

A situação dos monumentos portugueses face ao risco sísmico e a sua estabilidade estrutural

Paulo B. Lourenço

pbl@civil.uminho.pt
www.civil.uminho.pt/masonry



Noções básicas de gestão do risco e património cultural

isise



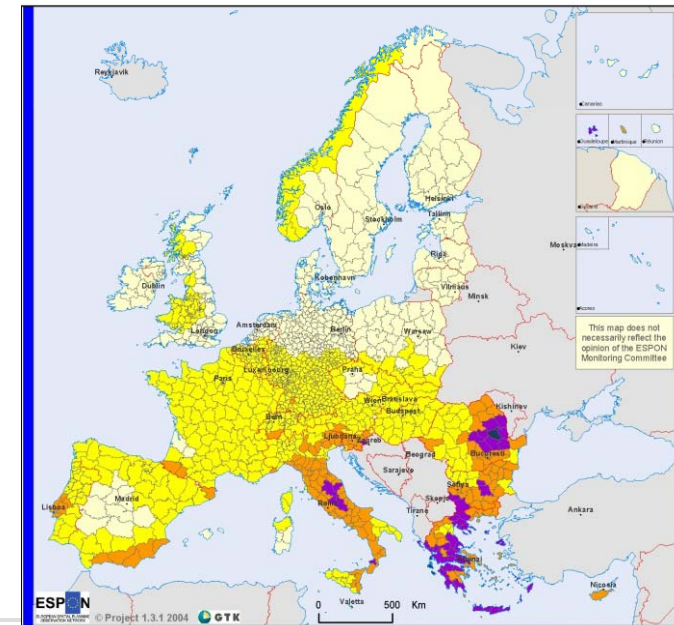
Conceitos básicos (I)

- ❑ **Desastre:** Um evento **natural** ou **provocado pelo homem** que causa importantes danos físicos ou destruição, perda de vidas humanas ou alterações drásticas no ambiente natural, e.g. sismos, cheias, deslizamentos, fogos, explosões...
- ❑ **Perigosidade:** Uma situação que coloca algum nível de ameaça à vida, saúde, propriedade ou ambiente, e que pode provocar um desastre
- ❑ Um mapa de perigosidade não pode ser relacionado com um mapa de desastres
- ❑ Os desastres são a consequência de uma gestão de risco inadequada



Conceitos básicos (II)

- ❑ **Vulnerabilidade:** medida da extensão do dano ou perturbação numa comunidade, estrutura, serviço e/ou área geográfica, em função da sua natureza e da proximidade do perigo
- ❑ **Risco:** medida das perdas esperadas no caso de um evento de uma dada magnitude, que ocorre em determinada área durante um período de tempo específico. Depende de: Perigosidade; Vulnerabilidade; Valor Económico



Earthquake hazard potential

Potential classification

- Very low hazard
- Low hazard
- Moderate hazard
- High hazard
- Very high hazard
- Non ESPON space

Origin of the data: © EuroGeographics Association for the administrative boundaries
Pga data © Global Seismic Hazard Assessment Program
Source: ESPON Data Base

The hazard classification is based on the average value of the peak ground acceleration (pga)/acceleration of gravity (%) in a NUTS 3 area.

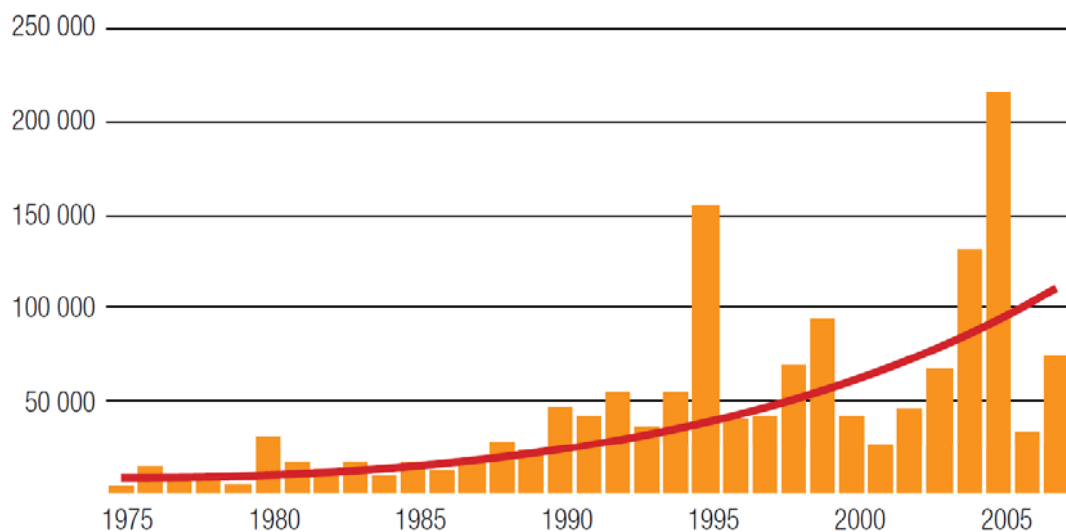
Gestão do risco

- ❑ Identificação, caracterização e avaliação das ameaças
- ❑ Avaliação da vulnerabilidade de ativos críticos em relação a ameaças específicas
- ❑ Determinação do risco (i.e. as consequências esperadas de um tipo de ataque em ativos específicos)
- ❑ Identificação de medidas para reduzir estes riscos
- ❑ Priorização das medidas de redução do risco em função de uma estratégia
- ❑ *Numa gestão de risco ideal, a definição de prioridades adotada é tal que os riscos com maiores perdas e a máxima probabilidade de ocorrência são tratados em primeiro lugar, seguindo depois uma ordem descendente. Na prática, o processo pode ser difícil, quando se comparam riscos com elevada probabilidade de ocorrência e perdas pequenas com um risco de perdas elevadas e baixa probabilidade de ocorrência*

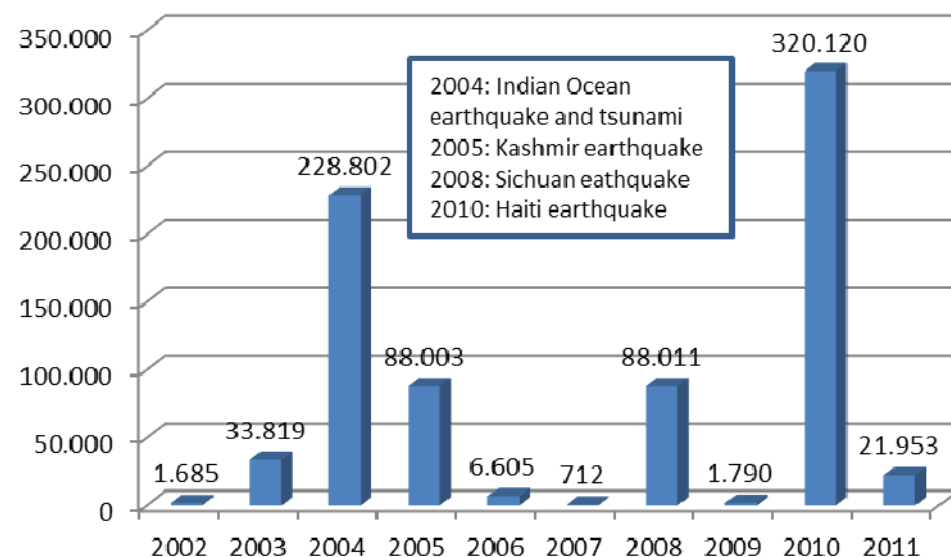
Gestão do risco, técnicos e a sociedade

- Perceção e comunicação
- Avaliação e diagnóstico
- Soluções, custos e implementação

Million current US\$



Últimos 30 anos: custos aumentaram 10x



Última década: 80.000 mortos/ano

- Como resolver a indeterminação matemática de consequências impressionantes e probabilidades ínfimas?***

Gestão do risco de desastres para o património cultural

- ❑ O património cultural dificilmente tem valor quantificável, pelo que a avaliação do risco não se pode aplicar
- ❑ O património cultural perdido não pode ser recuperado por medidas pós-desastre

- ❑ Como reduzir e mitigar o risco?
 - Os estudos realizados mostram que o investimento na mitigação permite poupar o quádruplo do valor investido
 - Uma análise de risco multivariada deve definir as prioridades
 - O investimento é grande pelo que é necessário considerar um período alargado de investimento
 - A mitigação deve ser considerada numa perspetiva abrangente, transversal à comunidade e numa perspetiva de longo prazo, conduzindo a comunidades fisicamente, socialmente e economicamente resilientes

- ❑ É necessário estar preparado para danos severos e recuperação pós-evento (perdas humanas, económicas e culturais)

Sismos

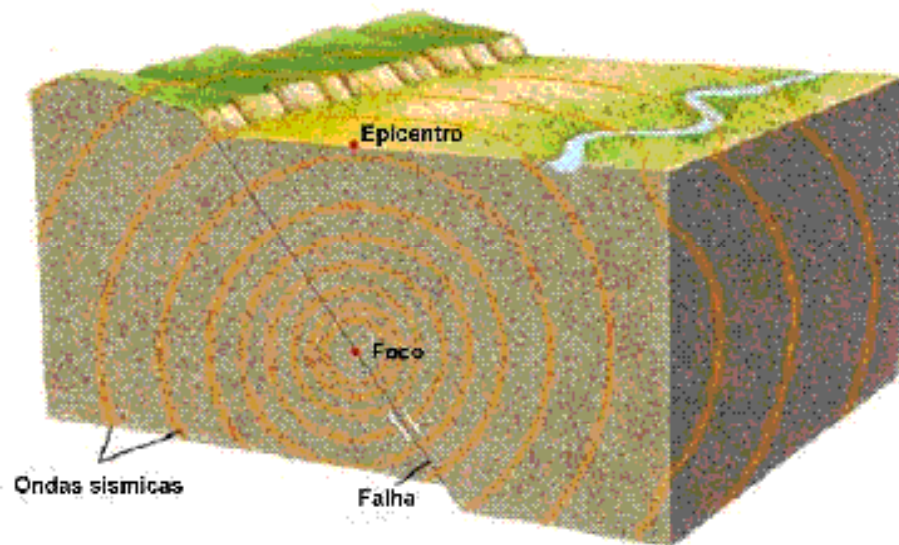
isise



Universidade do Minho

O que é um sismo?

