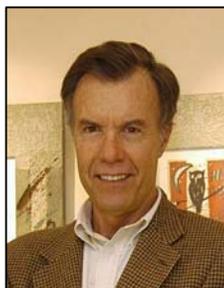


AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE SÍSMICA DOS EDIFÍCIOS POMBALINOS UTILIZANDO A ABORDAGEM DOS MACRO-ELEMENTOS



Maria Rosa Valluzzi
Eng.^a Civil
Investigadora
DCT- Dipartimento di
Costruz. e Trasporti
Univ. de Pádua



Vítor Cóias
Eng.º Civil
Grupo Stap
Lisboa



Marco Munari
Eng.º Civil
DCT- Dipartimento di
Costruz. e Trasporti
Univ. de Pádua

SUMÁRIO

A utilização de modelos de análise em regime elástico na verificação da segurança de edifícios antigos de alvenaria e madeira, com vista à reabilitação estrutural, encontra várias dificuldades. Como alternativa, apresenta-se a abordagem dos “macro-elementos”, aplicando-a ao caso de um quarteirão típico da Baixa Pombalina. Verificam-se os mecanismos de colapso mais prováveis através de dois procedimentos complementares: O “Vulnus” e o “c-Sisma”.

Palavras-chave: Reabilitação estrutural. Vulnerabilidade sísmica. Macro-elementos. Edifícios pombalinos. Vulnus. C-Sisma.

1. INTRODUÇÃO

Os edifícios históricos em zonas sísmicas caracterizam-se, frequentemente, pela sua elevada vulnerabilidade sísmica, devido a irregularidades (de origem ou resultantes de sucessivas alterações), deficiência de comportamento mecânico (materiais de má qualidade, ligações fracas entre componentes) e falta de rigidez dos pisos no seu plano) [1], [2]. Estas considerações aplicam-se ao caso da Baixa Pombalina de Lisboa, apesar das preocupações de Manuel da Maia e de Carlos Mardel de introduzirem nos edifícios construídos a partir de 1755 um conjunto de disposições anti-sísmicas que lhes conferem um carácter reconhecidamente inovador [3].

De facto, a normal degradação dos materiais e, sobretudo, as alterações introduzidas nos edifícios ao longo do tempo, contribuem para que eles se apresentem actualmente numa situação de flagrante vulnerabilidade face à possível ocorrência de um sismo intenso.

Habitualmente, a verificação da segurança é feita a partir da análise estrutural de modelos em regime elástico, utilizando programas de cálculo automático standardizados, procurando confirmar que em todos os componentes as deformações e os esforços máximos não excedem os correspondentes valores limite. Esta abordagem é uma extensão da usada em construção nova, na análise de estruturas correntes de betão armado ou de aço. Ao pretender-se aplicá-la a construções a reabilitar, mormente se forem antigas, encontram-se vários obstáculos (difícil idealização da estrutura em termos dos elementos correntemente utilizados, desconhecimento quer das alterações neles introduzidas quer do estado de tensão daí resultante, comportamento inelástico da alvenaria) [4].

Uma abordagem com interesse para a verificação da segurança sísmica dos edifícios deste tipo – confirmada pela observação de edifícios atingidos por recentes sismos em Itália -- é a dos designados “macro-elementos”, concebida por Giuffrè [5] e desenvolvida por ele e por outros autores [6]. Um macro-elemento é definido como um elemento da construção caracterizado por um comportamento sísmico individualizável. A reabilitação sísmica de edifícios de alvenaria pode, com vantagem, ser baseada na identificação dos mecanismos de danificação e colapso a que eles sejam julgados mais vulneráveis, consistindo a intervenção de reabilitação em contrariar esses mecanismos, alterando o menos possível o comportamento estrutural (por exemplo, evitando acréscimos de massas e rigidificação das coberturas), antes privilegiando as ligações entre diferentes elementos e reduzindo impulsos [7]. O equilíbrio destes macro-elementos, idealizados a partir dos vários mecanismos de colapso possíveis, é estudado através de modelos cinemáticos, quer no seu plano, quer fora desse plano, permitindo calcular “coeficientes de colapso”, do tipo

$$c=a/g,$$

onde “a” é a aceleração sísmica e “g” a aceleração da gravidade. Por sua vez, “c” representa o multiplicador das massa envolvidas, capaz de levar o elemento ao colapso [8]. Esta abordagem é reconhecida pela versão actualizada do regulamento sísmico italiano [9], [10] e pode envolver dois procedimentos complementares desenvolvidos na universidade de Pádua: O “Vulnus”, e o “c-Sisma”.

O procedimento Vulnus [11] e [12] permite combinar diferentes mecanismos para analisar globalmente a vulnerabilidade sísmica de edifícios suficientemente regulares (em planta e em elevação) e altura limitada (três andares ou menos), tendo em consideração o tipo de ligação entre os elementos estruturais; permite obter dois índices I1 e I2, representando, respectivamente, os coeficientes limites respectivamente no plano e fora do plano. Além disso, com base em informação específica de diagnóstico (recolhida utilizando um formulário

pormenorizado) permite determinar um índice I3 para avaliação global da vulnerabilidade, curvas de fragilidade e cenários de dano de acordo com a classificação EMS98 [13].

O procedimento C-Sisma [14] selecciona no edifício os macro-elementos mais significativos, aplica um número de diferentes mecanismos cinemáticos isolados de colapso, no plano e fora do plano, indica o menor coeficiente sísmico, correspondente ao mecanismo mais frágil dentre os possíveis de ocorrer e pode desenvolver a avaliação de acordo com requisitos regulamentares.

