



INSTITUTO
SUPERIOR
TÉCNICO

Análises Estáticas Não Lineares (*Pushover*) para o Dimensionamento e Avaliação Sísmica de Estruturas

Parte 4 Diferentes Procedimentos

Rita Bento

10 de Fevereiro de 2012



INSTITUTO
SUPERIOR
TÉCNICO

Objectivo

- Referir as potencialidades destes procedimentos
- Apresentar os progressos mais recentes nesta área de investigação (apresentação de casos de estudo).
Ênfase na aplicação destes procedimentos a estruturas irregulares em betão armado

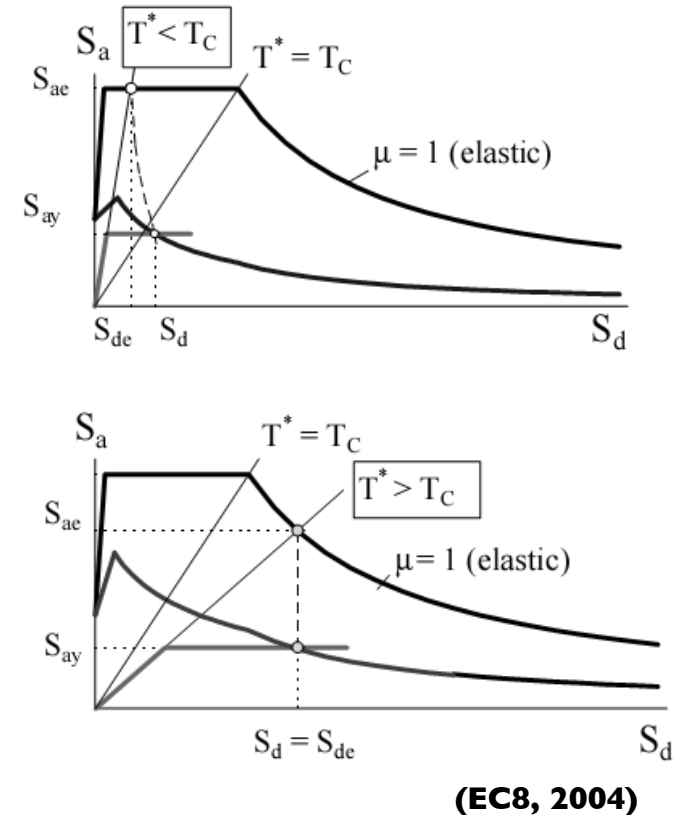
Método N2

Análise *pushover* e definir a curva de capacidade resistente da estrutura

Definir o sistema I GL equivalente e respectiva curva de capacidade

Caracterizar a relação bi-linear elasto-plástica para o mecanismo de colapso (\equiv admite-se um deslocamento último)

Calcular o período do sistema I GL equivalente e determinar o deslocamento objectivo (d_t^*)



Procedimento iterativo opcional

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



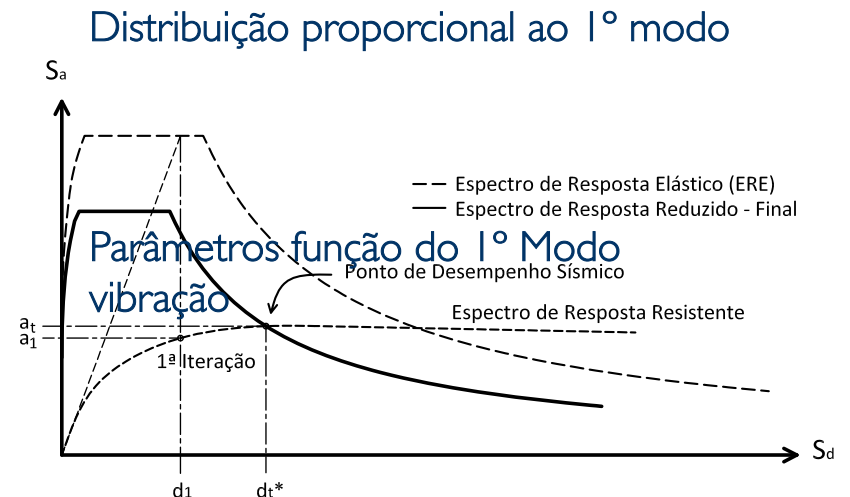
Método do Espectro de Capacidade Resistente

Análise *pushover* e definição da curva de capacidade resistente da estrutura

Definir o sistema 1 GL equivalente e respectiva curva de capacidade

Determinar ponto de desempenho sísmico a partir da intersecção com espectro de resposta

Determinar ductilidade (μ), amortecimento viscoso equivalente (ξ) e factor de redução espectral (η)



Procedimento Iterativo

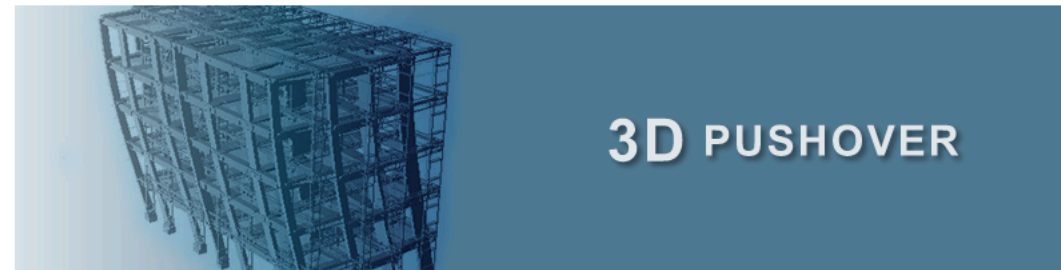
(até que a convergência no amortecimento viscoso equivalente é atingida)



INSTITUTO
SUPERIOR
TÉCNICO

Investigação – Projecto FCT em curso

<http://www.3disp.org/>



HOME	PROJECT	DISSEMINATION	NEWS
<p>The project aims to study and evaluate the performance of a set of novel performance-based seismic design and assessment procedures to 3D irregular structures. It will also focus on the development of next-generation related procedures and guidelines.</p> <p>This project builds upon the previous FCT research project POCI/ECM/59306/2004 which ended up with the organization of an International Workshop on Nonlinear Static Methods for Design/Assessment of 3D structures. One of the main objectives of proposal is to improve the results obtained and to develop the recommendations proposed in the abovementioned Workshop taking a further step on the 3D Pushover problem.</p> <p>The Nonlinear Static Procedures (NSP) are a powerful tool for performance evaluation. Seismic design codes, like the FEMA-273, FEMA-356, FEMA-440 and the ATC-40, have recommended the use of this type of procedures. More recently, the Eurocode8 also incorporated the procedure as an evaluation technique. However, some issues still need to be clarified regarding the format with which the pushover analysis has to be performed, thus requiring further research and development.</p> <p>The existence of a national research group to work in this topic, closely following and influencing the latest and most relevant improvements in the subject, seems of obvious importance. Adequate international cooperation has been ensured, for Anil Chopra (University of California, Berkeley), Rakesh Goel (California Polytechnic State University, San Luis Obispo), Peter Fajfar (University of Ljubljana, Slovenia) and Rui Pinho (University of Pavia, Italy) have been invited and accepted to become consultants for this research project.</p>			

Latest News

07/07/2010 - [Research Grant's](#)

FCT
Fundação para a Ciência e a Tecnologia

ICIST
INSTITUTO DE ENGENHARIA DE ESTRUTURAL, TERRITORIO E CONSTRUÇÃO



- **Capacity Spectrum Method (CSM)**
(CSM-ATC40: Freeman, 1975; ATC-40, 1996)
(CSM-FEMA440: FEMA440, 2005)
- **N2 Method (N2) – convencional e modificado**
(Fajfar and Fischinger, 1988; EC8, 2004) (Fajfar et al., 2005)
- **Modal Pushover Analysis (MPA)**
(Chopra and Goel, 2001)
- **Adaptive Capacity Spectrum Method (ACSM)**
(Casarotti and Pinho, 2006)



Para ter em conta os efeitos de torção:

- Recorre-se a um modelo 3D
- Análises *Pushover* independentes em 2 direcções horizontais
- Deslocamento objectivo determinado no CM
- Efeito da torção: determinado a partir dos resultados obtidos com a análise modal por espectro de resposta (combinação SRSS para as 2 direcções)
- Define-se os factores de correcção a aplicar aos resultados obtidos com as análises *Pushover*:

Não se considera qualquer benefício devido à torção



Para ter em conta a contribuição dos modos superiores:

1. Recorre-se a uma análise *Pushover* normal (método N2 – EC8)
2. Efeito dos modos de vibração superiores: análise modal por espectro de resposta com todos os modos de vibração significativos
3. A partir de 2. determinar os deslocamentos entre pisos. Normalize os resultados de forma que o deslocamento de topo é igual ao obtido em 1.
4. Para cada piso determine factores corretivos c_{HM} : relação entre os resultados obtidos em 2. e em 1. $c_{HM} \geq 1$
5. Os deslocamentos entre pisos são determinados, multiplicando os valores obtidos em 1. por c_{HM}
6. Os deslocamentos e esforços são determinados a partir dos deslocamentos entre pisos



Modal Pushover Analysis - MPA

Análise *pushover* e definição curva de capacidade resistente estrutura

Distribuição proporcional ao 1º modo

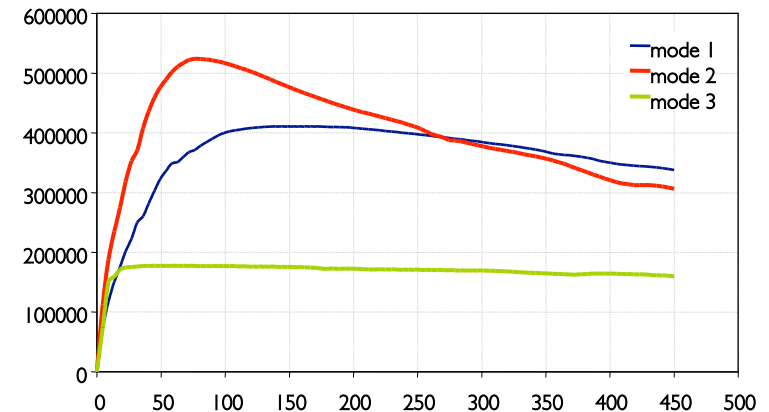
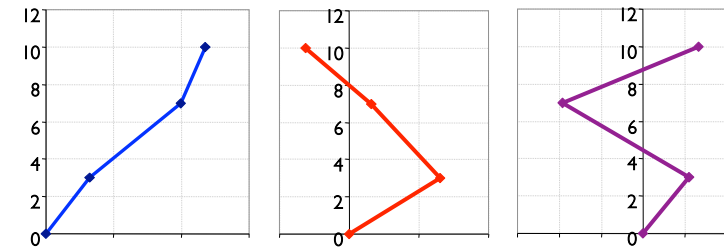
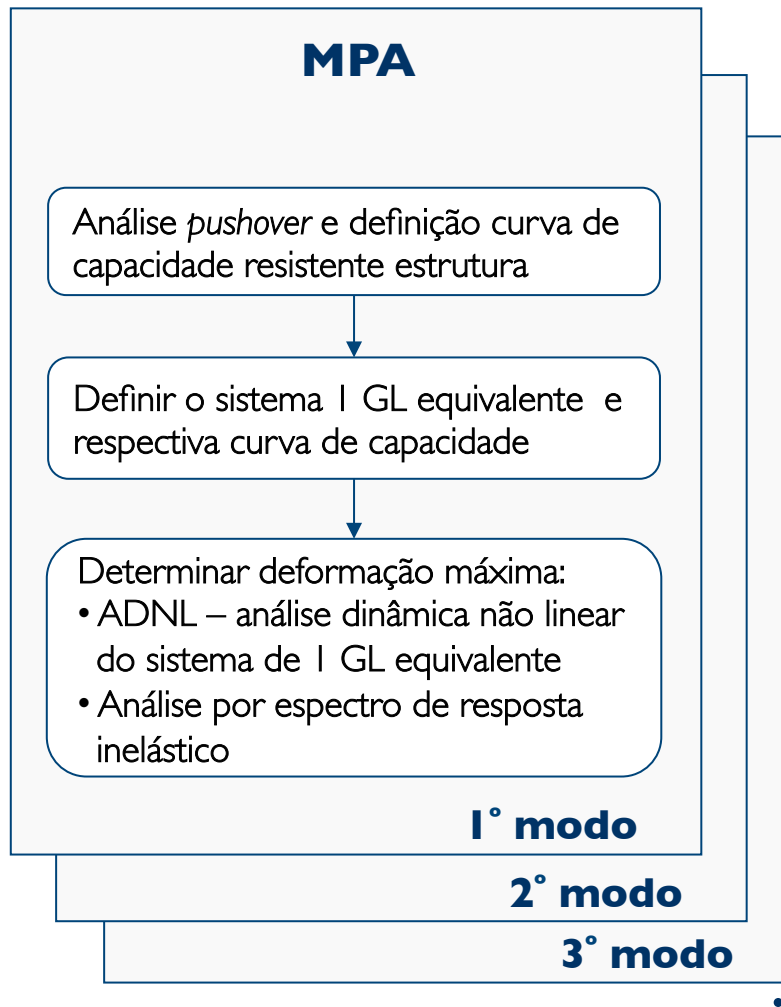
Definir o sistema 1 GL equivalente e respectiva curva de capacidade