- ❑ Um sismo é o resultado de uma libertação rápida de energia na crosta terrestre que cria ondas sísmicas
- ❑ As ondas resultam em abanões ou movimentos rápidos do terreno, que podem conduzir à perda de vidas e à destruição da propriedade



Sismo de 1755 em Lisboa: tsunami de 10 m de altura, incêndio que durou 5 dias, 85% dos edifícios destruídos, até 90.000 mortos = 30% da população, Iluminismo – Kant / Voltaire)

O problema sísmico (I)

- ❑ Os desastres são a consequência de uma gestão do risco inadequada
- ❑ A investimento na prevenção conduz a ganhos de 4x o valor investido
- ❑ Os sismos dificilmente são responsáveis pela morte de pessoas, sendo o colapso dos edifícios a principal causa das mortes
- ❑ Os cenários de um grande sismo em Portugal (do tipo de 1755 em Lisboa) preveem cerca de 10.000 mortos e uma perda de 100 a 200% do PIB



Igreja do Carmo, Lisboa



Igreja de Santa Maria, Beja

O problema sísmico (II)



1755, Lisboa



2009 e 2012, Itália

2011, Espanha



O aceitável

SISMO KOBE, 1995

A intensidade do sismo ultrapassou os valores de projeto em mais de 50%:

Evento Extremo

O dano neste pilar de ponte é aceitável (ainda que indesejado)



O inaceitável



O dano neste pilar de ponte é inaceitável

O aceitável

- ❑ Pior cenário possível: Viga embebida + Juntas verticais não preenchidas
- ❑ Dano ligeiro até 100% do sismo de projeto em Lisboa
- ❑ Rotura dúctil com 250% do registo sísmico de projeto em Lisboa



O inaceitável e o aceitável



- ❑ O património existente possui usualmente vulnerabilidade elevada: (a) materiais frágeis; (b) construção pesada; (c) ligações deficientes.
- ❑ Uma medida simples e económica pode melhorar francamente a situação



Shaking table tests
of ancient
masonry buildings

Strengthened Specimen
PGA = 1.5 Code



Universidade do Minho

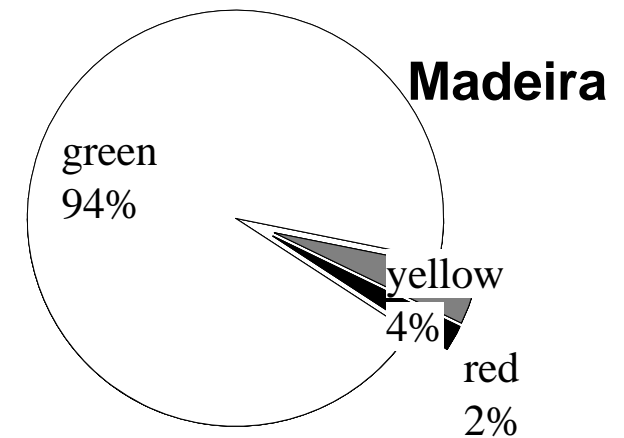
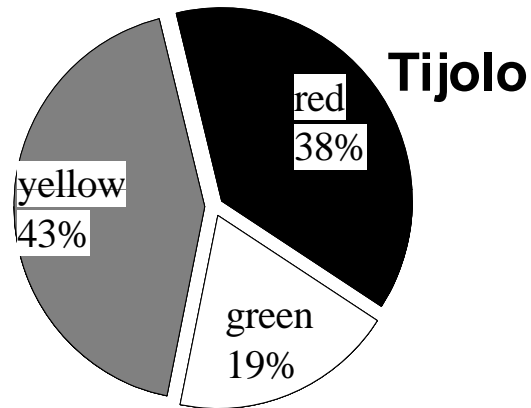
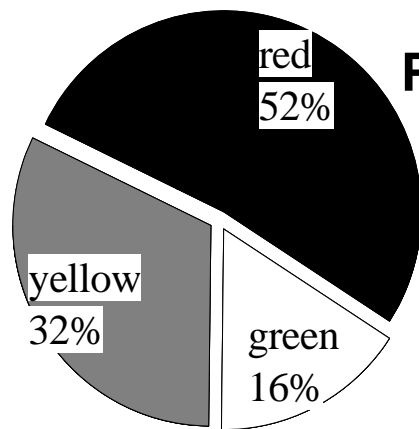
FCT
Fundação para a Ciência e a Tecnologia



BEL
Engenharia e Reabilitação de Estruturas, S.A.

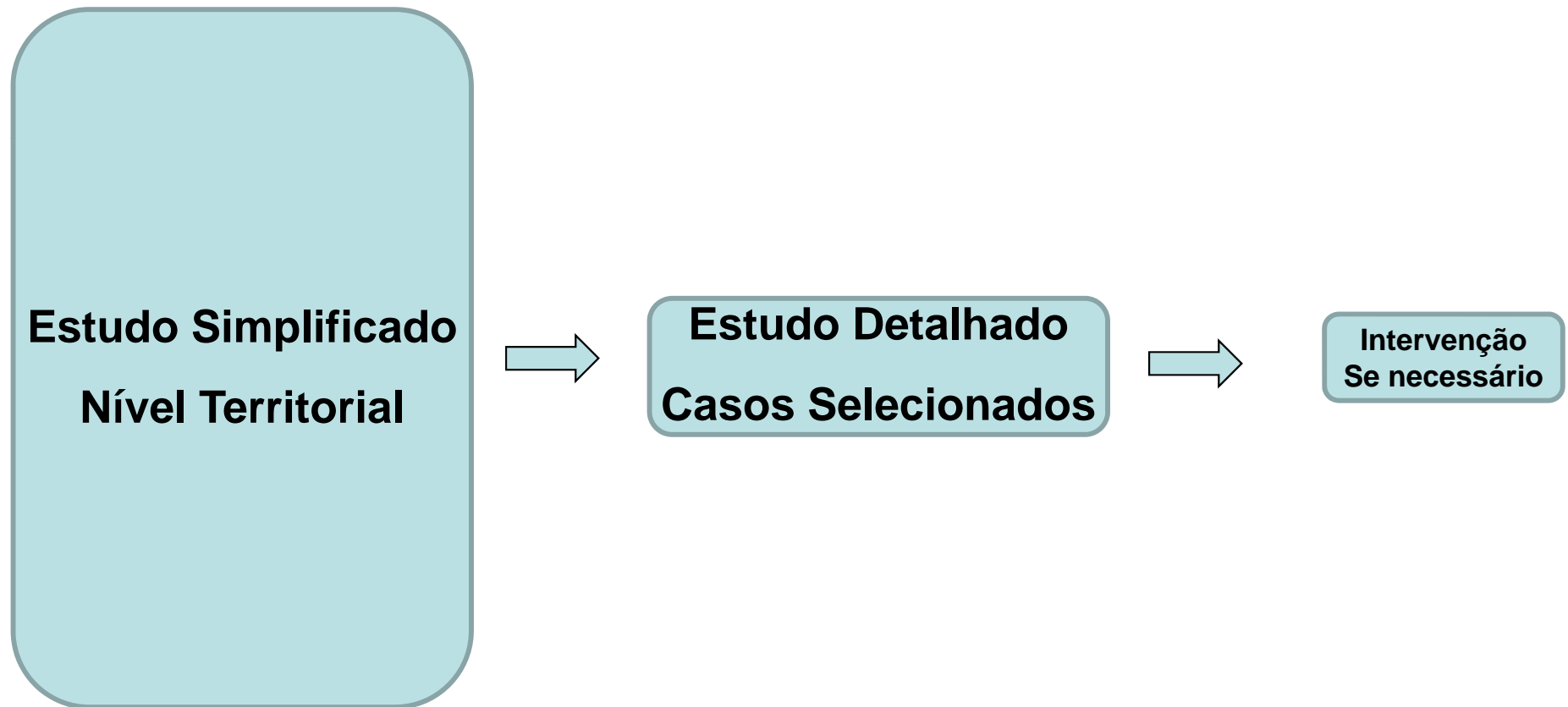
Exemplos de igrejas na Nova Zelândia (Sismos 2010-11)

- ❑ Vermelho: edifício inseguro com acesso proibido
- ❑ Amarelo: segurança comprometida com acesso urgente permitido
- ❑ Verde: sem restrições



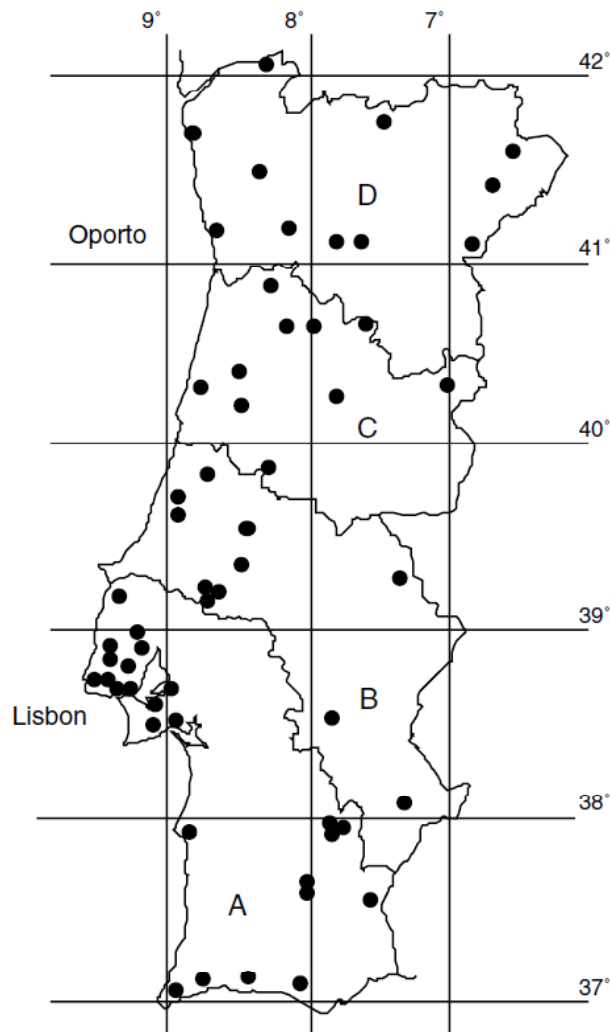
O que fazer?

