V Encontro Nacional,
I Congresso Internacional
de RISCOS

Estratégias e metodologias para intervenções de reabilitação urbana

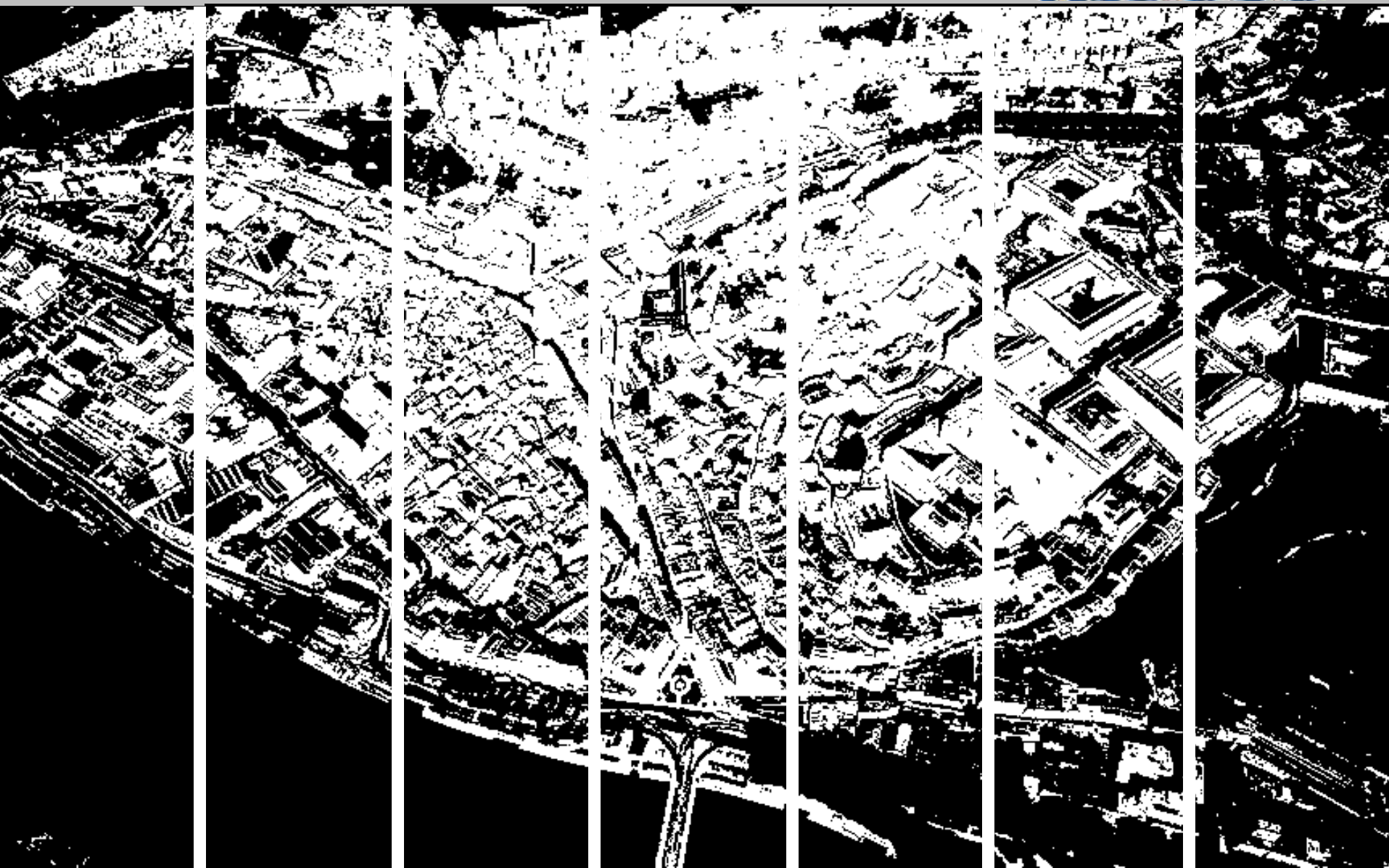
Avaliação da vulnerabilidade e do risco sísmico do edificado da Baixa de Coimbra

Romeu Vicente
Universidade de Aveiro

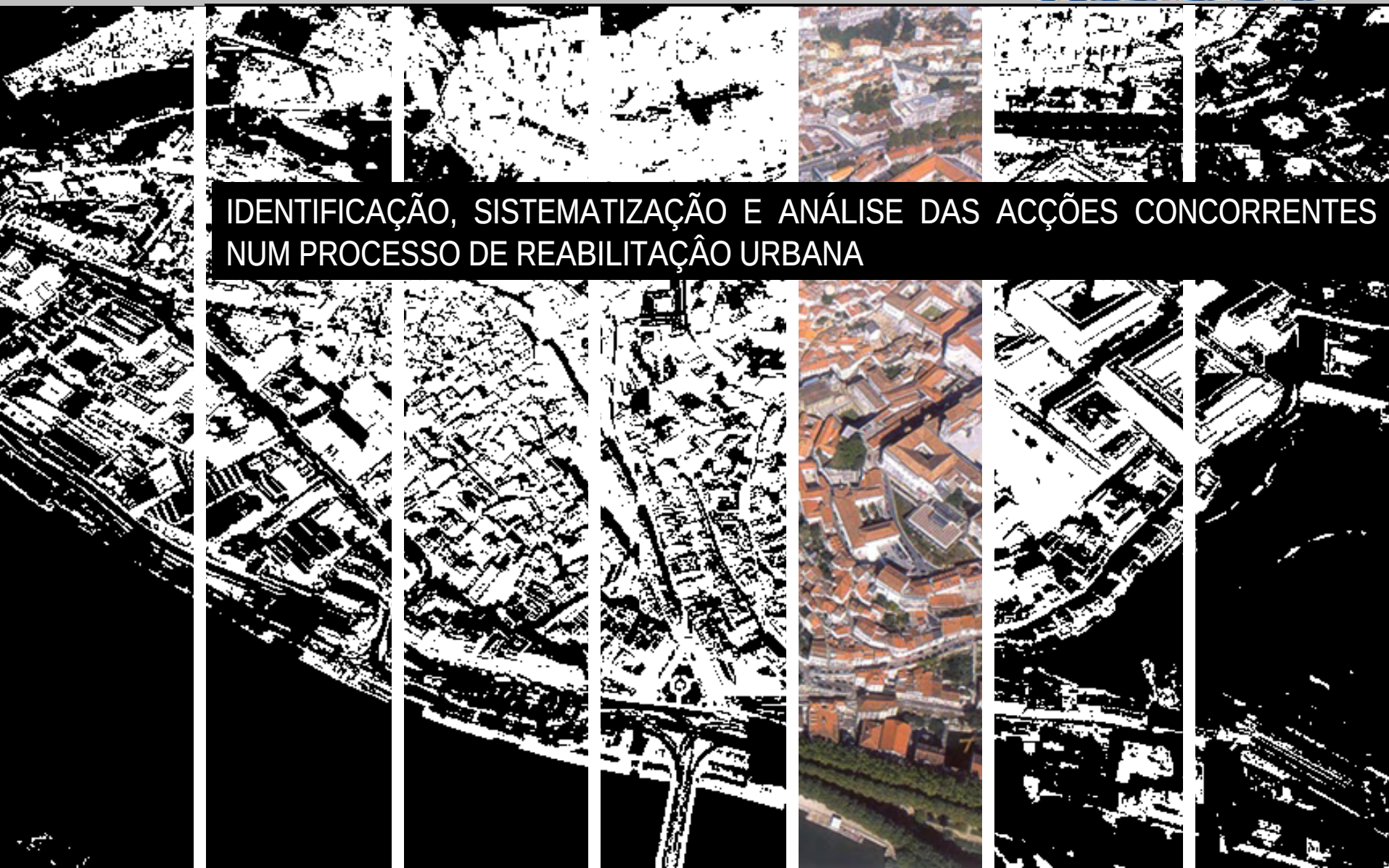
Humberto Varum
Universidade de Aveiro

J.A.R. Mendes da Silva
Universidade de Coimbra

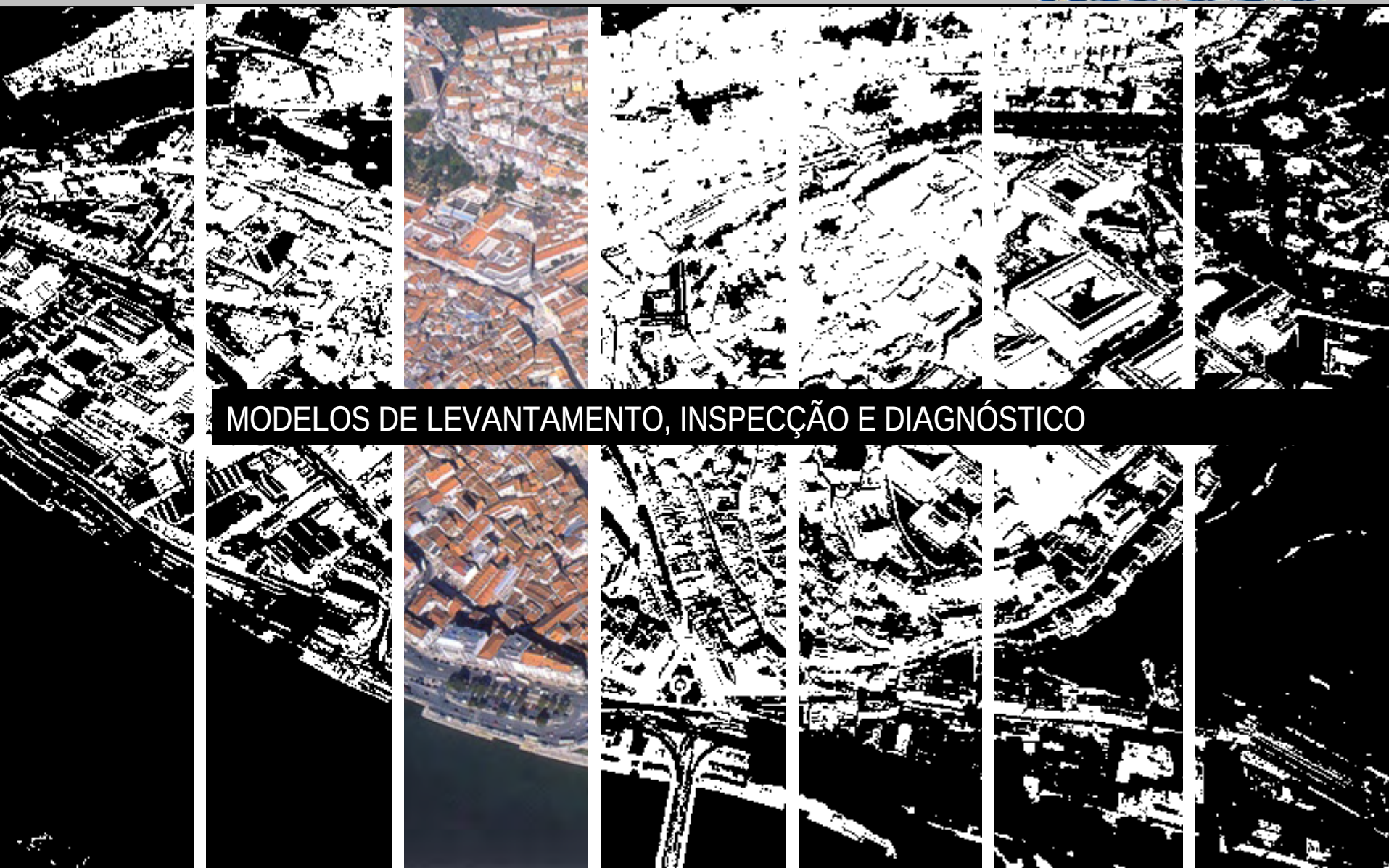
V Encontro Nacional,
I Congresso Internacional
de RISCOS



V Encontro Nacional,
I Congresso Internacional
de RISCOS



IDENTIFICAÇÃO, SISTEMATIZAÇÃO E ANÁLISE DAS ACÇÕES CONCORRENTES NUM PROCESSO DE REABILITAÇÂO URBANA



MODELOS DE LEVANTAMENTO, INSPECÇÃO E DIAGNÓSTICO

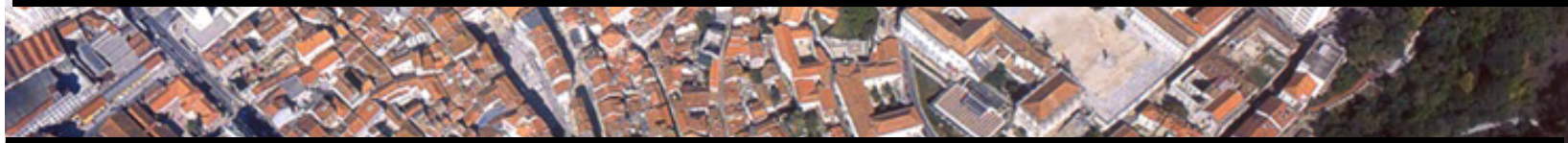
V Encontro Nacional,
I Congresso Internacional
de RISCOS

MODELOS DE AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE URBANA E GESTÃO DE RISCO SÍSMICO

V Encontro Nacional,
I Congresso Internacional
de RISCOS

IDENTIFICAÇÃO, SISTEMATIZAÇÃO E ANÁLISE DAS ACÇÕES CONCORRENTES NUM PROCESSO DE REABILITAÇÂO URBANA

MODELOS DE LEVANTAMENTO, INSPECÇÃO E DIAGNÓSTICO



MODELOS DE AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE URBANA E GESTÃO DE RISCO SÍSMICO

Três objectivos que se discutem ao longo deste trabalho:

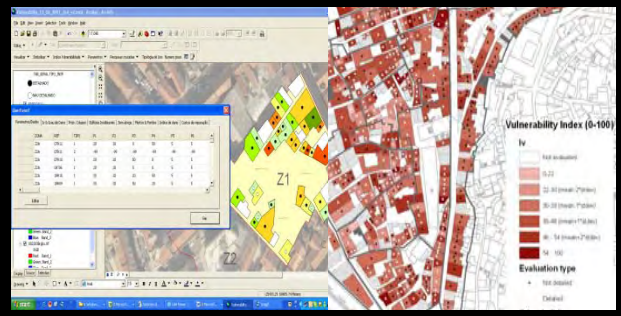
A Estratégia e Metodologia da intervenção (definição de acções concorrentes)

1

Elaboração de um Modelo de Registo e Diagnóstico estruturado e credível (caracterização do edificado da Baixa)

2

Avaliação da Vulnerabilidade do edificado (gestão de risco e avaliação de estratégias de reforço e reabilitação)



3

O Processo de Reabilitação Urbana

Reabilitar é imperativo !

REABILITAÇÃO VS CONSTRUÇÃO NOVA

PERCEBER O EDIFICADO

O processo da BAIXA DE COIMBRA …….

Destaque dos media:

ABERTURA

AGENDA

DIZ-SE

"A única solução para a Baixa de Coimbra é demolir e construir de novo"

O ALERTA DO ESPECIALISTA

Coordenador da comissão de inquérito à derrocada dos prédios considera "gravíssimo" o problema da degradação dos edifícios da zona

GRAÇA BARBOSA RIBEIRO

Coimbra dividida entre a reconstrução e a reabilitação dos prédios da Baixa

O coordenador científico do Sigurb não revela dados sobre as patologias dos edifícios da Baixa de Coimbra. Até porque, defende, estejam eles "em pior ou melhor estado", o objectivo é sempre o mesmo: a reabilitação

POR GRAÇA BARBOSA RIBEIRO

UNIVERSIDADE À PROCURA DE "CURA" PARA A BAIXA DE COIMBRA

Diário de Coimbra

Prédio que desabou ontem já não estava, para a Câmara, em risco de ruir

Pânico na Baixa de Coimbra

Relvado sintético é hoje inaugurado

Comandante cessa funções

Assaltada escola Ferrer Correia

Edifício colapsa quando sofre intervenção de reabilitação/renovação

2 anos antes o edifício apresentava uma estado de conservação razoável

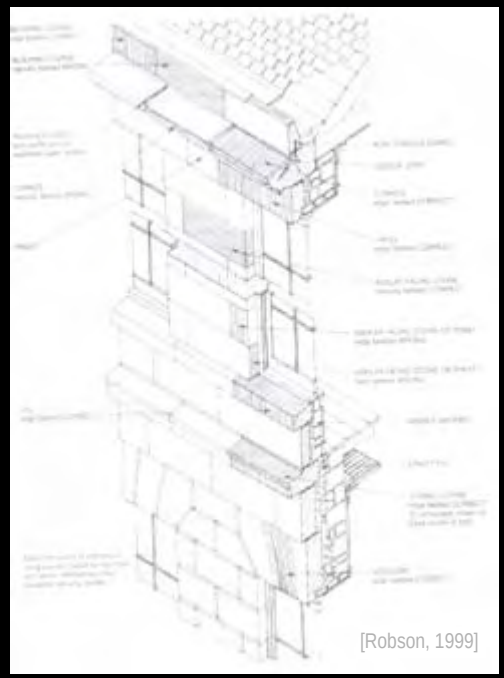
Porque?

Acção da água:
Falta de manutenção;
Intervenção (falta de cuidados de desconstrução).

PERCEBER O EDIFICADO ANTIGO

Exercício de perceber o edificado antigo:

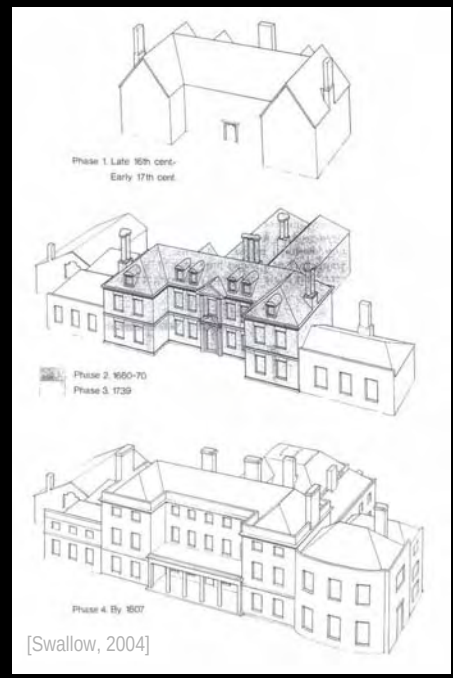
1. Tipologias construtivas (incluindo materiais, técnicas, tipos de pormenores construtivos);
2. Influência da envolvente (da cronologia da construção e das nomeadamente os microclimas);
3. A história e evolução do edifício (incluindo aspectos sucessivas alterações).



Pormenorização

Alçado Sul: Caixilharia em madeira degradada

Alçado Norte: Problemas de humidade



Registo cronológico das intervenções

Estratégia e técnicas de inspecção, registo e diagnóstico

800 edifícios

Inspecção visual do edificado, 90.000 Photos, 8.500 Fichas de Registo, 1.500 Desenhos e Inquéritos

2 ANOS DE TRABALHO
Gestão de informação
Base de Dados e SIG (WEB)

Caracterização sócio-demográfica

Inspecção e registo

Caracterização construtiva e levantamento de anomalias

Levantamento arquitectónico

Caracterização construtiva e registo de anomalias

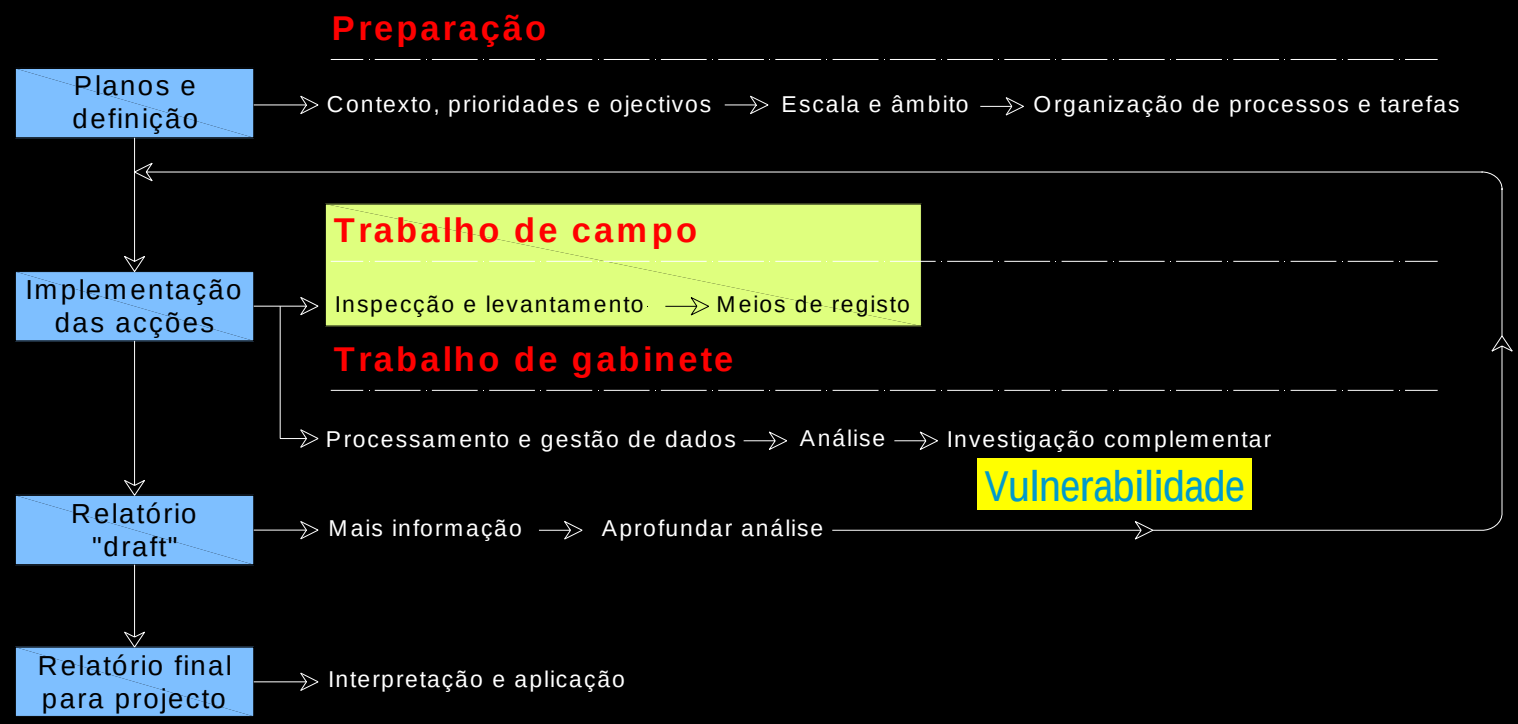
Alvenarias
- Capacidade resistente
- Anomalias
- Revestimentos, vãos...