Parâmetros função do 1º Modo vibração

Determinar deformação máxima:

- ADNL – análise dinâmica não linear do sistema de 1 GL equivalente
- Análise por espectro de resposta inelástico

Se uma análise espectral, com espectro inelástico, é adoptada um procedimento iterativo pode ter que ser usado



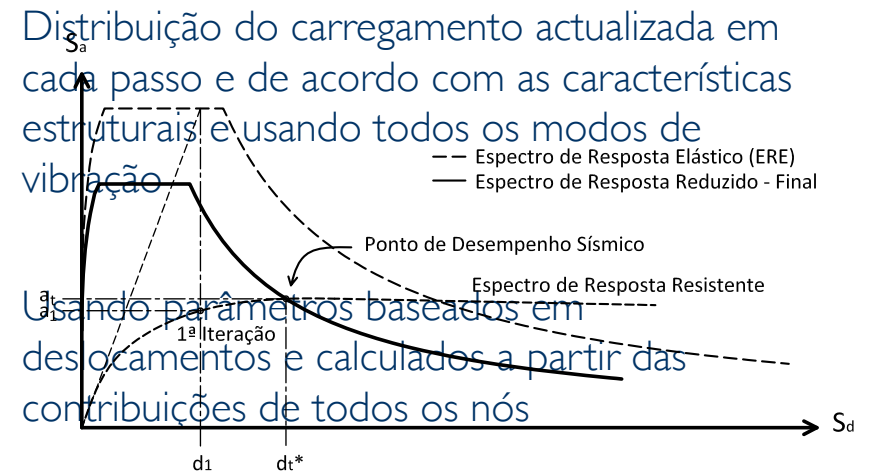
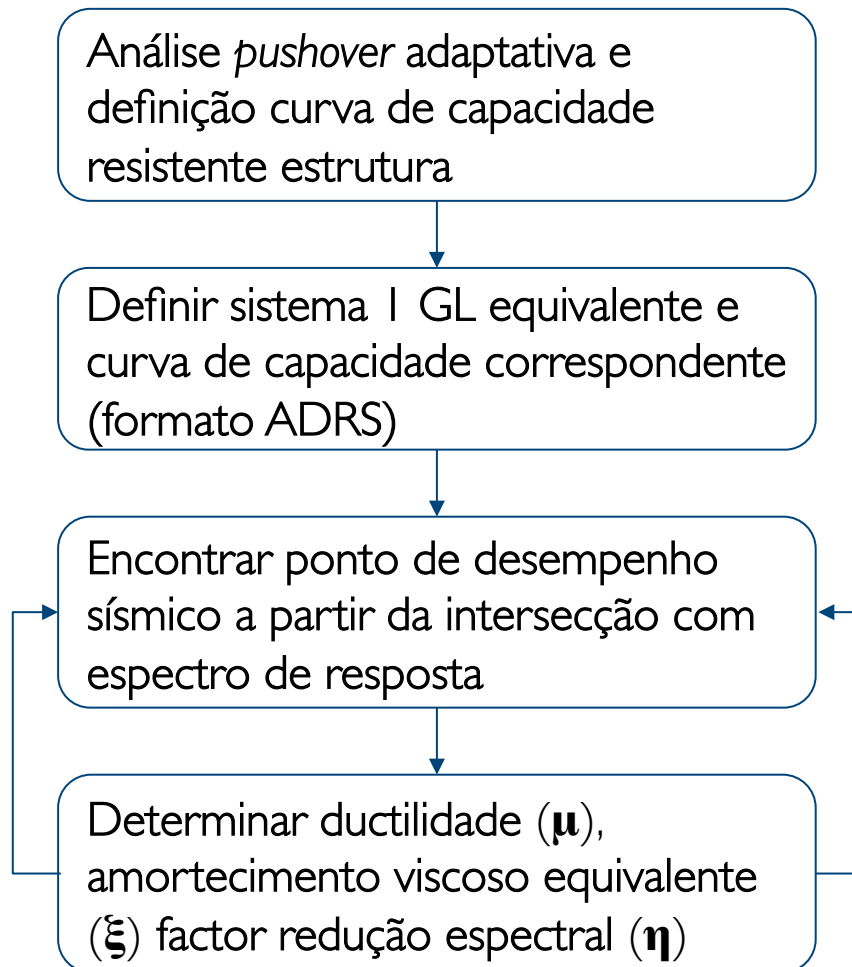
Pinho et al., 2008

Repetir o processo com o número de modos significativos

Combinar os resultados segundo uma regra de combinação quadrática



Adaptive Capacity Spectrum Method



Procedimento iterativo

(até que a convergência, relativamente ao amortecimento viscoso equivalente, é alcançada)



AENLs – Diferenças Conceptuais

ACSM	CSM	N2	MPA
TIPO DE ANÁLISE <i>PUSHOVER</i>			
Adaptativa baseada em deslocamentos	Convencional		
TIPO DE CARREGAMENTO			
Deslocamento Adaptativo	Força proporcional 1º modo	Força proporcional modo relevante	Força proporcional modos relevantes
NÓ DE REFERÊNCIA			
Calculado a partir de todas as localizações	Obrigatoriamente escolhido (normalmente CM piso topo)		
ESPECTRO DE RESPOSTA			
Sobre-amortecido		Inelástico	

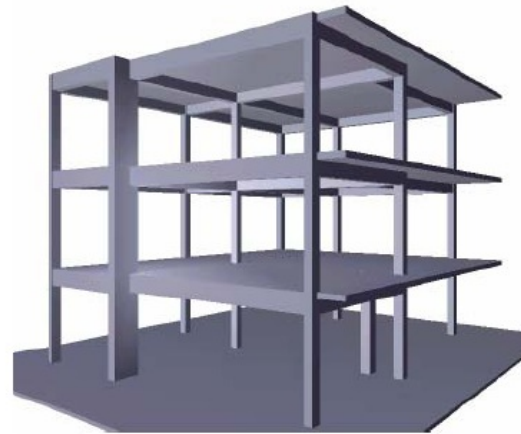
- Diferenças entre AENLs “convencionais” e “**adaptativas**”



