



INSTITUTO
SUPERIOR
TÉCNICO

DECivil

MODELOS ESTRUTURAIS COMPLEXOS

Modelação, Avaliação e Reforço Sísmico de Edifícios Pombalinos.
Referência à regulamentação existente

Rita BENTO e Mário LOPES

IST, Lisboa, Fevereiro 2008



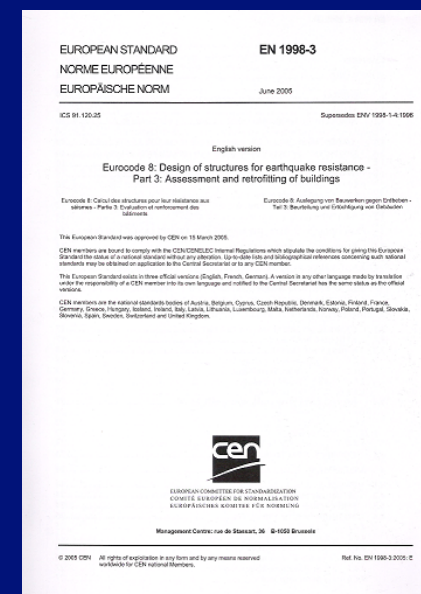
INSTITUTO
SUPERIOR
TÉCNICO

DECivil

Regulamentação existente

MODELOS ESTRUTURAIS COMPLEXOS
FUNDEC – Reabilitação de Estruturas Antigas tendo em conta a Acção Sísmica

- Legislação existente omissa quanto à obrigatoriedade do reforço sísmico em edifícios existentes;
- Regulamentos sísmicos estão vocacionados para novas construções;
- Encontra-se em fase de adopção o novo EC8 e da parte 3, que se reporta a edifícios existentes.



INSTITUTO
SUPERIOR
TÉCNICO

DECivil

Regulamento Italiano. Regulamento de transição até à aplicação do EC8;

Documentos nos EUA. Várias entidades a produzir documentação. Plano de mitigação de risco sísmico existe desde 1970.

