Aplicação do EUROCÓDIGO 8 à concepção e projecto de edifícios

Concepção, análise estrutural e verificação de segurança

E CANSADO CARVALHO, GAPRES SA
Chairman do CEN/TC250/SC8
Coordenador do GT EC8

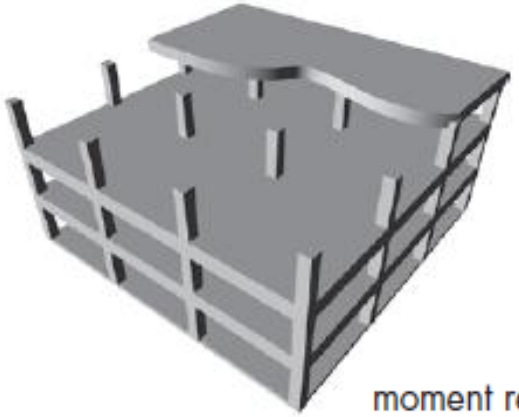
EN1998-1 – Edifícios - Importância da Concepção Estrutural

Definição de princípios orientadores de concepção de edifícios

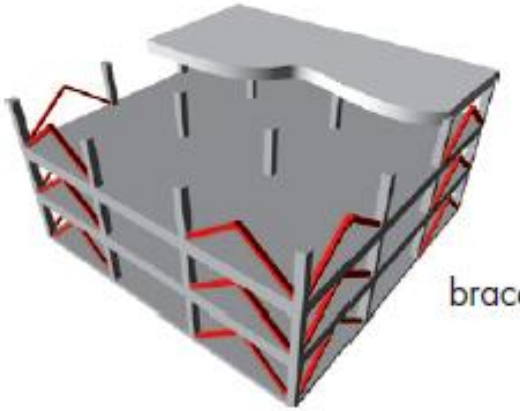
- Simplicidade Estrutural
- Uniformidade, simetria e redundância da estrutura
- Resistência e rigidez nas duas direcções
- Resistência e rigidez de torção
- Acção de diafragma ao nível dos pisos
- Fundação adequada

