

www.cmm.pt



Curso de Formação:

Dimensionamento Sísmico de Estruturas Metálicas

Lisboa, 24 e 25 de Setembro de 2010



Rita Bento



www.cmm.pt



SUMÁRIO - MÉTODOS AVANÇADOS PARA AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO SÍSMICO

- ❑ INTRODUÇÃO ÀS METODOLOGIAS DE ANÁLISE ESTÁTICA NÃO-LINEAR ('PUSHOVER') E DINÂMICA NÃO LINEAR ('TIME-HISTORY')
- ❑ VANTAGENS E DESVANTAGENS DA ANÁLISE ESTÁTICA NÃO LINEAR NA AVALIAÇÃO SÍSMICA DE ESTRUTURAS
- ❑ AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO SÍSMICO COM BASE NO MÉTODO N2 PROPOSTO NO EC8
- ❑ EXEMPLO DE APLICAÇÃO



www.cmm.pt



INTRODUÇÃO

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**



www.cmm.pt



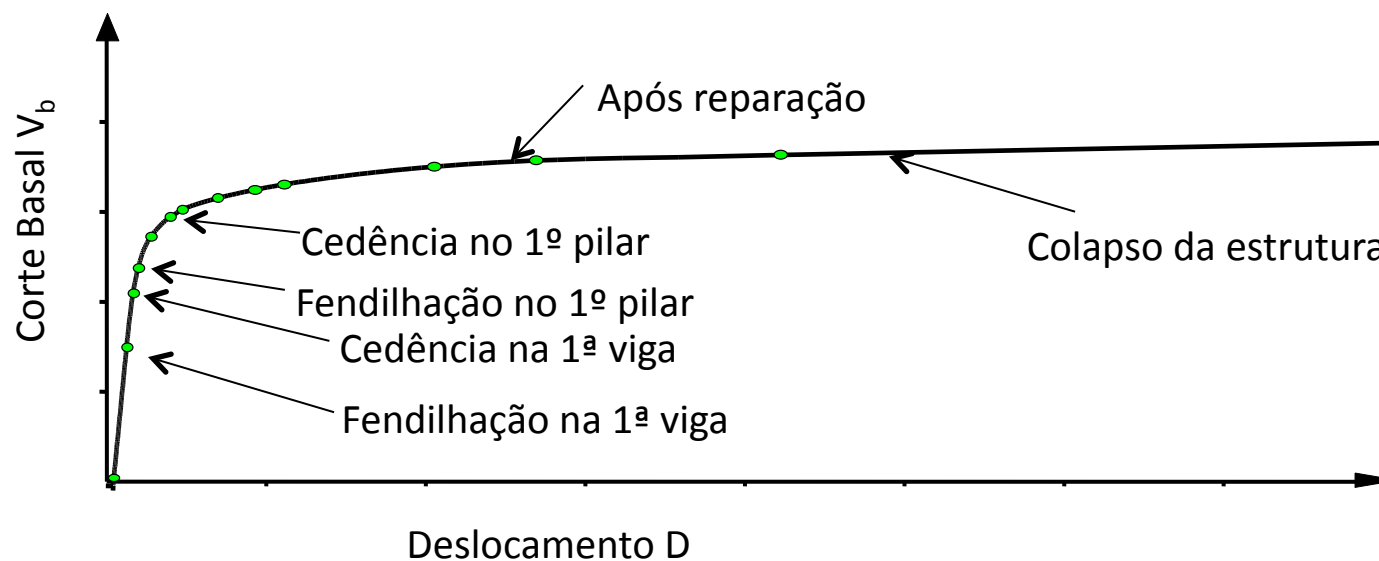
INTRODUÇÃO

- ❑ Nos últimos anos generalizou-se a ideia que um bom comportamento sísmico seria garantido com maior sucesso se fosse controlado o nível de deslocamentos, local e global, da estrutura.
- ❑ Novos processos de dimensionamento sísmico começaram a ser propostos por diversos autores: **Análises Estáticas Não Lineares** com controle de deslocamentos ('Pushover') e Dimensionamento Sísmico por controle de deslocamentos ('Displacement Based Design')
- ❑ **Análises dinâmicas não lineares** são consideradas as melhores, conhecendo-se no entanto as maiores desvantagens: complexas e não apropriadas para o dimensionamento prático de estruturas.



INTRODUÇÃO - ANÁLISES ESTÁTICAS NÃO LINEARES

- ❑ Considera o comportamento não linear da estrutura.
- ❑ Relaciona a resposta global da estrutura com uma estrutura equivalente de 1 GDL.
- ❑ Traça sequencialmente a cedência e colapso dos elementos, assim como a capacidade global da estrutura.





www.cmm.pt



INTRODUÇÃO - ANÁLISES ESTÁTICAS NÃO LINEARES

- ☐ Considera o comportamento monotónico fisicamente não linear da estrutura.
- ☐ Relaciona a resposta global da estrutura com uma estrutura equivalente de 1 GDL.
- ☐ Traça sequencialmente a cedência e colapso dos elementos, assim como a capacidade global da estrutura.
- ☐ Permite a avaliação adequada do desempenho sísmico para diferentes estados limites.
- ☐ Estes procedimentos começam a ser propostos nos regulamentos sísmicos (EC8).



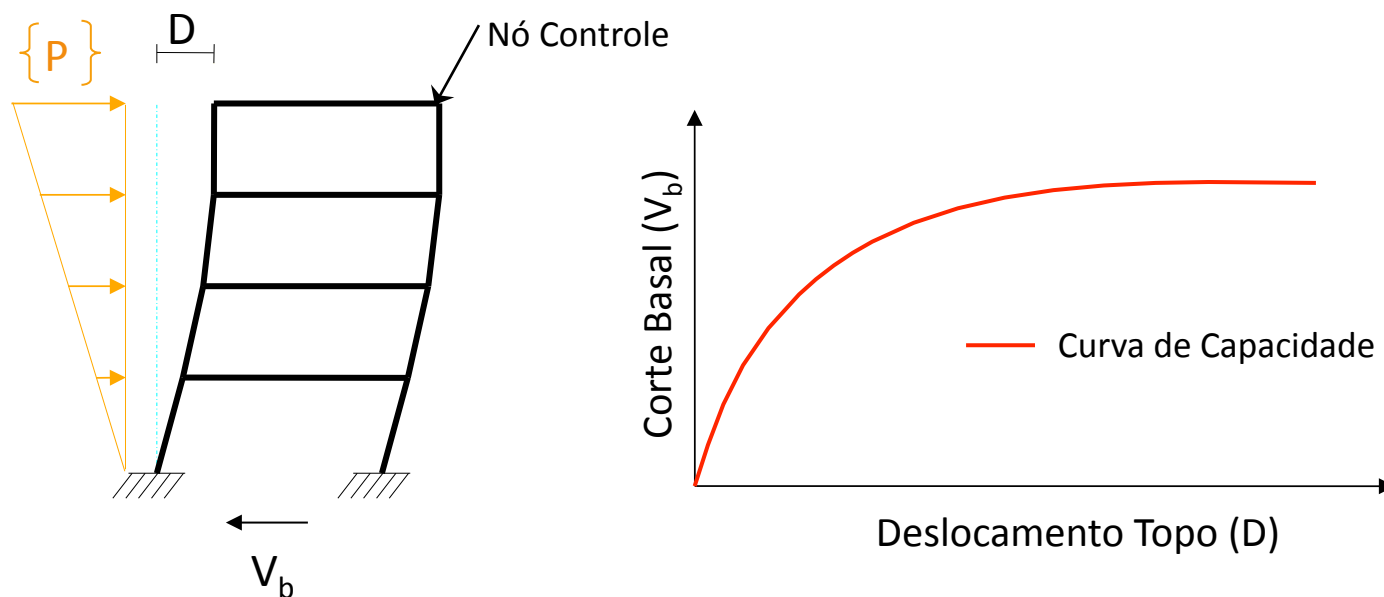
www.cmm.pt



INTRODUÇÃO - ANÁLISES ESTÁTICAS NÃO LINEARES

Fases Principais do Processo de Cálculo:

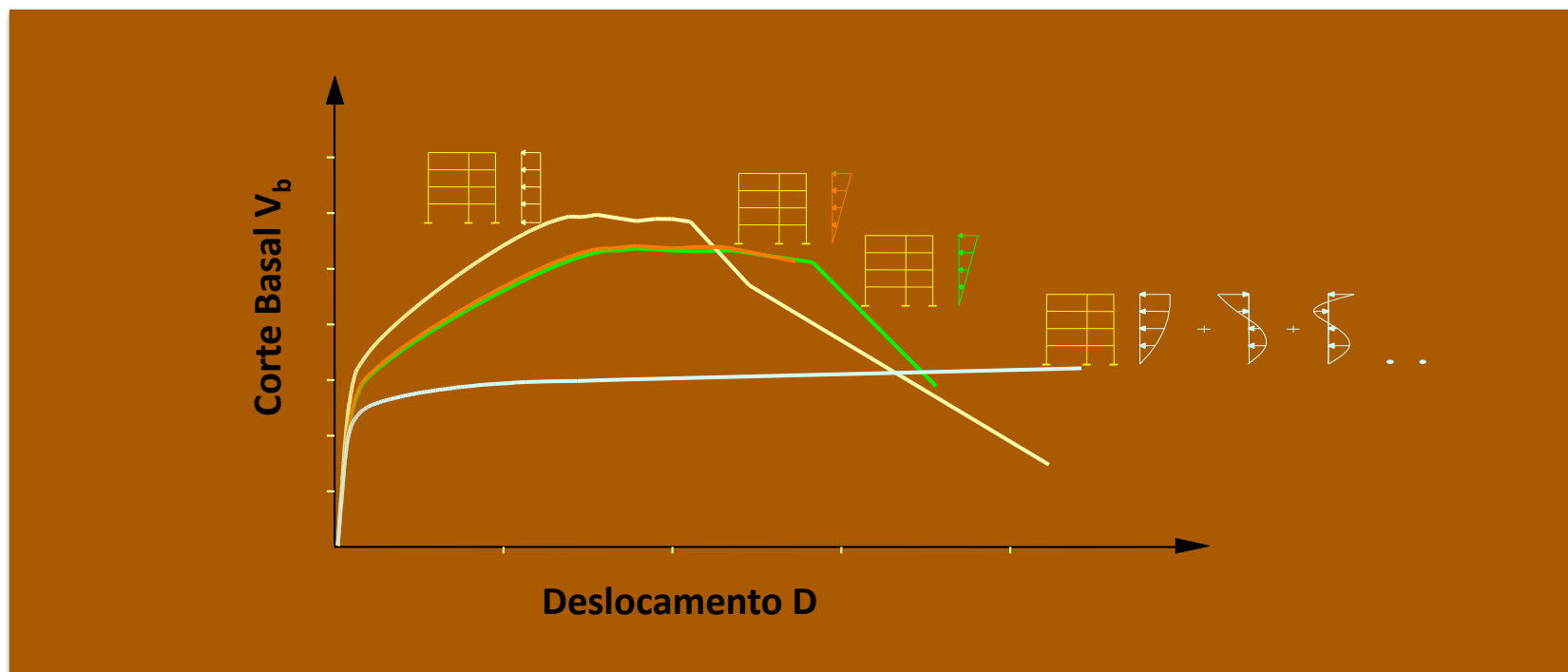
1. Definição da capacidade resistente estrutural, aplicando incrementalmente cargas ou deslocamentos





ANÁLISES ESTÁTICAS NÃO LINEARES

- ❑ Diferentes níveis de sofisticação podem ser usados, relativamente à distribuição de forças a utilizar.





