



INSTITUTO
SUPERIOR
TÉCNICO

Análises Estáticas Não Lineares (*Pushover*) de Edifícios 3D

Parte 5



FUNDEC

Carlos Bhatt, Rita Bento e André Belejo

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



Sumário

- Modelação da estrutura 3D atendendo ao comportamento não linear de todos os seus elementos estruturais e análise *Pushover* 3D utilizando elementos de plasticidade concentrada
- Análise *Pushover* do Edifício SPEAR 3D utilizando elementos de plasticidade distribuída
 - *Original N2 vs. Extended N2*
 - *CSM-ATC40 vs. CSM-FEMA440*
 - *CSM-FEMA440, Extended N2, MPA e ACSM*
 - *Extended CSM-FEMA440*
- Conclusões



INSTITUTO
SUPERIOR
TÉCNICO

FUNDEC

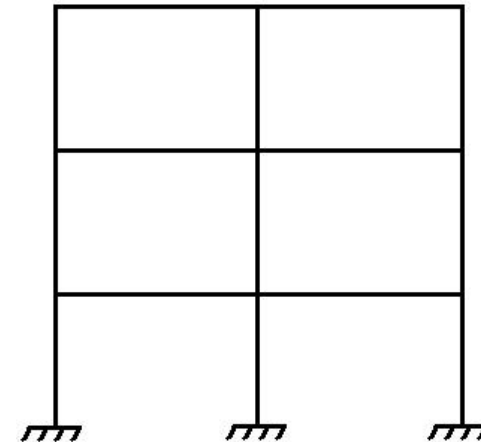
Estruturas regulares em planta



Passíveis de serem analisadas
através de pórticos planos



Análises *Pushover* 2D





INSTITUTO
SUPERIOR
TÉCNICO

**Estruturas irregulares em planta – maioria dos
casos reais**



**Modelos de análise
tridimensionais**



Análises *Pushover* 3D

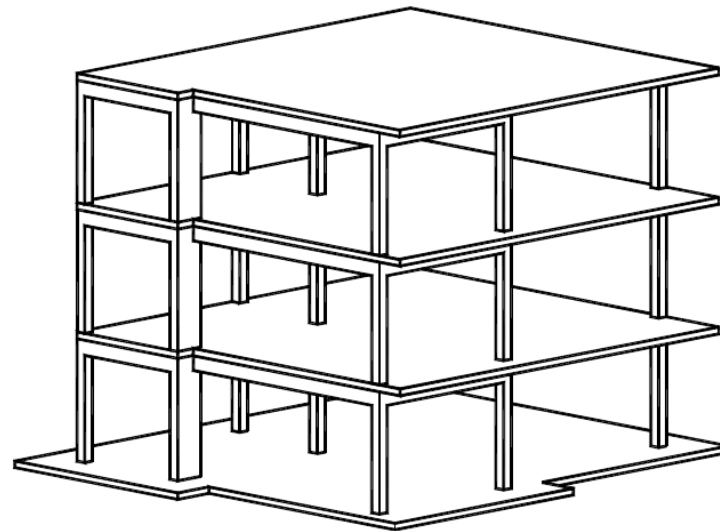
FUNDEC



INSTITUTO
SUPERIOR
TÉCNICO

FUNDEC

Modelação da Estrutura 3D e análise Pushover utilizando elementos de plasticidade concentrada



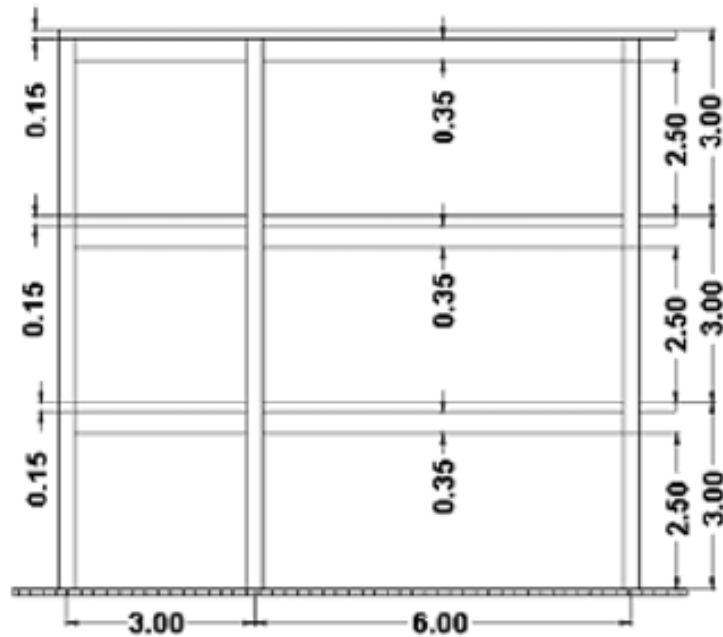


INSTITUTO
SUPERIOR
TÉCNICO

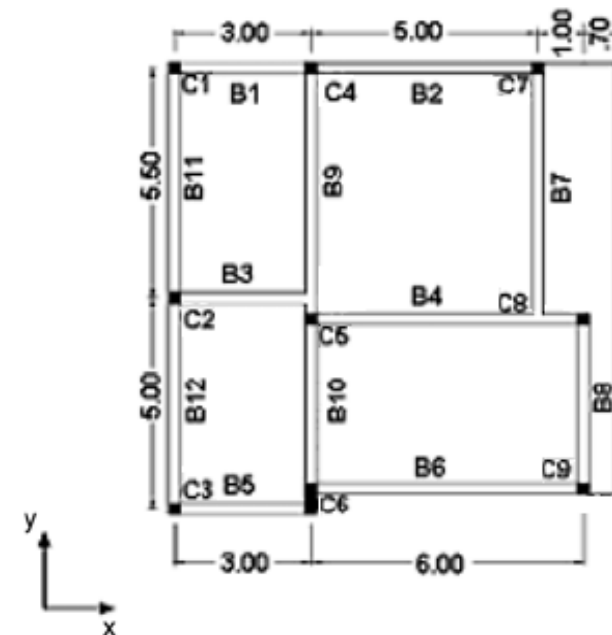
FUNDEC

1. Modelação 3D do edifício SPEAR

Regular em Altura



Irregular em Planta





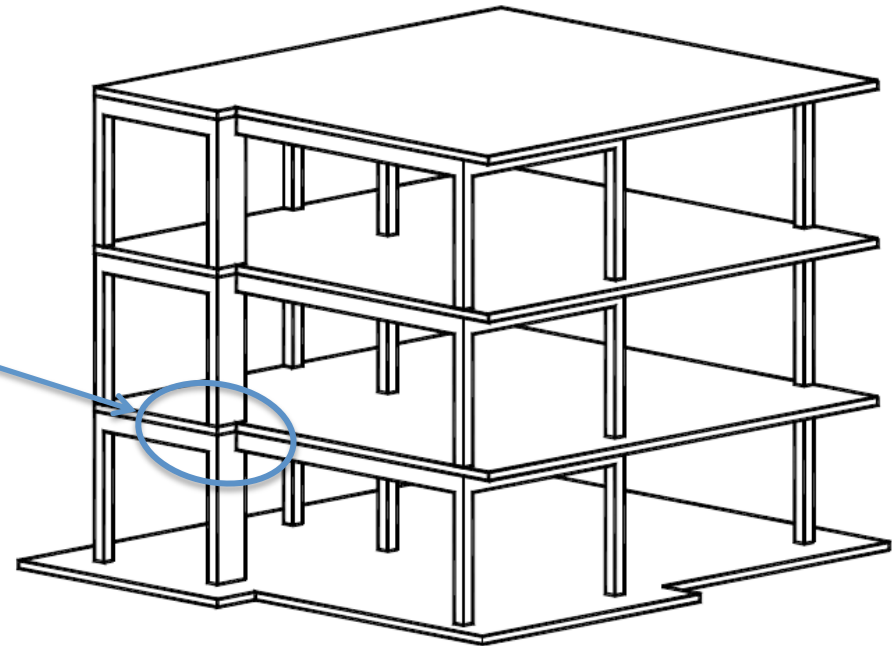
INSTITUTO
SUPERIOR
TÉCNICO

FUNDEC

- 6 graus de liberdade por nó

- Modelação dos Pisos como Diafragma Rígido

- Barras Rígidas a fazer a ligação do centro do Pilar C6 às vigas adjacentes



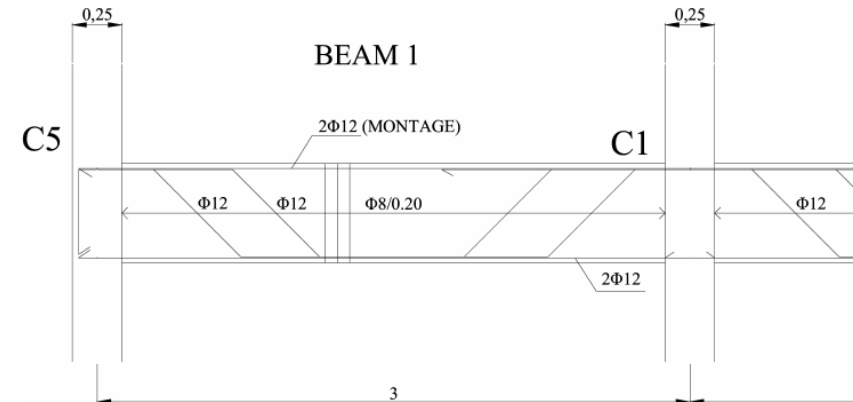
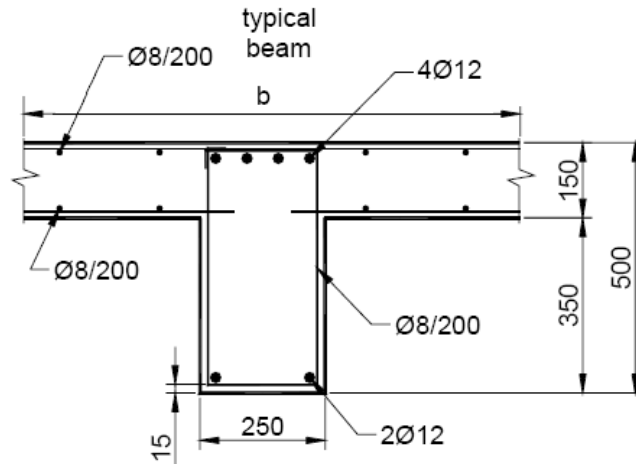
- Encastramentos na base dos pilares, com 6 restrições

- Definição da Massa da Estrutura em planta

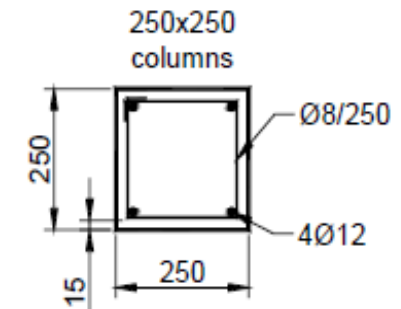
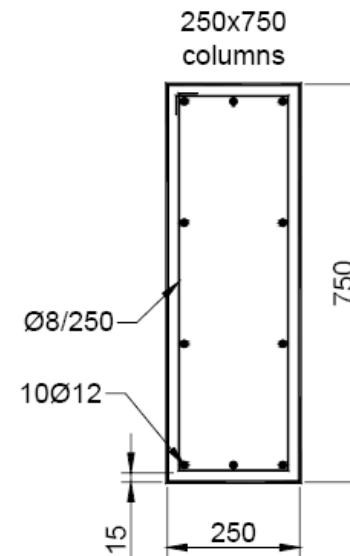


INSTITUTO
SUPERIOR
TÉCNICO

2. Definição das Secções dos elementos da Estrutura 3D: Vigas e Pilares



Viga	b (m)
B1 e B5	0.45
B2, B11 e B12	0.6
B3 e B6	0.65
B4*, B7* e B9*	1.05
B8 e B10	0.75

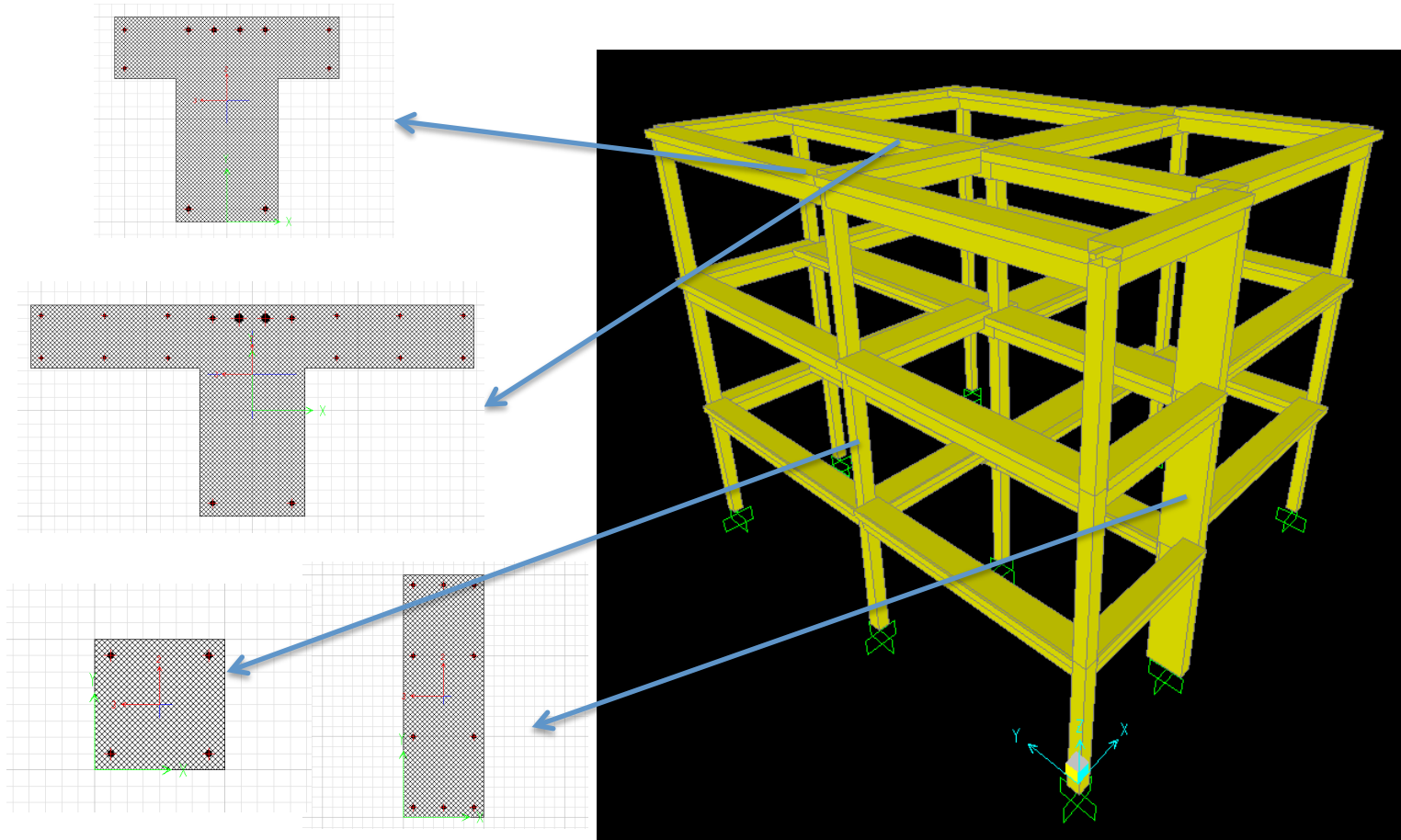


FUNDEC



INSTITUTO
SUPERIOR
TÉCNICO

FUNDEC



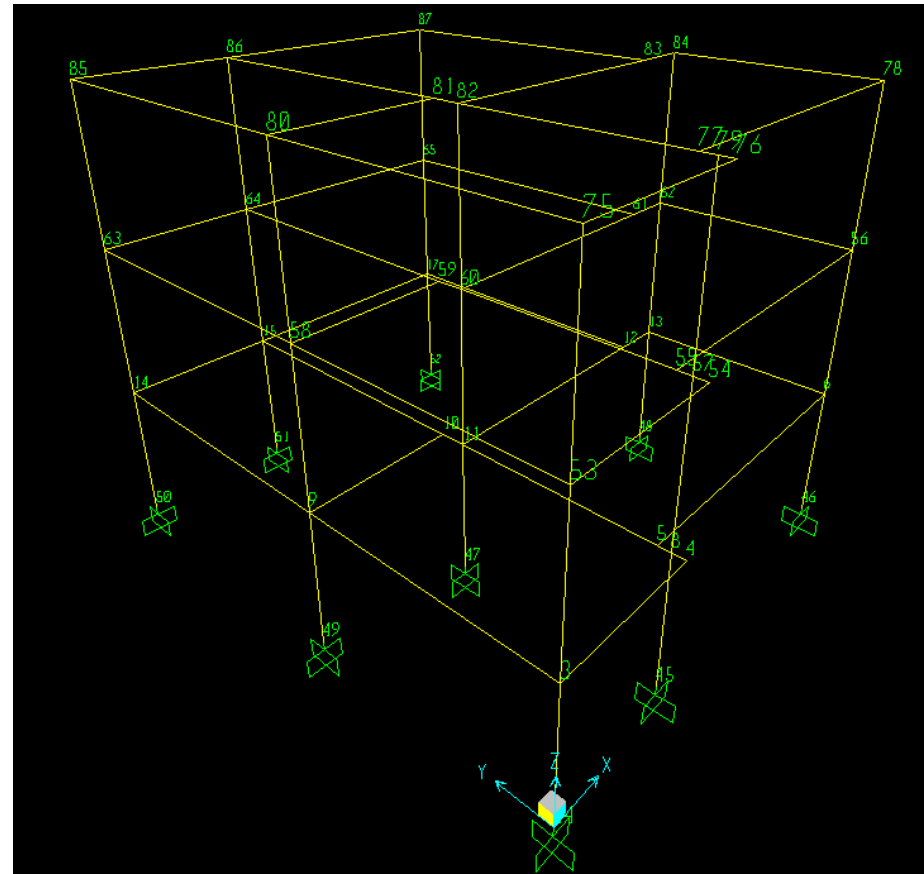
Análises Estáticas Não Lineares (Pushover) para o Dimensionamento e Avaliação Sísmica de Estruturas



