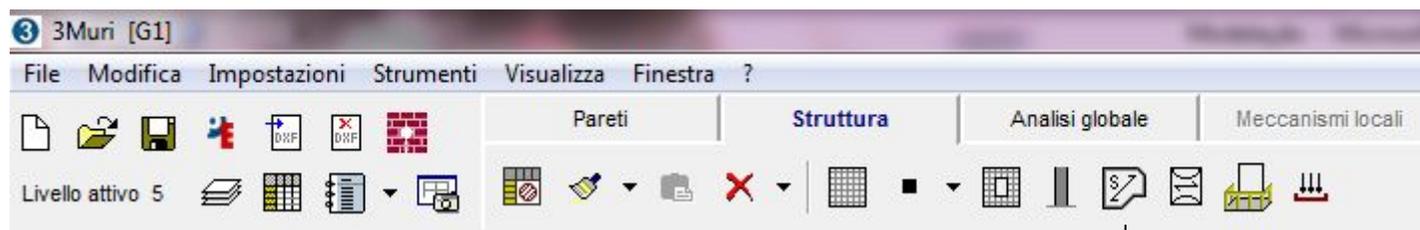
Pannello murario	Pannello + Cordolo C.A.	Pannello + Trave Acciaio / Legno			
Pannello + Catena	Setto C.A.	Trave C.A.	Trave Acciaio / Legno	Catena	Nessuna definizione



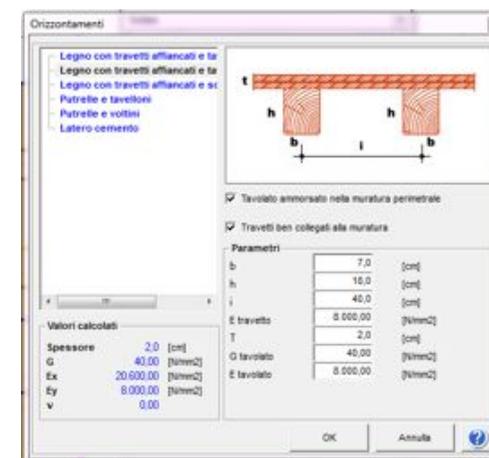
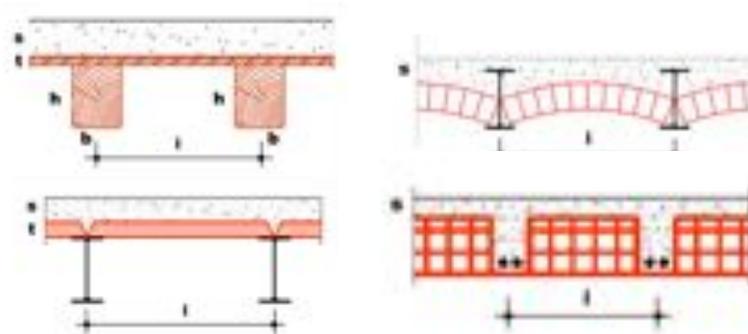
TÉCNICO  
LISBOA

## 5.2. Exemplo de Aplicação – Tremuri

### Discretização da Estrutura – Elementos



→ Pavimentos

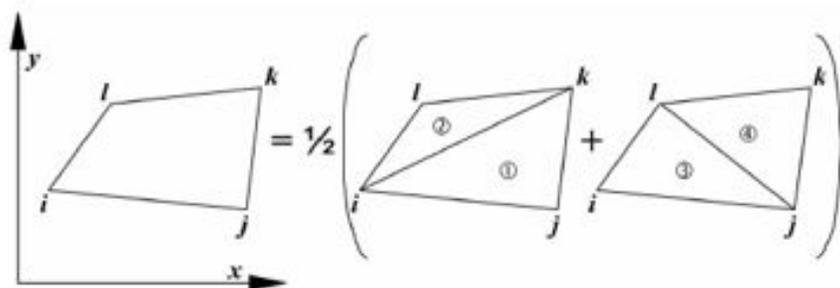
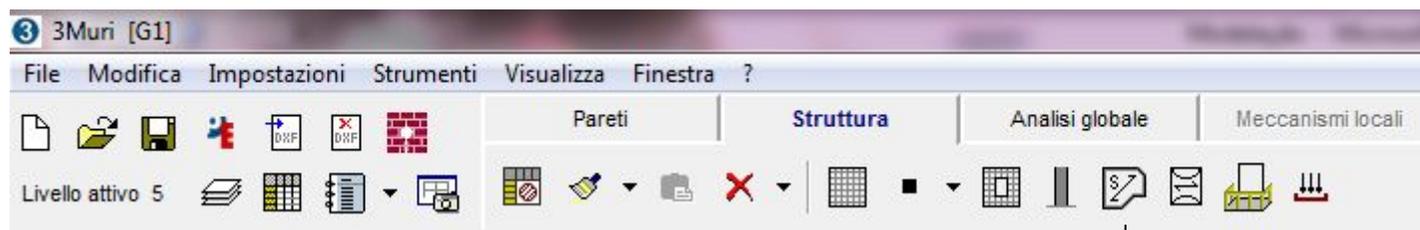




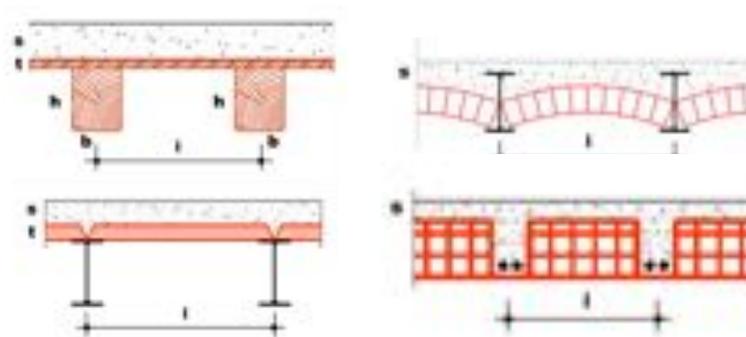
TÉCNICO  
LISBOA

## 5.2. Exemplo de Aplicação – Tremuri

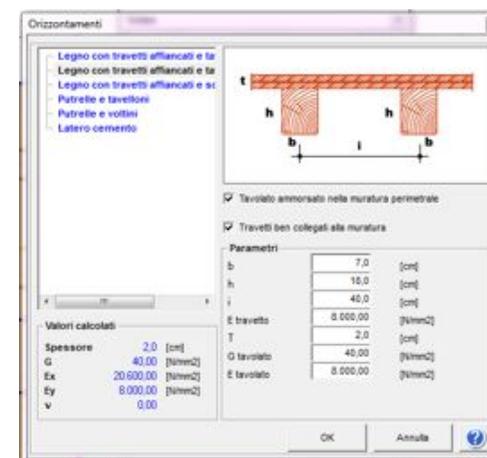
### Discretização da Estrutura – Elementos