2. O PROCEDIMENTO “VULNUS” APLICADO AOS EDIFÍCIOS POMBALINOS

Vulnus é um procedimento para a avaliação da vulnerabilidade sísmica de edifícios de alvenaria, quer isolados, quer agrupados em núcleos complexos de construções que interagem. O método baseia-se na avaliação de valores críticos da aceleração média de resposta correspondentes a mecanismos de colapso no plano (Índice I1) e fora do plano (Índice I2) de paredes isoladas ou de sistemas de paredes restringidas no seu movimento por pavimentos e paredes transversais. Estes dois índices e, ainda, um terceiro, (I3), dito de vulnerabilidade, que fornece informação qualitativa adicional sobre as características do edifício e do terreno, combinam-se através de um modelo aleatório pericial de vulnerabilidade que permite deduzir uma expressão qualificativa (ou correspondendo aos limites superior e inferior) da probabilidade de colapso ou danos graves de um edifício isolado ou de um conjunto de edifícios [12]. Aplica-se, em seguida, o procedimento Vulnus, ao caso de um quarteirão pombalino, idealizado a partir de dados recolhidos em quarteirões reais da Baixa Pombalina.

O primeiro passo para a utilização do procedimento Vulnus é a introdução das características geométricas e mecânicas do edifício. Considerando a simetria do quarteirão pombalino idealizado, foi o mesmo dividido em quatro partes, a fim de simplificar os cálculos (figuras 1 e 2). Para cada subdivisão foi necessário reconhecer os nós, paredes e septos: os nós são identificados pela intersecção de duas ou mais paredes, os septos são porções da mesma parede entre dois nós, sendo as paredes constituídas por um ou mais septos alinhados e contíguos. A subdivisão efectuada no quarteirão conduziu à identificação de 80 nós e 124 septos.

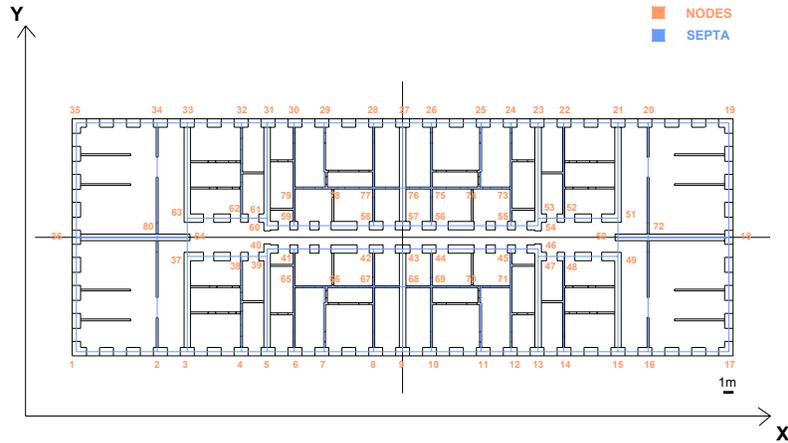


Figura 1: Subdivisão do conjunto do quarto pomalino idealizado

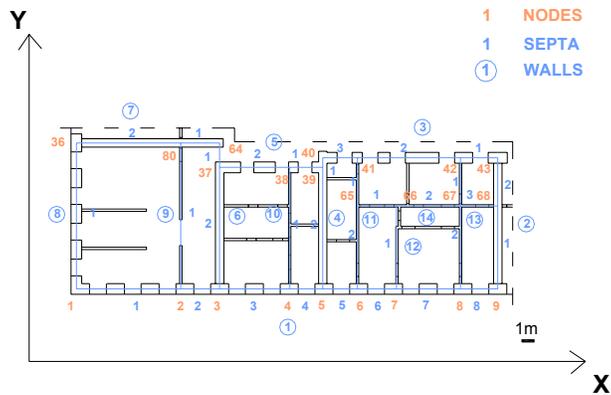


Figura 2: Subdivisão do quarto de quarto pomalino idealizado

Apresentam-se no quadro 1 os parâmetros considerados na definição das propriedades de cada quarto de quarto pomalino e de cada septo dessa parte.

Quadro 1: Propriedades da cada quarto de quarto e de cada septo

Número de andares:	4
Altura total:	13,5 m = (4,0+3,5+3,0+3,0) m
Área total:	440m ²
Propriedades da alvenaria;	$\sigma_c = 0,85 \text{ MPa}$ $\tau = 0,10 \text{ MPa}$; $\gamma = 2200 \text{ kg/m}^3$
Peso do piso de madeira:	3 kN/m ² (vigas principais perpendiculares à fachada principal)
	fachadas: base 0,90m, topo 0,75m;
Espessura das paredes:	empenas: base 0,70m, topo 0,70m;
	frontais: base 0,20m, topo 0,20m.

O procedimento calcula a relação entre o valor crítico da aceleração média e g, para mecanismos de colapso no plano (Índice I1) e fora do plano (Índice I2), este último, respectivamente, para faixas verticais (I2') e horizontais (I2''). Os resultados da análise do quarto de quarteirão constam do quadro 2.