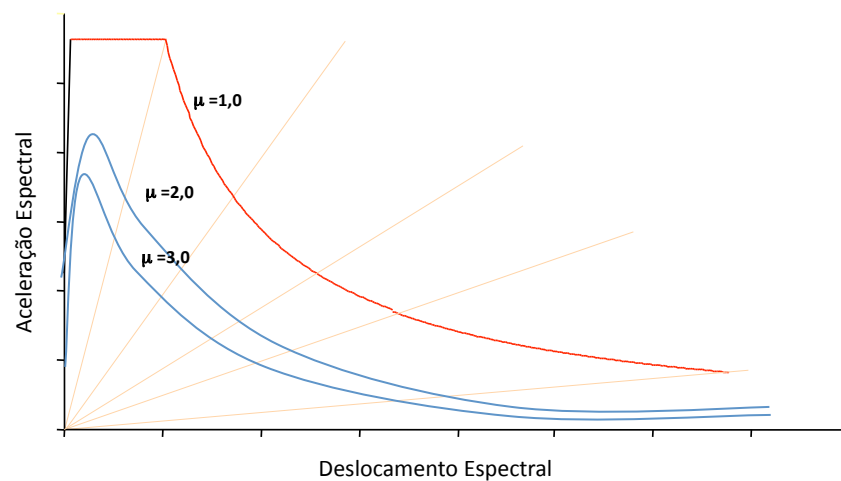
www.cmm.pt



INTRODUÇÃO - ANÁLISES ESTÁTICAS NÃO LINEARES

Fases Principais do Processo de Cálculo:

1. Definição da capacidade resistente estrutural, aplicando incrementalmente cargas ou deslocamentos
2. Definição da acção sísmica em termos de acelerações espectrais S_a e deslocamentos espectrais S_d , atendendo ao comportamento não linear da estrutura





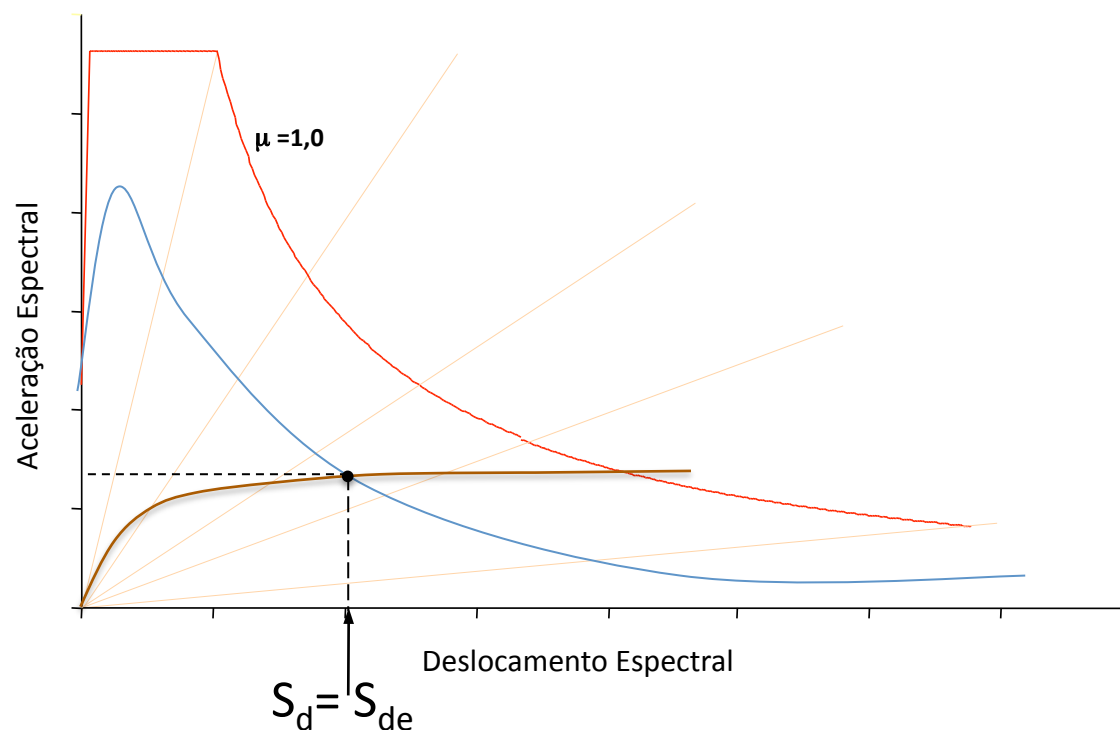
www.cmm.pt



INTRODUÇÃO - ANÁLISES ESTÁTICAS NÃO LINEARES

Fases Principais do Processo de Cálculo:

3. Cálculo do ponto de desempenho ('performance point') ou do deslocamento sísmico ('target displacement')



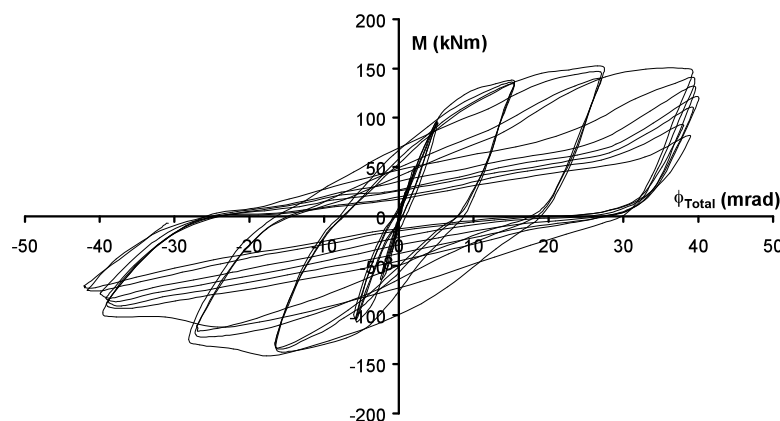


www.cmm.pt

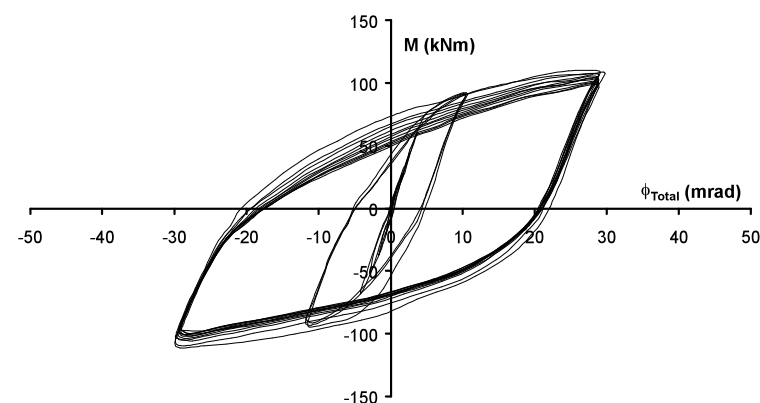


INTRODUÇÃO – ANÁLISES DINÂMICAS NÃO LINEARES

- ❑ Considera o comportamento dinâmico fisicamente não linear da estrutura.



Curva **histerética** de uma ligação metálica
com deslizamento



Curva **histerética** de uma ligação metálica
sem deslizamento

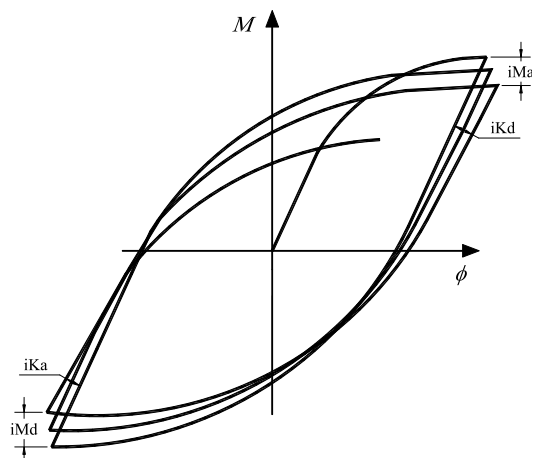


www.cmm.pt

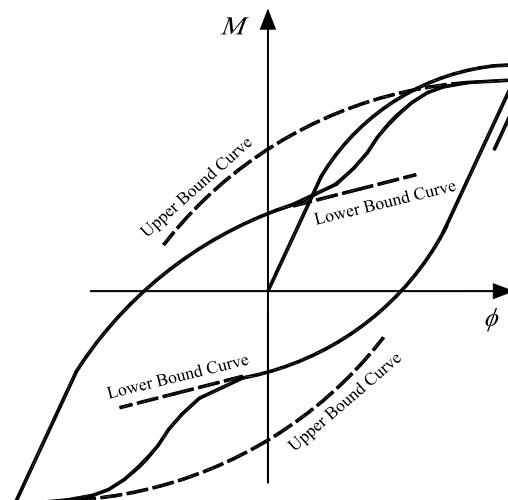


INTRODUÇÃO – ANÁLISES DINÂMICAS NÃO LINEARES

- ❑ Considera o comportamento dinâmico fisicamente não linear da estrutura.



Modelo Richard-Abbott **sem 'pinching'**



Modelo Richard-Abbott **com 'pinching'**



www.cmm.pt

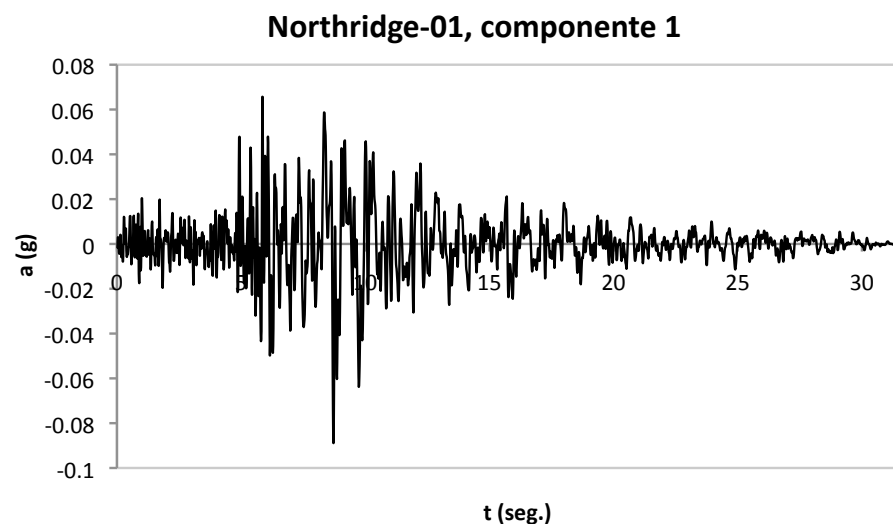


INTRODUÇÃO – ANÁLISES DINÂMICAS NÃO LINEARES

- ❑ Considera o comportamento dinâmico fisicamente não linear da estrutura.
- ❑ Resolve a equação de equilíbrio dinâmico a partir de métodos de integração numérica - integração directa da equação (passo-a-passo):

$$M \ddot{U} + C \dot{U} + K U = P(t) = M \ddot{U}_{\text{solo}}(t)$$

- ❑ A acção sísmica é definida a partir de acelerogramas:





www.cmm.pt



ANÁLISES ESTÁTICAS NÃO LINEARES - VANTAGENS

- ☐ Baseada no controle de deslocamentos, global ou local
- ☐ Evita a utilização de um coeficiente de comportamento
- ☐ Boas estimativas da resposta sísmica para estruturas que vibram principalmente num modo
- ☐ Fornece informação sobre as características da estrutura, que não se obtêm em análises elásticas:
 - ☐ Define a ductilidade da estrutura
 - ☐ Identifica as regiões críticas da estrutura, que exigem um dimensionamento mais pormenorizado
 - ☐ Avalia a resistência da estrutura e identifica as descontinuidades de resistência em planta e altura.....