INSTITUTO
SUPERIOR
TÉCNICO

FUNDEC

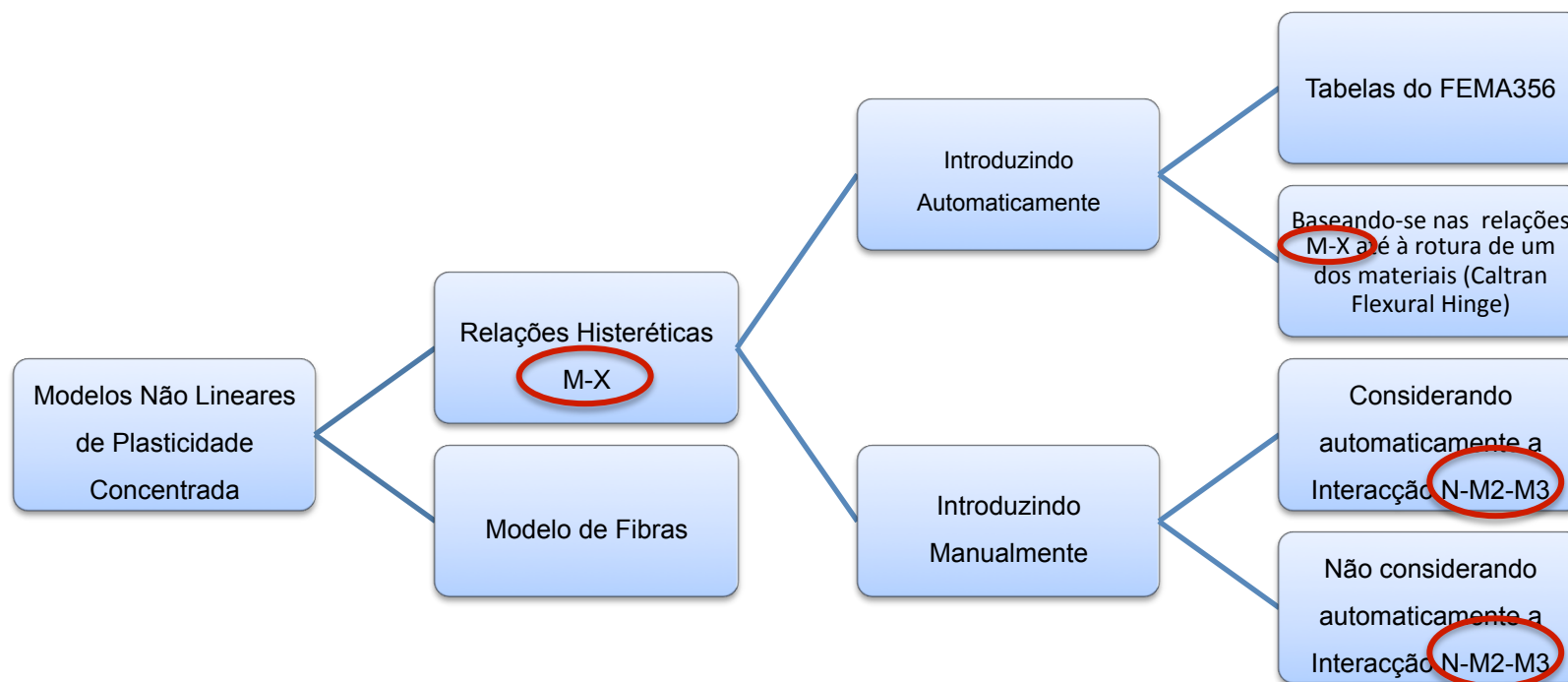
3. Definição da massa da estrutura e das Cargas gravíticas nos vários nós





4. Definição das relações Momento-Curvatura/Rotação nas extremidades de todas as Vigas e Pilares

No SAP2000, para obter resposta não linear, apenas é possível modelar a estrutura com recurso a modelos de plasticidade concentrada:





INSTITUTO
SUPERIOR
TÉCNICO

FUNDEC

5. Definição das Curvas de Capacidade Resistente da Estrutura

Estrutura Tridimensional Irregular em Planta



**Efectuar análise nas duas direcções ortogonais
Para cada direcção, efectuar análise nos dois sentidos (negativo e
positivo)**



**Obtêm-se curvas de capacidade e, conseqüentemente “deslocamento
objectivo” para cada direcção**

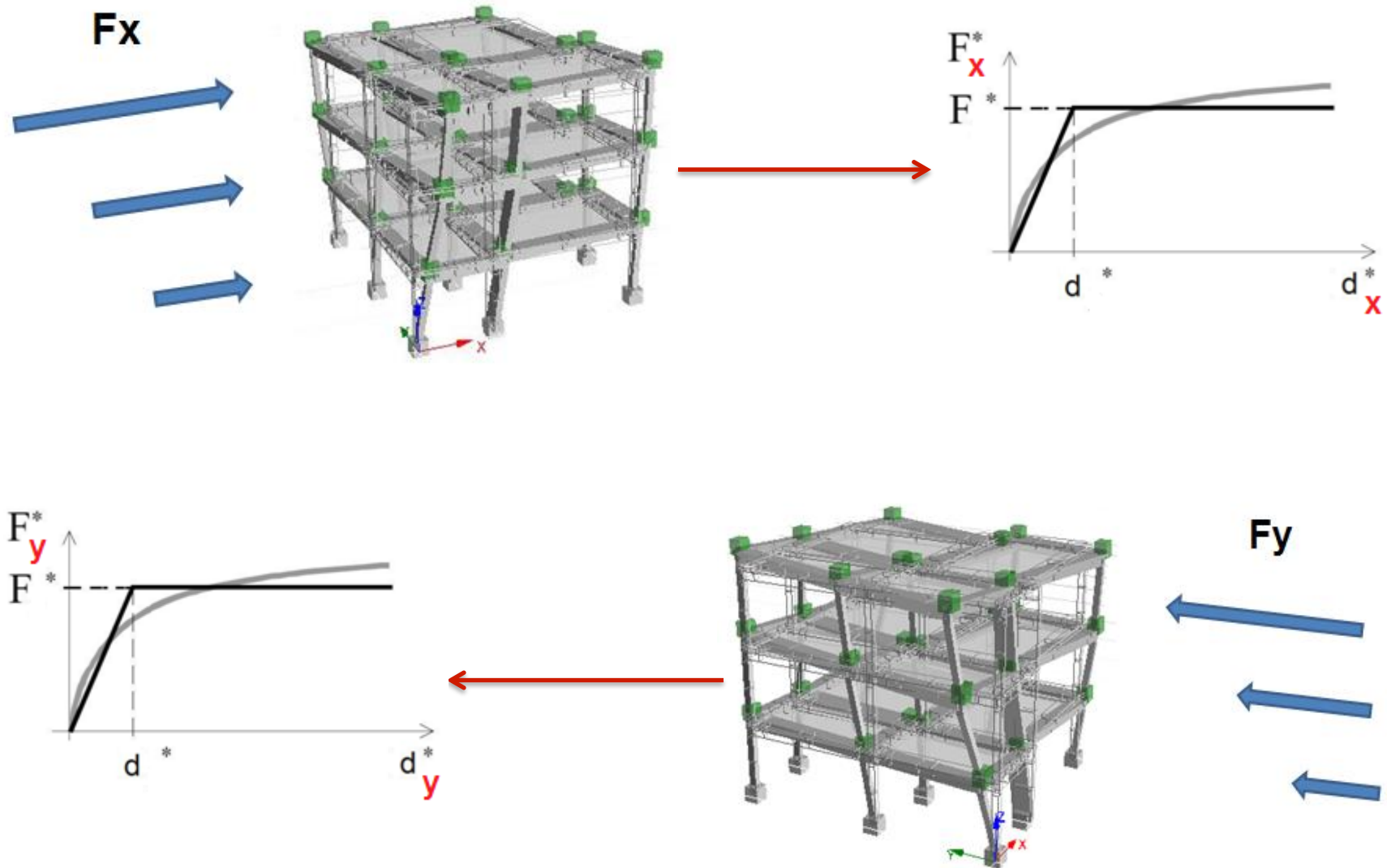


**Combinação dos resultados utilizando a Combinação
SRSS**



INSTITUTO
SUPERIOR
TÉCNICO

FUNDEC



Combinação SRSS

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



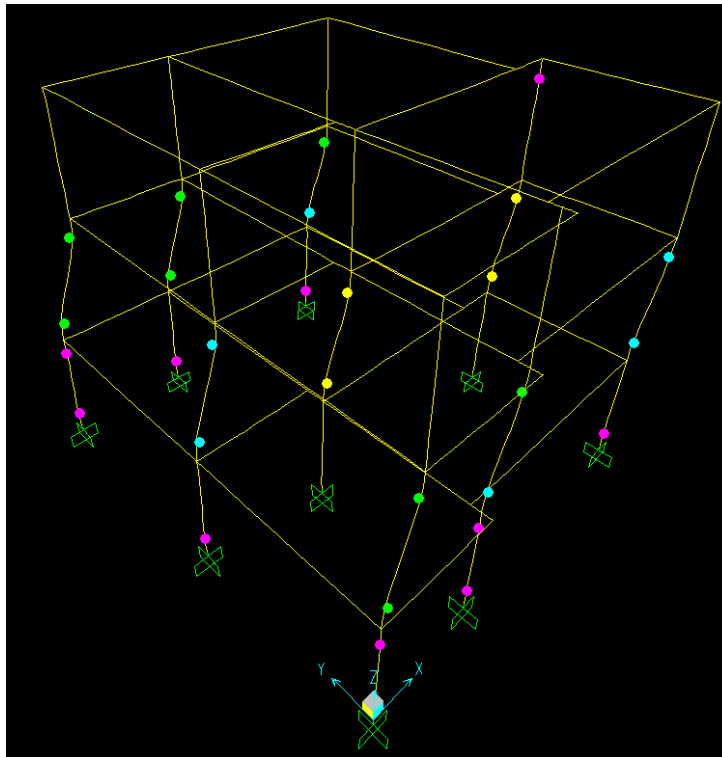
INSTITUTO
SUPERIOR
TÉCNICO

FUNDEC

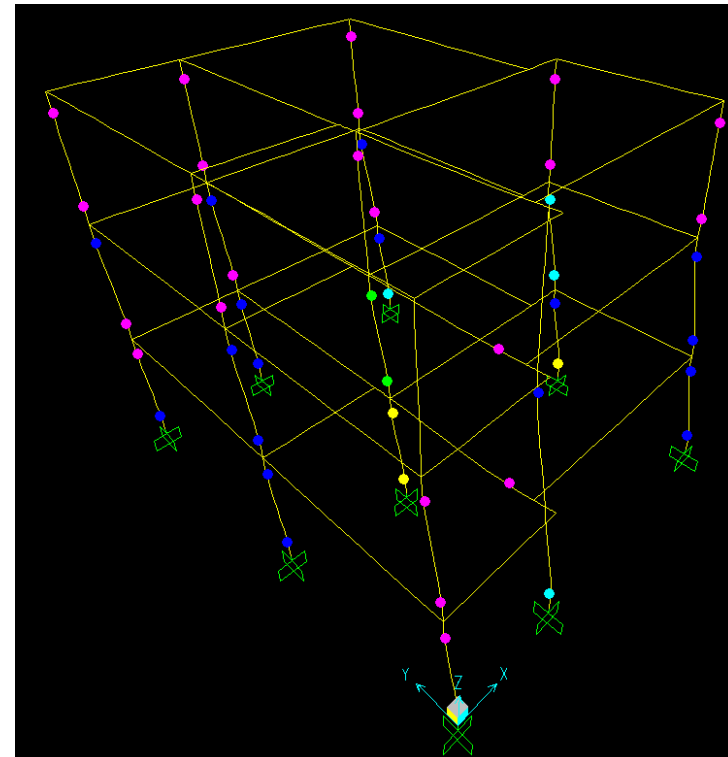
6. Desempenho sísmico da estrutura

Avaliação do desempenho Sísmico da Estrutura para o sismo B

Caso “X+”



Caso “Y+”





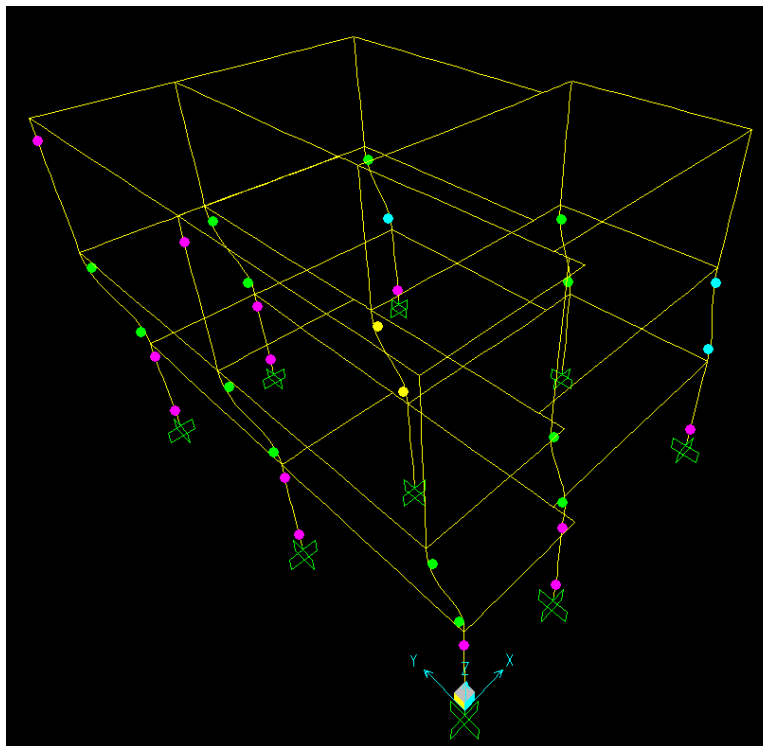
INSTITUTO
SUPERIOR
TÉCNICO

FUNDEC

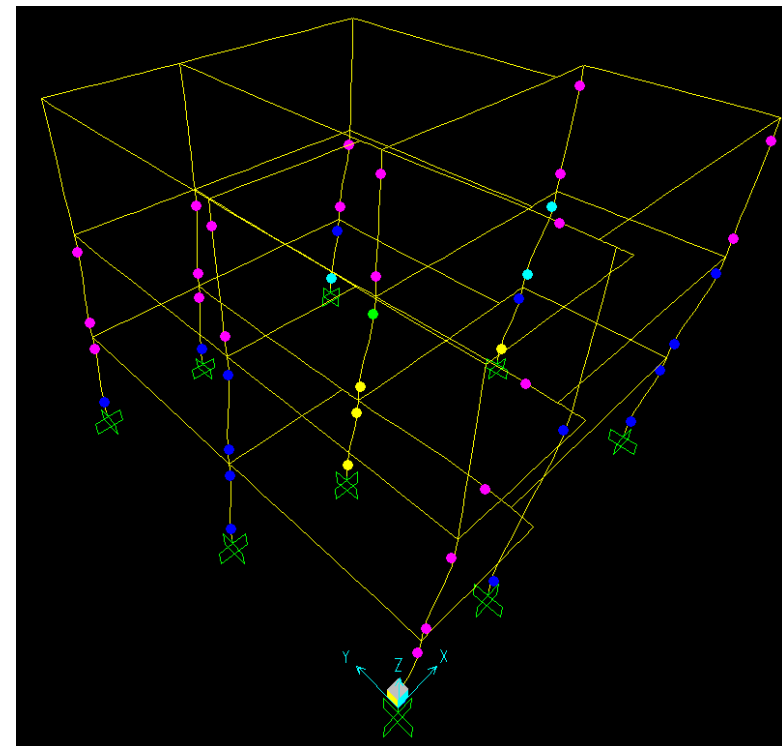
6. Desempenho sísmico da estrutura

Avaliação do desempenho Sísmico da Estrutura para o sismo B

Caso "X-"



Caso "Y-"





➤ **Aplicação de NSPs em pórticos planos muito estudada e com bons resultados**

➤ **Aplicação de NSPs em edifícios assimétricos em planta menos estudada**



➤ **Maioria dos casos reais assimétricos em planta
→ utilização em gabinetes de projecto limitada**