- Aceitar um número elevado de perdas (30%, 40%?) num sismo de magnitude elevada
- Ou avaliar vulnerabilidade e definir um plano de mitigação do risco sísmico?



Nível Territorial

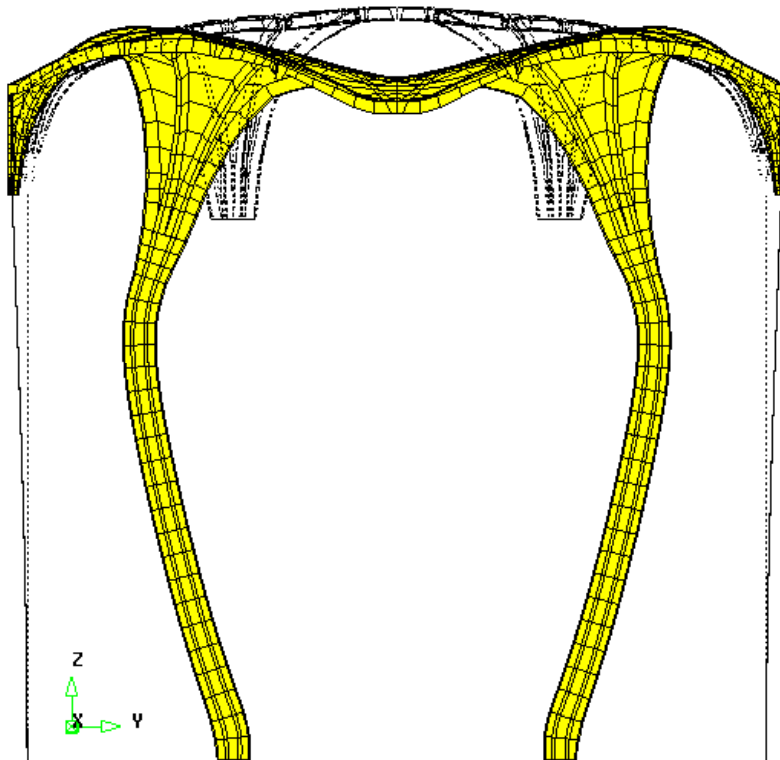
- ❑ 58 igrejas portuguesas
- ❑ 10 precisam de estudo detalhado



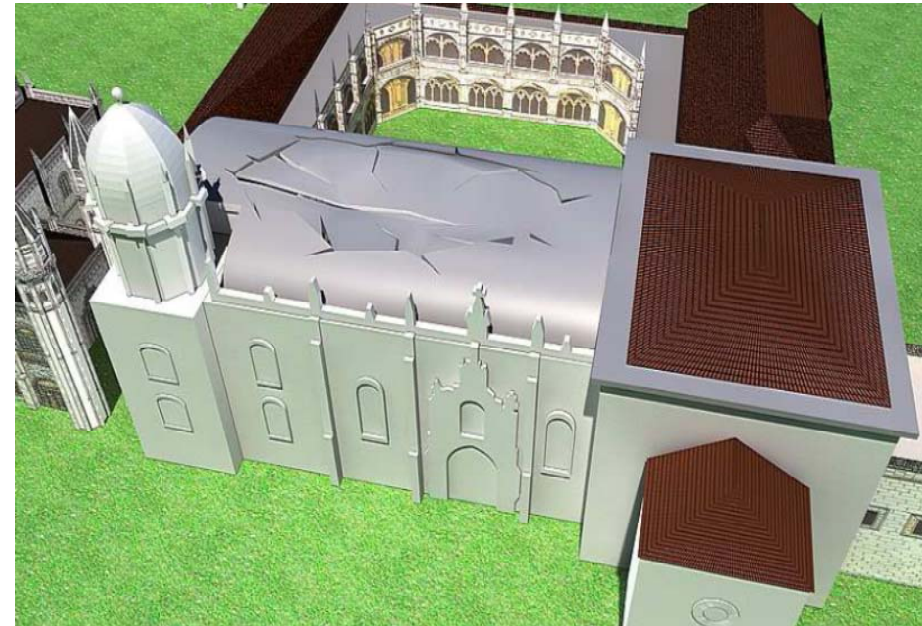
Zone	Designation of church	Location	Index 1		Index 2		Index 3	
			7 _{1x}	7 _{1y}	7 _{2x}	7 _{2y}	7 _{3x}	7 _{3y}
A1	Igreja de Santa Cruz-Almodôvar	Beja	0.14	0.18	3.87	5.07	1.00	1.31
A2	Igreja de Santo Amaro	Beja	0.11	0.17	3.49	5.34	0.93	1.42
A3	Igreja da Misericórdia de Beja	Beja	0.10	0.11	4.02	4.18	1.15	1.20
A4	Igreja da Misericórdia das Entradas	Castro Verde	0.16	0.31	3.32	6.48	0.74	1.44
A5	Igreja Matriz de Mértola	Mértola	0.12	0.14	3.30	3.96	1.00	1.17
A6	Igreja Matriz de Entradas	Castro Verde	0.11	0.24	2.15	4.78	0.76	1.68
A7	Igreja Matriz de Vila do Bispo	V. Bispo	0.15	0.15	4.62	4.69	0.96	0.97
A8	Igreja da Luz – Capela Mor	Lagos	0.12	0.14	3.99	4.83	0.95	1.15
A9	Igreja Matriz de Loulé	Loulé	0.17	0.15	3.59	3.16	1.32	1.16
A10	Sé de Silves	Silves	0.12	0.18	2.02	3.00	0.94	1.40
A11	Igreja Matriz	Alcochete	0.13	0.16	3.97	4.97	0.94	1.17
A12	Igreja do Antigo Mosteiro de Jesus	Setúbal	0.11	0.24	1.43	3.02	0.67	1.42
A13	Igreja Matriz S. Salvador	Sines	0.12	0.15	2.78	3.68	0.92	1.22
A14	Igreja de S. Lourenço	V.N. Azéitão	0.09	0.17	2.85	5.59	0.79	1.55
A15	Igreja de Nossa Senhora da Graça	Barreiro	0.10	0.14	3.98	5.43	0.92	1.26
A16	Igreja de São Quintino	Sobral	0.11	0.16	2.65	3.98	0.86	1.29
A17	Igreja da Cheleiros	Maфра	0.16	0.14	4.26	3.90	0.95	0.87
A18	Igreja de Santa Maria	Sintra	0.12	0.19	3.06	4.74	1.00	1.52
A19	Igreja de Santo André	Maфра	0.13	0.19	3.67	5.38	1.00	1.46
A20	Igreja Matriz da Lourinhã	Lourinhã	0.11	0.19	3.11	5.48	0.89	1.57
A21	Igreja Matriz de Loures	Loures	0.09	0.20	1.45	3.38	0.63	1.47
A22	Igreja Paroquial de S. Cristóvão	Lisboa	0.14	0.17	3.30	4.00	1.27	1.54
A23	Igreja de São Domingos	Lisboa	0.19	0.22	3.84	4.35	1.61	1.83
A24	Igreja da Terrugem	Sintra	0.13	0.17	4.73	6.03	1.04	1.32
A25	Igreja Matriz de Arruda dos Vinhos	A. dos Vinhos	0.12	0.14	3.52	4.05	1.14	1.31
B1	Igreja de Santa Clara	Santarém	0.07	0.12	1.53	2.72	1.08	1.92
B2	Igreja Matriz da Golega	Golega	0.08	0.13	2.34	3.66	1.34	2.10
B3	Igreja Matriz de Aronches	Portalegre	0.09	0.14	2.23	3.37	1.22	1.84
B4	Igreja Matriz da Redinha	Pombal	0.11	0.17	3.18	5.01	1.07	1.68
B5	Igreja Matriz de S. João Baptista	Moura	0.09	0.13	1.86	2.86	1.29	1.99
B6	Igreja de S. Pedro	Leiria	0.06	0.20	1.68	5.26	0.70	2.19
B7	Igreja Matriz da Batalha	Batalha	0.11	0.15	2.96	4.01	1.28	1.74
B8	Igreja de Sta. Maria dos Olivais	Tomar	0.07	0.10	2.75	4.01	1.17	1.71
B9	Igreja da Atalaia	Santarém	0.18	0.21	5.32	6.37	1.88	2.25
B10	Igreja de Santa Cruz	Santarém	0.12	0.14	2.52	2.83	1.30	1.46
B11	Sé de Évora	Évora	0.09	0.15	1.17	1.94	1.09	1.82
C1	Igreja de S. Tiago de Coimbra	Coimbra	0.09	0.19	1.72	3.60	1.17	2.45
C2	Igreja Matriz de Vouzela	Vouzela	0.11	0.21	2.51	4.68	1.43	2.66
C3	Igreja de Nossa Senhora da Fresta	Trancoso	0.11	0.22	2.64	5.55	1.29	2.70
C4	Igreja de São Pedro de Arganil	Arganil	0.08	0.14	4.50	7.69	1.55	2.64
C5	Sé velha	Coimbra	0.15	0.20	1.64	2.07	1.99	2.52
C6	Igreja Matriz da Lourosa	Oliv. Hospital	0.09	0.15	4.17	7.11	1.54	2.63
C7	Igreja da Tocha	Cantanhede	0.10	0.18	1.62	2.87	1.32	2.35
C8	Igreja Par. de Figueiró dos Vinhos	Leiria	0.10	0.11	2.92	3.09	1.99	2.10
C9	Igreja de S. João de Tarouca	Viseu	0.07	0.15	3.40	7.10	1.31	2.75
C10	Igreja da Misericórdia do Sabugal	Guarda	0.10	0.15	3.17	4.81	1.63	2.46
C11	Igreja de S. Miguel de Urro	Arouca	0.10	0.22	2.83	6.03	1.37	2.92
D1	Igreja da Misericórdia	Freixo E. Cinta	0.15	0.11	2.52	1.89	3.63	2.72
D2	Igreja de Algosinho	Mogadouro	0.14	0.21	4.52	6.45	3.02	4.31
D3	Igreja do Tabuado	Marco	0.15	0.17	2.72	3.07	2.55	2.87
D4	Igreja Matriz de Armamar	Armamar	0.13	0.18	2.96	4.18	3.00	4.23
D5	Igreja de N. Sra da Orada	Melgaço	0.12	0.23	2.29	4.53	1.95	3.86
D6	Igreja de S. Miguel do Castelo	Guimarães	0.11	0.24	3.02	6.58	2.20	4.79
D7	Igreja de Almacave	Lamego	0.15	0.18	2.86	3.44	3.13	3.75
D8	Igreja de S. Martinho de Cedofeita	Porto	0.24	0.28	2.77	3.24	3.69	4.32
D9	Igreja de Santo Cristo de Outeiro	Vimioso	0.15	0.17	2.03	2.25	3.64	4.04
D10	Igreja de N. Sra da Azinheira	Chaves	0.10	0.25	2.83	7.25	1.91	4.91
D11	Igreja de S. Fins de Friestas	Viana	0.11	0.24	3.07	6.90	2.84	6.38

