



## O DESAFIO DA PREVISÃO DO COMPORTAMENTO FORA-DO-PLANO DE EDIFÍCIOS EXISTENTES EM ALVENARIA

**Alexandre A. Costa**  
Prof. Adjunto  
Convidado  
ISEP/Construct-  
LESE  
Porto-Portugal

**Nuno Mendes**  
Pós-Doc  
ISISE/UM  
Guimarães-  
Portugal

**Alfredo Campos-Costa**  
Investigador  
Principal  
LNEC  
Lisboa-Portugal

**Paulo B. Lourenço**  
Prof. Catedrático  
ISISE/UM  
Guimarães-  
Portugal

### SUMÁRIO

O comportamento sísmico de estruturas existentes em alvenaria é muito condicionado pelo seu comportamento fora-do-plano, originando os chamados mecanismos locais. Apesar dos recentes avanços no estudo desta temática, existem diversas metodologias diferentes que tentam prever o comportamento deste tipo de estruturas e/ou modos de colapso.

O artigo apresentado pretende resumir os principais resultados obtidos num evento subordinado ao tema “Methods and challenges on the out-of-plane assessment of existing masonry buildings”, que antecedeu a 9<sup>th</sup> International Masonry Conference (2014) em Guimarães. Neste evento tomaram lugar cerca de 25 especialistas mundiais na área, com o objectivo de prever o comportamento de duas estruturas em alvenaria utilizando os métodos de análise correntemente utilizados na análise sísmica (análise baseada em força, análise baseada em deslocamentos, elementos finitos, elementos discretos, etc...).

Relativamente às estruturas estudadas, uma destas era materializada em alvenaria tradicional de pedra de dois panos, sendo a outra construída em alvenaria de tijolo. Estas estruturas foram ensaiadas à escala real na mesa sísmica do LNEC, tendo por objetivo avaliar o seu desempenho sísmico.

No final do presente artigo apresentam-se os principais resultados obtidos com as simulações realizadas e sua comparação com o comportamento real das estruturas, apontando também as principais conclusões obtidas que permitam o avanço e desenvolvimento de futuras técnicas adequadas ao tema.

## ABSTRACT

The seismic behaviour of existing masonry buildings is governed by the out-of-plane behaviour in the form of the so-called local mechanisms. Despite recent advances within the area, there are several different methodologies to predict the behaviour of these local mechanisms.

The article herein submitted aims to present the main results obtained on a workshop entitled “Methods and challenges on the out-of-plane assessment of existing masonry buildings”, within the 9<sup>th</sup> International Masonry Conference (2014), held at Guimarães. Around 25 world specialist in the area were invited to this pre-conference event, with the objective of predict the behaviour of masonry structures making use of any available method for the seismic analysis (force-based, displacement-based, energy-based, finite elements, discrete elements, etc...).

Regarding the studied structures, one was built on traditional double-leaf stone masonry while the other was built on brick masonry, and they were tested at LNEC shaking table.

The main conclusions are presented at the end of the article, namely the obtained results with the prediction and the observed experimental behaviour, pointing out also the main points that should be addressed in future research in order to overcome some limitations.

**PALAVRAS-CHAVE:** Alvenaria; Fora-do-plano; Mesa sísmica; Análise numérica

## 1. INTRODUÇÃO

O estudo e análise do comportamento fora-do-plano de estrutura em alvenaria tem tido alguma importância na área da engenharia sísmica, mas não existe consenso sobre o melhor modelo e/ou abordagem a seguir no estudo deste tipo de estruturas.

Com base neste pressuposto, e aproveitando a realização da 9<sup>a</sup> Conferência Internacional de Alvenarias em Guimarães onde muitos peritos mundiais nesta temática estiveram presentes, foi preparado um *workshop* de um dia onde esta temática foi debatida.

Para aumentar o interesse neste debate, um dos pontos importantes foi a realização de dois *blind-prediction tests*, onde os peritos foram desafiados a prever o comportamento de duas estruturas de um piso sujeitas a ensaios em mesa sísmica. Cada estrutura com uma configuração em U, foi sujeita a ações essencialmente para fora-do-plano das paredes principais.

Com base nos resultados obtidos experimentalmente e nas previsões realizadas por 13 participantes, foi possível debater as diferentes técnicas abordadas, as suas vantagens e inconvenientes e a sua aplicação em avaliações de estruturas existentes.

## 2. OS PROBLEMAS DE PREVISÃO E MODELAÇÃO

O estudo do comportamento fora-do-plano de alvenarias é bastante complexo e continua a ser bastante estudado nos dias de hoje, com trabalhos diferenciados e com pressupostos de modelação diferentes, mas que pretendem avançar com o conhecimento nesta área ([1], [2] or [3]).

No entanto, os pressupostos base das formulações utilizadas é bastante diversa, originando uma possível divisão das possibilidades de análise deste tipo de estruturas como sugerido por [4]: metodologias baseadas em força ou deslocamento; simulação do comportamento recorrendo a modelo numéricos (FEM, DEM ou Dinâmica de multi-corpos, *multi-body dynamics* ou MBD).

O desafio da previsão do comportamento fora-do-plano de edifícios existentes em alvenaria 2

Em função do tipo de abordagem utilizada para prever o comportamento fora-do-plano de estruturas de alvenaria, os parâmetros necessários para a análise a realizar serão diversos, mas que pretendem representar as características principais da estrutura para este tipo de comportamento, entre outros: i) condições fronteira do(s) elemento(s) alvo de análise, quer nos bordos horizontais quer nos verticais; ii) presença de paredes de retorno (paredes de contraventamento); iii) eficiência da ligação aos elementos ortogonais, nomeadamente paredes de contraventamento, pavimentos e cobertura; iv) flexibilidade dos diafragmas; v) nível de esforço axial nas paredes; vi) presença de aberturas (portas ou janelas); vii) interligação entre dano no plano da parede e sua influência no comportamento fora-do-plano; viii) efeitos dinâmicos da acção sísmica, nomeadamente filtragem e amplificação em altura.