Conceito de elementos sísmicos primários e secundários

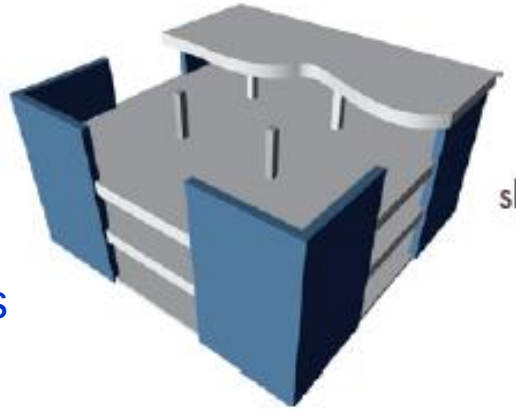
Configurações Estruturais Ideais



moment resisting frame



braced frame

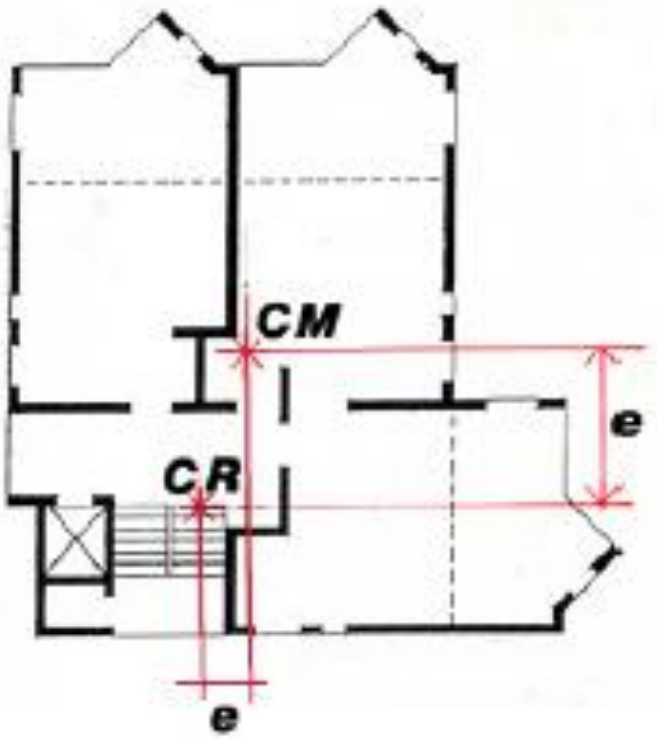


shear walls

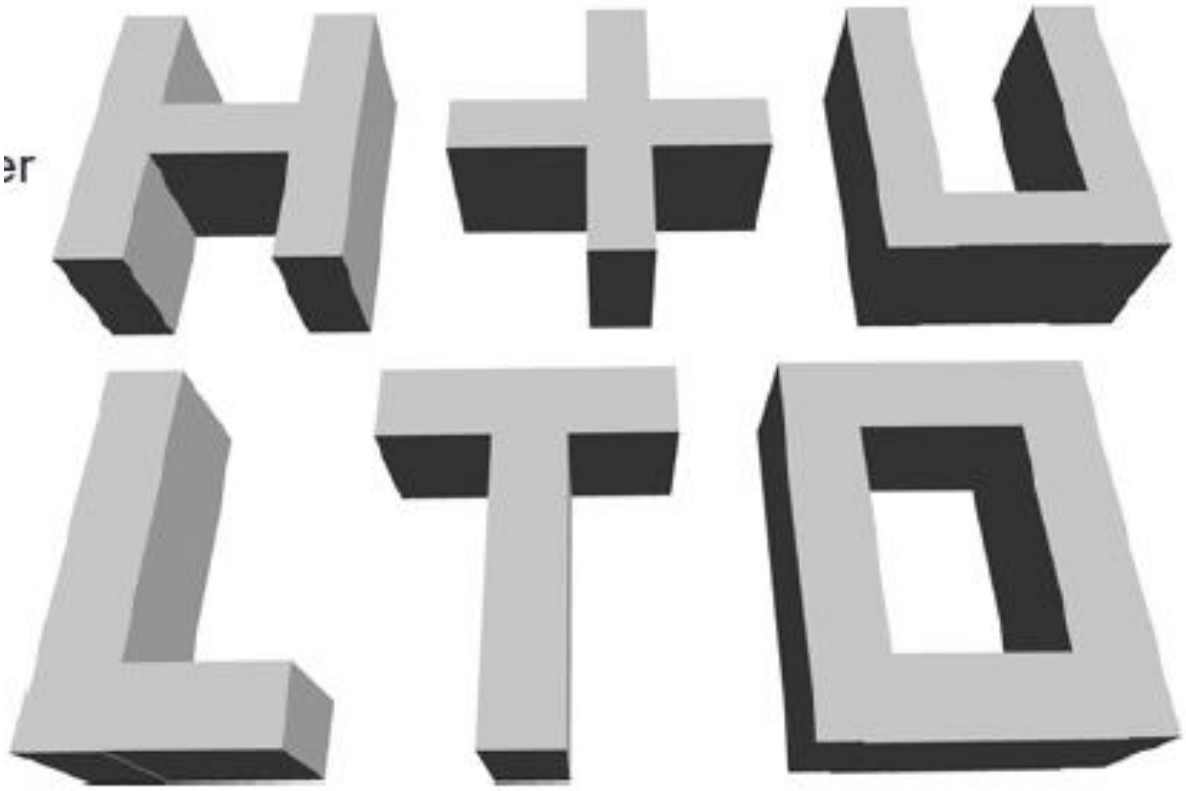
- Simples
- Uniformidade, simétrico, redundante
- Resistência e rigidez nas duas direcções
- Resistência e rigidez de torção
- Acção de diafragma ao nível dos pisos

Irregularidade em planta

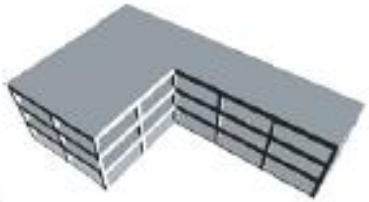
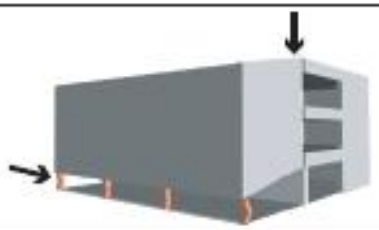
Irregularidade em planta
Excentricidade entre Massa e Rigidez/Resistência



Plantas irregulares com reentrâncias

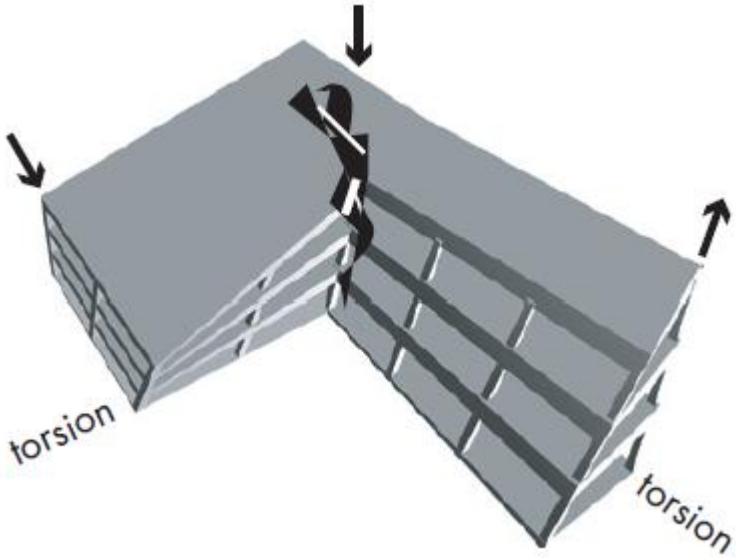


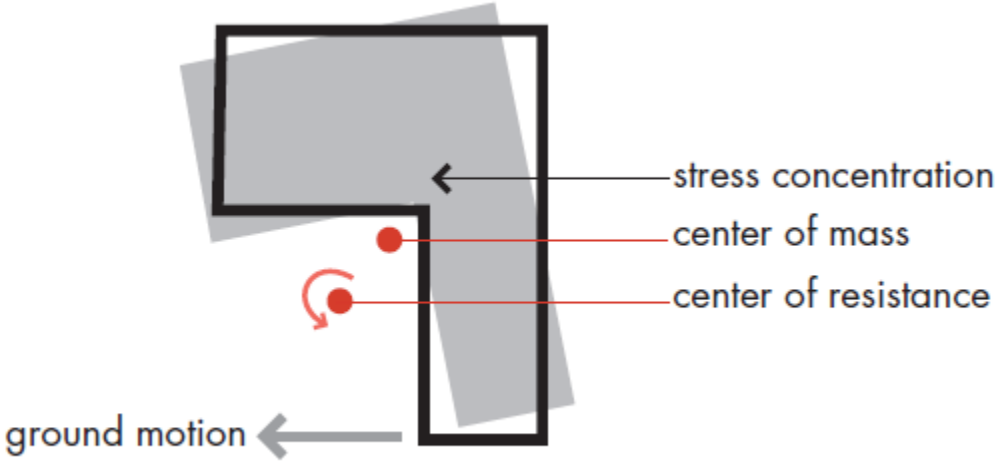
Irregularidade em planta

plan conditions	resulting failure patterns	performance	code remedies
		P1 Torsional Irregularity: Unbalanced Resistance	
		Localized damage. Collapse mechanism in extreme instances.	Modal Analysis, +65 foot high in SDC D,E, F. 25% increase to diaphragm connection design forces. Amplified forces to max of X3.
		**P2 Re-entrant Corners**	
		Local damage to diaphragm and attached elements. Collapse mechanism in extreme instances in large buildings.	25% increase in diaphragm connection design forces.
		P3 Diaphragm Eccentricity and Cutouts	
		Localized structural damage.	25% increase in diaphragm connection design forces.
		P4 Nonparallel Lateral Force-Resisting System	
		Leads to torsion and instability, localised damage.	Combine 100% and 30% of forces in 2 directions, use maximum.
		**P5 Out-of-Plane Offsets: Discontinuous Shearwalls**	
		Collapse mechanism in extreme circumstances.	Modal Analysis, +65 foot high in SDC D,E, F. 25% increase to diaphragm connection design forces.