Nível Detalhado

- ❑ Igreja de Santa Maria de Belém
- ❑ Parece ter um nível de risco aceitável



**Estudo de uma
secção da nave**



Estudo completo

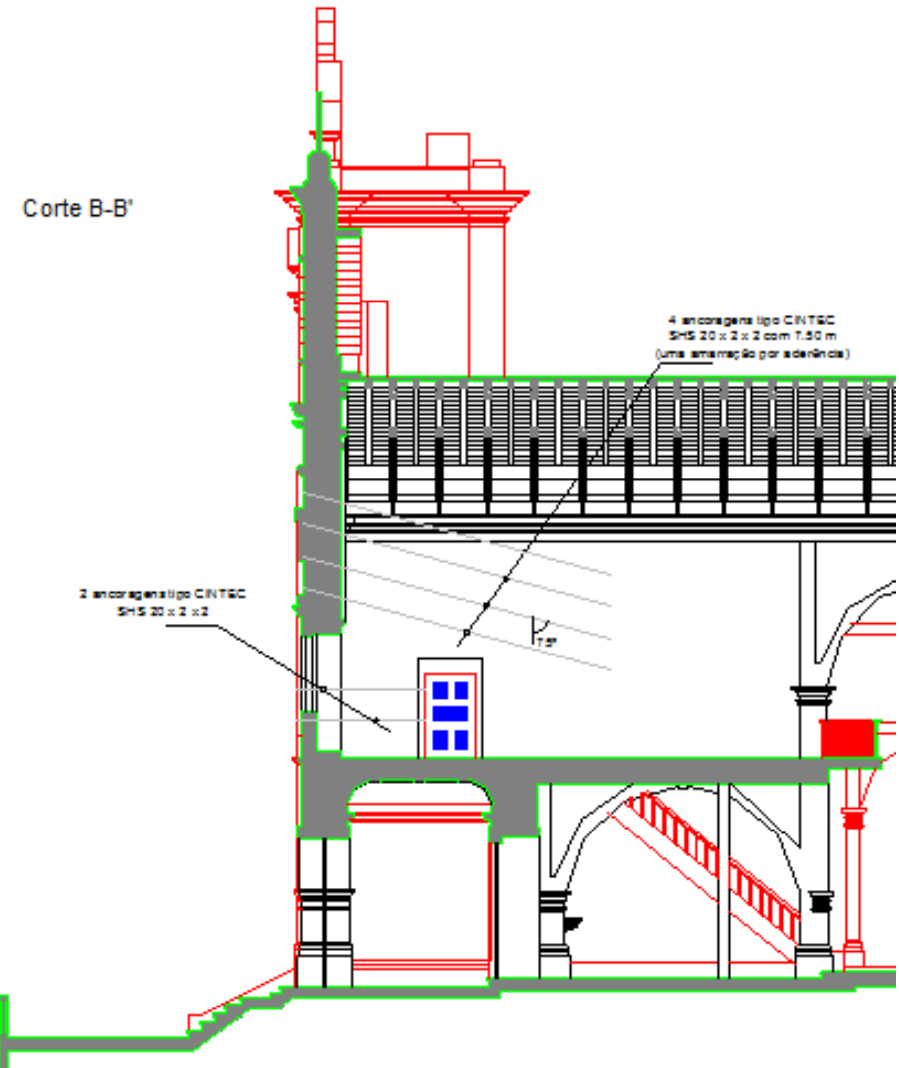
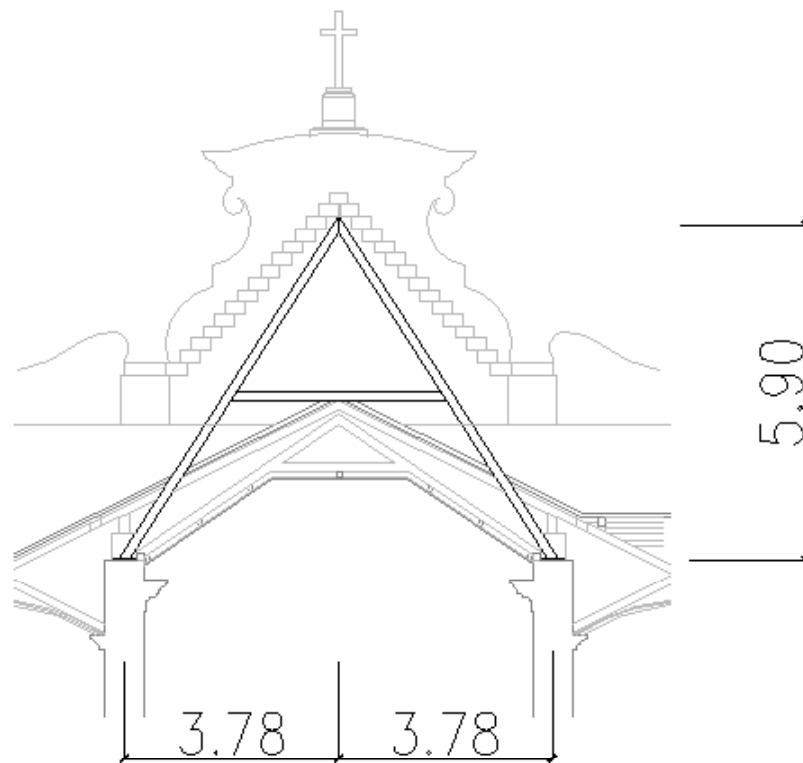
Intervenção (I)

- ☐ Igreja de S. Francisco na Horta

Dano Existente



Intervenção (II)



Estabilidade Estrutural

isise



Aplicações (I)



Mosteiro dos Jerónimos



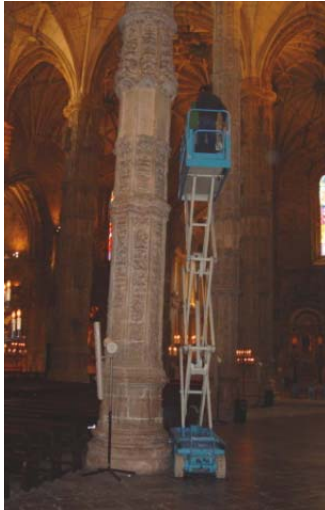
Mosteiro de Salzedas



Sé do Porto



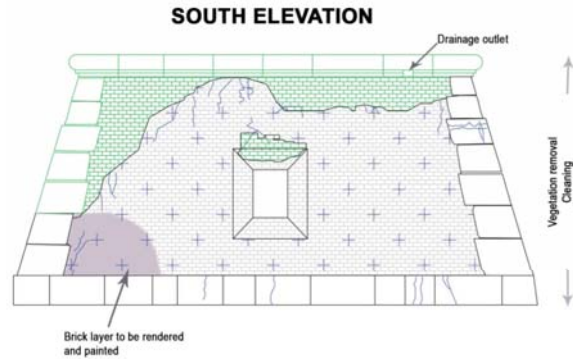
Convento Tomar



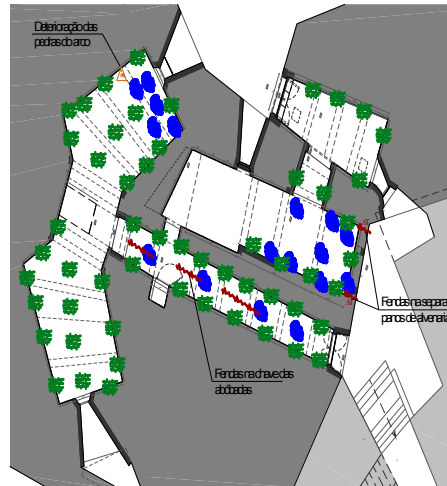
Aplicações (II)