O objectivo final de uma abordagem a uma estrutura existente será a possibilidade de reproduzir o mais adequadamente possível o comportamento da mesma com o menor grau de dificuldade. Além disso e preferencialmente, a influência da experiência e capacidade técnica do perito avaliador da estrutura deveria ser o mínimo possível, permitindo assim que a abordagem apresentada para avaliar e/ou simular o comportamento fora-do-plano fosse dependente do método em si, e não do projetista. Tendo em consideração esta última premissa, tornou-se então uma mais valia a realização de *blind-prediction tests* para analisar quais as metodologias propostas, a eficácia dos resultados obtidos e também o grau de envolvimento dos peritos para prever corretamente o comportamento fora-do-plano.

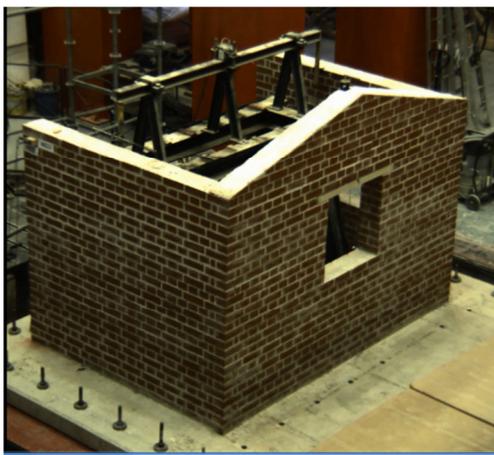
### 3. ENSAIOS EXPERIMENTAIS

#### 3.1. Descrição dos casos de estudo

Os casos de estudo a serem ensaiadas, e como já mencionados, foram duas estruturas semelhantes e com uma disposição em U, com aberturas nas paredes de fachada e paredes de retorno (paredes perpendiculares à fachada), induzindo efeitos torsionais na resposta.

Uma das estruturas foi materializada em alvenaria de tijolo perfurado na vertical e argamassa de cimento, sendo o aparelho do tipo inglês e espessura total das paredes de 0,235m. A outra estrutura foi construída em alvenaria de pedra de dois panos e argamassa à base de cal, com uma espessura igual a 0,50m.

A Figura 1 e Figura 2 apresentam as estruturas que foram ensaiadas em mesa sísmica.



(a)



(b)

Figura 1: Caso de estudo em alvenaria de tijolo: a) vista geral; b) abertura na parede perpendicular

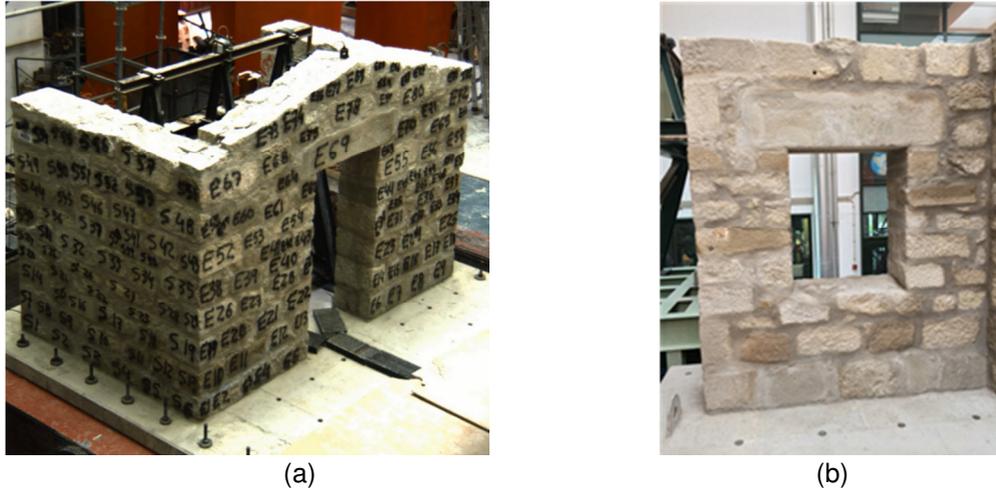


Figura 2: Caso de estudo em alvenaria de pedra: a) vista geral; b) abertura na parede perpendicular

Para que os participantes tivessem informação suficiente para realizarem as suas previsões, foram disponibilizados, além das configurações geométricas dos provetes e especificidades da sua construção, resultados de ensaios à compressão e compressão diagonal em muretes de alvenaria, nomeadamente: módulo de elasticidade; massa volúmica; resistência à compressão; resistência à tracção por compressão diagonal.

Por último, foram também disponibilizados os pontos monitorizados durante os ensaios mesa sísmica, nomeadamente acelerações (19 acelerómetros uniaxiais) e deslocamentos (6 LVDTs).

### 3.2. Acção sísmica

A acção sísmica, actuando perpendicularmente à fachada principal, foi introduzida para níveis crescentes de aceleração, até atingir o colapso parcial dos modelos. A acção sísmica introduzida foi diferente nos dois modelos, tendo consideração a diferente massa dos modelos e a influência da acção na formação dos mecanismos de colapso. No entanto, a acção base foi filtrada para conter os níveis de deslocamentos dentro do domínio de deslocamentos da mesa sísmica, sendo aplicado um filtro passa alto com frequência de corte de 1Hz.