Pavimentos e coberturas

Instalações

Condições de conforto, higiene e salubridade

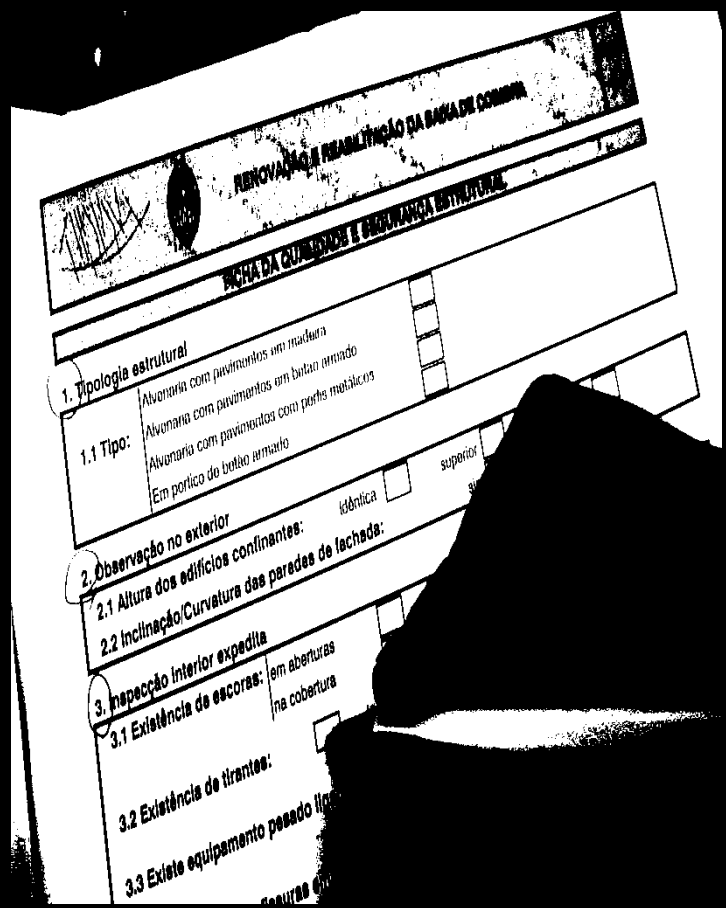
(...) O comité internacional ICOMOS e a ISO 13822 estabelecem linhas orientadoras e tecem recomendações para as acções de avaliação e salvaguarda do património (...)



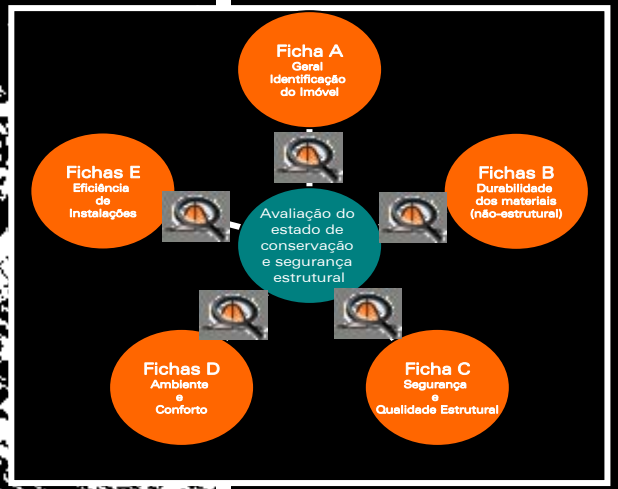
Fichas de registo

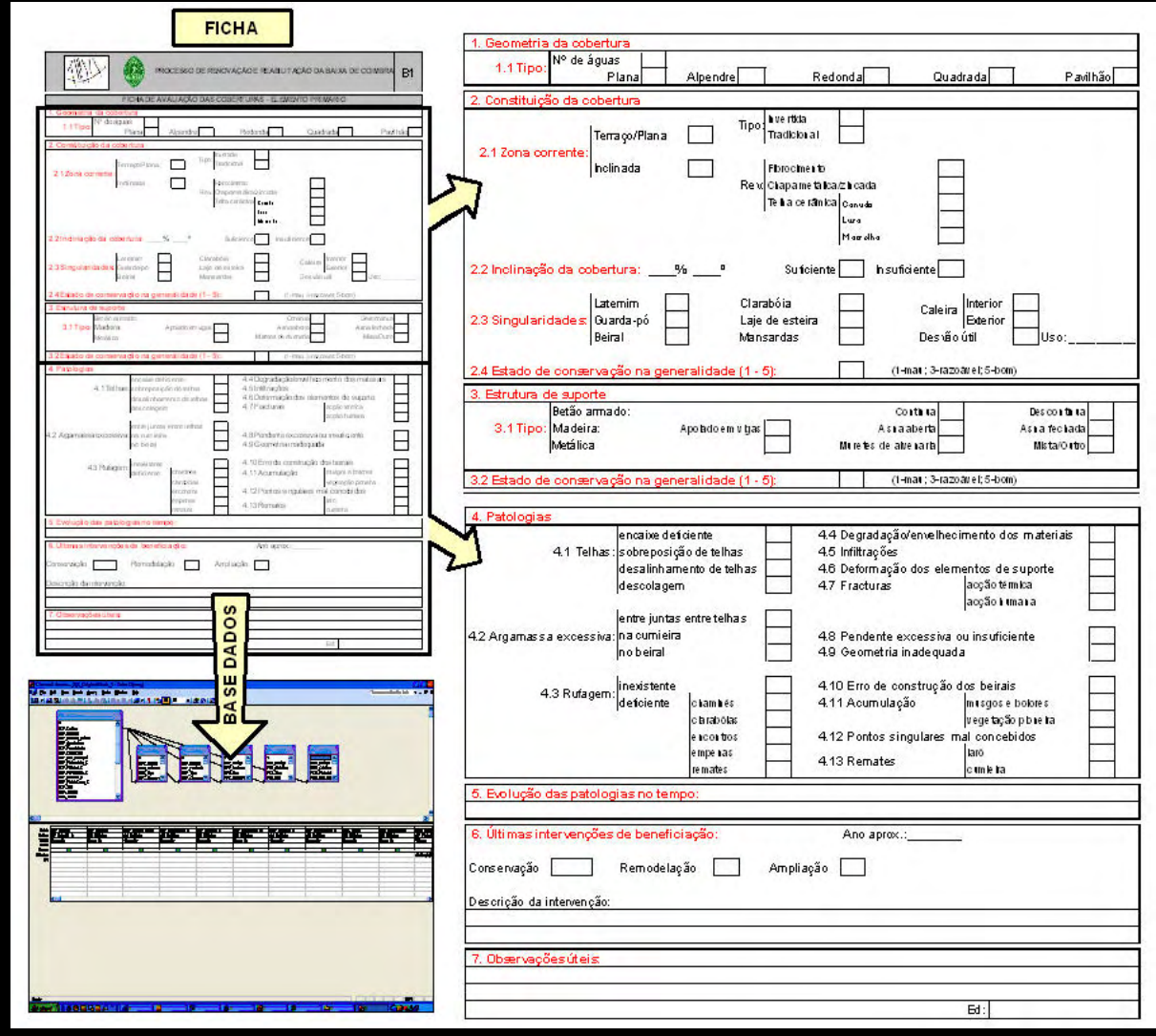
Fichas de inspecção

A	Identificação do Edifício
B1	Avaliação das Coberturas
B2	Avaliação das Paredes de Fachada
B3	Avaliação dos Pavimentos
B4	Avaliação das Paredes Interiores/Caixilharias/Tectos
C	Qualidade e Segurança Estrutural
D1	Condições de Ventilação/Salubridade e Iluminação
D2	Condições Térmicas e Acústicas
E1	Eficiência das Redes de Águas e Drenagem
E2	Eficiência das Redes Eléctrica e Telefónica
E3	Condições de Segurança Contra Incêndio



Fichas de registo





Caracterização construtiva e registo de anomalias

- Base de dados e tratamento
  - Ensaios mecânicos "in situ"
  - Analise da vulnerabilidade e risco
  - Estratégias de reabilitação
  - (...)

$f\ (a, b, c, d, \ldots x, y)$

RESULTADOS

Dados directos

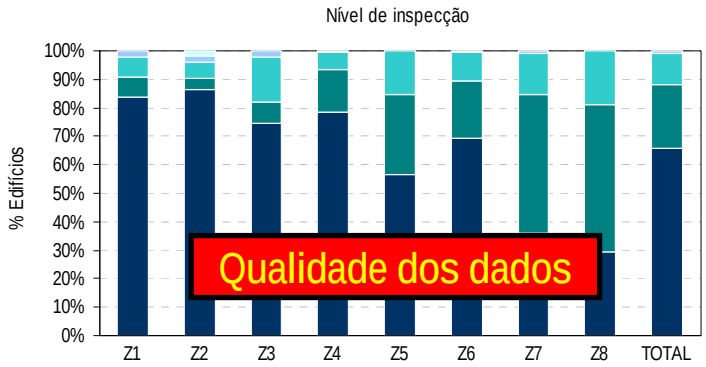
Combinação de informação

Extrapolação

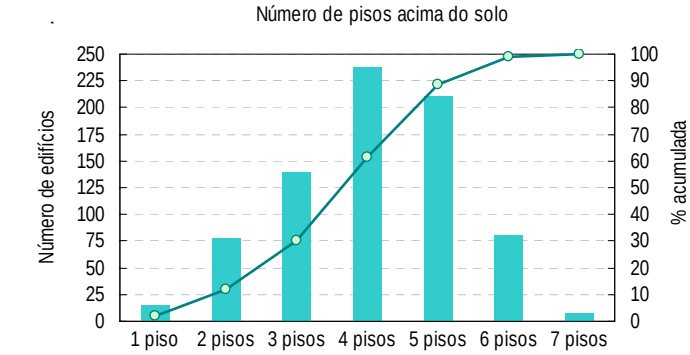
Níveis de abstracção

Base de dados e tratamento

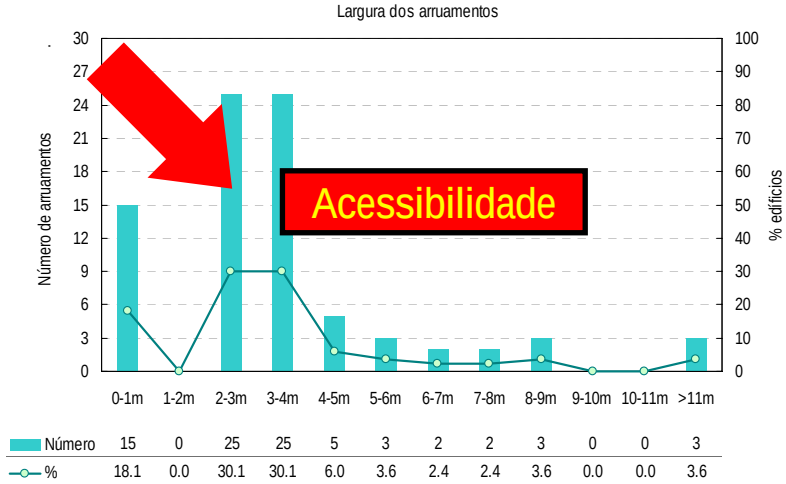
Aspectos gerais do edificado e espaço urbano



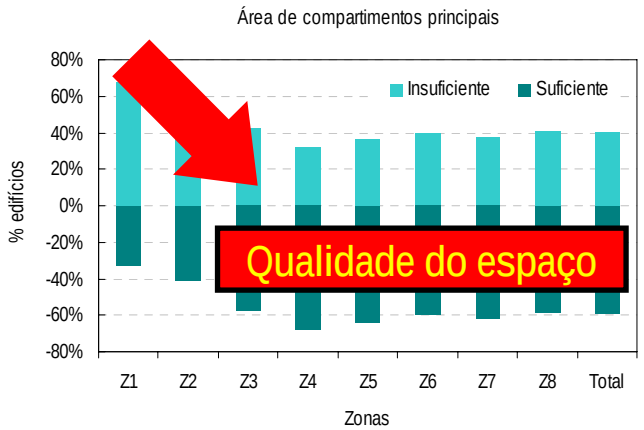
	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	Z7	Z8	TOTAL
Demolido / Ruína	0	1	0	0	0	0	0	0	1
Construção nova / Reconstrução	1	1	2	1	0	1	1	0	7
Inspecção da envolvente exterior	3	3	14	11	6	19	16	11	83
Parcialmente visitado	3	2	7	28	11	38	54	30	173
Completamente visitado	36	44	67	148	22	132	40	17	506



	1 piso	2 pisos	3 pisos	4 pisos	5 pisos	6 pisos	7 pisos
Número	15	78	140	238	210	80	8
%	2.0	12.1	30.3	61.2	88.6	99.0	100.0



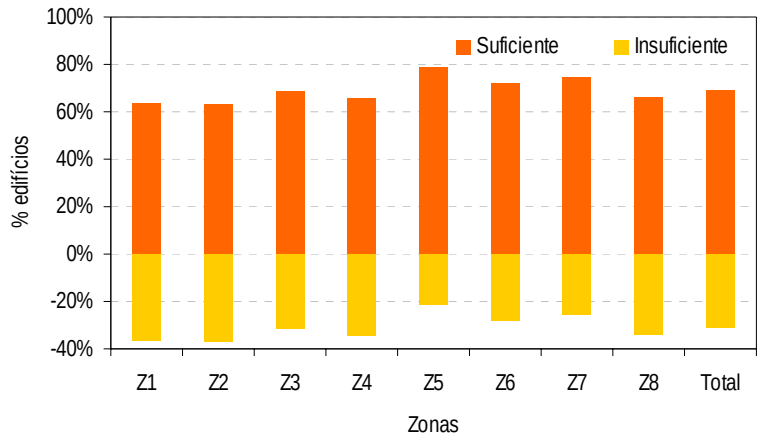
	0-1m	1-2m	2-3m	3-4m	4-5m	5-6m	6-7m	7-8m	8-9m	9-10m	10-11m	>11m
Número	15	0	25	25	5	3	2	2	3	0	0	3
%	18.1	0.0	30.1	30.1	6.0	3.6	2.4	2.4	3.6	0.0	0.0	3.6



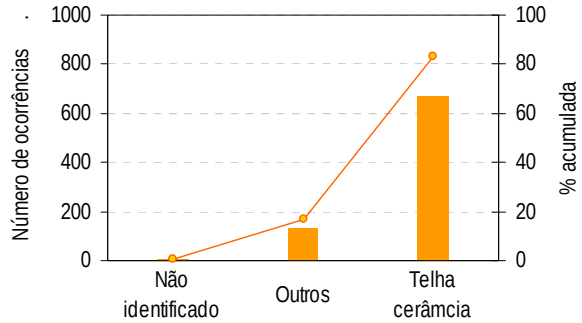
Base de dados e tratamento

Coberturas

Inclinação da cobertura



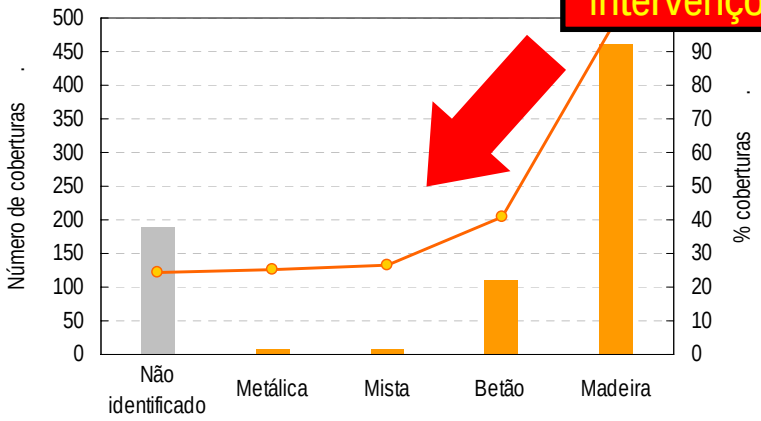
Tipo de revestimento



	Não identificado	Outros	Telha cerâmcia
Número	3	134	671
%	0.4	16.6	83.0

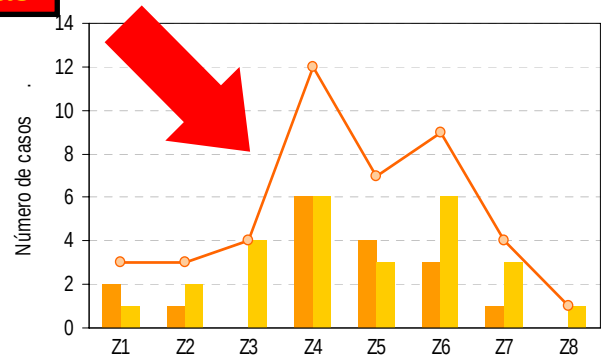
Intervenções erróneas

Tipo de estrutura de suporte



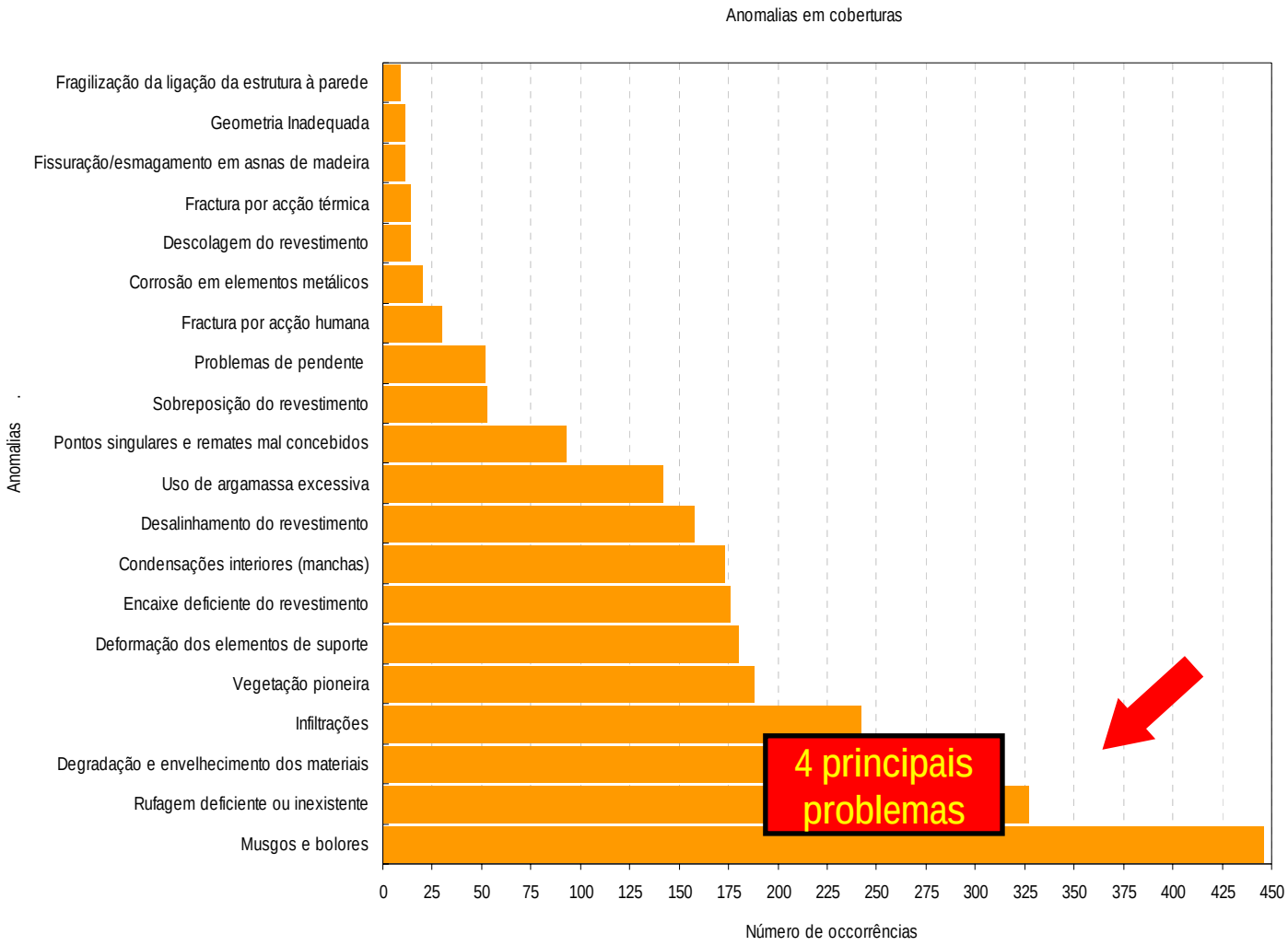
	Não identificado	Metálica	Mista	Betão	Madeira
Número	189	8	9	111	461
%	24.3	25.3	26.5	40.7	100.0

Edifícios em alvenaria com coberturas em betão armado

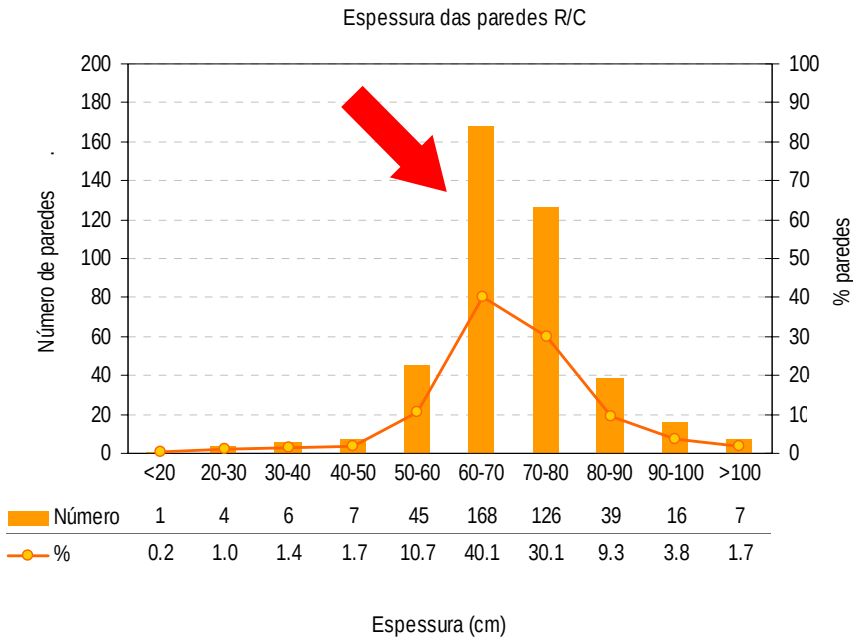


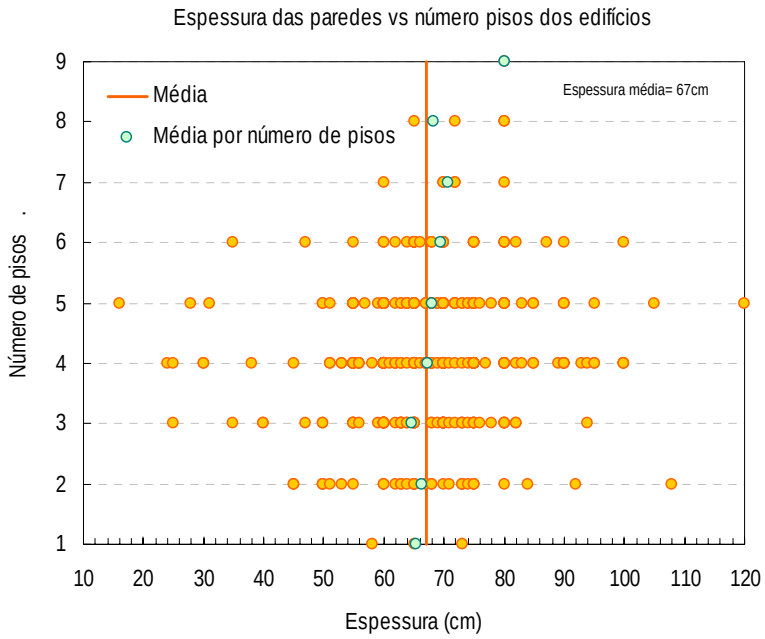
	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	Z7	Z8
Perfis pré-moldados	2	1	0	6	4	3	1	0
Laje maciça ou aligeirada	1	2	4	6	3	6	3	1
Total	3	3	4	12	7	9	4	1