Qutb Minar, Nova Deli, Índia



Defesa Pontifícia, Itália



Safi e Mazagão, Marrocos

Catedral Cantuária, Reino Unido



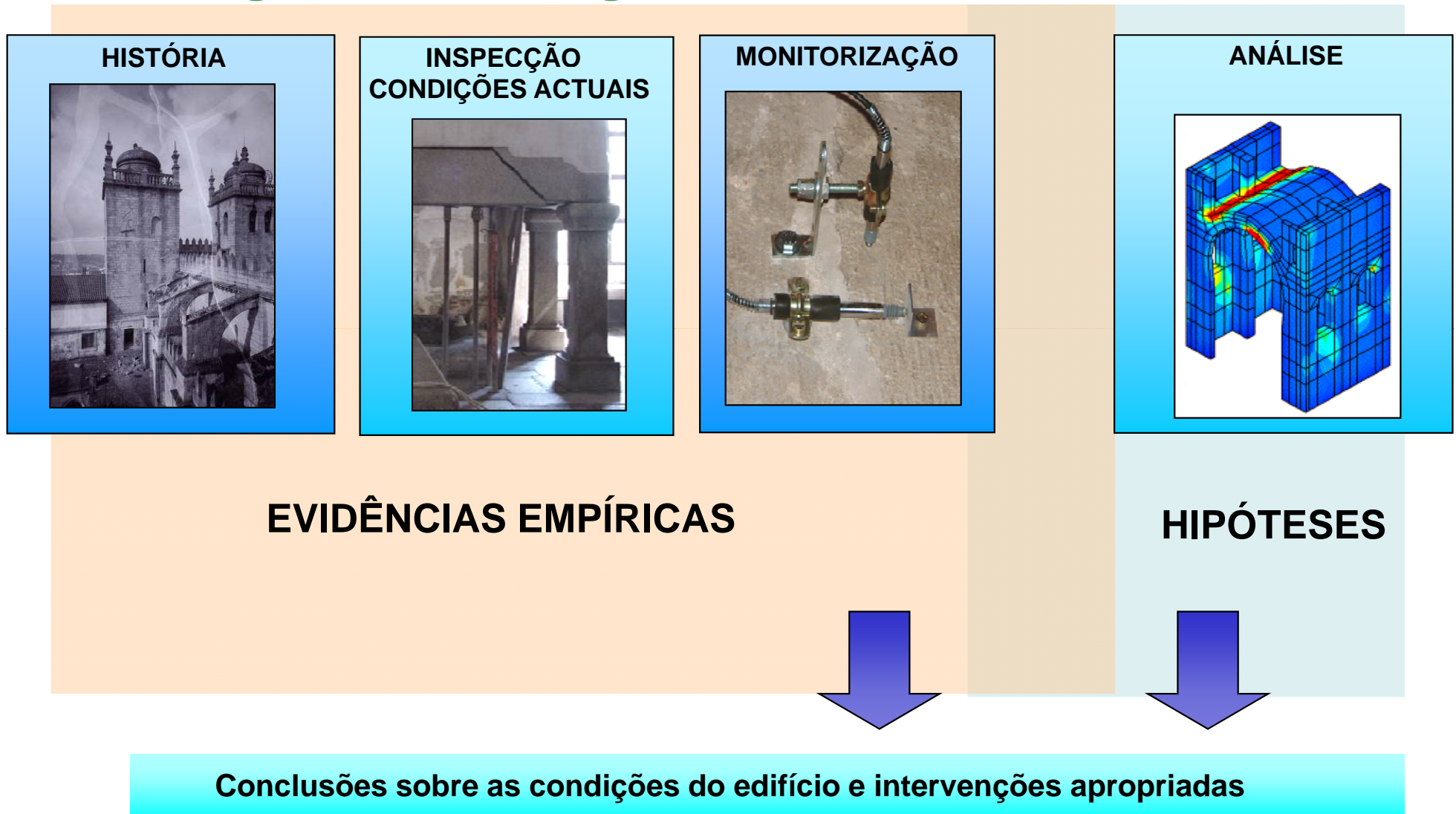
Famagusta Chipre

Mashad, Irão

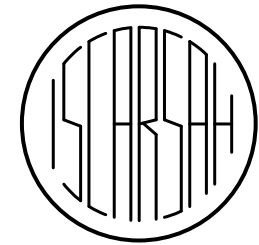




Abordagem Metodológica



Abordagem Metodológica



ICOMOS
INTERNATIONAL COUNCIL
ON MONUMENTS AND SITES

A especificidade do património, com a sua história complexa, requer a organização de estudos e propostas em fases semelhantes às que são utilizadas em medicina. Anamnese, diagnóstico, terapia e controlo correspondem, respetivamente, ao levantamento da informação disponível, identificação das causas de deficiências, seleção das ações necessárias e o controlo da eficácia das intervenções.

Análise estrutural vs. Estabilidade estrutural

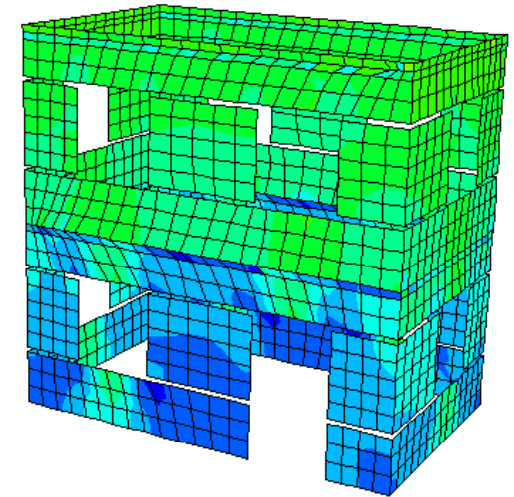
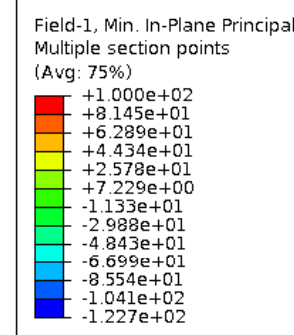
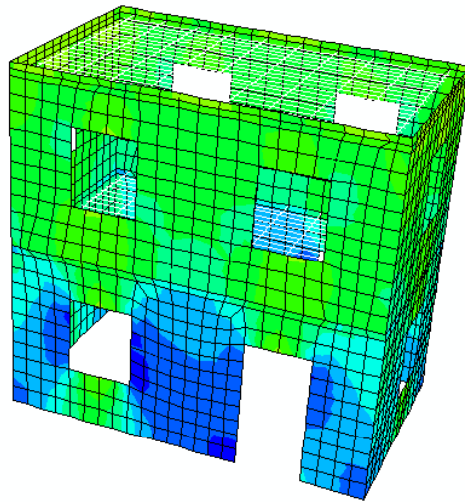
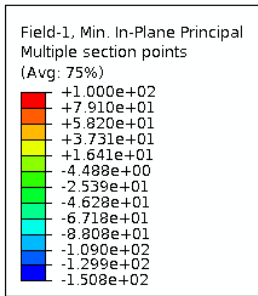
isise



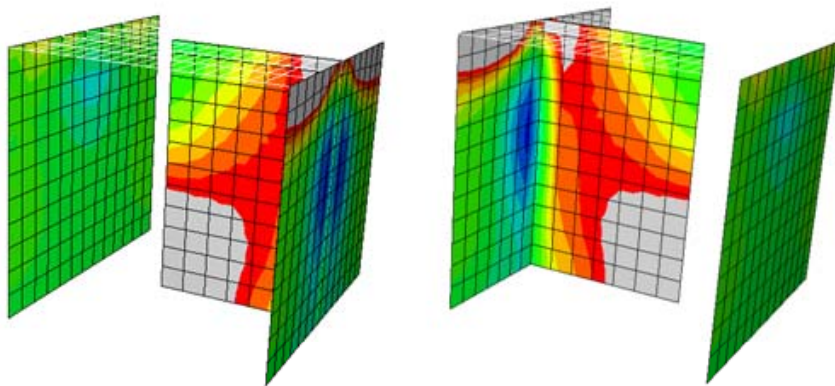
Resultados do NIKER

- ❑ Métodos simplificados para a resposta global de estruturas do património construído com valor cultural
- ❑ Métodos robustos para verificar ligações e subestruturas
- ❑ Estudos paramétricos de edifícios em função da geometria, técnicas de intervenção, rigidez de elementos horizontais e ligações
- ❑ Quantificação adequada sobre o desempenho das construções e parâmetros de resposta a utilizar na avaliação de segurança e projeto sísmico