Elemento finito de membrana ortotrópicos com 3-4 nós



→ Pavimentos

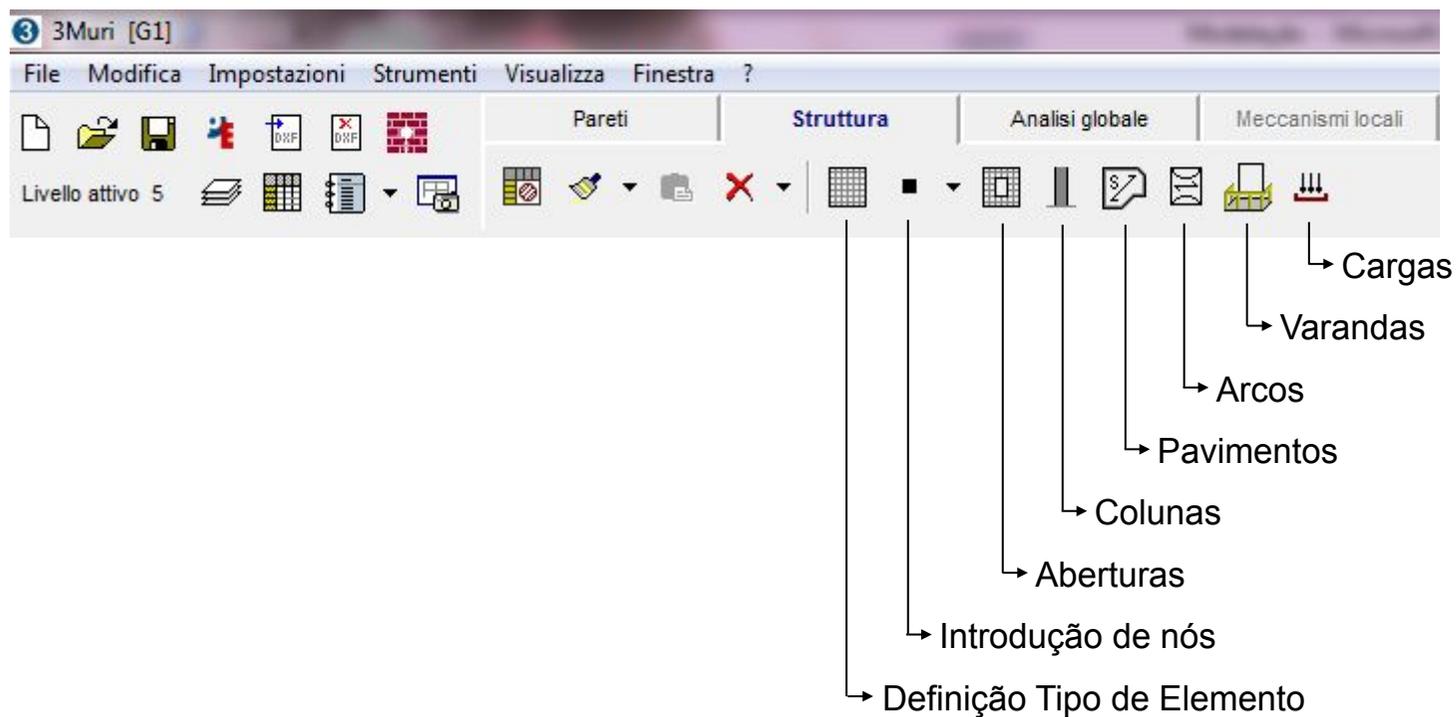




TÉCNICO  
LISBOA

## 5.2. Exemplo de Aplicação – Tremuri

### Discretização da Estrutura – Elementos

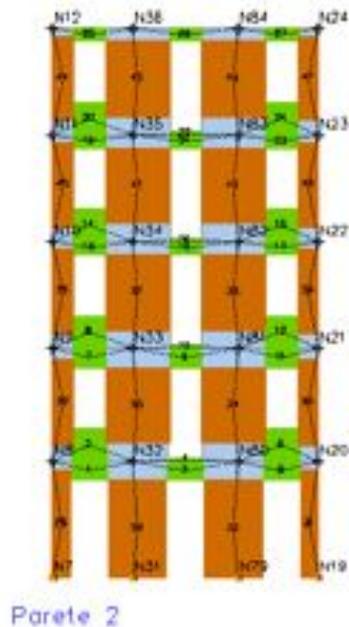




TÉCNICO  
LISBOA

## 5.2. Exemplo de Aplicação – Tremuri

### Análise Global da Estrutura



- Malha de Elementos Parede i (**Edição**)
- Planta da Estrutura
- **Geração Malha de Elementos**



TÉCNICO  
LISBOA

## 5.2. Exemplo de Aplicação – Tremuri

### Análise Global da Estrutura

3Muri [G1]

File Modifica Impostazioni Strumenti Visualizza Finestra ?

Pareti | Estrutura | **Analisi globale** | Meccanismi locali

Livello attivo 5

N12 N38 N84 N24  
N11 N35 N43 N13  
N14 N34 N42 N27  
N10 N33 N41 N21  
N8 N32 N40 N20  
N7 N21 N25 N19

Parete 2

Visualização dos Resultados

Análise Estática Não Linear

Definição da Acção Sísmica

Malha de Elementos Parede i (Edição)