➤ **Problemas de torção → alguns NPSs com melhores desempenhos do que outros**



INSTITUTO
SUPERIOR
TÉCNICO

FUNDEC



***Análise Pushover do Edifício
SPEAR 3D utilizando
elementos de plasticidade
distribuída***



INSTITUTO
SUPERIOR
TÉCNICO

FUNDEC

1. Modelação da Estrutura com elementos de fibra - SeismoStruct

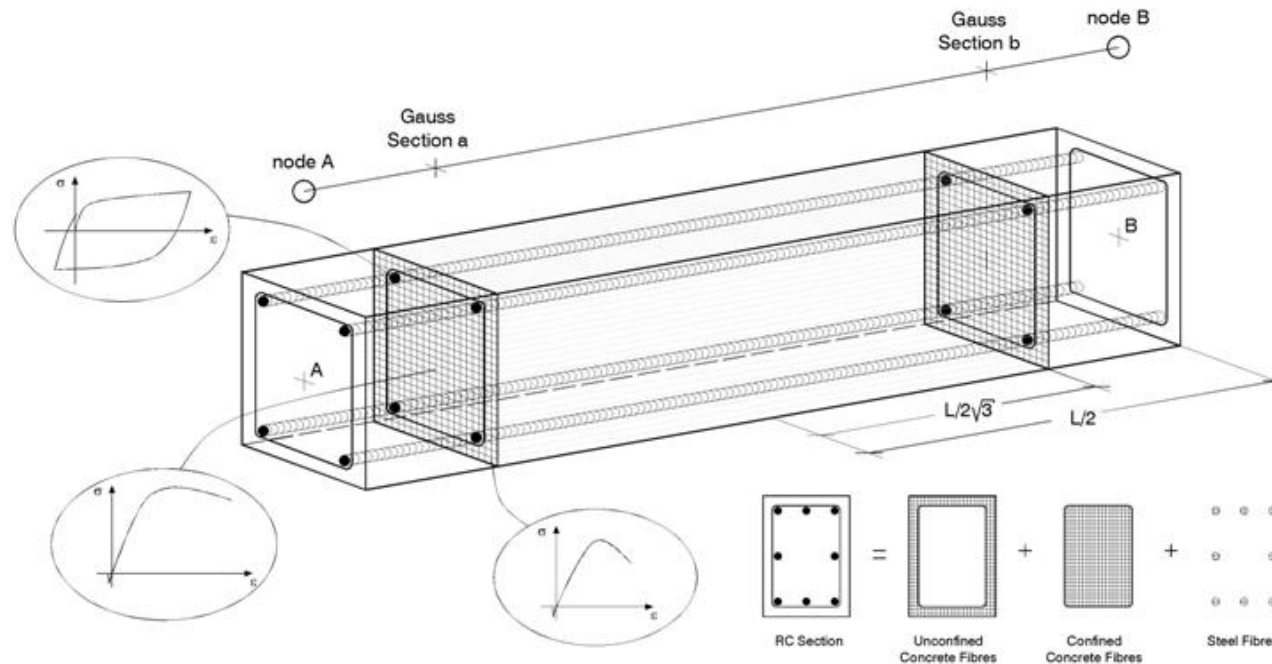
- *SeismoStruct*

- Modelos de plasticidade distribuída
 - *Modelos de fibras*

- *Elementos finitos Displacement based*



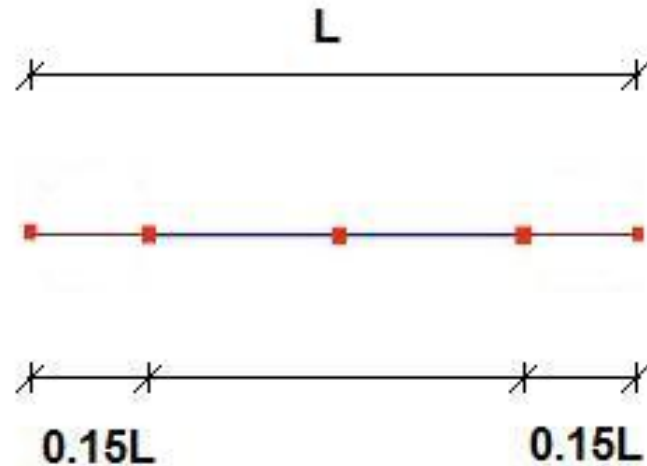
1. Modelação da Estrutura com elementos de fibra - SeismoStruct



- Resposta da secção: integração ao nível da secção considerando 300 fibras
- Resposta do elemento: integração ao longo do elemento considerando 2 pontos de Gauss → esquema de integração Gauss (betão e aço)
- Integração usando a *Mid point rule*



- *Cada elemento estrutural foi dividido em 3 a 4 sub-elementos*



- *Inelasticidade desenvolve-se nas extremidades*
 - *Elementos de extremidade mais curtos*



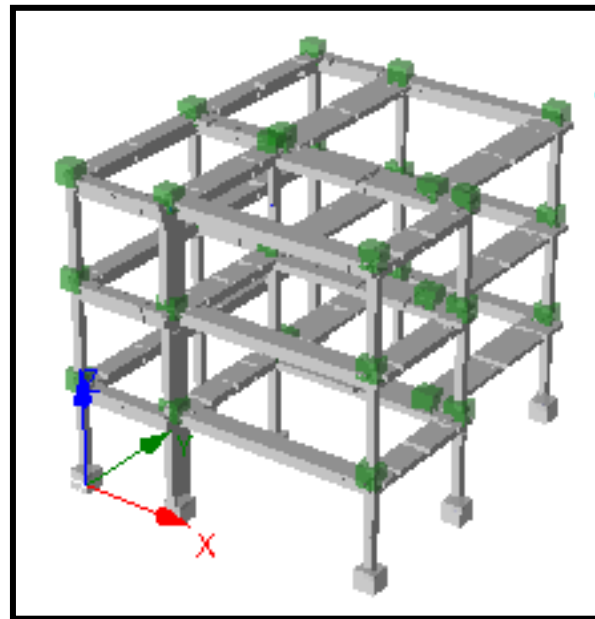
- Pilar alongado C6: ao nível de cada piso é ligado às vigas adjacentes com elementos elásticos de grande rigidez
- Escorregamento dos varões (lisos) não foi modelado por questões de simplicidade → não afectou a resposta
- Amortecimento histerético foi implicitamente incluído na formulação do modelo não linear por fibras de cada elemento
- 2% amortecimento proporcional à rigidez tangente – para ter em conta outras fontes de amortecimento não histerético



INSTITUTO
SUPERIOR
TÉCNICO

FUNDEC

- Altura dos pisos: 2.75m para o primeiro piso e 3.00m para os pisos superiores
- Modelação do piso rígido utilizando multiplicadores de Lagrange
- Massas concentradas nos nós





INSTITUTO
SUPERIOR
TÉCNICO

FUNDEC

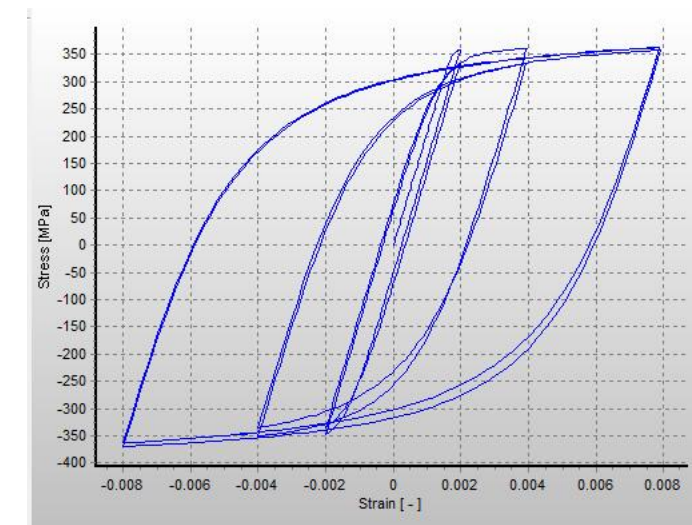
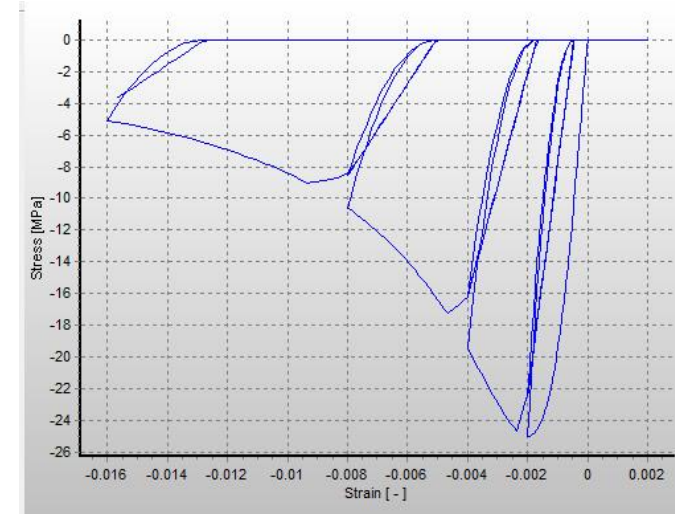
2. Definição dos Materiais

**Betão: Modelo de
Mander et al.**

**Comportamento cíclico –
modelo de Martinez
Rueda e Elanshai**

**Aço: Modelo de Menegotto
and Pinto**

**Regras de endurecimento
isotrópico de Filippou et al.**





INSTITUTO
SUPERIOR
TÉCNICO

3. Validação da modelação - Protótipo testado ELSA vs. Modelo analítico



FUNDEC

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



Comparação com os resultados experimentais (I)

- ***Períodos***

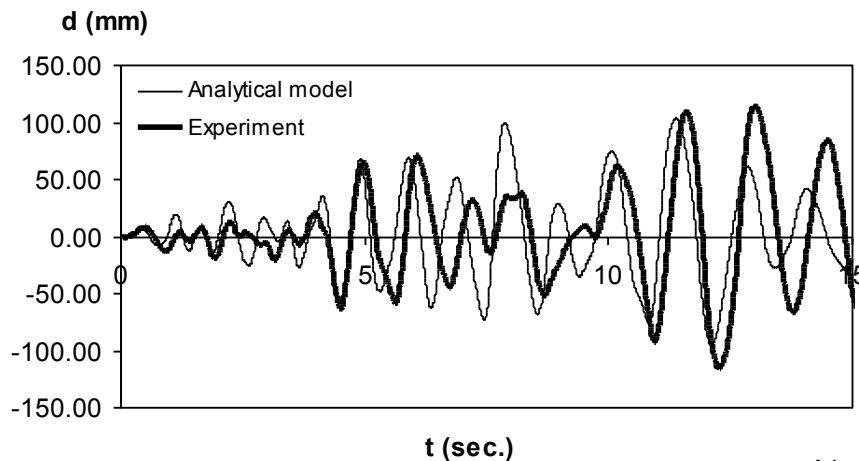
	Experimental	Analítico
T1	0.85 sec.	0.62 sec.
T2	0.78 sec.	0.53 sec.

- Diferenças devido à fendilhação nas colunas aquando do transporte do protótipo de fora (onde foi construído) para o interior do laboratório ELSA em ISPRA (onde foi testado).

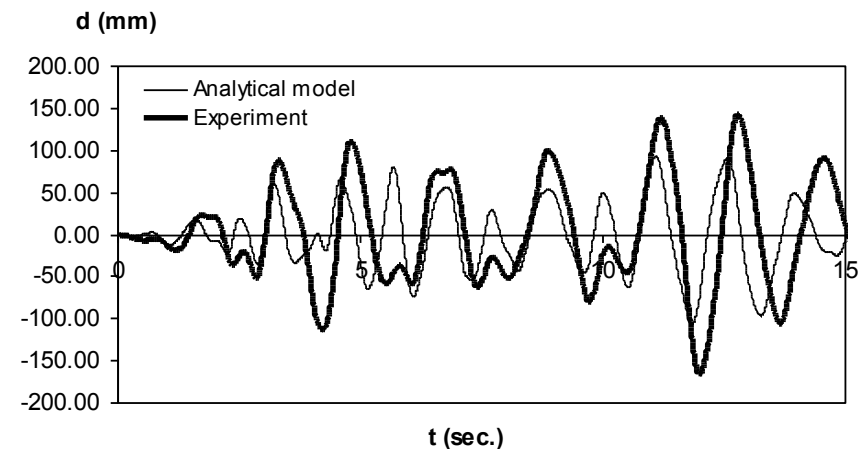


Comparação com os resultados experimentais (II)

• Deslocamentos de topo – 0.2g



nó C7 – direcção X



nó N1 – direcção Y



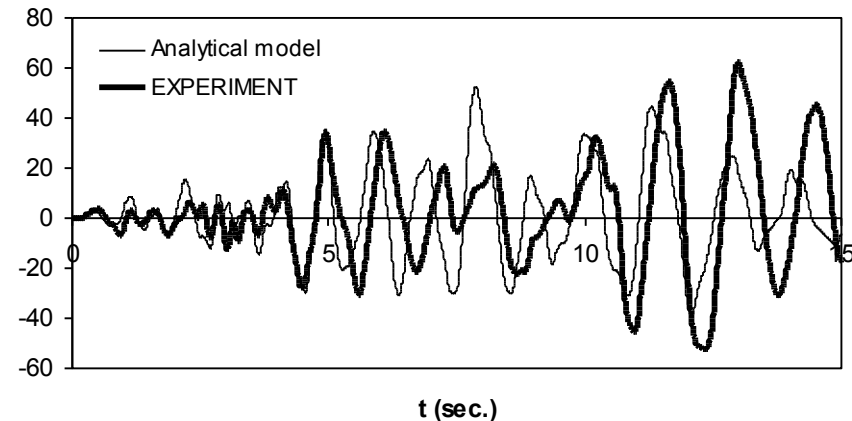
INSTITUTO
SUPERIOR
TÉCNICO

Comparação com os resultados experimentais (III)

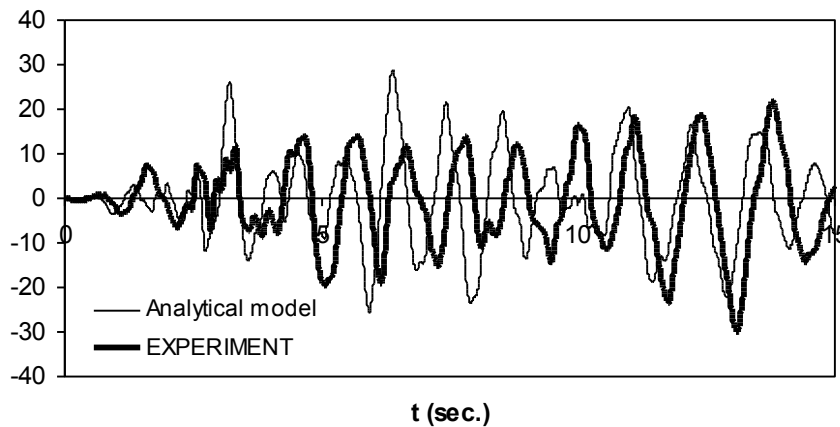
- *Deslocamentos interpisos – 0.2g*

*nó C7 1^o-2^o pisos –
direcção X*

id (mm)



id (mm)



*nó C9 1^o piso –
direcção Y*

FUNDEC

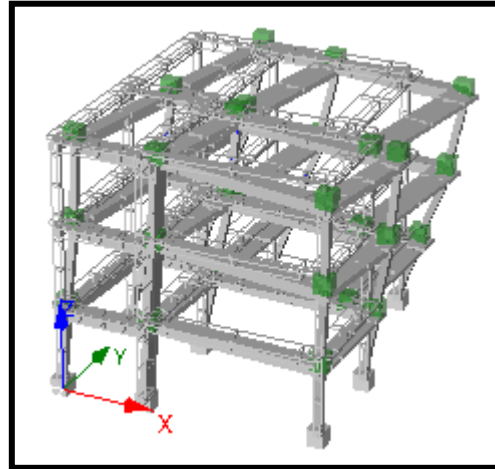


INSTITUTO
SUPERIOR
TÉCNICO

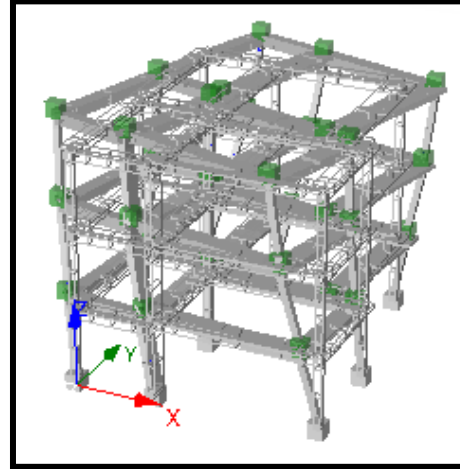
4. Propriedades dinâmicas

*Primeiros
modos*

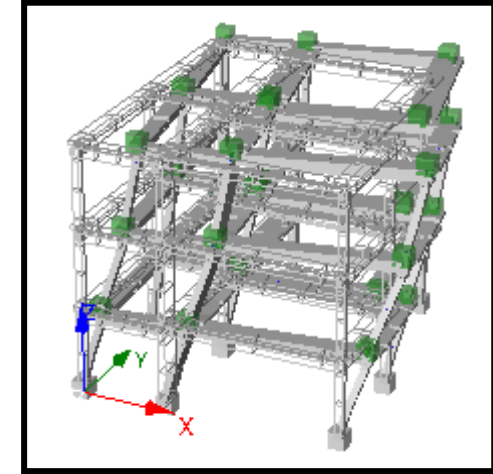
*Modo de translação
segundo X*



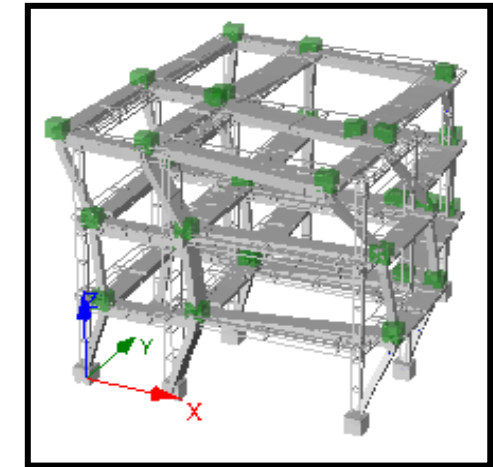
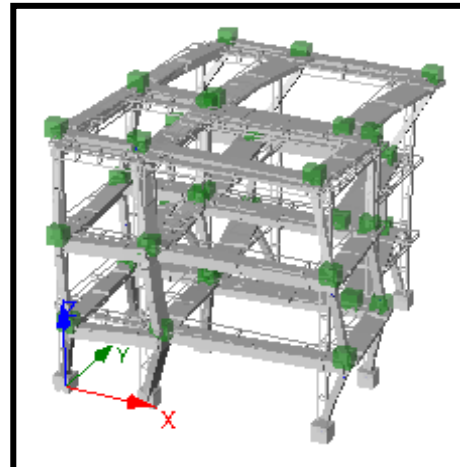
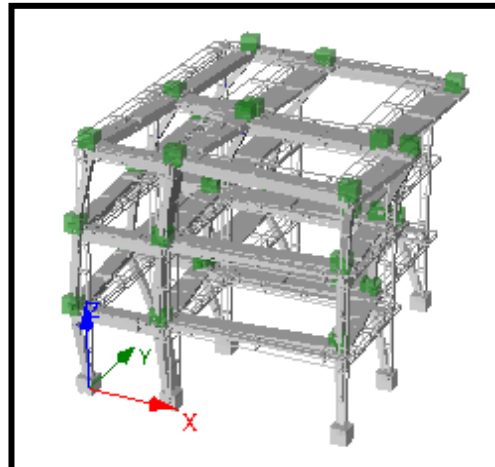
*Modo de translação
segundo Y*



Modo de torção



*Modos
elevados*



- Características torsionais importantes
- Necessário utilizar um modelo espacial

FUNDEC



INSTITUTO
SUPERIOR
TÉCNICO

4. Propriedades dinâmicas – Razão de períodos

	Ω_x	Ω_y
Edifício SPEAR	1.2	0.8

- Torsionalmente rígido na direcção X
- Torsionalmente flexível na direcção Y

FUNDEC



5. Análises desenvolvidas – Análises dinâmicas não lineares

- 7 acelerogramas bi-direcionais semi-artificiais do projecto SPEAR, compatíveis com o espectro elástico do EC8 (Tipo 1, solo C). Aplicados nas duas direcções simultaneamente.