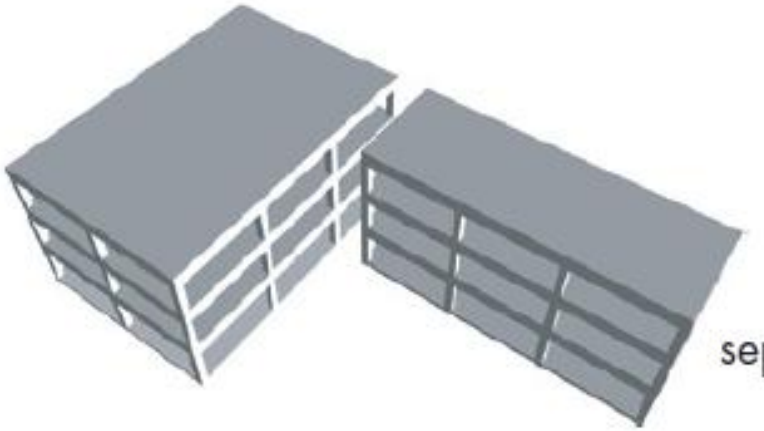
FEMA 454

Irregularidade em planta

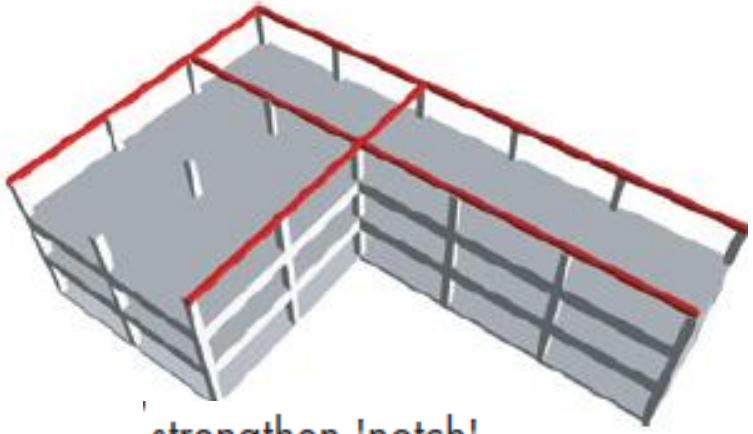




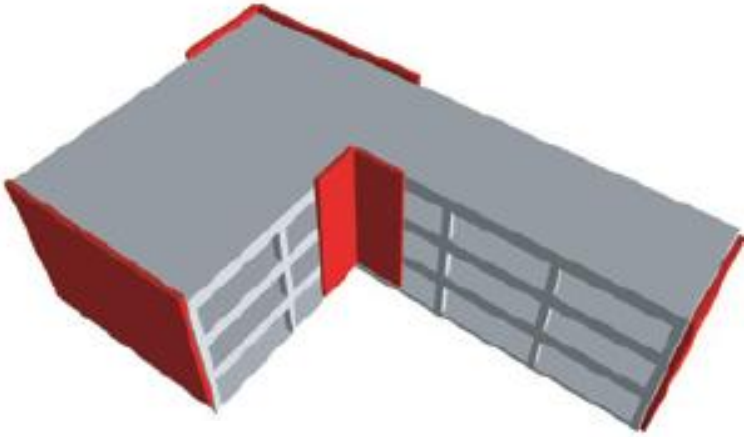
Irregularidade em planta
Soluções de minimização