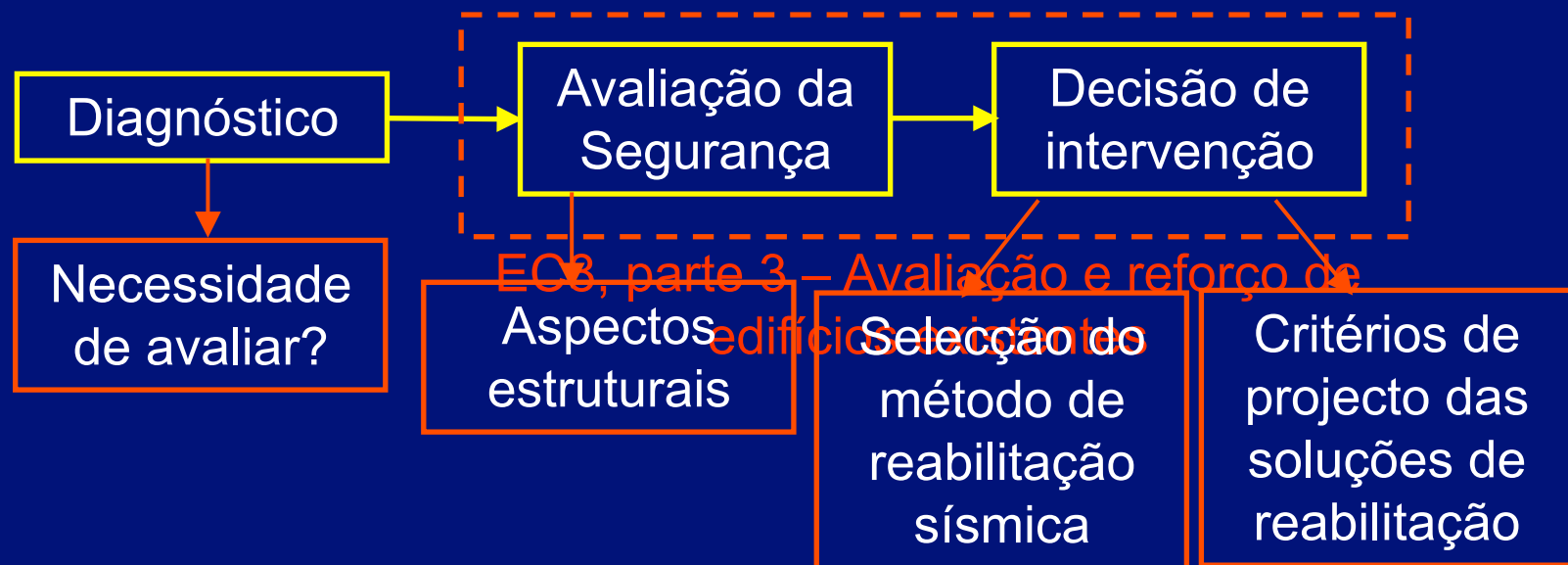


Eurocódigo 8 – Parte 3

INSTITUTO
SUPERIOR
TÉCNICO

DECivil

Etapas de estudo para um edifício existente,



É composto por um corpo de aplicação geral complementado com os anexos referentes a diferentes tipos de estruturas.