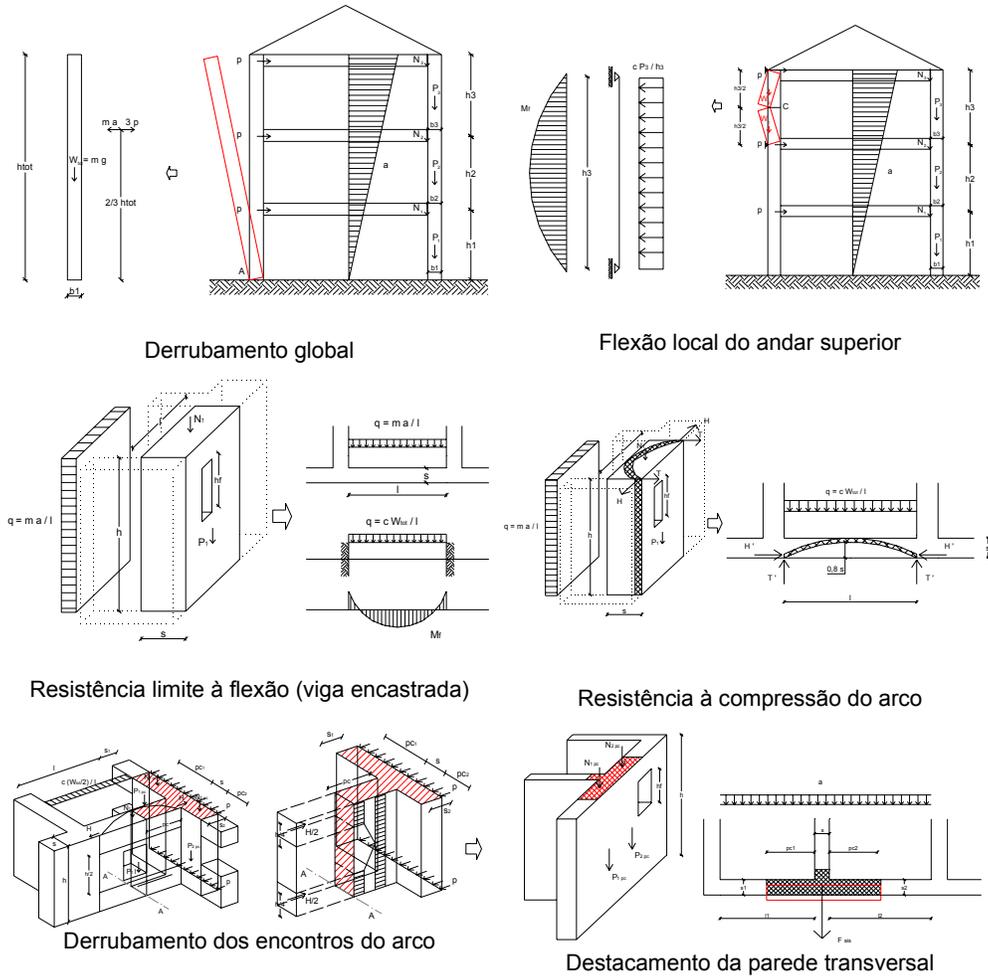


Figura 3: Principais mecanismos fora do plano considerados pelo Vulnus [15]

Quadro 2: Síntese das características do edifício e valores dos índices I1 e I2

Material das paredes	alvenaria de pedra	Número de tirantes na fachada // Y	0
Estado de conservação	mediocre	Número de cintas perimetrais	0
Resistência à compressão [MPa]	0,64	Confinamento das paredes // X	7,421
Resistência à tracção [MPa]	0,11	Confinamento das paredes // Y	0,742
Peso específico equivalente [kg/m ³]	2714	Índice I1 na direcção X	0,234
Volume [m ³]	5895	Índice I1 na direcção Y	0,302
Número de pisos	4	Índice I2 mínimo	0,116
Pavimentos	médios	I2' + I2" mín.	0,062 + 0,054
Planta	irregular	Índice I2 máximo	2,705
Altura do beiral [m]	13,5	I2'+I2"' máx.	0,050 + 2,655
Número de tirantes na fachada // X	0	Índice I2 médio	0,50

Considerando o valor $a/g = 0,17$ (para $S_a \approx 1,7 \text{ m/s}^2$, aceleração a adoptar, neste caso, segundo o RSA [16]), para a acção sísmica de referência e para o coeficiente de comportamento $\eta = 1,5$ (para ter em conta a ductilidade), os índices dos mecanismos de colapso podem ser indicativamente comparados com $a/g = 0,12$.

O procedimento permite determinar os valores dos índices globais, que constam do quadro 2. O valor mínimo de I1 é 0,234, maior que 0,12, mas o de I2 é 0,116, inferior a 0,12. Constata-se, portanto, que os mecanismos fora do plano possuem resistência insuficiente. O procedimento Vulnus permite, ainda, identificar as paredes e septos que são afectadas pelos vários mecanismos, dentre os representados na figura 3, que contribuem para definir I2, para os quais $a/g < 0,12$.

O índice de vulnerabilidade I3 é calculado com base nos parâmetros constantes de uma "ficha GNDT", desenvolvida pelo Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti (figura 4). Estes parâmetros representam a susceptibilidade do edifício aos danos associados a um sismo e a incerteza associada a esta avaliação. O preenchimento da ficha foi feito para um quarto do quarteirão. As classes dos parâmetros vão desde A (bom) a D e as classes para a qualidade da informação fornecida são: E (certa), M (média), B (incerta) e A (ao acaso).

O índice I3 tem uma variabilidade compreendida entre 0 e 1: se o valor de I3 é alto ($I3=1$), a vulnerabilidade é alta. O valor calculado, no presente caso, pelo Vulnus é $I3 = 0,43$.