separation



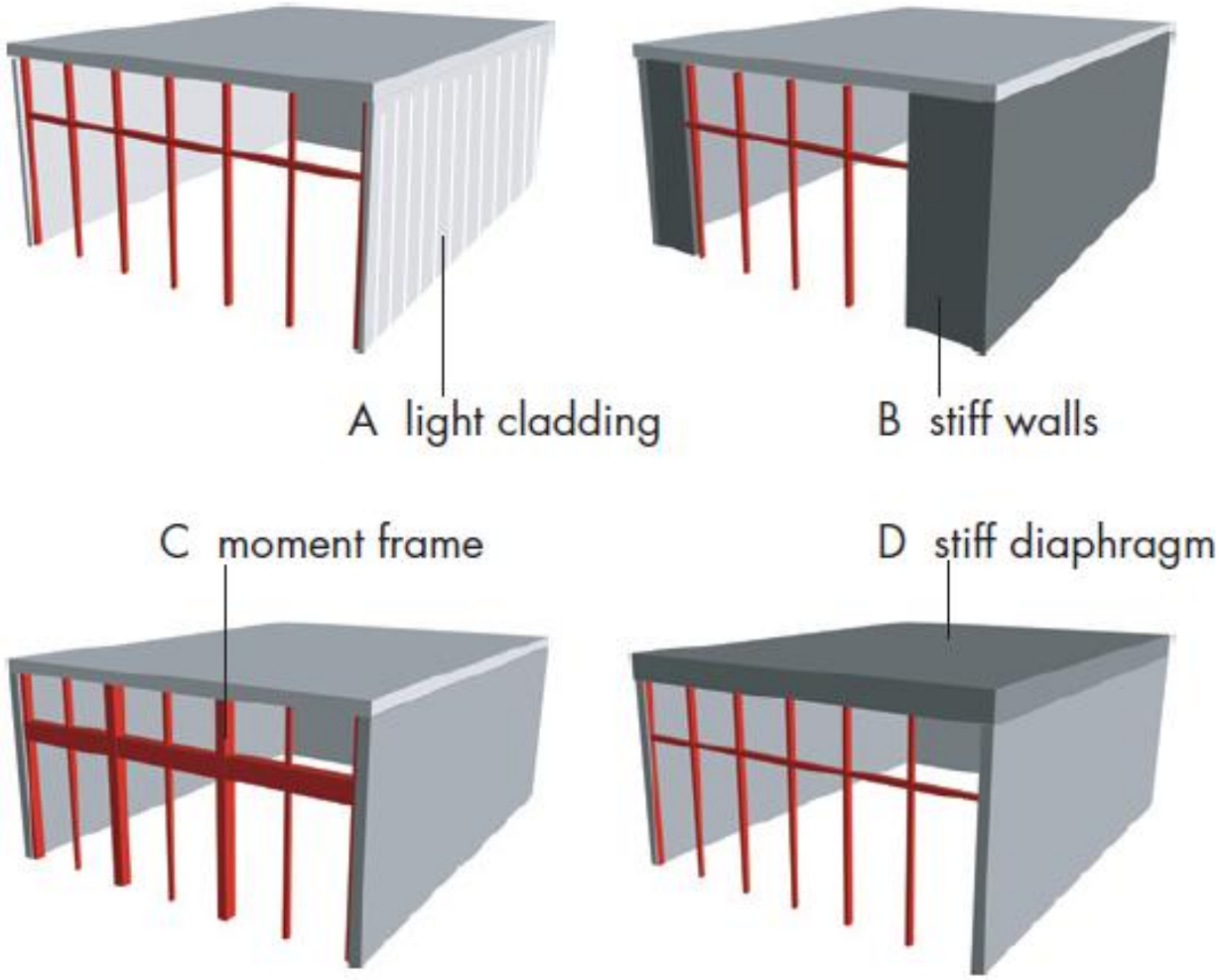
strengthen 'notch'



stiff resistant elements

Irregularidade em planta
Soluções de minimização

- À – Situação deficiente
- B - Aumento rigidez de torção
- Compensação de rigidez
- Diafragma eficaz



Acção dos diafragmas

.

- A – Função Diafragma
- B – Diafragma deformável ou rígido (influência na distribuição de esforços)
- Reforço de diafrgama
- Interrupção do “banzo” do diafragma (comportamento deficiente)

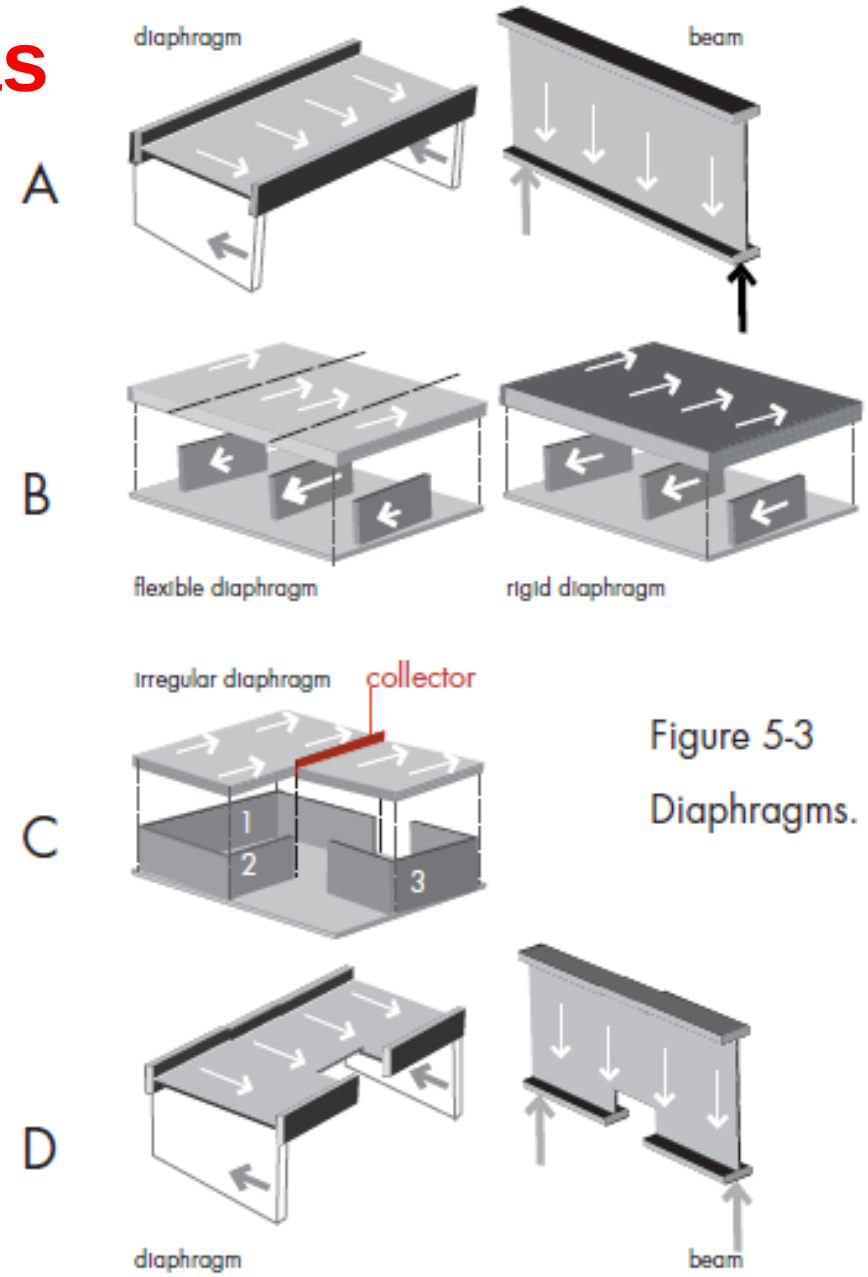


Figure 5-3
Diaphragms.

