

**DESAFIOS E DIREÇÕES DE INVESTIGAÇÃO NA IDENTIFICAÇÃO E  
CARACTERIZAÇÃO DE TIPOLOGIAS DE EDIFÍCIOS DE ALVENARIA  
INTERVENCIONADOS COM RECURSO A BETÃO ARMADO**

**Gonçalo Correia Lopes**  
Bolsheiro de doutoramento  
RISCO – Universidade de Aveiro

**Romeu Vicente**  
Prof. Associado  
RISCO – Universidade de Aveiro

**Tiago Miguel Ferreira**  
Investigador (post-doc)  
ISISE – Universidade do Minho

**Miguel Azenha**  
Prof. Auxiliar  
ISISE – Universidade do Minho

**SUMÁRIO**

Os processos de reabilitação, reforço, renovação e/ou reconstrução de construções de alvenaria não-reforçada, em paralelo com o desenvolvimento e uso progressivo do betão armado desde o início do século XX, conduziram ao aparecimento de uma nova tipologia estrutural mista composta por alvenaria tradicional (URM) e betão armado (RC), designada aqui em diante como URM-RC (do inglês *UnReinforced Masonry-Reinforced Concrete*). No entanto, ao longo dos anos, estas estruturas mistas resultantes de intervenções passadas têm, na maioria dos casos, demonstrado um comportamento sísmico desadequado. Apesar da sua elevada complexidade e heterogeneidade estrutural, carece-se ainda de investigação aprofundada para desmistificar o seu papel negativo, admissível, ou até necessário.

Neste contexto, o presente artigo representa um primeiro passo para a compreensão definição e catalogação das tipologias existentes de edifícios mistos URM-RC. Com base na proposta de um sistema de classificação para a categorização e caracterização das diferentes tipologias mistas, este trabalho tem como principal objetivo apoiar futuras avaliações da vulnerabilidade sísmica deste tipo de edifícios em estudos futuros, bem como ajudar a conceber soluções de intervenções de reforço mais eficientes e adequadas. Adicionalmente, são identificados os principais desafios em aberto associados à avaliação da vulnerabilidade sísmica.

**ABSTRACT**

The processes of rehabilitation, strengthening, renovation and/or reconstruction of unreinforced masonry (URM) buildings, in parallel with the development and progressive use of reinforced concrete (RC) since the beginning of the 20th century, led to the creation of a mixed unreinforced masonry-reinforced concrete typology, hereinafter designated as URM-RC. However, over the years, these mixed structures derived from past interventions have often exhibited a poor seismic behaviour. Although their high structural complexity and heterogeneity, there is still a need for in-depth research to demystify its negative, permissible, or even necessary role.

In this context, the present paper represents a first step for the thorough understanding of the existing mixed URM-RC building typologies. A comprehensive cataloguing and categorization of the different mixed typologies is herein proposed in order to support a more reliable assessment of their seismic vulnerability in future studies, as well as to design proper strengthening interventions so as to avoid future disasters. Furthermore, a comprehensive array of open issues is given in a section dedicated to the associated challenges.

**PALAVRAS-CHAVE:** Edifícios mistos URM-RC; Tipologias de edifícios; Estratégias de reforço sísmico.

## 1. INTRODUÇÃO

A reabilitação do património edificado é um assunto que tem recebido um crescente interesse nas últimas décadas. Neste contexto, dois aspetos importantes são a avaliação da segurança estrutural de edifícios antigos e, se necessário, o dimensionamento de soluções de reforço. Contudo, várias intervenções concretizadas no passado com o propósito de reforçar edifícios antigos com novos materiais e técnicas foram (e continuam a ser) realizadas sem o apoio de cálculos estruturais adequados e sem a avaliação das suas consequências em termos de compatibilidade com a estrutura existente.

Esta realidade tem ocorrido em paralelo com o advento e uso progressivo do betão armado desde o início do séc. XX, o que levou ao aparecimento de uma tipologia estrutural mista composta por alvenaria tradicional (URM) e betão armado (RC), designada na bibliografia como URM-RC (do inglês *unreinforced masonry-reinforced concrete*). Para além disto, a utilização de betão armado em intervenções de reforço tem sido sugerida em várias normas e códigos nacionais e internacionais, com o propósito de aproveitar as eventuais vantagens deste material em termos de melhoria da ductilidade e capacidade resistente, e melhorar o comportamento global (“*box-behaviour*”) da estrutura. Tal como observado por Sangirardi [1], no contexto italiano, foram várias as normas técnicas, emitidas após importantes sismos, a recomendar a utilização de betão armado como um material adequado para a realização de intervenções de reforço estrutural em edifícios antigos. No contexto nacional, na sequência do sismo dos Açores de 1998, o Laboratório Regional de Engenharia Civil (LREC) elaborou um documento técnico prescrevendo um conjunto de regras gerais para o reforço e reconstrução de edifícios afetados pelo sismo com recurso à tecnologia do betão armado (ex.: adição de rebocos armados, inserção de vigas cinta, etc.).