G.N.D.T. – SCHEDA DI VULNERABILITA' DI 2° LIVELLO (MURATURA)					
Codice ISTAT Provincia		Codice ISTAT Comune		Scheda N°	
PARAMETRI	Classi	Qual. Inf.	ELEMENTI DI VALUTAZIONE	SCHEMI - RICHIAMI	
1 TIPO ED ORGANIZZAZIONE DEL SISTEMA RESISTENTE (S.R.)	C	M	Norme nuove costruzioni (Clas. A)	1	Parametro 9. n. di piani a convenzionale
			Norme riparazioni (Clas. A)	2	
			Cordoli e catene tutti i livelli (Clas. B)	3	
			Buoni ammortam. fra muri (Clas. C)	4	
			Senza cordoli cattivi ammortam. (Clas. D)	5	
2 QUALITA' DEL S.R.	C	E	(vedi manuale)	D	
3 RESISTENZA CONVENZIONALE	C	M	Numero di piani N	14	Massimo tra A, e A, A (n°) 30 Massimo tra A, e A, E (n°) 31 Coeff. a, =A/A, 0.07 Coeff. γ = B/A, 1.03 q = (A, + A, M) p, / A + p, 1.54 $C = \frac{a \cdot x}{q N} \sqrt{1 + \frac{q N}{1.5 a \cdot x (1 + \gamma)}}$ e = C · 0,4 = 0,450
			Area totale coperta A (mq)	14 13 17	
			Area A, (mq)	3 10 1	
			Area A, (mq)	3 11 1	
			κ (t/mq)	1 17 1	
			Alt. media interpiano h (m)	3 14 1	
			Peso specifico pareti p, (t/mq)	2 12 1	
4 POSIZIONE EDIFICIO E FONDAZIONE	A	M	Carico permanente solai p, (t/mq)	10 5 1	Parametro 6. Configurazione e planimetria
			Pendenza percentuale del terreno	10 1	
			Roccia Fondazioni: Si 1 No 4		
			Terr. sciolto non sping. Fond. Si 2 No 5		
			Terr. sciolto spingente Fond. Si 3 No 6		
Differen. Max di quota Δh (m)	10 1				
5 ORIZZONTAMENTI	C	E	Piani sfalsati Si 1 No 2		Parametro 7. Configurazione in elevazione
			Orizzontamenti rigidi e ben collegati	1	
			Orizzontam. deformabili e ben collegati	2	
			Orizzontam. rigidi e mal collegati	3	
			Orizzontam. deformabili e mal collegati	4	
6 CONFIGURAZIONE PLANIMETRICA	D	E	% Orizzontam. rigidi e ben collegati	10 1	Parametro 8. Copertura
			Rapporto percentuale β ₁ = a/l	13 10 1	
7 CONFIGURAZIONE IN ELEVAZIONE	A	E	Rapporto percentuale β ₂ = b/l	17 1	
			% aumento (+) o diminuzione (-) di massa	10 1	
			Rapporto percentuale T/H	10 1	
8 D _{max} MURATURE	C	E	Percentuale superficie porticata	10 1	Coperture spingenti (tipologia M)
			Piano terra porticato Si 1 No 2		
9 COPERTURA	C	M	Rapporto massimo l/ε	12 13 1	Coperture poco spingenti (tipologia N)
			Copert. non sp. g' poco sp. 1 sp. 2		
			Cordoli in copertura Si 1 No 2		
			Catene in copertura Si 1 No 2		
			Carico perman. copert. p, (t/mq)	10 13 1	
10 ELEM. NON STRUTT.	D	E	Lungh. appoggio cooper. l, (m)	17 14 1	Coperture non spingenti (tipologia O)
			Perimetro copertura l (m)	19 13 1	
11 STATO DI FATTO	C	E	(vedi manuale)		

Figura 4: GNĐT – Ficha de vulnerabilidade do segundo nível (Alvenaria) [17]

A função de vulnerabilidade V_u pode ser expressa, pelo procedimento através de uma função de participação $\mu(V_u)$, numa escala de vulnerabilidades de 0 a 100. A probabilidade da participação do quarto de quarteirão a uma classe de vulnerabilidade baseia-se na teoria do modelo aleatório, sendo a vulnerabilidade expressa por uma frase qualificativa. Para $a/g = 0,12$, a classe de vulnerabilidade de cada parte e a do conjunto do quarteirão é, finalmente, definida como "Média", de acordo com a avaliação do Vulnus.

Além da interpretação dada através da frase qualificativa, a vulnerabilidade do quarteirão é, também, representada pelo gráfico da figura 5. Para cada valor de PGA/g a curva vermelha (central) dá a distribuição cumulativa da probabilidade de colapso E[Vg] (valores esperados de danos elevados). A zona entre as curvas a azul (laterais) representa o intervalo dos valores mais prováveis esperados para a frequência de danos sérios. Para um valor de PGA/g = 0,12 o procedimento permite avaliar E[Vg] = 0,55, com um intervalo de variação compreendido entre 0,15 e 0,85: esta incerteza é devida à escolha das classes da qualidade da informação na “ficha GNDT”.