www.cmm.pt



ANÁLISES ESTÁTICAS NÃO LINEARES – LIMITAÇÕES DOS MÉTODOS CONVENCIONAIS

- ☐ Mais adequada para estruturas baixas e com frequências elevadas
- ☐ Admite que a deformada da estrutura não varia ao longo do tempo (regulamentos sugerem a utilização de mais do que uma distribuição de forças lateral – EC8)
- ☐ Os métodos regulamentares/convencionais têm dificuldade de modelar adequadamente as deformações quando os modos de vibração mais elevados são importantes e/ou a estrutura entra em regime significativamente não linear
- ☐ Detecta inadequadamente as concentrações de danos locais, responsáveis pela alteração da resposta modal
- ☐ Sendo uma análise estática despreza a dissipação de energia associada com a resposta dinâmica: energia cinética, amortecimento viscoso e os efeitos de duração
- ☐ Dificuldade de reproduzir efeitos dinâmicos particulares, de incorporar efeitos 3D e efeitos do carregamento cíclico do sismo



www.cmm.pt



ANÁLISES DINÂMICAS NÃO LINEARES – VANTAGENS E LIMITAÇÕES

VANTAGENS

- ☐ Estes métodos são os únicos capazes de considerar a variação da rigidez e do amortecimento ao longo do tempo, atendendo ao comportamento fisicamente não linear dos materiais/estrutura
- ☐ Modelam o comportamento não linear das estruturas de forma adequada – os resultados obtidos são considerados os de referência

LIMITAÇÕES

- ☐ Maior complexidade e exigem um esforço computacional elevado
- ☐ Dificuldades associadas à caracterização adequada da acção sísmica



www.cmm.pt



AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO SÍSMICO COM BASE NO MÉTODO N2 PROPOSTO NO EC8

N - 2

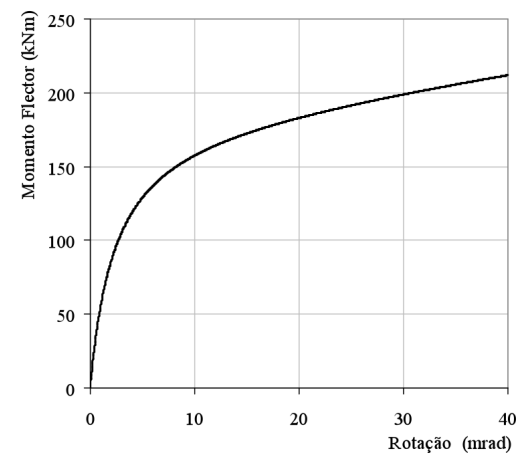
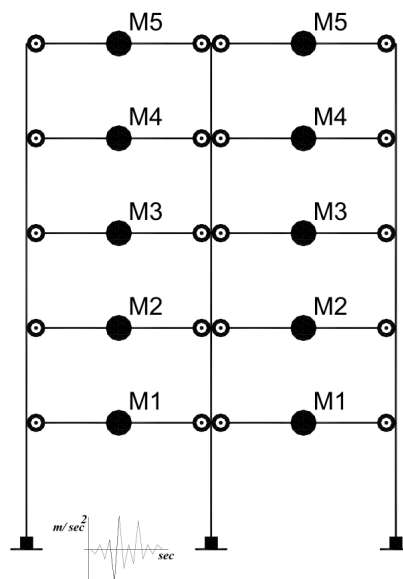


www.cmm.pt



MÉTODO N2 - Passos

1. Modelação da estrutura atendendo ao **comportamento não linear** de todos os seus elementos estruturais





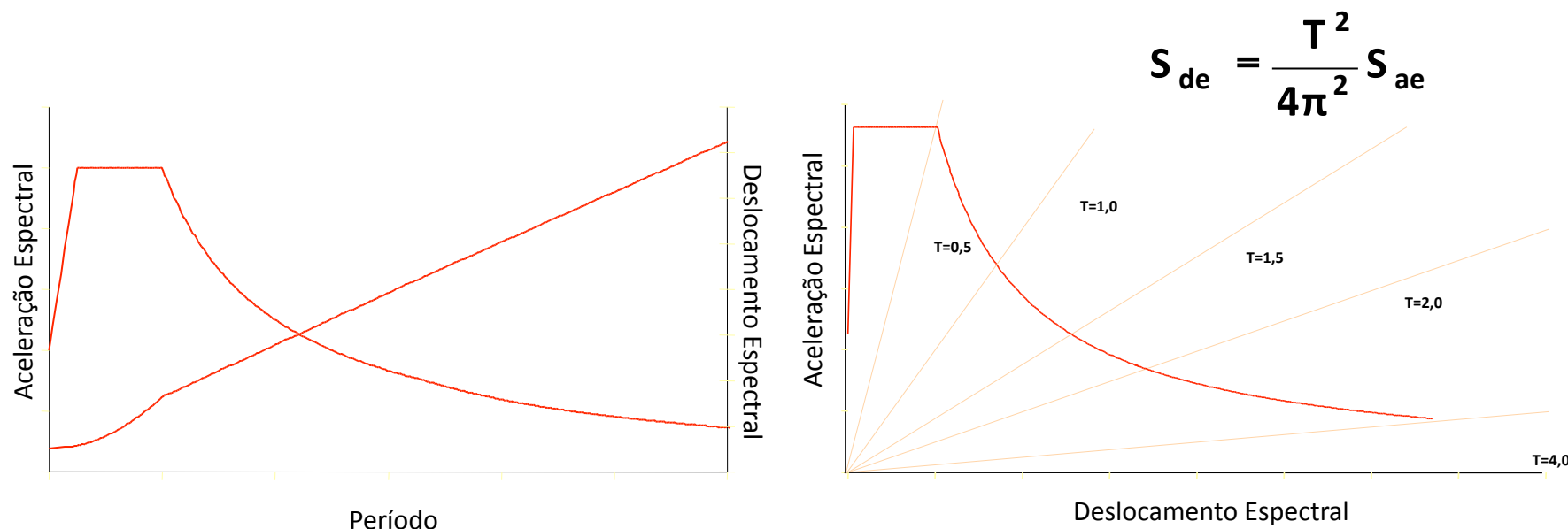
www.cmm.pt



MÉTODO N2 - Passos

1. Modelação da estrutura atendendo ao **comportamento não linear** de todos os seus elementos estruturais
2. Definição da Acção Sísmica

2.1 Determina-se o Espectro Elástico no formato ADRS



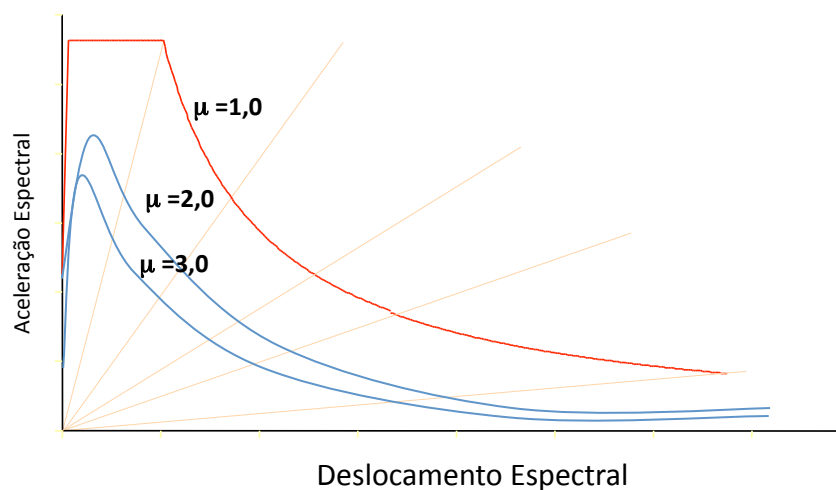


MÉTODO N2 - Passos

1. Modelação da estrutura atendendo ao **comportamento não linear** de todos os seus elementos estruturais
2. Definição da Acção Sísmica

2.1 Determina-se o Espectro Elástico no formato ADRS

2.2 Determina-se o Espectro Inelástico no formato ADRS



$$S_a = \frac{S_{ae}}{R_\mu} \quad S_d = \mu S_{dy}$$

$$R_\mu = (\mu - 1) \frac{T}{T_c} + 1 \quad T < T_c$$

$$R_\mu = \mu \quad T \geq T_c$$

$$S_d = \mu \frac{T^2}{4\pi^2} S_a$$



MÉTODO N2 - Passos

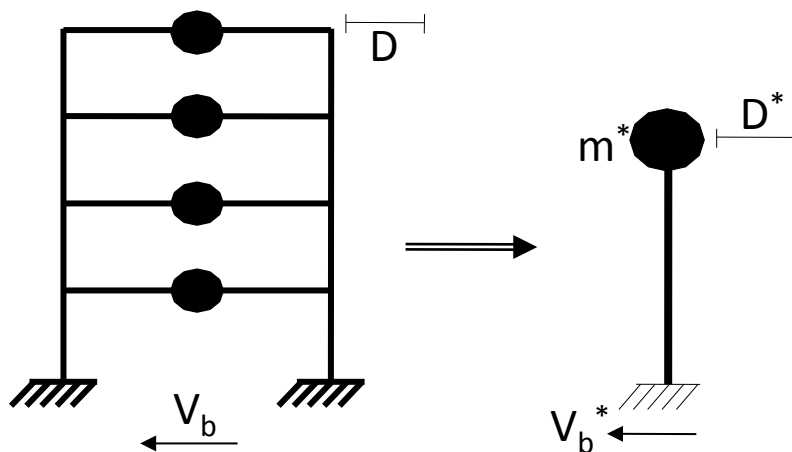
3. Recorre-se à **Análise Pushover** e define-se a **Curva de Capacidade Resistente**

3.1 Assume-se a forma da deformada $\{\phi\}$

3.2 Determina-se a distribuição vertical das forças laterais $\{P\} = [M] \{\phi\}$

3.3 Define-se a curva $V_b - D$, aumentando monotonicamente uma distribuição de forças lateral

4. Definição do sistema de **1GL** equivalente



$$m^* = \sum m_i \phi_i$$

$$V_b^* = \frac{V_b}{\Gamma} \quad \Gamma = \frac{m^*}{\sum m_i \phi_i^2}$$

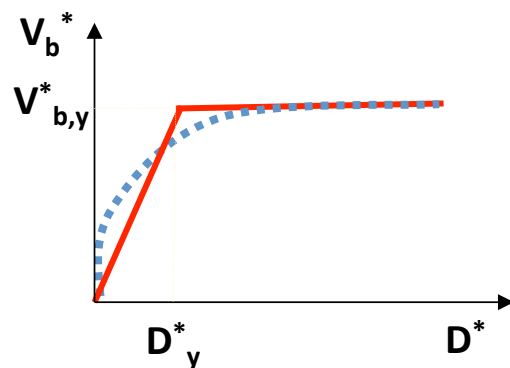
$$D^* = \frac{D}{\Gamma}$$



MÉTODO N2 - Passos

4. Definição do sistema de **1GL** equivalente

- Definir uma relação aproximada Força – Deslocamento elasto-plástica e determinar $V_{b,y}^*$ e D_y^* e T^*



$$T^* = 2\pi \sqrt{\frac{m^* D_y^*}{V_{b,y}^*}}$$

- Determinar o diagrama de capacidade (Aceleração vs Deslocamento)

$$S_a = \frac{V_b^*}{m^*}$$





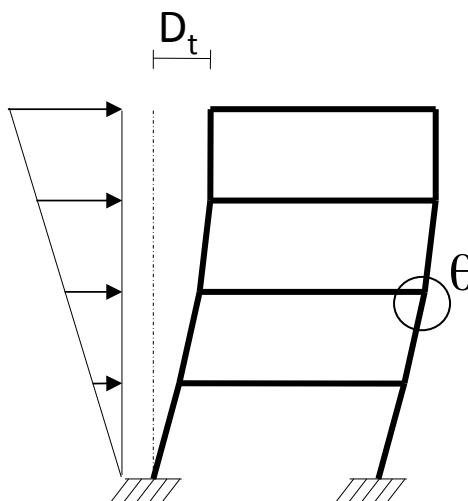
www.cmm.pt



MÉTODO N2 - Passos

6. Desempenho sísmico do sistema **nGL**

- Cálculo do deslocamento de topo da estrutura de **nGL**
$$D_t = \Gamma D_t^*$$
- Recorrer a uma análise estática, aumentando monotonicamente as cargas, até atingir D_t (ou um múltiplo deste)
- Cálculo de quantidades locais, como rotações θ , deslocamentos relativos....





www.cmm.pt



MÉTODO N2 - Passos

6. Desempenho sísmico do sistema **nGL**

- Cálculo do deslocamento de topo da estrutura de **nGL**

$$D_t = \Gamma S_d$$

- Recorrer a uma análise estática, aumentando monotonicamente as cargas, até atingir D_t (ou um múltiplo deste) relativos....
- Cálculo de quantidades locais, como rotações θ , deslocamentos relativos....