<i>Sismo</i>	<i>Nome da Estação</i>
Imperial Valley 1979	Bonds Corner
Loma Prieta 1989	Capitola
Kalamata 1986	Kalamata – Perfecture
Montenegro 1979	Herceg Novi
Friuli 1976	Tolmezzo
Montenegro 1979	Ulcinj2
Imperial Valley 1940	El Centro Array #9

- Combinações: X+Y+, X+Y-, X-Y-, X-Y+
- Intensidades: 0.05g, 0.1g, 0.2g e 0.3g



INSTITUTO
SUPERIOR
TÉCNICO

FUNDEC

6. Análises desenvolvidas – Análises estáticas não lineares

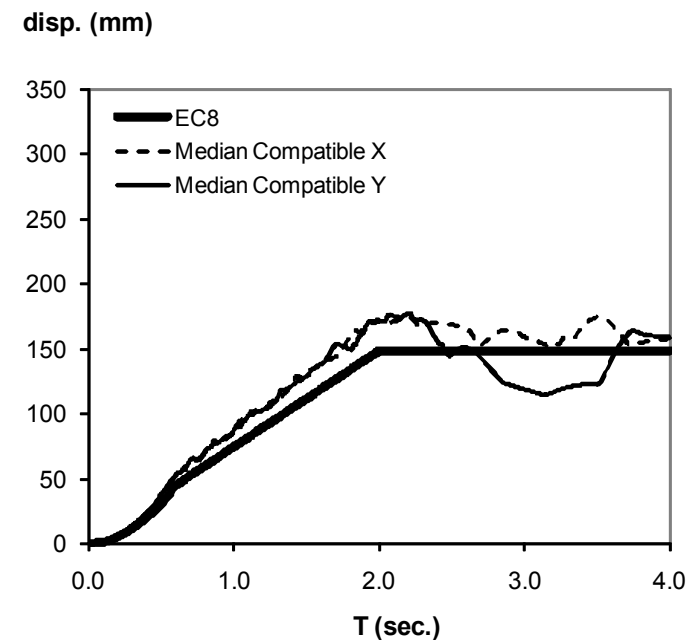
- *Pushover* convencional com forças
 - *Pushover* adaptativo com deslocamentos (DAP)
- } Separados em cada direcção
Com sentido + e -

- Procedimentos estáticos não lineares

- Original N2
- Extended N2
- CSM – ATC40
- CSM – FEMA440
- Extended CSM-FEMA440
- MPA
- ACSM

- Intensidades: 0.05g, 0.1g,
0.2g e 0.3g

- Mediana dos espectros compatíveis
com os acelerogramas



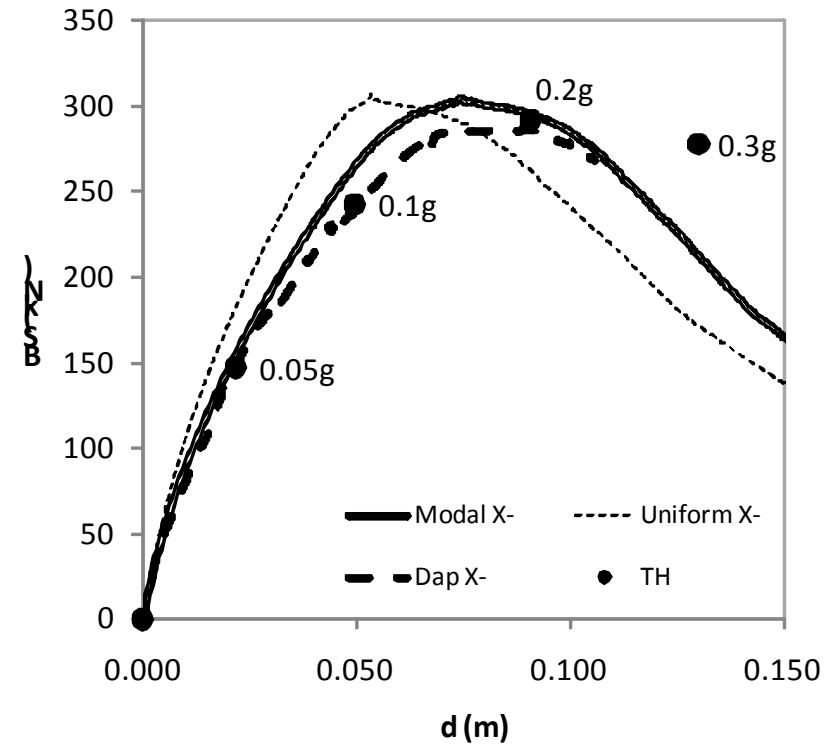
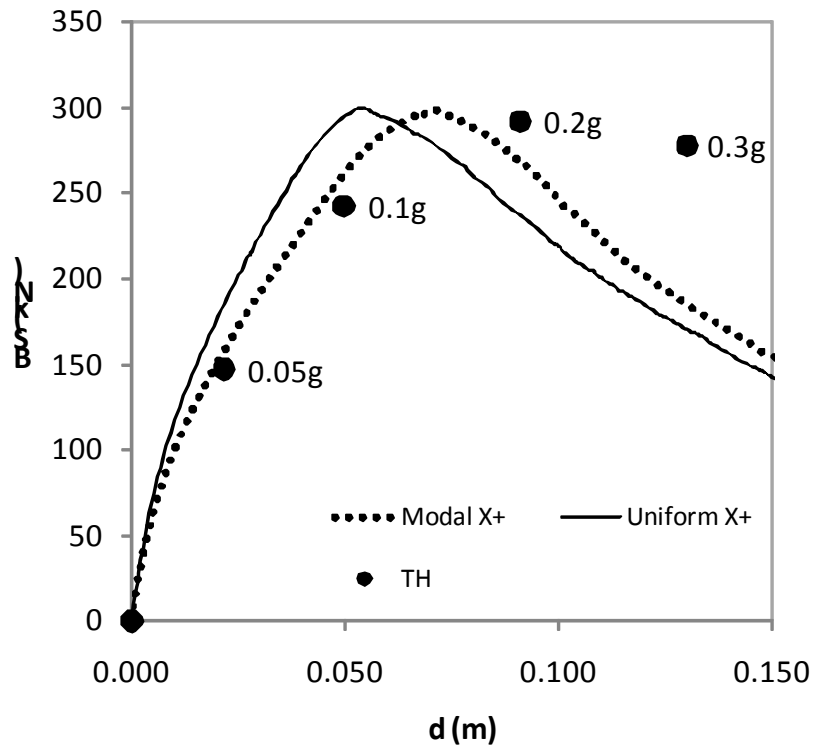
Nível de intensidade: 0.2g



INSTITUTO
SUPERIOR
TÉCNICO

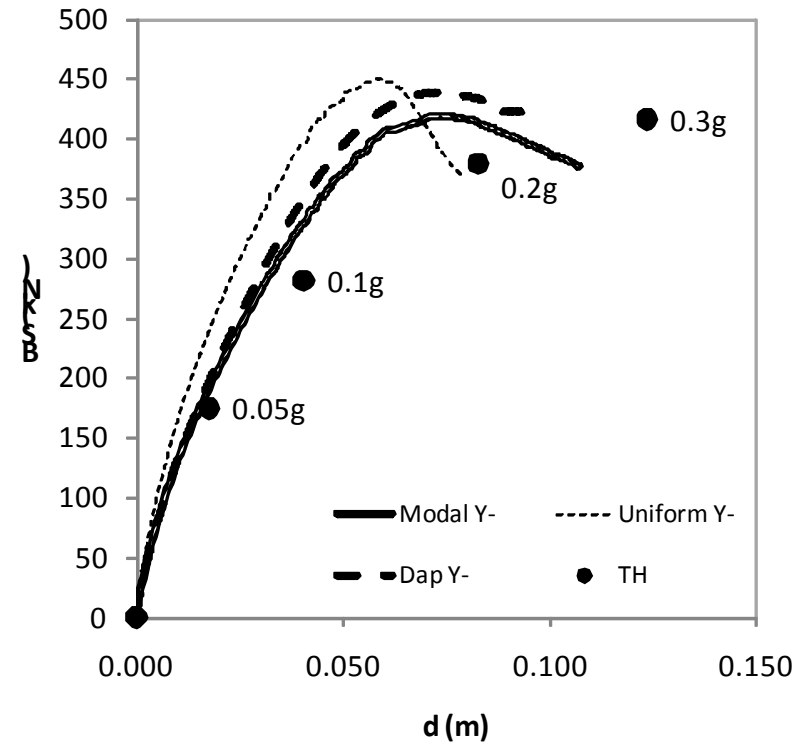
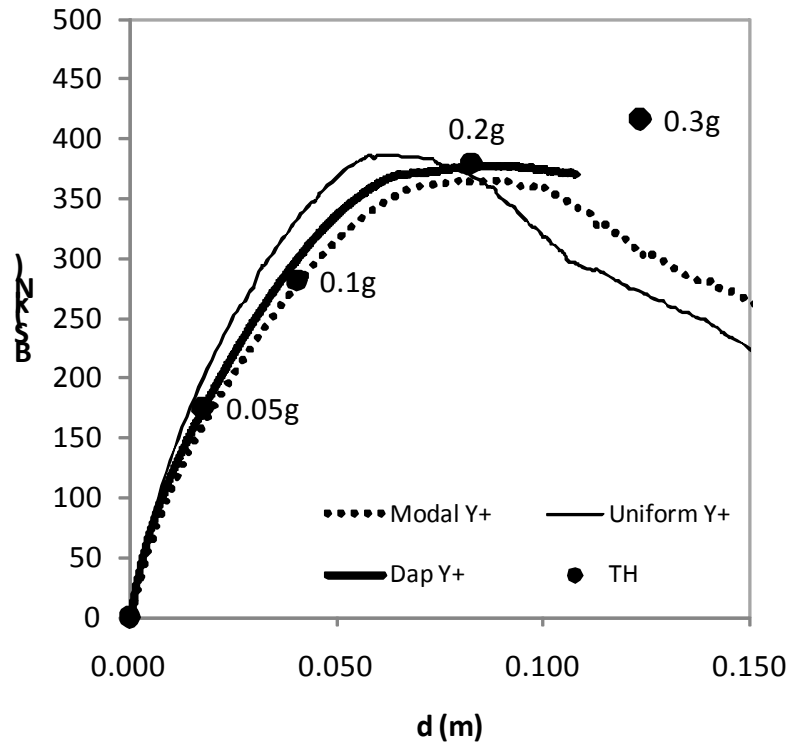
FUNDEC

7. Curvas de capacidade – direcção X





7. Curvas de capacidade – direcção Y





7. *Curvas de capacidade*

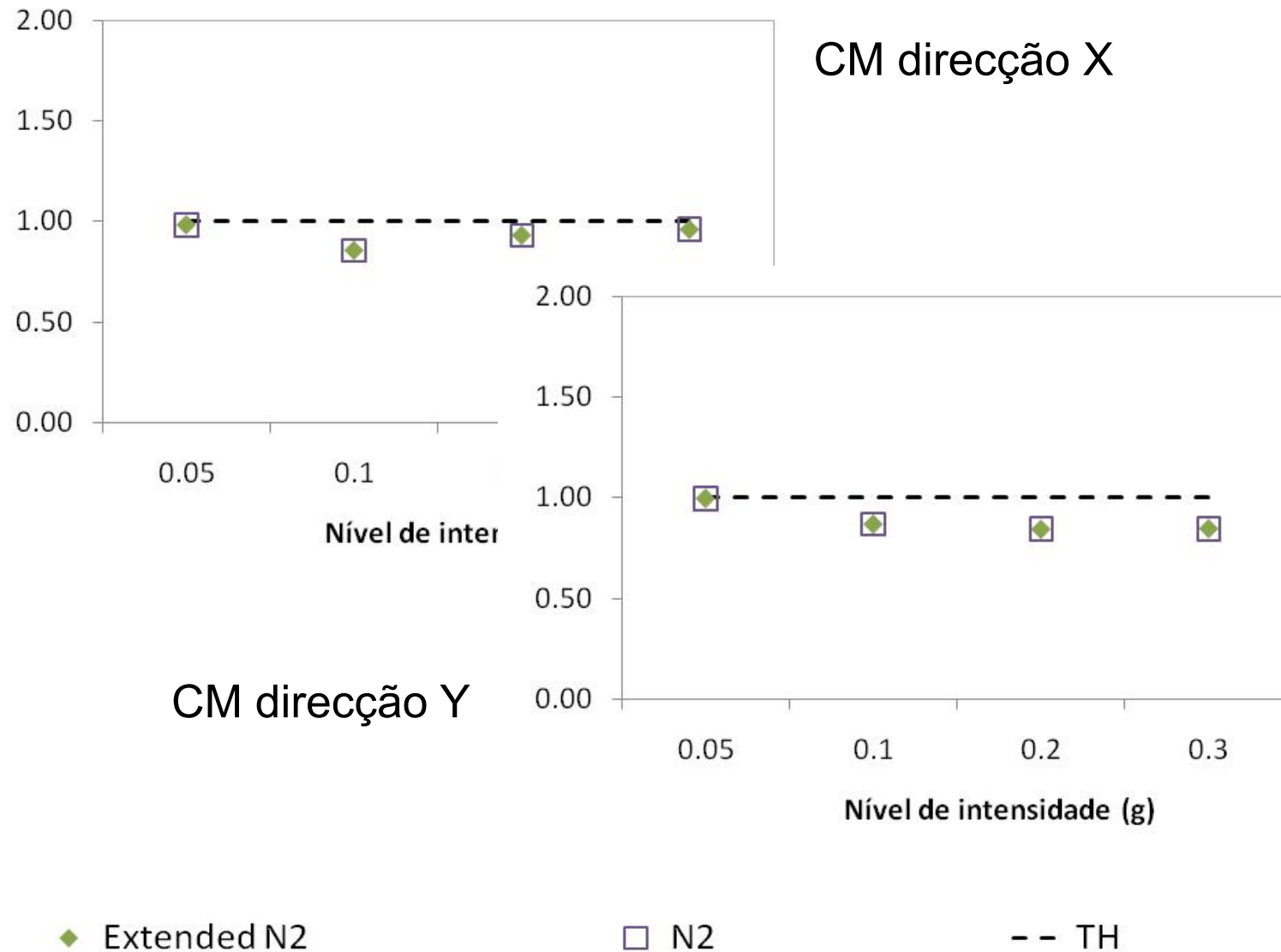
- A estrutura apresenta maior resistência segundo a direcção Y (o pilar C6 alongado apresenta a maior dimensão segundo Y)
- Capacidades máximas em termos de corte basal próximas em X+ e X-
- Capacidades máximas em termos de corte basal diferentes em Y+ e Y- devido ao pilar C6
- O edifício SPEAR está em regime praticamente elástico para 0.05g e 0.1g; em regime não linear para 0.2g e 0.3g
- Colapso para 0.3g
- Curvas *Pushover* próximas dos resultados *timehistory*
- Curvas Dap e Modal com resultados próximos; Curva Uniforme envolvente



