

Desenvolvimento de curvas de fragilidade à acção sísmica para construções tradicionais de Liège, Bélgica

Alexandre A. Costa

*NCREP – Consultoria em Reabilitação do Edificado e Património, Lda. / ISEP, Porto, Portugal,
alexandre.costa@ncrep.pt*

Jérôme Pirmez

*Louvain School of Engineering, UCLouvain, Louvain-la-Neuve, Belgium,
jerome.pirmez@student.uclouvain.be*

João Pacheco de Almeida

*Institute of Mechanics, Materials and Civil Engineering, UCLouvain, Louvain-la-Neuve, Belgium,
joao.almeida@uclouvain.be*

Resumo

A análise do risco sísmico à escala urbana é actualmente realizada com base na análise de zonas homogéneas, onde se identificam tipologias construtivas comuns numa determinada área de uma cidade, muitas vezes associadas com a evolução orgânica da malha urbana. Posteriormente, são desenvolvidas ou utilizadas curvas de fragilidade já existentes para cada tipologia dos edifícios identificados, sendo importante que procurem reproduzir o comportamento sísmico das construções o mais próximo da realidade. Nesse sentido, a utilização de curvas adaptadas à realidade do construído é fundamental para uma estimativa realista do risco sísmico à escala urbana.

Neste trabalho apresenta-se o desenvolvimento de curvas de fragilidade para construções tradicionais de 3 e 4 pisos presentes na cidade de Liège, Bélgica, construções estas em alvenaria de tijolo não reforçado anteriores a 1940 e representativas de mais de 25% do parque habitacional. É apresentada a metodologia utilizada recorrendo ao programa Tremuri, tendo-se em consideração as incertezas associadas ao material e sua influência no comportamento global de dois edifícios padrão. Por último, apresenta-se os resultados obtidos relativos às curvas de fragilidade, bem como resultados da análise de risco sísmico da cidade de Liège incluindo esta tipologia construtiva.

Liège pode ser considerada como inserida numa zona de baixa a moderada sismicidade (PGA 0.10g) de acordo com o zonamento sísmico nacional actual. Por outro lado, é a 4ª cidade com mais população da Bélgica (200 mil habitantes), evidenciando uma exposição relevante face à acção sísmica combinada com uma acção sísmica baixa mas não negligenciável, comprovada pelos danos provocados pelo sismo de Liège de 1983 (75 milhões euros, Camelbeeck et al., 2013).

Palavras-chave: Alvenaria; Fragilidade; Sísmica; Liege; Pushover

1 INTRODUÇÃO

A Bélgica apresenta uma perigosidade sísmica não negligenciável, nomeadamente a região da Valónia. A sismicidade histórica encontra-se sumarizada no mapa da Figura 1(a), permitindo identificar as duas regiões mais expostas à acção sísmica. A Oeste encontra-se a província de Hainaut, incluindo cidades como Charleroi e Mons. Foi a noroeste desta região que teve lugar o epicentro do sismo de Oudenaerde em 1938 (M_L 5.6), que mais danos causou até à data. Os registos incluem 17'550 chaminés colapsadas, 3 mortos e várias dezenas de feridos. Atingiu intensidades de VII em diversas regiões do país (EMS-98).

A região com maior distribuição geográfica de registos sísmicos encontra-se, porém, a Este. Inclui as províncias de Liège e de Limbourg, onde existe uma importante densidade populacional. Em particular, a cidade de Liège, analisada no presente trabalho, detém um registo histórico regular de ocorrência de sismos. Nos últimos 50 anos, são de registar o sismo de 1965 e, com consequências mais gravosas, o de 1983 ($M_w=4.7$): 16'000 edifícios danificados e mil habitantes realojados, ver Figura 1(b).