Base de dados e tratamento — Coberturas

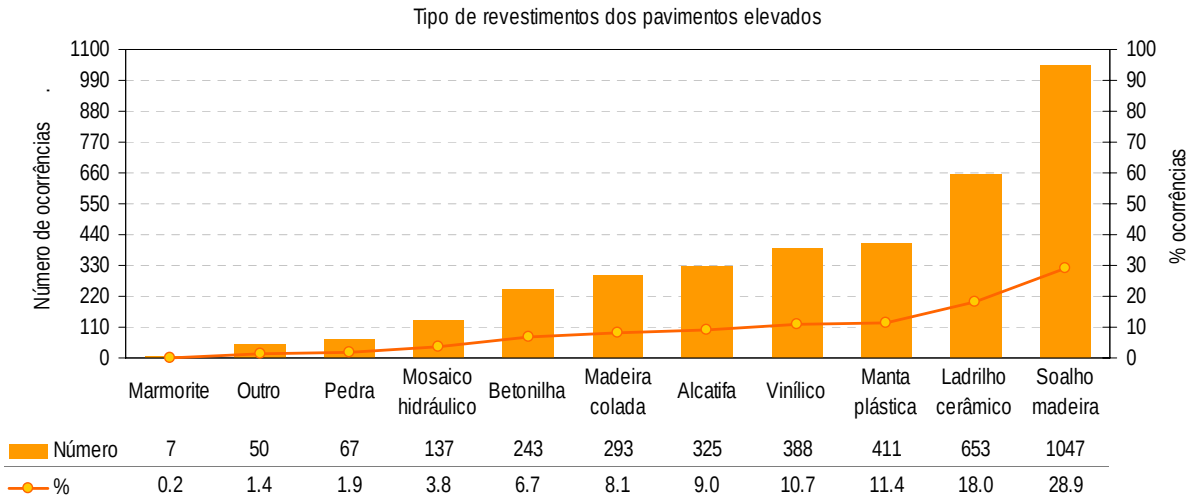


Base de dados e tratamento — Paredes de fachada

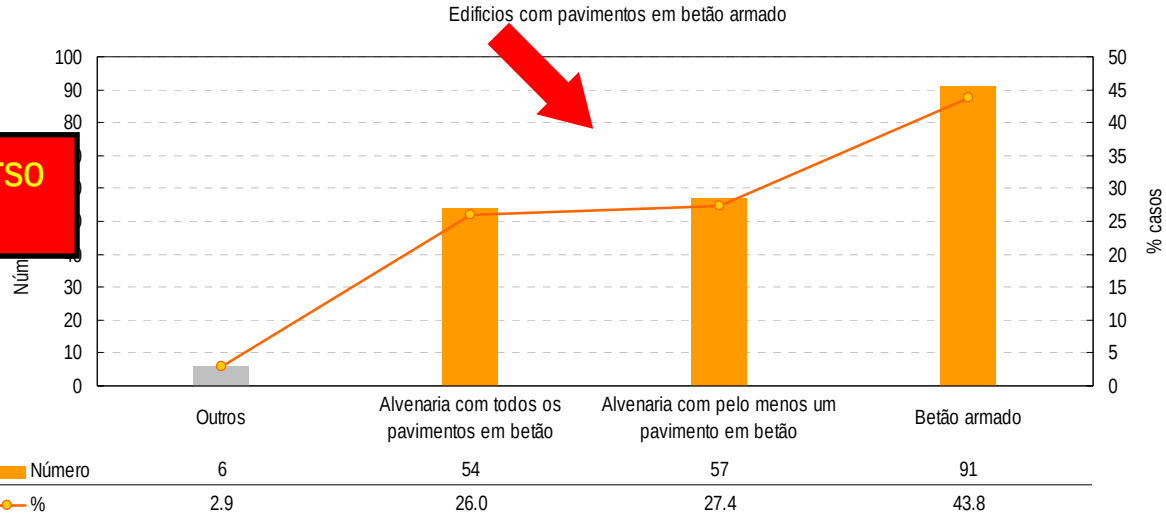




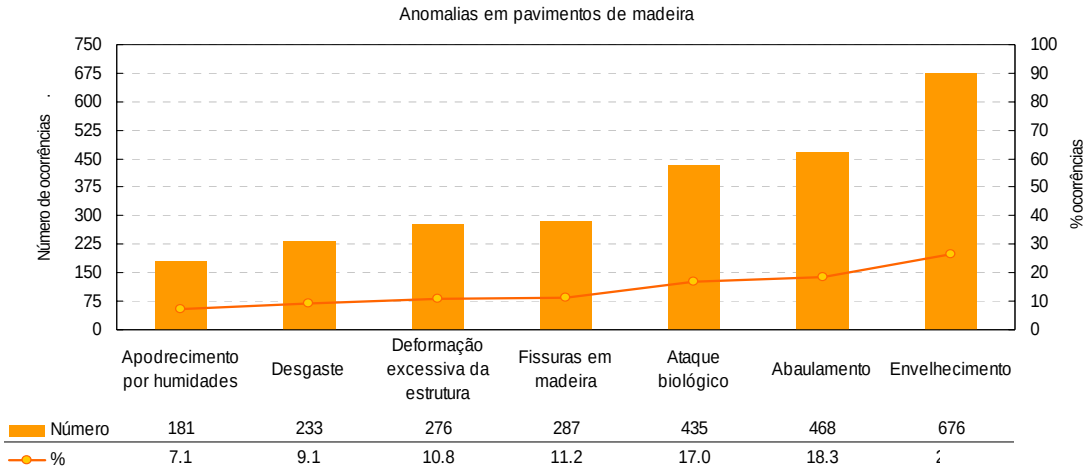
Base de dados e tratamento — Pavimentos

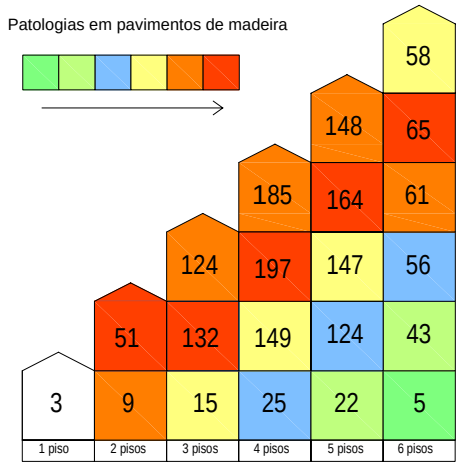


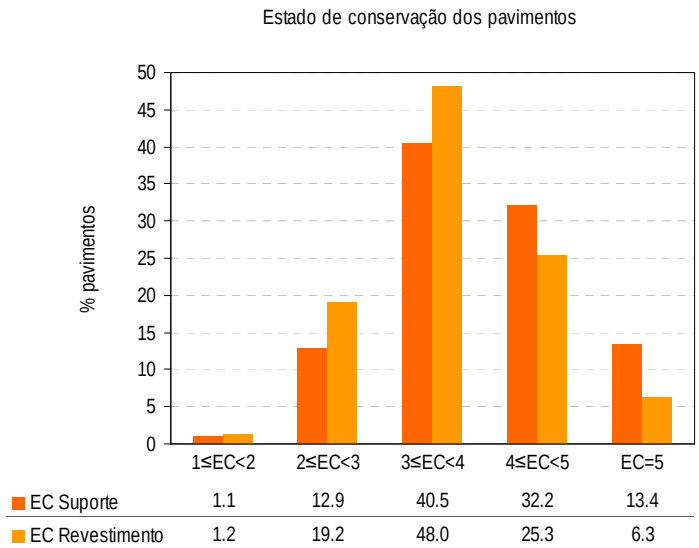
Intervenções com recurso ao betão armado

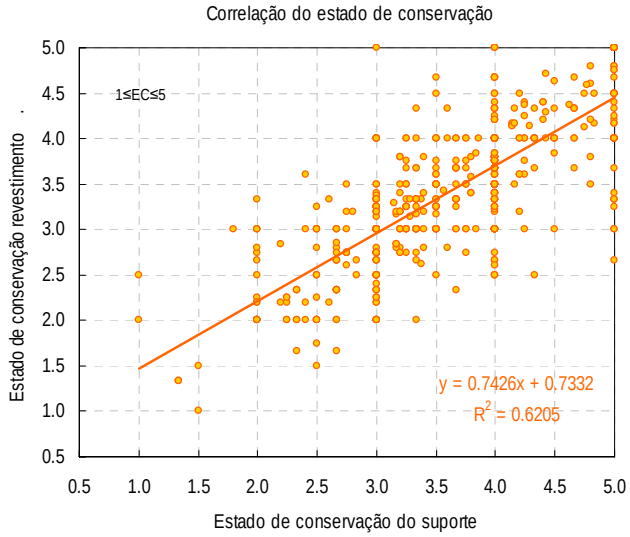


Base de dados e tratamento — Pavimentos





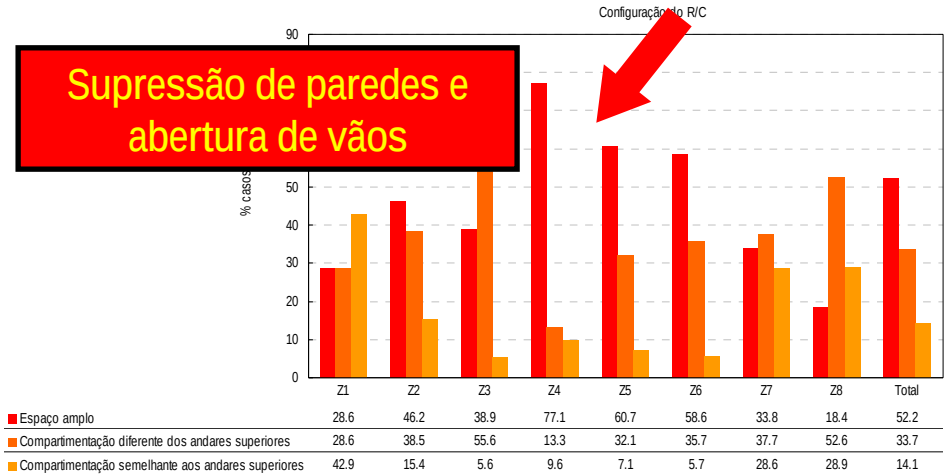




Base de dados e tratamento

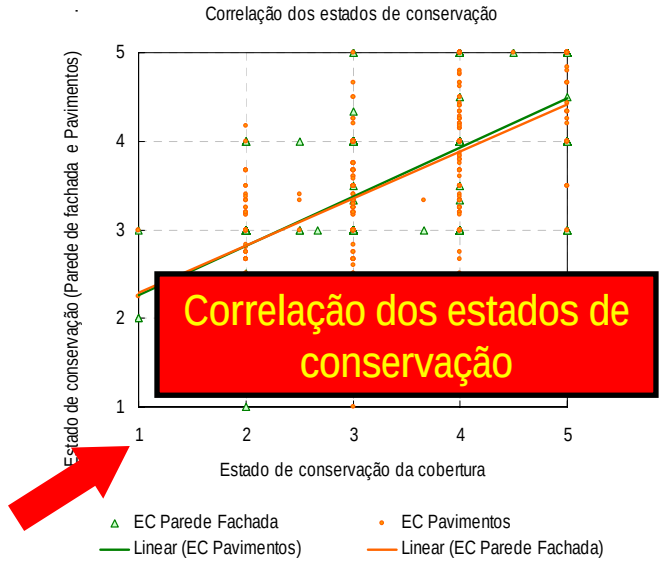
Qualidade estrutural

Supressão de paredes e abertura de vãos

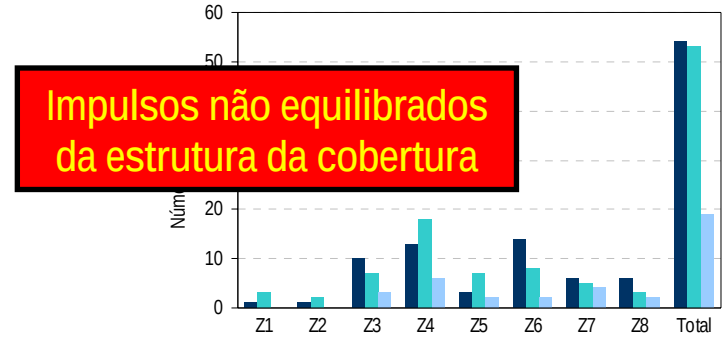


	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	Z7	Z8	Total
Espaço amplo	28.6	46.2	38.9	77.1	60.7	58.6	33.8	18.4	52.2
Compartimentação diferente dos andares superiores	28.6	38.5	55.6	13.3	32.1	35.7	37.7	52.6	33.7
Compartimentação semelhante aos andares superiores	42.9	15.4	5.6	9.6	7.1	5.7	28.6	28.9	14.1

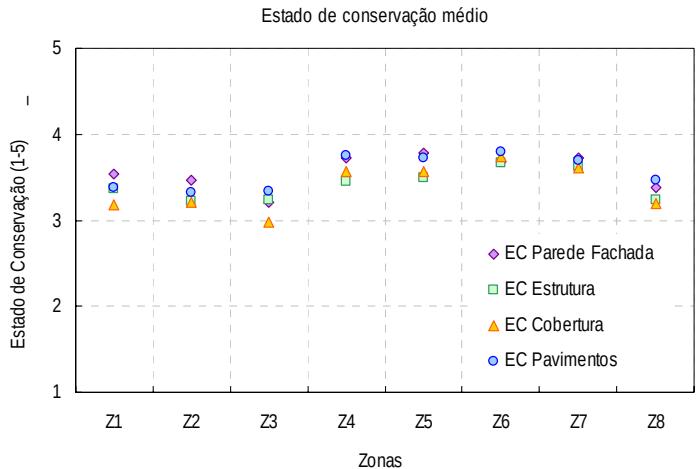
Correlação dos estados de conservação



Impulsos não equilibrados da estrutura da cobertura

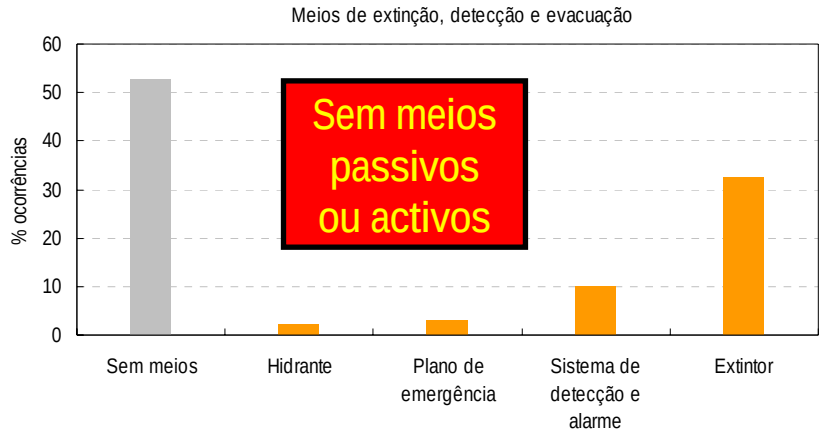


	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	Z7	Z8	Total
Impulso	1	1	10	13	3	14	6	6	54
Fragilização local	3	2	7	18	7	8	5	3	53
Impulso + fragilização local	0	0	3	6	2	2	4	2	19

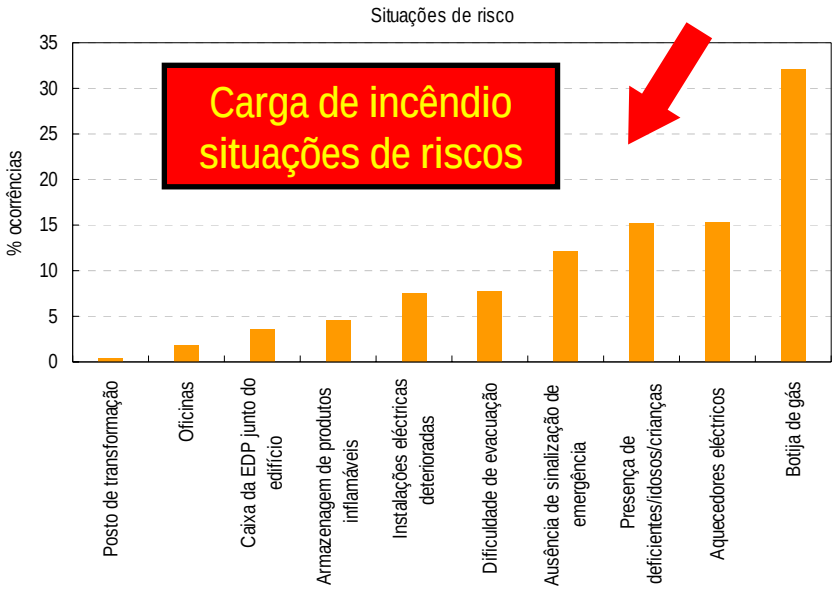


Base de dados e tratamento

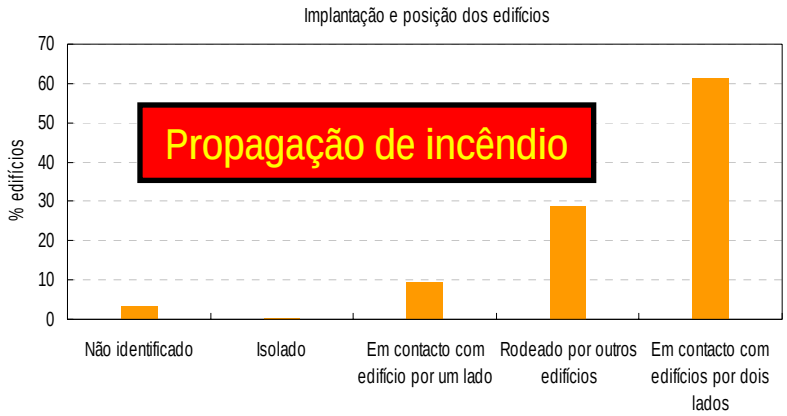
Segurança contra incêndio



Sem meios passivos ou activos



Carga de incêndio situações de riscos

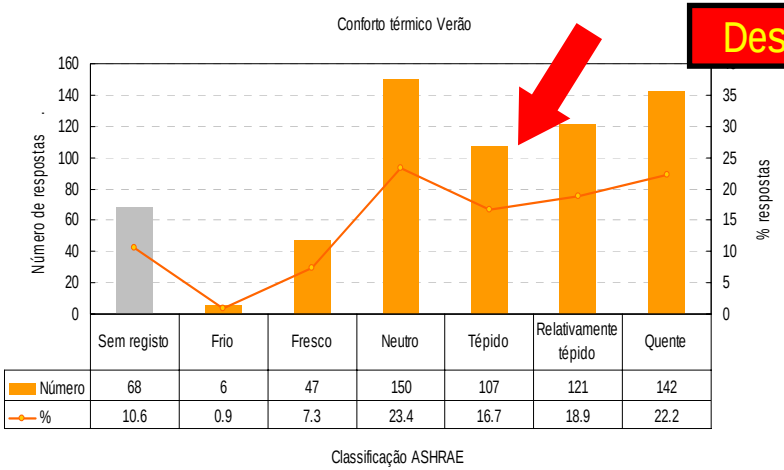


Propagação de incêndio

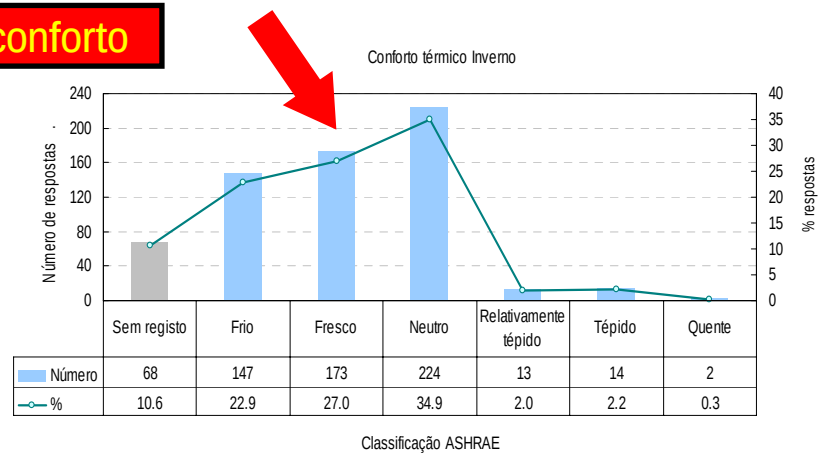
Base de dados e tratamento

Conforto térmico e acústico

Desconforto

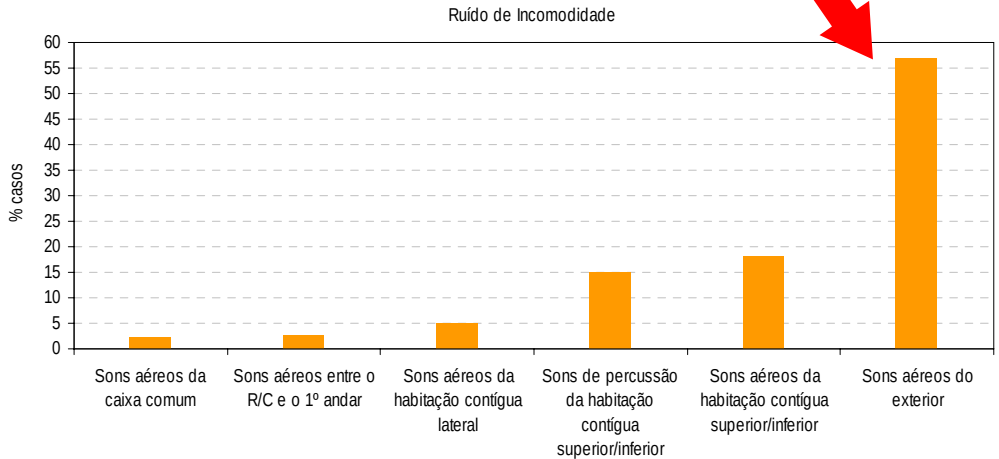


	Sem registo	Frio	Fresco	Neutro	Tépido	Relativamente tépido	Quente
Número	68	6	47	150	107	121	142
%	10.6	0.9	7.3	23.4	16.7	18.9	22.2