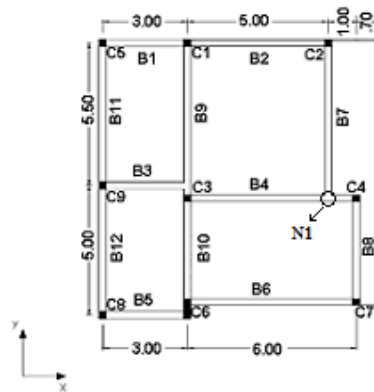
INSTITUTO
SUPERIOR
TÉCNICO

Casos de Estudo

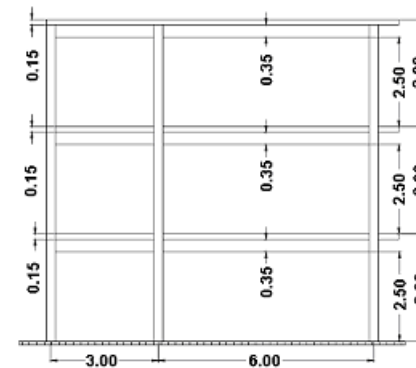
Edifício SPEAR



Vista 3D



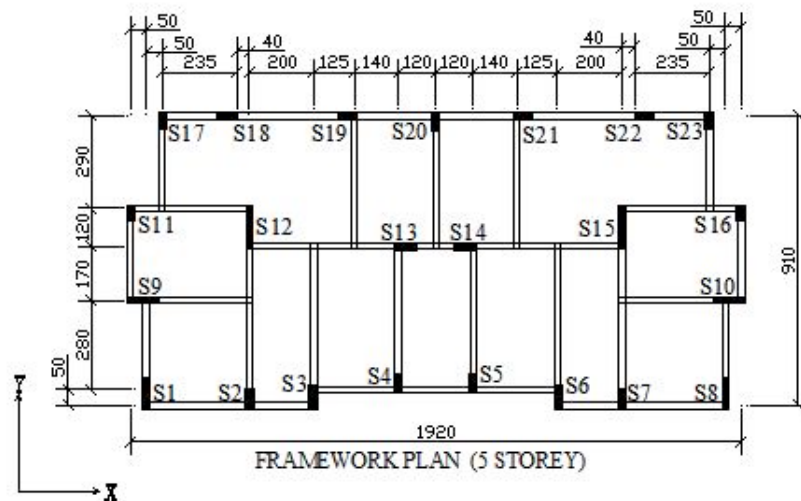
Planta



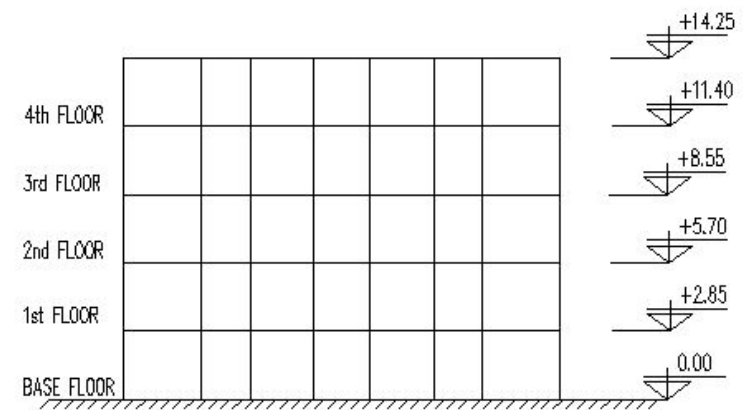
Vista lateral



Edifício 5 Pisos



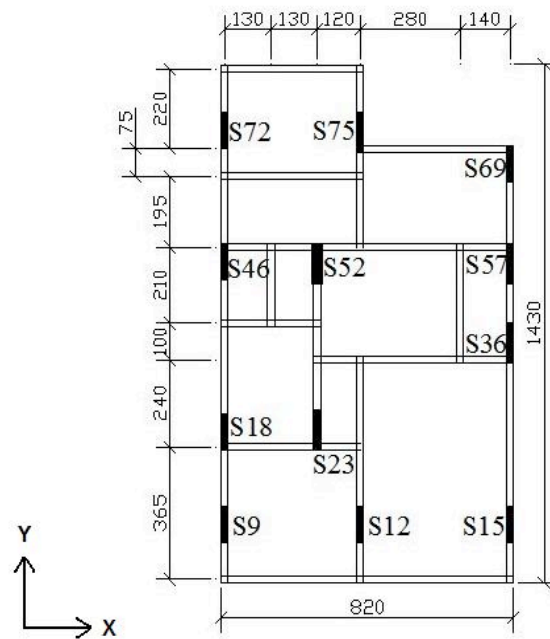
Planta



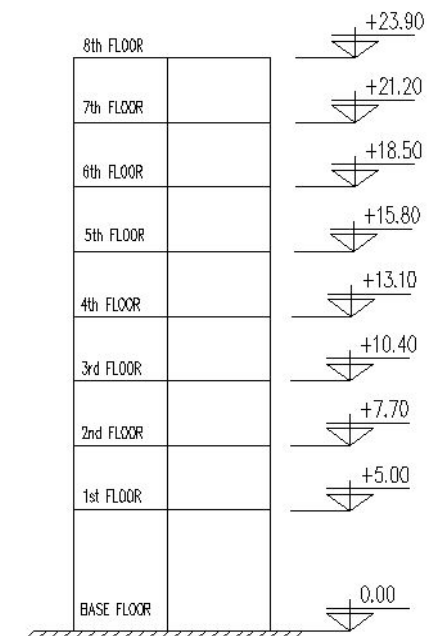
Vista lateral



Edifício 8 Pisos



Planta



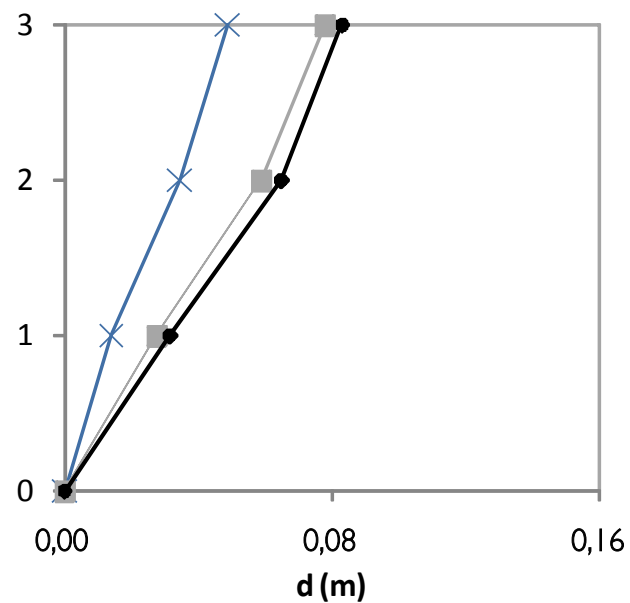
Vista lateral



CSM-ATC40 vs. CSM-FEMA440

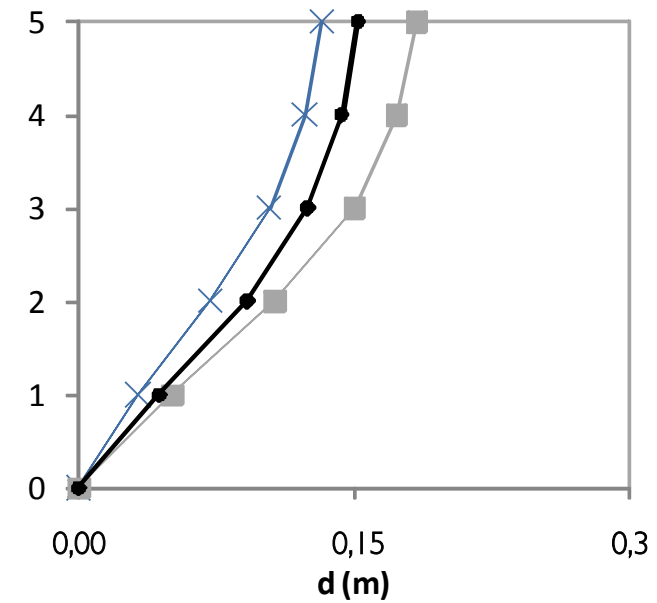
Deslocamentos Pisos

3 Pisos, direção y, Pilar C3, $a_g = 0,2g$



—x— CSM ATC40

5 Pisos, direção x, Pilar S13, $a_g = 0,6g$



—■— CSM FEMA440

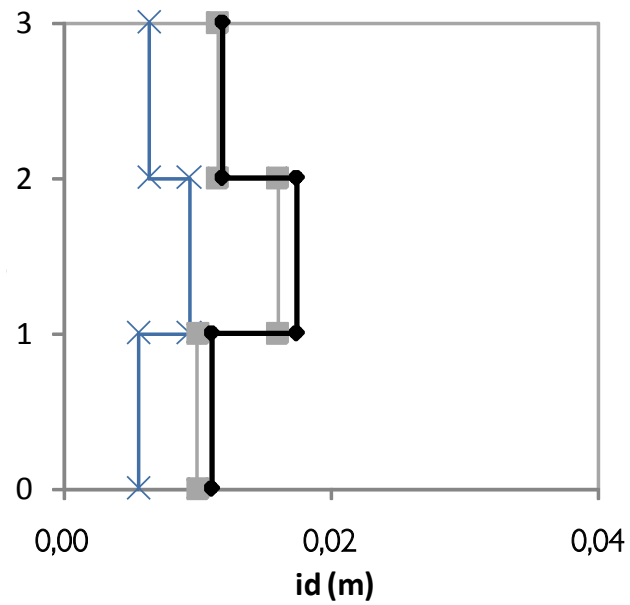
—●— TH



CSM-ATC40 vs. CSM-FEMA440

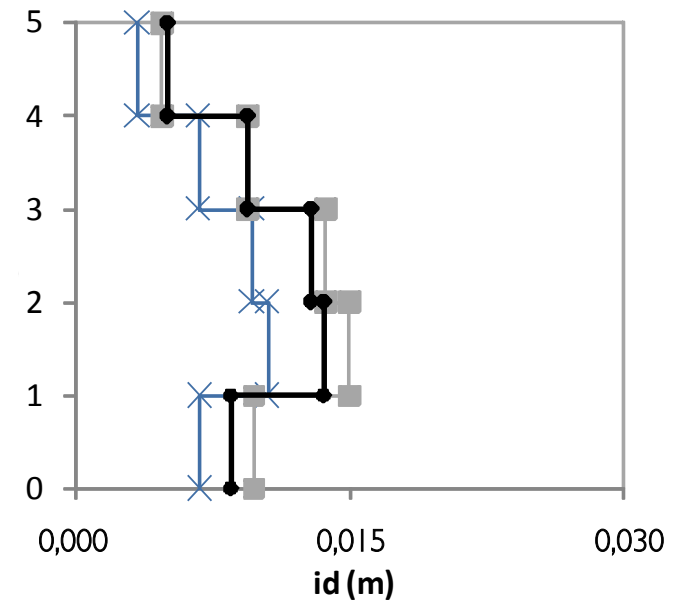
Deslocamentos relativos Inter-Pisos

3 Pisos, direcção y, Pilar C3, $a_g = 0,1g$



—x— CSM ATC40

5 Pisos, direcção x, Pilar S13, $a_g = 0,2g$



—■— CSM FEMA440

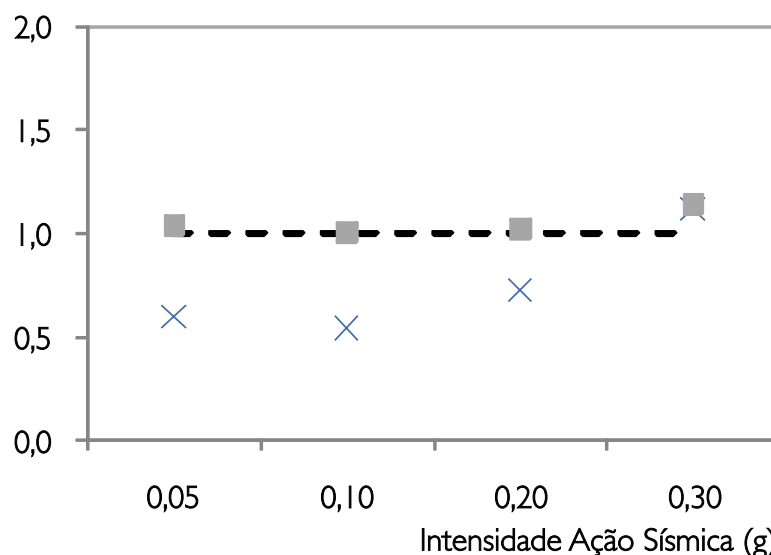
—●— TH



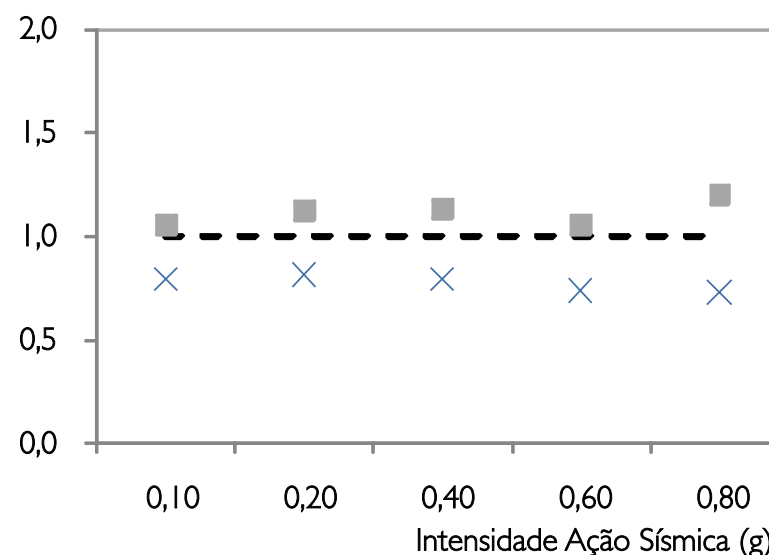
CSM-ATC40 vs. CSM-FEMA440

Deslocamentos topo normalizados em relação ADNL

3 Pisos, direção x, CM



5 Pisos, direção y, Pilar S23



—x— CSM ATC40

—■— CSM FEMA440

—●— TH

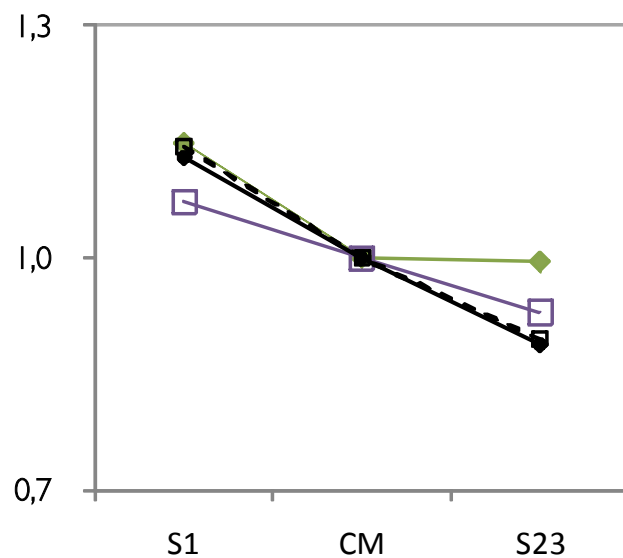
A comparação feita entre o CSM-ATC40 e o CSM-FEMA440 permitiu concluir que este último, uma versão atualizada do primeiro, conduz, em geral, a melhores resultados.