Irregularidade em altura

Irregularidade em altura

Irregularidade em altura

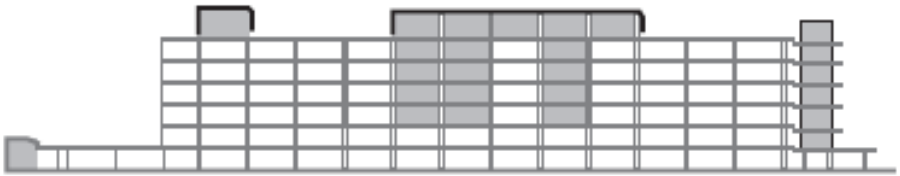


Figure 5-13: Long section, Olive View Hospital.
Note that the shear walls stop at the third floor.

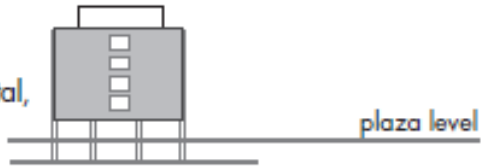


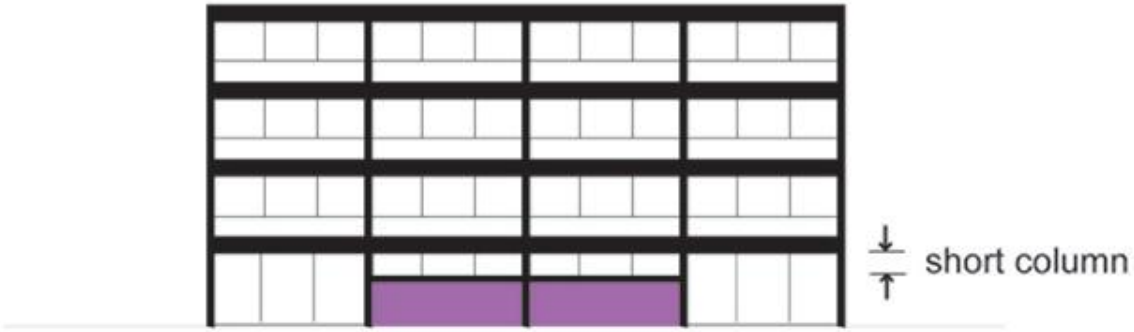
Figure 5-14: Cross section, Olive View hospital, showing the second-floor plaza and the discontinuous shear wall.

Irregularidade em altura

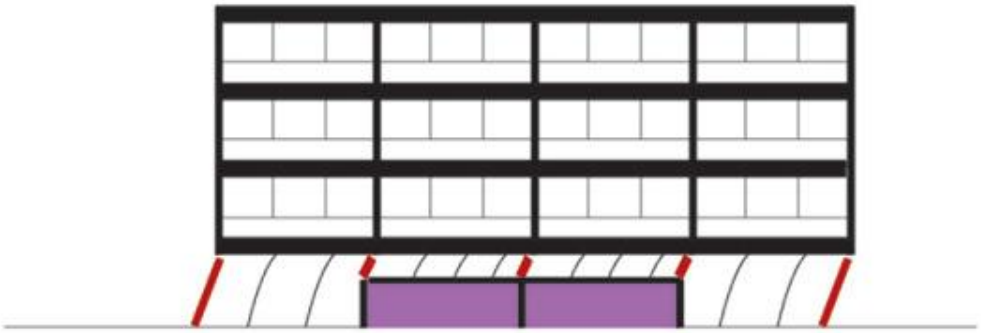
vertical conditions	resulting failure patterns	performance	code remedies
		V1 Stiffness Irregularity: Soft Story	
		Common collapse mechanism. Death and much damage in Northridge earthquake.	Modal Analysis, +65 feet high in SCD D,E,F. Extreme case not permitted in seismic use groups E and F.
		V2 Weight/Mass Irregularity	
		Collapse mechanism in extreme circumstances.	Modal Analysis, +65 foot high in SDC D,E,F.
		V3 Vertical Geometric Irregularity	
		Localized structural damage.	Modal Analysis, +65 foot high in SDC D,E,F.
		V4 In-Plane Irregularity in Vertical Lateral Force System	
		Localized structural damage.	Model Analysis, +65 foot high is SDC D, E, F. 25% increase to diaphragm connection design force. Supporting members designed for increased forces.
		V5 Capacity Discontinuity: Weak Story	
		Collapse mechanism in extreme circumstances	Modal Analysis, +65 foot high in SDC D, E, F.

FEMA 454

Contribuição dos enchimentos para a irregularidade em altura



partial floor-height panel infill



failure pattern

Concepção estrutural de edifícios: a interacção com o arquitecto

This chapter has focused on basic seismic structural systems in relation to architectural configurations, and has looked at architectural design through a seismic "filter". This shows that **many common and useful architectural forms are in conflict with seismic design needs**. To resolve these conflicts the **architect needs to be more aware of the principles of seismic design**, **and the engineer needs to realize that architectural configurations are derived from many influences, both functional and aesthetic.**

The ultimate solution to these conflicts depends on **the architect and engineer working together on building design from the outset of the project** and engaging in knowledgeable negotiation.

Trends in architectural taste suggest that for the engineer to expect to convince the architect of some of the conventional virtues of seismic design, such as simplicity, symmetry and regularity, is only realistic for projects in which economy and reliable seismic performance are paramount objectives. **When the architect and the client are looking for high-style design, the forms will probably be irregular, unsymmetrical, and fragmented**. The wise and successful engineer will enjoy the challenges. **New methods of analysis will help, but engineers must also continue to develop their own innate feeling for how buildings perform**, and be able to visualize the interaction of configuration elements that are quite unfamiliar. (FEMA 454)

EN1998-1 – Efeito da regularidade estrutural nas condições de análise

.