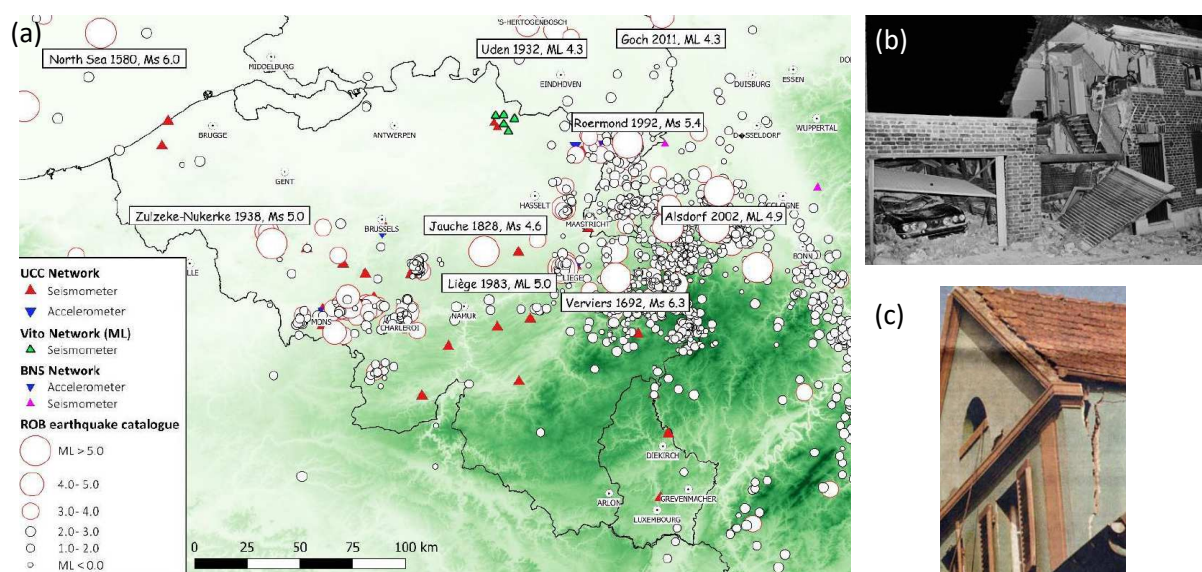


Figura 1. (a) Sismicidade histórica na Bélgica; (b) Danos registados em Liège após o sismo de 1983; (c) Danos registados após o sismo de Roermond, em 1992 [2]

2 Descrição da tipologia construtiva

Vinel e Tenret [1] realizaram recentemente um extenso trabalho de investigação relativo à exposição sísmica da cidade de Liège, mostrando que 95% dos edifícios habitacionais são construídos de alvenaria resistente, como ilustrado na Figura 2.

Pirmez [4] consultou de seguida diversos engenheiros de estruturas e arquitetos locais, bem como documentação diversa nomeadamente no domínio da História da Arquitectura de Liège. Concluiu que as primeiras construções em betão armado só aparecem depois da 2ª Guerra Mundial, podendo-se assim assumir que os edifícios construídos até 1940 são na sua esmagadora maioria construções em

alvenaria não reforçada. Assim, e tendo em conta a o histograma da Figura 3, conclui-se que pelo menos 24286 edifícios são de alvenaria não reforçada, o que corresponde a 21.9% do total ou 31.9% dos edifícios residenciais.

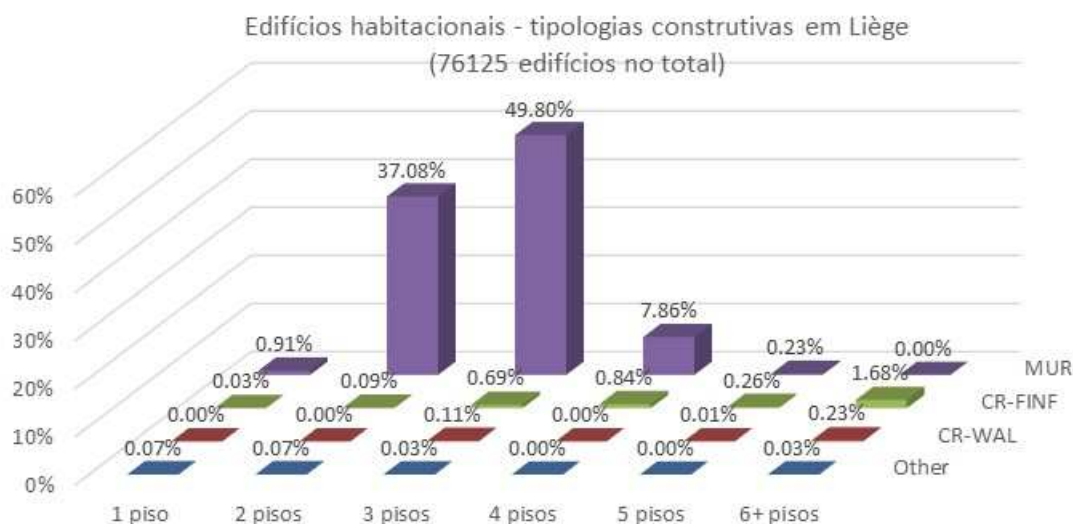


Figura 2. Tipologias de edifícios habitacionais em Liège (MUR: alvenaria não reforçada; CR-FINF: porticados em betão armado com alvenaria de enchimento; CR-WAL: betão armado com paredes monolíticas) (Vinel e Tenret [1]).