7. O desempenho sísmico estrutural, correspondente ao deslocamento D_t (ou um múltiplo deste), é comparado com os valores resistentes propostos



www.cmm.pt



N2 – LIMITAÇÕES adicionais

- ❑ **A regra de ‘deslocamentos iguais’** (elástico e inelástico) é adequada para estruturas com o período fundamental médio e longo e solos firmes, com ciclos histeréticos relativamente estáveis – valores de deslocamentos inelásticos ligeiramente conservativos
- ❑ **A regra de ‘deslocamentos iguais’** conduz a deslocamentos inelásticos muito pequenos quando a estrutura está sujeita a sismos próximos, os ciclos histeréticos são caracterizados pelo efeito de aperto (‘pinching’) ou por significativa degradação de resistência e de rigidez
- ❑ **A regra de ‘deslocamentos iguais’** não é adequada para solos moles – nestes casos um espectro inelástico modificado deve ser usado ou, alternativamente, usar factor correctivos para o cálculo de deslocamentos

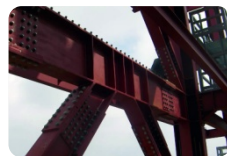
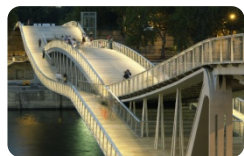


www.cmm.pt



EXEMPLO DE APLICAÇÃO

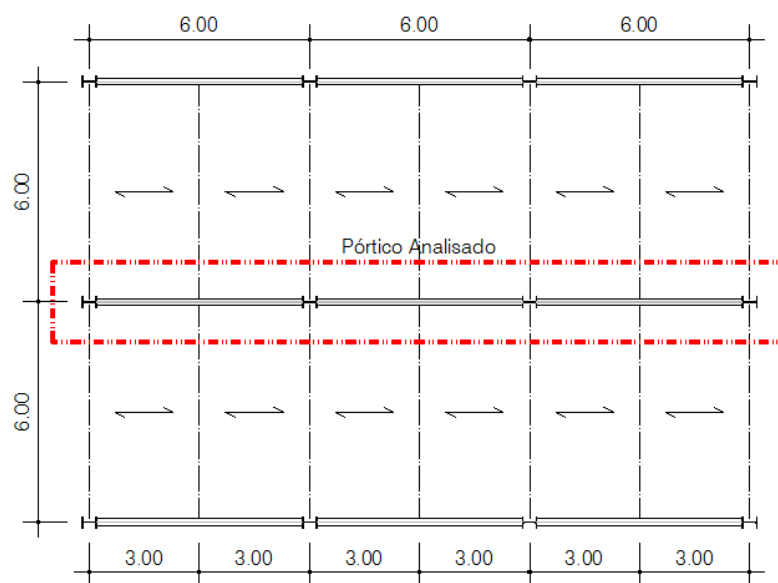
Pórtico Metálico de Ligações Rígidas



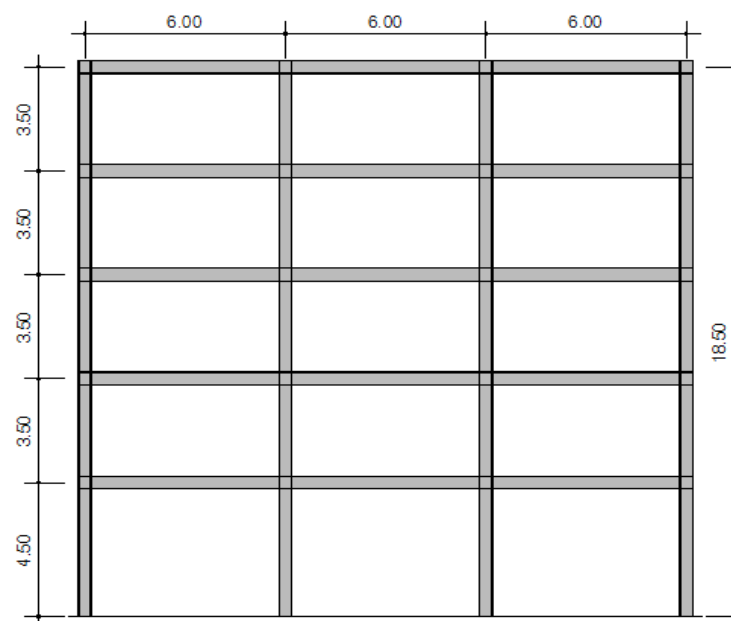
www.cmm.pt



EXEMPLO DE APLICAÇÃO



Planta da Estrutura Metálica



Pórtico Analisado



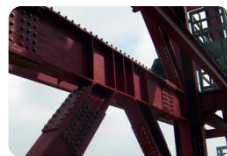
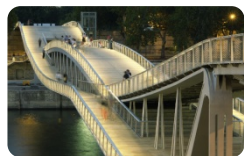
www.cmm.pt



EXEMPLO DE APLICAÇÃO

1. MODELAÇÃO DA ESTRUTURA

- ☐ As análises foram efectuadas no **OpenSees v2.2**
- ☐ Elementos de fibras (2 elementos por viga e 1 por pilar) com uma formulação em forças (7 pontos de Gauss)
- ☐ Ligações rígidas entre as vigas e os pilares. Comportamento não-linear ao nível destes elementos.
- ☐ Modelação do material: modelo elasto-plástico bi-linear com 1% de endurecimento

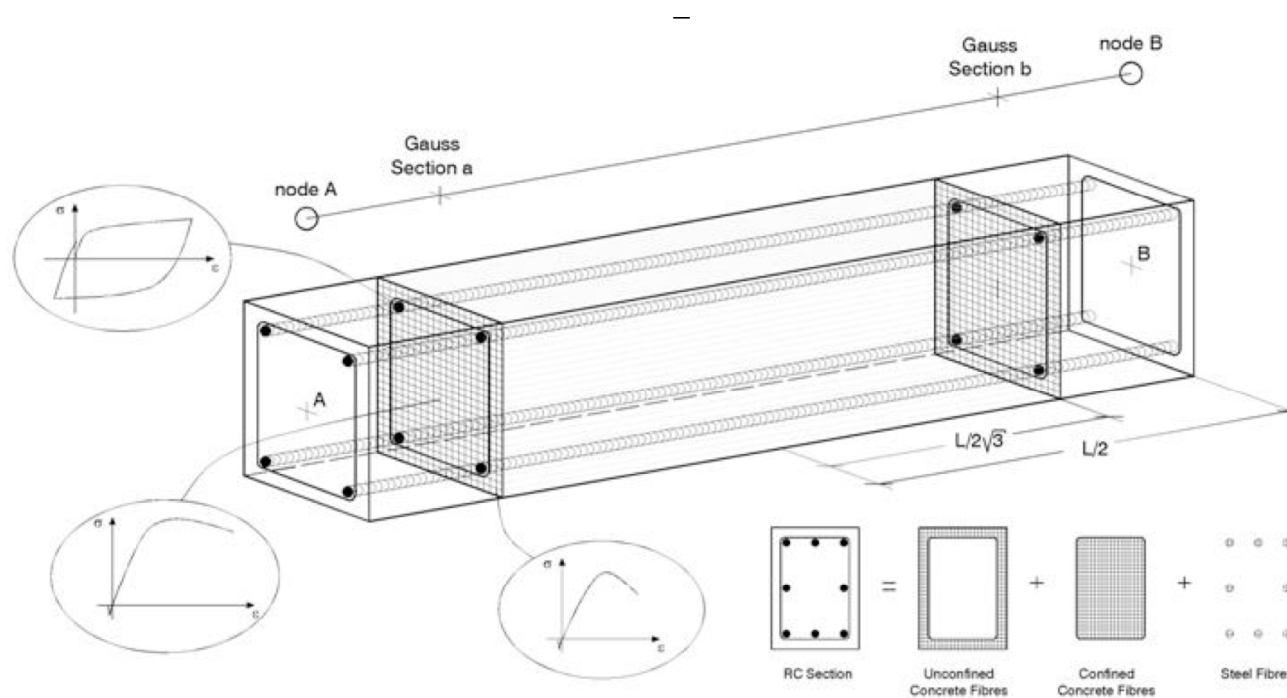


www.cmm.pt



EXEMPLO DE APLICAÇÃO

1. MODELAÇÃO DA ESTRUTURA





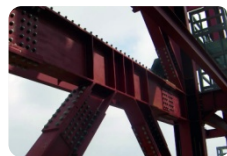
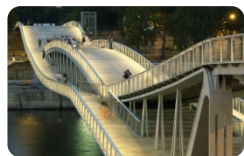
www.cmm.pt



EXEMPLO DE APLICAÇÃO

1. MODELAÇÃO DA ESTRUTURA

- ☐ No OpenSees as secções metálicas não estão discretizadas com as zonas arredondadas entre a alma e os banzos
- ☐ As secções extremas das vigas são modeladas com uma rigidez de flexão igual a 95% da rigidez real
- ☐ => Redução do M_{pl} em $\pm 5\%$