Relativamente à informação disponibilizada aos participantes, foi fornecido apenas o espectro de resposta normalizado a 1g, assim como a envolvente da acção sísmica.

A Figura 3 apresenta a informação fornecida para o caso de estudo de alvenaria de pedra.

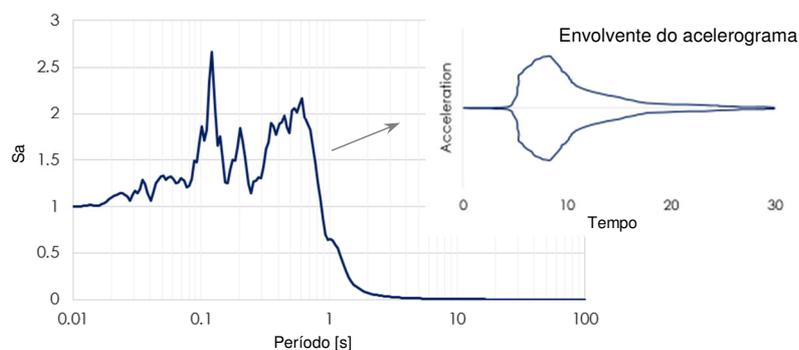


Figura 3: Acção sísmica – elementos fornecidos aos participantes (caso de estudo pedra)

### 3.3. Resultados obtidos e mecanismos de colapso formados

A realização dos ensaios em mesa sísmica possibilitou a obtenção dos mecanismos de colapso em ambos os modelos ensaiados, obtendo-se também a aceleração base que originou esses mecanismos e os deslocamentos máximos observados. A Figura 4 e Figura 5 apresenta a evolução do dano e os mecanismos de colapso para os dois modelos.

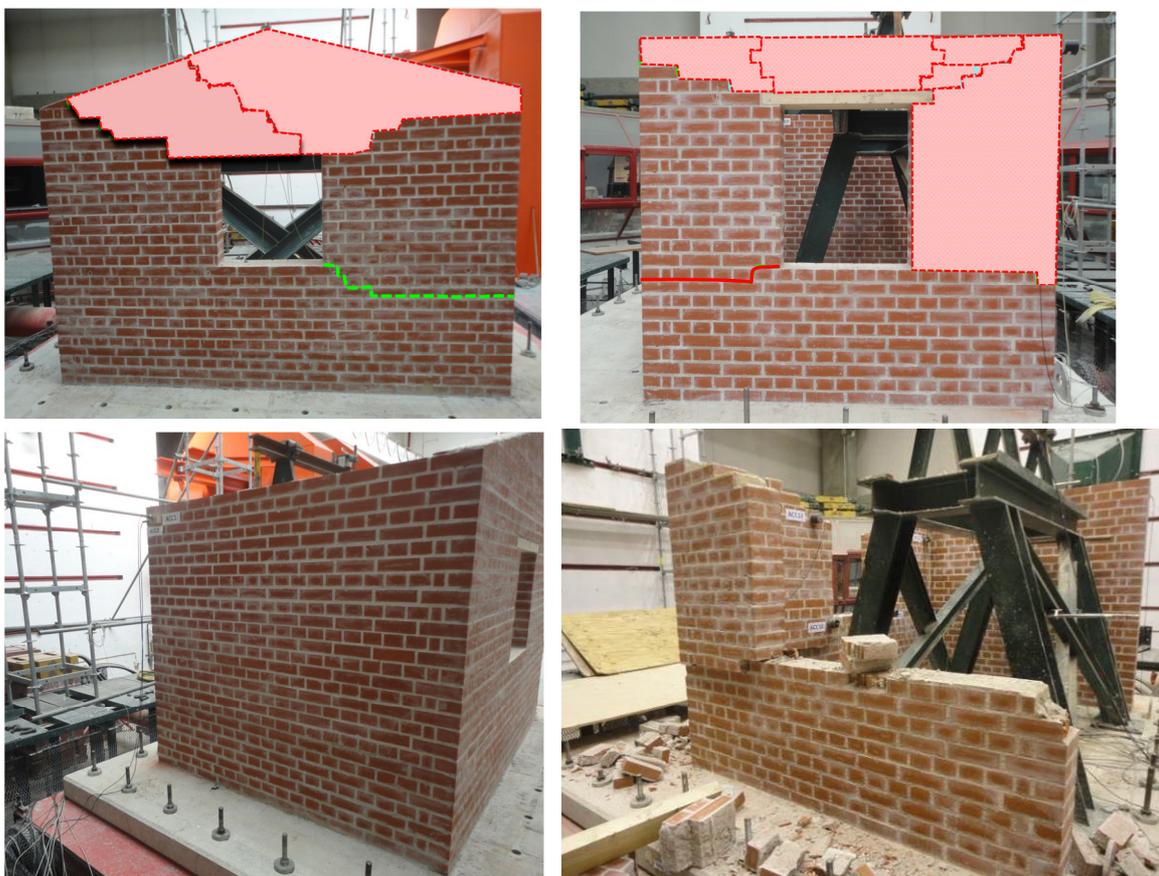


Figura 4: Modelo de tijolo - evolução do dano e mecanismos formados (azul – 0.56g; verde - 0.84g; vermelho (colapso) – 1.27g).