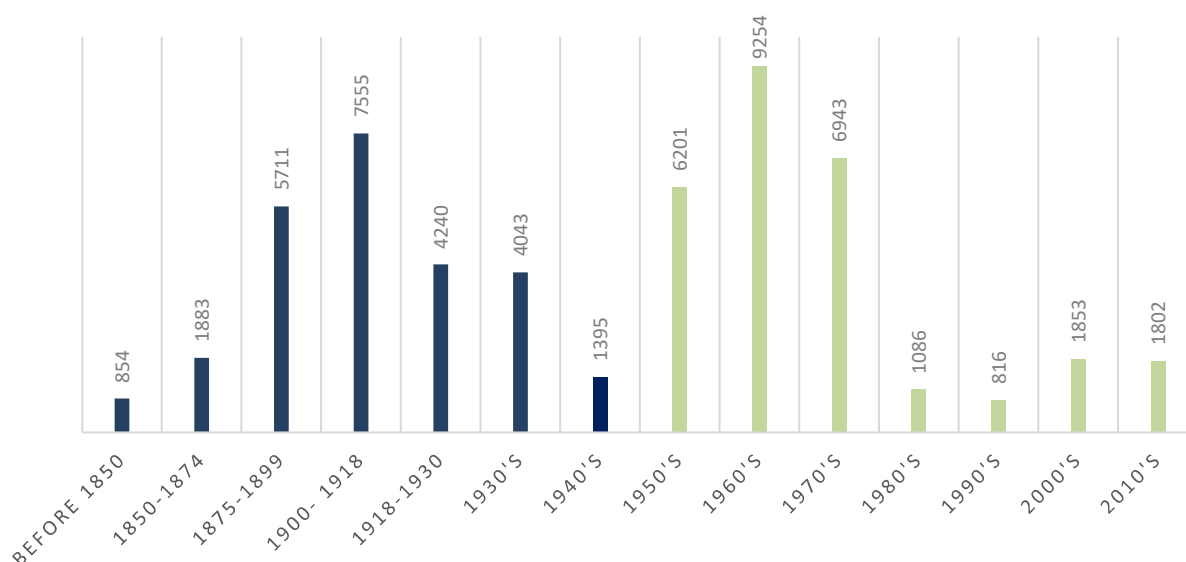
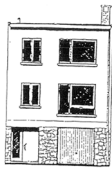
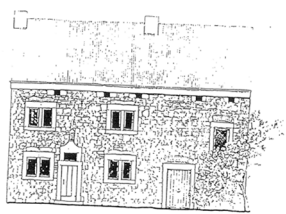


Figura 3 – Número de edifícios residenciais em Liège por data de construção, considerando apenas aqueles que não tiveram obras de modificação [4].

Adicionalmente, Pirmez [4] verificou que o número de edifícios de alvenaria anteriores a 1940, partilhando duas paredes com as construções adjacentes, e com 2 ou 3 pisos (+sótão), corresponde a 25.5% (19472 construções) do número total de edifícios residenciais. Tal conclusão indica a

importância de analisar esta tipologia construtiva em maior detalhe. A Tabela 1. apresenta o resumo das tipologias existentes de edifícios de alvenaria em Liège. As casas que se enquadram nas tipologias mais representativas têm 2 a 3 pisos (+ sótão), foram construídas antes de 1940 e não foram entretanto modificadas. As casas modestas, burguesas, e mansões encaixam-se neste perfil. Apesar das casas históricas também poderem apresentar elevado risco sísmico, estas têm uma representatividade reduzida e não foram consideradas neste estudo.

Tabela 1.– Tipologias de edifícios de alvenaria em Liège (compilado e adaptado de [5], [6] e [7]).