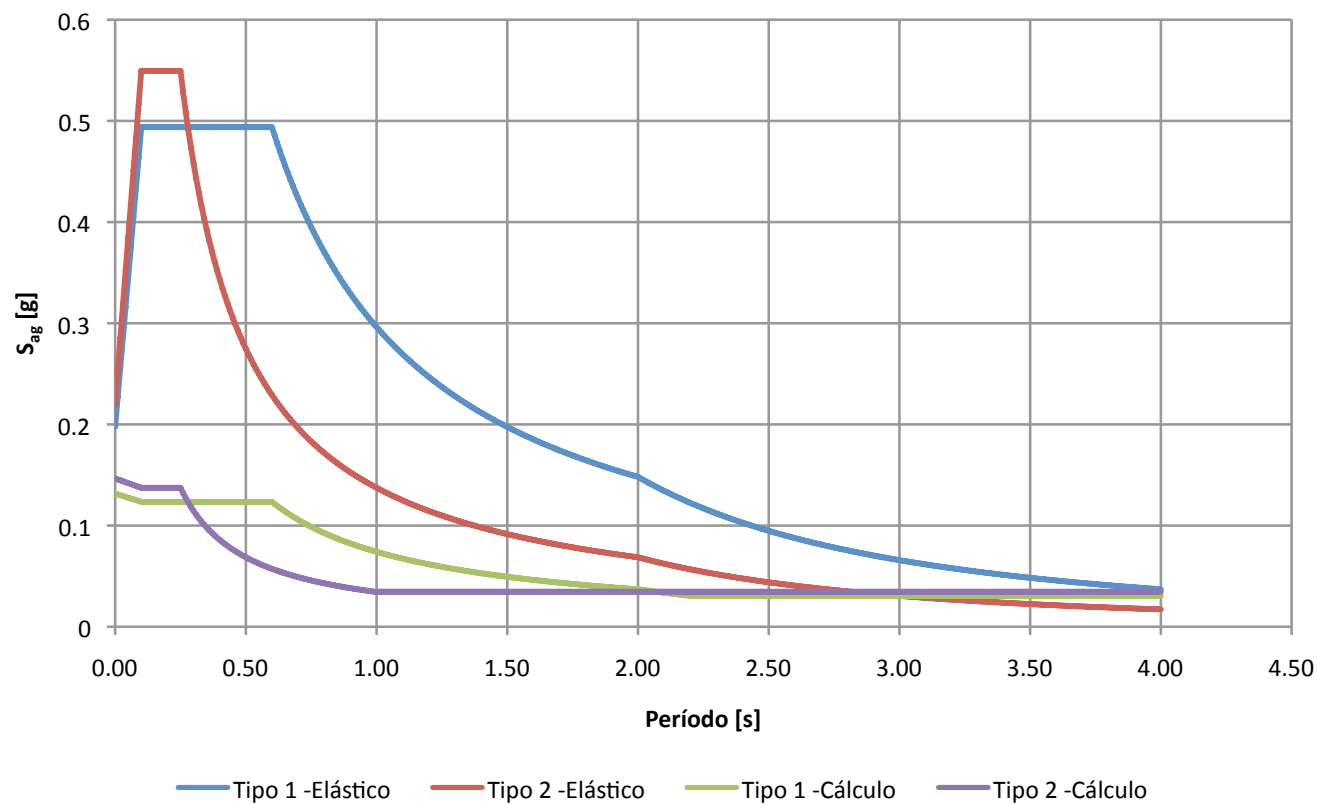
www.cmm.pt



EXEMPLO DE APLICAÇÃO

2. DEFINIÇÃO DA ACÇÃO SÍSMICA - Espectro Elástico (0,15g)

Espectros de Resposta



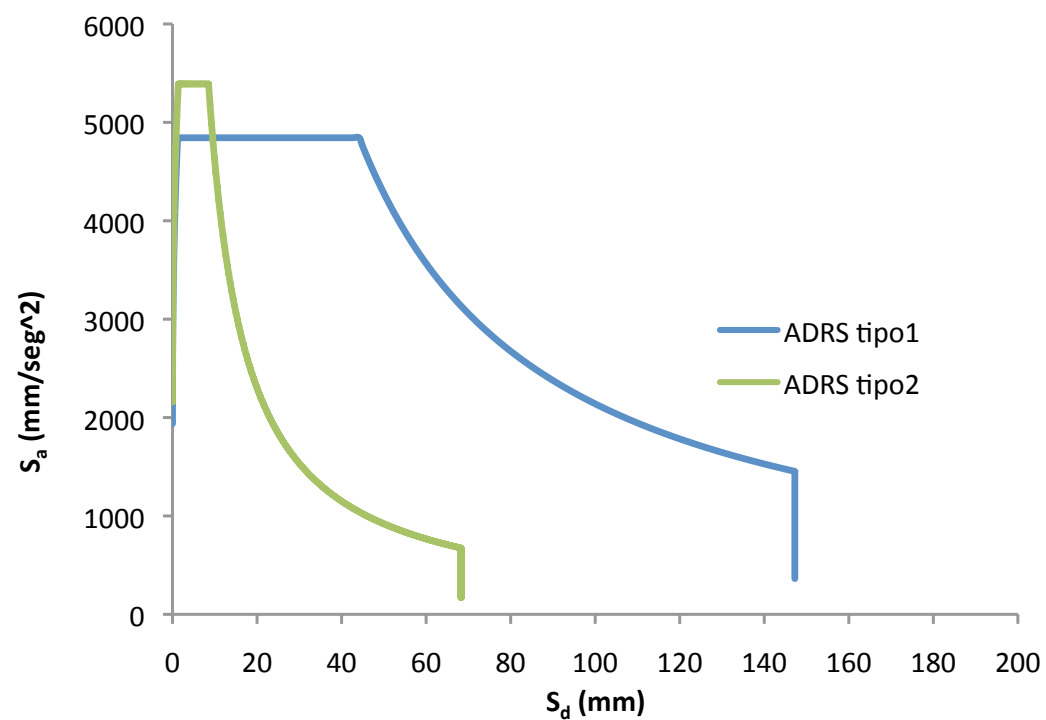


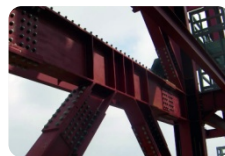
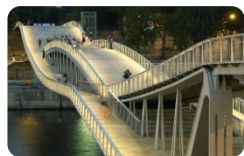
www.cmm.pt



EXEMPLO DE APLICAÇÃO

2. DEFINIÇÃO DA ACÇÃO SÍSMICA – Espectro elástico no formato ADRS



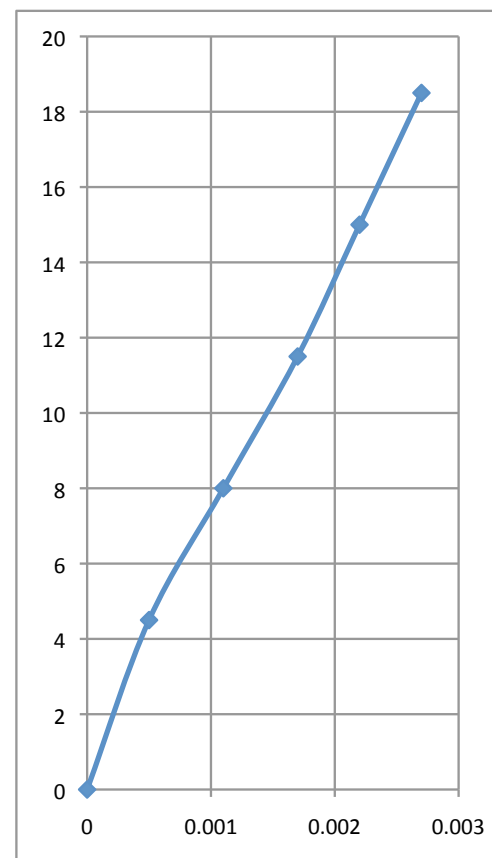


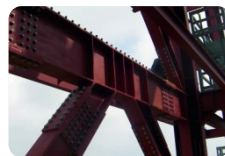
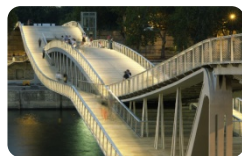
EXEMPLO DE APLICAÇÃO

CARACTERIZAÇÃO DINÂMICA

1º Modo de Vibração ϕ

h_i (m)	ϕ
0	0
4.5	0.0005
8	0.0011
11.5	0.0017
15	0.0022
18.5	0.0027



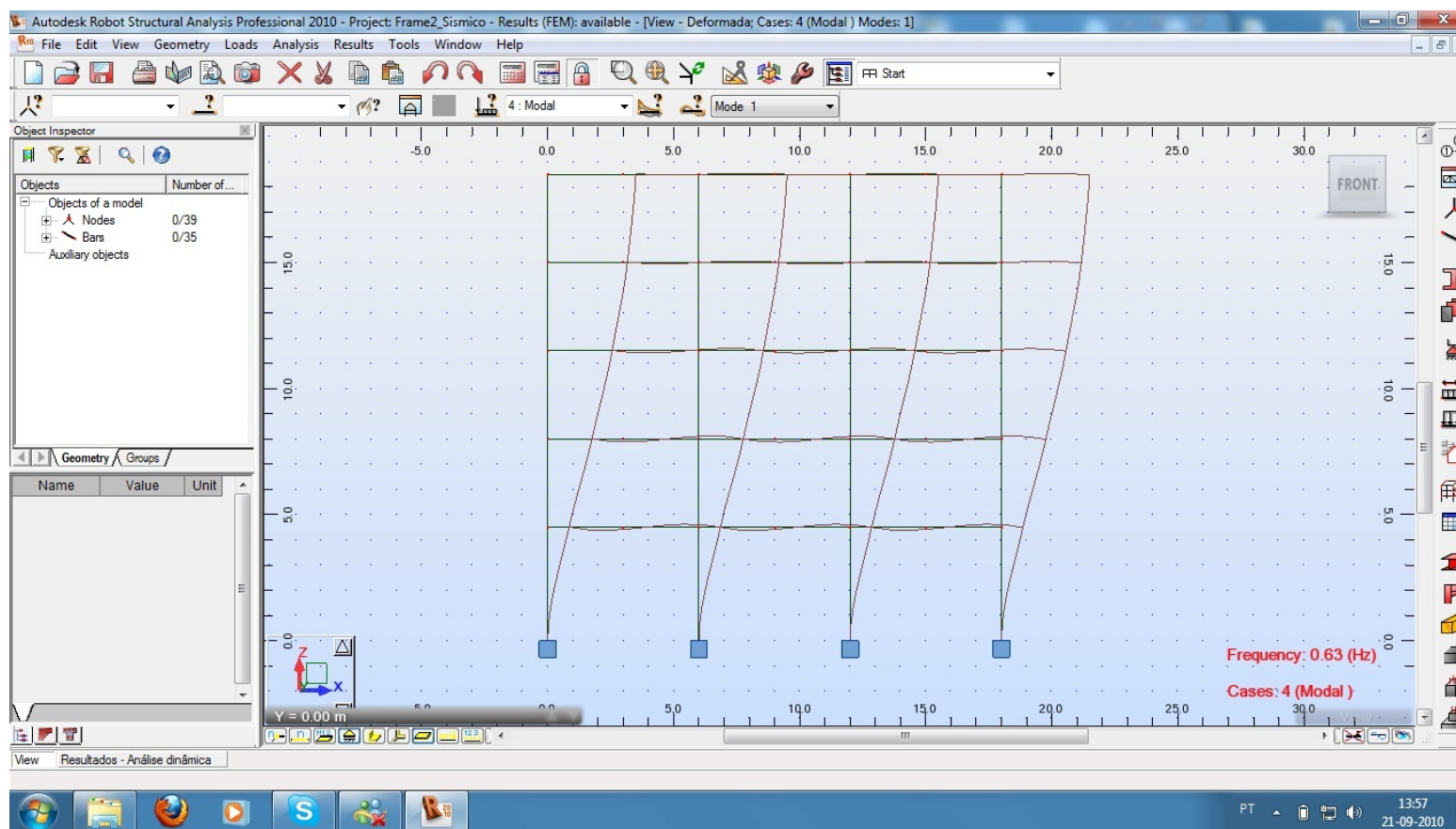


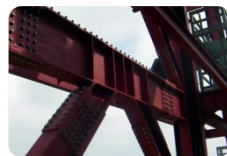
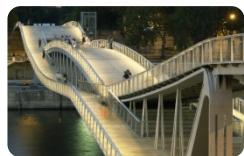
www.cmm.pt