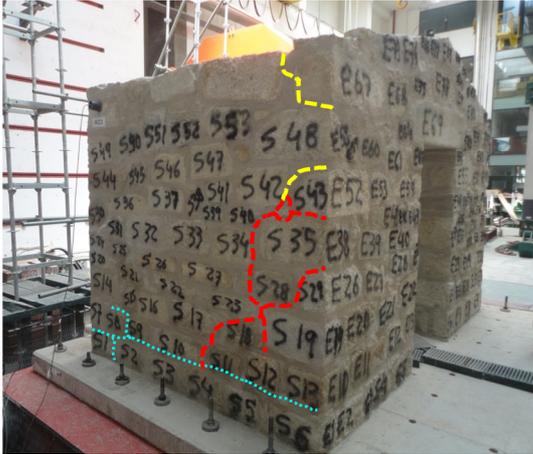


Figura 5: Modelo de pedra - evolução do dano e mecanismos formados (azul - fendas iniciais; verde - 0.66g; amarelo – 1.02g; vermelho (colapso) – 1.05g).

Os mecanismos de colapso envolveram a fachada principal (com particular ênfase nos movimentos do tímpano) e nas paredes de retorno, nomeadamente a parede de retorno com abertura.

A Figura 6 apresenta a evolução dos deslocamentos da fachada dos dois modelos ensaiados em função da aceleração base. É notória a influência do dano no aumento exponencial dos deslocamentos observados, nomeadamente para  $PGA > 0.5g$  (modelo de pedra) e  $PGA > 0.7g$  (modelo de tijolo).

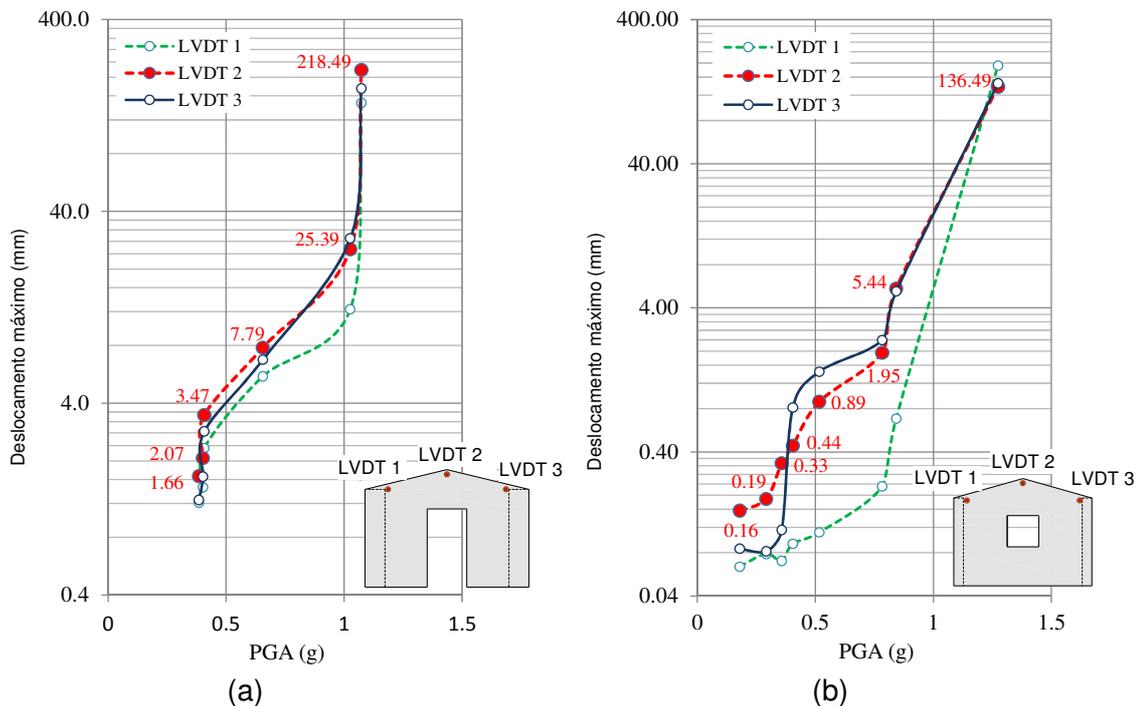


Figura 6: Deslocamento máximo relativo: a) estrutura de pedra; b) estrutura de tijolo

## 4. AVALIAÇÃO E INTERPRETAÇÃO DAS PREVISÕES

### 4.1. Comentários gerais

A previsão dos resultados das estruturas existentes teve como ponto principal a definição do(s) mecanismo(s) de colapso, onde posteriormente, em função da metodologia utilizada, foi definida a capacidade máxima da estrutura essencialmente em termos de aceleração ou deslocamento.

A Figura 7 apresenta as etapas principais seguidas para obtenção das previsões do comportamento. É de realçar o papel que a capacidade técnica dos peritos teve no processo final de previsão.