Anexo A – estruturas de betão armado

Anexo B – estruturas de aço

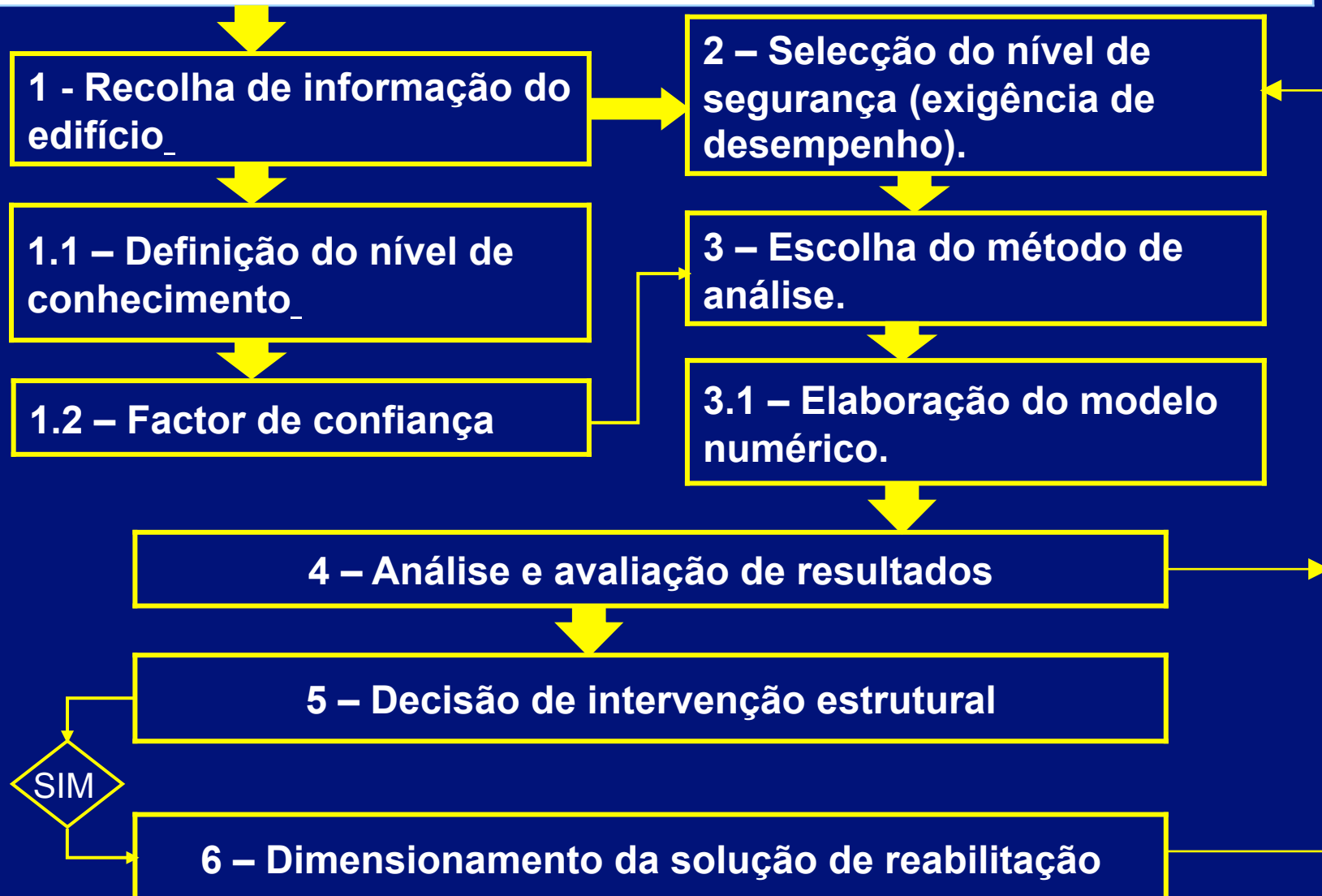
Anexo C – estruturas de alvenaria

Eurocódigo 8 – Parte 3

INSTITUTO
SUPERIOR
TÉCNICO

DECivil

Metodologia para avaliação e reabilitação sísmica de um edifício existente



Eurocódigo 8 – Parte 3

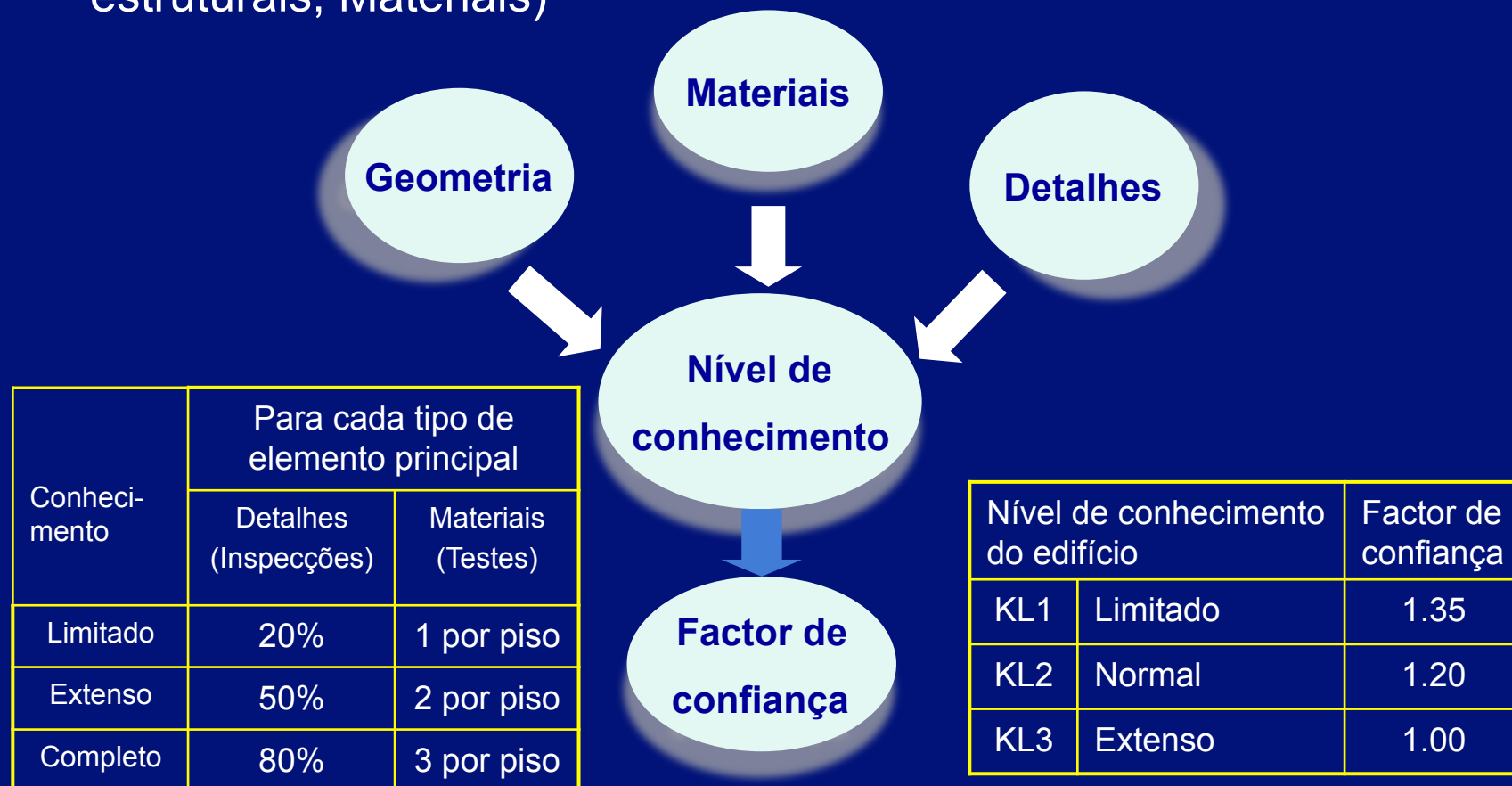


INSTITUTO
SUPERIOR
TÉCNICO

DECivil

1 - Recolha de informação do edifício

- Informações de carácter geral e história do edifício
- Dados dos edifício (Geometria, Detalhes construtivos e estruturais, Materiais)



Eurocódigo 8 – Parte 3



INSTITUTO
SUPERIOR
TÉCNICO

DECivil

Nível de conhecimento	Geometria	Detalhes	Materiais
KL1 - Limitado	<i>Full survey</i> (exame total) Ou Desenhos originais de construção com exame visual	Inspeções limitadas <i>in situ</i> <u>ou</u> Detalhes similares na época de construção	Testes limitados <i>in situ</i> <u>ou</u> Valores usuais na época da constr.
KL2 - Normal		Inspeções extensas <i>in situ</i> <u>ou</u> Desenhos de constr. Incompletos + insp. limitadas	Testes extensos <i>in situ</i> <u>ou</u> Especificações do cálculo inicial + testes limitados
KL3 - Extenso		Inspeções completas <i>in situ</i> <u>ou</u> Desenhos de constr. Detalhados + insp. limitadas	Testes completos <i>in situ</i> <u>ou</u> Relatório de testes originais + testes limitados

Eurocódigo 8 – Parte 3



INSTITUTO
SUPERIOR
TÉCNICO

DECivil