EXEMPLO DE APLICAÇÃO

CARACTERIZAÇÃO DINÂMICA – Estrutura Inicial



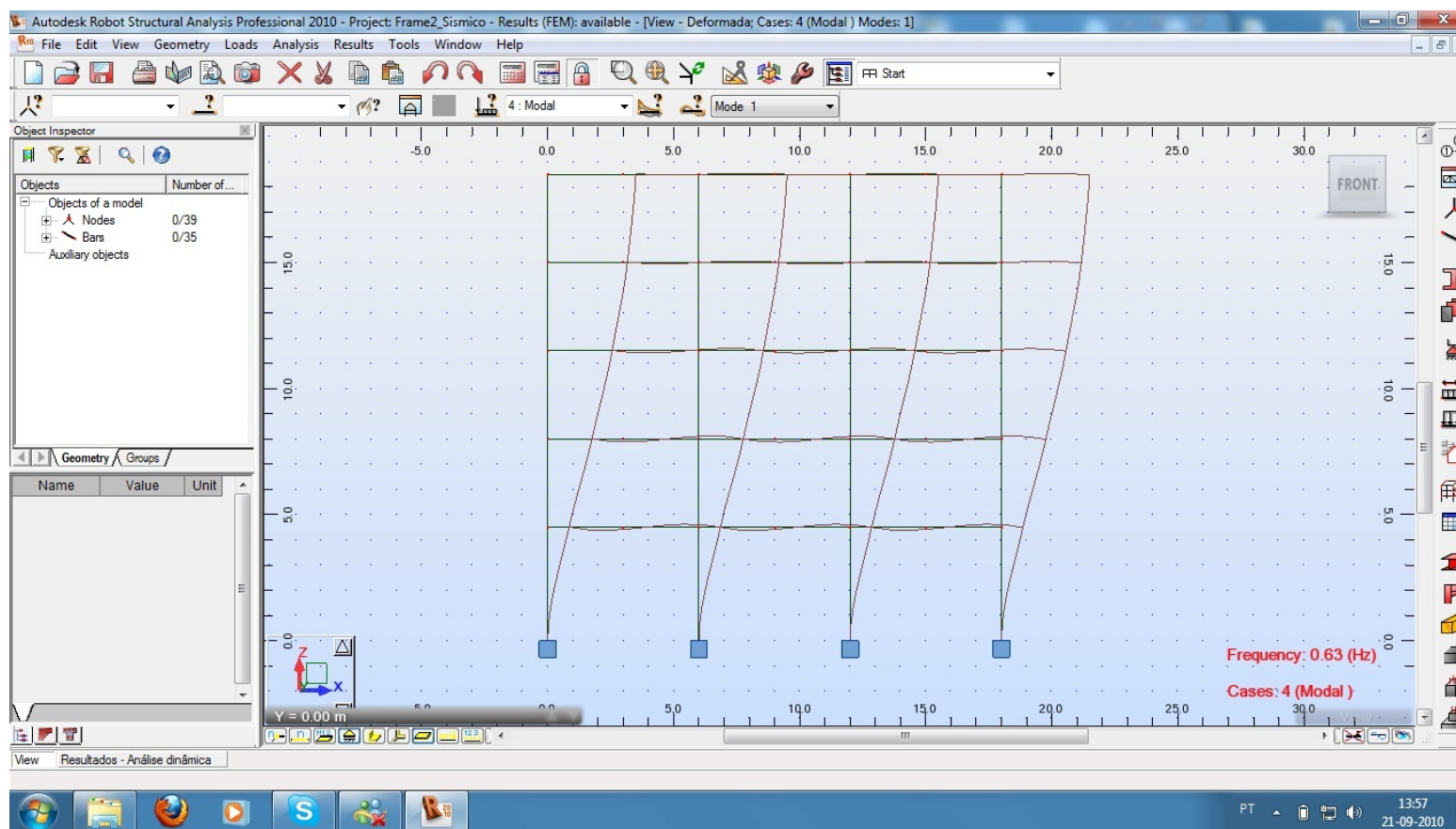


www.cmm.pt



EXEMPLO DE APLICAÇÃO

CARACTERIZAÇÃO DINÂMICA – Estrutura Final



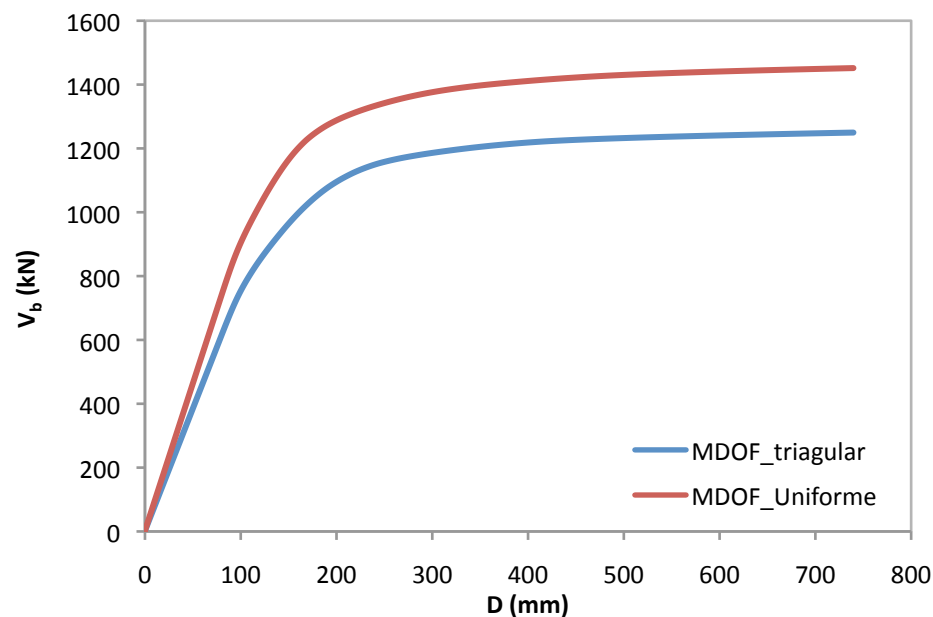


EXEMPLO DE APLICAÇÃO

3. ANÁLISE *PUSHOVER*

As análises *Pushover* foram efectuadas com um padrão uniforme e com um padrão de forças proporcional à massa e à configuração do primeiro modo de vibração

Curvas de Capacidade Resistente





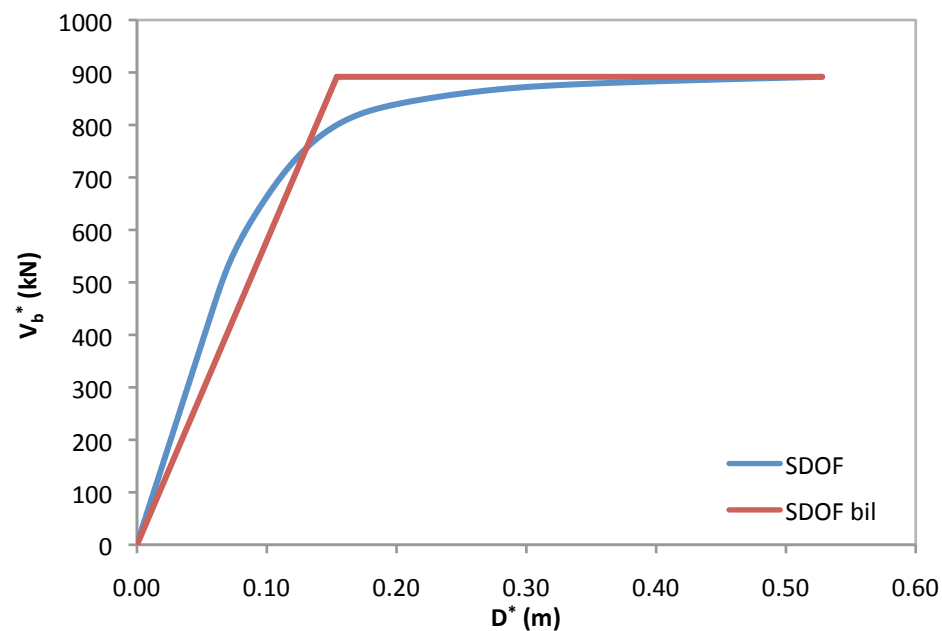
EXEMPLO DE APLICAÇÃO

4. DEFINIÇÃO DO SISTEMA DE **1GL** EQUIVALENTE

$$m^* = \sum m_i \phi_i^2 = 130,58$$

$$\Gamma = \frac{m^*}{\sum m_i \phi_i^2} = 1,401$$

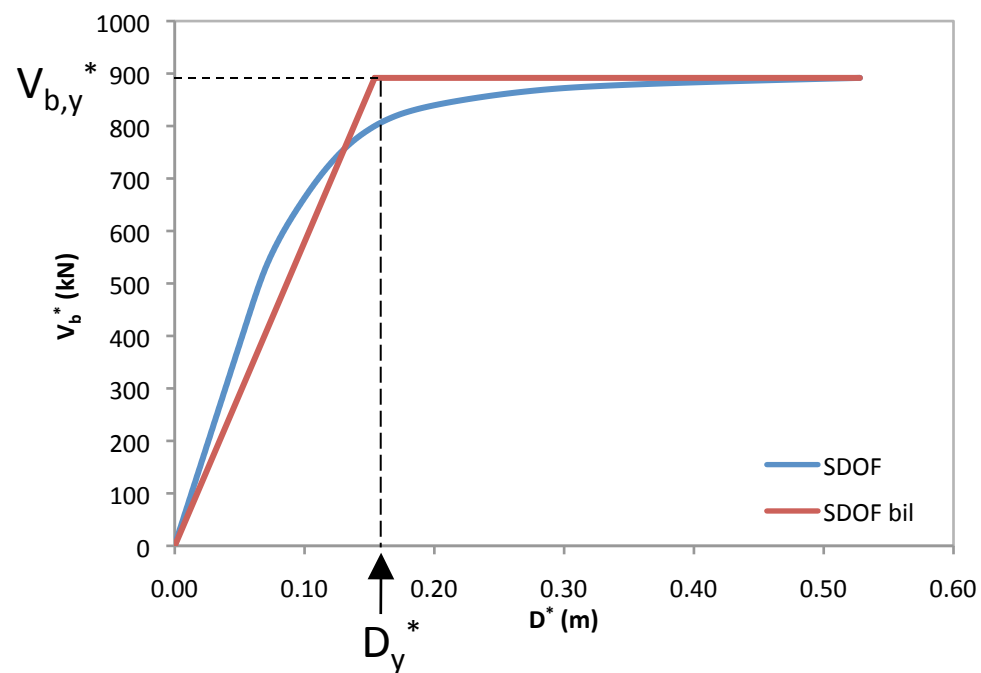
$$V_b^* = \frac{V_b}{\Gamma} \quad D^* = \frac{D}{\Gamma}$$