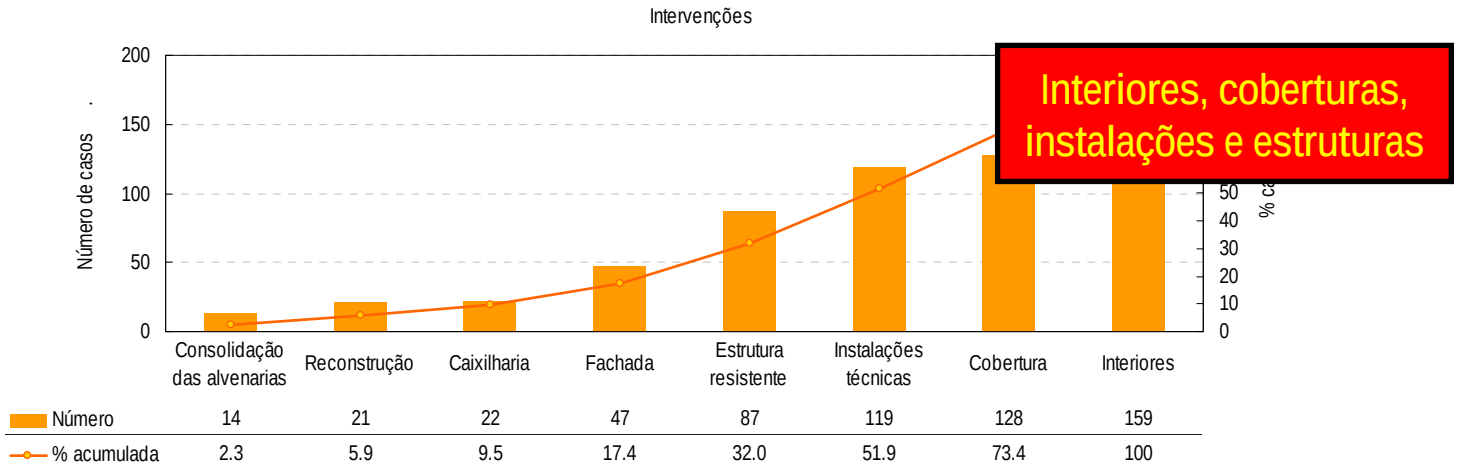
	Sem registo	Frio	Fresco	Neutro	Relativamente tépido	Tépido	Quente
Número	68	147	173	224	13	14	2
%	10.6	22.9	27.0	34.9	2.0	2.2	0.3

Ruído do exterior



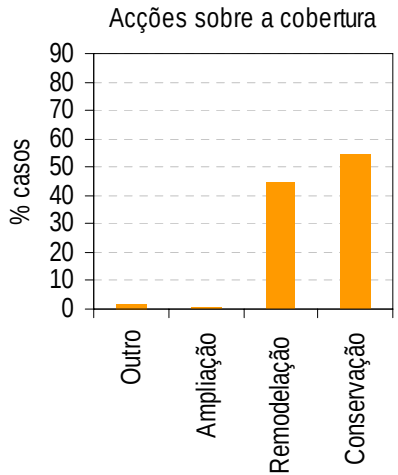
Base de dados e tratamento

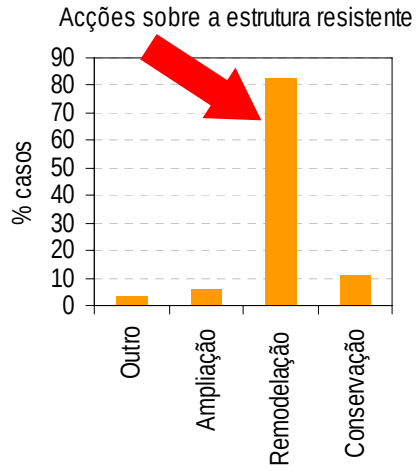
Acções de intervenções

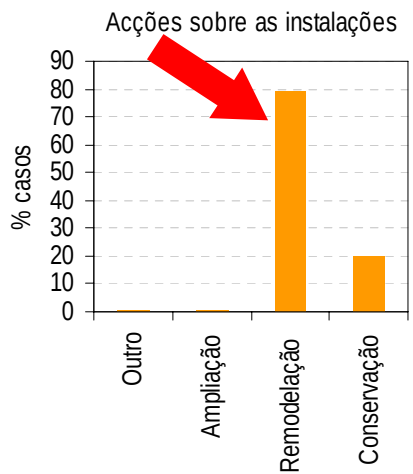


Interiores, coberturas, instalações e estruturas

Remodelações > Conservações







Deste inventário...

Uma análise com esta dimensão é singular no nosso país. Os resultados obtidos reflectem muito bem o estado do centro histórico de Coimbra. A realidade dos outros centros históricos é semelhante à verificada em Coimbra;

Esta caracterização é necessária para perceber o estado de conservação actual e o grau de intervenção que se poderá perspectivar;

Esta "imagem" muito detalhada da Baixa de Coimbra, possível pela análise dos dados permite a avaliação sustentada dos problemas mais relevantes em termos de habitabilidade e segurança dos seus edifícios e ainda a definição de ensaios e acções de inspecção complementares;

Caracterização construtiva e registo de anomalias

Alvenarias de pedra

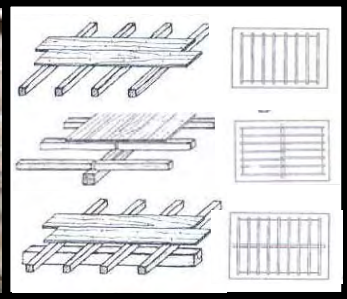
Alvenarias de pedra irregular ou surribada desordenada apresentam um assentamento aleatório e com juntas desalinhadas e irregulares, contudo com algum cuidado na execução (selecção e assentamento);

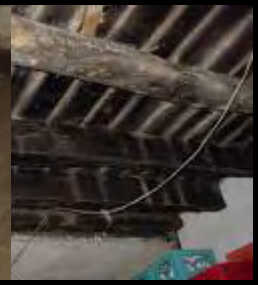
A heterogeneidade das alvenarias é bem visível, com mistura de pedra com tijolos maciços (utilizado no preenchimento e regularização do assentamento que não atravessam a parede na sua espessura);

As estruturas de madeira assumiram uma tridimensionalidade com a utilização de elementos embebidos nas paredes com enchimento de pedra irregular, argamassa e agregados (grés e arenitos) e cacos cerâmicos de menor dimensão (indústria cerâmica de Coimbra e arredores).

Caracterização construtiva e registo de anomalias

Pavimentos

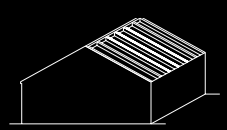
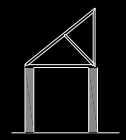
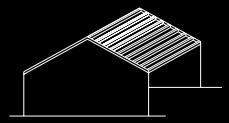
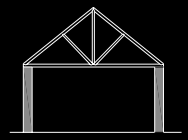




Os pavimentos de madeira representam a maioria e são constituídos de vigamentos de madeira paralelos numa direcção distanciados em média entre 0.3 a 0.6m no qual assenta um soalho pregado na direcção transversal. A distância entre o vigamento é um reflexo da melhor ou pior qualidade da habitação, isto é, a relação entre a dimensão do vigamento (largura do barrote) e o afastamento entre o vigamento na maioria dos casos era de 1:3 ou 1:4. As secções transversais das vigas e barrotes varia em função do vão, mas para vãos correntes (cerca de 3 a 3 a 3.5m) as dimensões são muito dispersas, variam entre 10 a 20cm para a largura e de 12 a 25cm para a altura. Para além desta variabilidade em dimensões medidas, as secções transversais das peças de madeira não são esquadriados (secção rectangular), são por vezes troncos circulares sem casca.

Caracterização construtiva e registo de anomalias

Coberturas

As estruturas das coberturas são na quase totalidade em madeira, existindo muitos poucos casos de outra tipologia de cobertura planas e de outras geometrias. Observou-se diferentes soluções estruturais das coberturas desde da configuração das asnas, elementos de contraventamento, inclusão de mansardas, lanternins, janelas, etc.

Pela inserção e configuração estreita dos edifícios em banda constituídas por duas águas, a solução estrutural é muito simples, consistindo em vigas/barrotes principais de madeira paralelos à fachada, descarregando sobre as paredes meeiras ou meãs e em outros casos para um lintel no topo das paredes de fachada, como se fossem asnas desprovidas de escoras, pendural e linha. Outra solução observada no caso desta geometria e dimensão, consiste na asna simples ou designada de "paládio".

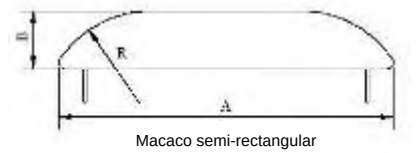
As dimensões das peças de madeira; nomeadamente as vigas ou o caso de asnas; as pernas, linhas, madres não obedecem pelas regras de construção aquando á construção destas soluções a nenhum critério especial se forem inferiores a 5m. No caso de serem superiores a esta dimensão teriam que respeitar dimensões de cálculo.

Ensaios de caracterização mecânica

Os ensaios com macacos planos permitem a caracterização da alvenaria para além da inspecção visual feita durante as inspecções aos edifícios.

Informação acerca do:

- Estado de tensão instalada nas paredes;
- Resistência à compressão;
- Módulo de elasticidade.

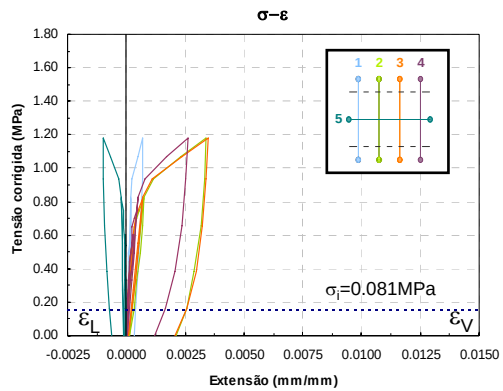


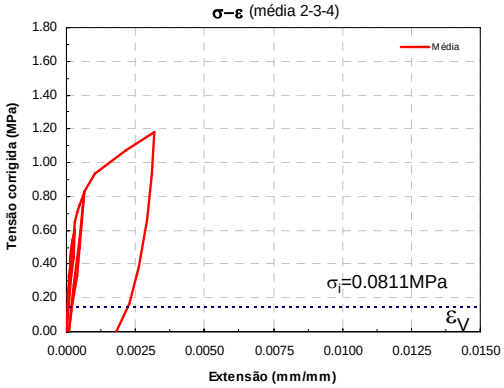
Macaco semi-rectangular

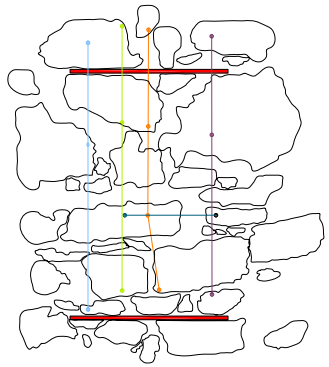
Procura-se assim criar bases que permitam a sustentação e promoção as acções de reabilitação e renovação tradicionais necessárias e adequadas, usando as paredes existentes, sensibilizando os técnicos para a preservação das suas características e respeito pelas estruturas originais dos edifícios.

Ensaio duplo – deformabilidade, resistência

Ensaio duplo 4, Alta da cidade, Exterior junto a um vão de porta







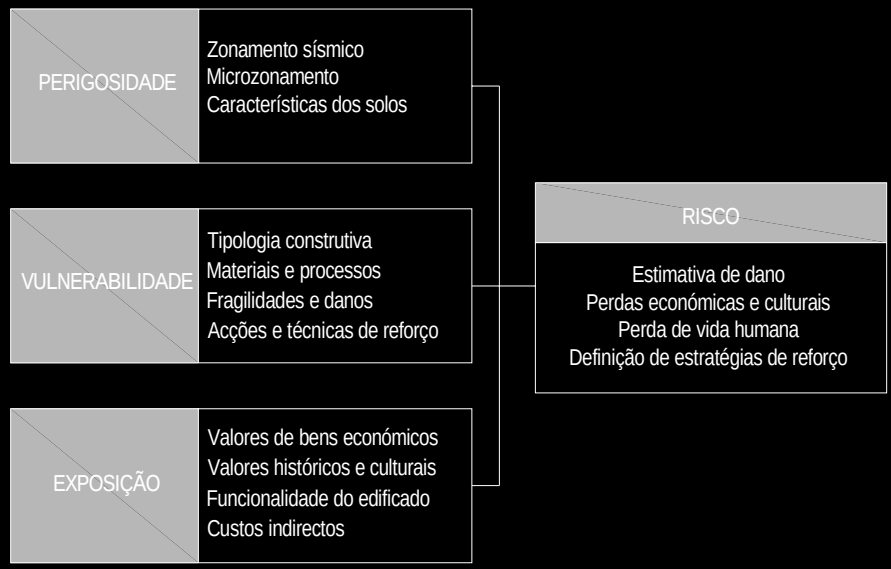
1.% Pedra	66.32	Macaco superior M8	K_a=0.6125
1.% Argamassa	32.70		K_m=0.8613
1.% Vazios	0.98	1. Macaco inferior M6	K_a=0.6579
1.Área total (m²)	0.236		K_m=0.8699
Tensão "in-situ", s_i (MPa)		0.081	
*Máximo valor da tensão atingida (MPa)		1.18	
Módulo de elasticidade, E_0 (MPa)		2941	
Coef. Poisson (regime elástico)		0.210	

Observações:
•1 – O registo do alinhamento 1 não foi utilizado devido ao calçamento deficiente do macaco inferior na zona deste alinhamento.
•2 – Percentagem de pedra elevada

Avaliação da vulnerabilidade sísmica

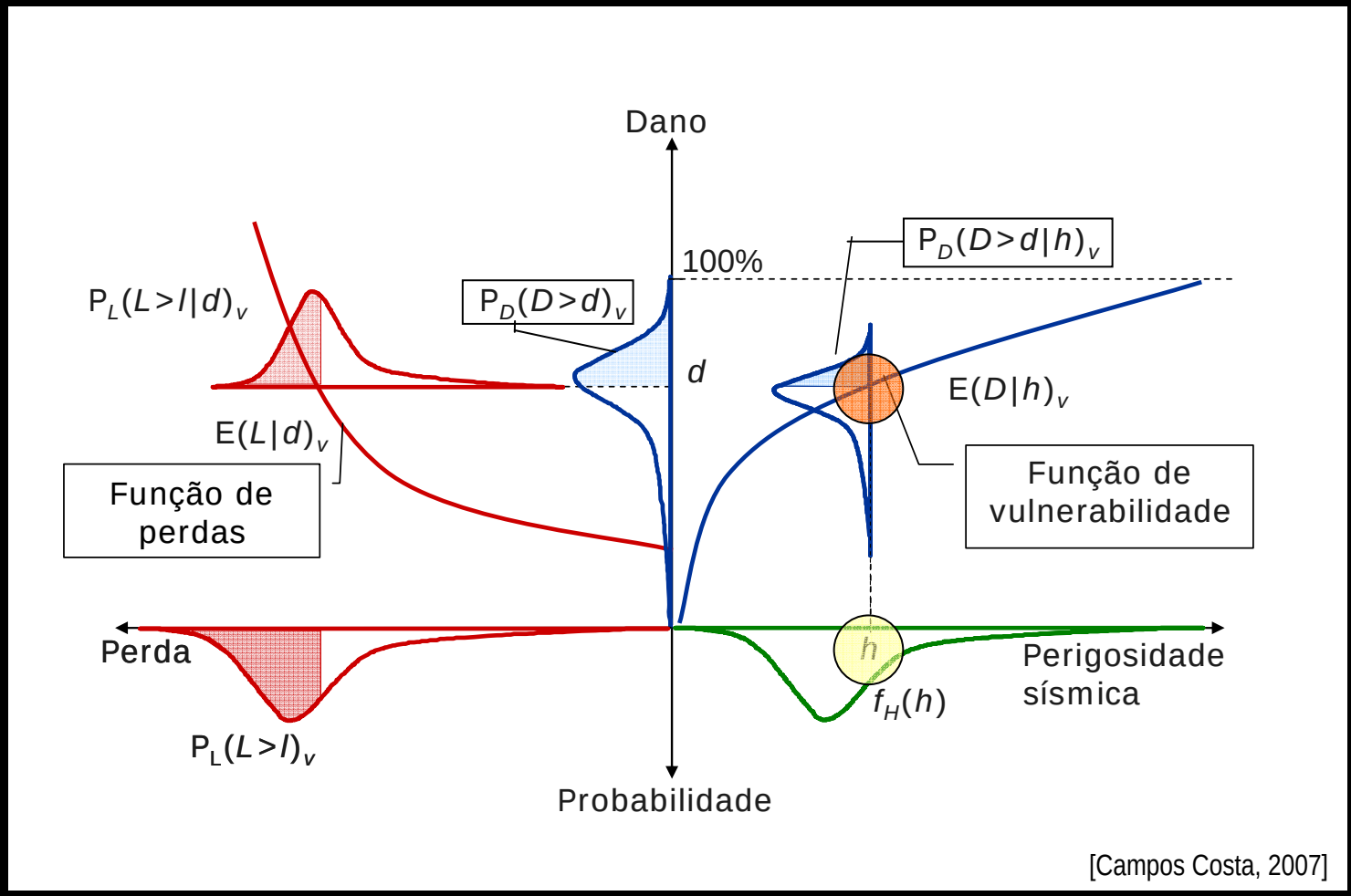
“ A crescente preocupação acerca da durabilidade, conservação e alteração de edifícios antigos em alvenaria em zonas urbanas, suscita a premência na avaliação da segurança e qualidade estrutural, particularmente à acção sísmica.

É largamente reconhecido que a vulnerabilidade sísmica da maioria dos centros históricos, com edifícios isentos de preocupações de resistência à acção sísmica é alta. A necessidade de catalogar edifícios de acordo com a sua vulnerabilidade, particularmente as construções tradicionais é uma acção chave em qualquer processo de renovação e reabilitação urbana.”



$$R_{ie}\,|_T = |\,(H_i \otimes V_e) \otimes E\,|_T$$

Avaliação da vulnerabilidade sísmica: formulação



[Campos Costa, 2007]

Vulnerabilidade : função da escala de operacionalidade

679 edifícios inspeccionados

Estado de degradação muito avançado

Avaliação da vulnerabilidade

Oportunidade para a gestão de risco

Ausência de conhecimento do comportamento à acção sísmica

Orientação e definição de estratégias de reforço

Vulnerabilidade : função da escala de operacionalidade

679 edifícios inspeccionados

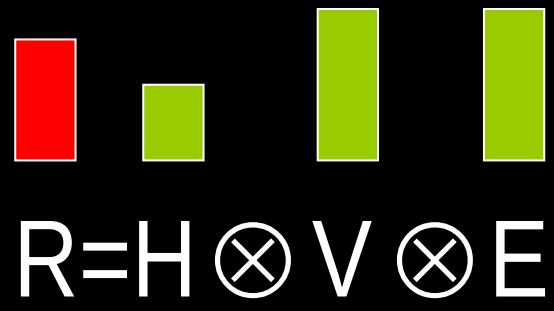
Estado de degradação muito avançado

Avaliação da vulnerabilidade

Oportunidade para a gestão de risco

Ausência de conhecimento do comportamento à acção sísmica

Orientação e definição de estratégias de reforço



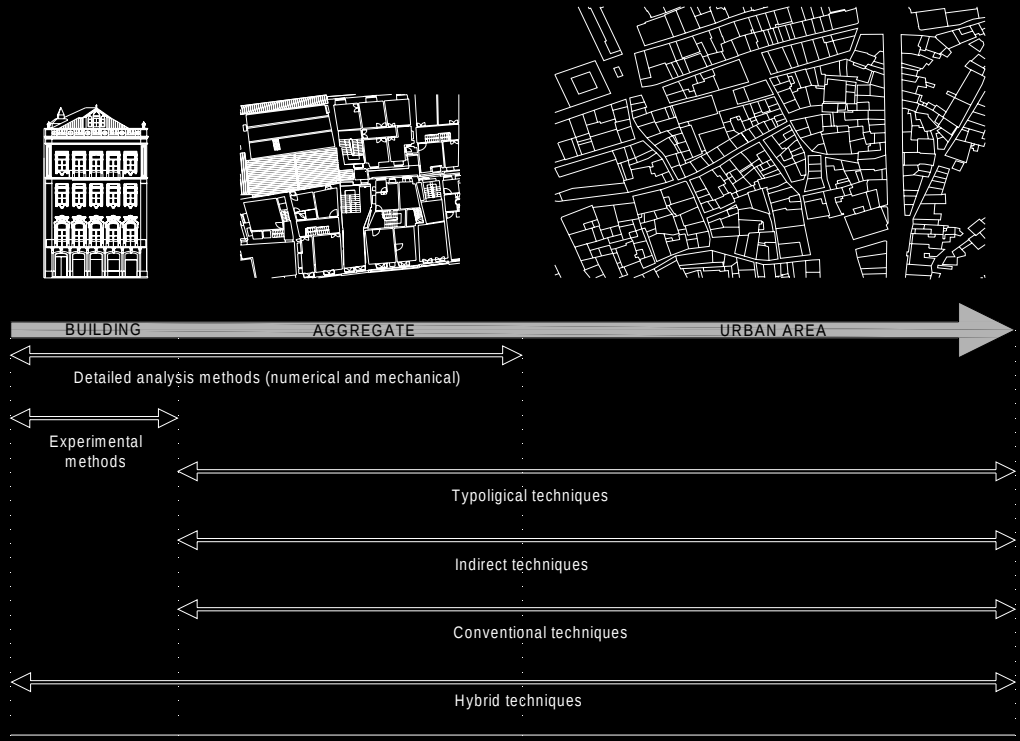
Perigosidade : Sismos sentidos no distrito de Coimbra e arredores desde 1997

Ano	Data	Local	Magnitude (Grau)
1997	09-03	Figueira da Foz	2.3
1997	27-08	Porto de Mós	2.3
1997	01-09	Pombal	2.0
1997	01-11	Figueira da Foz	2.8
1998	11-02	Pombal	2.0
1998	01-03	Soure	2.5
1998	25-04	Leiria	2.3
1998	19-08	Leiria	2.2
1998	03-09	Leiria	2.4
1999	30-04	S. Pedro de Moel	4.5 (IV/V)
1999	28-06	Pombal	2.0
1999	18-08	Pombal	2.1
1999	22-09	Porto de Mós	3.4 (III)
2001	10-04	Leiria	4.1 (IV)
2001	01-11	Mira	2.0
2003	14-03	Pombal	2.1
2005	01-12	Soure	3.8 (III)
2005	23-04	Anadia	2.4
2007	18-08	Pombal	2.1

Baixa a moderada perigosidade

Vulnerabilidade : função da escala de operacionalidade

A introdução de metodologias simplificadas de avaliação da vulnerabilidade sísmica dos edifícios tem sido desenvolvido por vários autores, "Rapid screening", Metodologia ATC-21 [FEMA], Ficha GNDT II [CNR-GNDT-INGV] e Macroseimic method [Giovinazzi e Lagomarsino], com especial intensidade em Itália, Japão e nos Estados Unidos devido à forte perigosidade dos seus territórios