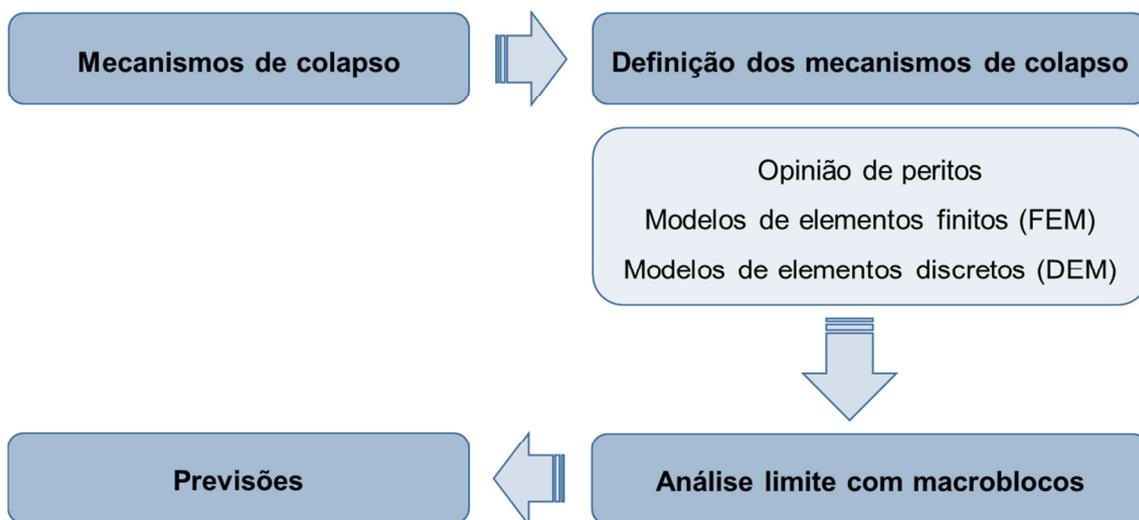


Figura 7: Etapas principais nas metodologias utilizadas

A Figura 8 apresenta alguns dos modelos desenvolvidos pelos participantes para definição dos mecanismos de colapso e/ou capacidade máxima das estruturas.

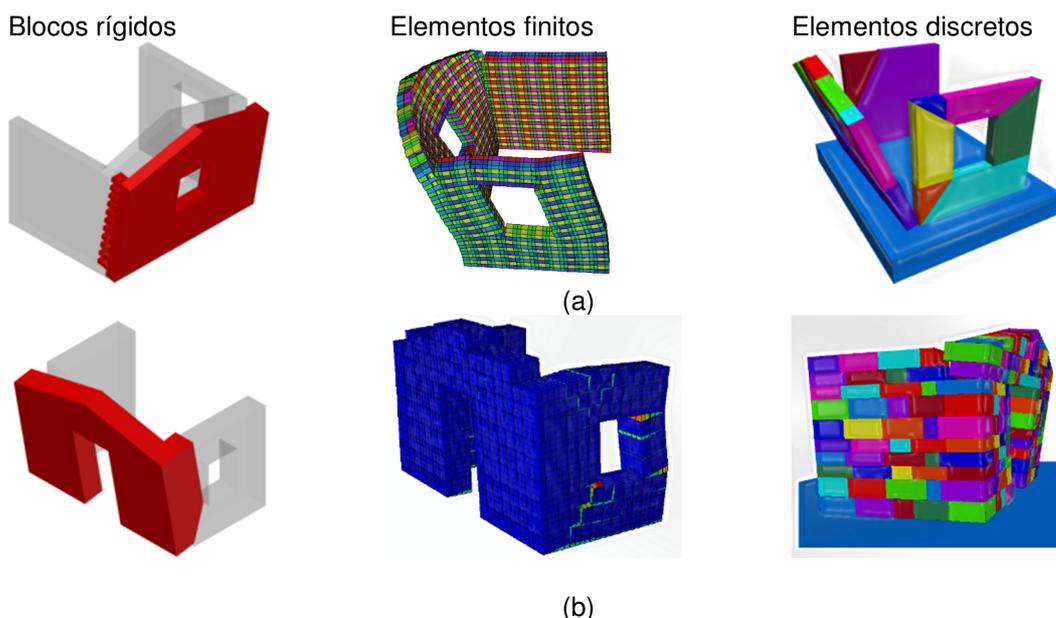
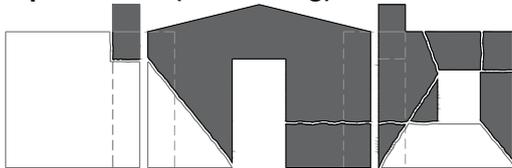


Figura 8: Exemplos dos modelos desenvolvidos pelos participantes: a) modelo tijolo; b) modelo pedra

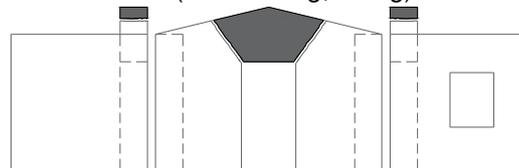
## 4.2. Caso de estudo: alvenaria de pedra

A Figura 9 apresenta os mecanismos de colapso definidos pelos participantes para o modelo de alvenaria de pedra e sua comparação o mecanismo de colapso obtido experimentalmente. Foram definidos 13 mecanismos diferentes, num total de 19 previsões. Os mecanismos propostos mais próximos do mecanismo experimental foram classificados como “Bom”.