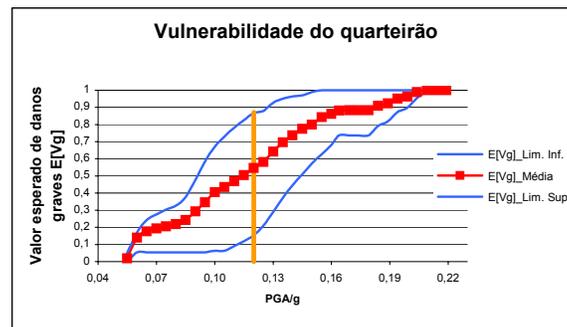


Figura 5: Representação gráfica da vulnerabilidade do quarteirão

Finalmente, é possível processar “cenários de dano” que dão a percentagem de edifícios que sofrem certo tipos de danos versus a intensidade do sismo (escala MCS). É, então, possível comparar o cenário de dano elaborado pelo Vulnus para o caso em apreço, com outros cenários e, em particular, com o baseado nas classes macrosísmicas EMS 98.

Adoptou-se a correlação PGA/g – intensidade macro sísmica proposta por Petrini (quadro 3), resultante de estudos feitos para o território de Itália. Para o cálculo dos cenários de dano usaram-se matrizes binómias da probabilidade de danificação.

O quarteirão em análise pertence, de acordo com a classificação EMS 98, à classe de vulnerabilidade A (a mais alta).

Quadro 3: Correlação PGA/G – Intensidade, segundo Petrini [17]

PGA/g	Escala MCS
0,017	V
0,031	VI
0,057	VII
0,104	VIII
0,191	IX
0,348	X
0,636	XI

Para danos > D2 e > D3, de acordo com as definições EMS 98, os gráficos das figuras 6 e 7 comparam os cenários de dano fornecidos pelo Vulnus (limites superiores – curvas a azul -- e valores médios – curva a vermelho), e os cenários de dano propostos por EMS 98 (curvas dos limites superior e inferior, calculados com as matrizes binômias da probabilidade de danificação – a amarelo). Para $PGA/g = 0,12$ (cerca do grau VIII de intensidade da escala MCS, de acordo com Petrini, cerca de 45% dos edifícios sofrem danos graves.

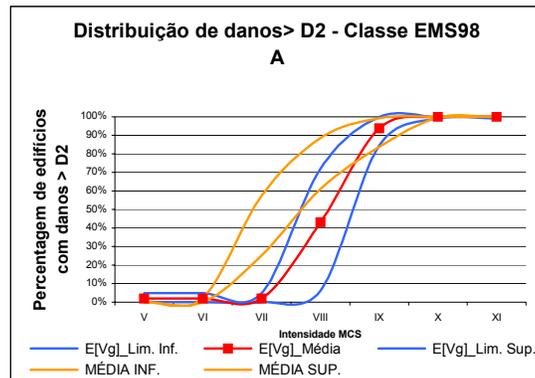


Figura 6: Comparação dos cenários de dano fornecidos pelo Vulnus com os cenários de dano propostos por EMS 98, para danos > D2

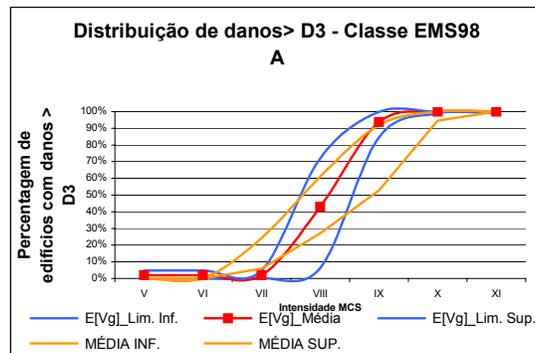


Figura 7: Comparação dos cenários de dano fornecidos pelo Vulnus com os cenários de dano propostos por EMS 98, para danos > D3

3. O PROCEDIMENTO “C-SISMA” APLICADO AOS EDIFÍCIOS POMBALINOS

Além da avaliação da vulnerabilidade global fornecida pelo Vulnus para o quarteirão analisado, justifica-se, dada a sua complexidade, efectuar uma análise local, considerando os modelos cinemáticos elementares mais prováveis, através do procedimento c-Sisma.

De facto, enquanto o Vulnus faz uma avaliação do conjunto, fornecendo apreciações estatísticas sobre os resultados obtidos, o procedimento c-Sisma permite aplicar, sobre septos e paredes consideradas separadamente, os vários mecanismos elementares de colapso, para calcular os correspondentes coeficientes. Para calcular o coeficiente c é necessário conhecer diversas variáveis para cada mecanismo. Em geral, é necessário obter, para todas as paredes e pisos dos edifício, a seguinte informação básica: altura (h), comprimento (l), espessura (b ou s), altura de eventuais aberturas (h_f), tipo de material (propriedades da alvenaria, neste caso, $\sigma_c = 0,85$ MPa; $\tau_t = 0,15$ MPa; $\gamma = 2200$ kg/m³), carga actuante (N) e braço da carga em relação à aresta exterior da parede na qual está aplicada (d).

Apresentam-se nos quadros 4 a 8 os índices c relativos a vários mecanismos: os valores a negrito e sublinhados referem-se aos casos em que $a/g < 0,12$; os valores sublinhados correspondem a valores muito próximos de 0,12, que também interessa ter em conta.

3.1 Mecanismos associados às faixas verticais de alvenaria

Neste caso a análise c-Sisma incidu sobre conjunto de mecanismos representados na figura 8. Apresentam-se, no quadro 4 e no histograma da figura 9 os valores dos coeficientes c para a parede e septo mais desfavorável, a Parede 8 – septo 1.