Casas modestas	Casas burguesas	Mansão
		
Construída entre segunda metade do séc. XIX e início séc. XX Localizada em zonas suburbanas industriais 4 a 5m de largura 2 pisos + sótão utilizável Janelas e portas alinhadas Fachadas de alvenaria Edificação em banda	Construída entre segunda metade do séc. XIX e início séc. XX Localizada em zonas urbanas 5 a 6m de largura 2 pisos + sótão utilizável Janelas mais largas do que as portas Fachadas de alvenaria	Construída entre segunda metade do séc. XIX e início séc. XX 7 a 12m de largura Entre 2 e 3 pisos (+ sótão utilizável) Janelas e portas largas Algumas com varandas Edificação em banda Fachadas de alvenaria e trabalhadas
Casa histórica	Casa moderna	Casa rural
		
Construída entre séc. XVIII e XIX Localizada no centro histórico de Liège 4 a 5m de largura Janelas estreitas e altas Sótão utilizável	Construída a partir de 1930 Paredes meeiras 6 a 8m de largura Cobertura plana Fachada com diferentes tijolos Existência de 1 garagem no R/C	Construída entre início séc XVIII e início séc. XX Localizadas na periferia Bastante largas 2 pisos

3 Casos de estudo

3.1 Critérios para selecção e apresentação

A definição dos casos de estudo a utilizar para desenvolvimento das curvas de fragilidade da tipologia construtiva habitacional mais comum foi feita com base na selecção de edifícios de 2 a 3 pisos (+ sótão) e 2 paredes meeiras, sendo representativos das tipologias de casa modesta, burguesa e mansão. Foram seleccionados 2 edifícios onde existia toda a documentação, nomeadamente peças desenhadas de arquitectura (plantas, alçados e cortes), documentação fotográfica e informação da evolução dos edifícios ao longo dos tempos (incluindo registo da data de construção).

3.1.1 Casa A (Rue Comhaire)

É uma casa de 2 pisos acima do solo (cave, R/C + 1 piso + sótão) e que representa a casa burguesa descrita anteriormente, ver casa danificada na Figura 1(b). Foi construída entre 1875 e 1899 na Rue Comhaire do distrito de Laveu. Apresenta uma planta trapezoidal com dimensões de 6,02m de largura, 8,38m de comprimento máximo e 7,72 comprimento mínimo, com 48,5m² de área de implantação. As paredes são de alvenaria de tijolo, contendo tijolos de diferentes cores na fachada principal. Os pavimentos são constituídos por vigas de madeira com soalho de madeira, materializando um diafragma flexível. Não foi possível verificar se existe ligação entre as vigas e as paredes de alvenaria. Em relação à direcção das vigas, considerou-se perpendicular à fachada, tendo as paredes interiores de compartimentação de tijolo também funções de suporte (parede interior principal com 25cm de espessura). Constatou-se que não existe um critério definido para a orientação das vigas de pavimento nas consultas realizadas a várias fontes locais (arquitectos, engenheiros, e construtores).

3.1.2 Casa B (Rue de l'Aumonier)

É uma casa de 3 pisos acima do solo (cave + R/C + 2 pisos + sótão) que representa a casa mansão descrita anteriormente, estando apresentada na Figura 4. Foi construída no final do séc. XIX e localiza-se na rua l'Aumonier, no distrito de Saint-Laurent. Apresenta uma planta rectangular com dimensões de 6,29m de largura por 9,63m de comprimento, com uma área de 60,6m² de área de implantação. No piso 0 e 1 apresenta uma pequena extensão na parte tardoz, não considerada no modelo por não ser representativo desta tipologia. As paredes são feitas de alvenaria de tijolo na sua maioria, contendo alguns elementos de pedra na fachada principal.

Em relação aos pavimentos ligações viga-parede, e orientação das vigas de piso, as considerações feitas para a casa A também são válidas para este caso.