2- Selecção do nível de segurança

A selecção do nível de segurança está relacionado com a definição da exigência de desempenho, que corresponde ao nível de danos máximo que se pretende que a estrutura apresente quando sujeita a um determinado nível de acção sísmica.

O nível de danos é garantido com a verificação de determinados estados limites.

Estados Limite	Descrição	Acção sísmica
Estado Limite de Colapso Eminente (<i>Near collapse</i>)	Danos próximos do colapso. Exploração completa da capacidade de deformação dos elementos estruturais.	<u>2475 anos</u> , 2% de prob. de exceder em 50 anos
Estado Limite de Danos severos (<i>Significant Damage</i>)	Danos significativos. A estrutura ainda pode suportar acções sísmicas de intensidade moderada.	<u>475 anos</u> , 10% de prob. de exceder em 50 anos
Estado Limite de Danos Limitados (<i>Damage Limitation</i>)	Danos ligeiros. Elem. estrut. mantêm capacidades resistentes. A estrutura não necessita de reparação.	<u>225 anos</u> , 20% de prob. de exceder em 50 anos



3 - Escolha do método de análise

Métodos Lineares

Análise estática linear (**Forças laterais**);

Análise dinâmica linear - modal por espectro
resposta elástico;

Métodos Não lineares

Análise estática não linear (**Pushover**);

Análise dinâmica não linear (**Time history**);

Recurso ao coeficiente de comportamento (***q-factor approach***) com análises
lineares (espectro de resposta reduzido).