Não obstante a disseminação desta tipologia, especialmente nos países mediterrânicos e na América Latina, a investigação sobre este tema ainda é limitada [1, 2]. Além disso, ao contrário das soluções de alvenaria confinada, para as quais estão disponíveis vários manuais e regulamentos, no que diz respeito às tipologias mistas URM-RC, não existem indicações suficientes e rigorosas sobre as metodologias e critérios de análise e de avaliação a utilizar na prática [2]. Consequentemente, estas intervenções com recurso ao betão armado têm sido executadas considerando apenas a resistência aos esforços verticais, negligenciando a sua resposta real face às ações sísmicas, pelo que nem sempre resultam em melhoria do desempenho sísmico dos edifícios [3]. Por exemplo, a substituição de pisos existentes de madeira por lajes de betão armado e a inserção de vigas-cinta podem ter consequências negativas ou positivas, dependendo de uma série de fatores, tais como a compatibilidade com a estrutura existente, o grau de ligação, o rigor do dimensionamento, a qualidade da execução e dos materiais, etc. [4].

Por estes motivos, o presente artigo representa um primeiro passo para a compreensão das tipologias mistas URM-RC existentes através de uma proposta de um sistema de classificação para a definição e categorização dos tipos de intervenção mais frequentemente executados com recurso ao betão armado em edifícios existentes, bem como na especificação dos principais desafios associados à avaliação da vulnerabilidade sísmica deste tipo de edifícios.

## 2. EVOLUÇÃO DAS TIPOLOGIAS DE EDIFÍCIOS DE ALVENARIA

A classificação de edifícios de alvenaria tradicional pode ser feita de acordo com vários aspetos [5, 6]: (i) materiais de construção (adobe, pedra, tijolo); (ii) função estrutural da alvenaria; (iii) sistema estrutural; (iv) local de construção; (v) disposição no agregado urbano; (vi) período de construção; (vii) uso do edifício. Relativamente às tipologias mistas URM-RC, o primeiro sistema de classificação foi proposto por Cattari (2007) e Liberatore *et al.* (2007), diferenciando estruturas em que os elementos de betão armado estão ou não considerados aderentes com as paredes de alvenaria tradicional.

Todavia, tendo em conta a classificação das tipologias de intervenção proposta na secção 3. , o sistema de classificação adotado neste artigo é baseado na evolução do papel do betão armado nos edifícios ao longo dos últimos 90 anos, que foi gradualmente substituindo os processos de construção tradicionais. Desta forma, é possível distinguir três tipologias de construção principais, tal como ilustrado na Fig. 1: edifícios antigos de alvenaria tradicional, edifícios mistos URM-RC, e edifícios de estrutura porticada de betão armado com paredes de enchimento de alvenaria confinada. Os edifícios mistos podem ainda ser subdivididos em: (i) edifícios URM-RC originais, quando a construção dos elementos de betão armado é contemporânea à construção das paredes de alvenaria tradicional (ex.: edifícios “placa”); e (ii) edifícios URM-RC derivados, quando a construção dos elementos de betão armado é posterior à data de construção do edifício. Esta última tipologia mista é característica de intervenções de reabilitação e/ou renovação em edifícios antigos, em que a inclusão de novos elementos de betão armado resulta geralmente num aumento da complexidade e heterogeneidade estrutural (massa e rigidez), o que pode comprometer o comportamento do edifício face à ação sísmica [9, 10].


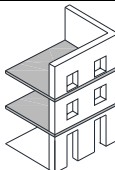
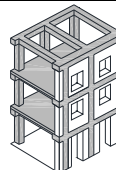
Designação	Edifícios antigos de alvenaria tradicional (sem betão armado)	Edifícios mistos URM-RC		Edifícios de estrutura porticada de betão armado
		Edifícios URM-RC originais	Edifícios URM-RC derivados	
Esquema		Advento do betão armado → 	Ver tipologias da Fig. 3	Novos regulam. para o betão armado → 
Período	<1930	1930-1960	1940-presente	1960-presente
Elementos portantes verticais	Alvenaria de pedra ou tijolo (e/ou elementos de madeira)	Alvenaria de pedra ou tijolo (e alguns elementos de betão armado)	Alvenaria de pedra ou tijolo (e elementos de betão armado não originais)	Pórticos de betão armado
Estrutura do piso	Madeira	Madeira e/ou lajes de betão armado	Madeira ou lajes de betão armado não originais	Lajes de betão armado
Estrutura da cobertura	Madeira	Madeira	Madeira (e/ou elementos de betão armado não originais)	Betão armado

Fig. 1 – Principais fases da utilização do betão armado nos edifícios

### 3. DEFINIÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DAS TIPOLOGIAS MISTAS URM-RC

Com vista à categorização das múltiplas tipologias mistas URM-RC observadas em edifícios intervencionados, propõe-se neste artigo um sistema de classificação com base na maneira como os elementos estruturais de betão armado são introduzidos no edifício original de alvenaria tradicional – adição, inserção e substituição –, tal como esquematicamente ilustrado na Fig. 2. A maneira como estas três ações estão ordenadas pressupõe um nível crescente de intrusividade da intervenção. Além disto, este nível é agravado de caso para caso dependendo da quantidade de betão armado que é aplicada e na extensão da intervenção, podendo ser executada localmente (por exemplo: adição de reboco armado numa única parede) até globalmente (por exemplo: substituição completa de todas as lajes em todos os pisos). Naturalmente, soluções híbridas são possíveis pela combinação de duas ou mais intervenções.