Planta da Estrutura

Geração Malha de Elementos



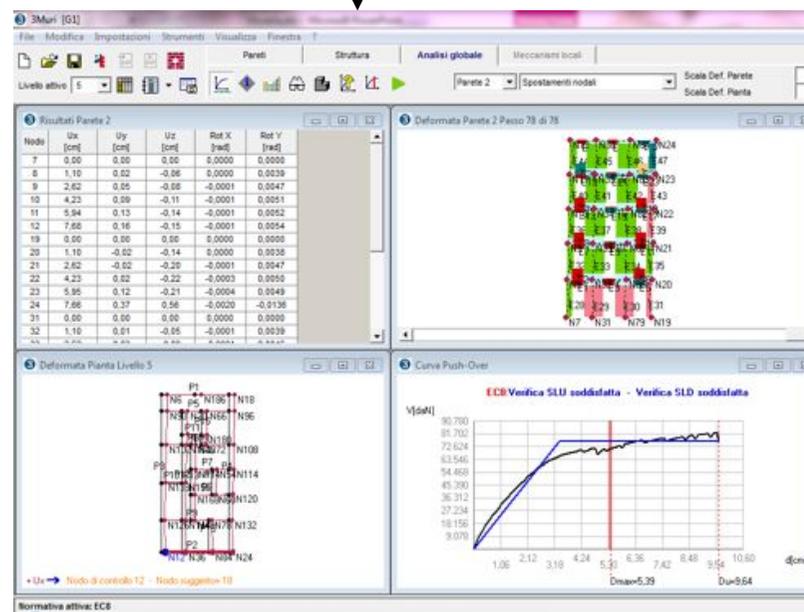
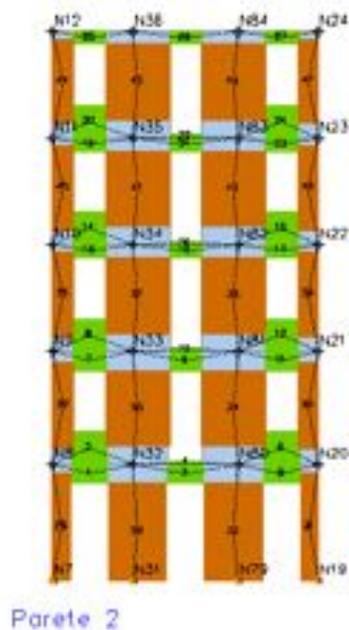
TÉCNICO  
LISBOA

## 5.2. Exemplo de Aplicação – Tremuri

### Análise Global da Estrutura



Visualizzazione dei Risultati





TÉCNICO  
LISBOA

## 5.2. Exemplo de Aplicação – Tremuri

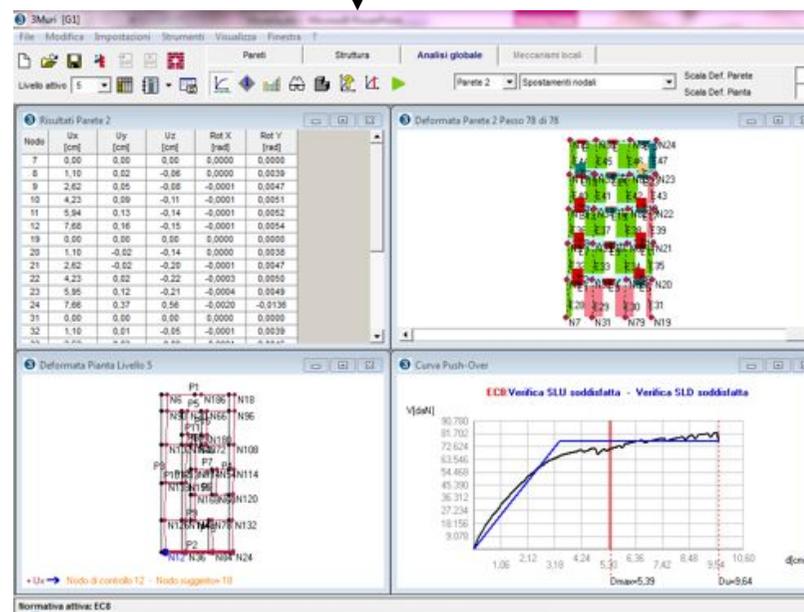
### Análise Global da Estrutura



Evolução Danos



Visualização dos Resultados





TÉCNICO  
LISBOA

## 5.2. Exemplo de Aplicação – Tremuri

### Análise Global da Estrutura

3Muri [G1]

File Modifica Impostazioni Strumenti Visualizza Finestra ?

Pareti | Struttura | **Analisi globale** | Meccanismi locali

Livello attivo 5

N12 N18 N24 N24  
N11 N15 N21 N23  
N17 N14 N20 N22  
N10 N13 N19 N21  
N6 N12 N18 N20  
N7 N11 N15 N19

Parete 2

- Análise Modal
- Verificação Estática
- Visualização dos Resultados
- Análise Estática Não Linear
- Definição da Acção Sísmica
- Malha de Elementos Parede i (Edição)
- Planta da Estrutura
- Geração Malha de Elementos



TÉCNICO  
LISBOA



## 6. Casos de Estudo

The screenshot shows a website page with a green header. The main title is 'SEISMIC VULNERABILITY of Old Masonry Buildings'. On the left is a navigation menu with links for Home, Project, Dissemination, and News. The main content area has a 'Summary' section with three paragraphs of text and a 3D structural model of a building. Below the summary is a 'Latest News' section with three entries: '22/05/2013 - Training Course', '10/10/2011 - Seminar', and '09/09/2011 - Research Grant'. At the bottom left are logos for FCT and ICIST. At the bottom right is the URL 'http://severes.org'. A small vertical text on the right edge of the screenshot reads 'Copyright (c) 2010 by ICIST. All rights reserved. ICIST is a project of the Portuguese Government. ICIST is a project of the Portuguese Government. ICIST is a project of the Portuguese Government.'

<http://severes.org>

All rights reserved © ICIST 2010



TÉCNICO  
LISBOA



## 6. Casos de Estudo

---

**Objectivo:** definir a vulnerabilidade sísmica dos edifícios antigos de alvenaria da cidade de Lisboa, nomeadamente edifícios Pombalinos, Gaioleiros e Placa



TÉCNICO  
LISBOA

## 6. Casos de Estudo

---

**Objectivo:** definir a vulnerabilidade sísmica dos edifícios antigos de alvenaria da cidade de Lisboa, nomeadamente edifícios Pombalinos, Gaioleiros e Placa

- Identificar as características geométricas e estruturais das várias tipologias de edifícios





TÉCNICO  
LISBOA

## 6. Casos de Estudo

---

**Objectivo:** definir a vulnerabilidade sísmica dos edifícios antigos de alvenaria da cidade de Lisboa, nomeadamente edifícios Pombalinos, Gaioleiros e Placa

### Pombalino

(>1755)



- Construção depois do **Sismo de 1755**
- Paredes exteriores em alvenaria de pedra e pisos de madeira
- **Paredes interiores com estrutura de madeira-alvenaria (paredes de frontal)**



TÉCNICO  
LISBOA

## 6. Casos de Estudo

**Objectivo:** definir a vulnerabilidade sísmica dos edifícios antigos de alvenaria da cidade de Lisboa, nomeadamente edifícios Pombalinos, Gaioleiros e Placa