Linear vs. Não linear ?

Estática vs. Dinâmica?

Eurocódigo 8 – Parte 3



INSTITUTO
SUPERIOR
TÉCNICO

DECivil

Método de análise	Modelação da acção sísmica	Condições de aplicabilidade
Análise estática linear (Forças laterais)	Espectro de resposta elástico $S_e(T)$, definido no EC8 – parte 1, secção 3.2.2.2.	i. Critérios dados pelo EC8 – parte 1 relativamente às análises lineares (4.3.3.2 para forças laterais ou 4.3.3.3 para análise modal)
Análise modal por espectro resposta		ii. $\rho_{max}/\rho_{min} < 2,5$ em que ρ_{max} e ρ_{min} são os valores máximos e mínimos de $\rho_i = D_i/C_i$, para todos os elementos dúcteis em que $\rho_i > 1$. iii. Capacidade > Efeitos, em todos os elementos frágeis.
Análise estática não linear (Pushover)	Espectro de resposta elástico $S_e(T)$, definido no EC8-parte 1, 3.2.2.2.	i. Caso não se verifiquem os critérios para a utilização das análises elásticas.
Análise dinâmica não linear (Time history)	Acelerogramas.	ii. Critérios dados pelo EC8 – parte 1 relativamente às análises não lineares.
q-factor approach	Espectro de resposta de projecto $S_d(T)$, para análise elástica, de acordo com EC8 - parte 1, 3.2.2.5.	Critérios dados pelo EC8 - parte 1 relativamente às análises lineares (4.3.3.2 para forças laterais ou 4.3.3.3 para análise modal)

Prática corrente  Métodos Lineares

+ simples

+ rápidos

+ conhecidos

- Capacidade computacional

Eurocódigo 8 – Parte 3

INSTITUTO
SUPERIOR
TÉCNICO

DECivil

Aplicabilidade de métodos lineares

No geral:

- Critérios de regularidade em planta e altura (EC8, parte1);
- Condições complementares indicadas no quadro anterior.

Em particular para edifícios de alvenaria:

- **Pisos a funcionarem como diafragmas** (não se verifica para a grande maioria dos edifícios existentes de alvenaria);
- Pisos em faces opostas de uma parede comum encontram-se à mesma cota;
- Em cada piso, o coeficiente entre a rigidez lateral da parede principal mais rígida e a parede principal mais fraca não excede 2,5.

Eurocódigo 8 – Parte 3



INSTITUTO
SUPERIOR
TÉCNICO

DECivil

3.1 – Elaboração do modelo numérico

- Simular características e comportamento estrutural real;
- Nível de conhecimento - para KL1 – Modelo Linear;
- Regularidade em planta – possível modelos planos;
- Efeitos de torção;
- Elementos Secundários;
- Valores médios para as propriedades dos materiais;
- Paredes de alvenaria – considerar $\frac{1}{2}$ rigidez elástica

Eurocódigo 8 – Parte 3

INSTITUTO
SUPERIOR
TÉCNICO

DECivil

Análise de resultados

4 - Análise e avaliação de resultados

- Resultados obtidos da análise efectuada ao modelo numérico;
- Redistribuição de esforços quando possível e necessário;
- Ajustes nos resultados dependendo do estado Limite a verificar.

Verificações de segurança

Exigências < Capacidades

Estrutura
no Global

- Controle de deslocamentos globais;
- Controle de corte na base.