Métodos directos — **Tipológicos**, **Mecânicos**

Métodos indirectos

Métodos convencionais

Métodos híbridos

(Classificação por Corsanego & Petrini)

Vulnerabilidade : níveis

Vulnerabilidade funcional

Vulnerabilidade não-estrutural

Vulnerabilidade estrutural

Vulnerabilidade : formas de quantificação

Classes de vulnerabilidade

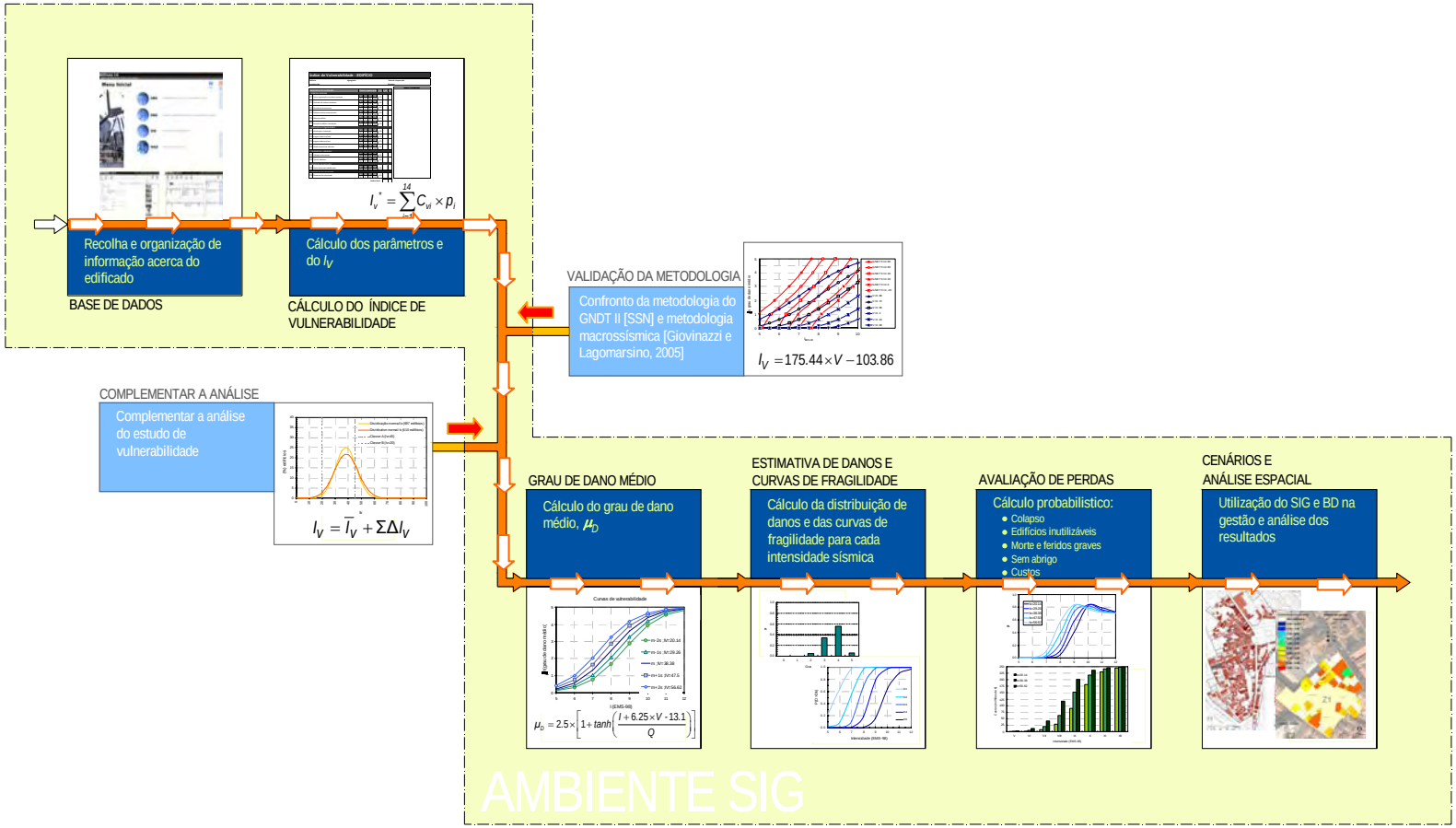
Índices de vulnerabilidade

Matrizes de probabilidade de dano

Curvas / funções de vulnerabilidade

Curvas de fragilidade

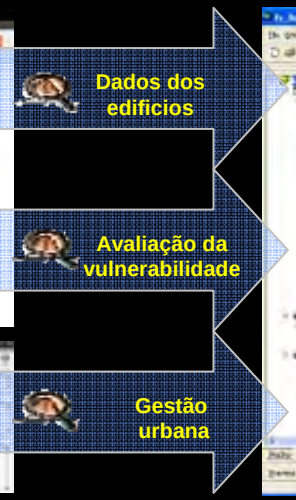
Processo: Avaliação da vulnerabilidade, estimativa de dano e perdas

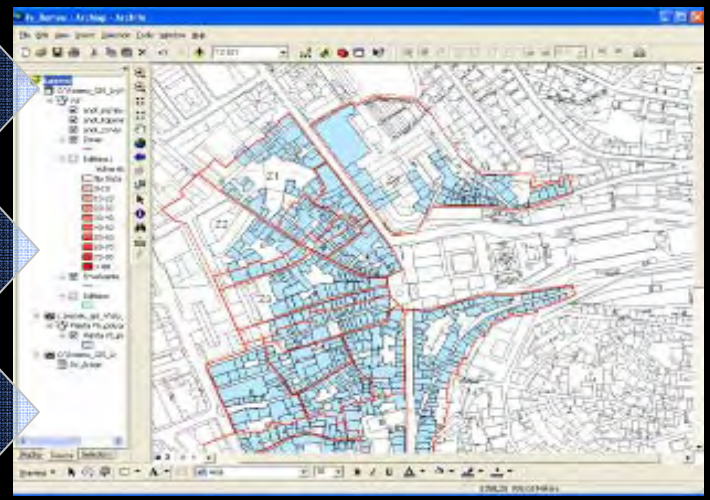


Informação: Sistemas de informação e bases de dados

i. **Na gestão do edificado de centros históricos é necessário recorrer a "ferramentas" que façam a organização da informação. O apoio à decisão não se consegue fazer sem uma analise quantificada e uma visão integral da área em estudo.**

ii. **Uma ferramenta de representação espacial, ArcGis 9.2 ligada a uma base de dados das características do edificado (particularmente dos dados utilizados na avaliação da vulnerabilidade sísmica) é essencial. O uso de um sistema de informação georeferenciada, permite associar a disposição e localização dos edifícios com a informação da vulnerabilidade e ainda o cruzamento com outro níveis de informação, visualização de cenários de risco e ainda analises de sensibilidade**





Metodologia de avaliação: Princípios

A metodologia criada para avaliar a vulnerabilidade do centro histórico de Coimbra, tendo em conta a escala e número de edifícios a avaliar é baseada no tratamento de informação recolhida no terreno durante o processo de inspecção e levantamento.

A formulação da metodologia é semelhante à metodologias existentes (GNDT, Macroseimic method), mas melhorada e adaptada e com um nível de detalhe muito superior possível pelo apoio do levantamento exaustivo efectuado do edificado da Baixa. Este nível de detalhe desta metodologia apresenta-se possível pelo facto de estar inserida num processo com outros objectivos ao nível da renovação urbana, aproveitando recursos e destacando-se das metodologias de primeiro nível pela avaliação quantitativa e rigorosa de alguns parâmetros.

As diferenças em relação à metodologia original, GNDT II, são essencialmente:

i) o maior nível de detalhe na avaliação de alguns parâmetros;
ii) a redefinição e ajuste dos critérios de classificação dos parâmetros originais;
iii) a introdução de três novos parâmetros considerados fundamentais na vulnerabilidade das construções de alvenaria.

Metodologia de avaliação: I_v

14 aspectos

	PARÂMETROS	Classe C_{vi}				Peso
		A	B	C	D	p_i
1	Tipo sistema resistente	0	5	20	50	0.75
2	Qualidade do sistema resistente	0	5	20	50	1.00
3	Resistência convencional	0	5	20	50	1.50
4	Distância máxima entre paredes	0	5	20	50	0.50
5	Número de pisos	0	5	20	50	1.50
6	Posição do edifício e fundações	0	5	20	50	0.75
7	Localização e interacção	0	5	20	50	1.50
8	Irregularidade em planta	0	5	20	50	0.75
9	Irregularidade em altura	0	5	20	50	0.75
10	Desalinhamento de aberturas	0	5	20	50	0.50
11	Diafragmas horizontais	0	5	20	50	1.00
12	Tipo de cobertura	0	5	20	50	1.00
13	Danos estruturais e estado de conservação	0	5	20	50	1.00
14	Elementos não estruturais	0	0	20	50	0.50

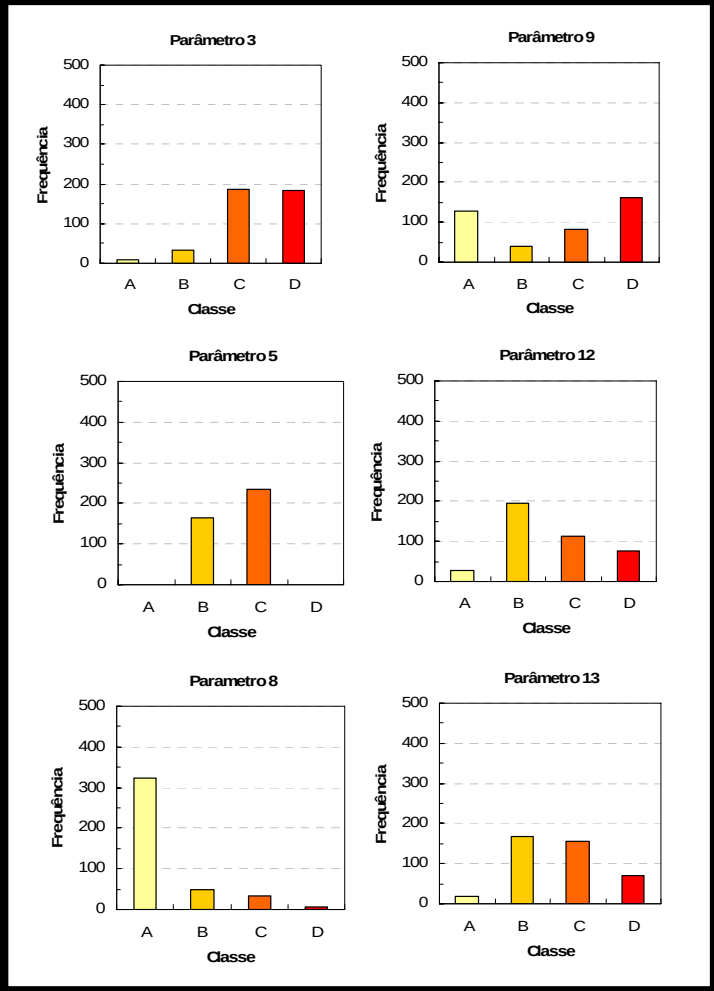
ÍNDICE DE VULNERABILIDADE

$$I_v^* = \sum_{i=1}^{14} C_{vi} \times p_i$$

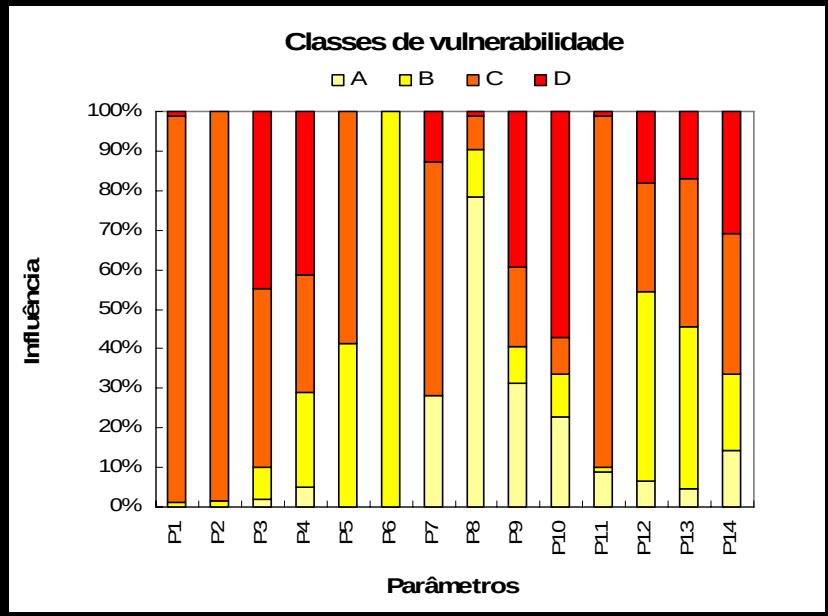
$$0 \le I_v^* \le 650$$

I_v normalizado => $0 \le I_v \le 100$

Metodologia de avaliação: Parâmetros



Parâmetros mais influentes?



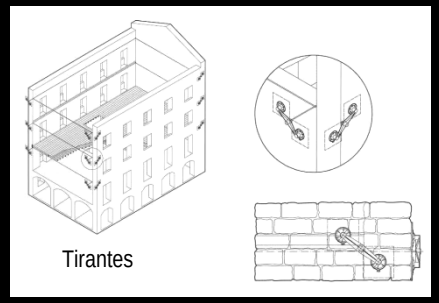
Metodologia de avaliação: Parâmetros

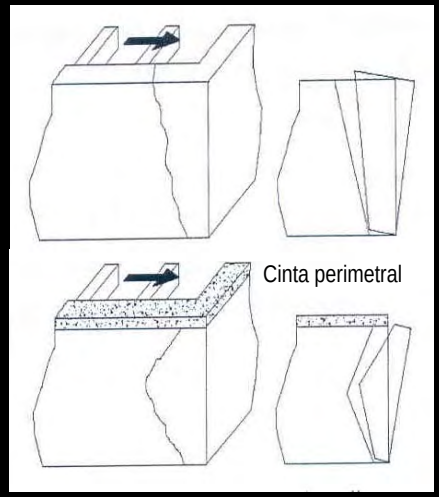
Parâmetro 1: Tipo de organização do sistema resistente

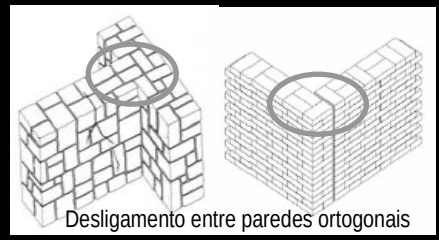
A	Edifício construído de acordo com as recomendações[1] de construção sismo-resistente, reforço ou consolidação de edifícios em alvenaria de acordo com a normativa de reforço ou recuperação[2] referente em documentos europeus [normas europeias (italiana), EC6 e EC8, etc..] garantindo assim as condições de ligação e conexão entre elementos verticais e os elementos verticais e horizontais eficazes.
B	O edifício apresenta ligações com bom aparelho e embricamento entre paredes ortogonais, capazes de transmitir cargas verticais de corte (caso de cunhais em cantaria). Ao nível de todos os pisos de forma a garantir a solidarização entre paredes, são presentes cintas em todo o perímetro ou tirantes de amarração bem dispostas, secção suficiente e boa amarração (dependente da espessuras da parede) e tensionadas (no caso das alvenarias os tirantes são passivos, mas tensionadas de forma a promover a mobilização do sistema se solicitado) .
C	O edifício não apresenta ligações definidas na classe B em nenhum ou apenas alguns níveis, mas tem com boa ligação entre as suas paredes ortogonais resistentes garantida pelo bom aparelho e embricamento em toda a largura das paredes.
D	O edifício não tem paredes resistentes bem unidas. Ausência total de tirantes e cintas.

[1] Nota: Nunca existiu um regulamento especifico para as alvenarias no nosso país, apenas se referem algumas boas práticas em manuais de construção: Luís Pereira de Sousa, Cansado Carvalho, Outro

[2] Nota: No caso de uma construção intervencionada a sua classificação e feita em função da eficácia das suas ligações segundo a descrição feita.


Tirantes


Cinta perimetral


Desligamento entre paredes ortogonais

Metodologia de avaliação: Parâmetros

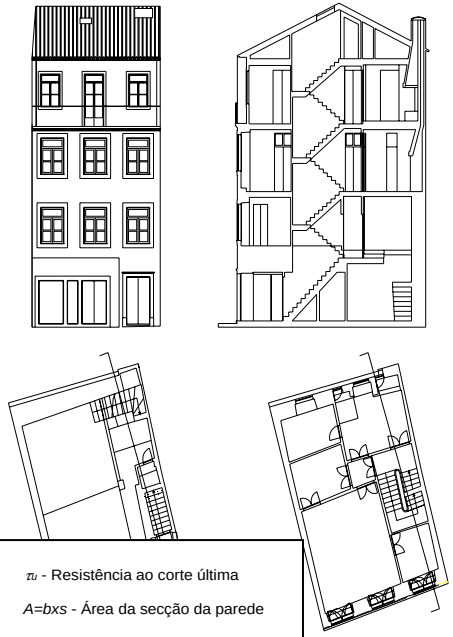
Parâmetro 2: Qualidade do sistema resistente

A	Alvenaria de tijolo de boa qualidade (maciço ou perfurado até 45%) ou alvenaria de pedra bem talhada com unidades homogéneas e de tamanhos constantes em toda a extensão das paredes. Alvenaria de pedras irregulares bem argamassada e travada/embricadas, existindo ligação transversal entre as duas faces da parede;
B	Alvenaria de tijolo (perfuração >45%) ou de pedra bem talhada com unidades pouco homogéneas por toda extensão das paredes. Alvenaria de pedras irregulares com ligação transversal entra as duas faces da parede;
C	Alvenaria de tijolo de baixa qualidade e com irregularidade (assentamento e ligação). Alvenaria de pedra com unidades não trabalhadas e de dimensões heterogéneas. Alvenaria de pedras irregular sem ligação transversal, no entanto bem argamassada e travada.
D	Alvenaria de tijolo de má qualidade com incrustação de fragmentos de pedra. Alvenaria de pedra com unidades muito irregulares e sem travamento cuidado (criando vazios). Alvenaria de pedras irregulares sem ligação transversal e mal argamassada e travada.

Metodologia de avaliação: Parâmetros

Parâmetro 3: Resistência convencional

A	Estrutura com α≥ 1.0
B	Estrutura com 0.6 ≤ α < 1.0
C	Estrutura com 0.4 ≤ α ≤ 0.6
D	Estrutura com α < 0.4
α=C/0.4 (valor normalizado da resistência)	



1º, 2º, 3º

Cálculo da resistência convencional (C_{conv})

$$C_{conv} = \frac{a_0 \times \tau_k}{q \times N}\sqrt{1+\frac{q \times N}{1{,}5 \times a_0 \times \tau_k \times (1+\gamma)}}$$

Peso médio de um piso por unidade de área coberta (inclui o peso das paredes e dos pavimentos)

$$q = \frac{(A_x + A_y) \times h \times p_m}{A_t} + p_s$$

τ_k=60kPa (valor de referência)

A_{min}=mín {A_x, A_y}

$A_{máx}$=máx {A_x, A_y}

$a_0 = A_{mín} / A_t$

$\gamma = A_{mín} / A_{máx}$

$A_{mín}$ - Área mínima (m²)

$A_{máx}$ - Área máxima (m²)

A_t - Área coberta (m²)

A_x, A_y - Área total de parede resistente na direcção XX e YY, respectivamente (m²)

h - Altura média entre pisos

p_m - Peso específico da alvenaria (kN/m³)

p_s - Peso por unidade de área de pavimento (kN/m²)

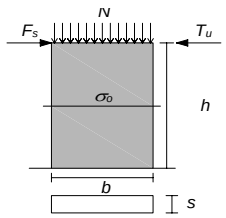
mentos verticais com mais de 15cm de espessura, como recomendado no EC6 [CEN, 2005]

Força sísmica (definida segundo a norma italiana D.M. 16.01.1996, [1996])

$$F_s = C \times R \times \varepsilon \times \beta \times \gamma \times I \times W$$

C - coeficiente de intensidade sísmica
R - coeficiente de resposta
ε - coeficiente de fundação
β - coeficiente de estrutura
γ - coeficiente de distribuição da acção
I - coeficiente de protecção
W - peso total

$$F_s = 0.4 \times W$$



Verificação sísmica:

$$T_u \geq 0.4 \times W;$$

τ_u - Resistência ao corte última

$A=bxs$ - Área da secção da parede

τ_k - Resistência ao corte característica

$\sigma_0=N/A$ - Tensão normal vertical

$$\tau_u = A \times \tau_k \sqrt{1+\frac{\sigma_0}{1.5 \times \tau_k}}$$

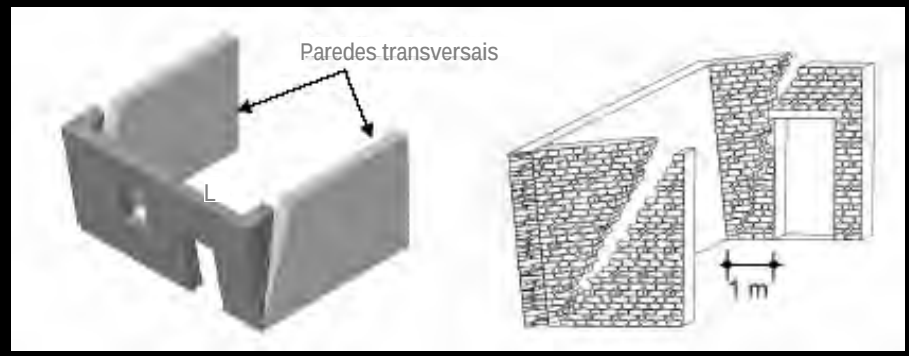
(Turnšek e Čačovič, 1971)

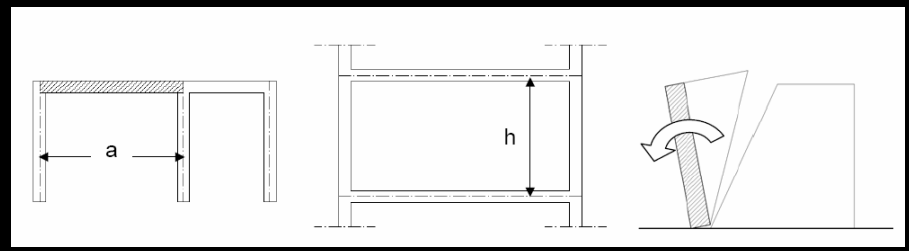
Metodologia de avaliação: Parâmetros

Parâmetro 4: Distância máxima entre paredes

Relações geométricas		
A	$\left(\frac{h_0}{s}\right)_{máx} \leq 10$	$\left(\frac{L}{s}\right)_{máx} \leq 15$
B	$10 < \left(\frac{h_0}{s}\right)_{máx} \leq 15$	$15 < \left(\frac{L}{s}\right)_{máx} \leq 18$
C	$15 < \left(\frac{h_0}{s}\right)_{máx} \leq 20$	$18 < \left(\frac{L}{s}\right)_{máx} \leq 25$
D	$\left(\frac{h_0}{s}\right)_{máx} > 20$	$\left(\frac{L}{s}\right)_{máx} > 25$

Nota: No caso de ao nível da cobertura não estar bem ligada, a altura deve ser considerada h_0.