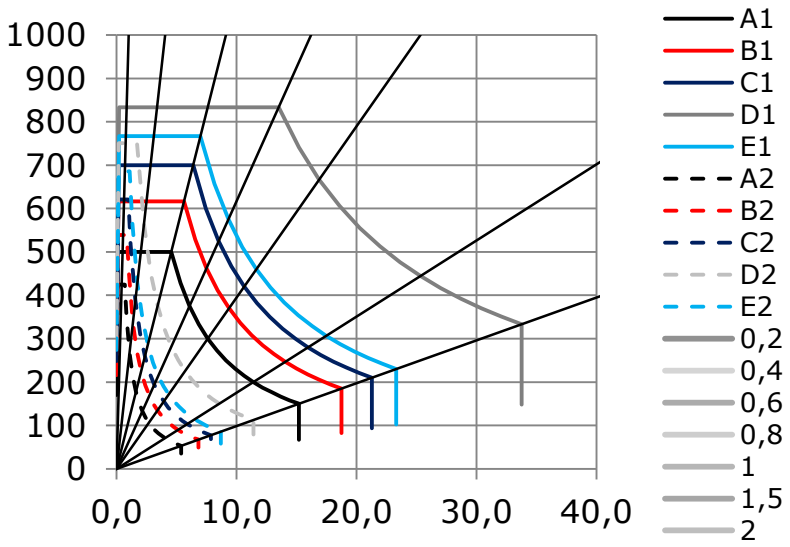
Regularidade		Simplificações admitidas		Coeficiente de comportamento
Em planta	Em altura	Modelo	Análise elástica linear	(para a análise linear)
Sim	Sim	Plano	Força lateral	Val. de referência
Sim	Não	Plano	Modal	Valor reduzido
Não	Sim	Espacial	Força lateral	Val. de referência
Não	Não	Espacial	Modal	Valor reduzido

EN1998-1 – Elementos sísmicos primários e secundários

- Não fazem parte do sistema resistente às acções sísmicas
- Resistência e rigidez deve ser desprezada na análise. Rigidez inferior a 15% do global
- Não sujeitos às regras de pormenorização sísmica
- Devem manter a capacidade de suporte das cargas gravíticas com a deformação sísmica
- Verificar o efeito de 2ª ordem (P- D)

EN1998-1 – Análise Estrutural

- Modelação
  - Representação adequada da massa e rigidez (e resistência em análises não lineares)
  - Diafragmas rígidos ou deformáveis (variação de deslocamento inferior a 10%)
  - Em situações regulares possibilidade de utilizar 2 modelos planos
  - Considerar o efeito da fendilhação na rigidez. Rigidez secante na cedência (50%, na ausência de outra informação)
  - Deformabilidade da fundação
  - Torção acidental ($e_{ai} = \pm 0{,}05\, L_i$)



EN1998-1 – Análise Estrutural

- Métodos de análise
  - Análise linear
    - Análise por **forças laterais** (com limitações de aplicação: regularidade em altura e $T_1 \leq \min(4.T_C; 2s)$
    - **Análise modal** por espectro de resposta (aplicável em geral)
  - Análise não linear
    - Estática não linear (***pushover***)
    - **Dinâmica** não linear

Em modelos espaciais aplicar a acção sísmica segundo todas as direcções horizontais relevantes e nas direcções ortogonais.

EN1998-1 – Métodos de Análise Linear

- Forças laterais
  - Distribuição das forças: $$F_i = F_b \cdot \frac{s_i \cdot m_i}{\sum s_j \cdot m_j}$$
  - Efeito da torção acidental: $$e_{ai} = \pm 0{,}05 \cdot L_i$$
  - Efeito da **torção acidental** com utilização de (2) modelos planos (multiplicação por *d* dos esforços sísmicos em todos elementos estruturais):
  - edifícios com simetria: $$\delta = 1 + 0{,}6 \cdot \frac{x}{L_e}$$
  - outras situações: $$\delta = 1 + 1{,}2 \cdot \frac{x}{L_e}$$

x - Distância ao C.G.

L_e - Distância entre elementos de contraventamento extremos

EN1998-1 – Métodos de Análise Linear

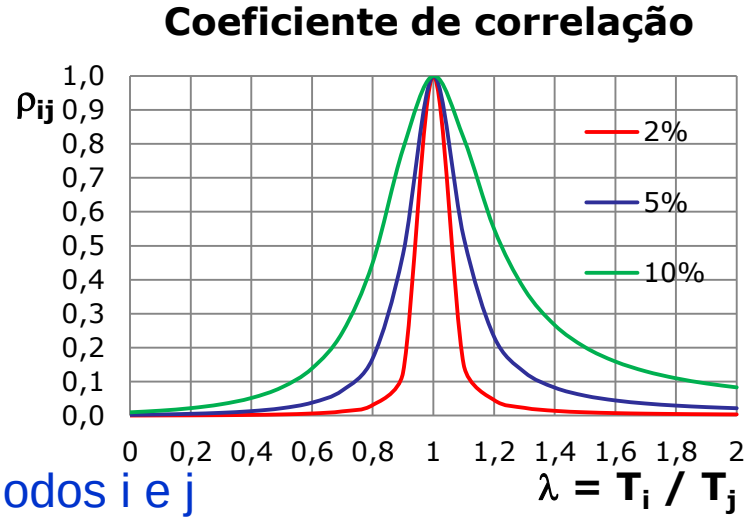
- Análise modal
  - Soma das massas modais **superior a 90 %** da massa total
  - Considerar todos os modos com massa superior a 5%
  - Situações especiais:

    Número mínimo de modos: $k \geq 3 \cdot \sqrt{n}$ e $T_k \leq 0{,}2s$
  - **Combinação dos modos**:
    - Modos independentes $T_j \leq 0{,}9 \cdot T_i$: **Combinação Quadrática**
    - Outros casos: **Combinação Quadrática Completa**