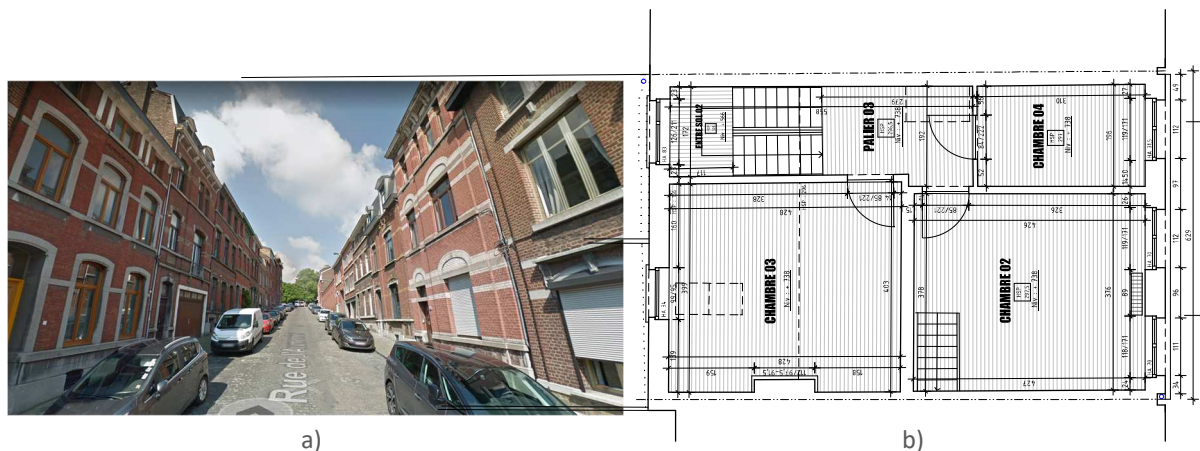


Figura 4. Casa B (casa burguesa): a) imagem da rua (fonte: Google maps); b) planta tipo (pisos 2).

3.2 Definição de modelos de análise sísmica

A selecção dos modelos para análise sísmica foi feita na sequência de trabalhos já feitos no passado em âmbito semelhante pelo NCREP [8], usando modelação 3D através de pórticos equivalentes com macro-elementos, recorrendo ao programa Tremuri [9]. A Figura 5 apresenta a discretização das fachadas (direcção X) dos 2 casos de estudo através dos macro-elementos (laranja – elementos parede; verde – elementos *spandrel*; cinza – elementos rígidos).

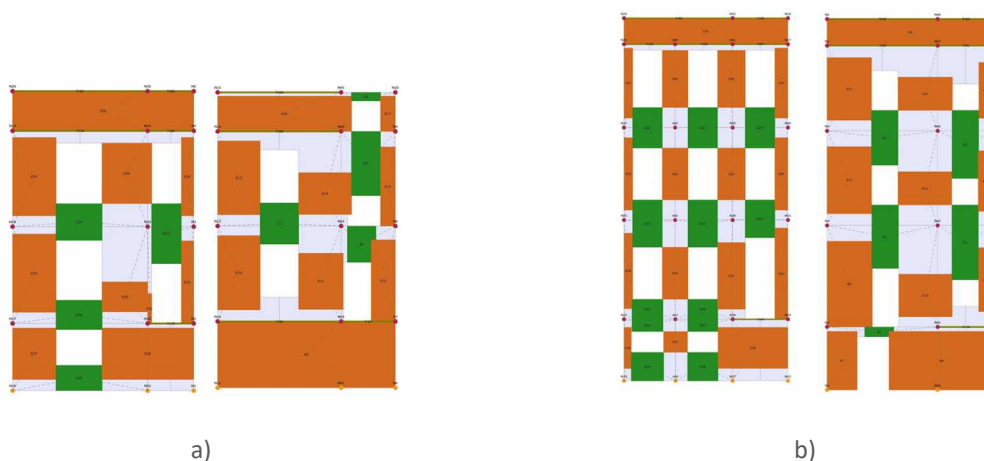


Figura 5. Modelo das fachadas frontal e tardoz através de pórticos equivalentes em Tremuri:
a) casa A; b) casa B.

A selecção deste tipo de modelação permitiu manter tempos de computação aceitáveis na realização de análises não-lineares. Optou-se ainda por análises estáticas não-lineares (pushover) devido ao tempo de cálculo reduzido e à inexistência de catálogos de acções sísmicas para a cidade de Liège à data da realização do trabalho. Contudo, num dos trabalhos futuros serão realizadas análises não-lineares dinâmicas, para validar e complementar as conclusões obtidas neste trabalho.