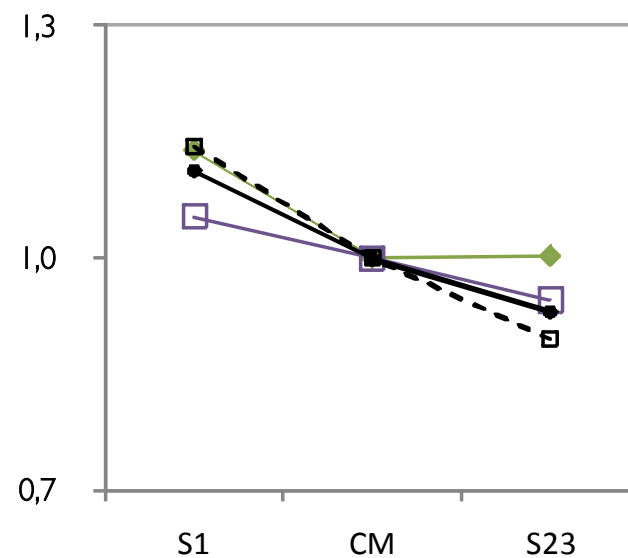
Método N2 vs. Método N2 modificado

Deslocamentos topo normalizados

5 Pisos, direção x, 0,2g



5 Pisos, direção x, 0,6g



—◆— Extended N2

—□— N2

—●— TH

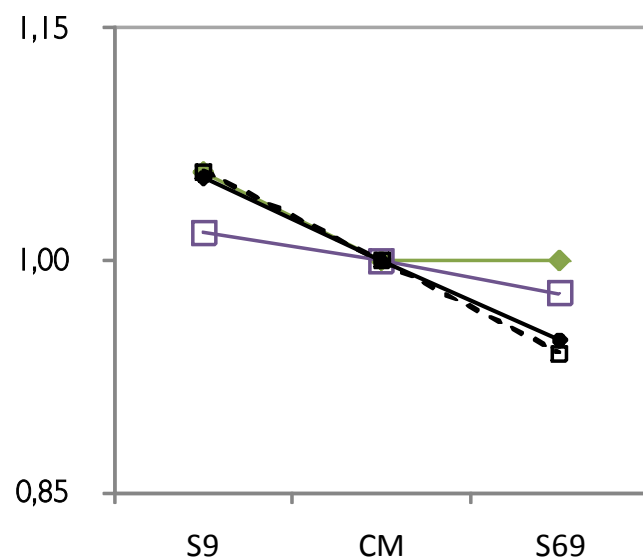
—■— RSA



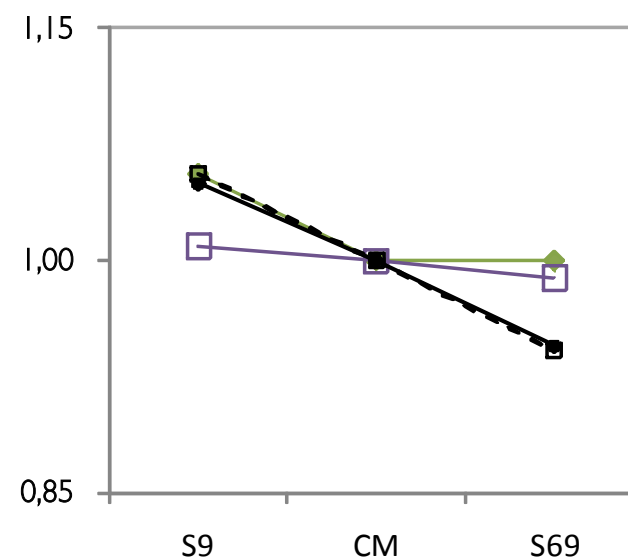
Método N2 vs. Método N2 modificado

Deslocamentos topo normalizados

8 Pisos, direção x, 0,2g



8 Pisos, direção x, 0,4g



—◆— Extended N2

—□— N2

—●— TH

—■— RSA



INSTITUTO
SUPERIOR
TÉCNICO

Método N2 vs. Método N2 modificado

Conclusões

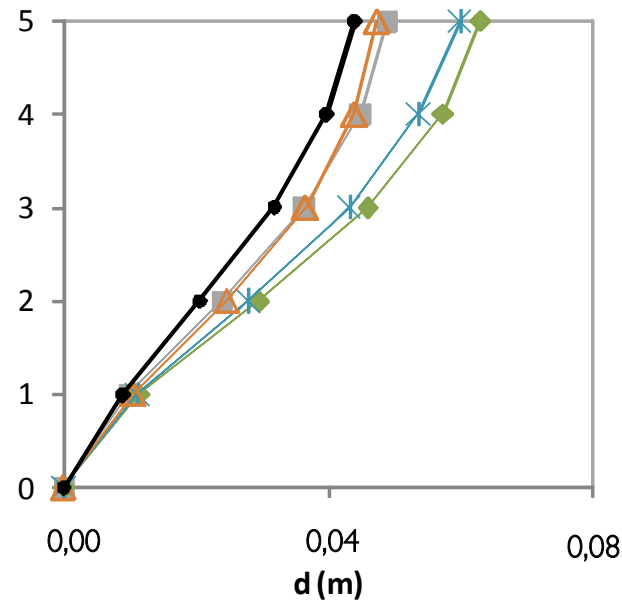
- O método N2 modificado conduziu sempre a resultados mais precisos que a versão original.
- Estes resultados estão em sintonia com os estudos desenvolvidos por Fajfar e seus colaboradores
- Esta versão tem certamente potencial para ser inserida numa nova versão do Eurocódigo 8, permitindo, assim, estimar mais adequadamente o desempenho sísmico de edifícios irregulares em planta



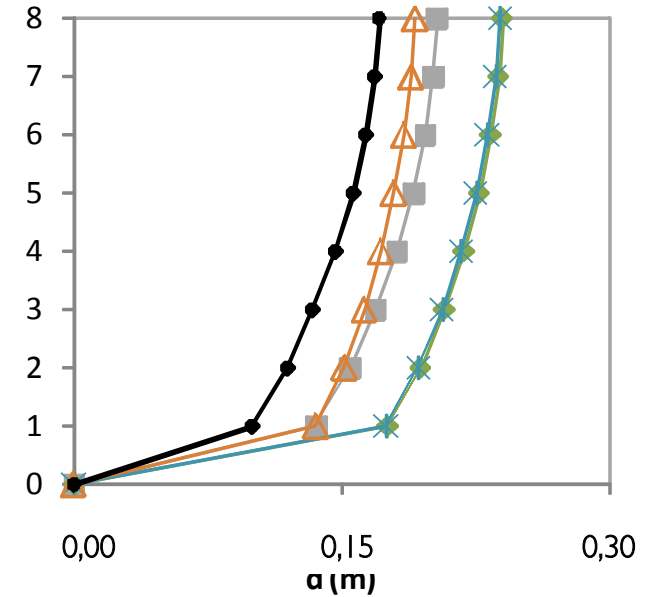
CSM-FEMA440, N2 modificado, MPA, ACSM

Deslocamentos pisos

5 Pisos, direção x, S23, 0,2g



8 Pisos, direção x, Pilar S69, 0,4g



—■— CSM FEMA440 —◆— Extended N2 —*— MPA —△— ACSM —●— TH

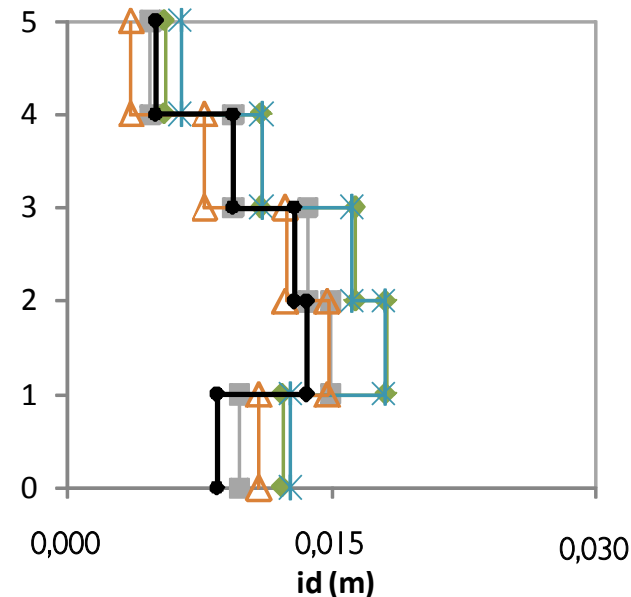
- CSM-FEMA440 e o ACSM são os métodos que conduzem aos melhores resultados
- O método N2 modificado é o que conduz a resultados mais conservadores, para as estruturas analisadas



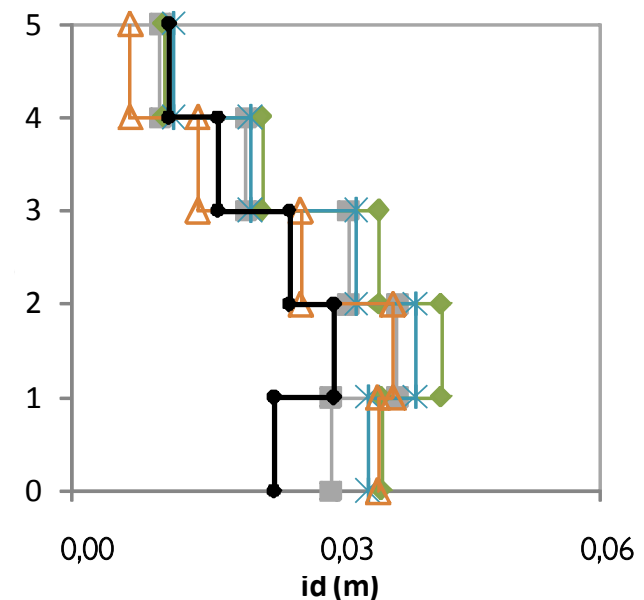
CSM-FEMA440, N2 modificado, MPA, ACSM

Deslocamentos relativos inter-pisos

5 Pisos, direção x, S13, 0,2g



5 Pisos, direção x, Pilar S1, 0,4g



■ CSM FEMA440 ◆ Extended N2 * MPA ▲ ACSM ● TH

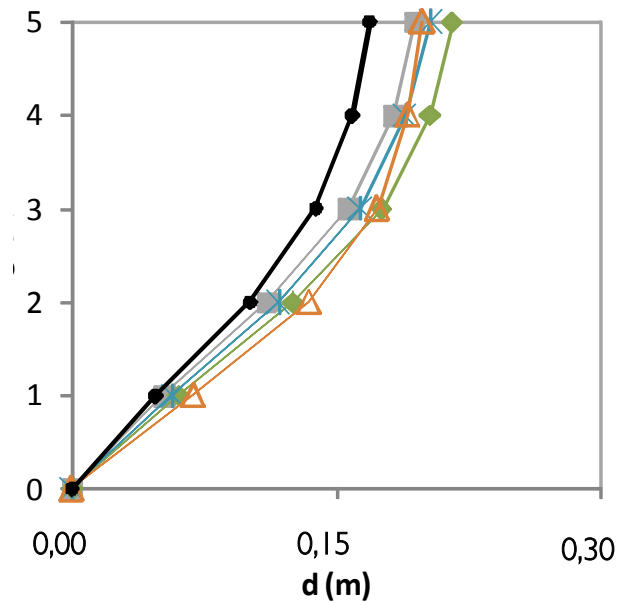
- ACSM é o método que normalmente apresenta resultados mais próximos da ADNL
- Conduz por vezes a valores de deslocamentos inter-pisos inferiores à ADNL