EN1998-1 – Métodos de Análise Linear

- Combinação Quadrática: $E_E = \sqrt{\sum_N E_{Ei}^{\ 2}}$
- Combinação Quadrática Completa:

$$E_E = \sqrt{\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N}\rho_{ij}E_{Ei}E_{Ej}}$$



E_E – Efeito da acção sísmica

E_{Ei} , E_{Ej} – Efeito da acção sísmica para os modos i e j

ρ_{ij} – Coeficiente de correlação entre modos i e j

$$\rho_{ij} = \frac{\zeta^2(1+\lambda)^2}{(1-\lambda)^2 + 4\cdot\zeta^2\cdot\lambda}$$

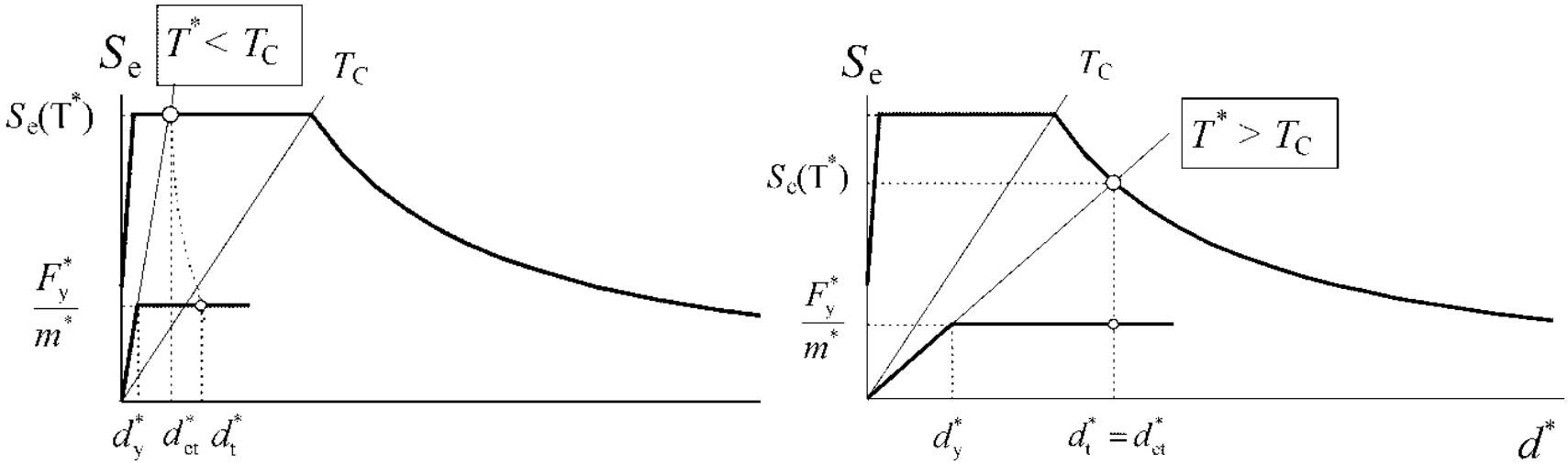
ζ - Amortecimento

λ - T_i / T_j

EN1998-1 – Métodos de Análise Não Linear

Modelação estrutural com valores médios das propriedades dos materiais

- Análise estática não linear (***pushover***)
  - Carga lateral
  - Curva de capacidade
  - Deslocamento alvo



EN1998-1 – Métodos de Análise Não Linear (cont.)

- Análise temporal não linear
  - Modelação do comportamento com carregamento cíclico
  - No mínimo 3 acelerogramas compatíveis com o espectro de projecto (duração mínima: AS1 $T_s \geq 30s$; AS2 $T_s \geq 10s$)
  - Avaliação da resposta em termos de deslocamento imposto *vs* capacidade de deformação
- Efeito da acção
  - Valor mais desfavorável se aplicados 3 a 6 acelerogramas
  - Valor médio se aplicados 7 ou mais acelerogramas

Anexo Nacional limita a 25% o desvio da resistência global horizontal relativamente ao cálculo linear de referência

EN1998-1 – Métodos de Análise

- Combinação dos efeitos das **componentes** da acção sísmica
  - Avaliar separadamente os efeitos de cada componente
  - Combinação:
  - Quadrática simples $$E_{Ed} = \pm\sqrt{E_{Edx}^2 + E_{Edy}^2}$$
  - Aproximação linear $$E_{Ed} = \begin{cases} E_{Edx} \text{"+"} 0{,}30 \cdot E_{Edy} \\ 0{,}30 \cdot E_{Edx} \text{"+"} E_{Edy} \end{cases}$$
    - Considerar $\pm E_{Edx}$ e $\pm E_{Edy}$ (8 casos)
  - Sistemas regulares de paredes (ou com contraventamentos ortogonais independentes) não requerem combinação

EN1998-1 – Cálculo dos deslocamentos

(4.3.4) ….no caso de análise linear: $d_s = q_d \, d_e$

d_s – Deslocamento de um ponto do sistema estrutural

d_e – Deslocamento do mesmo ponto do sistema estrutural determinado por uma análise linear baseada no espectro de resposta de cálculo

q_d – coeficiente de comportamento em deslocamento, que se admite ser **igual a *q*, salvo indicação em contrário**

Em geral q_d é superior a q se o período fundamental da estrutura for inferior a T_C

Ter em conta os efeitos da torção devidos à acção sísmica

EN1998-1 – Cálculo dos deslocamentos relativos

(4.4.2.2(2)) ….