INSTITUTO
SUPERIOR
TÉCNICO

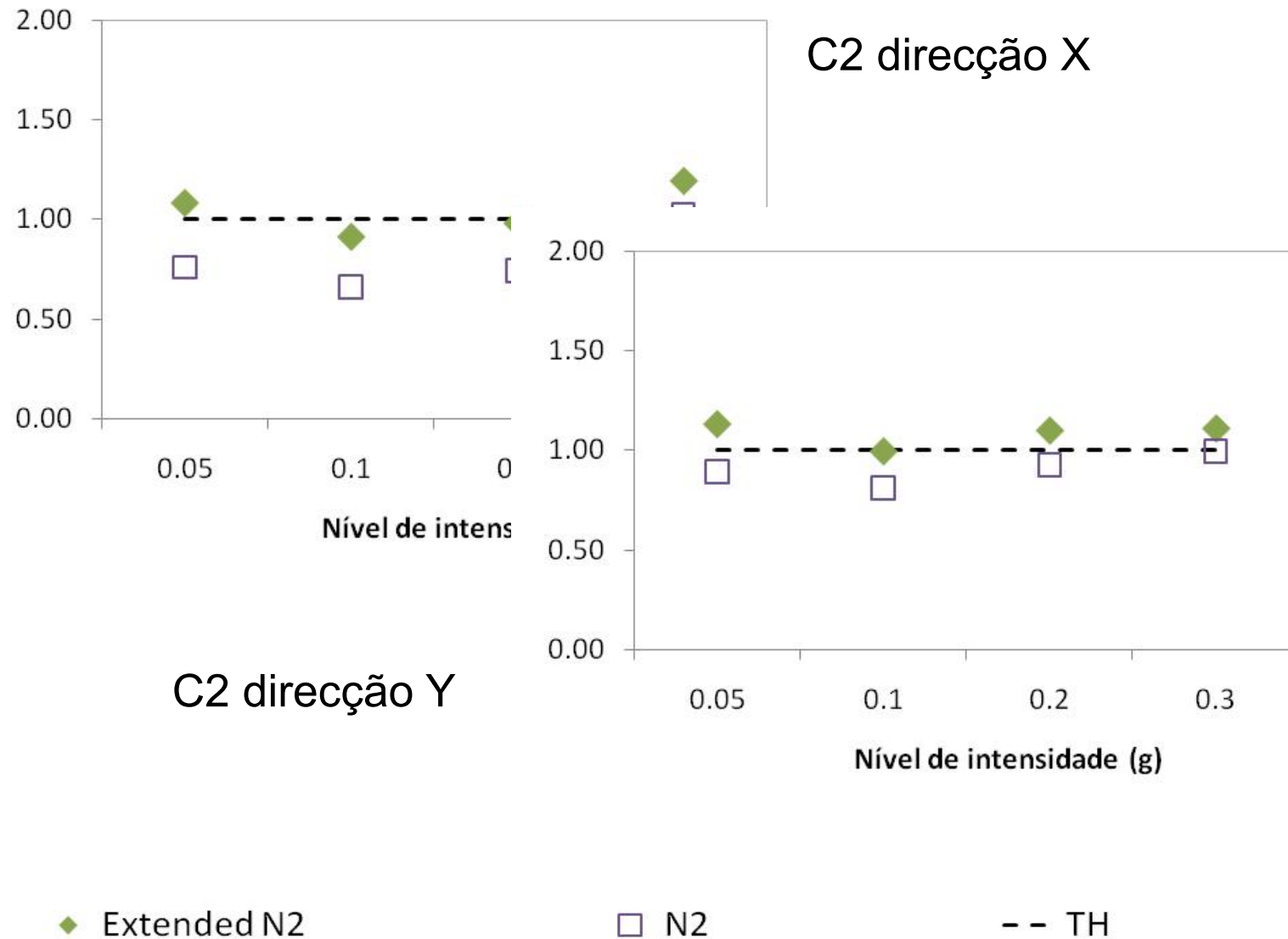
FUNDEC

8. Original N2 vs. Extended N2 – Deslocamentos de topo





8. Original N2 vs. Extended N2 – Deslocamentos de topo

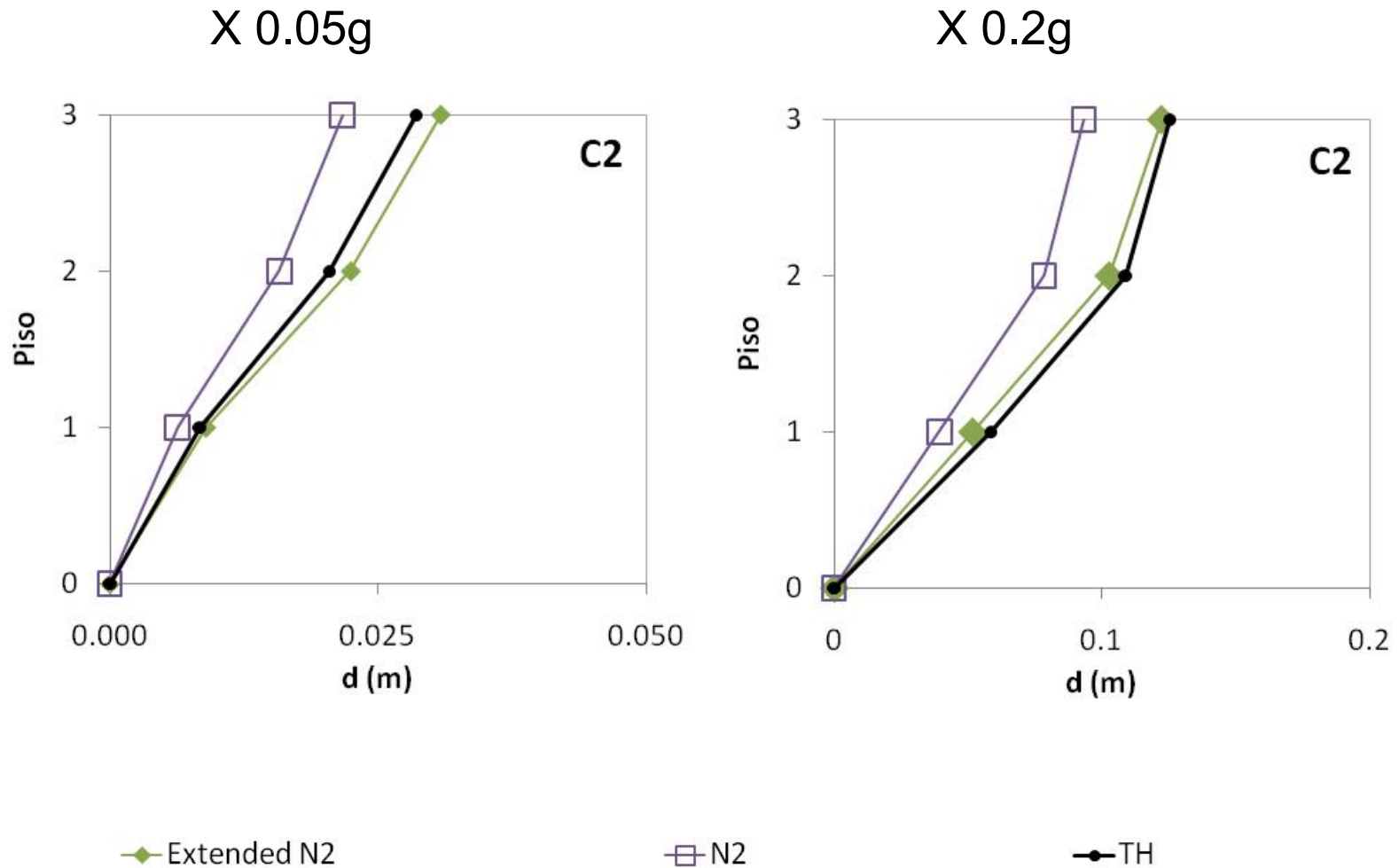




INSTITUTO
SUPERIOR
TÉCNICO

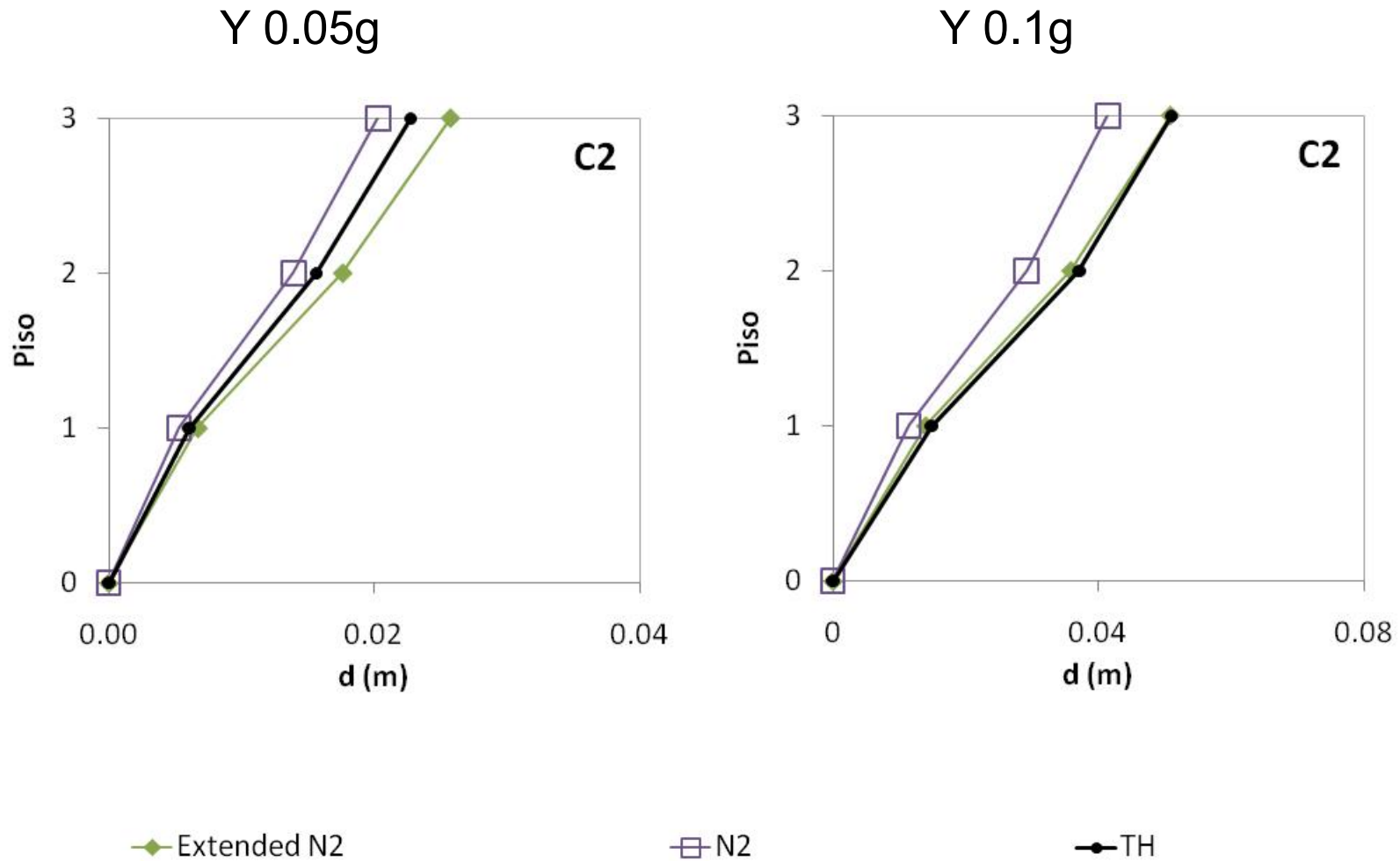
FUNDEC

8. Original N2 vs. Extended N2 – Perfil de deslocamentos laterais, direcção X





8. Original N2 vs. Extended N2 – Perfil de deslocamentos laterais, direcção Y

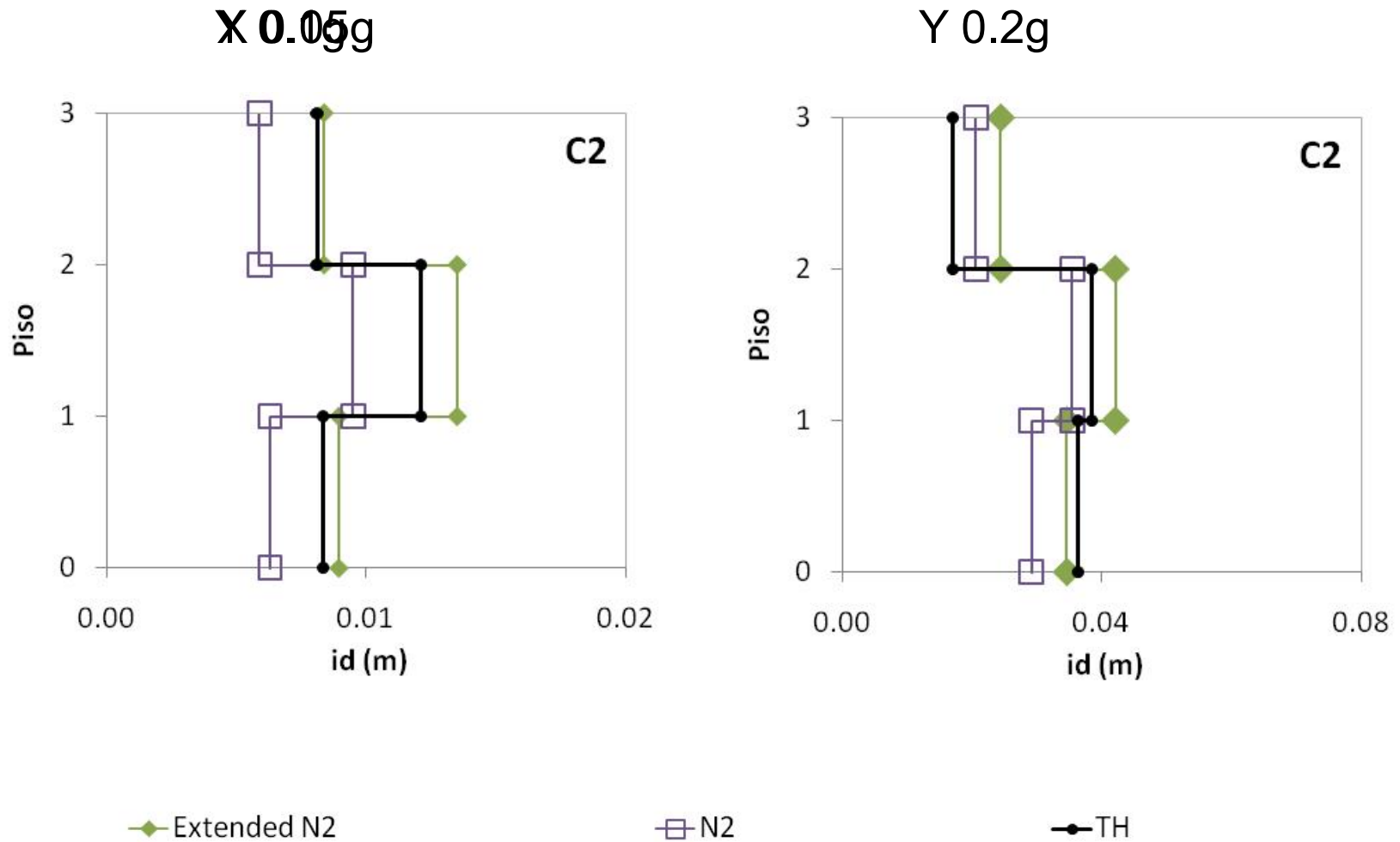




INSTITUTO
SUPERIOR
TÉCNICO

FUNDEC

8. Original N2 vs. Extended N2 – Deslocamentos interpisos

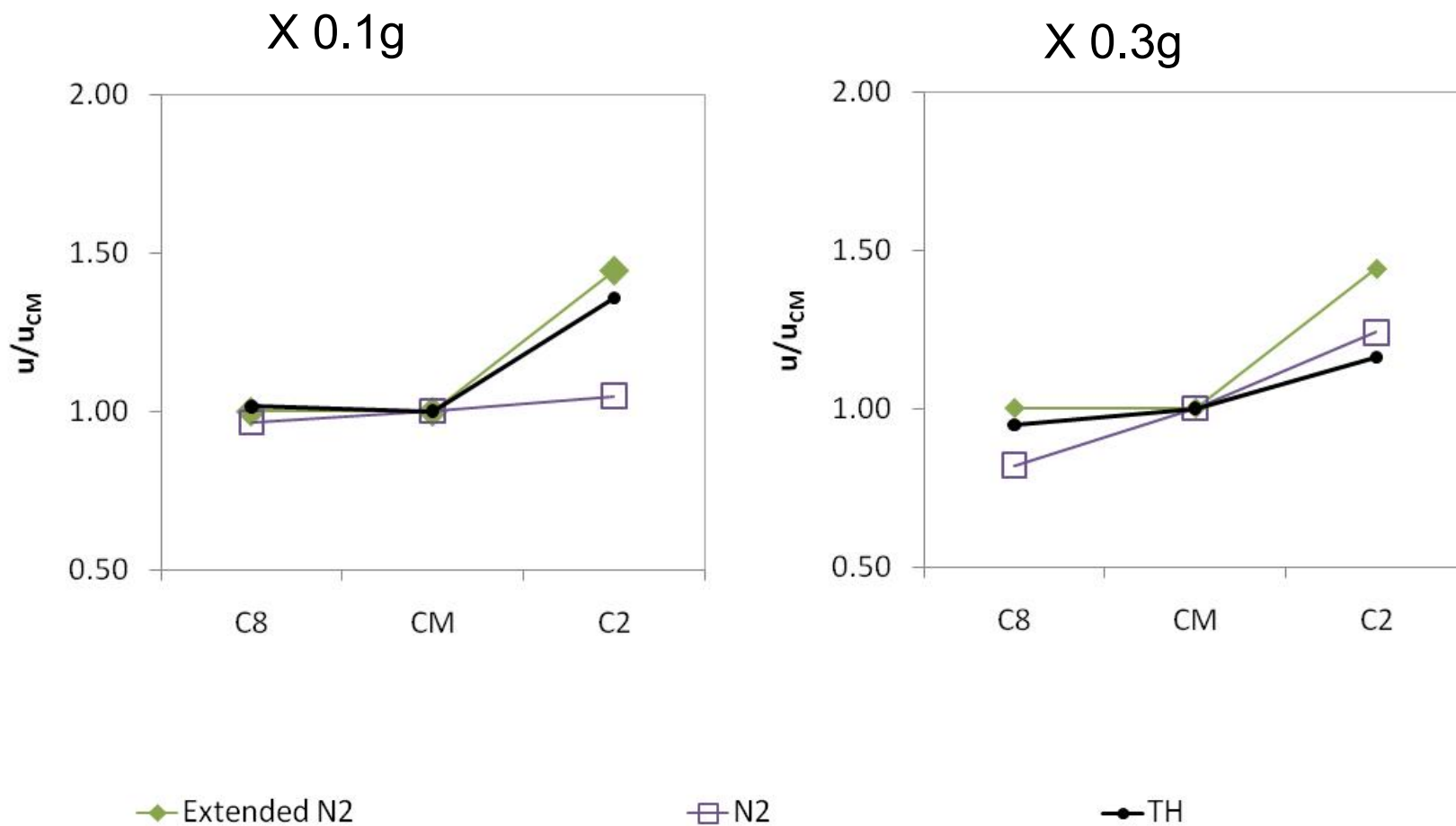




INSTITUTO
SUPERIOR
TÉCNICO

FUNDEC

8. Original N2 vs. Extended N2 – Deslocamentos de topo normalizados, direcção X

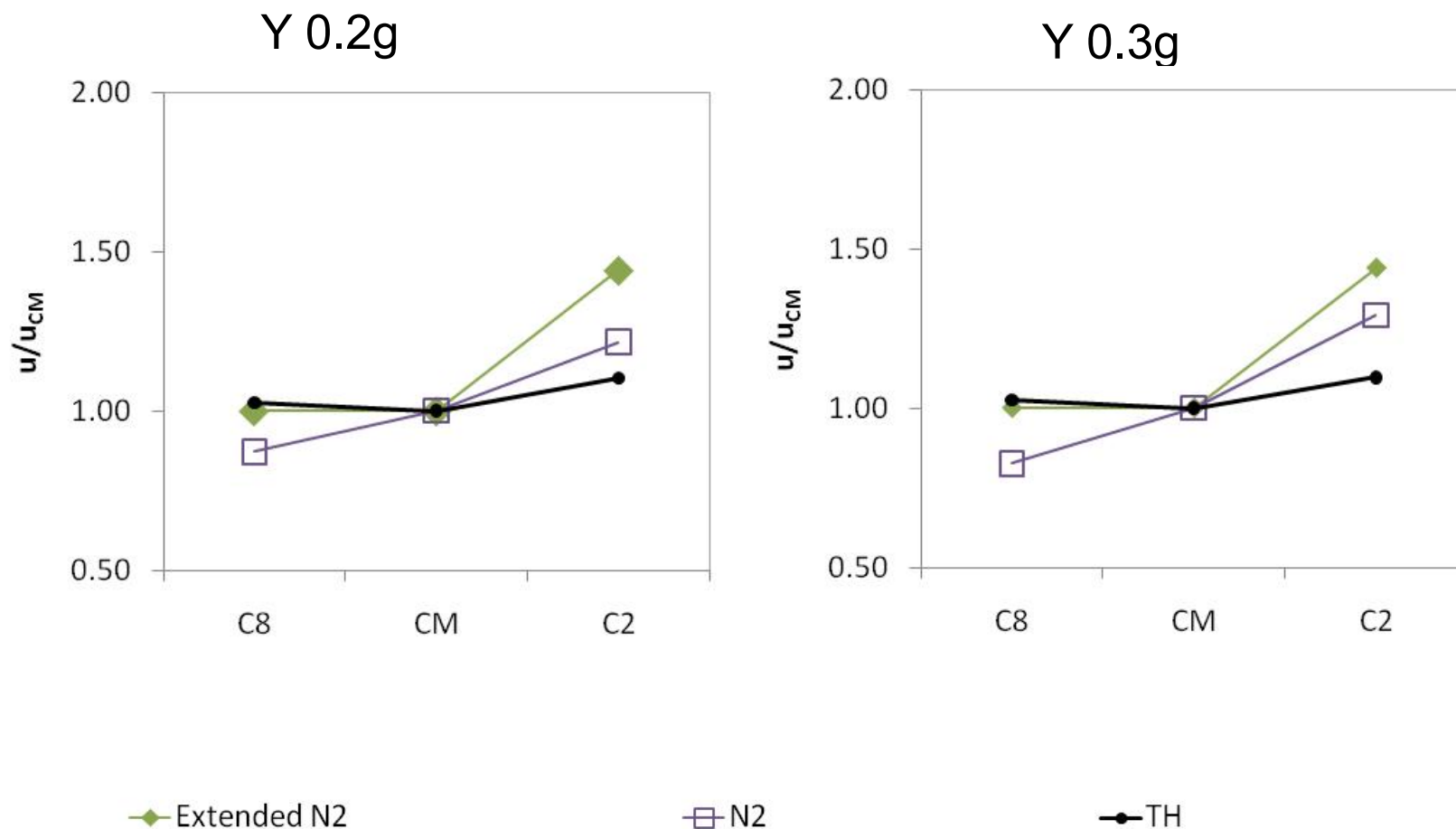




INSTITUTO
SUPERIOR
TÉCNICO

FUNDEC

8. Original N2 vs. Extended N2 – Deslocamentos de topo normalizados, direcção Y





INSTITUTO
SUPERIOR
TÉCNICO

FUNDEC

8. Original N2 vs. Extended N2 – Conclusões

- Edifício SPEAR – testado experimentalmente no laboratório ELSA, Ispra – irregular em planta (torsionalmente sensível)
- Método N2 original vs. Extensão do N2 → comparação com IDA
- Extensão do método N2 → aplicação de factores de correcção para ter em conta o efeito da torção
 - Factores de correcção calculados com base numa análise dinâmica linear e numa análise *pushover*
- Extensão do N2 consegue reproduzir melhor a resposta do edifício → sobretudo na extremidade flexível → amplificação da resposta devido à torção é mais acentuada
- O método N2 original conduz a resultados não conservativos → extremidade flexível



8. Original N2 vs. Extended N2 – Conclusões