Elementos
Particulares

- Controlo de rotações e deslocamentos relativos;
- Controlo de tensões.

Eurocódigo 8 – Parte 3



INSTITUTO
SUPERIOR
TÉCNICO

DECivil

Verificação da segurança em edifícios de alvenaria existentes

Estado Limite	Verificações necessárias	Critérios	
		Exigências < Capacidades	
		Exigências	Capacidade resistente
De Colapso Eminente	Estrutura global	Deslocamento no topo do edif.	Deslocamento último (1)
	Em paredes de alvenaria caso $V_{EM} < V_{EV}$	Deslocamentos nas paredes	$Drift = 4/3 \times 0,008H_0/D$ (elem. primários) (2)
	Em paredes de alvenaria caso $V_{EM} > V_{EV}$		$Drift = 4/3 \times 0,012H_0/D$ (elem. secundários)
De Danos Severos	Estrutura global	Deslocamento no topo do edif.	$Drift = 4/3 \times 0,004$ (elem. primários)
	Em paredes de alvenaria caso $V_{EM} < V_{EV}$	Deslocamentos nas paredes	$Drift = 4/3 \times 0,006$ (elem. secundários)
	Em paredes de alvenaria caso $V_{EM} > V_{EV}$		3/4 deslocamento último
De Danos Limitados	Estrutura global	<u>Análise linear</u>	
		Esforços de corte na base	Resistência ao corte na base (total)
		<u>Análise não linear</u>	
	Em paredes de alvenaria caso $V_{EM} < V_{EV}$	Deslocamento no topo do edif.	Deslocamento de cedência (3)
		Deslocamentos nas paredes	$Drift = 0,008H_0/D$ (elem. primários)
			$Drift = 0,012H_0/D$ (elem. secundários)
	Em paredes de alvenaria caso $V_{EM} > V_{EV}$		$Drift = 0,004$ (elem. primários)
			$Drift = 0,006$ (elem. secundários)

Eurocódigo 8 – Parte 3



INSTITUTO
SUPERIOR
TÉCNICO

DECivil

5 - Decisão de intervenção estrutural

Influenciada por:

- ✖ Tipo e nível de danos iniciais apresentado pela estrutura;
- ✖ Resultado da avaliação sísmica efectuada;
- ✖ Relação Custo-Benefício da intervenção em termos económicos, sociais, tempo de interrupção de utilização durante intervenção.

Critérios técnicos para a escolha:

- ✖ Corrigir os maiores problemas (danos);
- ✖ Melhorar a regularidade em planta e altura;
- ✖ Aumentar a Ductilidade local ou global;
- ✖ Aumentar a resistência local ou global, sem diminuir a ductilidade global.

Eurocódigo 8 – Parte 3

INSTITUTO
SUPERIOR
TÉCNICO

DECivil

6 - Dimensionamento da solução de reabilitação

Deve incluir os seguintes passos:

1. Concepção → Da solução de reparação e/ou reforço
2. Análise → Com execução de modelo numérico e escolha de método de análise
3. Verificações → Da segurança para a estrutura no Global e para os Elementos isolados

No Anexo C do EC8 é apresentada uma listagem de soluções de reforço com uma abordagem qualitativa. Permite uma visão alargada das diversas técnicas de intervenção. Esta listagem pode ser vista como uma base de trabalho não invalidando outras soluções, que melhor se adequam ao caso de estudo. De facto novas soluções são continuamente estudadas e aplicadas ao longo dos anos.

Eurocódigo 8 – Parte 3



INSTITUTO
SUPERIOR
TÉCNICO

DECivil

Comentários:

Nível de conhecimento KL1 $\Rightarrow$ Só Análises Lineares

Pavimentos de madeira $\Rightarrow$ Piso flexível $\Rightarrow$ Só Análises não lineares

Edifícios antigos com pavimentos de madeira

Obrigatoriamente Análises não Lineares

Nível de conhecimento KL2 ou KL3

Maior nº de testes *in situ*

Mais caro
Maiores danos
impostos

Regulamento Italiano



INSTITUTO
SUPERIOR
TÉCNICO

DECivil

OPCM 3274 de Maio de 2003 - “Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sísmica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sísmica”

OPCM 3431 de Maio de 2005 - “Ulteriori modifiche ed integrazioni all'Ordinanza n.3274 del 20/3/2003”.