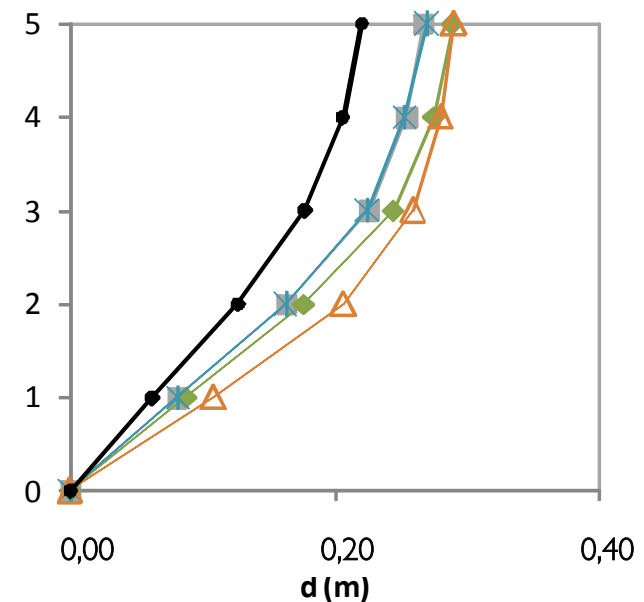
CSM-FEMA440, N2 modificado, MPA, ACSM

Deslocamentos pisos

5 Pisos, direção x, SI, 0,6g



5 Pisos, direção x, Pilar SI, 0,8g



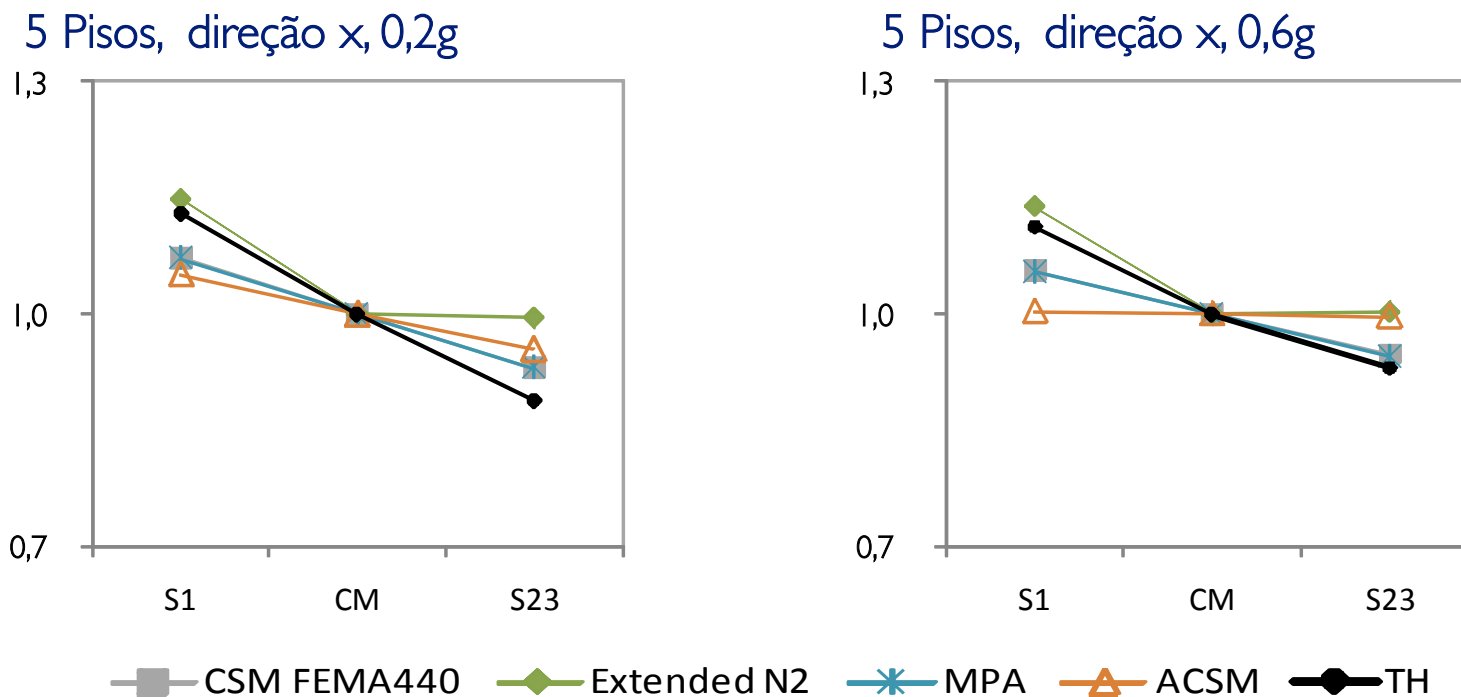
CSM FEMA440 Extended N2 MPA ACSM TH

- Todos AENLs conduzem a resultados próximos e conservadores para níveis de inelasticidade elevada



CSM-FEMA440, N2 modificado, MPA, ACSM

Deslocamentos topo normalizados



- Em termos de deslocamentos de topo normalizados o método N2 modificado é o único capaz de reproduzir adequadamente o efeito de torção dos edifícios estudados



INSTITUTO
SUPERIOR
TÉCNICO

Investigação – Projecto FCT em curso

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

SEISMIC VULNERABILITY

of Old Masonry Buildings



HOME

PROJECT

DISSEMINATION

NEWS

Summary

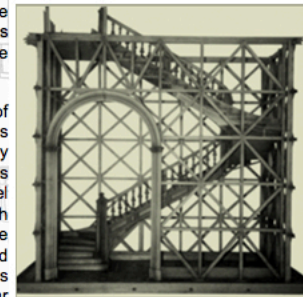
This project addresses the seismic hazard, the vulnerability it poses to old masonry structures (especially to Pombalino buildings) and possible retrofitting solutions.

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

behaviour of masonry will be taken into account by running both non-linear static and dynamic analyses.

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

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



Latest News

29/04/2010 - [Research Grant](#)

FCT
Fundação para a Ciência e a Tecnologia

ICIST

INSTITUTO DE ENGENHARIA DE ESTRUTURAL, TERRITÓRIO E CONSTRUÇÃO



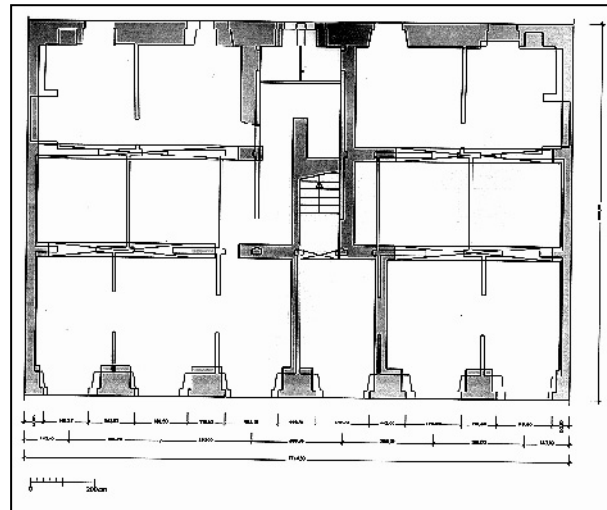
INSTITUTO
SUPERIOR
TÉCNICO

Caso de Estudo – Edifício Pombalino

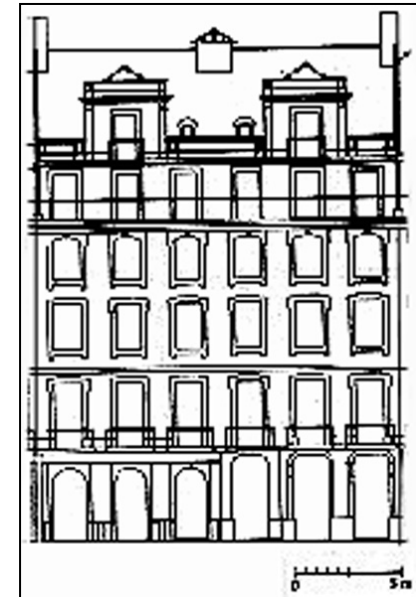
Cobertura



Rua da Prata, 210 a 212



Planta-tipo



Alçado Principal



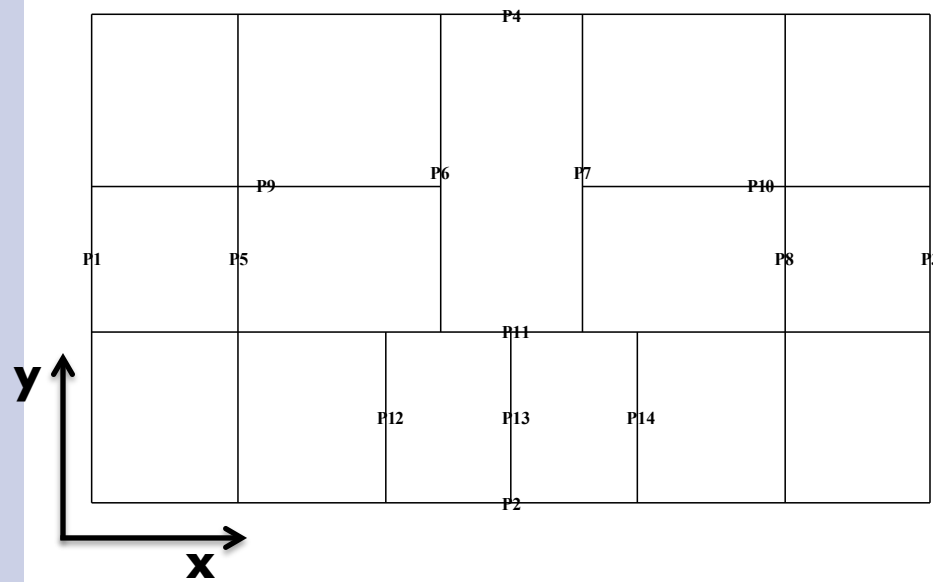
INSTITUTO
SUPERIOR
TÉCNICO

Caso de Estudo – Edifício Pombalino

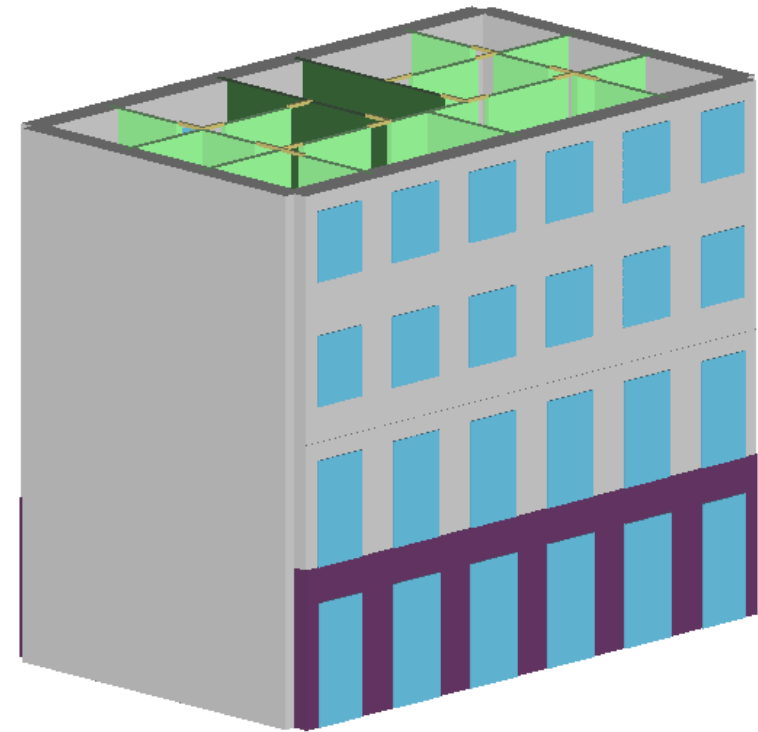
MODELO

Programa TREMURI

(Galasco, Lagomarsino, Penna e Cattari, 2002)