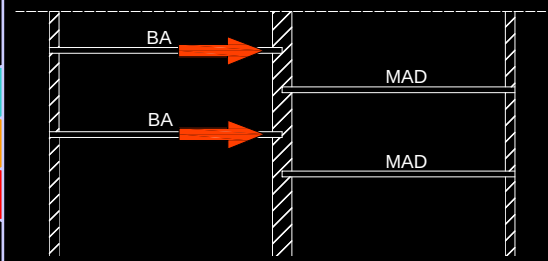


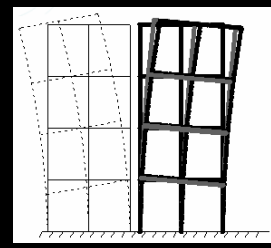


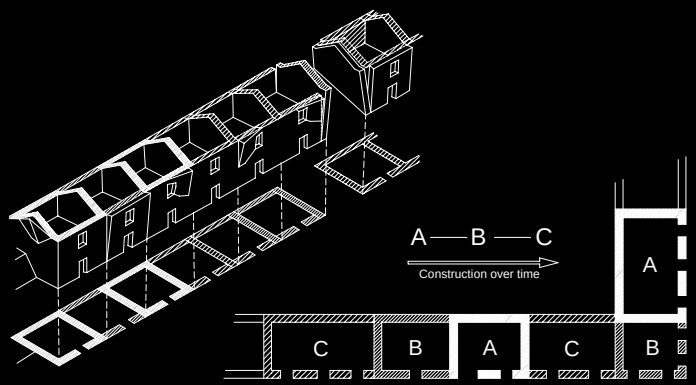
Metodologia de avaliação: Parâmetros

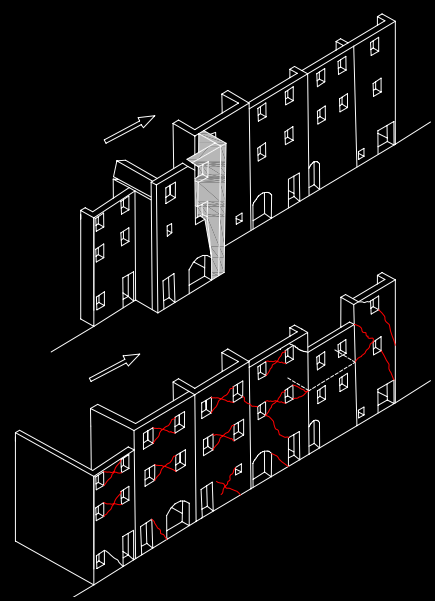
Parâmetro 7: Localização e interacção com outros edifícios

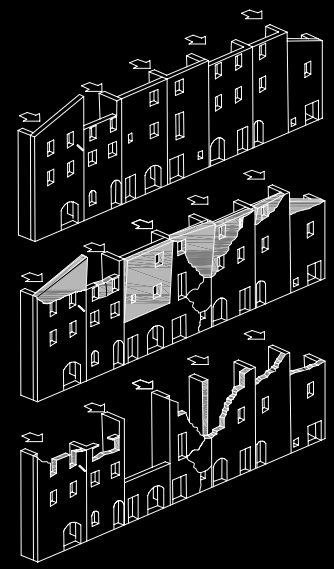
Localização	CLASSE	Desníveis dos pavimentos (agravamento da classe)
Edifício banda meio	A	
Edifício isolado	B	
Edifício gaveto	C	
Edifício banda extremo	D	--









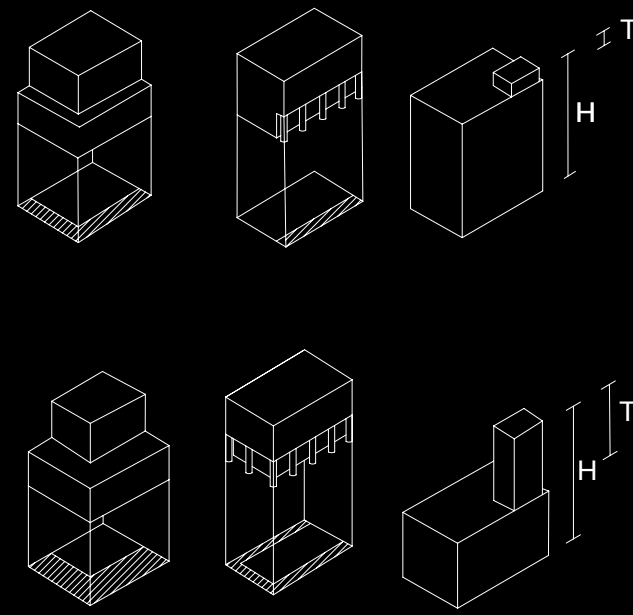


Metodologia de avaliação: Parâmetros

Parâmetro 9: Irregularidade em altura

	Critérios geométricos	Critério da rigidez
A	Edifícios com distribuição de massa e área de elementos resistentes em altura praticamente uniforme em toda a sua altura. Edifícios com representem uma redução de massa ou área inferior a 10% da área em planta (ΔM/M<10% ou ΔA/A<10%).	Variação de rigidez entre pisos consecutivos (ΔK<±10%).
B	Edifícios uma variação de área superior a 10% e inferior a 20% da área em planta 10%≤ΔM/M<20% ou 10%≤ΔA/A<20%). Edifício com uma descontinuidade em altura (torre) inferior a 10% da altura total do edifício avaliada pelo quociente H/T. Edifícios com galeria ou arcada de modesta dimensão, inferior a 10% da área total do piso.	Variação de rigidez entre pisos consecutivos (±10%<ΔK<±20%).
C	Edifícios com recuos que representem uma variação de área superior a 20% da área em planta ΔM/M>20% ou ΔA/A>20%). Edifício com uma descontinuidade em altura (torre) superior a 10% e inferior ou igual 40% da altura total do edifício avaliada pelo quociente H/T. Edifícios com galeria ou arcada com área superior a 10% e inferior ou igual a 20% da área total do piso.	Variação de rigidez entre pisos consecutivos (±20%<ΔK≤±30%).
D	Edifícios com recuos que representem uma variação de área superior a 30% da área em planta ΔM/M>30% ou ΔA/A>30%). Edifício com uma descontinuidade em altura (torre) superior a 40% da altura total do edifício. Edifícios com galeria ou arcada com área superior a 20% da área total do piso.	Variação de rigidez entre pisos consecutivos (ΔK>±30%).

(indicação da classe)



Redução de área

Superfície porticada

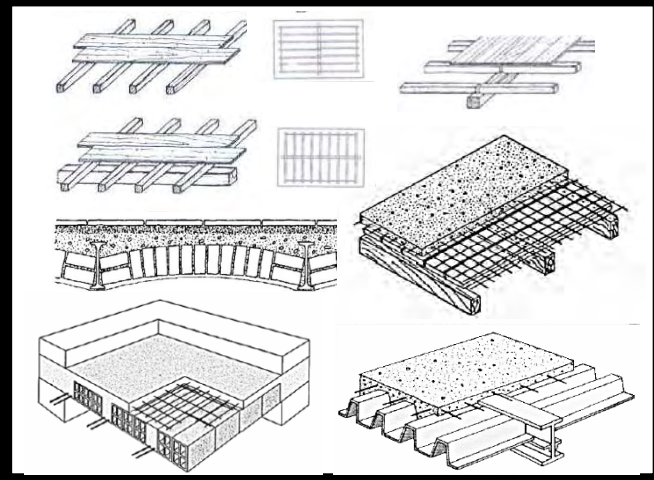
Existência de torres

Metodologia de avaliação: Parâmetros

Parâmetro 11: Diafragmas horizontais

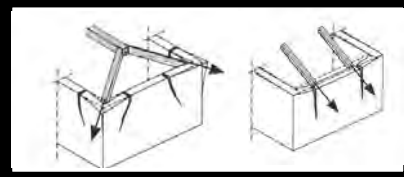
Pavimentos	CLASSE	FZA ou DA ou FS
Rígido ou semi-rígido e bem ligado	A	B
Deformável e bem ligado	B	C
Rígido ou semi-rígido e mal ligado	C	D
Deformável e mal ligado	D	--

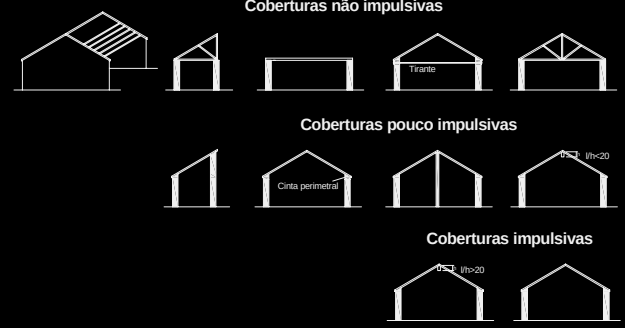
FZA – Fragilização na zona de apoio, DA – Sinais de deformação, FS – Falta segurança à circulação



Parâmetro 12: Coberturas

Impulso	Cinta perimetral	Tirantes	CLASSE	Estado de conservação	
				Mau	Péssimo
Não impulsivo	1 (Sim)	1 – 0	A		
Não impulsivo	1 – 0	1	A		
Não impulsivo	0 (Não)	0	B		
Pouco impulsivo	1	1 – 0	B		
Pouco impulsivo	1 – 0	1	B		
Pouco impulsivo	0	0	C		
Impulsivo	1	1 – 0	C		
Impulsivo	1 – 0	1	C		
Impulsivo	0	0	D	---	--



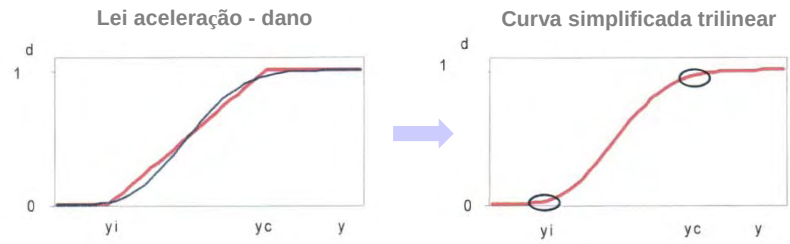


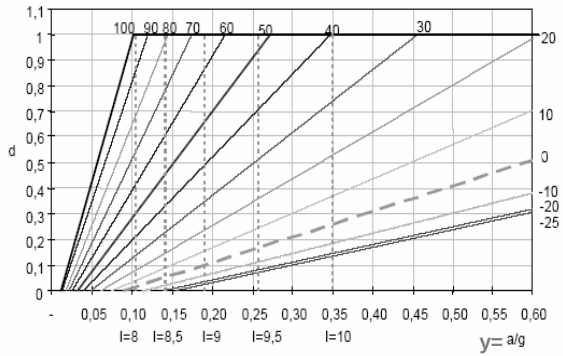
Metodologia de avaliação: Validação

Na essência os parâmetros mais importantes não são significativamente modificados e semelhante à metodologia do GNDT permitindo que as relações estabelecidas entre a vulnerabilidade avaliada e os danos observados sejam válidas no caso da presente metodologia, já que não existem dados, nem correlações desta natureza para o edificado português.

A validação faz-se através da comparação das funções de vulnerabilidade.

Curvas de vulnerabilidade de Petrini & Benedetti (1994) exprimem um índice de dano económico, d_e, normalizado numa escala (0≤d≤1).



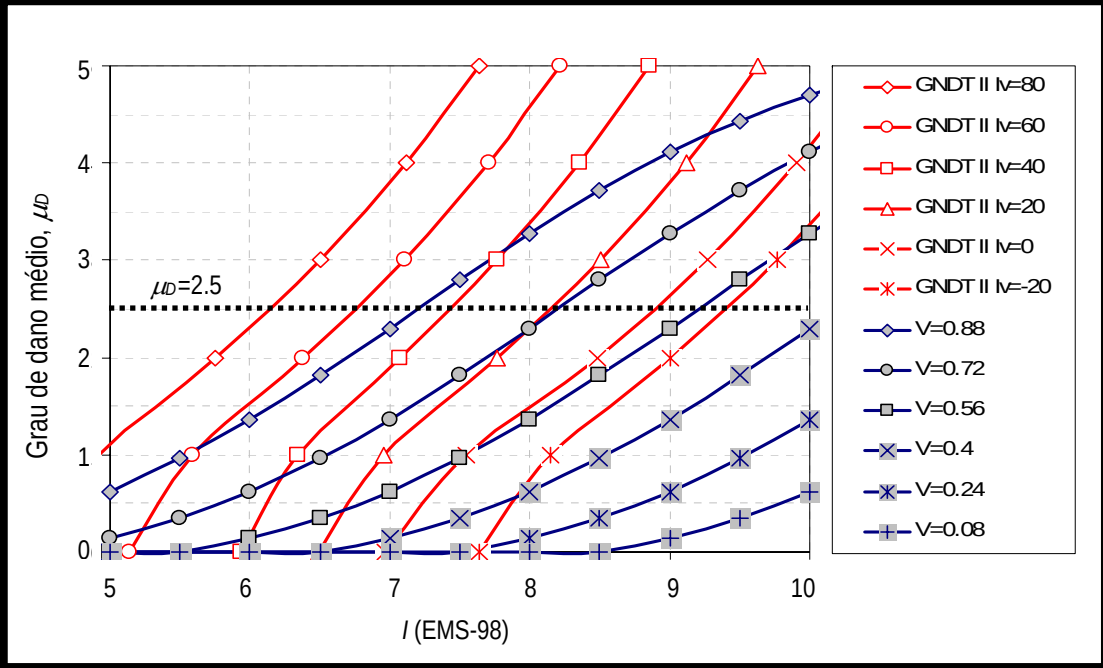


$$ln(y) = a \times I_{MCS} - b$$ com a = 0.602, b = 7.073 [Guagenti e Petrini]

$$I_{MSK} = 0.7344 + 0.8136 \times I_{MCS}$$ [Margotini *et al.*]

Metodologia de avaliação: Validação

Correlação entre os índices de vulnerabilidade das duas metodologias



Método macrossísmico	Classe A (V = 0.88)	Classe B (V = 0.72)	Classe C (V = 0.56)
Metodologia GNDT II	I_v = 45	I_v = 20	I_v = -5

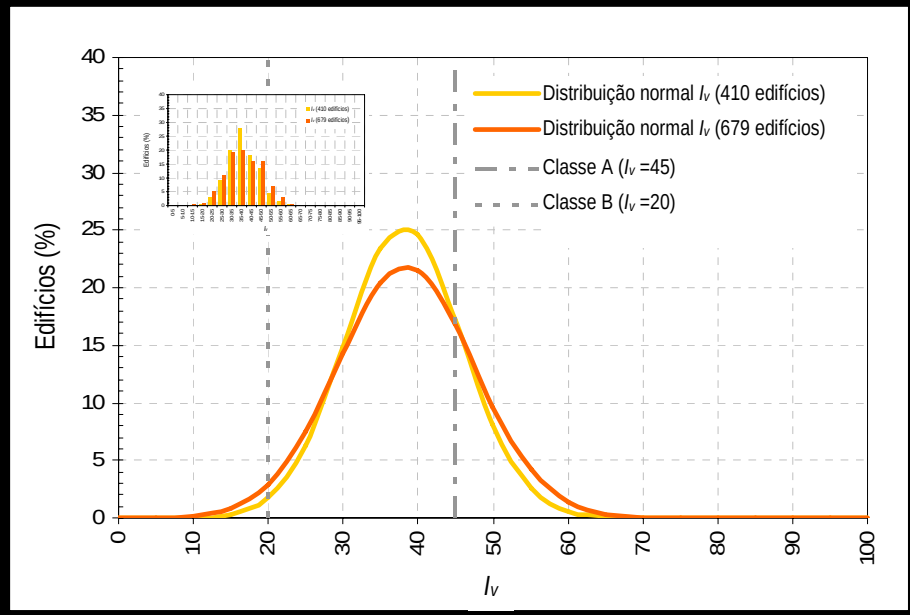
$$V = 0.592 + 0.0057 \times I_V$$

Metodologia de avaliação: Resultados

A avaliação da vulnerabilidade foi efectuada em duas fases:

Numa *primeira fase* uma avaliação da vulnerabilidade par os edifícios com informação detalhada;

Numa *segunda fase* a avaliação da vulnerabilidade do edificado sem detalhe de informação de forma mais expedita com base nos resultados médios obtidos da avaliação feita na primeira fase e com uso de factores de modificação, completando assim a avaliação de toda área do projecto.

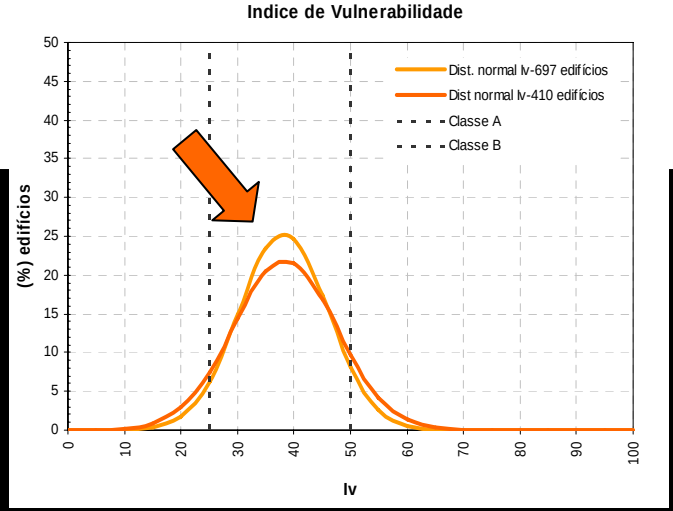


Iv – Índice de vulnerabilidade	Classe EMS 98	Tipologia EMS 98
38.38	A e B (mais provável)	"Pedra irregular e Pedra simples"

Metodologia de avaliação: Completar a avaliação

$$I_V = \overline{I}_V + \Sigma \Delta I_V$$

	Classe de Vulnerabilidade, C_{vi}			
	0	5	20	50
Factores modificadores do índice de vulnerabilidade	A	B	C	D
P5 - Número de pisos	-4.62	-3.46	0.00	6.92
P6 - Posição do edifício e fundações	-0.58	0.00	1.73	5.19
P7 - Localização e interacção	-1.15	0.00	3.46	10.38
P8 - Irregularidade em planta	-2.31	-1.73	0.00	3.46
P9 - Irregularidade em altura	-2.31	-1.73	0.00	3.46
P12 - Tipo de cobertura	-3.08	-2.31	0.00	4.62
P13 - Danos estruturais identificados	-3.08	-2.31	0.00	4.62
Amplitude máxima de modificação, ΣI_v	-17.12	-11.54	5.19	38.65



Pontuação do factor modificador:

$$\frac{p_i}{\sum_{i=1}^{7} p_i} \times (C_{vi} - \overline{C}_{vi})$$

p_i : Peso do parâmetro i, já definido

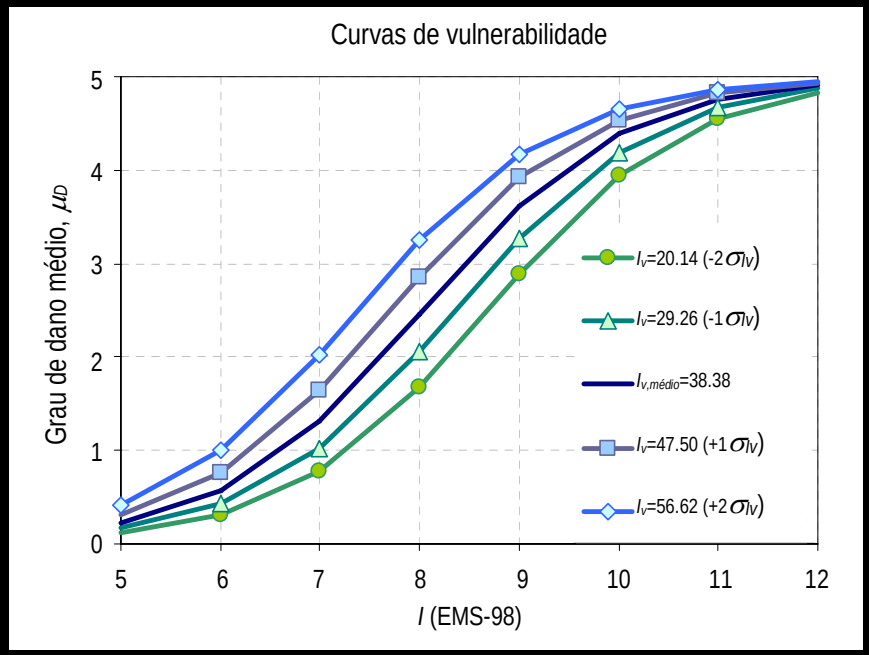
$\sum_{i=1}^{7} p_i$: Soma dos pesos de todos os parâmetros

C_{vi} : Classe do parâmetro modificador

$\overline{C}_{vi}$: Classe de vulnerabilidade média do parâmetro, i(*)