Métodos robustos para ligações e subestruturas

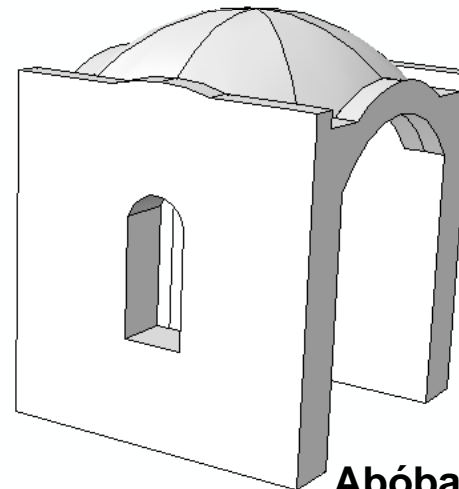


Alvenaria simples vs. mista alvenaria-madeira

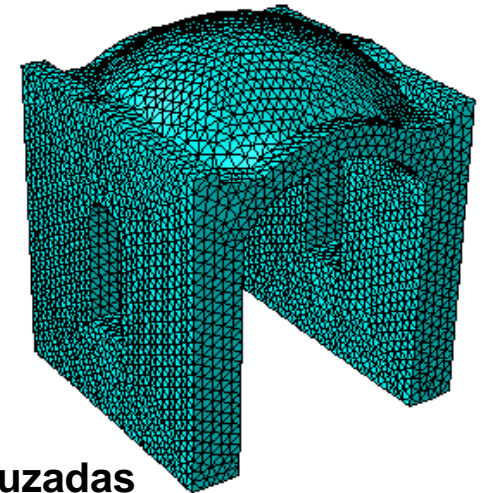


t=4.10sec

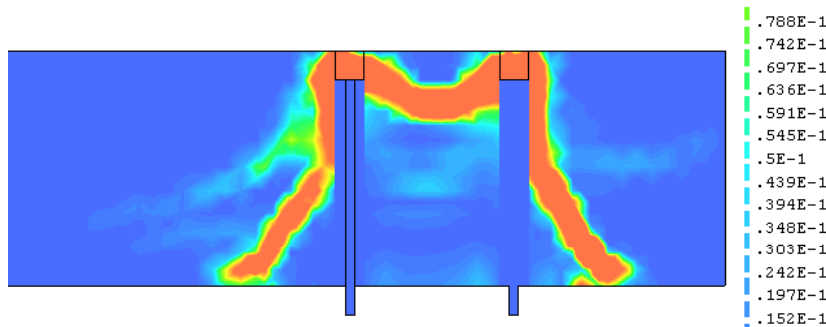
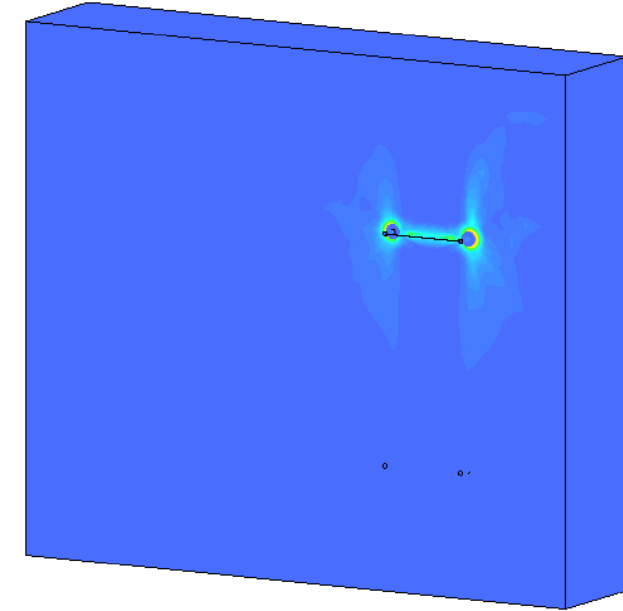
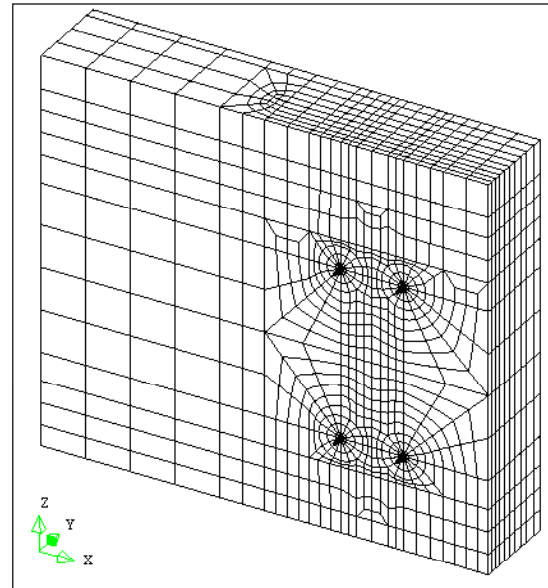
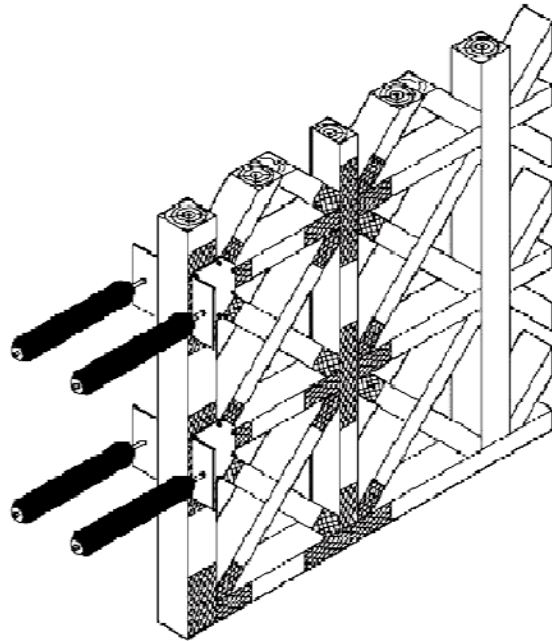
Parede de alvenaria em T



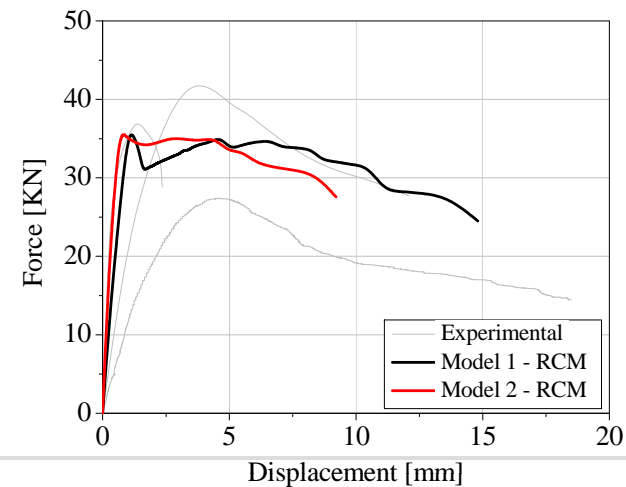
Abóbadas cruzadas



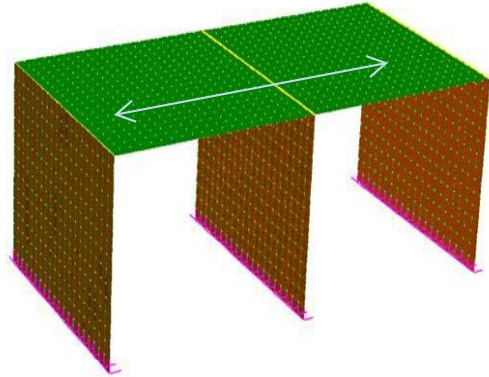
Métodos robustos para ligações e subestruturas: Ligações parede-parede



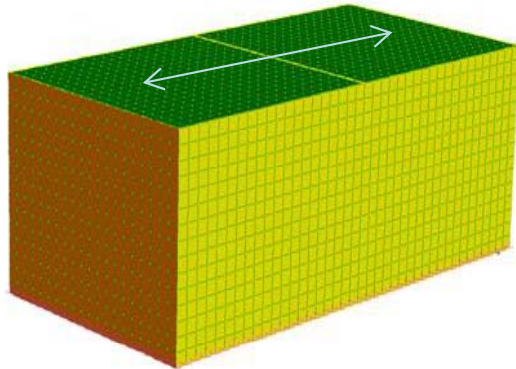
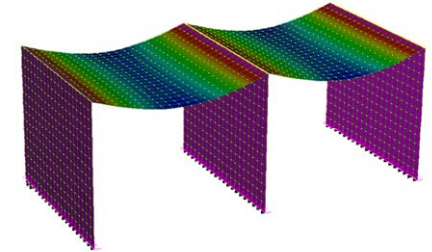
Validação



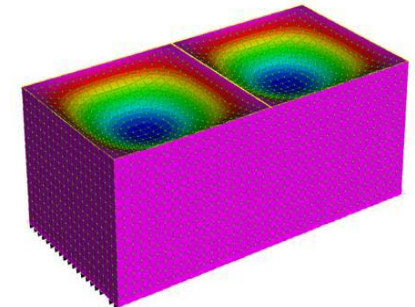
Estudos paramétricos: Pavimentos



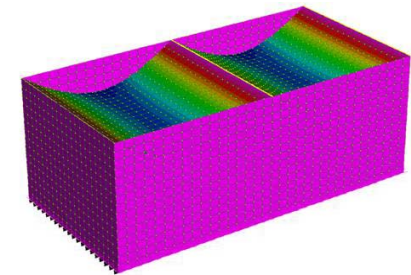
M1: Pavimento unidirecional em paredes numa direção



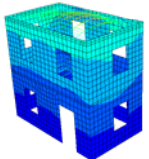
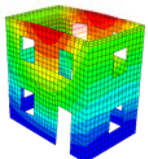
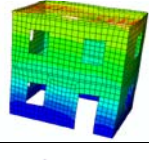
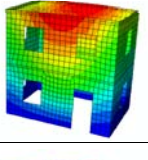
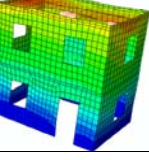
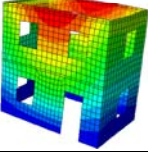
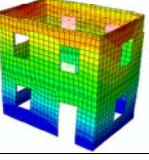
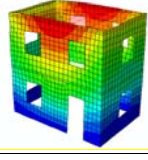
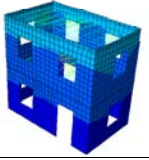
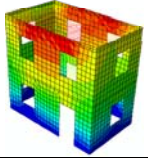
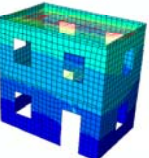
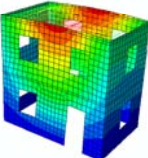
M2: Pavimento bidirecional em paredes em caixa