Planta



Vista 3D



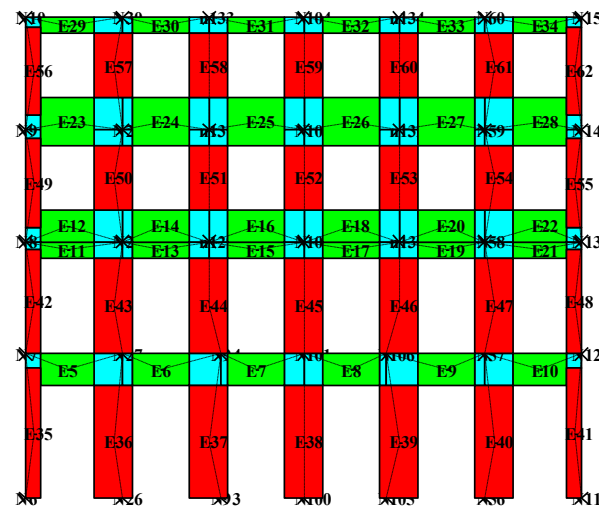
INSTITUTO
SUPERIOR
TÉCNICO

Caso de Estudo – Edifício Pombalino

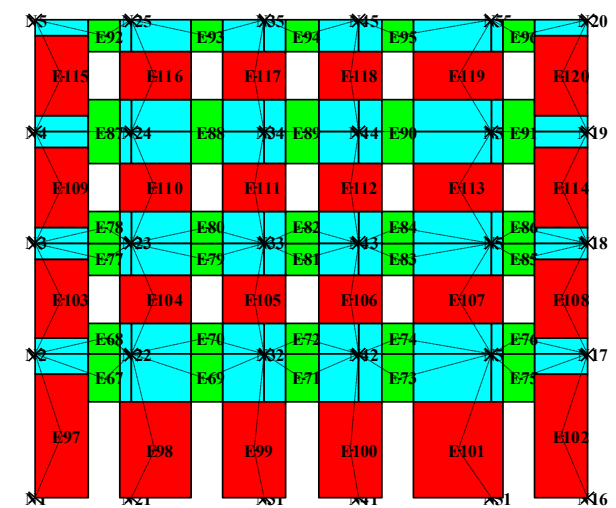
MODELO

Programa TREMURI

(Galasco, Lagomarsino, Penna e Cattari, 2002)



Fachada Frontal

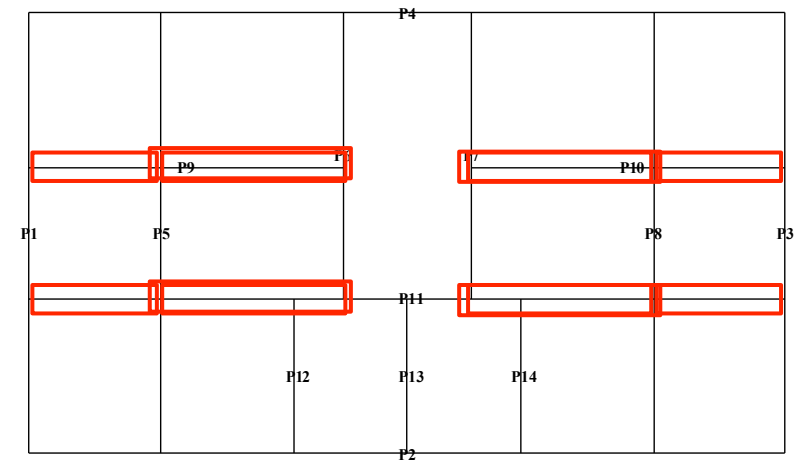


Fachada Posterior



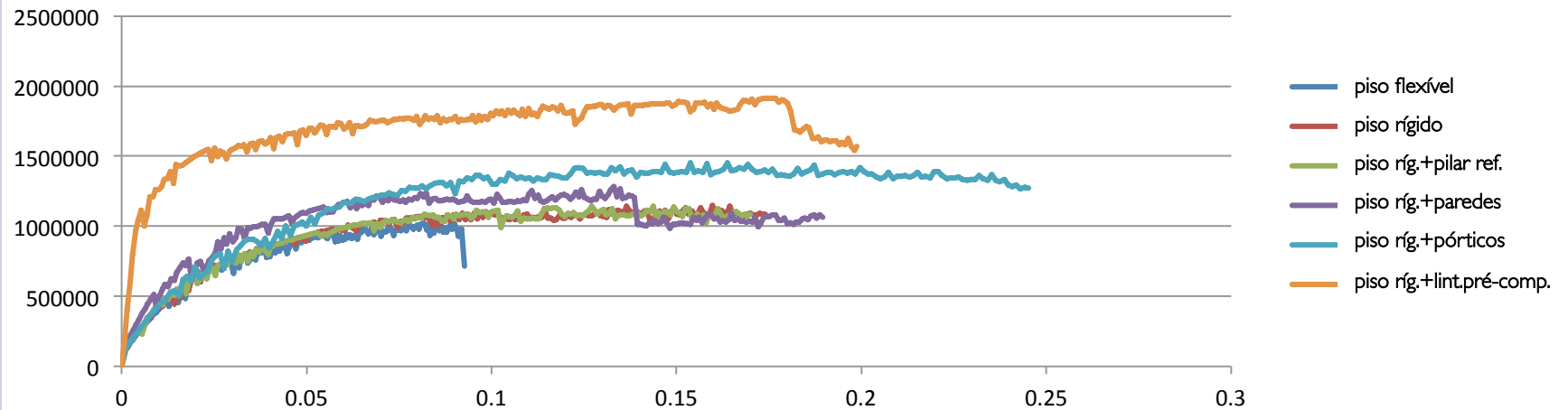
Edifícios modelados

- Edifício original (pisos flexíveis)
- Edifício com pisos rígidos
- Edifício com os pilares do interior, no r/c, reforçados
- Edifício com paredes resistentes no r/c
- Edifício com pórticos metálicos no r/c
- Edifício com lintéis pré-comprimidos