EXEMPLO DE APLICAÇÃO

4. DEFINIÇÃO DO SISTEMA DE **1GL** EQUIVALENTE



$$V_{b,y}^* = 891,7 \text{ kN}$$

$$D_y^* = 0,154 \text{ m}$$

$$T^* = 2\pi \sqrt{\frac{m^* D_y^*}{V_{b,y}^*}} = 0,944 \text{ seg}$$

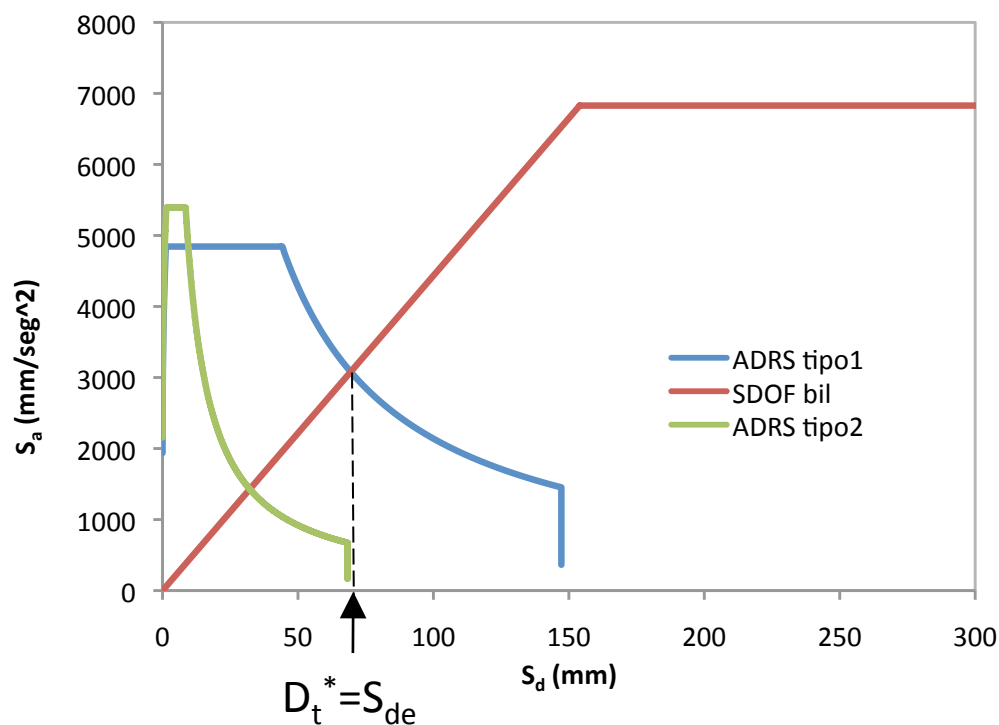


www.cmm.pt



EXEMPLO DE APLICAÇÃO

5. DESEMPENHO SÍSMICO DO SISTEMA 1GL



$$D_t^* = 0,07 \text{ m}$$

6. DESEMPENHO SÍSMICO DO SISTEMA nGL

$$D_t = \Gamma D_t^* = 0,0974 \text{ m}$$

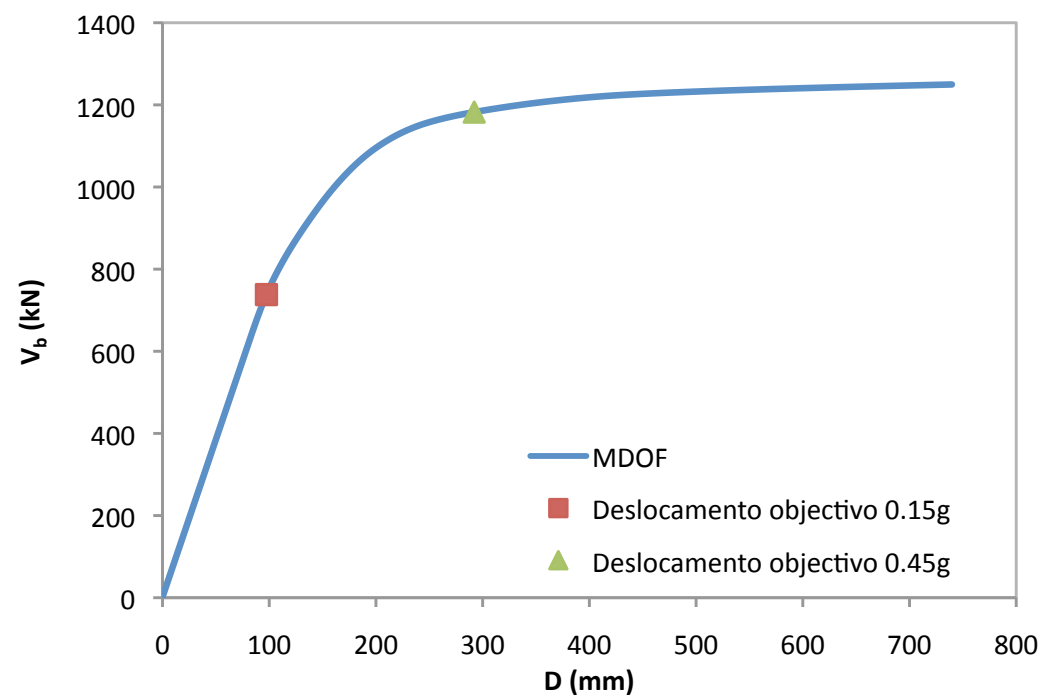


www.cmm.pt



EXEMPLO DE APLICAÇÃO

DESLOCAMENTO OBJECTIVO DO PÓRTICO PARA 0,15g E 0,45g



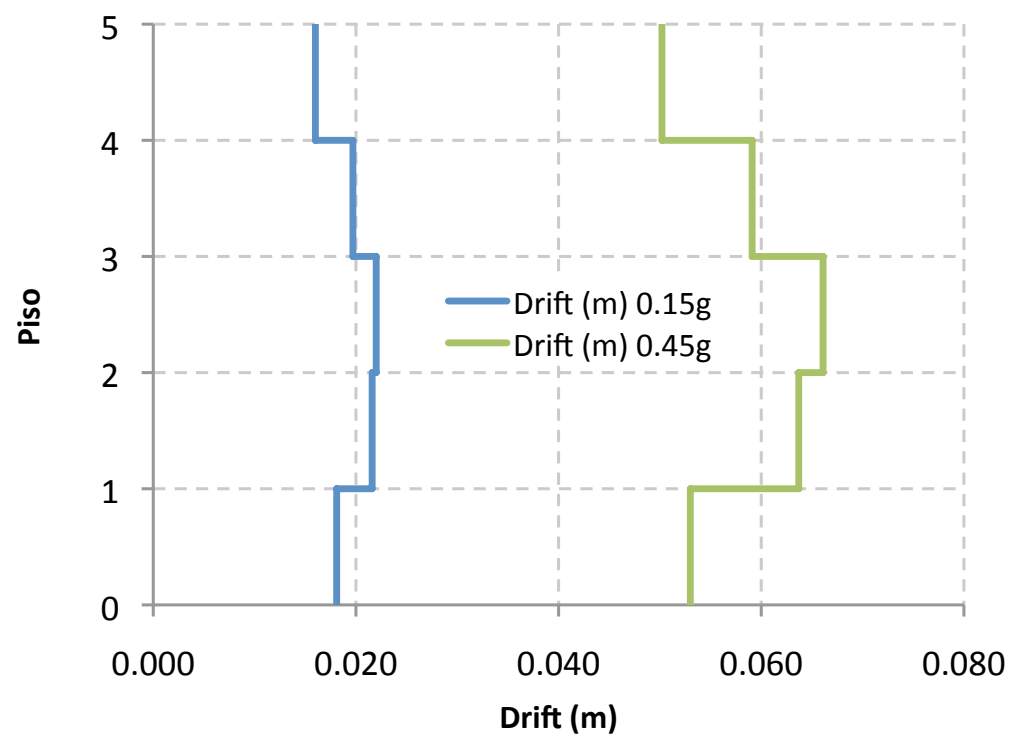


www.cmm.pt



EXEMPLO DE APLICAÇÃO

AVALIAÇÃO SÍSMICA – Deslocamentos Relativos entre pisos



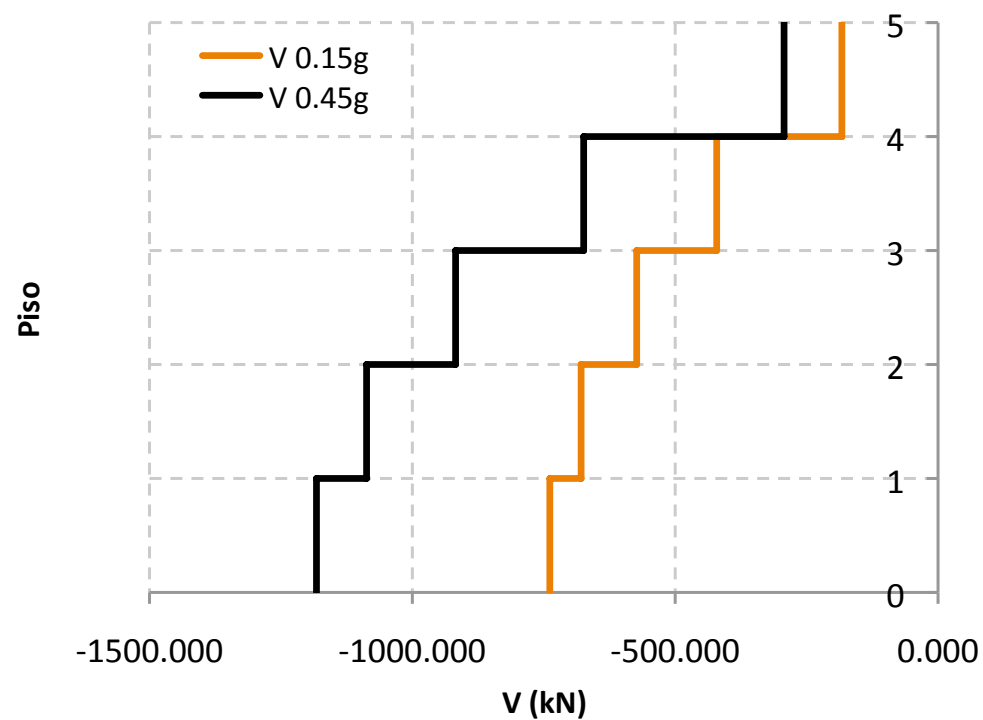


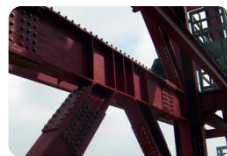
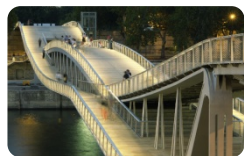
www.cmm.pt