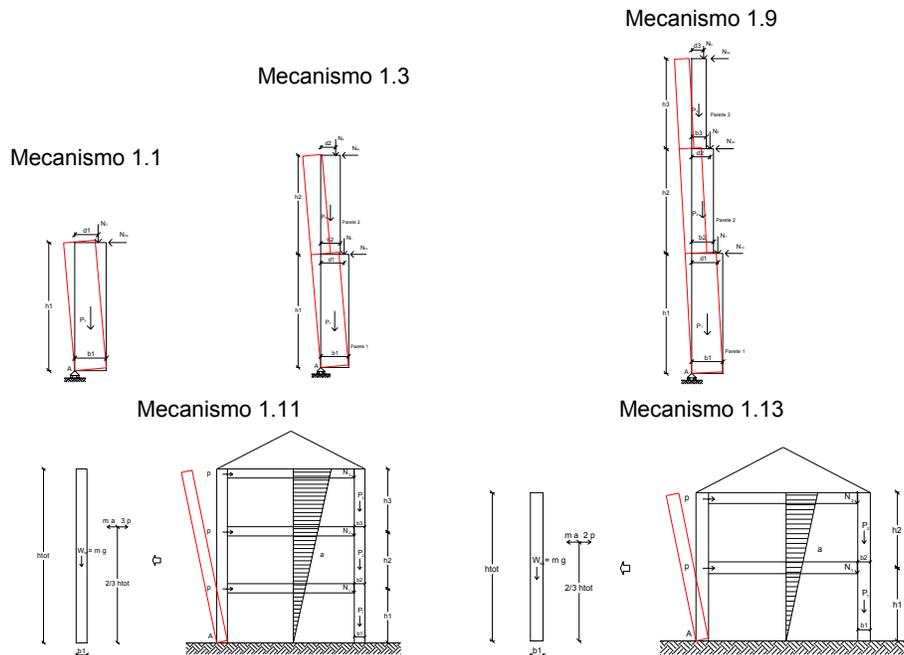


Figura 8: Procedimento c-Sisma - Mecanismos associados às faixas verticais de alvenaria

Quadro 4: Mecanismos de faixas verticais de alvenaria – Parede 8 – septo 1

Mecanismo	c	
1.1	derrubamento do último piso	0,241
1.3	derrubamento dos últimos 2 pisos	0,131
1.9	derrubamento dos últimos 3 pisos	0,087
1.11	derrubamento global dos últimos 3 pisos	0,084
1.13	derrubamento global dos últimos 2 pisos	0,118

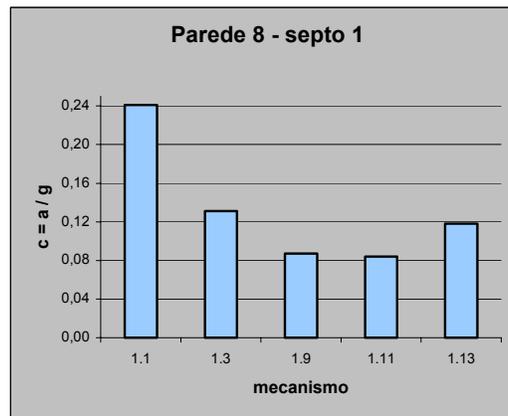


Figura 9: Mecanismos associados às faixas verticais de alvenaria – Valores do coeficiente c. Histograma.

O procedimento c-Sisma permite confirmar a vulnerabilidade dos mecanismos cinemáticos que envolvem o derrubamento de faixas verticais de alvenaria constituídas por paredes sobrepostas. Constata-se, de acordo com os resultados fornecidos pelo Vulnus e pelo c-Sisma, que a parede mais fraca do quarteirão é a parede n.º 8, que apresenta valores do índice c inferiores a 0,12, especialmente se se considerar o derrubamento dos últimos três andares da fachada (mecanismos 1.9 – 1.11).

3.2 Mecanismos associados a faixas horizontais de alvenaria (último andar)

Neste caso a análise c-Sisma incidiu sobre um conjunto de doze septos, envolvendo as paredes 1, 2, 3, 5, 7, 8, 9, 13 e 14 (ver figura 2), e os mecanismos representados na figura 10. Apresentam-se, nos quadros 5 a 8 e nos histogramas das figuras 11 a 13, os valores dos coeficientes c para as paredes e septos mais desfavoráveis.