- Extensão do N2 reproduz correctamente a resposta torsional do edifício – deslocamentos de topo normalizados
 - Efeitos de torção maiores para intensidades mais baixas
 - N2 original estima linearmente a resposta desde a extremidade rígida à flexível do edifício
 - N2 original sobrestima a desamplificação de deslocamentos devido à torção na extremidade rígida → resultados não conservativos
 - Extensão do N2 não considera redução de deslocamentos devido à torção → correcta estimativa da resposta na extremidade rígida
 - Extensão do método N2 reproduz bem a amplificação na extremidade flexível
- As conclusões retiradas verificam-se para os vários níveis de intensidade analisados e nas duas direcções
- Outros edifícios com outras tipologias têm sido estudados de modo a confirmar os resultados obtidos → verificam-se as mesmas conclusões
- A extensão do método N2 poderá ser incluída no EC8 → análise de edifícios irregulares planta (torsionalmente sensíveis).
- Extensão do método N2 para ter em conta os modos superiores

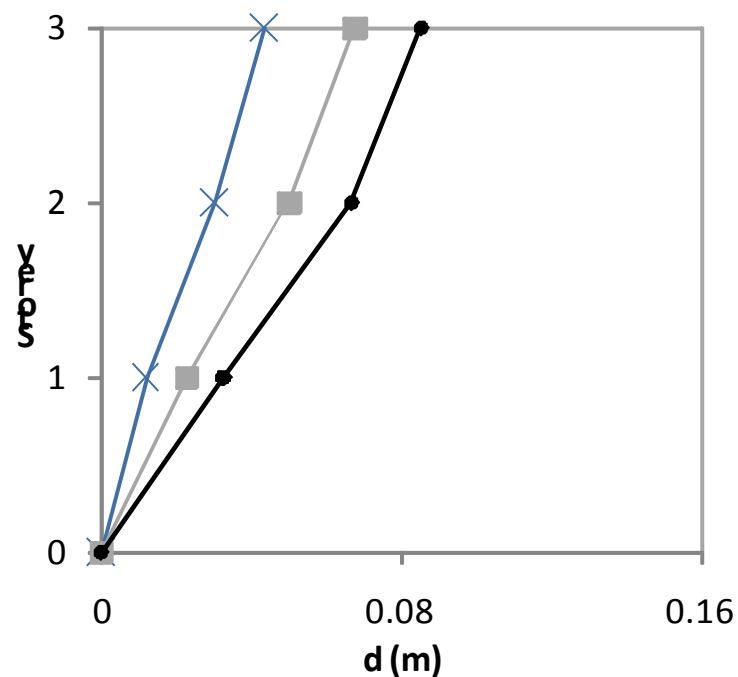


INSTITUTO
SUPERIOR
TÉCNICO

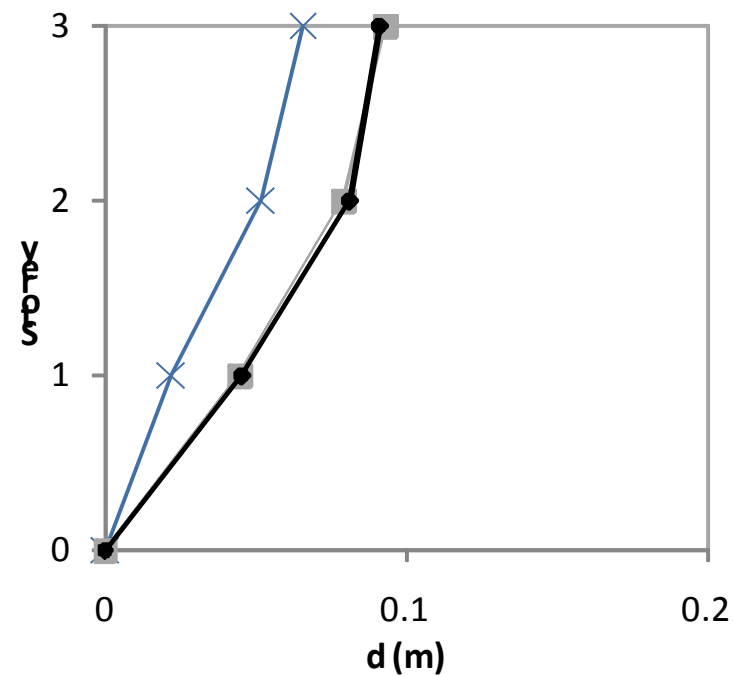
FUNDEC

8. CSM-ATC40 vs. CSM-FEMA440 – Perfil de deslocamentos laterais

Pilar C8, 0.2g, direcção X



Pilar C3, 0.2g, direcção X



—x— CSM ATC40

—■— CSM FEMA440

—●— TH

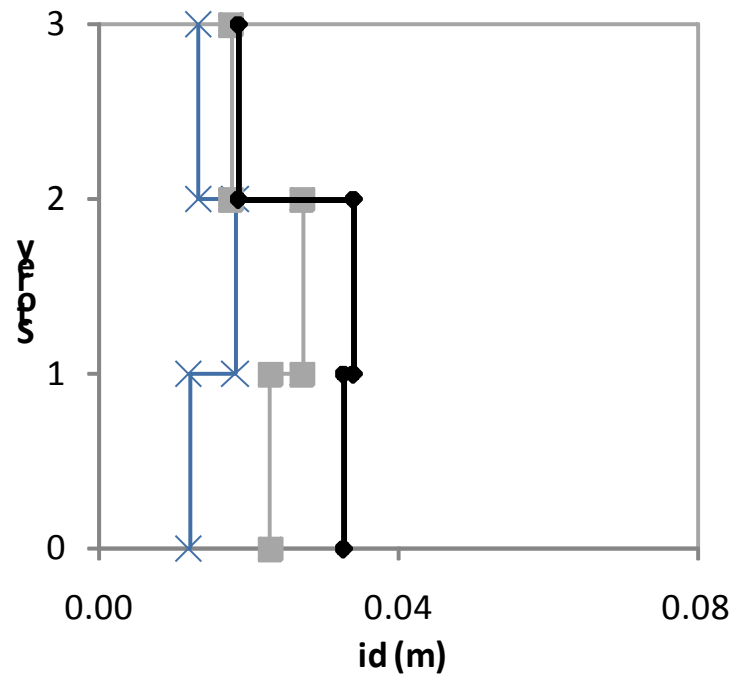


INSTITUTO
SUPERIOR
TÉCNICO

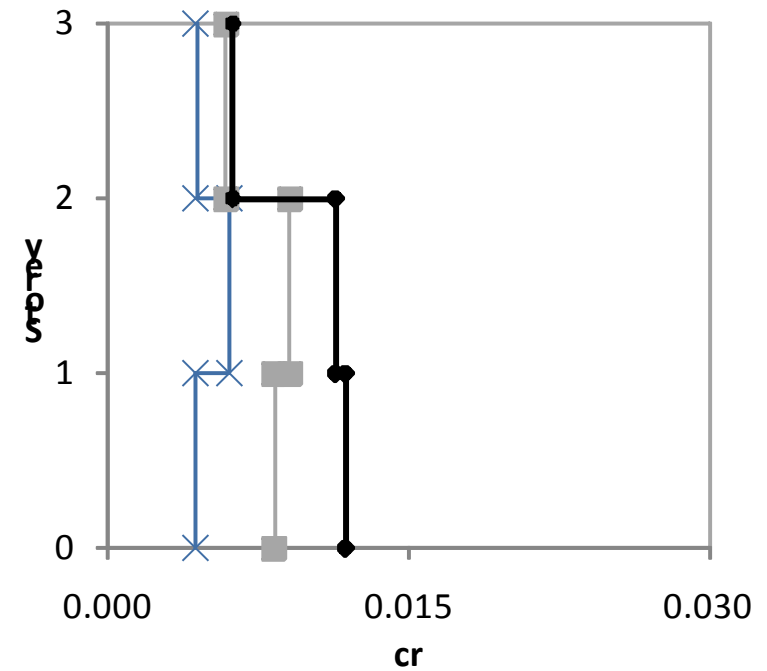
FUNDEC

8. CSM-ATC40 vs. CSM-FEMA440 – Deslocamentos interpisos e rotações de corda

Pilar C8, 0.2g, direcção Y



Pilar C8, 0.2g, direcção Y



—x— CSM ATC40

—■— CSM FEMA440

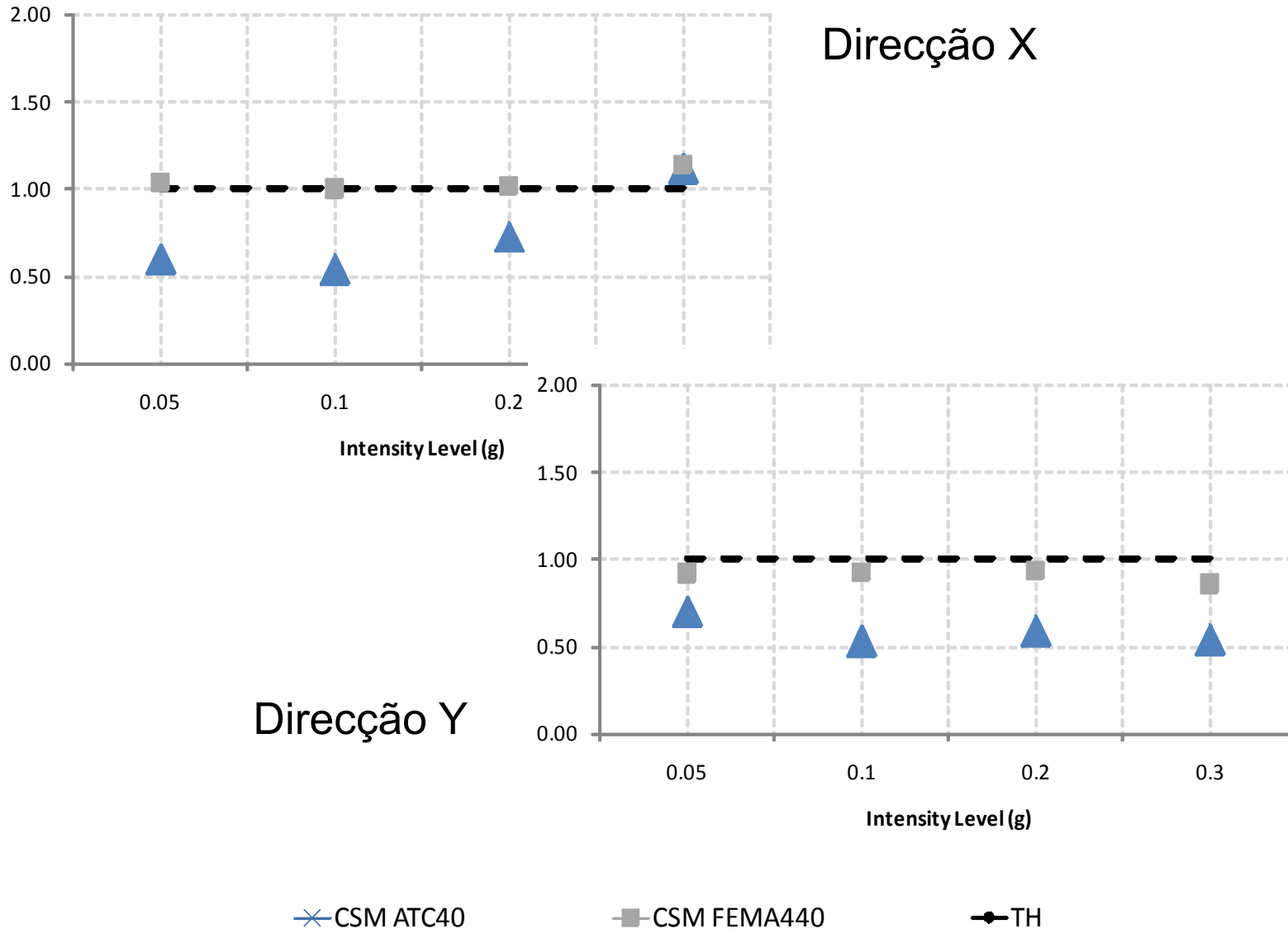
—●— TH



INSTITUTO
SUPERIOR
TÉCNICO

FUNDEC

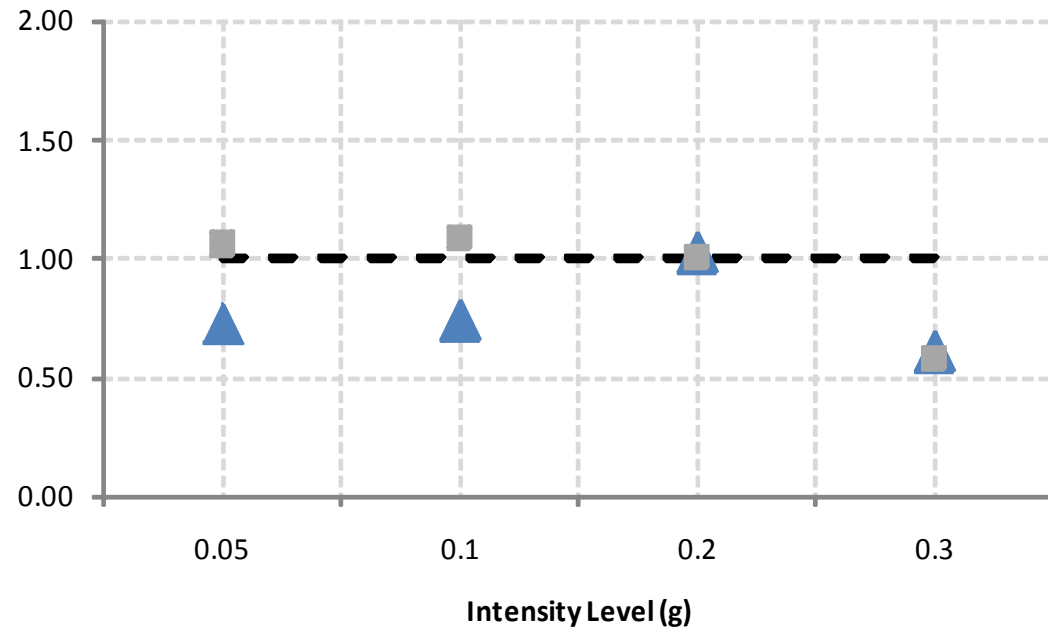
8. CSM-ATC40 vs. CSM-FEMA440 – Deslocamentos de topo (CM)