3.3 Definição de objectivos e características do modelo

Sendo o objectivo principal do trabalho a obtenção de curvas de fragilidade para este tipo de edifícios, optou-se por trabalhar na variabilidade associada às características mecânicas das alvenarias, deixando para uma futura fase a análise na variabilidade geométrica das construções. Na ausência de resultados de ensaios experimentais em paredes, foram recolhidas amostras de um edifício em demolição em Liège. Das amostras recolhidas, observou-se que a maioria dos tijolos têm dimensões $23 \times 11 \times 6 \text{ cm}^3$ (respectivamente, comprimento, largura e altura). Foi analisada a constituição da alvenaria nessas amostras, tendo-se extraído 5 amostras de tijolo para ensaiar à compressão ($f_{b,mean}=17.67 \text{ MPa}$, $\sigma=4.49 \text{ MPa}$). Os valores obtidos enquadram-se dentro de valores obtidos na literatura (p. ex., [10], [11], [12]). Assumindo uma distribuição do tipo normal, foi adoptado o valor médio afectado de 1 desvio padrão para definição das propriedades do tijolo (intervalo entre 13.18 MPa e 22.16 MPa). Relativamente às argamassas utilizadas, existe uma grande variação: argamassas maioritariamente com cal, argamassas onde já era utilizado cimento, ou argamassas bastardas. Considerou-se um valor mínimo de 2.5 MPa e máximo de 5 MPa para os valores de resistência à compressão (f_m).

Com base nas características definidas para os tijolos e argamassa, definiram-se as restantes características mecânicas da alvenaria, partindo da definição da resistência à compressão da alvenaria (f_m) segundo o EC6, Eq. (1) ($K=0.55$; $\alpha=0.7$; $\beta=0.3$)

$$f_k = K \cdot f_b^\alpha \cdot f_m^\beta \quad (1)$$

A definição da resistência à compressão da alvenaria serviu de base para a definição dos parâmetros de rigidez (E, G), sendo a definição dos parâmetros relativos ao comportamento ao corte definidos com base na bibliografia. A Tabela 2 sumarisa a gama de valores usados nas análises numéricas.

Tabela 2. Características mecânicas consideradas e número de valores (N) utilizados nas análises.

	Mínimo	Máximo	Unidades	N	Definição	Fonte
Resistência à comp. tijolo f_b	13,18	22,16	MPa	-	-	Ensaio de provetes
Resistência à comp. argam. f_m	2,5	5	MPa	-	M2 e M5	[13]
Resistência à comp. alvenaria f_k	4,41	7,79	MPa	50	Eq. (1)	[13]
Módulo de elasticidade E	1843	3256	MPa	50	$f_k \times 418$	[14]
Módulo de distorção G	614	1085,4	MPa	50	$\frac{1}{3} \times E$	[14]
Resistência inicial ao corte f_{vko}	0,13	-	MPa	1	Constante	[14]
Coefficiente de atrito μ	0,4	0,7	[-]	4	-	[13], [15], [16]

Em particular, foram definidos 50 valores para a resistência à compressão (f_k) e 4 valores para o coeficiente de atrito (μ), originando um total de 200 análises por direcção, totalizando 400 análises por

edifício (200 na direcção +X e 200 para -X). As análises foram realizadas apenas na direcção paralela à fachada por ser a direcção mais vulnerável.

4 Análise de resultados e risco sísmico

4.1 Estados limite considerados e curvas de fragilidade

Como referido, foram realizadas análises pushover para as diferentes combinações de características mecânicas para cada edifício. Com base nas curvas pushover, geraram-se curvas bilineares de acordo com o procedimento apresentado no EC8, obtendo-se de seguida o *performance point* para uma dada acção com determinado PGA. O deslocamento associado ao performance point foi comparado com 4 estados-limite definidos, obtendo-se assim indicação da fragilidade do edifício. Este procedimento foi repetido para acções sísmicas com valores crescentes de PGA (abrangendo todos os estados-limite), obtendo-se a matriz de fragilidade. As curvas de fragilidade finais decorreram do ajuste de uma distribuição lognormal aos resultados obtidos.

Foram definidos 4 estados-limite: i) DS1 (limitação de danos): primeira fenda, identificado como dano ligeiro no 1º macro elemento; DS2 (danos ligeiros): associado à mudança para tramo recto da curva bilinear (*yielding point*); DS3 (danos significativos): 75% do deslocamento último da bilinear (estado-limite de acordo com EC8); DS4 (colapso iminente): deslocamento último na bilinear (estado-limite de acordo com EC8). As curvas de fragilidade finais apresentam-se na Figura 6.