Deslocamento relativo entre pisos:

d_r: "*valor de cálculo do deslocamento relativo entre pisos, avaliado como a diferença entre os deslocamentos laterais médios d_s no topo e na base do piso considerado e calculado de acordo com 4.3.4".*

EN1998-1 – Verificações de Segurança

Estado Limite Último

- Resistência $E_d \leq R_d$
- Efeitos de 2ª ordem

Dispensada a verificação se, em **todos os pisos**: $\theta = \frac{P_{tot} \cdot d_r}{V_{tot} \cdot h} \leq 0{,}1$

P_{tot} – Carga gravítica total acima do piso

d_r – Deslocamento relativo entre pisos

V_{tot} – Esforço transverso sísmico total no piso

h – Altura entre pisos

Se $0{,}1 < \theta \leq 0{,}2$ corrigir os esforços da análise de 1ª ordem por $1/(1-\theta)$

Se $0{,}2 < \theta \leq 0{,}3$ realizar análise explícita de 2ª ordem

Não aceite se $\theta > 0{,}3$

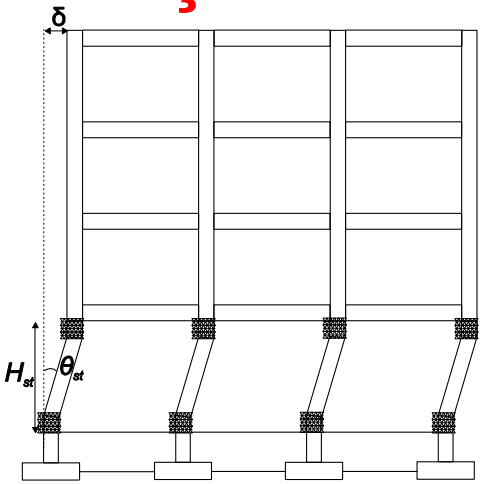
EN1998-1 – Verificações de Segurança

Estado Limite Último (cont.)

- Ductilidade global

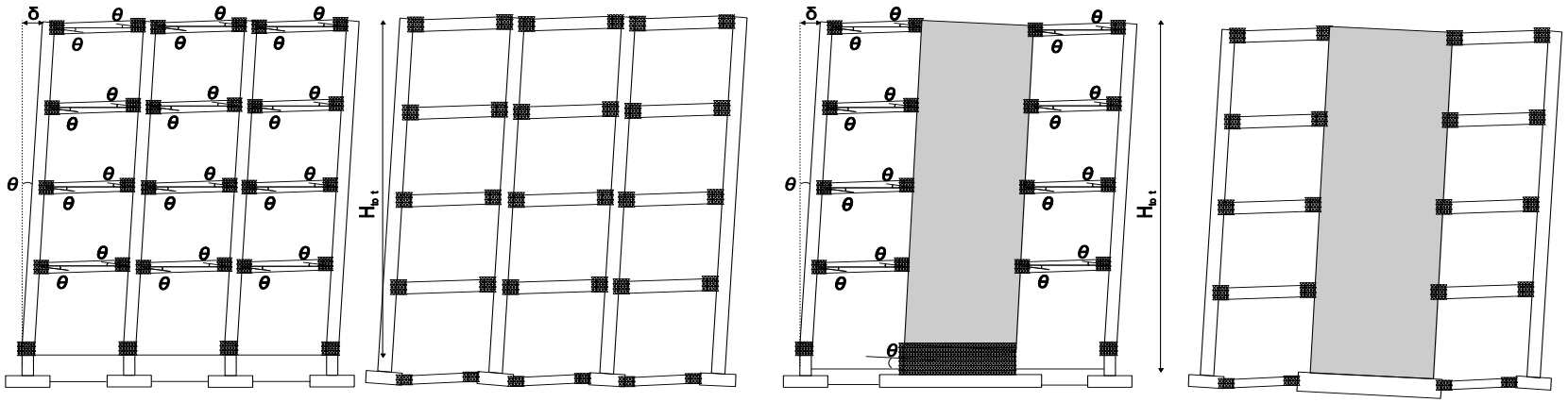
Evitar a formação de mecanismo de piso flexível em estruturas porticadas: $\sum M_{Rc} \geq 1{,}3 \sum M_{Rb}$

(em todos os nós, nas 2 direcções e nos 2 sentidos)



Colapso com piso flexível

Mecanismos estáveis



EN1998-1 – Verificações de Segurança

Estado Limite Último (cont.)

- Ductilidade local

Rótulas plásticas com ductilidade disponível em função de *q*

Cálculo por capacidade real ("*Capacity design*") para evitar roturas frágeis (regras dependentes das Classes de Ductilidade)

- Equilíbrio
- Resistência de **diafragmas** horizontais
- Resistência das **fundações**

$$E_{Fd} = E_{F,G} + \gamma_{Rd} \Omega E_{F,E}$$

$E_{F;G}$ – Efeitos das acções não sísmicas

γ_{Rd} – Coeficiente de sobre-resistência (=1,2 para $q > 3$)

$E_{F;E}$ – Efeitos da acção sísmica resultante da análise

Ω – $R_{di} / E_{di} \leq q$ (para o elemento i com maior influência em E_F)

- **Junta sísmica**

EN1998-1 – Verificações de Segurança

Limitação de danos

- Limitação de deslocamentos relativos entre pisos

Elementos não estruturais frágeis fixos: $d_r \nu \leq 0{,}005 \cdot h$

Elementos não estruturais dúcteis: $d_r \nu \leq 0{,}0075 \cdot h$

Elementos não estruturais fixos sem interferência

ou sem elementos não estruturais: $d_r \nu \leq 0{,}010 \cdot h$

d_r – Deslocamento relativo entre pisos

h – Altura entre pisos

ν – Coeficiente correctivo do período de retorno

Acção sísmica	ν *(NP EN1998-1)*
Tipo 1	0,40
Tipo 2	0,55

Designers' Guide to EN1998-1 and EN1998-5
Eurocode 8: Design of Structures for earthquake resistance. General rules, seismic actions, design rules for buildings, foundations and retaining structures

Fardis et al

Thomas Telford Publishing, 2005

Muito obrigado