INSTITUTO
SUPERIOR
TÉCNICO

8. CSM-ATC40 vs. CSM-FEMA440 – Corte basal



—x— CSM ATC40

—■— CSM FEMA440

—◆— TH

FUNDEC



8. CSM-ATC40 vs. CSM-FEMA440 – Conclusões

FEMA440 → resultados mais próximos das análises dinâmicas não lineares



FEMA440 estima melhor o amortecimento efectivo do que o ATC40

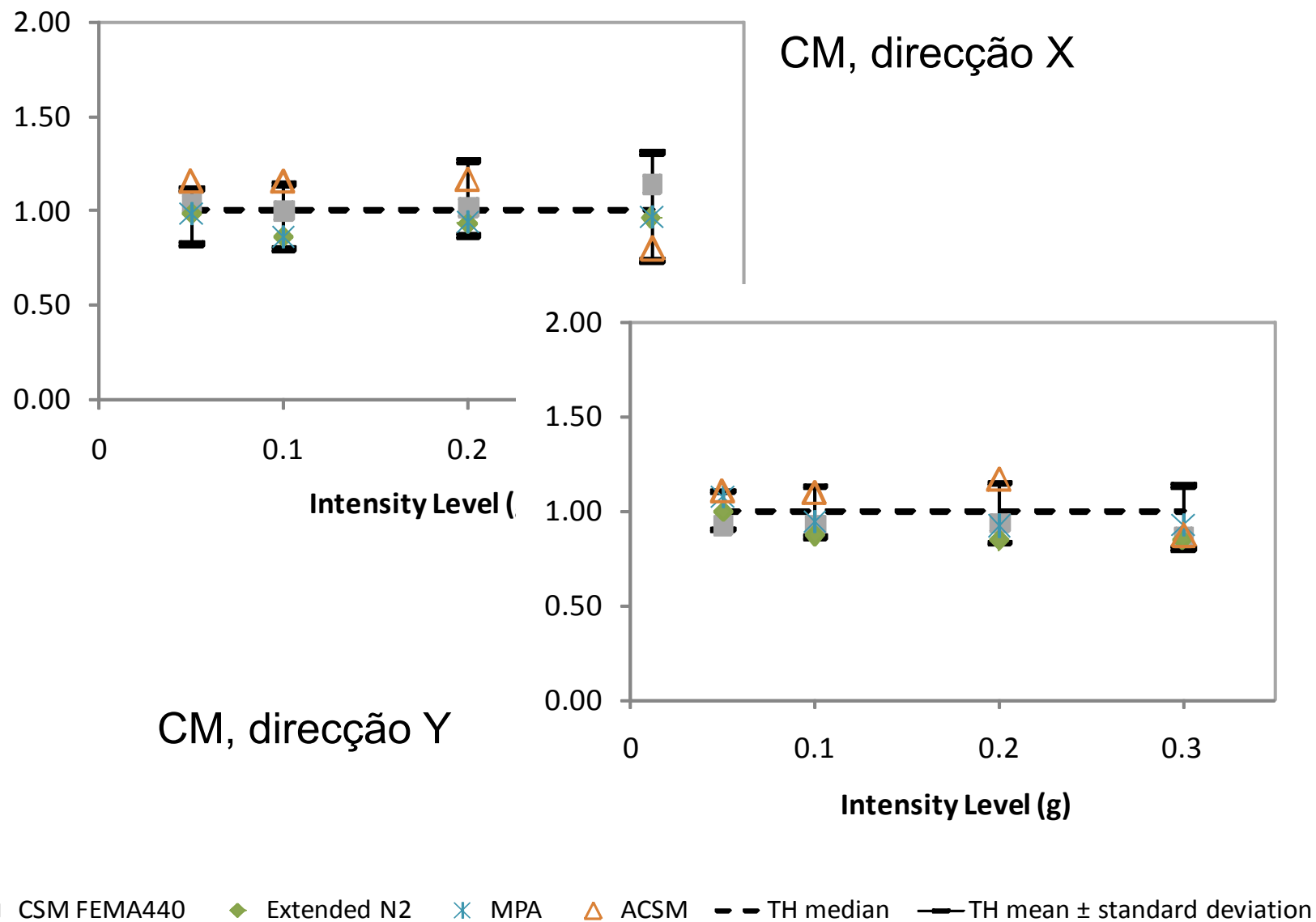
Three storey building: 2% equivalent viscous damping					
		X (T = 0.617 sec)		Y (T = 0.441 sec)	
Intensity level (g)	ATC40	FEMA440	ATC40	FEMA440	
0.05	6.4%	2.1%	5.7%	2.1%	
0.1	12.0%	2.2%	10.1%	2.1%	
0.2	13.6%	5.8%	10.6%	3.2%	
0.3	25.8%	15.9%	15.8%	5.8%	