* - definido na análise detalhada

Metodologia de avaliação: Curvas de fragilidade

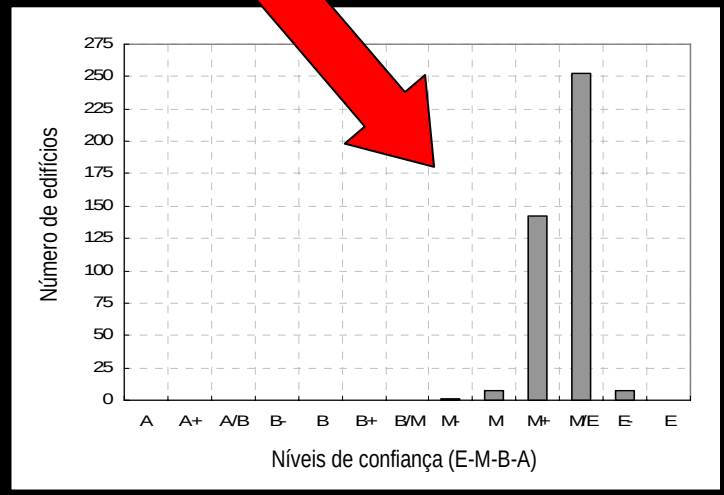


E – Elevada

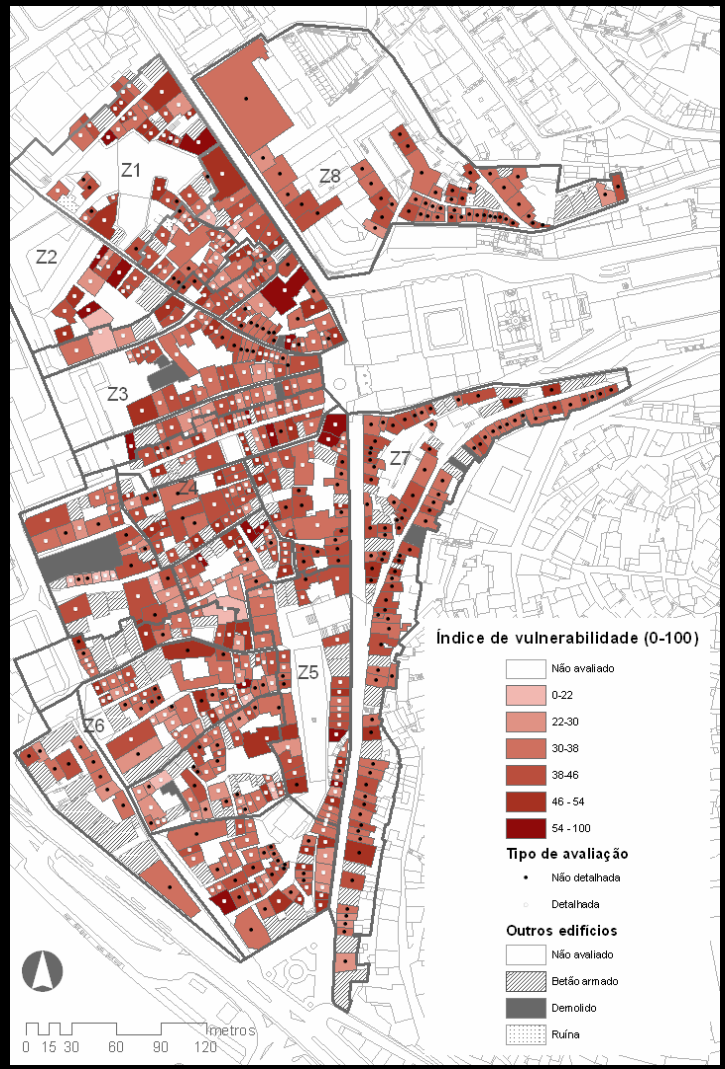
M – Média

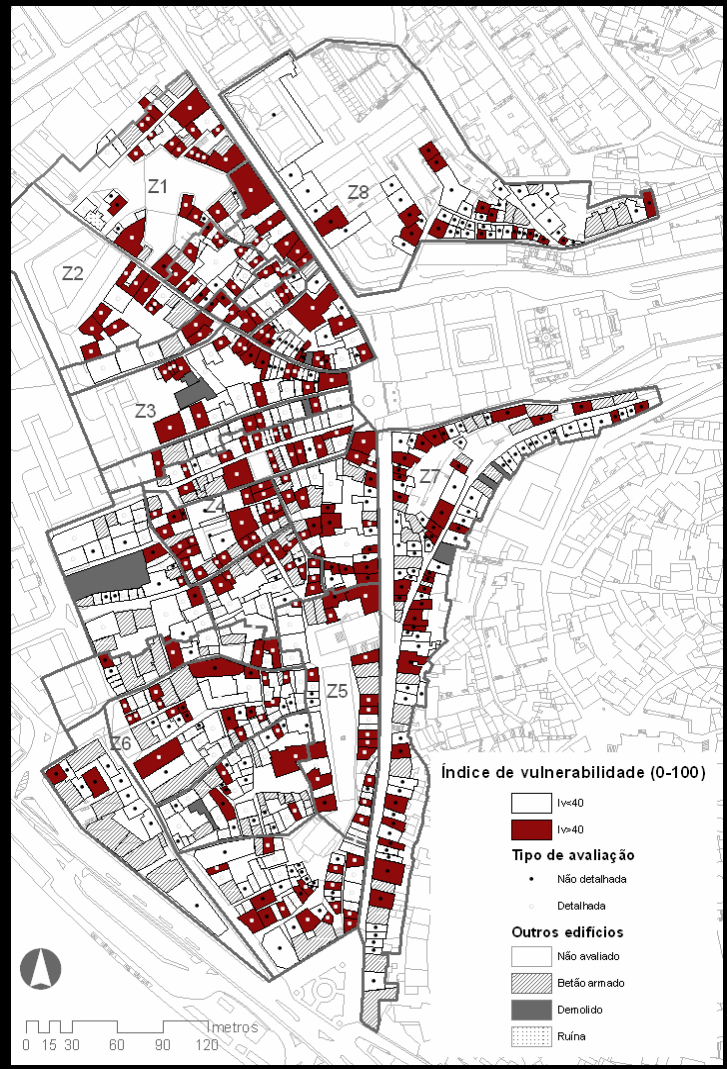
B – Baixa

A - Ausente

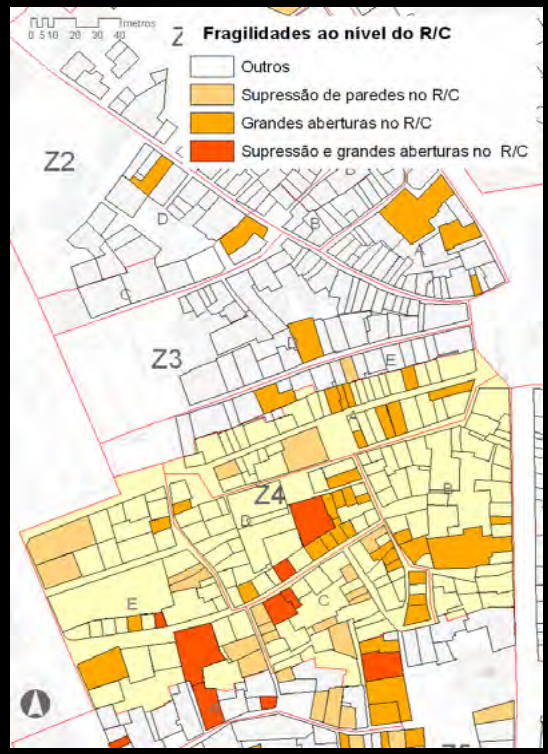


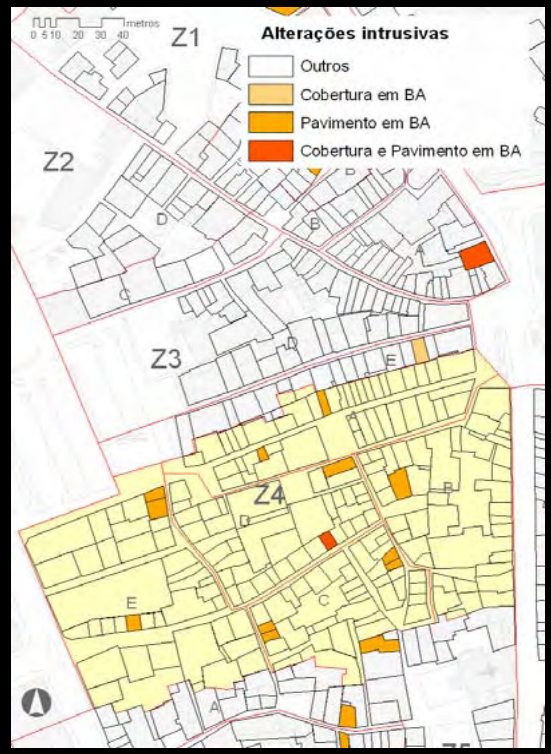
Metodologia de avaliação: Distribuição do I_V



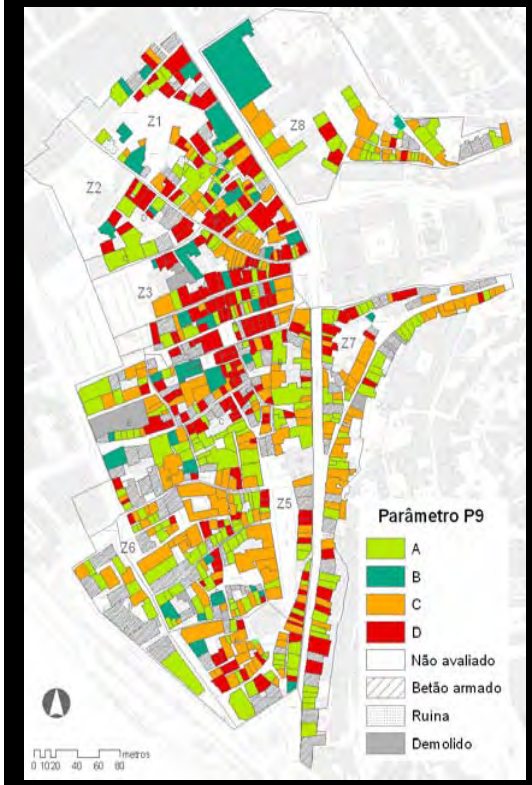


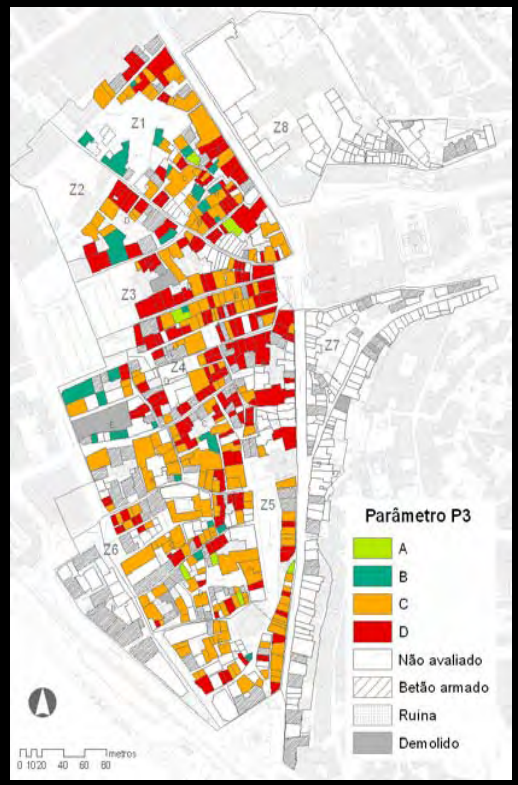
Metodologia de avaliação: Fragilidades estruturais

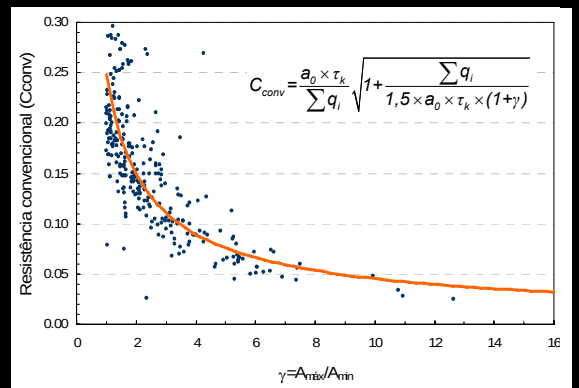


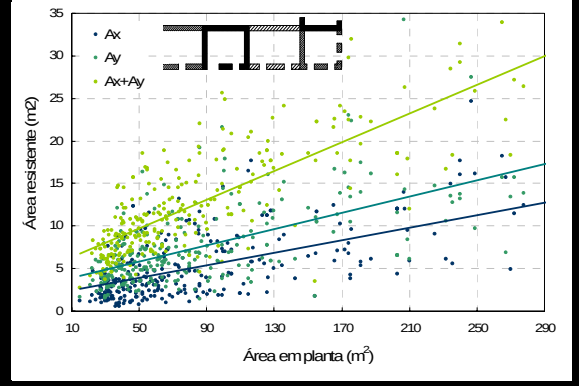


Metodologia de avaliação: Análise dos parâmetros









Cenários de dano: Distribuições

Dos valores do grau de dano médio, μ_D, podemos definir diferentes histogramas de dano, para diferentes intensidades e valores de vulnerabilidade representativa numa base probabilística. Normalmente são utilizadas as funções probabilidade binomial e beta.

"probability mass function" de uma distribuição binomial

$$PMF: p_k = \frac{n!}{k!(n-k)!} \times d^k \times (1-d)^{n-k} \quad n \geq 0; \quad 0 \leq p \leq 1$$

"probability density function" de uma distrbuição beta

$$PDF: \quad f(x,\alpha,\beta) = \frac{\Gamma(\alpha+\beta)}{\Gamma(\alpha)\times\Gamma(\beta)} \times \frac{(x-a)^{\alpha-1} \times (b-x)^{\beta-1}}{(b-a)^{\alpha+\beta-1}} \quad a \leq x \leq b; \quad \alpha,\beta > 0$$

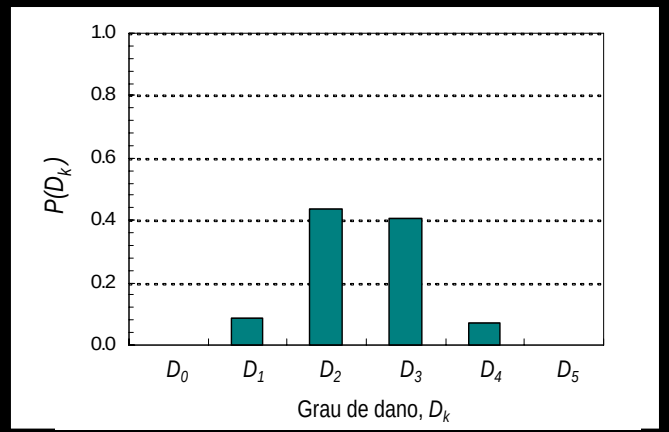
Pretendendo-se uma distribuição discreta, pode-se definir a probabilidade associada a cada grau de dano (D_k, k de 0 a 5) da forma seguinte:

$$P(D_0) = p(0) = \int_0^{0.5} k(t,r) \cdot x^{r-1}(5-x)^{t-r-1} dx$$

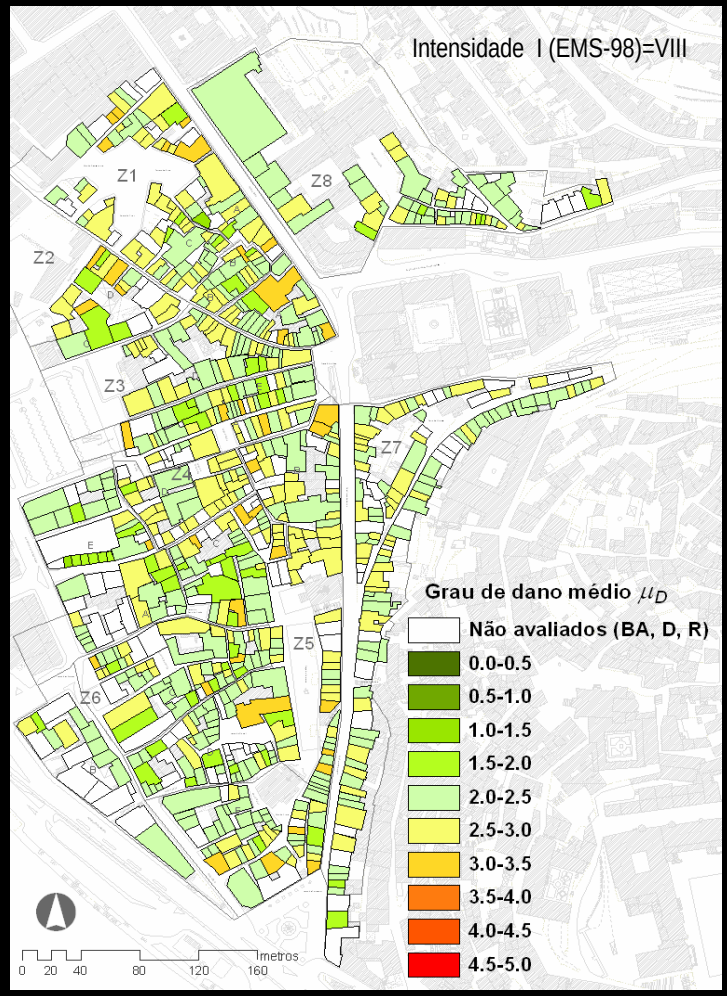
$$P(D_k) = p(k) = \int_{k-0.5}^{k+0.5} k(t,r) \cdot x^{r-1}(5-x)^{t-r-1} dx$$

$$P(D_5) = p(5) = \int_{4.5}^{5} k(t,r) \cdot x^{r-1}(5-x)^{t-r-1} dx$$

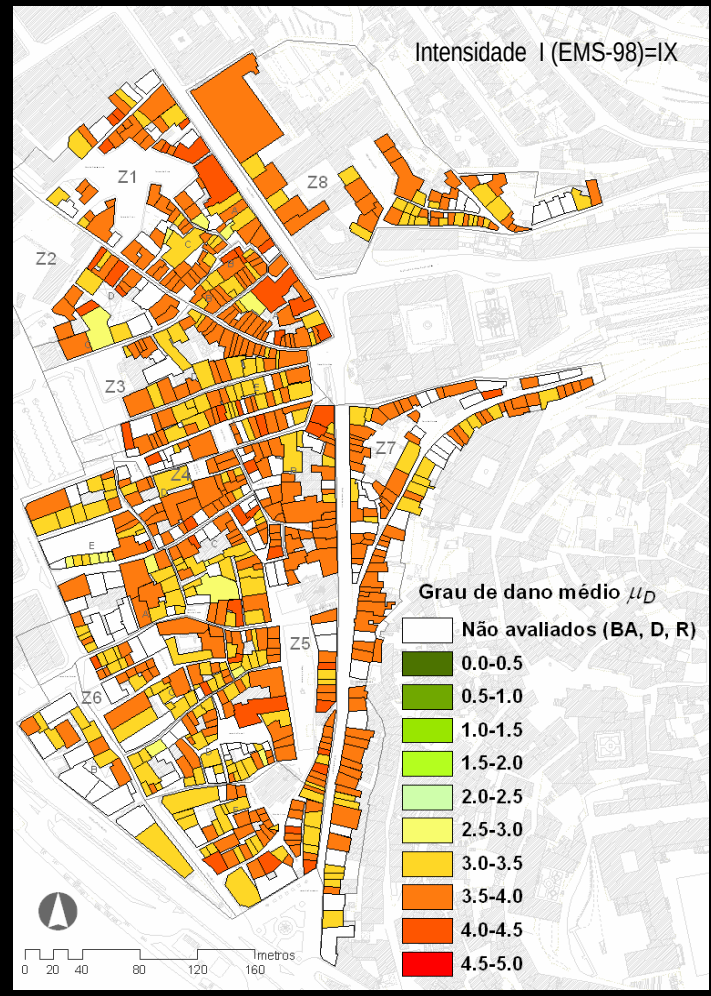
k =1, 2, 3 ou 4



Cenários de dano: Distribuições

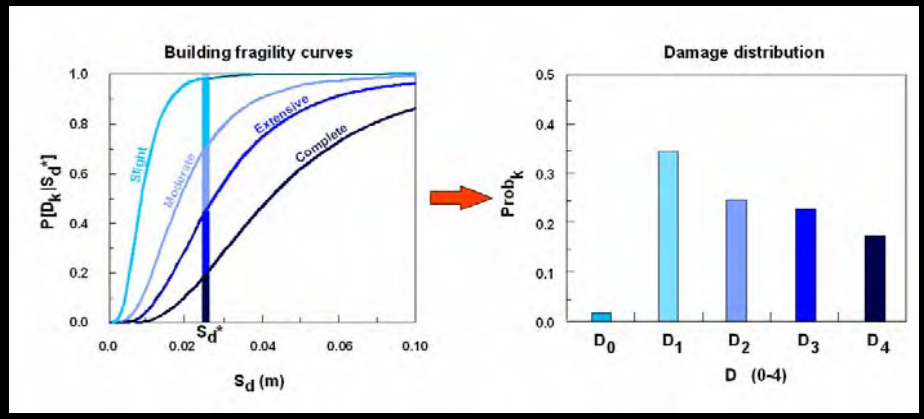


BA (Betão armado), D (Demolido), R (Ruína)



BA (Betão armado), D (Demolido), R (Ruína)

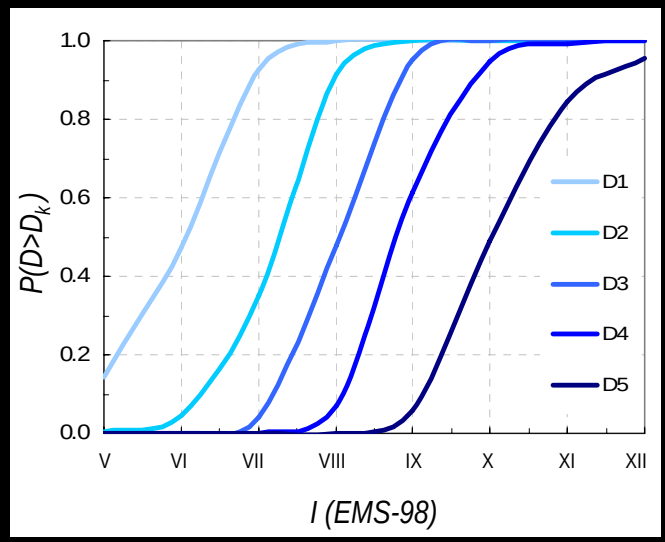
Cenários de dano: Distribuições

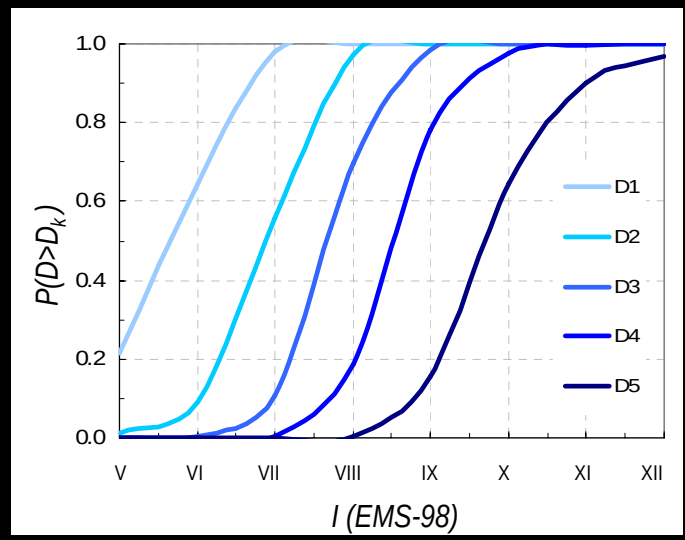


$$P(D_k = d) = P_D[D_k \geq d] - P_D[D_{k+1} \geq d]$$

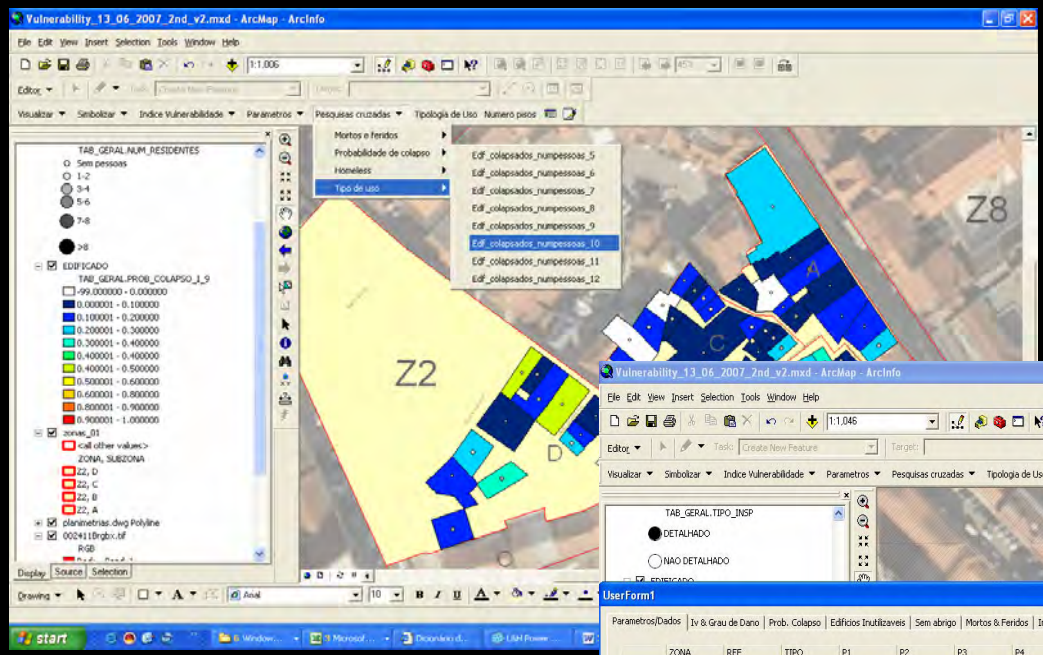
As curvas de fragilidade definem a probabilidade de excedência de cada grau de dano D_k (0 a 5) é obtido directamente da função de densidade beta cumulativa.