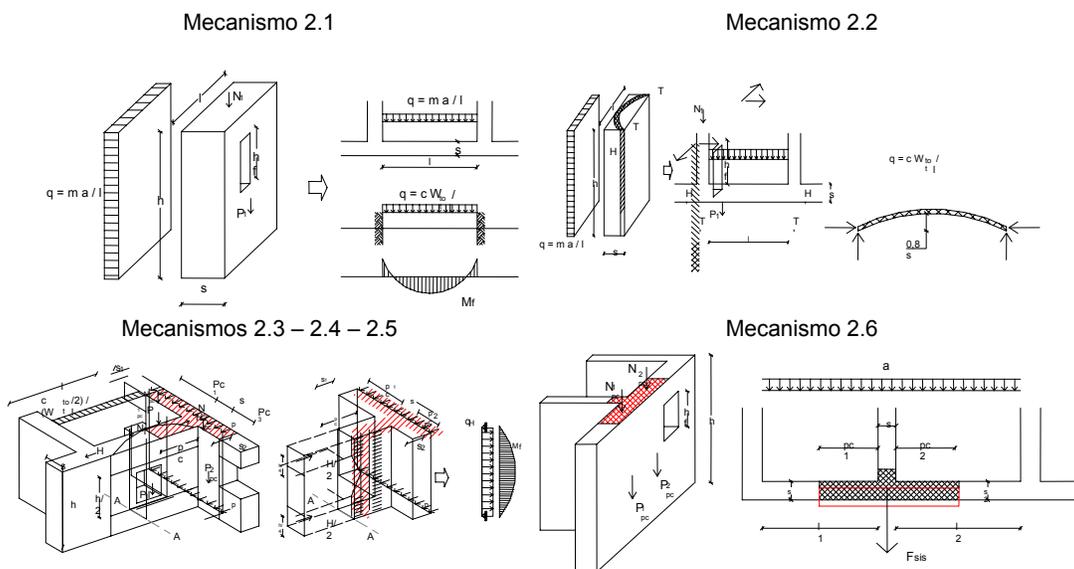


Figura 10: Procedimento c-Sisma - Mecanismos associados às faixas horizontais de alvenaria (último andar)

Quadro 5: Mecanismos de faixas horizontais de alvenaria - Parede 1 – septo 1 – N. 1 – 2

Mecanismo	c
2.1 Resistência limite à flexão (viga encastrada)	1,600
2.2 Resistência à compressão do arco	1,002
2.3 Derrubamento dos encontros do arco	0,174
2.4 Derrubamento dos encontros do arco (confinamento elevado)	0,317
2.5 Resistência à flexão dos encontros do arco (confinamento elevado)	0,973
2.6 Destacamento da parede trasversal	0,056

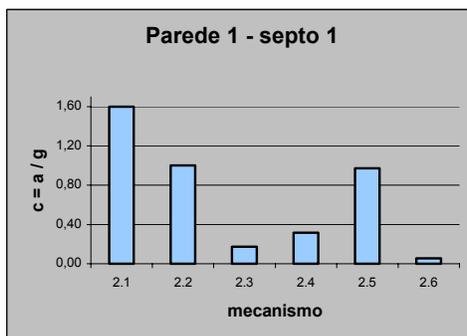


Figura 11: Parede 1 – septo 1 – N. 1 – 2 .Valores do coeficiente c. Histograma

Quadro 6: Mecanismos de faixas horizontais de alvenaria – Parede 3 – septo 2 – N. 42 – 41

Mecanismo	c
2.6 Destacamento da parede transversal N. 42	0,081
2.6 Destacamento da parede transversal N. 41	0,404

Quadro 7: Mecanismos de faixas horizontais de alvenaria - Parede 8 – septo 1 – N. 36 – 1

Mecanismo	c
2.1 Resistência limite à flexão (viga encastrada)	1,503
2.2 Resistência à compressão do arco	0,770
2.3 Derrubamento dos encontros do arco	0,168
2.4 Derrubamento dos encontros do arco (confinamento elevado)	<u>0,159</u>
2.5 Resistência à flexão dos encontros do arco (confinamento elevado)	0,575

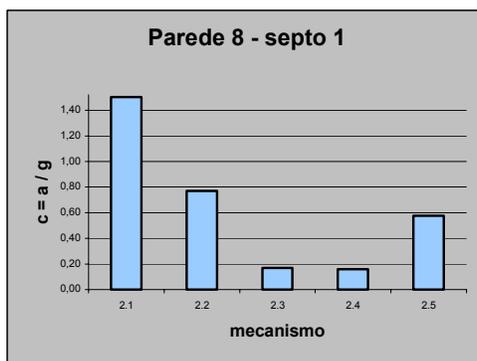


Figura 12: Parede 8 – septo 1 – N. 36 – 1. Valores do coeficiente c. Histograma

Quadro 8: Mecanismos de faixas horizontais de alvenaria -- Parede 9 – septo 1 – N. 80 – 2

Mecanismo	c
2.1 Resistência limite à flexão (viga encastrada)	0,554
2.2 Resistência à compressão do arco	<u>0,121</u>
2.3 Derrubamento dos encontros do arco	0,042
2.4 Derrubamento dos encontros do arco (confinamento elevado)	0,640
2.5 Resistência à flexão dos encontros do arco (confinamento elevado)	7,976

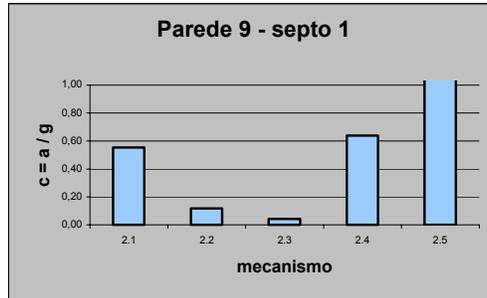


Figura 13: Parede 9 – septo 1 – N. 80 – 2. Valores do coeficiente c. Histograma

Face os resultados obtidos para os septos analisados (ver histogramas acima, figuras 11 a 13), é possível constatar, através do procedimento c-Sisma aplicado a faixas horizontais de alvenaria no último andar (onde a intensidade das ações sísmicas é mais alta), que o mecanismo 2.3, relativo ao derrubamento dos encontros do arco incorporado na espessura da parede e o mecanismo 2.6, relativo ao destacamento da parede transversal, dão valores do índice c que são frequentemente inferiores a 0,12 (a menos de uma diferença marginal, o mesmo acontece com o mecanismo 2.4, relativo, tal como 2.3, ao derrubamento dos encontros do arco incorporado na espessura da parede).