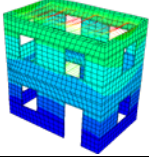
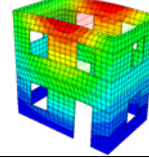
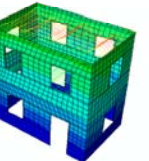
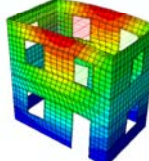
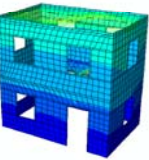
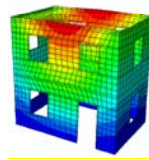
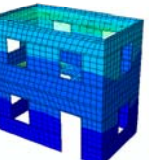
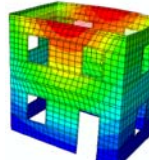
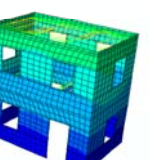
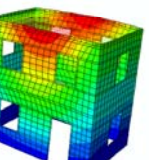
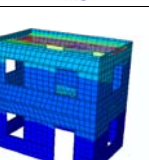
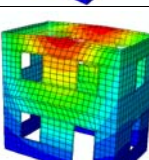


M3: Pavimento unidirecional em paredes em caixa



Estudos paramétricos: Propriedades dos materiais

Parameter	Changed value	results			
		Mode shape X	Frequency X [Hz]	Mode shape Y	Frequency Y [Hz]
reference	-		6.58		4.87
Profile of joists	8x10cm ²		6.75		4.94
Profile of planks	1.5x10cm ²		6.70		4.95
	2.0x10cm ²		6.88		5.07
Properties of wooden elements	C24 E=11GPa G=0.69GPa		8.18		6.10
Properties of masonry walls	$\rho=2.30\text{Mg/m}^3$ E=1.4GPa		9.41		7.57

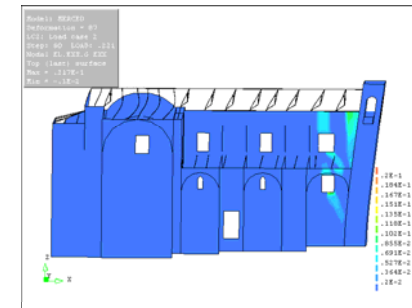
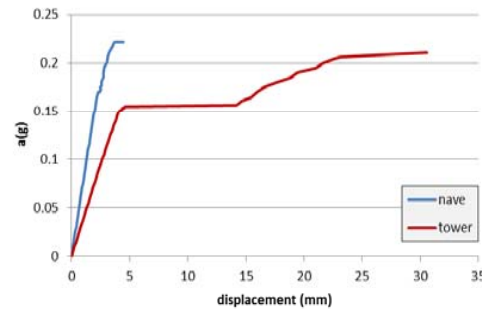
Parameter	Changed value	results			
		Mode shape X	Frequency X [Hz]	Mode shape Y	Frequency Y [Hz]
reference	-		8.58		6.61
Profile of joists	8x10cm ²		9.10		6.70
Profile of planks	1.5x10cm ²		8.94		6.72
	2.0x10cm ²		9.18		6.78
Properties of wooden elements	C24 E=11GPa G=0.69GPa		8.98		6.81
Properties of masonry walls	$\rho=2.30\text{ Mg/m}^3$ E=1.4GPa		10.16		9.10

Alvenaria simples

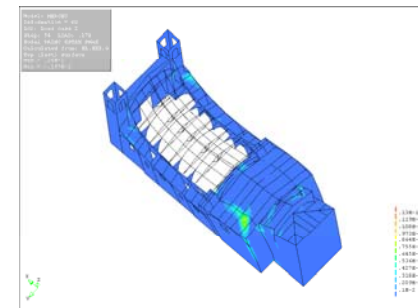
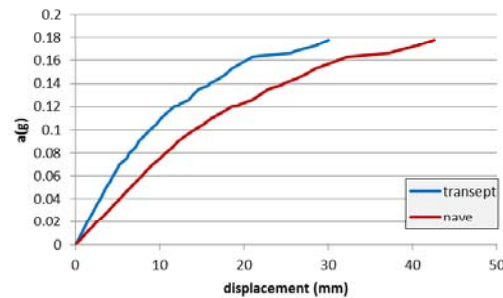
Misto alvenaria-madeira

Estudos paramétricos de edifícios: Ligações

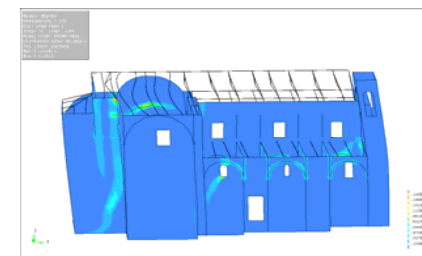
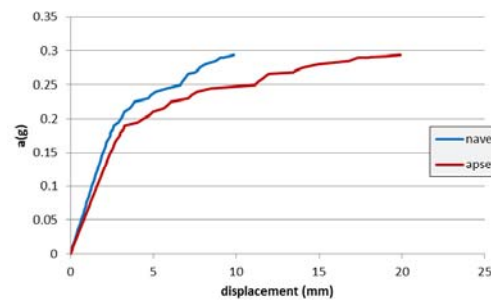
Modelo de referência



Direção longitudinal



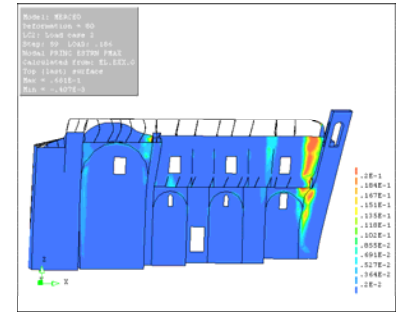
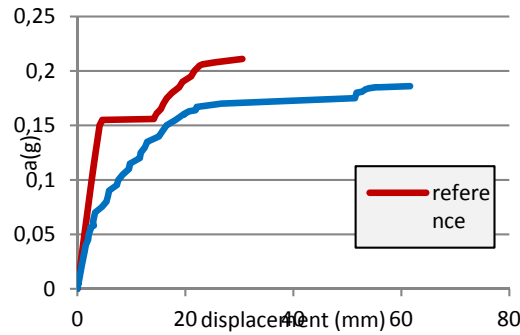
Direção transversal



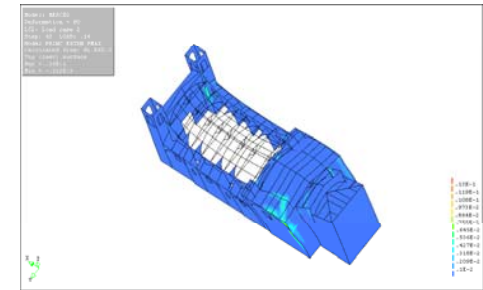
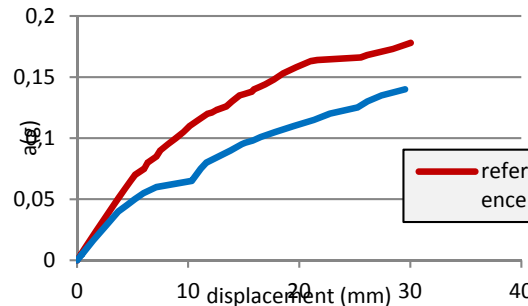
Transepto vs. nave

Estudos paramétricos de edifícios: Ligações

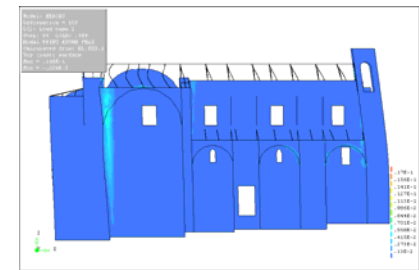
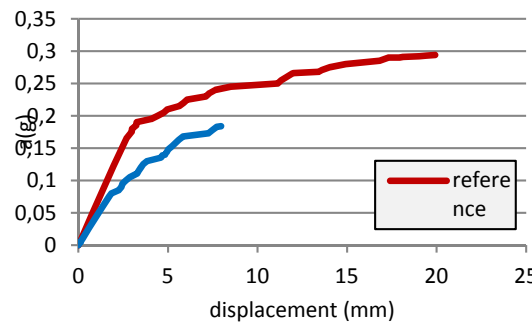
Ligações deterioradas



Direção longitudinal



Direção transversal



Original vs. deteriorado

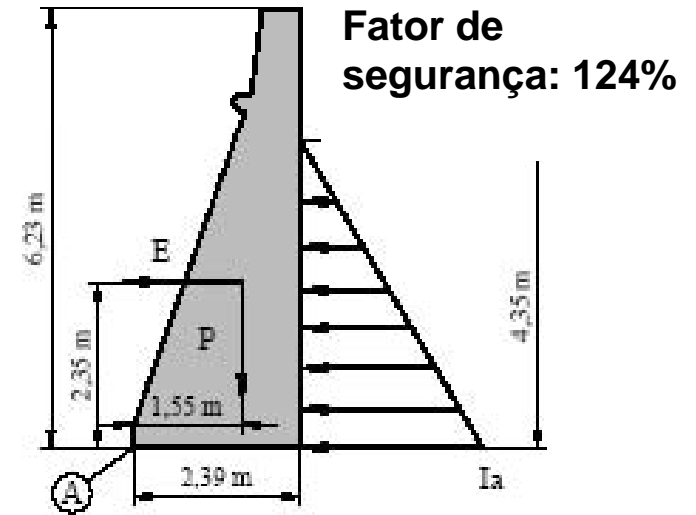
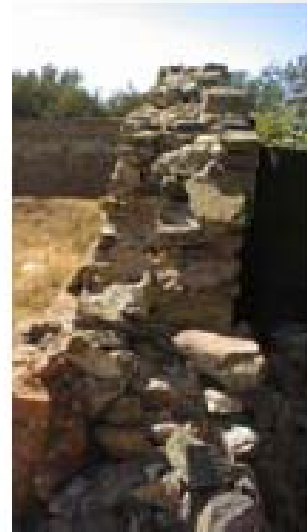
Cuidado!