Exemplo de curvas de fragilidade

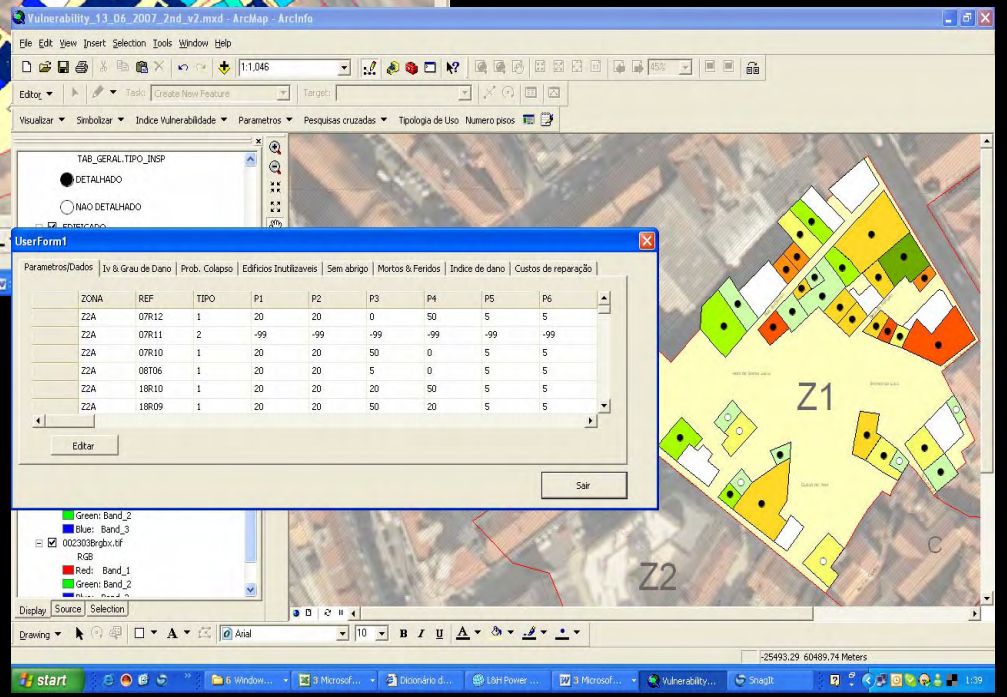




Avaliação de perdas: "Uma ferramenta"

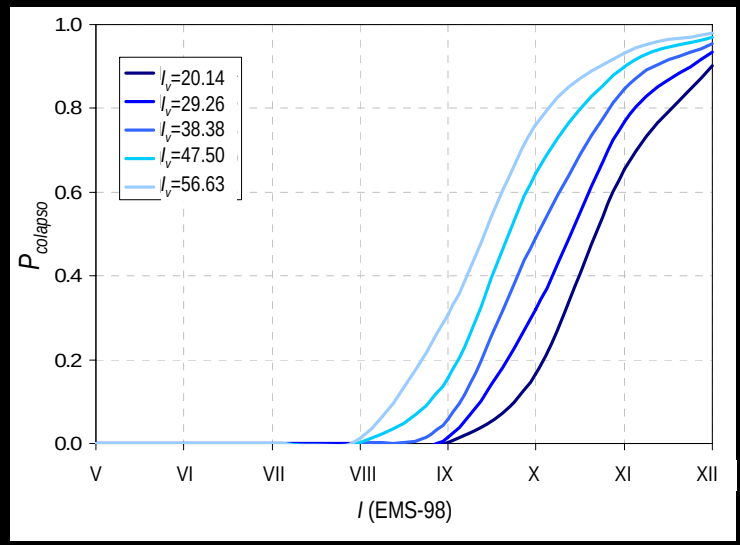


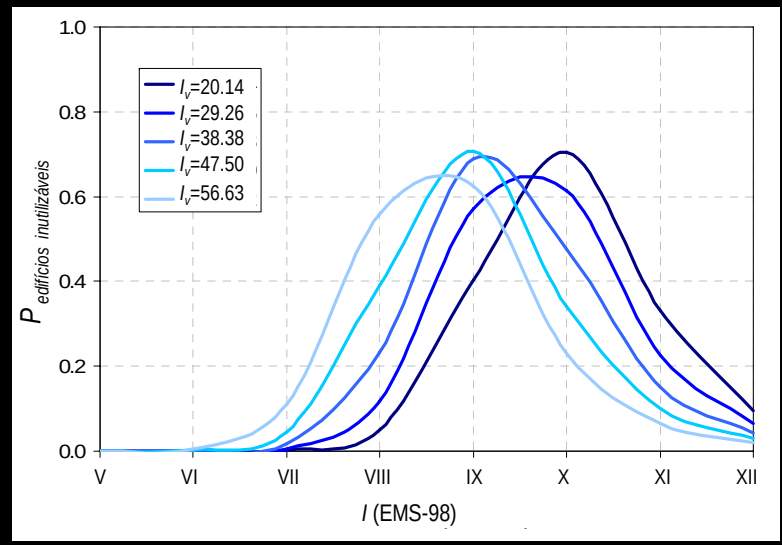
Edição de dados
Criação de cenários



Subrotinas em VBasic e Python
(algoritmos)

Avaliação de perdas: Colapso e edifícios inutilizáveis





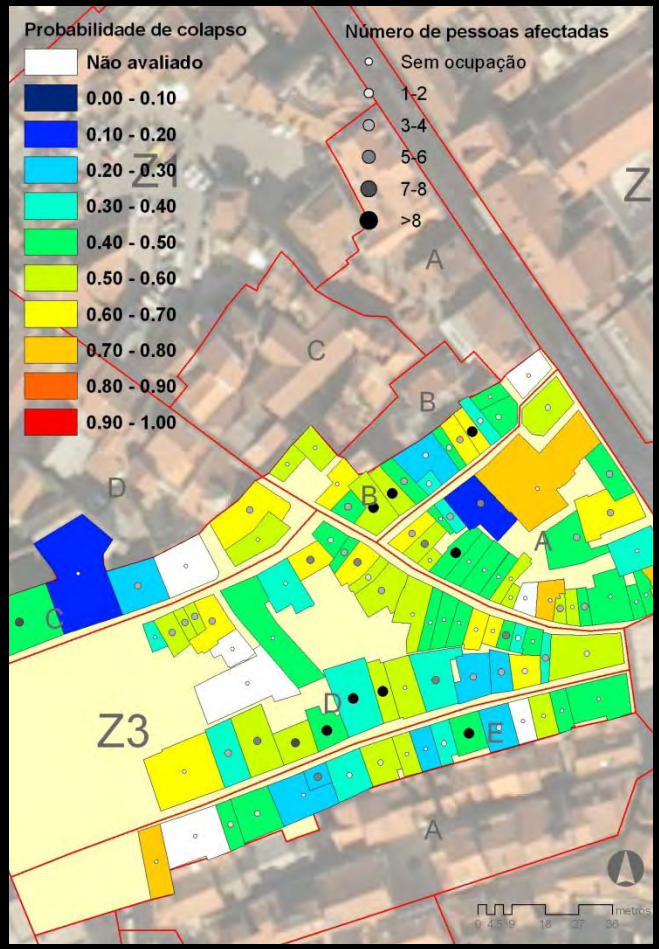
$$P_{colapso} = P(D_5)$$

$$P_{edifícios\ inutilizáveis} = P(D_3) \times W_{ei,3} + P(D_4) \times W_{ei,4}$$

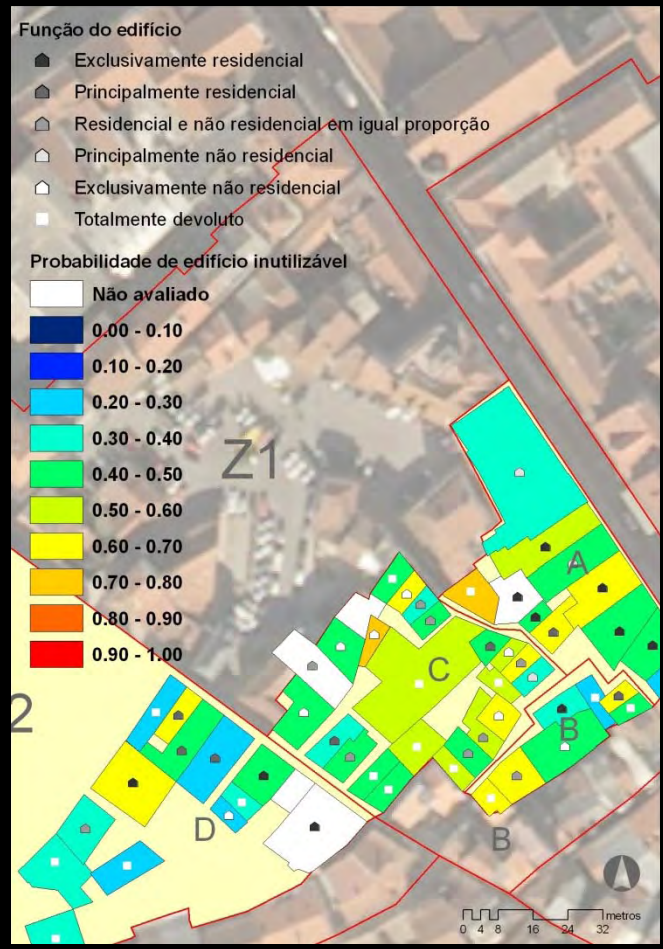
Numero total de edifícios: 679	Sismo de intensidade VII	Sismo de intensidade VIII	Sismo de intensidade IX	Sismo de intensidade X
Colapsos	0	1(0.14%)	39 (5.74%)	334 (49.1%)
Edifícios inutilizáveis	11(1.62%)	158(23.2%)	468 (68.9%)	324 (47.7%)

Resultados da estimativa de colapsos e edifícios inutilizáveis

Avaliação de perdas: Cenários de perda

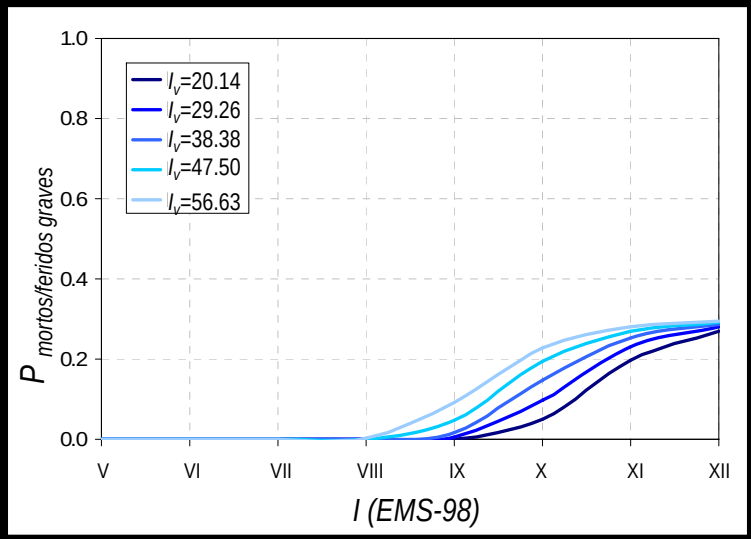


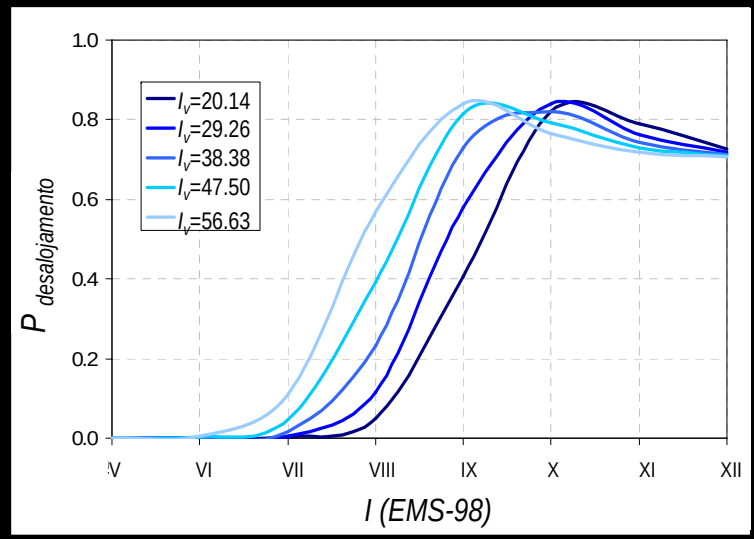
Probabilidade de colapso e ocupação dos edifícios



Tipo de utilização do edifício e probabilidade do edifício ficar inutilizável

Avaliação de perdas: Mortos, feridos e sem abrigo





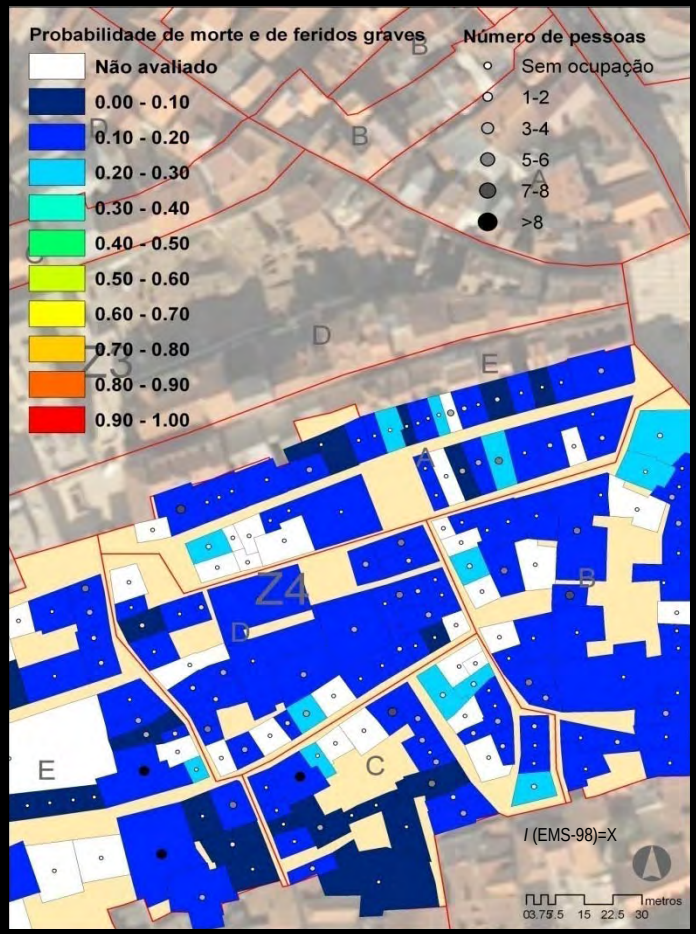
$$P_{mortos\ e\ feridos\ graves} = 0.3 \times P(D_5)$$

$$P_{desalojamento} = P(D_3) \times W_{ei,3} + P(D_4) \times W_{ei,4} + 0.7 \times P(D_5) = P_{edifícios\ inutilizáveis} + 0.7 \times P(D_5)$$

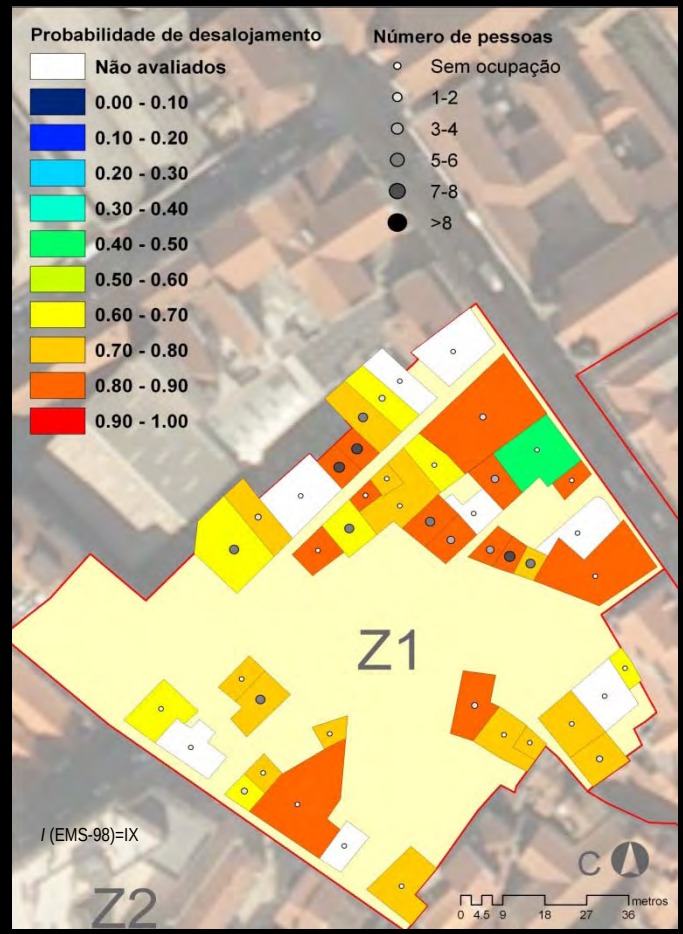
Numero médio de pessoas: 1800	Sismo de intensidade VII	Sismo de intensidade VIII	Sismo de intensidade IX	Sismo de intensidade X
Desalojados	30(1.67%)	419(23.3%)	1313 (72.9%)	1478 (82.1%)
Mortos e feridos graves	0	0	31 (1.72%)	265 (14.7%)

Resultados da estimativa de mortos, feridos graves e desalojados

Avaliação de perdas: Mortos, feridos e sem abrigo

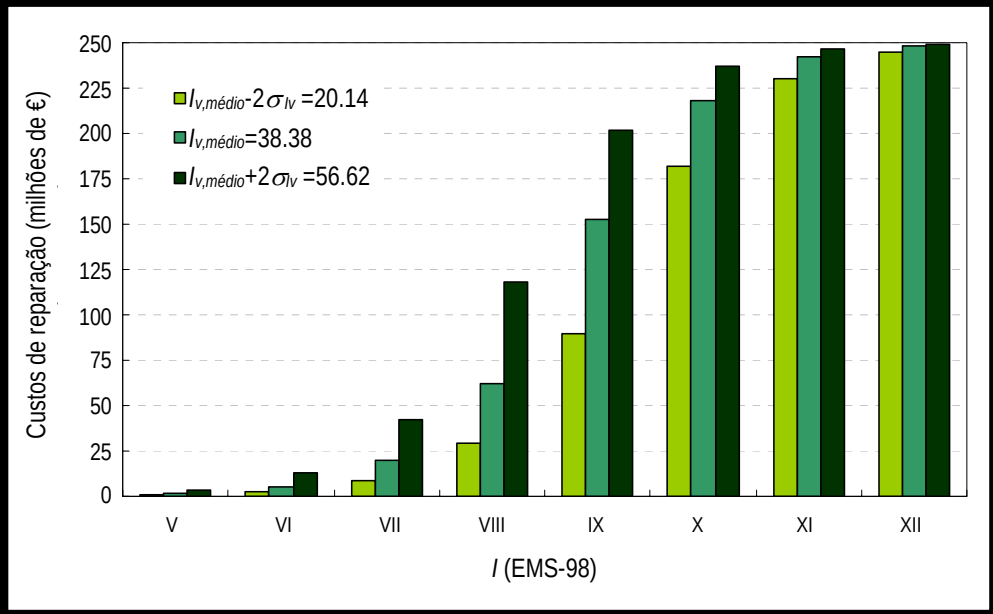


Probabilidade de ocorrência de morte e de feridos graves e ocupação dos edifícios



Probabilidade de ocorrência de desalojamento e ocupação dos edifícios

Avaliação de perdas: Custos de reparação



Notemos que os valores de reparação total, rondam os 3.4% (I_{EMS-98}=VII) a 35.7% (I_{EMS-98}=IX) do custo de reposição para todo o edificado da área em estudo.

Por exemplo para o caso de uma intensidade sísmica de VIII, o custos totais de reparação rondam os 60% do valor do orçamento municipal para a cidade de Coimbra para um valor médio da vulnerabilidade (I_V=38.38).

$$P[R \mid I] = \sum_{D_k=1}^{5} \sum_{I_v=0}^{100} Prob[R \mid D_k] \times Prob[D_k \mid I_v, I]$$

Da avaliação da vulnerabilidade, estimativa de dano e perda

A especificidade associada a cada metodologia, pode limitar a sua utilização de forma universal por várias razões. A escolha da metodologia está também condicionada à escala de operacionalidade;

Verificou-se ainda que, mesmo numa região de baixa a moderada perigosidade, como é o caso de Coimbra, o nível de danos pode ser elevado, uma vez que a vulnerabilidade média do edificado da Baixa é elevada;

Os cenários de dano sísmico estudados, permitem afirmar que existe uma boa correlação com a identificação de fragilidades e característicos estruturais e construtivas dos edifícios. No âmbito da mitigação do risco, a redução dos níveis de perda é apenas possível pela actuação principalmente sobre a vulnerabilidade.

Os resultados produzidos são sempre interpretados estatisticamente, dada a incerteza associada à avaliação de alguns parâmetros;

Uma das premissas seguidas na proposta da metodologia de avaliação do índice de vulnerabilidade, foi a sua aplicabilidade ao edificado em alvenaria para qualquer centro histórico, não sendo condicionado pela regionalidade da construção.

Comentário final

Urge a realização de mais estudos sobre este assunto, nomeadamente a elaboração de legislação específica aplicável, cada vez mais urgente, na resposta ao avançado estado de degradação dos edifícios e na responsabilidade nacional da salvaguarda do nosso património edificado.

A intervenção no património edificado tem de deixar de ser um exercício empírico, para passar a ser pautada pelo rigor. A melhor caracterização do binómio "intervenção–risco" deve ser uma exigência, porque apenas assim se conseguem justificar opções e decisões.

Romeu Vicente
<romvic@ua.pt>