### Pombalino

(>1755)



- Construção depois do **Sismo de 1755**
- Paredes exteriores em alvenaria de pedra e pisos de madeira
- **Paredes interiores com estrutura de madeira-alvenaria (paredes de frontal)**

### Gaioleiro

(1880-1940)



- **Edifícios mais altos** com paredes exteriores em alvenaria de pedra e pisos de madeira
- **Paredes interiores em alvenaria de tijolo**



TÉCNICO  
LISBOA

## 6. Casos de Estudo

**Objectivo:** definir a vulnerabilidade sísmica dos edifícios antigos de alvenaria da cidade de Lisboa, nomeadamente edifícios Pombalinos, Gaioleiros e Placa

### Pombalino

(>1755)



- Construção depois do **Sismo de 1755**
- Paredes exteriores em alvenaria de pedra e pisos de madeira
- **Paredes interiores com estrutura de madeira-alvenaria (paredes de frontal)**

### Gaioleiro

(1880-1940)



- **Edifícios mais altos** com paredes exteriores em alvenaria de pedra e pisos de madeira
- **Paredes interiores em alvenaria de tijolo**

### Placa

(1940-1960)



- Paredes exteriores de alvenaria de pedra e blocos de cimentos
- Pisos de madeira ou em **betão armado**
- Pórticos de **betão armado**, principalmente na traseira dos edifícios



TÉCNICO  
LISBOA

## 6. Casos de Estudo

---

**Objectivo:** definir a vulnerabilidade sísmica dos edifícios antigos de alvenaria da cidade de Lisboa, nomeadamente edifícios Pombalinos, Gaioleiros e Placa

- Identificar as características geométricas e estruturais das várias tipologias 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





TÉCNICO  
LISBOA

## 6. Casos de Estudo

**Objectivo:** definir a vulnerabilidade sísmica dos edifícios antigos de alvenaria da cidade de Lisboa, nomeadamente edifícios Pombalinos, Gaioleiros e Placa

- Identificar as características geométricas e estruturais das várias tipologias 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



**Ensaios de  
Compressão Diagonal**



**Ensaios Triplet**



**Ensaios de  
Compressão**



TÉCNICO  
LISBOA

## 6. Casos de Estudo

**Objectivo:** definir a vulnerabilidade sísmica dos edifícios antigos de alvenaria da cidade de Lisboa, nomeadamente edifícios Pombalinos, Gaioleiros e Placa

- Identificar as características geométricas e estruturais das várias tipologias 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



**Ensaio de Macacos  
Planos Simples**



**Ensaio de Macacos  
Planos Duplo**



**Ensaio de Macacos  
Planos – Corte**



TÉCNICO  
LISBOA

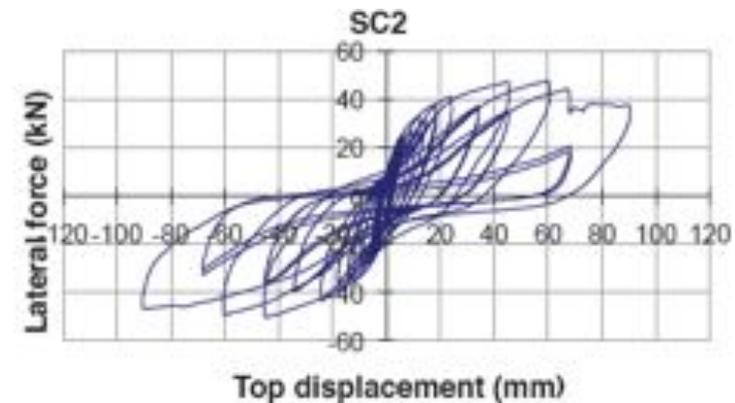
## 6. Casos de Estudo

**Objectivo:** definir a vulnerabilidade sísmica dos edifícios antigos de alvenaria da cidade de Lisboa, nomeadamente edifícios Pombalinos, Gaioleiros e Placa

- Identificar as características geométricas e estruturais das várias tipologias 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



**Ensaios Cíclicos de  
Paredes de Frontal Pombalino**





TÉCNICO  
LISBOA



## 6. Casos de Estudo

---

**Objectivo:** definir a vulnerabilidade sísmica dos edifícios antigos de alvenaria da cidade de Lisboa, nomeadamente edifícios Pombalinos, Gaioleiros e Placa

- Identificar as características geométricas e estruturais das várias tipologias 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 que permitam simular de forma adequada o comportamento não linear dos elementos estruturais e a realização de análises estáticas não lineares.

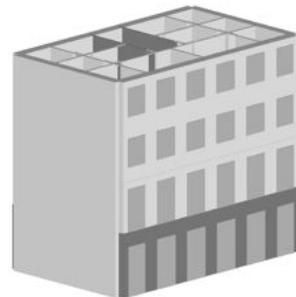


TÉCNICO  
LISBOA

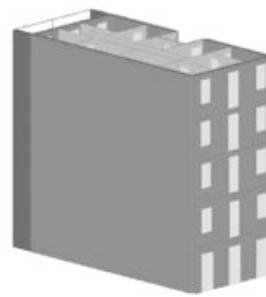
## 6. Casos de Estudo

**Objectivo:** definir a vulnerabilidade sísmica dos edifícios antigos de alvenaria da cidade de Lisboa, nomeadamente edifícios Pombalinos, Gaioleiros e Placa

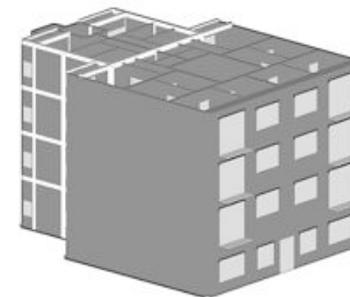
- Identificar as características geométricas e estruturais das várias tipologias de edifícios
- Realizar trabalho experimental, laboratorial e *in-situ*, de forma a caracterizar as propriedades mecânicas dos materiais e o comportamento cíclico de alguns elementos estruturais
- Desenvolver modelos analíticos que permitam simular de forma adequada o comportamento não linear dos elementos estruturais e a realização de análises estáticas não lineares.