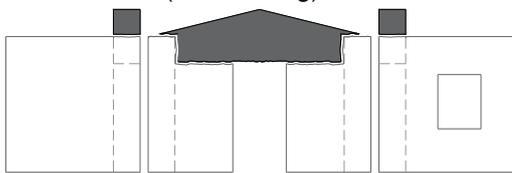
**Experimental (PGA=1.07g)**



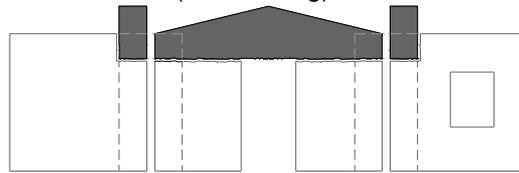
**Mecanismo 1 (PGA: 0.30g; 0.80g)**



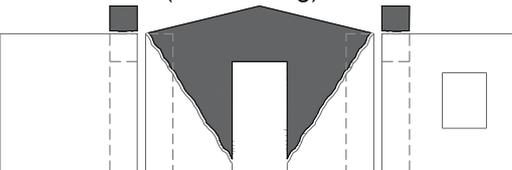
**Mecanismo 2 (PGA: 0.38g)**



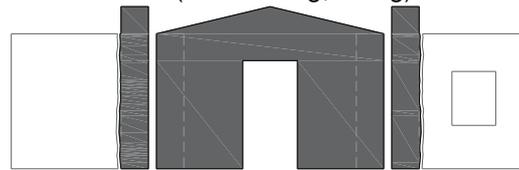
**Mecanismo 3 (PGA: 0.95g)**



**Mecanismo 4 (PGA: 0.60g)**



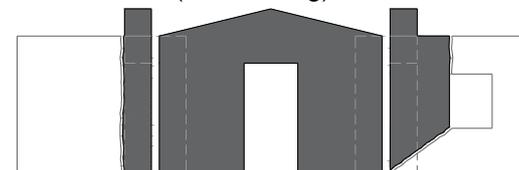
**Mecanismo 5 (PGA: 0.49g; 2.00g)**



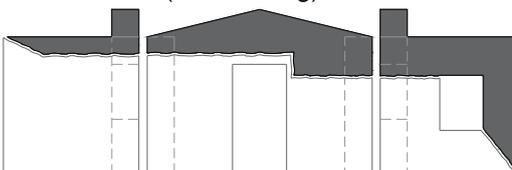
**Mecanismo 6 (PGA: 2.50g)**



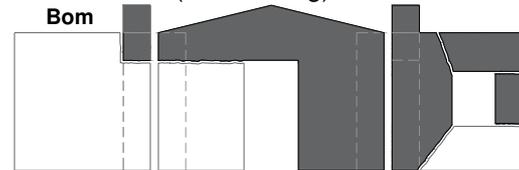
**Mecanismo 7 (PGA: 0.22g)**



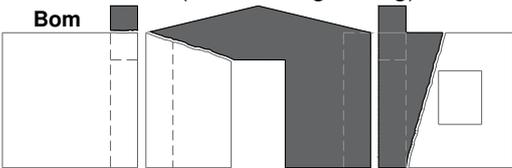
**Mecanismo 8 (PGA: 0.60g)**



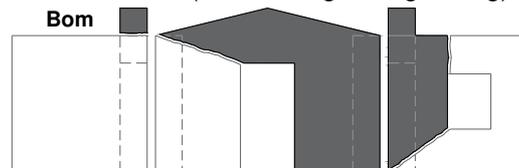
**Mecanismo 9 (PGA: 0.65g)**



**Mecanismo 10 (PGA: 0.53g; 0.89g)**



**Mecanismo 11 (PGA: 0.58g; 0.92g; 1.11g)**



**Mecanismo 12 (PGA: 1.40g)**

**Mecanismo 13 (PGA: 0.87g; 1.42g)**

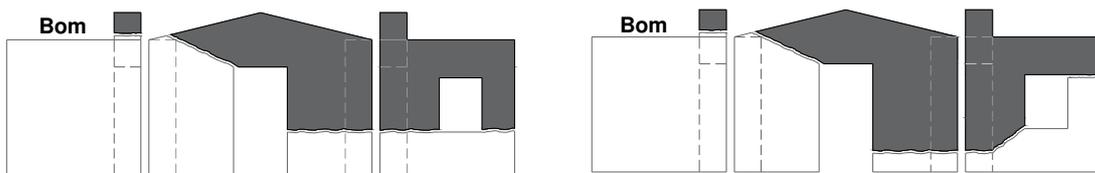


Figura 9: Mecanismos de colapso definidos para a estrutura em alvenaria de pedra

Como a maioria dos participantes definiu a aceleração na base do modelo (PGA) como parâmetro de controlo do colapso, a Figura 10 apresenta os valores previstos pelos participantes e a comparação com o valor experimental. O domínio dos resultados é muito alargado (desde 0.22g a 2.5g e COV=63%). Contudo, os valores aqui apresentados também são bastante influenciados pela definição dos mecanismos de colapso apresentados anteriormente.

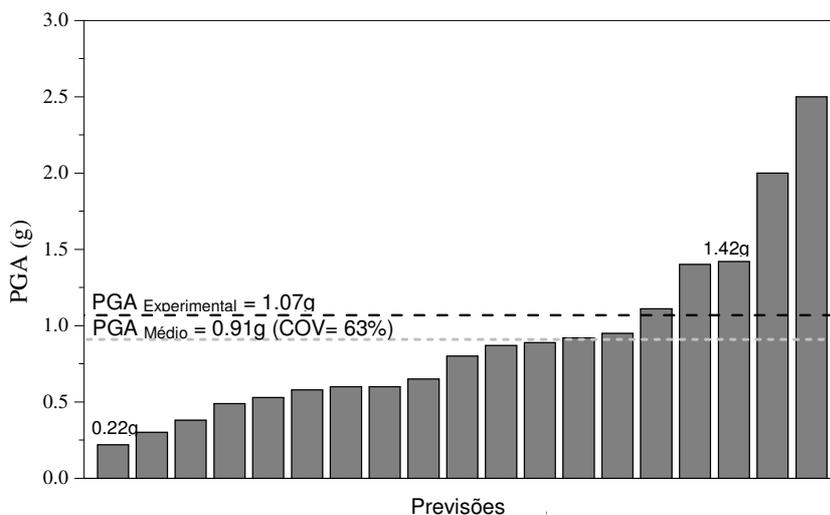


Figura 10: Comparação das previsões em termos de aceleração base para o modelo de pedra

No entanto, e tendo em vista uma abordagem conservativa, a maioria dos participantes previu uma capacidade resistente menor à observada experimentalmente.