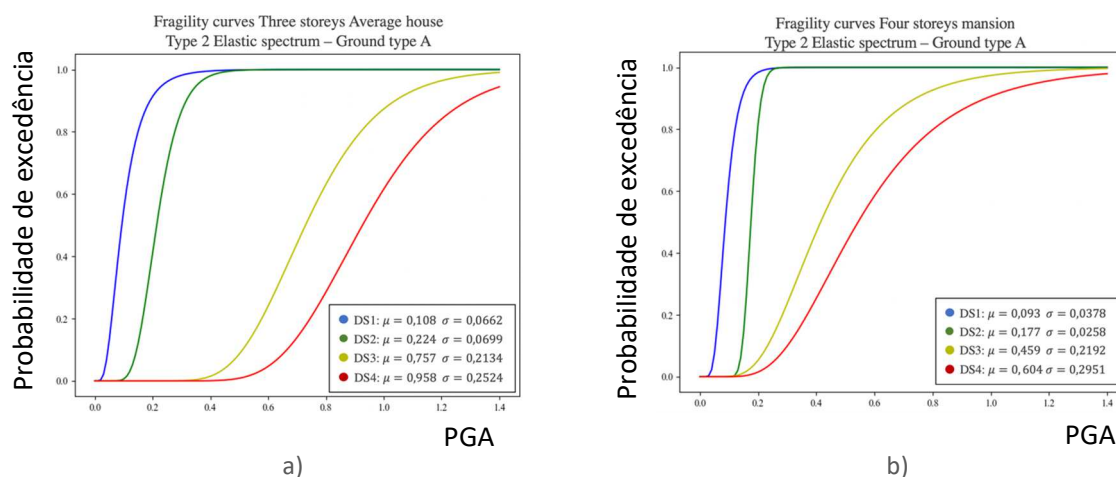


Figura 6. Curvas de fragilidade em rocha para sismo tipo 2 (caso de Liège): a) edifício 2 pisos+sótão (casa burguesa); b) edifício 3 pisos+sótão (mansão).

4.2 Análise do risco sísmico

Paralelamente ao presente estudo, foi desenvolvido por [1] a análise de risco de Liège, utilizando para a tipologia de edifícios alvo deste estudo curvas de fragilidade de tipologias construtivas de outros países. As novas curvas de fragilidade serviram para actualizar tal análise de risco.

A Figura 7 apresenta a comparação dos resultados obtidos com as novas curvas de fragilidade, mais realistas, para um mesmo cenário de dano específico, considerando o plano de rotura do sismo de Liège de 1983. As novas curvas de fragilidade traduzem um comportamento mais vulnerável da tipologia do parque habitacional alvo deste estudo. Os resultados indicam que, para um cenário semelhante ao sismo de Liège de 1983, 17116 edifícios habitacionais apresentarão danos, valores próximos das 16.000 casas reportadas como danificadas em 1983 [17]. Realça-se que as curvas de fragilidade apresentadas não contemplam colapsos fora-do-plano ou problemas associados a elementos não estruturais (por exemplo, chaminés ou parapeitos), podendo estar a ser demasiado penalizadoras. Por outro lado, a comparação directa destes resultados está também influenciada pela definição da perigosidade sísmica de Liège e adequação das leis de atenuação.

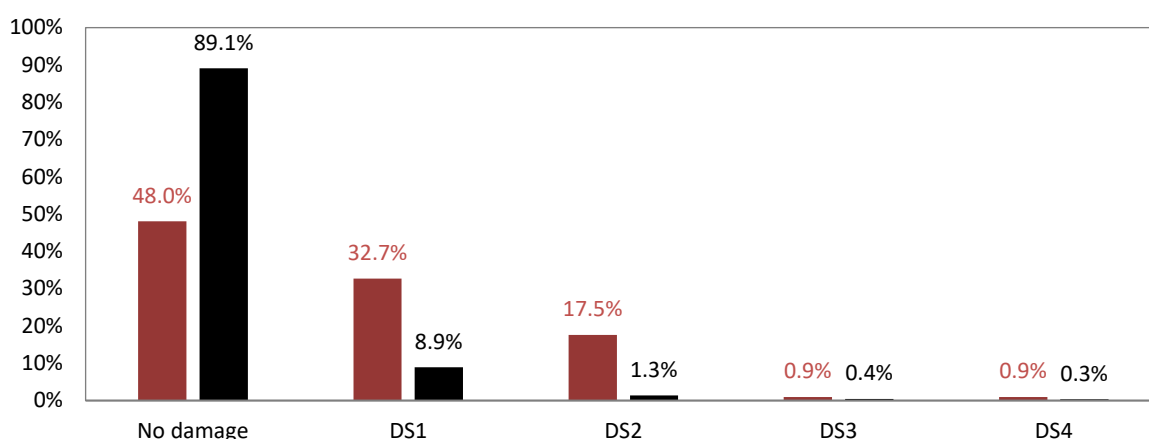


Figura 7 . Comparação da estimativa dos níveis de dano nas tipologias alvo deste estudo: vermelho, novas curvas de fragilidade; preto, curvas de fragilidade utilizadas por [1].