**Pombalino**



**Gaioleiro**



**Placa**



TÉCNICO  
LISBOA



## 6. Casos de Estudo

---

**Objectivo:** definir a vulnerabilidade sísmica dos edifícios antigos de alvenaria da cidade de Lisboa, nomeadamente edifícios Pombalinos, Gaioleiros e Placa

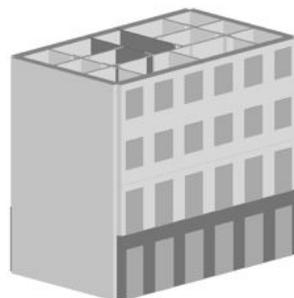
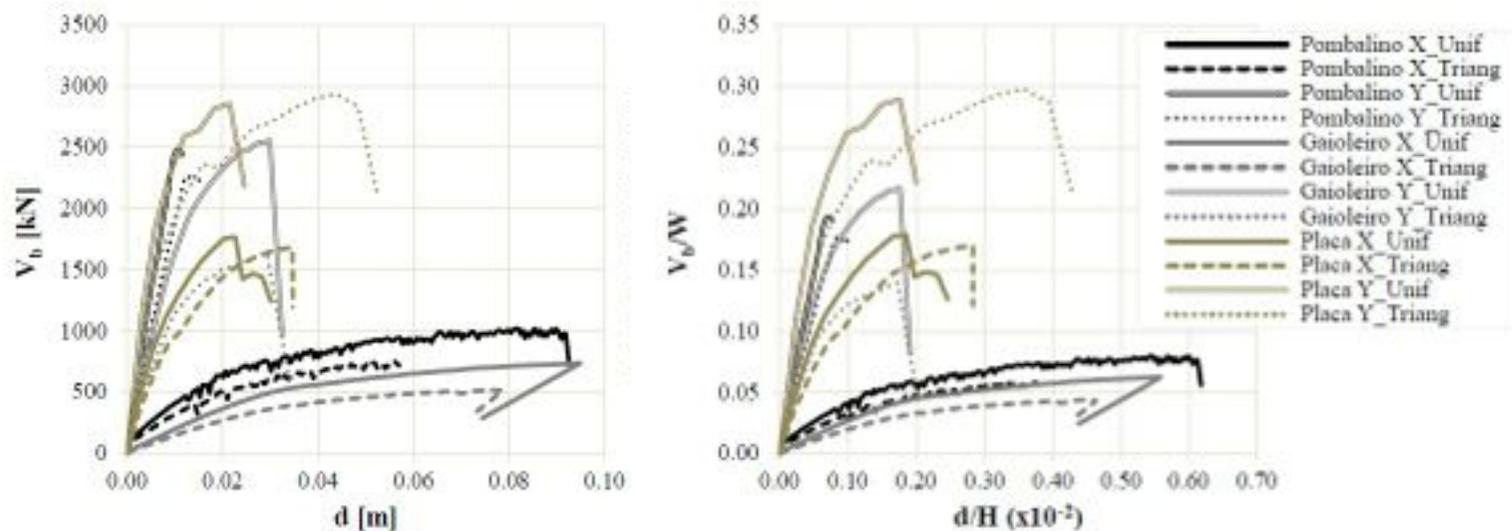
- Identificar as características geométricas e estruturais das várias tipologias de edifícios
- Realizar trabalho experimental, laboratorial e *in-situ*, de forma a caracterizar as propriedades mecânicas dos materiais e o comportamento cíclico de alguns elementos estruturais
- Desenvolver modelos analíticos que permitam simular de forma adequada o comportamento não linear dos elementos estruturais e a realização de análises estáticas não lineares.
- O 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 poderão ser posteriormente utilizadas pela comunidade científica e técnica como dado nos modelos de risco sísmico e perdas associadas.



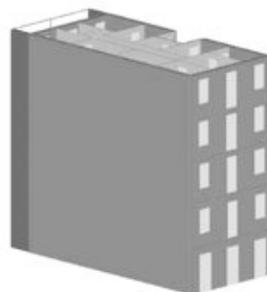
TÉCNICO  
LISBOA

## 6. Casos de Estudo

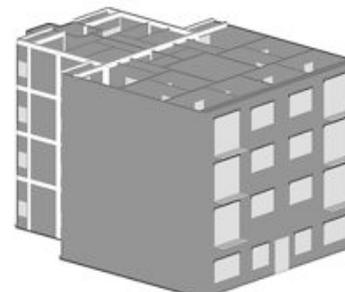
### Curvas de Capacidade resultantes da Análise Estática Não Linear



**Pombalino**



**Gaioleiro**  
Tipo I



**Placa**  
Rabo de Bacalhau  
Tipo D



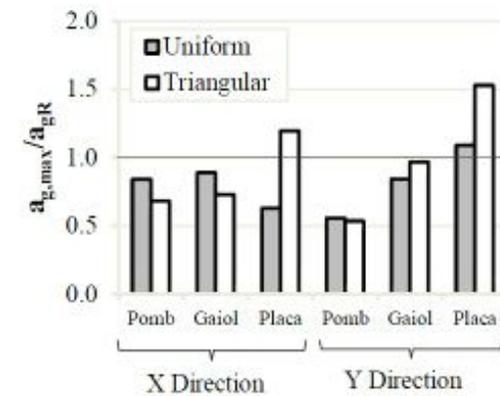
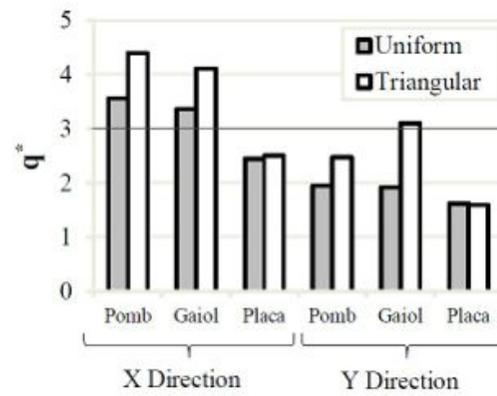
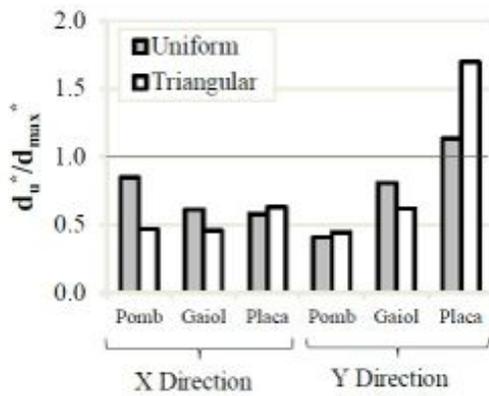
TÉCNICO  
LISBOA