isise

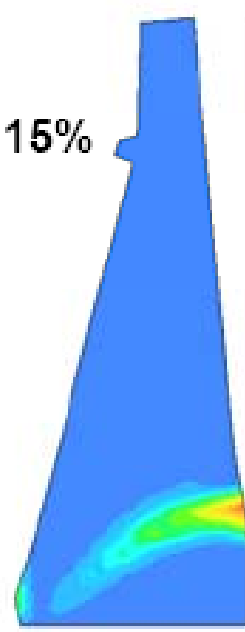


Universidade do Minho

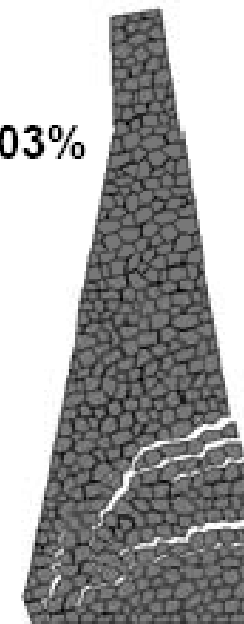
Adotar a ferramenta de análise adequada



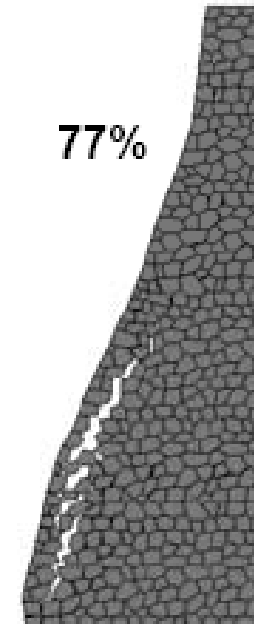
115%



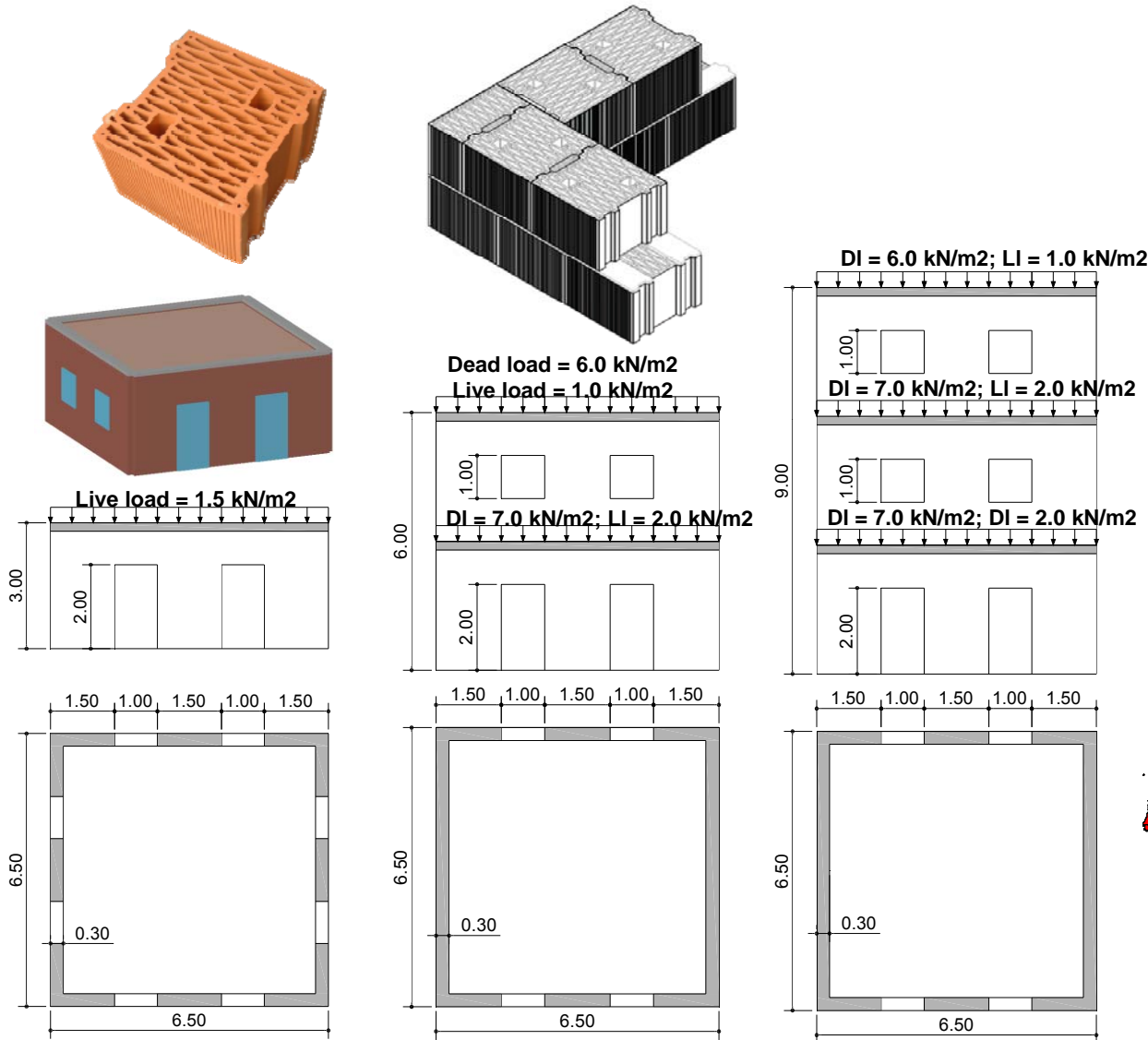
103%



77%

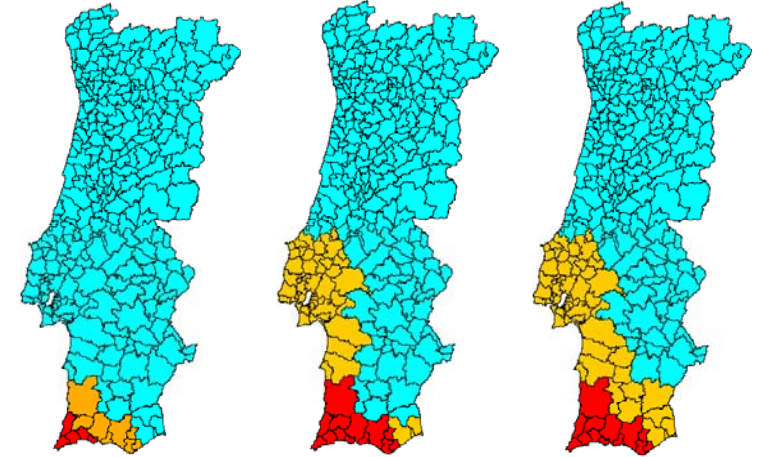


Análise adequada?

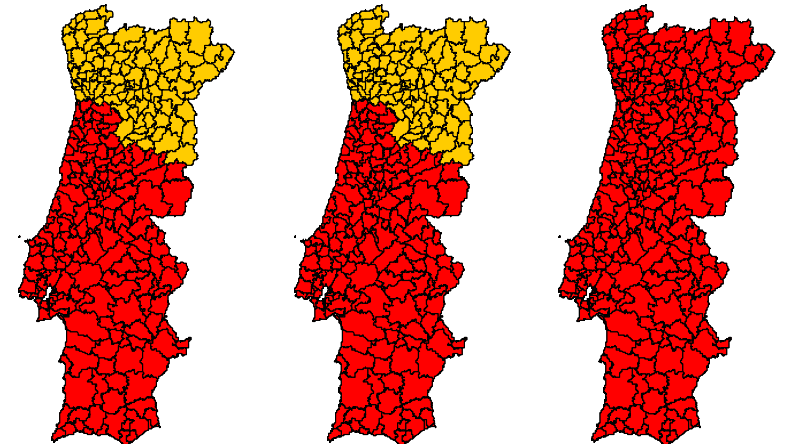


1 piso 2 pisos 3 pisos

Análise correta



Análise regulamentar (q=1.5)



■ Não se pode usar
■ Em rocha
■ Em solo bom

Conclusões

isise



Conclusões

- ❑ Não subsistem dúvidas que a perigosidade vai resultar em desastres em diferentes localizações no mundo e que não existem medidas pós-desastre que podem recuperar a herança cultural perdida. As palavras-chave são: mitigação e preparação
- ❑ A sensibilização e envolvimento da sociedade são imperiosas
- ❑ O problema é multidisciplinar e complexo, mas tem solução
- ❑ O cumprimento das cartas internacionais sobre o património cultural implica a aplicação dos seus princípios e responsabilidades
- ❑ As ações têm de ser faseadas, para que possam ser alocados recursos
- ❑ Existem métodos de avaliação de estabilidade adequados (e também não!)
- ❑ A ausência de ações não resolve os problemas, apenas os piora



A situação dos monumentos portugueses face ao risco sísmico e a sua estabilidade estrutural

Paulo B. Lourenço

pbl@civil.uminho.pt
www.civil.uminho.pt/masonry