EXEMPLO DE APLICAÇÃO

AVALIAÇÃO SÍSMICA – Esforço Transverso



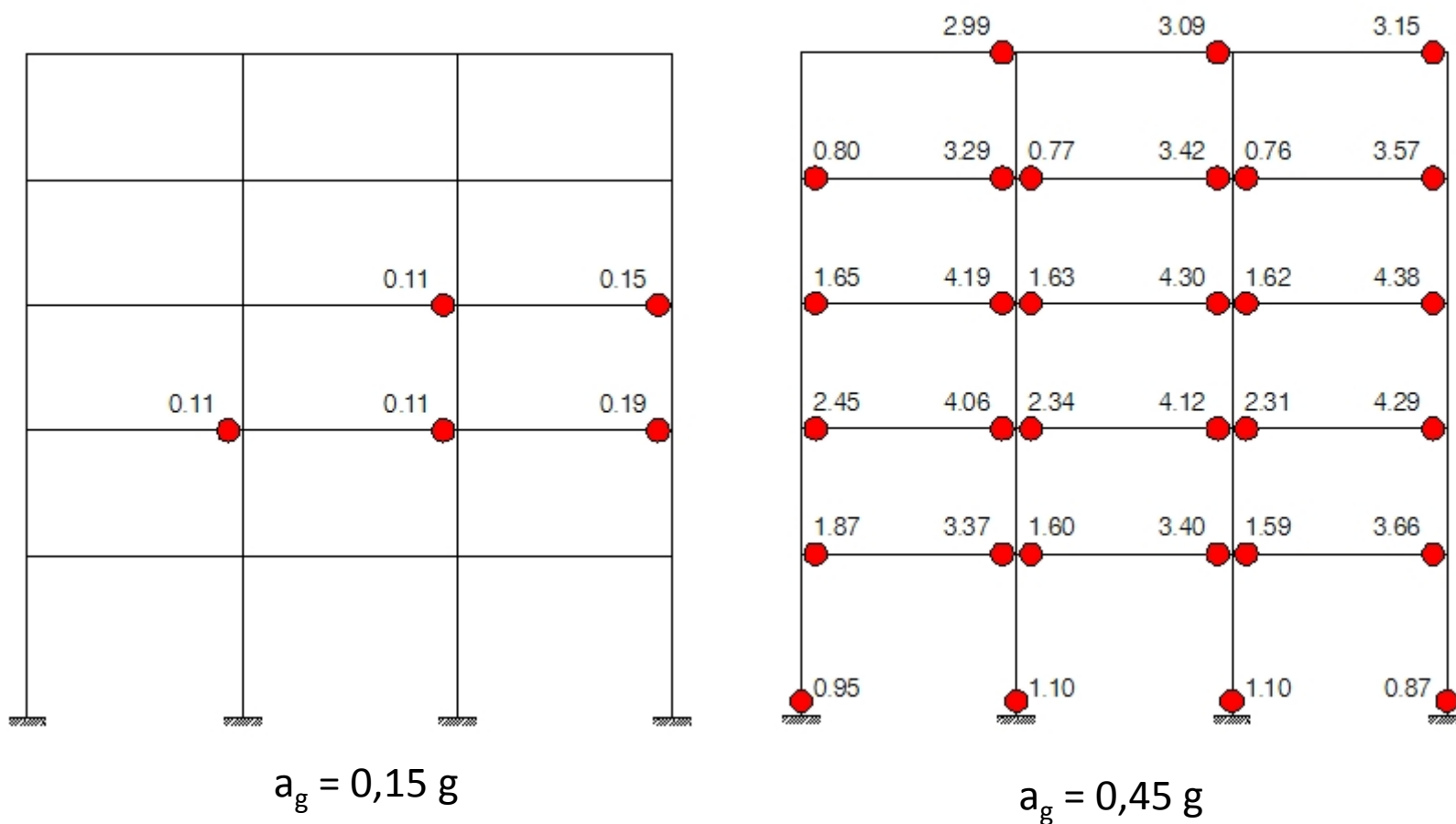


www.cmm.pt



EXEMPLO DE APLICAÇÃO

AVALIAÇÃO SÍSMICA – Rotações não lineares



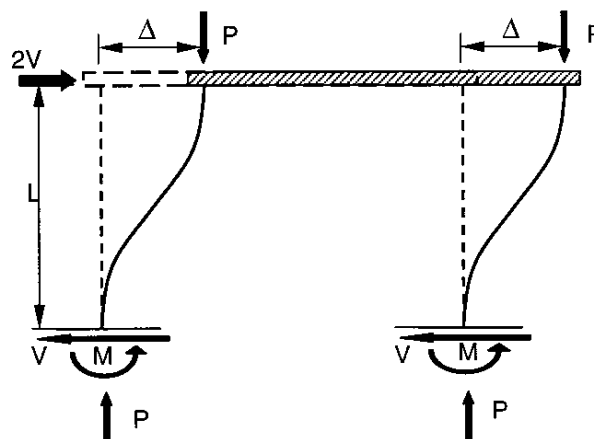


www.cmm.pt



EFEITOS P-Δ

EFEITOS P-Δ sistema 1GL – Comparação do EC8 e da norma Americana



- ☐ Nos regulamentos de dimensionamento a consideração na análise dos efeitos P-Δ é baseada no cálculo do **coeficiente θ de estabilidade por piso**
- ☐ Se $\theta < 0,1$ então P-Δ pode ser **desprezado**. Se $0,1 < \theta < 0,2$ então P-Δ tem que ser **considerado** $[1/(1-\theta)]$

(by Peres e Castro, 2010)



www.cmm.pt



EFEITOS P-Δ

EFEITOS P-Δ nos regulamentos – Coeficiente de Estabilidade no EC8

$$\theta = \frac{P_{tot} \times d_r}{V_{tot} \times h}$$

P_{tot} : Carga vertical cumulativa nos pilares do piso

V_{tot} : Esforço transverso de dimensionamento do piso

h : Altura do piso

d_r : Deslocamento relativo inter-pisos

Deslocamento relativo inter-pisos → baseado na regra de **Igualdade de Deslocamento**: $d_s = q \times d_e$

$$\theta = \frac{P_{tot} \times (q \times d_e)}{V_{tot} \times h} = \frac{P_{tot} \times d_e}{V_{tot} \times h} \times q$$

(by Peres e Castro, 2010)



www.cmm.pt



EFEITOS P-Δ

EFEITOS P-Δ nos regulamentos – Coeficiente de Estabilidade no NEHPR

$$\theta = \frac{P_{tot} \times \Delta \times I}{V_{tot} \times h \times C_d}$$

P_{tot} : Carga vertical cumulativa nos pilares do piso

V_{tot} : Esforço transversal de dimensionamento do piso

h : Altura do piso

Δ : Deslocamento de dimensionamento

I : Factor de importância

C_d : Factor de amplificação

Deslocamento (Δ) → definido multiplicando o deslocamento por um factor de amplificação (C_d) → $\delta = \frac{C_d \times \delta_e}{I}$, onde δ_e é deslocamento elástico

$$\theta = \frac{P_{tot} \times \frac{C_d \times \delta_e}{I} \times I}{V_{tot} \times h_s \times C_d} = \frac{P_{tot} \times \delta_e}{V_{tot} \times h_s}$$

(by Peres e Castro, 2010)



EFEITOS P-Δ

EFEITOS P-Δ nos regulamentos – Rigidez inicial e secante por piso

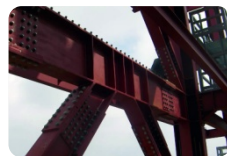
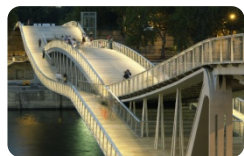
•EC8

$$\theta = \frac{P_{tot} \times d_e}{V_{tot} \times h} \times q = \frac{P_{tot}}{\left(\frac{V_{tot}}{d_e \times q} \right) \times h} = \frac{P_{tot}}{\left(\frac{K_{el}}{q} \right) \times h} = \frac{P_{tot}}{K_{sec} \times h}$$

•NEHRP

$$\theta = \frac{P_{tot} \times \delta_e}{V_{tot} \times h} = \frac{P_{tot}}{\left(\frac{V_{tot}}{\delta_e} \right) \times h} = \frac{P_{tot}}{K_{el} \times h}$$

(by Peres e Castro, 2010)



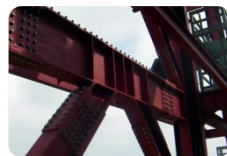
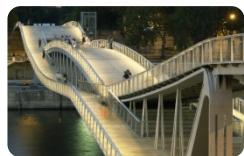
www.cmm.pt



EFEITOS P-Δ

(by Peres e Castro, 2010)

Numero de Pisos	Intensidade Sísmica	Valores máximos aceites para θ	
5 Pisos (3 vãos)	PGA = 0.3g	$\theta_{NEHRP} < 0.1; \theta_{EC8} > 0.20$	Caso 1: 5 S_ NEHRP_0.3g
		$0.10 < \theta_{EC8} < 0.20$	Caso 2: 5 S_ EC8<0.2_0.3g
		$\theta_{EC8} < 0.10$	Caso 3: 5 S_ EC8<0.1_0.3g
	PGA = 0.4g	$\theta_{NEHRP} < 0.1; \theta_{EC8} > 0.20$	Caso 4: 5 S_ NEHRP_0.4g
		$0.10 < \theta_{EC8} < 0.20$	Caso 5: 5 S_ EC8<0.2_0.4g
		$\theta_{EC8} < 0.10$	Caso 6: 5 S_ EC8<0.1_0.4g
8 Pisos (3 vãos)	PGA = 0.3g	$\theta_{NEHRP} < 0.1; \theta_{EC8} > 0.20$	Caso 7: 8 S_ NEHRP_0.3g
		$0.10 < \theta_{EC8} < 0.20$	Caso 8: 8 S_ EC8<0.2_0.3g
		$\theta_{EC8} < 0.10$	Caso 9: 8 S_ EC8<0.1_0.3g

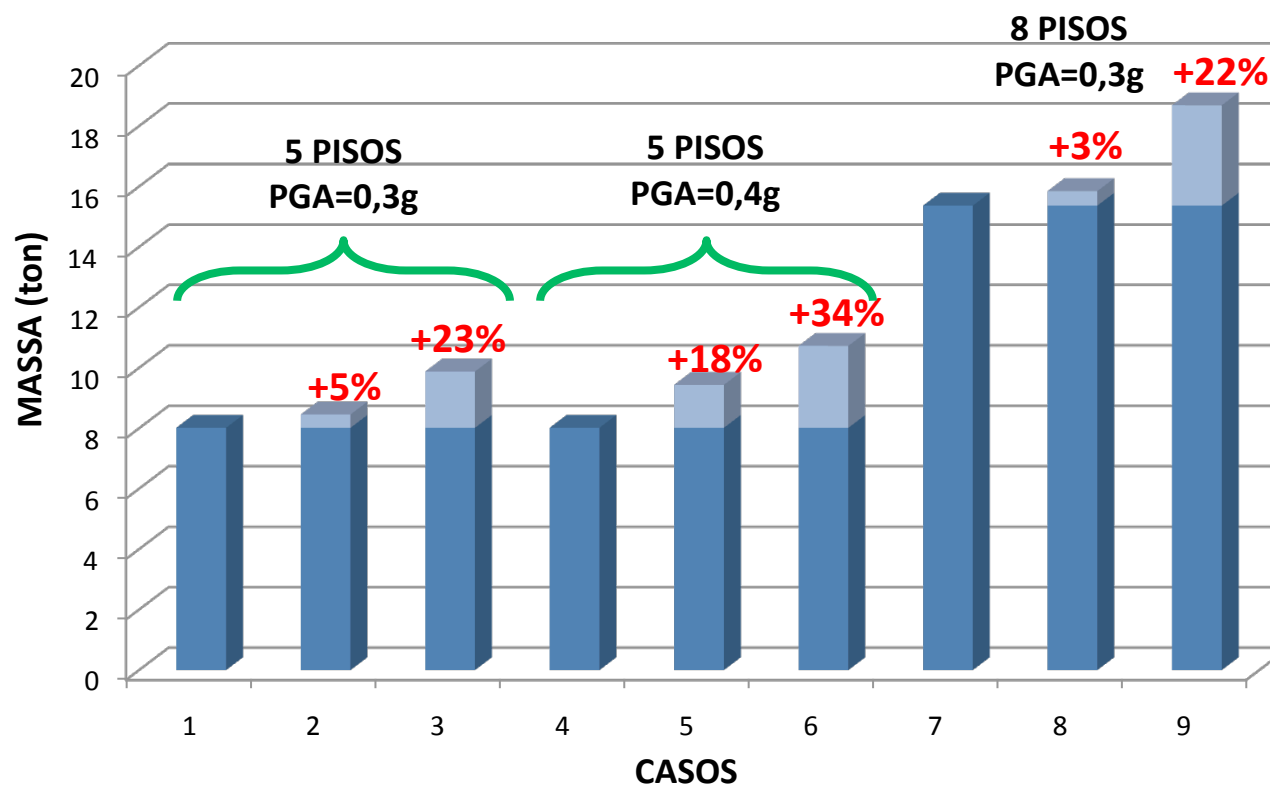


www.cmm.pt

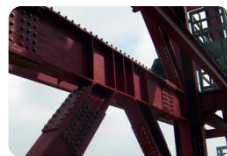
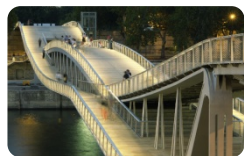


EFEITOS P-Δ

ESTUDO PARAMÉTRICO – Comparação de Massas



(by Peres e Castro, 2010)



www.cmm.pt



Curso de Formação:

Dimensionamento Sísmico de Estruturas Metálicas

Lisboa, 24 e 25 de Setembro de 2010



Rita Bento