INSTITUTO
SUPERIOR
TÉCNICO

FUNDEC

9. Extended N2, CSM-FEMA440, MPA, ACSM – Deslocamentos de topo

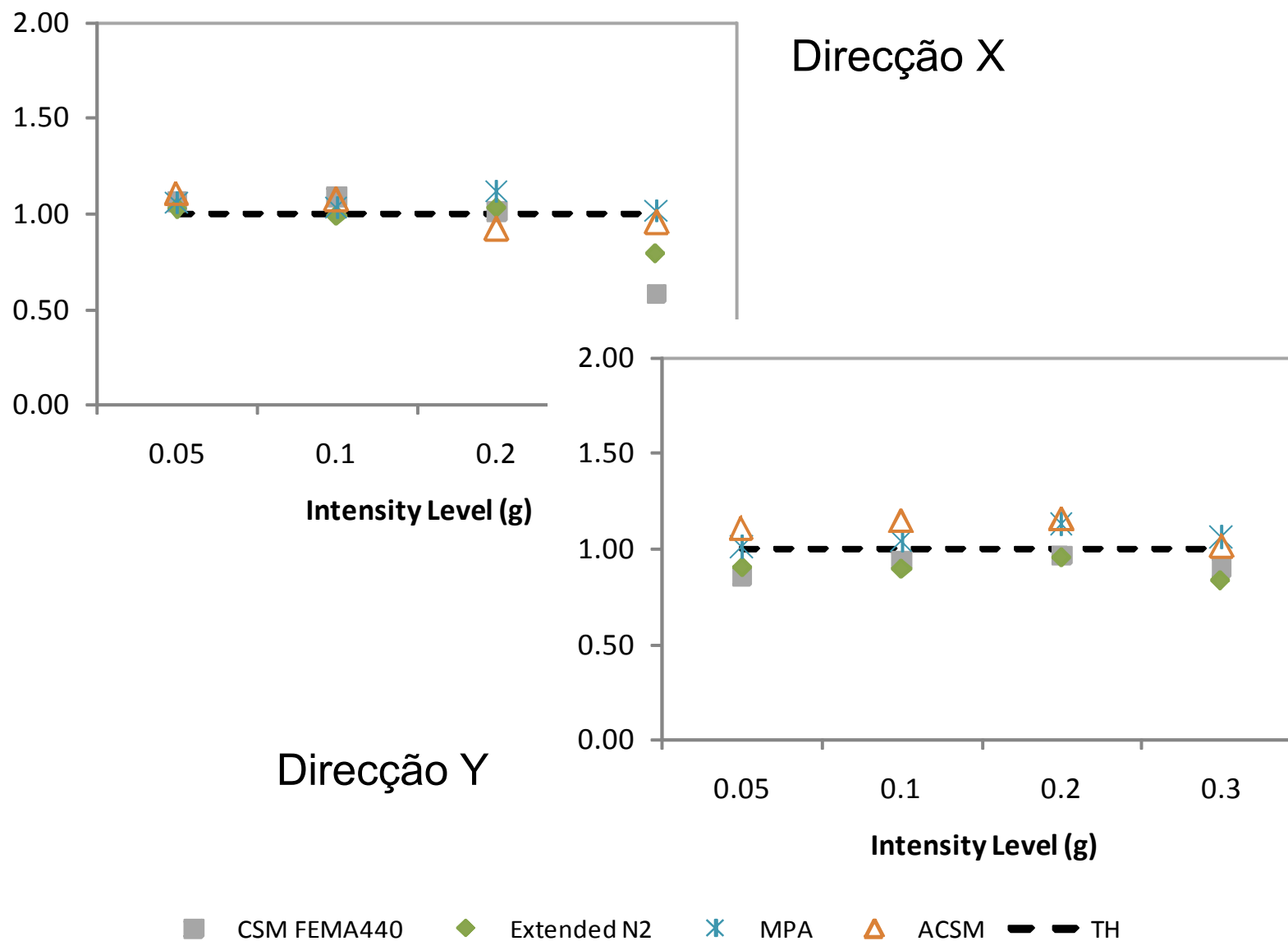




INSTITUTO
SUPERIOR
TÉCNICO

FUNDEC

9. Extended N2, CSM-FEMA440, MPA, ACSM – Corte basal



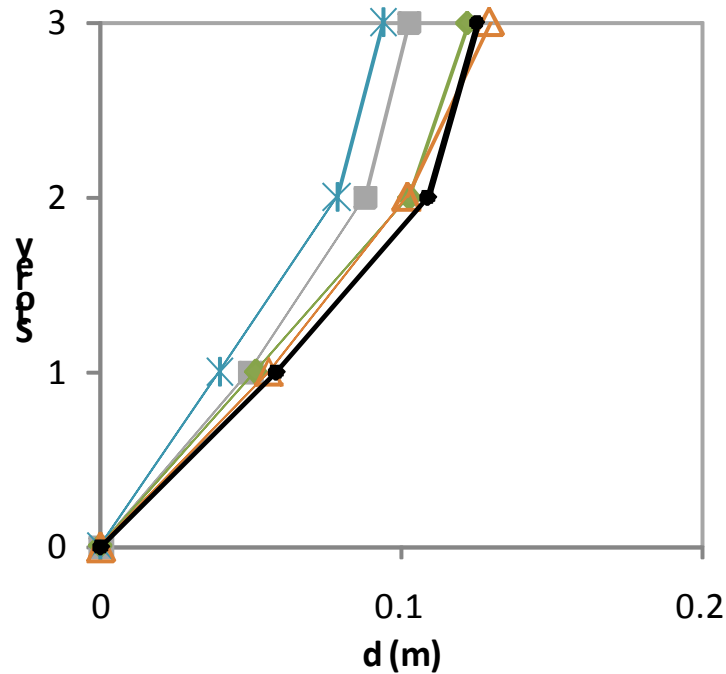


INSTITUTO
SUPERIOR
TÉCNICO

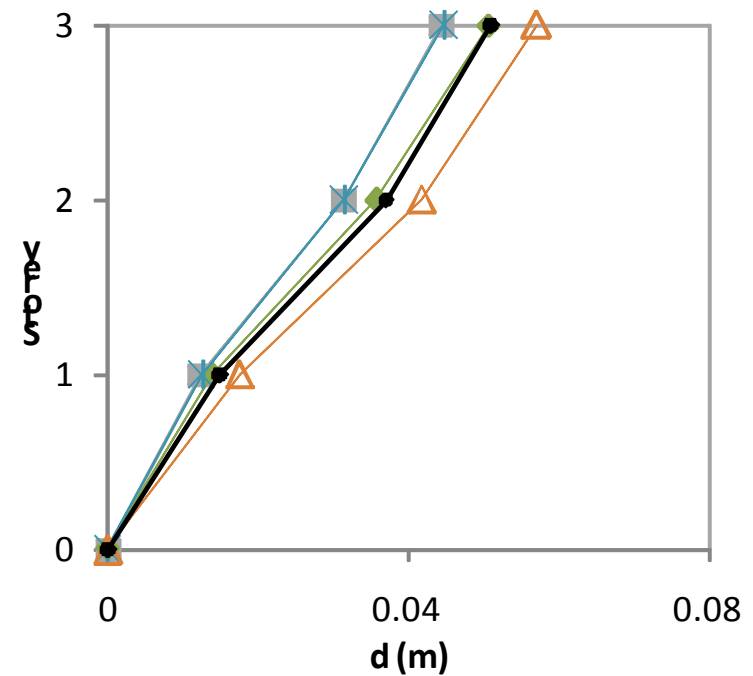
FUNDEC

9. Extended N2, CSM-FEMA440, MPA, ACSM

Pilar C2, 0.2g, direcção X



Pilar C2, 0.1g, direcção Y



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

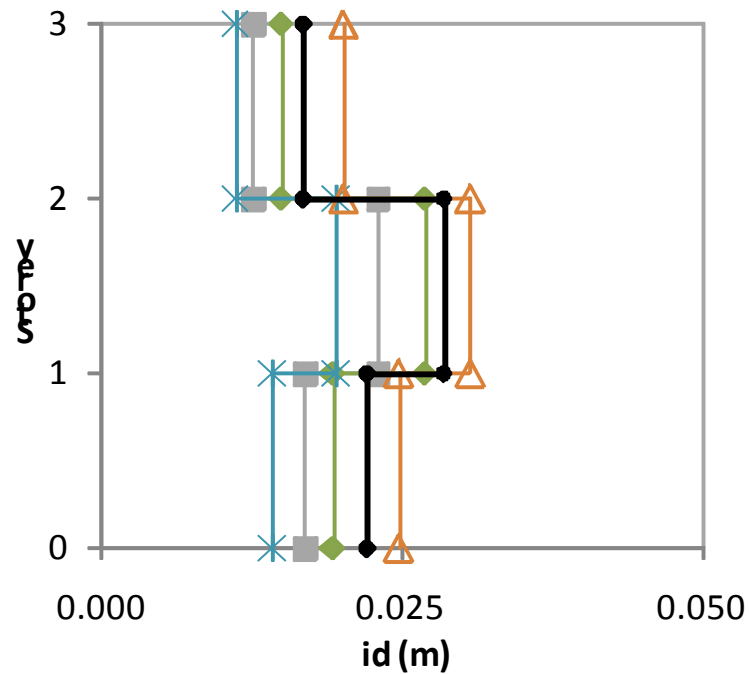


INSTITUTO
SUPERIOR
TÉCNICO

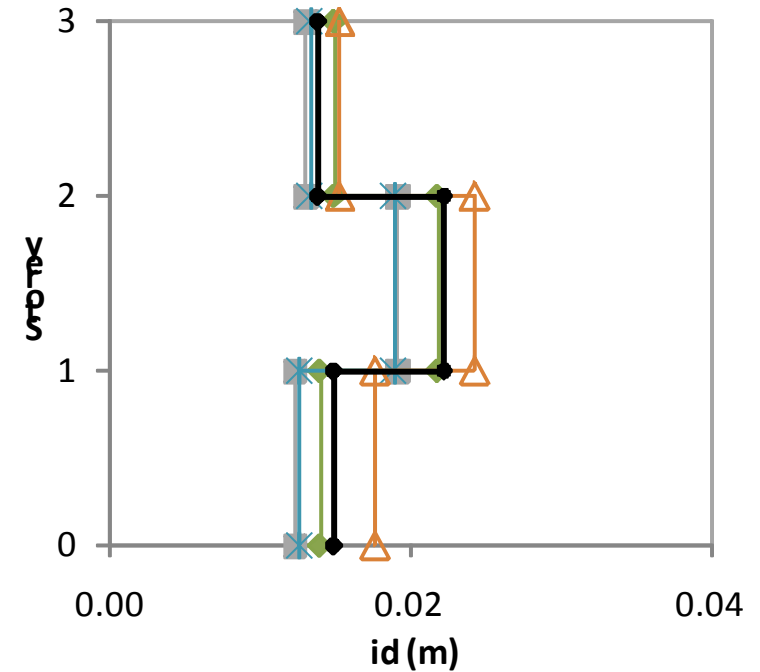
FUNDEC

9. Extended N2, CSM-FEMA440, MPA, ACSM – Deslocamentos interpisos

Pilar C2, 0.1g, direcção X



Pilar C2, 0.1g, direcção Y

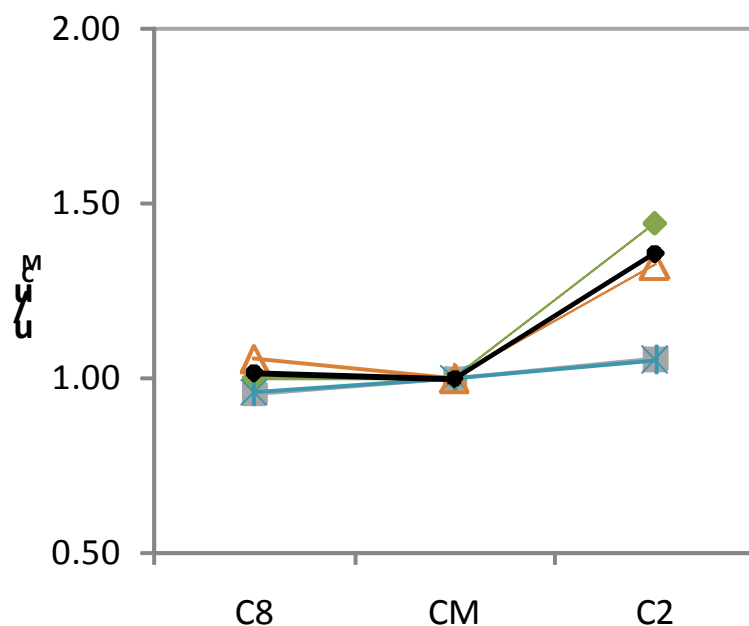


■ CSM FEMA440 ◆ Extended N2 * MPA ▲ ACSM ● TH

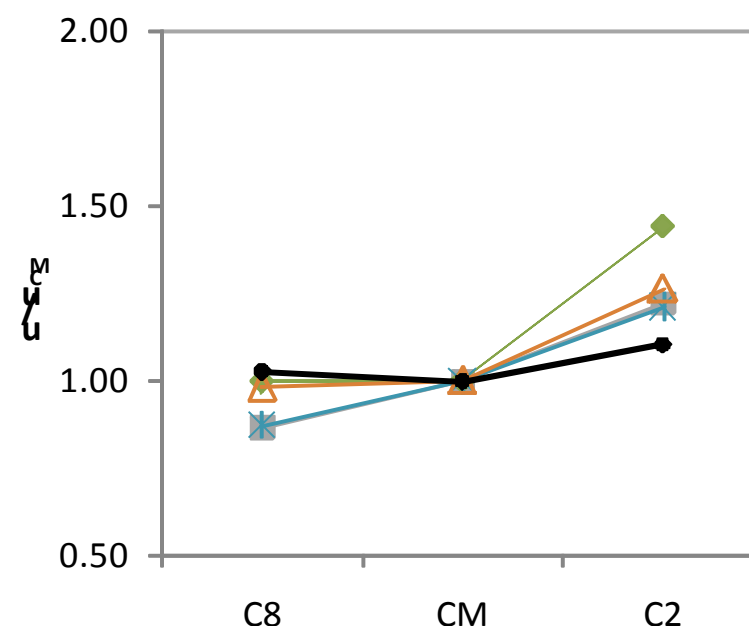


INSTITUTO
SUPERIOR
TÉCNICO

9. Extended N2, CSM-FEMA440, MPA, ACSM – Deslocamentos normalizados de topo



0.1g, Direcção X



0.2g, Direcção Y

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

FUNDEC



INSTITUTO
SUPERIOR
TÉCNICO

FUNDEC

9. *Extended N2, CSM-FEMA440, MPA, ACSM - Conclusões*

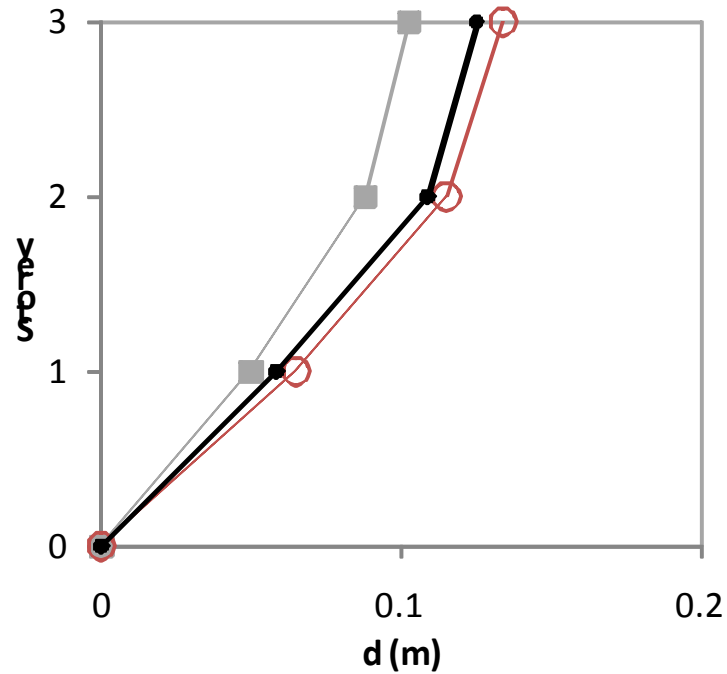
- Todos os NSPs conduzem em geral a bons resultados nos elementos centrais do edifício → pouco efeito da torção
- CSM-FEMA440 e MPA conduzem a resultados inferiores aos obtidos com as análises dinâmicas não lineares nas extremidades dos edifícios → efeitos de torção mais acentuados
- Apenas o Extended N2 consegue reproduzir correctamente a resposta torsional do edifício para todos os níveis de intensidade sísmica



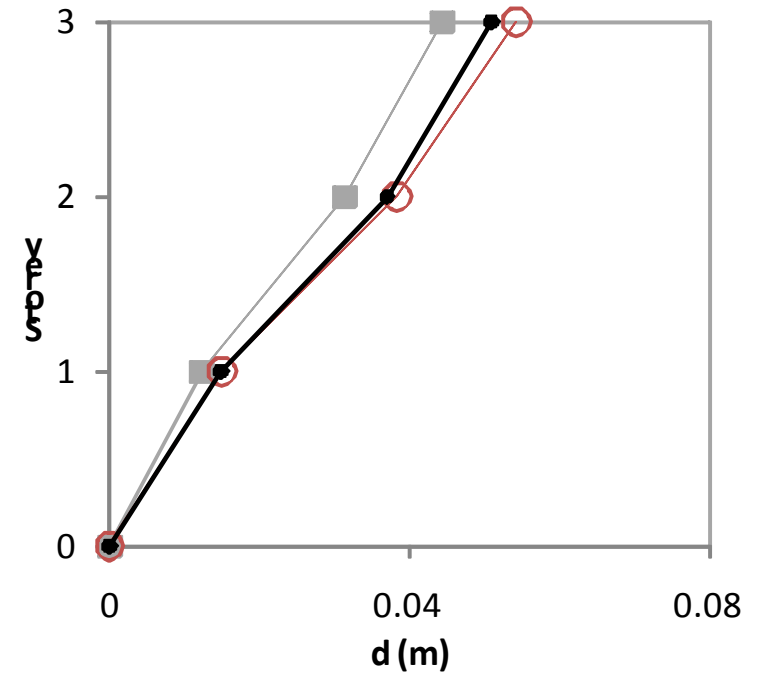
INSTITUTO
SUPERIOR
TÉCNICO

FUNDEC

10. Extended CSM-FEMA440 – Perfil de deslocamentos laterais



Pilar C2, 0.2g, direcção X



Pilar C2, 0.1g, direcção Y

—■— CSM FEMA440

—○— Extended CSM FEMA440

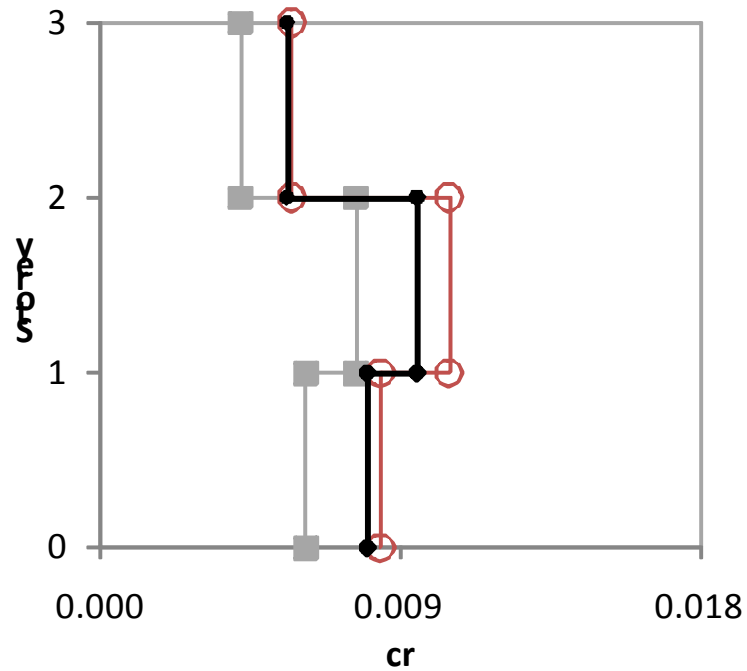
—●— TH



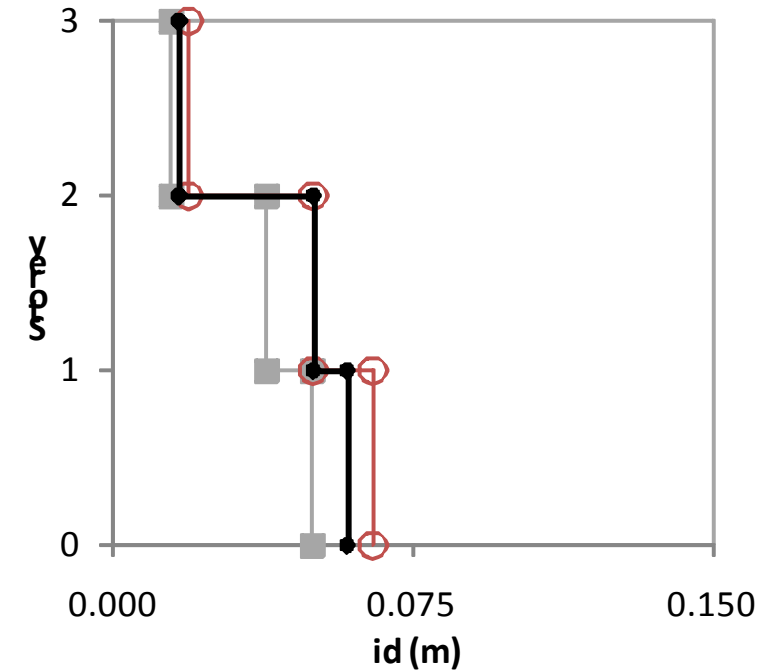
INSTITUTO
SUPERIOR
TÉCNICO

FUNDEC

10. Extended CSM-FEMA440 – Deslocamentos interpisos e rotações de corda



Rotações de corda, pilar
C2, 0.1g, direcção X



Deslocamentos interpisos,
pilar C2, 0.2g, direcção X

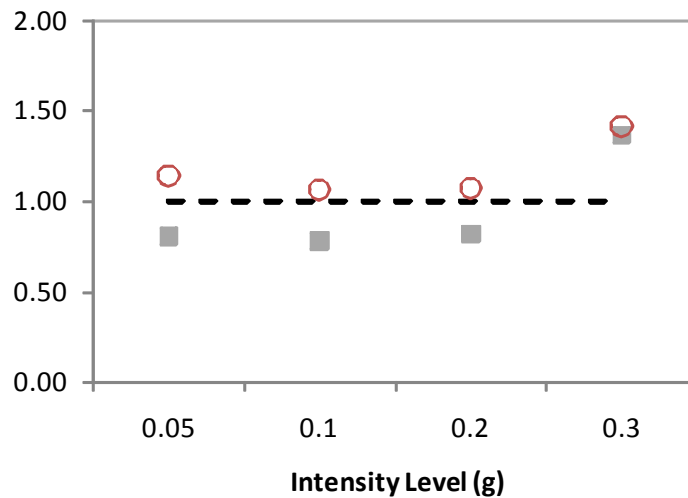
■ CSM FEMA440

○ Extended CSM FEMA440

● TH



10. Extended CSM-FEMA440 – Deslocamentos de topo

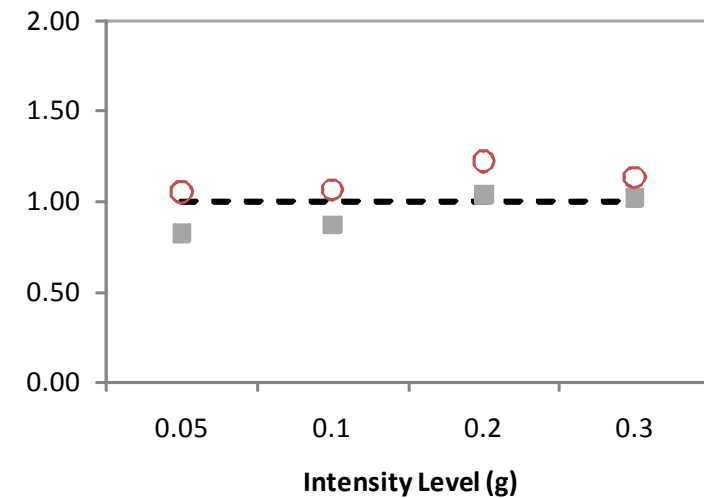


repro
a extre
os bas

a amç

extremidade flexível do edifício

Pilar C2, direcção X



Pilar C2, direcção Y

■ CSM FEMA440

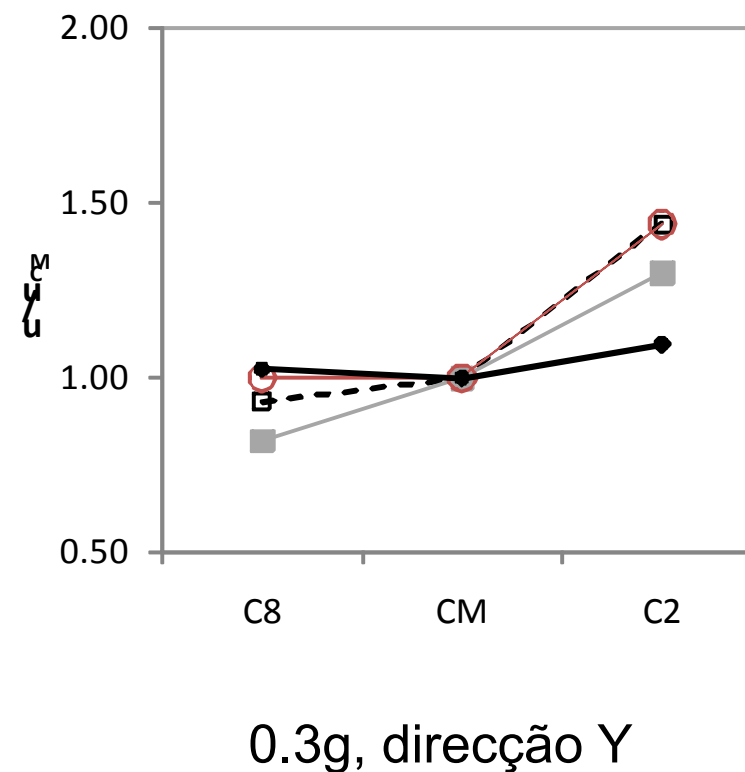
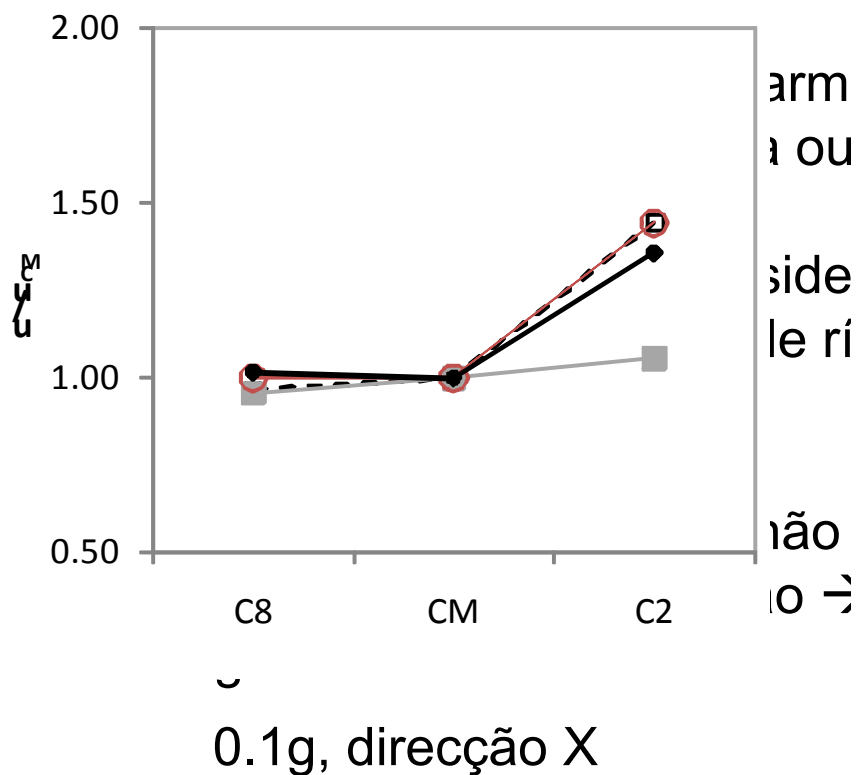
○ Extended CSM FEMA440

● TH



INSTITUTO
SUPERIOR
TÉCNICO

10. Extended CSM-FEMA440 – Deslocamentos normalizados de topo



-■- RSA

-■- CSM FEMA440

-○- Extended CSM FEMA440

-●- TH

FUNDEC



10. *Extended CSM-FEMA440 - Conclusões*

- Extended CSM-FEMA440 com melhor desempenho do que o método original para todos os níveis de intensidade analisados
- Reproduz de uma forma precisa a amplificação devido à torção na extremidade flexível do edifício
- A resposta na extremidade rígida foi estimada com precisão ou sobrestimada → extended CSM-FEMA440 não considera a desamplificação de deslocamentos devido à torção



11. Conclusões

- Extended N2 reproduz com mais precisão o comportamento torsional do que o método N2 original
 - Factores correctivos para a torção (RSA)
 - Potencial para ser incluído na próxima versão do EC8
- CSM-FEMA440 conduz a resultados mais próximos da *timehistory* do que o CSM-ATC40, devido a um melhor algoritmo para o cálculo do amortecimento efectivo e dos factores de redução
- Extended N2, CSM-FEMA440, MPA e ACSM conduzem a bons resultados nos elementos centrais do edifício (efeito de torção pouco acentuado)



11. Conclusões

- ACSM com bons resultados devido:
 - DAP
 - Transformação de MDOF para SDOF baseada na deformada da estrutura
- Apenas o Extended N2 consegue reproduzir correctamente (por vezes conservadoramente) o efeito da torção nas extremidades do edifício analisado
- Extended CSM-FEMA440 consegue reproduzir correctamente os efeitos da torção → Potencial para ser incluído na próxima versão do regulamento Americano ATC



INSTITUTO
SUPERIOR
TÉCNICO

Análises Estáticas Não Lineares (*Pushover*) de Edifícios 3D



Obrigado pela atenção

FUNDEC