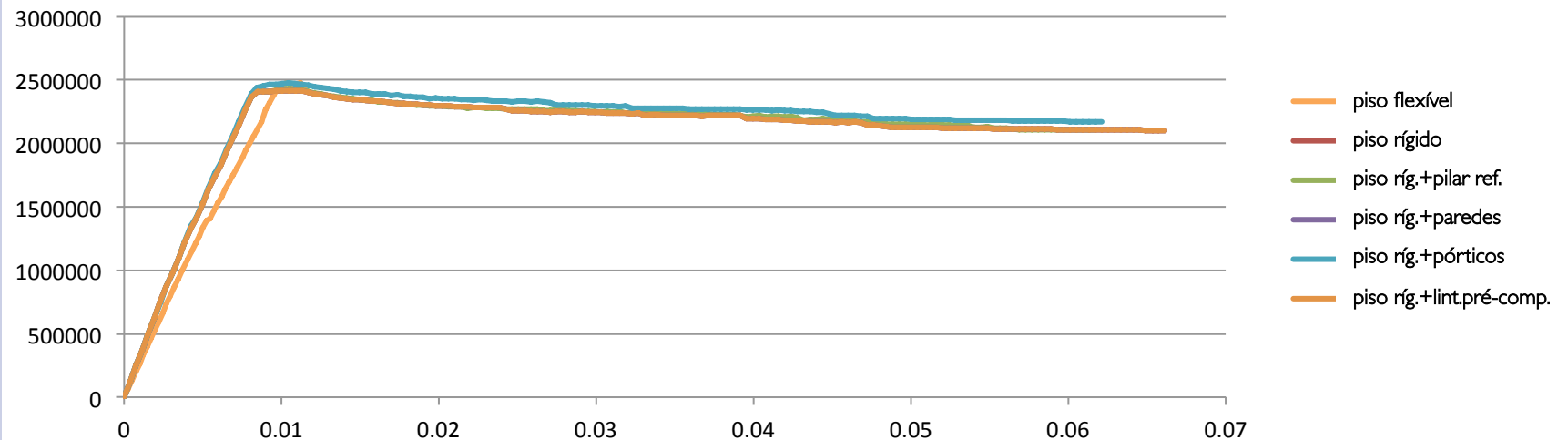




Curvas de Capacidade – direcção x



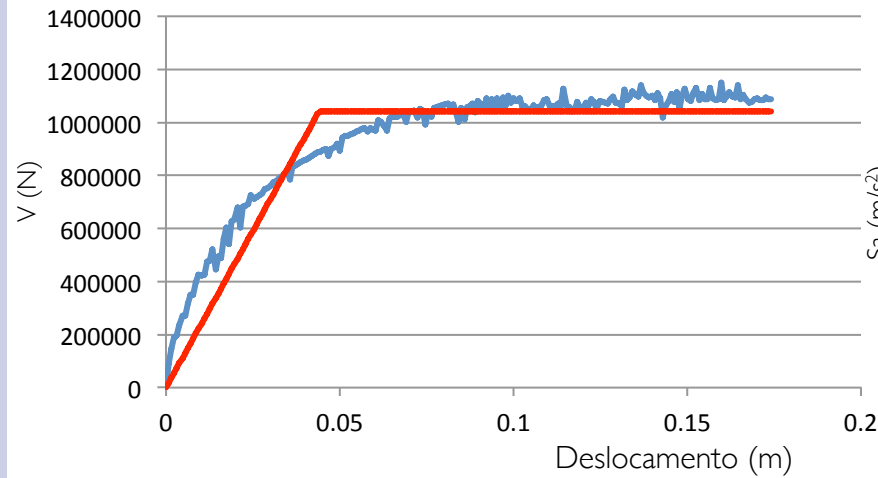
Curvas de Capacidade – direcção y



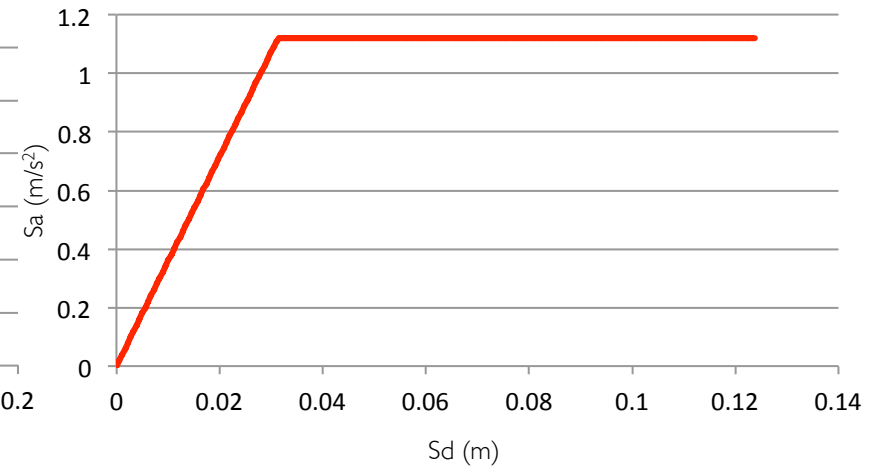


Método N2– Piso Rígido

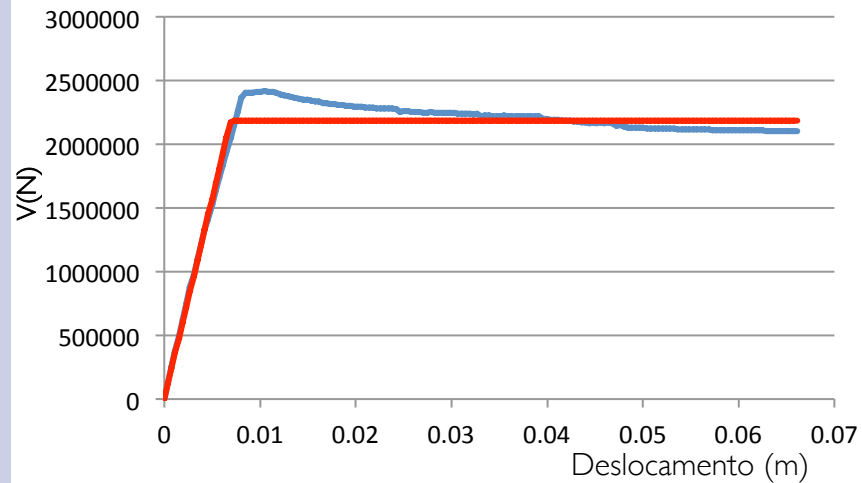
Direcção x



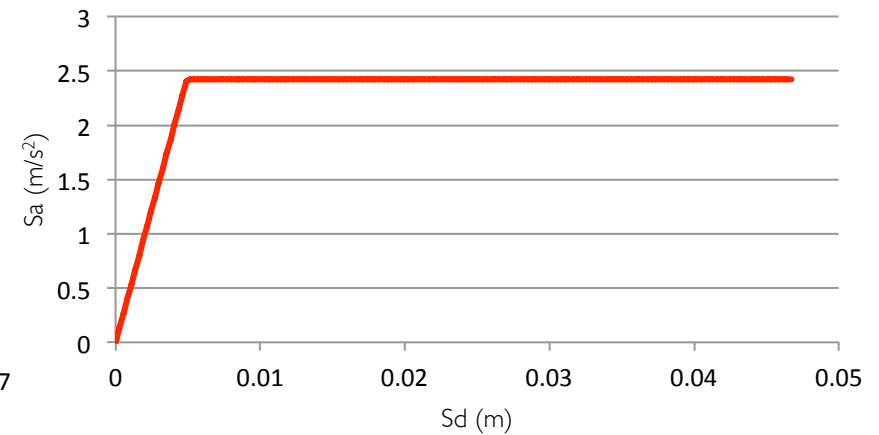
Direcção x



Direcção y

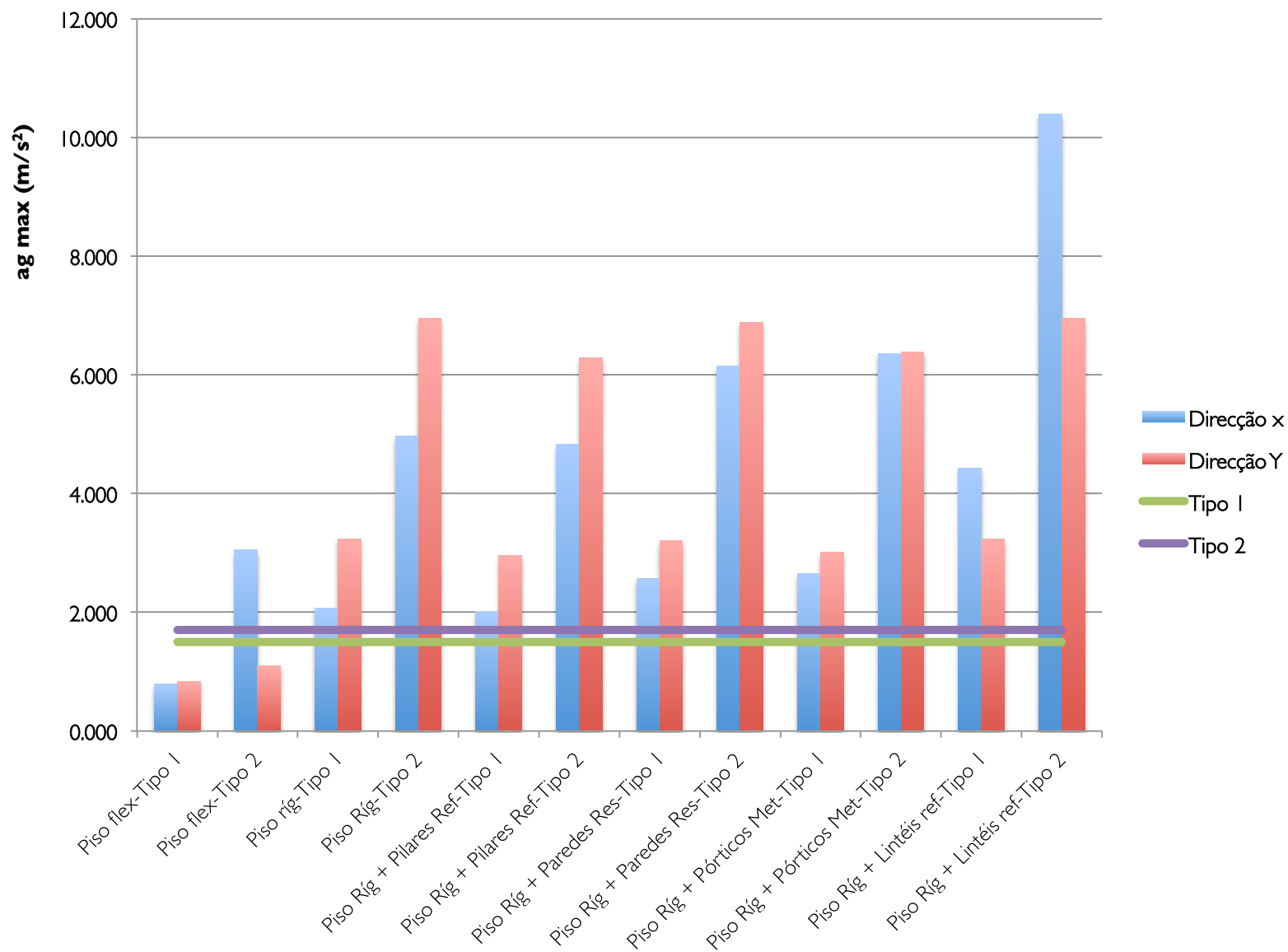


Direcção y





Aceleração máxima





Função de distribuição de probabilidade log-normal

$$P[D_k | a_g] = \Phi \left[\frac{1}{\beta_k} \ln \left(\frac{a_g}{a_{g,k}} \right) \right]$$

$$\beta_{total} = \sqrt{\beta_1^2 + \beta_2^2 + \beta_3^2 + \beta_4^2}$$

Estado de Danos

P_0 – sem danos

P_1 – danos ligeiros

P_2 – danos moderados

P_3 – danos extensos

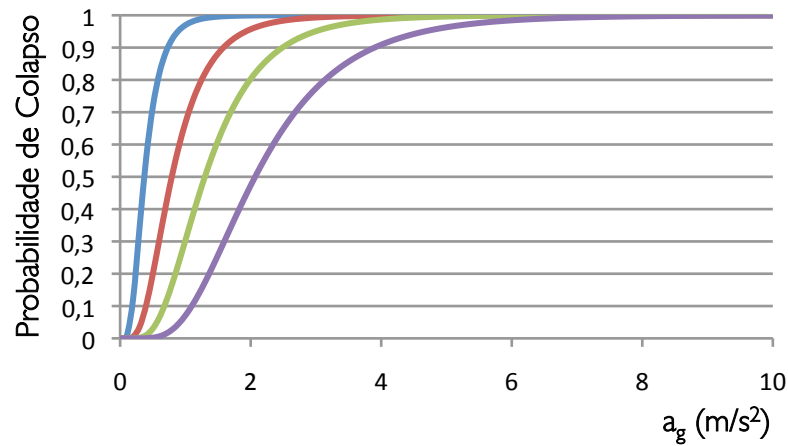
P_4 – danos totais/colapso

β	P_1	P_2	P_3	P_4
β_1 – Modelo/Programa	0,25	0,25	0,25	0,25
β_2 – Materiais	0,35	0,35	0,35	0,35
β_3 – Acção sísmica	0,2	0,2	0,2	0,2
β_4 – Estados Limite	0,24	0,26	0,18	0,14
β_{total}	0,53	0,54	0,51	0,49