Novo Regulamento Sísmico, documento de transição até a aplicação final do EC8 em Itália.

Baseado no EC8, remete para o capítulo 11 a avaliação e reforço de edifícios existentes.

Apresenta um anexo com elementos de cálculo complementares.

Regulamento Italiano

INSTITUTO
SUPERIOR
TÉCNICO

DECivil

Alteração na necessidade de avaliar e na definição da acção sísmica

1) Ao contrário do EC8, define as condições que implicam a obrigatoriedade de aplicar o código:

- ☐ Aumento do edifício em altura ou em planta;
- ☐ Alteração do tipo de utilização do edifício, decorrente da intervenção, que envolva o aumento das cargas iniciais (permanentes e variáveis);
- ☐ A execução de intervenções estruturais com vista a transformar o edifício noutra diferente do original;
- ☐ A execução de intervenções estruturais que envolvam alterações substanciais no comportamento global do edifício (renovações, substituições de partes estruturais, etc.).

2) Para intervenções de reabilitação e de reforço que reduzam a vulnerabilidade, a acção sísmica pode ser reduzida até 65% da acção usada para estruturas novas.

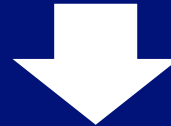
Regulamento Italiano

INSTITUTO
SUPERIOR
TÉCNICO

DECivil

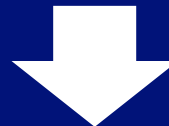
Alteração na recolha de informação e níveis de conhecimento

- ~~Testes Limitados *in situ*~~  Levantamento Limitado *in situ*
- Características mecânicas dos materiais



Tabelas

- Dados experimentais de outros edifícios



Correspondência entre materiais
e detalhes do edifício em estudo

Regulamento Italiano

INSTITUTO
SUPERIOR
TÉCNICO

DECivil

Alteração no coeficiente de comportamento

EC8, parte 1

Edifícios de alvenaria não reforçada ;

regular em elevação $q = 2,0$ $\alpha_u/\alpha_1 = 2,8$ → 1,5 a 2,5não regular em elevação $q = 1,5$ $\alpha_u/\alpha_1 = 2,7$ → 1,5 a 2,0

Em que α_u/α_1 é o OSR (coeficiente de sobrerresistência), para o qual são sugeridos os seguintes valores:

- Edif de alvenaria não reforçada de um piso $\alpha_u/\alpha_1 = 1,4$
- Edif de alvenaria não reforçada de dois ou mais pisos $\alpha_u/\alpha_1 = 1,8$

EC8, parte 3 não dá indicação do valor de q a considerar para edifícios de alvenarias.

EC8, parte 1 não dá valores de α_u/α_1 para edifícios de alvenaria

Regulamento Italiano

INSTITUTO
SUPERIOR
TÉCNICO

DECivil

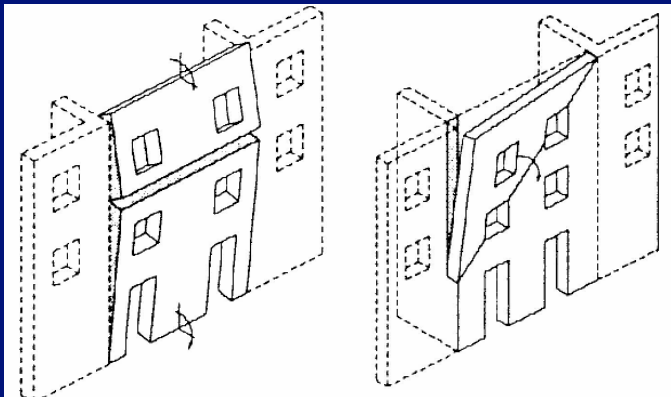
Alteração na verificação da segurança

Considera somente dois Estados Limite:

- Estado Limite Último = Estado Limite de Danos Severos (EC8, parte 3)
- Estado Limite de Danos = Estado Limite de Danos Limitados

A avaliação da segurança é feita separadamente para acções no plano e fora do plano. **No plano**, tal como no EC8, considera 2 tipos de mecanismos de rotura: ao corte e à flexão

Fora do plano, considera a formação de um mecanismo de colapso local:



Verificação do primeiro modo de colapso – mecanismo local de rotura para fora do plano (anexo 11C);

Documentos Americanos



INSTITUTO
SUPERIOR
TÉCNICO

DECivil

Standard ASCE/SEI 31-03, Seismic Evaluation of Existing Building

que apresenta critérios e procedimentos para a avaliação sísmica de estruturas existentes,

Standard ASCE/SEI 41-06, Seismic Rehabilitation of Existing Buildings para a reabilitação dos edifícios existentes à acção sísmica,

Documento **FEMA 547, Techniques for the Seismic Rehabilitation of Existing Buildings** que apresenta uma compilação de técnicas de reabilitação sísmica incluindo pormenores, detalhes e indicações práticas bem como indicações sobre as técnicas adequadas para mitigar tipos específicos de anomalias em vários tipos de estruturas.

Documentos Americanos

INSTITUTO
SUPERIOR
TÉCNICO

DECivil

Documentos **FEMA 395 a 399 Incremental Seismic Rehabilitation of (...) buildings**, fornecem a informação necessária para a avaliação da vulnerabilidade sísmica de cada tipo de edifício e implementar um programa de reabilitação sísmica incremental para esses edifícios (escolas, hospitais, de escritórios, apartamentos para habitação, de comércio).

Documento **FEMA 420, The Engineering Guideline for Incremental Seismic Rehabilitation**, sugere uma metodologia de reabilitação e reforço incremental de edifícios como alternativa à execução do reforço numa só fase.

Documentos Americanos

INSTITUTO
SUPERIOR
TÉCNICO

DECivil

Seguem uma filosofia baseada no desempenho da estrutura.

Apresentam os conceitos:

Objectivo de Reabilitação = Desempenho do edifício

+

Acção sísmica

Desempenho do edifício ou estado de danos que depende de:

- a) segurança dos ocupantes do edifício durante e após o sismo;
- b) custo e exequibilidade de repor o edifício nas condições existentes antes do sismo;
- c) o período de tempo durante o qual o edifício se encontra fora de serviço para efeitos de reabilitação e
- d) efeitos na comunidade em termos económicos, arquitectónicos ou históricos

Relações Custo-Benefício que podem ser a base de um programa de mitigação de risco sísmico.

Comentários Finais



INSTITUTO
SUPERIOR
TÉCNICO

DECivil

- Adopção do EC8 – ANEXOS NACIONAIS;
- Metodologia do EC8 com alguns problemas. Devem ser resolvidos na elaboração dos Anexos Nacionais;
- Aprender com a evolução do Regulamento Italiano;
- Introduzir alguns conceitos dos Documentos Americanos (e.g. relações C-B, essenciais para a definição de um programa de mitigação de risco sísmico nacional);
- Adequar EC8 à realidade Nacional, tendo em conta as tipologias construtivas;
- Focar a Questão do efeito do Quarteirão e dos edifícios Mistos.



INSTITUTO
SUPERIOR
TÉCNICO

DECivil

MODELOS ESTRUTURAIS COMPLEXOS

Modelação, Avaliação e Reforço Sísmico de Edifícios Pombalinos.
Referência à regulamentação existente

Rita BENTO e Mário LOPES

IST, Lisboa, Fevereiro 2008