Por último, e tendo em conta apenas as previsões que estimaram correctamente o mecanismo de colapso, a amplitude de valores reduz-se (de 0.53g a 1.42g e COV = 31%). Sendo assim, é possível concluir que, através de uma previsão correcta do mecanismo de colapso, é ainda necessário ajustar as metodologias à previsão do comportamento fora-do-plano de estruturas de alvenaria de pedra.

### 4.3. Caso de estudo: alvenaria de tijolo

No caso de estudo de alvenaria de tijolo verificou-se que a maioria dos participantes teve dificuldade em definir correctamente o mecanismo de colapso, apesar de ser uma alvenaria regular e juntas bem definidas.

Um dos problemas nas previsões poderá ter sido a não correcta contabilização do efeito das aberturas na parede de retorno e sua influência no modo de colapso final.

A Figura 11 apresenta os mecanismos de colapso (8 diferentes mecanismos definidos em 14 previsões) dos participantes e sua comparação com a observação experimental. Como não foram obtidos mecanismos de colapso semelhantes ao observado no modelo experimental, foi definido um critério para considerar mecanismos razoavelmente semelhantes ao experimental (identificados como "Razoável").

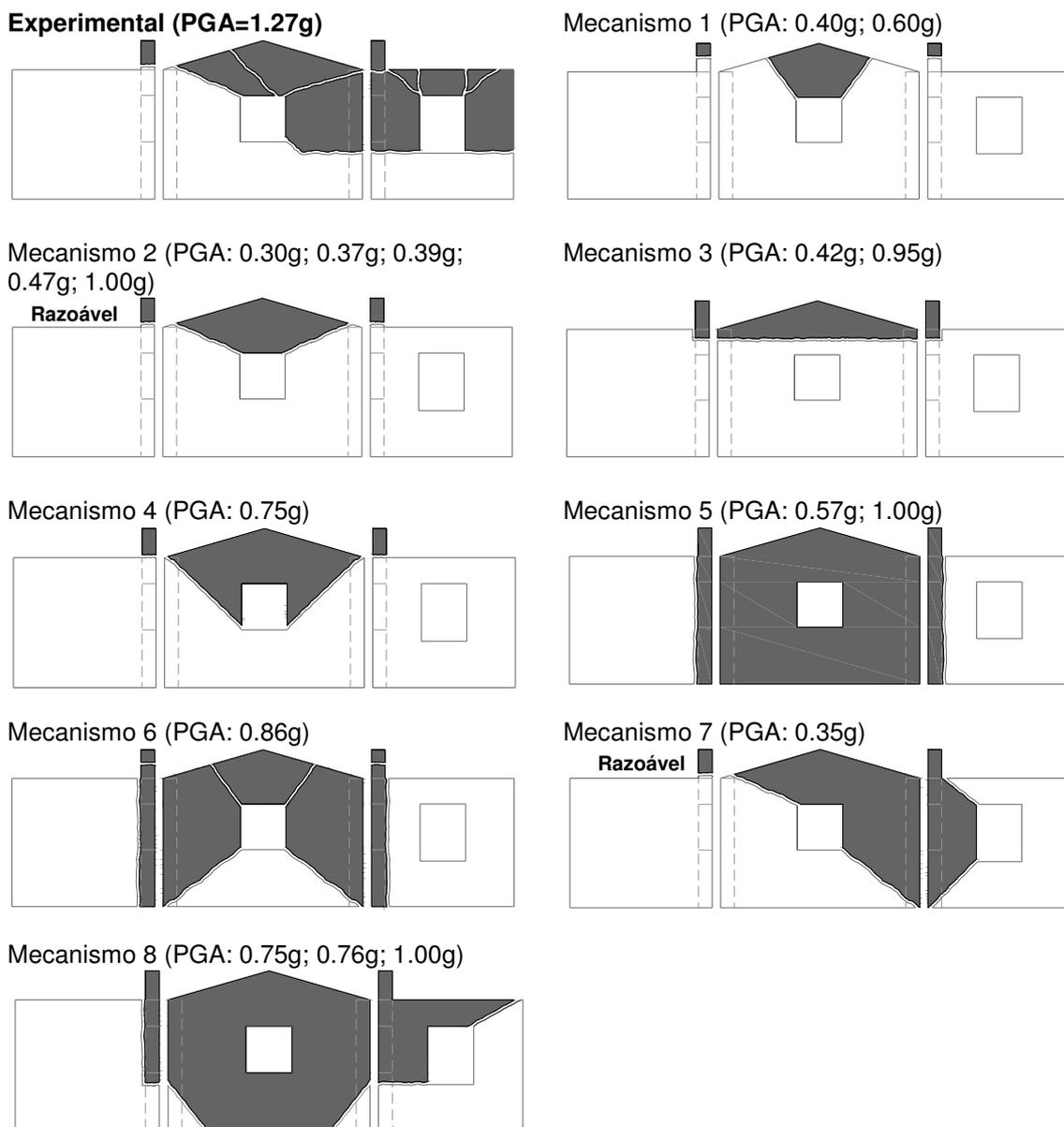


Figura 11: Mecanismos de colapso definidos para a estrutura em alvenaria de tijolo

Existem mecanismos definidos pelo simples derrube do tímpano segundo uma linha horizontal, até derrube total da fachada com ou sem envolvimento das paredes perpendiculares. Verifica-se também que, para os mesmos tipos de mecanismos de colapso, se obtiveram valores bastante diferentes de aceleração na base (p. ex., para o mecanismo 2, desde 0.30g a 1.0g).