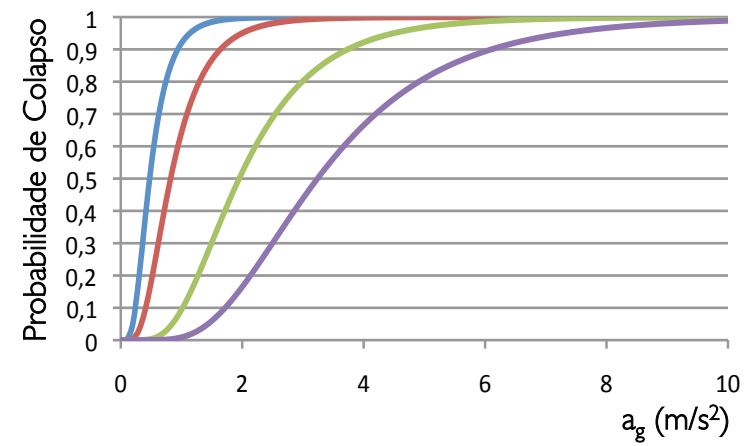


Curvas de Fragilidade – Edifício piso Rígido

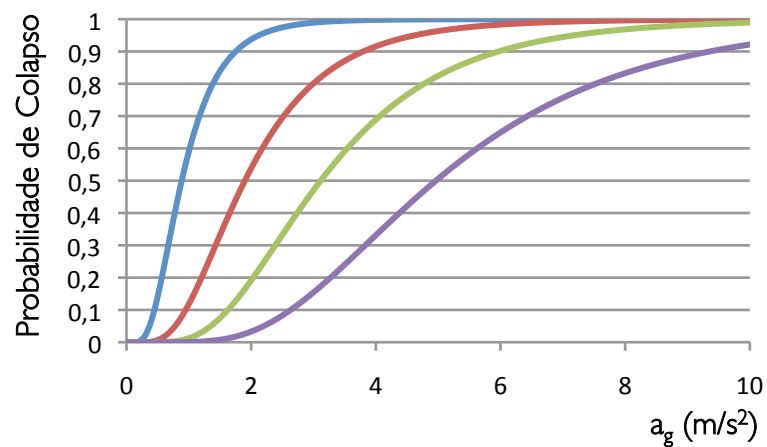
Sismo tipo 1, direcção x



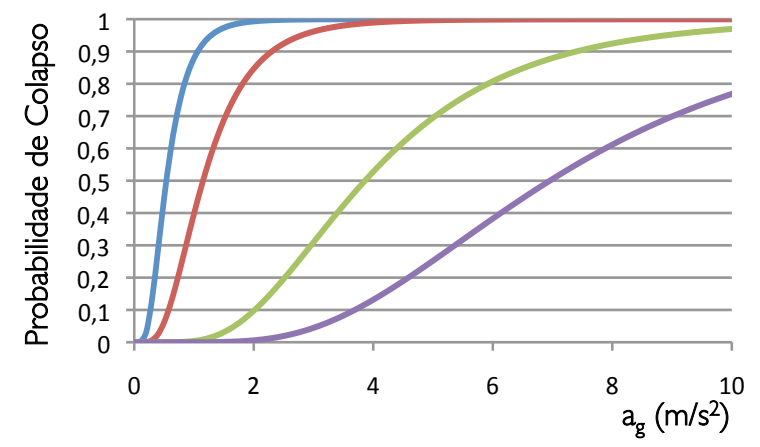
Sismo tipo 1, direcção y



Sismo tipo 2, direcção x



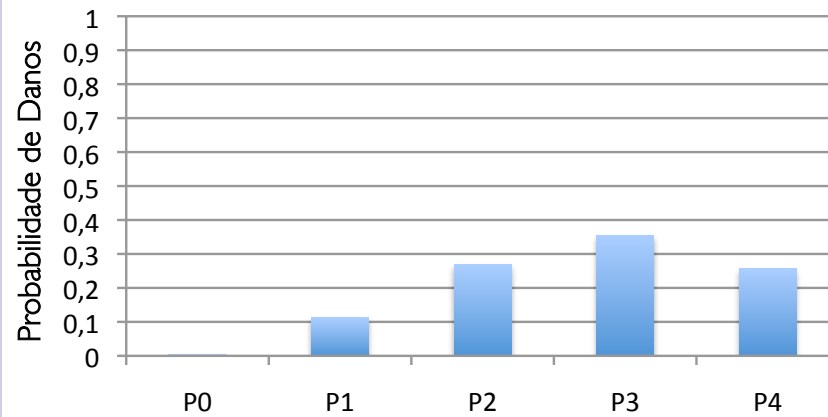
Sismo tipo 2, direcção y



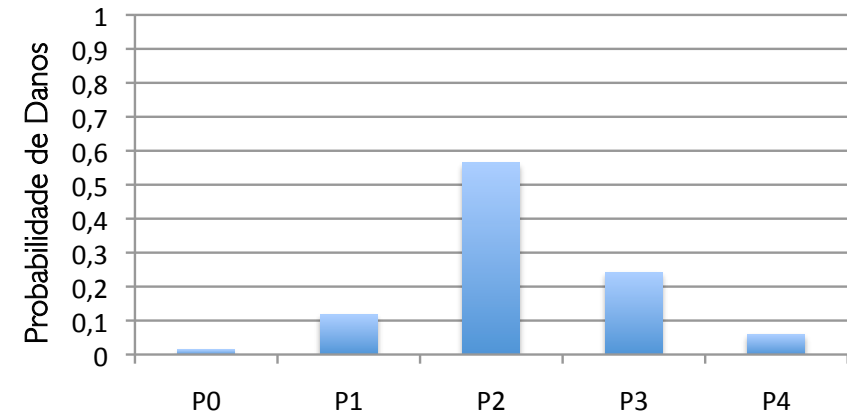


Distribuição de Danos - Edifício Piso Rígido

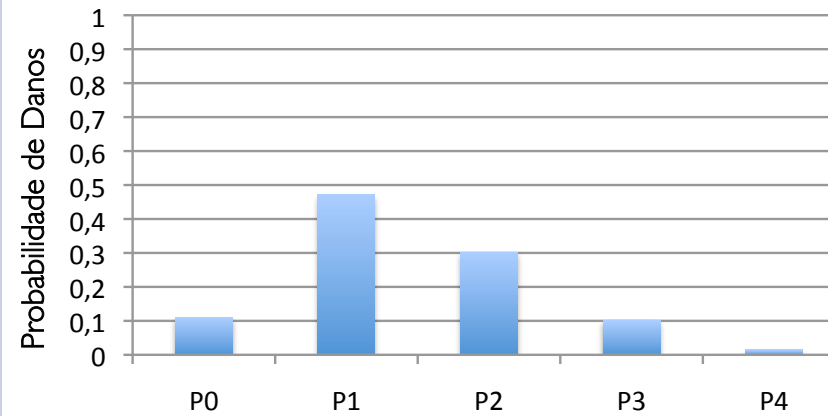
Sismo tipo 1, direcção x



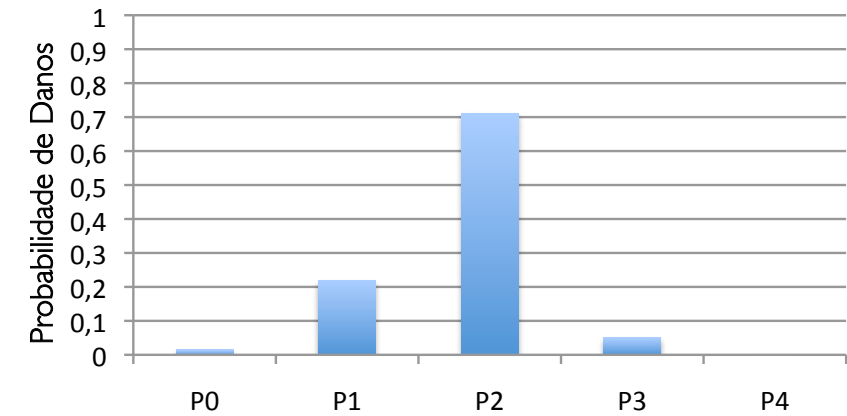
Sismo tipo 1, direcção y



Sismo tipo 2, direcção x



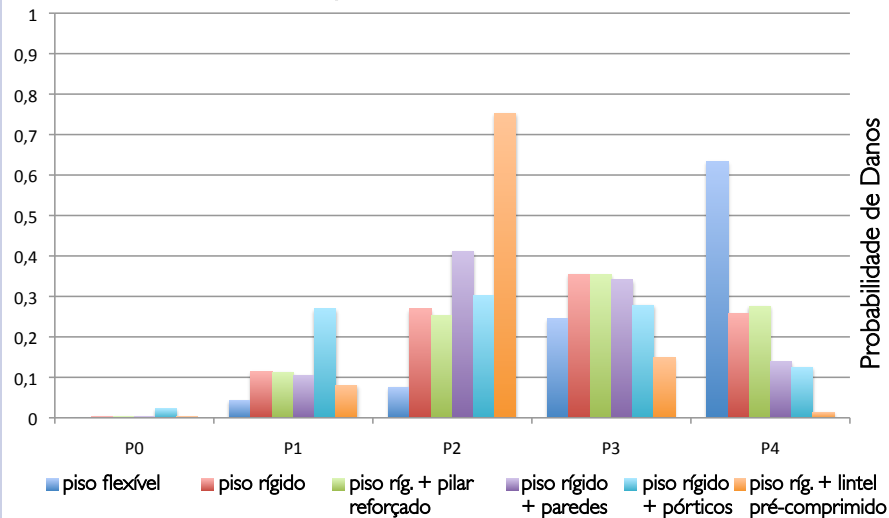
Sismo tipo 2, direcção y



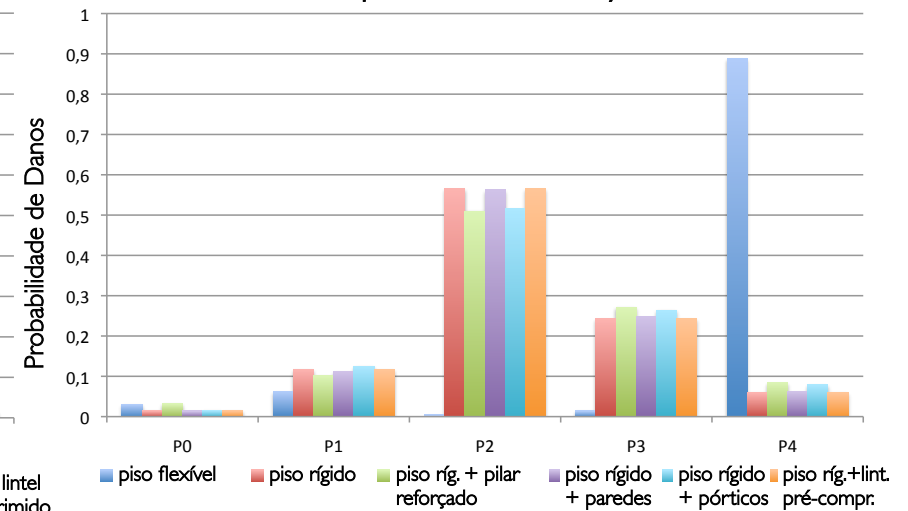


Distribuição de Danos – Todos os Casos

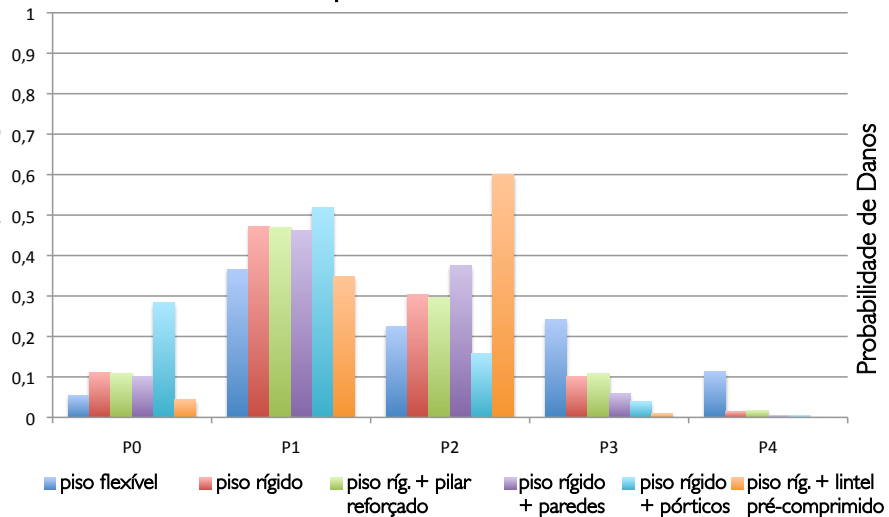
Sismo tipo 1, direcção x



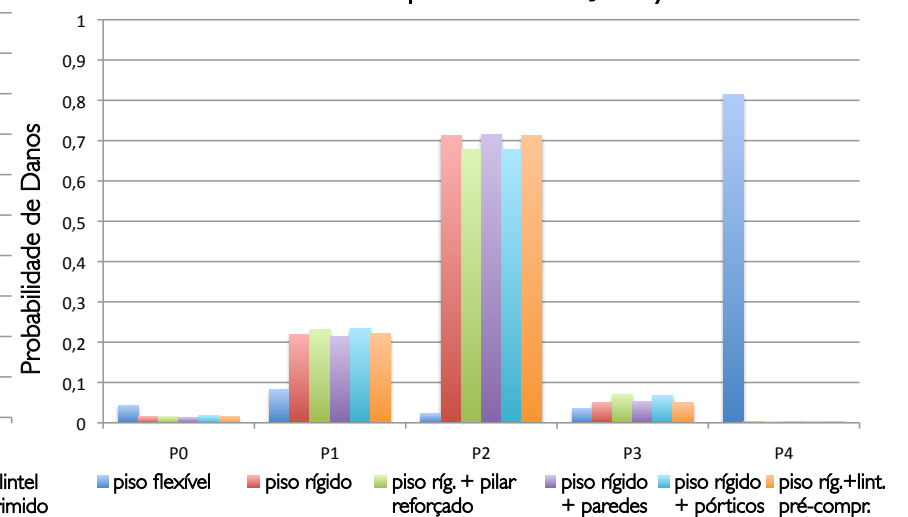
Sismo tipo 1, direcção y



Sismo tipo 2, direcção x



Sismo tipo 2, direcção y





- Um bom comportamento sísmico só pode ser garantido se se controlar o nível de deslocamentos, global e local
Os novos processos de avaliação e dimensionamento sísmico com controle de deslocamentos visam alcançar este propósito
- As AENLs constituem procedimentos adequados e recomendáveis para a avaliação e o dimensionamento sísmico de estruturas com base em critérios de desempenho
Apesar de não tão precisas como as ADNL, são adequadas desde que se conheçam as limitações e o campo de aplicação do procedimento que está a ser utilizado
- Os resultados dos mais recentes trabalhos de investigação permitem já indicar quais as AENLs que podem ser aplicadas mesmo em estruturas irregulares
CSM-FEMA440, N2 modificado, ACSM modificado



INSTITUTO
SUPERIOR
TÉCNICO

Análises Estáticas Não Lineares (*Pushover*) para o Dimensionamento e Avaliação Sísmica de Estruturas

Parte 4 Diferentes Procedimentos

Rita Bento

10 de Fevereiro de 2012