## 6. Casos de Estudo

### Verificação de Segurança



$$d_u/d_{max} > 1$$
$$q^* < 3$$



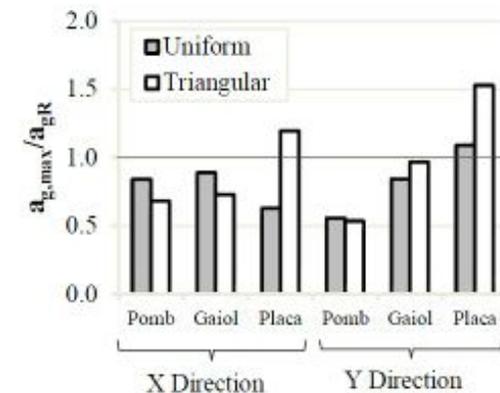
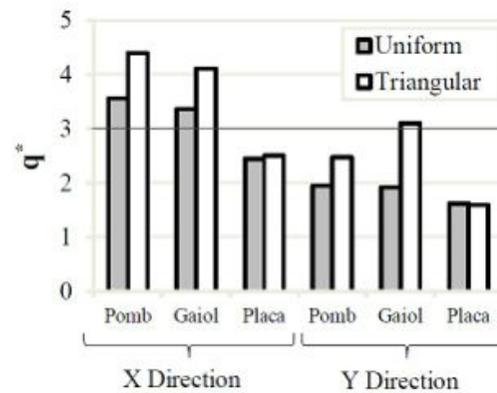
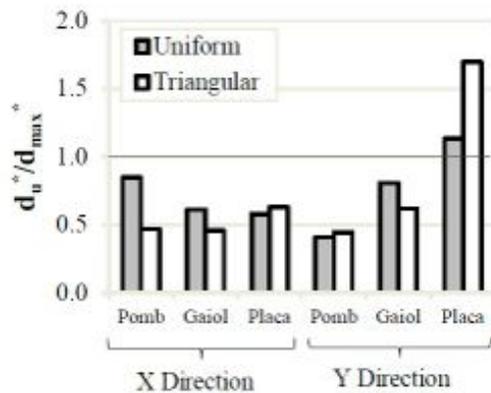
## 6. Casos de Estudo

### Verificação de Segurança



$$d_u/d_{max} > 1$$

$$q^* < 3$$



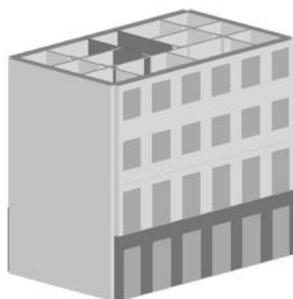
- **Apenas** o edifício de Placa verifica a segurança na direcção Y.
- **Edifício Pombalino e Gaioleiro capacidade de deformação insuficiente.**
- Aceleração máxima admissível na estrutura ( $a_{g,max}$ ) muito inferior à aceleração de pico ( $a_{gR}$ ). Excepção edifício de Placa na direcção X com distribuição pseudo-triangular e na direcção Y com ambas as distribuições de forças.



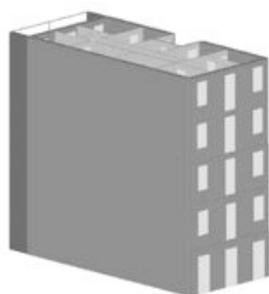
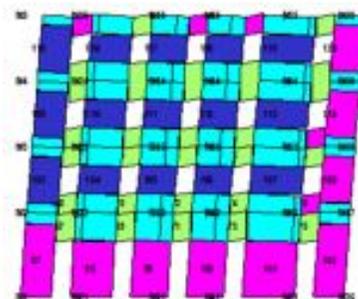
TÉCNICO  
LISBOA

## 6. Casos de Estudo

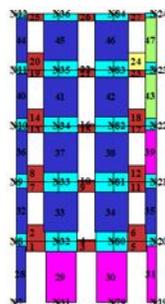
### Análise dos Danos na Estrutura ( $d_u \rightarrow 0.8 V_{b,max}$ )



Pombalino



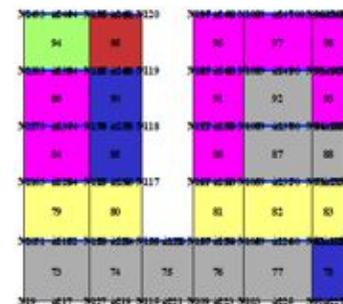
Gaioleiro  
Tipo I



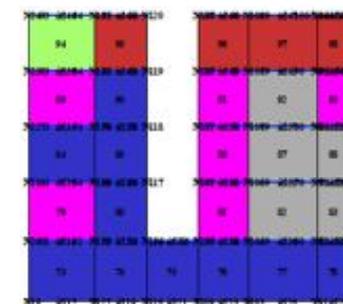
Uniforme



Triangular



Uniforme



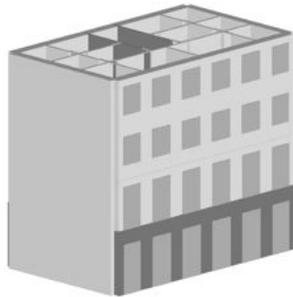
Triangular



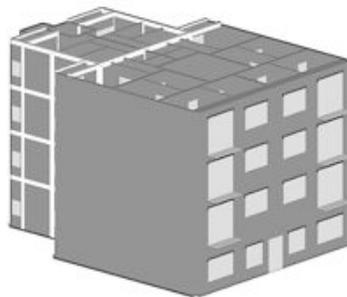
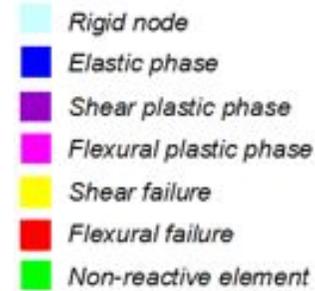
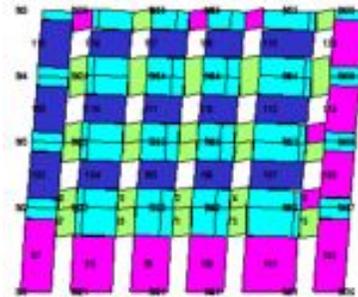
TÉCNICO  
LISBOA

## 6. Casos de Estudo

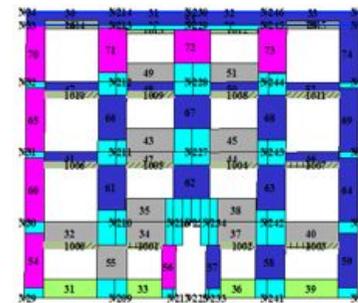
### Análise dos Danos na Estrutura ( $d_u \rightarrow 0.8 V_{b,max}$ )