Completada a análise, é possível pôr em prática medidas correctivas pouco intrusivas destinadas a contrariar os mecanismos de colapso acima referidos (mecanismos 1.9, 1.11 e 1.13, associados a faixas verticais de alvenaria e mecanismos 2.3, 2.4 e 2.6, associados a faixas horizontais). A quantificação dos dispositivos a instalar num caso e noutro pode ser feita a partir dos défices de resistência constatados para estes mecanismos.

4. CONCLUSÕES

A aplicação dos procedimentos Vulnus e c-Sisma ao quarteirão pombalino permitiram estudar e descrever o comportamento estrutural destes edifícios de alvenaria usando a abordagem dos macro-elementos. O Vulnus permite fazer uma análise global do quarteirão. A determinação dos índices globais I1 e I2 mostra que os mecanismos fora do plano são os causadores de maior debilidade, conduzindo a um valor do índice abaixo do crítico. Por outro lado, a avaliação global da vulnerabilidade como “Média”, atribuída ao quarteirão, significa que, no caso de um evento sísmico importante (próxima do grau VIII de intensidade de acordo com a escala MCS), cerca de 50% dos edifícios sofrerão danos graves.

A análise da vulnerabilidade local, feita aplicando os modelos cinemáticos mais prováveis considerados no procedimento c-Sisma, aos principais macro-elementos do edifício, completa a avaliação da vulnerabilidade global feita pelo Vulnus. Esta análise mostra a particular vulnerabilidade dos edifícios pombalinos aos mecanismos de colapso frágil fora do plano dos

macro-elementos, e, em particular, aos derrubamentos das paredes de fachada, causado directamente pela acção sísmica (nembos) ou pela acção indirecta de mecanismos actuando em elementos resistentes interligados. A debilidade das ligações entre elementos estruturais deverá, portanto, ser compensada através de disposições correctivas adequadamente dimensionadas.

Referências

- [1] Tomazevic M. 1999. - *Earthquake-Resistant Design of Masonry Buildings* (Series on Innovations in Structures and Construction), Vol 1, London, Imperial College Press.
- [2] Binda L., et al. - "A multilevel approach to the damage assessment and seismic improvement of masonry buildings in Italy". *Seismic Damage to Masonry Buildings*, Bernardini Ed., Rotterdam: Balkema, 1999.
- [3] Córias, V. - "Um Novo Modelo (e uma Nova Visão) do Edificado Pombalino de Lisboa" - *Monumentos*, (DGEMN), Nº. 6, Lisboa, Mar. 1997 p. 80-85.
- [4] Córias, V. - "Modelos de cálculo para edifícios pombalinos". *Pedra & Cal* n.º 30, Lisboa, 2006, p.14-16
- [5] Giuffrè A. - *Sicurezza e conservazione dei centri storici. Il caso Ortigia Bari*. Laterza, 1993.
- [6] Doglioni F., et al. - *Le chiese e il terremoto. Dalla vulnerabilità constatata nel terremoto del Friuli al miglioramento antisismico nel restauro, verso la politica di prevenzione*. Trieste, ed. LINT.
- [7] Lagomarsino, S. - "Seismic Damage Survey of the Churches in Umbria". *Monument-98*. Lisboa, LNEC, Nov. 1998.
- [8] Valluzzi, M.R. et al. - "Modellazione del comportamento di Edifici in Muratura sotto Azioni Sismiche: l'Esperienza Umbria-Marche". *X Congresso Nazionale "L'ingegneria Sismica in Italia"*, Potenza-Matera 9-13 settembre 2001.
- [9] O.P.C.M. n. 3274, 20/03/03: *Norme tecniche per il progetto, la valutazione e l'adeguamento sismico degli edifici - e successivi aggiornamenti*.
- [10] O.P.C.M. n. 3431, 03/05/05: *Norme tecniche per il progetto, la valutazione e l'adeguamento sismico degli edifici*.
- [11] Bernardini A., et al. - *Valutazioni di resistenza di nuclei di edifici in muratura per analisi di vulnerabilità sismica*. Internal Report 2/88, University of Padova, Istituto di Scienza e Tecnica delle Costruzioni, 1988.
- [12] Bernardini A., et al. - "Application of Coupled Analytical Models and Experiential Knowledge to Seismic Vulnerability Analyses of Masonry Buildings". *Earthquake Damage Evaluation and Vulnerability Analysis of Buildings Structures*. A. Kortize Ed., INEEC, Omega Scientific, 1990.
- [13] Grunthal G., "European Macroseismic Scale 1998", *Cahiers du Centre Europ. de Géodyn. et de Séismologie*, vol 15 (1998).
- [14] Valluzzi M.R., et al. "Analysis of the seismic vulnerability of masonry buildings in historical centres and intervention proposals". *Proceedings of the 6th Int. Symp. on the Conservation of Monuments in the Mediterranean Basin*, Lisbon, Portugal, 7-10 April 2004.
- [15] Bernardini A. (a cura di). *La vulnerabilità degli edifici: Valutazione a scala nazionale della vulnerabilità degli edifici ordinari*. C.N.R. - G.N.D.T., Roma, 2000.
- [16] Lopes, M., et al. - *Análise sísmica de um quarteirão pombalino (Estudo realizado para a Oz, Ld.ª)*. Relatório EP n.º 54/04, ICIST, Nov. 2004.
- [17] <http://gndt.ingv.it>