A Figura 12 apresenta a comparação dos resultados obtidos em termos de previsão da aceleração base para o colapso da estrutura de tijolo. Os valores previstos ficaram abaixo do valor experimental, sendo todos eles conservativos. O domínio de resultados previstos apresentou-se num domínio entre 0.30g e 1.0g, em que o coeficiente de variação é igual a 41%.

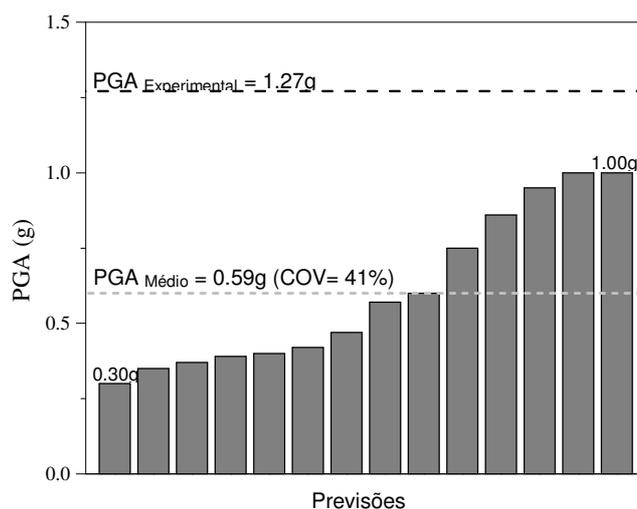


Figura 12 - Comparação das previsões em termos de aceleração base

#### 4.4. Comparação global

Para uma observação global dos resultados obtidos através das previsões realizadas e as metodologias utilizadas, apresenta-se na Tabela 1 o resumo das previsões realizadas e respectivo método utilizado.

Tabela 1: Resumo das previsões realizadas

Método	PGA (g)		Mecanismo		Erro	
	Pedra	Tijolo	Pedra	Tijolo	Pedra	Tijolo
FB + DB + TH	0.6	0.3		Razoável		-75%
Não especificado	0.95	0.75				
FB + DB	2.5	1		Razoável		-21%
FEM + FB + DB	0.58	0.95	Bom			-45%
FEM + FB + DB	0.92	0.42	Bom			-12%
DEM (NLS)	0.65	-	Bom	-		-38%
DEM (IDA)	0.6	-		-		
DEM + FB + DB / FB + DB	0.53	0.37	Bom	Razoável	-50%	-71%
DEM + FB + DB / FB + DB	0.89	0.39	Bom	Razoável	-16%	-69%
FEM (NLS)	0.8	0.6				
FEM (IDA)	0.3	0.4				
FEM + FB + DB	0.50	0.88				
FEM + FB + DB	1.11	0.47	Bom	Razoável	6%	-63%

FEM: Método dos elementos finitos; DEM: Método dos elementos discretos; NLS: Análise estática não linear; IDA: Análise dinâmica incremental; FB: Previsão baseada em força; DB: Previsão baseada em deslocamentos; TH: Análise dinâmica no tempo

Os resultados permitem verificar que foram utilizados vários métodos de análise assim como a combinação entre metodologias, para estimar da melhor forma possível a resposta das estruturas. Relativamente ao modelo de pedra, as melhores estimativas foram realizadas recorrendo ao método dos elementos finitos (FEM) na previsão dos mecanismos de colapso, juntamente com abordagens em força e deslocamento. Relativamente ao modelo em tijolo, a utilização de modelos simplificados e métodos

mistos (força e deslocamento) exibiram a melhor aproximação à capacidade máxima da estrutura.

## 5. CONCLUSÕES

A avaliação do comportamento para fora-do-plano das paredes de estruturas existentes em alvenaria é um problema complexo, o qual foi realçado com a informação apresentada neste artigo. As metodologias disponíveis são várias e os resultados obtidos são diversos e variados, mas nem sempre preveem correctamente o comportamento das estruturas. Apesar dos inúmeros avanços nesta área é possível, através deste trabalho perceber que ainda existe um longo caminho a percorrer, inclusivamente no ponto mais simples mas crucial, como a definição do mecanismo de colapso.

Contudo, a maioria das previsões realizadas e apresentadas neste artigo são conservativas, o que para intervenções em estruturas existentes poderá originar reforços mais profundos e intrusivos, mas que salvaguarda os ocupantes e respectivas vidas humanas.

## 6. AGRADECIMENTOS

Aos técnicos do NESDE do LNEC, na preparação e realização dos ensaios em mesa sísmica. A todos os participantes do workshop, pela dedicação e tempo dispendido nas previsões e discussão dos resultados.

## 7. REFERÊNCIAS

- [1] Gambarotta, L. And Lagomarsino, S. (1997) Damage Models for the Seismic Response of Brick Masonry Shear Walls. Part II: the continuum model and its applications, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 26(4), 441-462. DOI:10.1002/(SICI)1096-9845(199704)26:4%3C441::AID-EQE651%3E3.0.CO;2-0/full.
- [2] Doherty, K., M. C. Griffith, N. Lam and J. Wilson (2002). Displacement-based seismic analysis for out-of-plane bending of unreinforced masonry walls. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 31(4), 833 - 850.
- [3] Costa A.A., Penna A., Arêde A., Costa A. (2015) Simulation of masonry out-of-plane failure modes by multi-body dynamics, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 44(14), 2529-2549. DOI: 10.1002/eqe.2596.
- [4] Ferreira, T. M., Costa A. A., Costa, A. (2015) Analysis of the out-of-plane seismic behaviour of unreinforced masonry: A literature review, *International Journal of Architectural Heritage*, 9(8), 949-972. DOI:10.1080/15583058.2014.885996