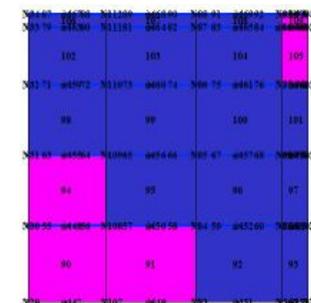
**Pombalino**



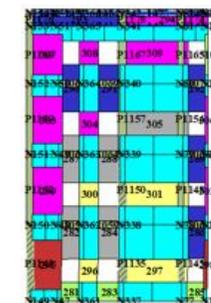
**Placa**  
Rabo de Bacalhau  
Tipo D



**Fachada**



**Empena**



**Rabo de Bacalhau**

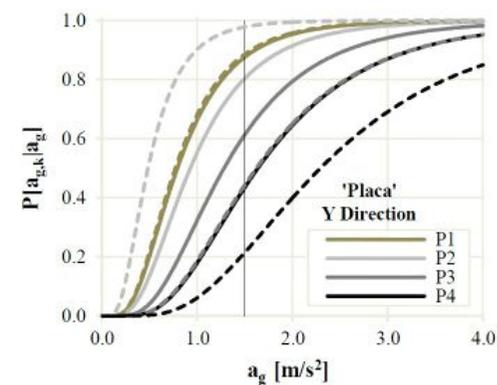
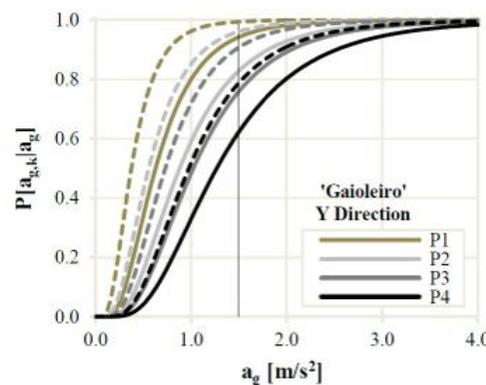
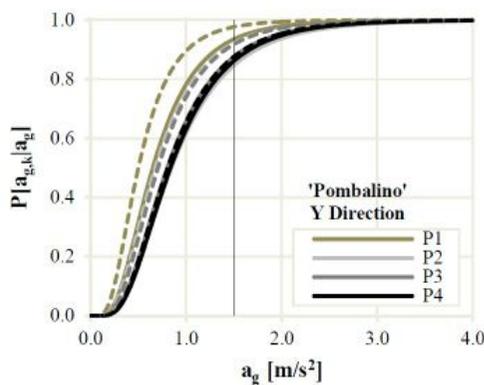
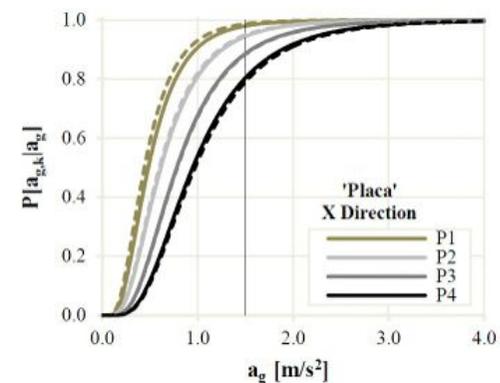
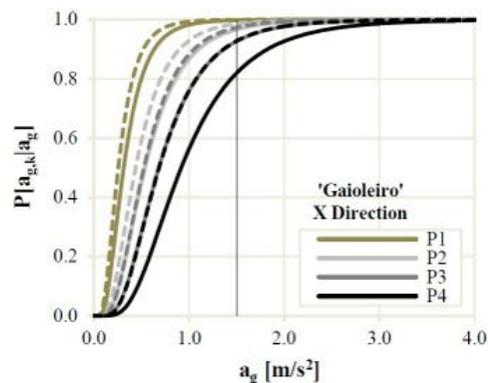
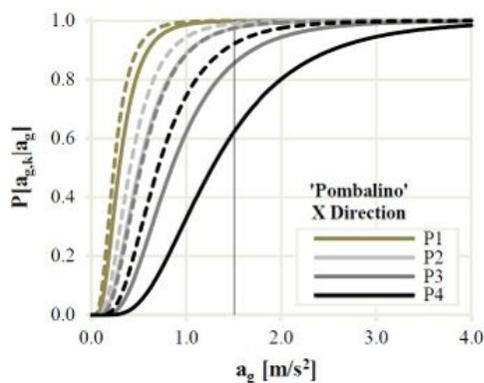


TÉCNICO  
LISBOA

## 6. Casos de Estudo

### Determinação das Curvas de Fragilidade

$$P[ds|S_d] = \Phi \left[ \frac{1}{\beta_{ds}} \ln \left( \frac{S_d}{\bar{S}_{d,ds}} \right) \right]$$