5 Considerações finais

O presente trabalho apresenta as tipologias construtivas típicas de Liège, Bélgica, bem como os sistemas estruturais mais comuns. Com base na tipologia mais representativa dos edifícios habitacionais, foram desenvolvidas novas curvas de fragilidade que evidenciaram uma maior vulnerabilidade destas construções em cenário sísmico quando comparadas com resultados obtidos de trabalhos anteriores.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao aluno de doutoramento Jose Baena por toda a assistência técnica.

REFERÊNCIAS

- [1] Barszez, A.-M. (2007) Vulnérabilité et risques sismiques em Belgique: État des lieux et études de cas significatifs. Évaluation et prévention du risque sismique en Région Wallonne, 16-17 October 2007.



- [2] Plumier, A., Camelbeeck, T., & Barszez, A.-M. (2006) Le risque sismique et sa prévention en région wallonne. La Région wallonne.
- [3] Vinel, L., Tenret, T. (2020) Neglected but non-negligible: Seismic risk assessment in Belgium. MSc thesis, UCLouvain, Belgique.
- [4] Pirmez, J. (2021) Development of fragility curves for Belgian unreinforced masonry buildings and characterisation of seismic risk, MSc thesis, UCLouvain, Belgique.
- [5] SPW (2020) Wallonie énergie SPW. Energy department of the Wallonia public service. <https://energie.wallonie.be/fr/index.html?IDC=6018>
- [6] Opdebeeck, M., De Herde, A. (2014) Guide de la rénovation énergétique et durable des logements en Wallonie.
- [7] Plumier, A., Jongmans, D. (2000) Étude pilote du risque sismique sur une partie de la ville de Liège.
- [8] Costa, A.A., Marchesi, B., Guedes, J.M., Quelhas, B., Ilharco, T., Lopes, V. (2019) Avaliação do comportamento sísmico de edifícios tradicionais do Porto antes e após aplicação de reforço simples. Parte 1: calibração de modelo numérico e critérios de modelação. Sísmica 2019 – 11º Congresso Nacional de Sismologia e Engenharia Sísmica, IST, 29-30 Abril 2019.
- [9] Lagomarsino, S., Penna, A., Galasco, A., Cattari, S. (2013) TREMURI program: An equivalent frame model for the nonlinear seismic analysis of masonry buildings. In Engineering Structures, Vol. 56, 1787-1799.
- [10] Brencich, A., and Sterpi, E. (2006) Compressive Strength of Solid Clay Brick Masonry: Calibration of Experimental Tests and Theoretical Issues. Structural Analysis of Historical Constructions. New Delhi.
- [11] Pelà, L., Roca, P., Benedetti, A. (2015) Mechanical characterization of historical masonry by core drilling and testing of cylindrical samples.
- [12] NZSEE (2019) Recommendations of a NZSEE Project Technical Group. Assessment and Improvement of the Structural Performance of Buildings in Earthquakes. June.
- [13] CEN, European committee for Standard (2005) Eurocode 6: Design of masonry structures - part 1.1 common rules for reinforced and unreinforced masonry structures. EN 1996- 1-1. Brussels.
- [14] MIT, Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti (2018) Italian National Technical Code. Decreto Ministeriale del 17 gennaio 2018, Supplemento ordinario alla G.U. n. 42 del 20 febbraio 2018, Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti. Rome.
- [15] Atkinson, R.H., Amadei, P., Saeb, S., Sture, S. (1989) Response of masonry bed joints in direct shear. Journal of Structural Engineering, Vol. 115, No. 9, pp. 2276-2296.
- [16] Roberti, G.M., Binda, L., Cardani, G. (1997) Numerical modeling of shear bond tests on small brick-masonry assemblages. Computer Methods in Structural Masonry-4: Fourth International Symposium. Vol. 4., pp. 144-152.
- [17] Camelbeeck, T., Plumier, A., Garcia-Moreno, D. (2013) Le tremblement de terre de Liège du 8 novembre 1983.