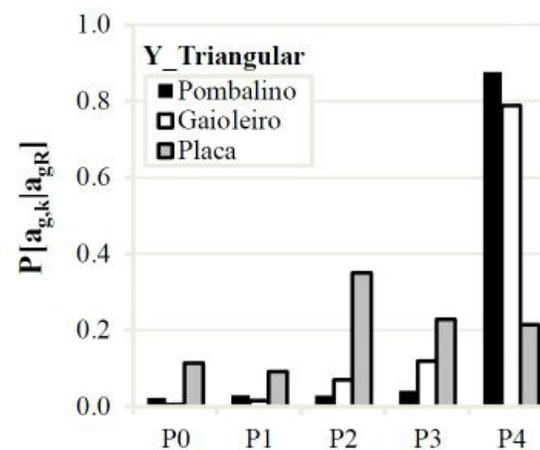
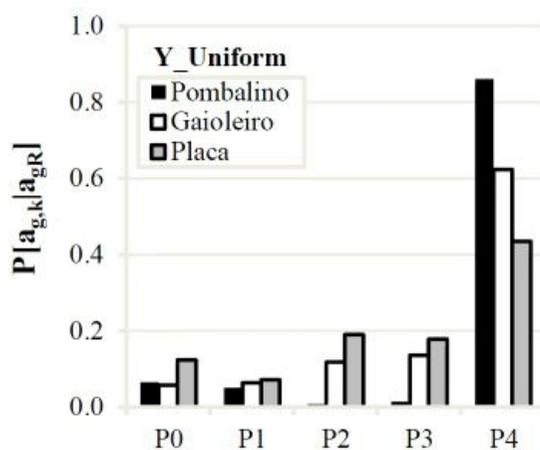
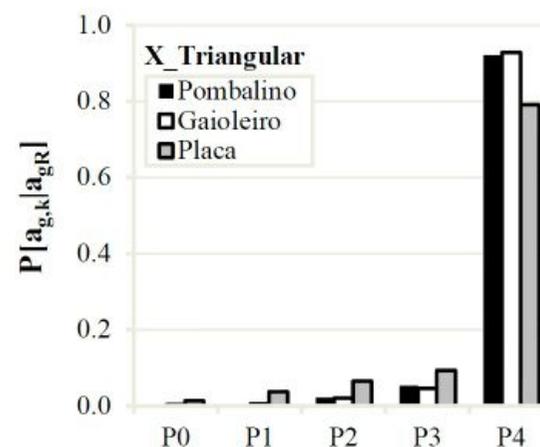
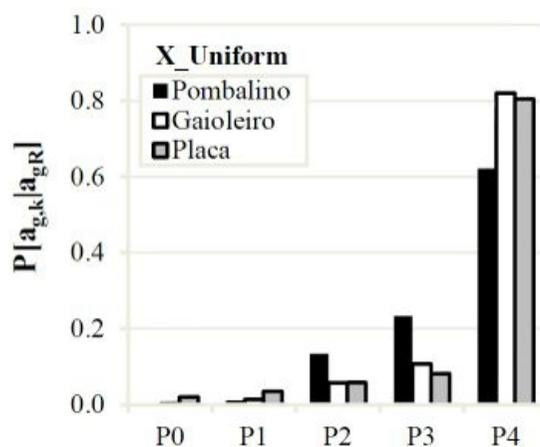




TÉCNICO  
LISBOA

## 6. Casos de Estudo

### Determinação da Probabilidade de Dano ( $a_{gR} = 1,5 \text{ m/s}^2$ )





TÉCNICO  
LISBOA

## 6. Casos de Estudo

The screenshot shows the website 'SEISMIC VULNERABILITY of Old Masonry Buildings'. The navigation menu on the left includes: HOME, PROJECT, DISSEMINATION, Publications (highlighted with a red box), and NEWS. The main content area is titled 'Publications' and is divided into two sections: 'Papers in international journals' and 'Books - Chapters'. The 'Papers in international journals' section lists three publications:

- [Mileonici J., Gago A., Lopes M., Bento R. 2013. "Experimental assessment of shear strength parameters on rubble stone masonry specimens". Construction and Building Materials, Elsevier, Vol. 47 \(2013\), 1372-1380.](#)
- [Mileonici J., Lopes M., Gago A., Bento R. 2013. "Testing and Modelling the Diagonal Tension Strength of Rubble Stone Masonry Panels". Engineering Structures, The Journal of earthquake, wind and ocean engineering, Vol. 52 \(2013\) 581-591.](#)
- [Meireles H., Bento R., Cattari S., Lagomarsino S. 2012. "A Hysteretic Model for "frontal" walls in Pombalino Buildings". Bulletin of Earthquake Engineering, Elsevier, Vol. 10, N. 5, 1481-1502 \(DOI: 10.1007/s10518-012-9360-0\)](#)

The 'Books - Chapters' section lists one publication:

- [Lopes M., Meireles H., Cattari S., Bento R., Lagomarsino S. 2013. Pombalino Constructions, Description and Seismic Assessment, 187-234, Capítulo do Livro Structural Rehabilitation of Old Buildings, Eds. Anibal Costa, João Miranda Guedes and Humberto Varum, Vol. 2, Springer.](#)

At the bottom of the page, there is a section for 'Papers in national journals' which is currently empty. The URL <http://severes.org> is displayed at the bottom left of the screenshot.



TÉCNICO  
LISBOA



## 7. Referências

---

Calderini, C.; Cattari, S.; Lagomarsino, S. (2009). In-plane strength of unreinforced masonry piers. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Volume 38, Issue 2, pp. 243-267.

Cattari S., Lagomarsino S. (2012). Performance-based approach to earthquake protection of masonry cultural heritage. SAHC Conference, Jerzy Jasieńko (ed) DWE, Wrocław, Poland, pp. 2914-2922.

Cattari S., Lagomarsino, S. (2013). Seismic assessment of mixed masonry-reinforced concrete buildings by non-linear static analyses. *Earthquake and Structures*, 4 (3).

Deliverable D26 (2012). Modelling strategies for seismic global response of building and local mechanisms. Perpetuate Project (downloadable from <http://www.perpetuate.eu>).

Galasco, A.; Lagomarsino, S.; Penna, A.; Resemini, S. (2004). Nonlinear analysis of masonry structures. 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, Canada.

Kappos, A., Penelis, G.; Drakopoulos, C. (2002) Evaluation of Simplified Models for Lateral Load Analysis of Unreinforced Masonry Buildings. *Journal of Earthquake Engineering*, Vol. 128, No. 7.

Lagomarsino, S.; Penna, A.; Galasco, A.; Cattari, S. (2013). TREMURI program: An equivalent frame model for the nonlinear seismic analysis of masonry buildings. *Engineering Structures*, Vol. 56, pp. 1787-1799.



TÉCNICO  
LISBOA



## 7. Referências

---

Lagomarsino, S.; Penna, A.; Galasco, A.; Cattari, S. (2012). TREMURI program: Seismic Analyses of 3D Masonry Buildings, Release 2.0. University of Genoa, Italy (mailto: tremuri@gmail.com).

Magenes, G.; Della Fontana, A. (1998). Simplified nonlinear seismic analysis of masonry buildings. British Masonry Society, Volume 8, pp. 190-195.

Marques, R. (2012). Metodologias Inovadoras no Cálculo Sísmico de Estruturas em Alvenaria Simples e Confinada. PhD Thesis in Civil Engineering, Universidade do Minho, Portugal.

Meireles, H. (2012). Seismic Vulnerability of Pombalino Buildings. PhD Thesis in Civil Engineering, IST, UTL, Lisbon, Portugal.

Pasticier, L.; Amadio, C.; Fragiacom, M. (2007) Non-linear Seismic Analysis and Vulnerability Evaluation of a Masonry Building by Means of the SAP2000® v.10 Code. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, No. 37, pp. 467-485.

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

Simões, A.; Bento, R.; Lagomarsino, S.; Cattari, S. (2013) Seismic Pushover Analysis of 'Gaioleiro' Buildings in Lisbon. SE-50EEE, Macedonia.

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.