Com base nestas ações, os seguintes parágrafos estabelecem uma descrição das tipologias mais frequentes de intervenções executadas com recurso a betão armado em edifícios existentes de alvenaria tradicional. Cada tipologia é esquematicamente ilustrada na Fig. 3 com a respetiva associação a um dos três tipos de utilização do betão armado (adição, inserção e substituição).

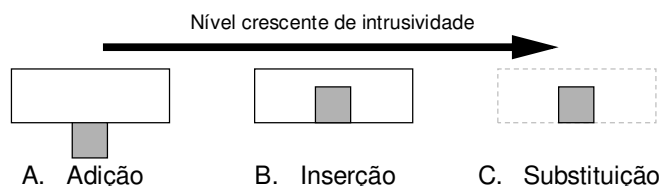


Fig. 2 - Esquema das três maneiras possíveis de usar betão armado em edifícios de alvenaria tradicional

	Rebocos armados ( <i>jacketing</i> )	Lajes colaborantes	Novas paredes	Elementos suplementares (vigas, pilares)	Pisos intermédios	Ampliações em planta	Ampliações em altura
Adição							
Inserção	Vigas cinta	Elementos embebidas	Juntas	Escadas	Núcleos	Estruturas subterrâneas	
Substituição	Estrutura da cobertura	Laje de cobertura	Laje de piso	Paredes (na posição original)	Ampliação de vãos	Renovação de pisos	Reformulação estrutural (fachadismo)

Fig. 3 – Tipologias estruturais dos edifícios mistos URM-RC (elementos de betão armado a cinza)

### 3.1. Adição

No contexto de edifícios URM-RC entende-se como **adição** a introdução de novos elementos estruturais de betão armado na estrutura existente ou o aumento das dimensões dos elementos existentes com betão armado. Ao contrário das intervenções de inserção e substituição, a adição de novos elementos estruturais não deverá envolver demolições na estrutura existente para acomodar os novos elementos. Exemplos de intervenções de adição são:

- **Projeção de rebocos armados (“jacketing”)** em paredes de alvenaria tradicional de maneira a melhorar a capacidade resistente às ações horizontais e a aumentar a capacidade de dissipação de energia da estrutura [5] (ver Fig. 4);
- **Adição de lajes colaborantes** sobre pisos de madeira existentes de maneira a aumentar a capacidade de carga às ações verticais, ou simplesmente executadas em intervenções de renovação (ex.: aplicação de novos revestimentos e instalação de tubagens embebidas no pavimento) (ver Fig. 5);
- **Adição de novas paredes** de betão armado, modificando a disposição estrutural e arquitetónica;
- **Adição de elementos resistentes suplementares** (ex.: vigas, pilares e/ou pórticos) à estrutura existente de maneira a aumentar a capacidade resistente da estrutura localmente ou globalmente [11] (ver Fig. 6);
- **Adição de pisos intermédios (“mezzanines”)** em betão armado entre dois pisos existentes (ver Fig. 7);
- **Ampliações em planta e ampliações em altura** (adição de novo(s) piso(s)) por forma a aumentar o nível de ocupação do edifício (ver Fig. 8 e Fig. 9).



Fig. 4 – Projeção de reboco armado



Fig. 5 – Adição de laje colaborante



Fig. 6 – Adição de elementos resistentes suplementares [12]



Fig. 7 – Adição de piso intermédio [13]



Fig. 8 – Ampliação em planta [14]



Fig. 9 – Ampliação em altura [15]

### 3.2. Inserção

No contexto de edifícios URM-RC entende-se como **inserção** a introdução de novos elementos estruturais de betão armado incorporados na estrutura existente. Esta ação envolve uma demolição localizada na estrutura existente para acomodar os novos elementos. Exemplos de intervenções de inserção são:

- **Inserção de vigas cinto** no topo das paredes exteriores do edifício com vista à melhoria do comportamento global da estrutura através da restrição dos movimentos para fora do plano das fachadas [11] (ver Fig. 10);
- **Inserção de elementos de betão armado embebidos** nas paredes existentes de alvenaria tradicional, visando o confinamento das mesmas e/ou a melhoria da sua capacidade resistente e de dissipação de energia (ver Fig. 11);
- **Inserção de juntas sísmicas** com recurso a pilares duplos de betão armado por forma a dividir o edifício existente em duas ou mais partes, ou visando a sua separação dos edifícios adjacentes, reduzindo assim os eventuais danos resultantes de efeitos torsionais associados com irregularidades estruturais;
- **Inserção de caixas de escadas ou núcleos de betão armado** (ex.: caixas de elevador) conectando verticalmente todos os pisos do edifício de maneira a melhorar a sua acessibilidade e usabilidade (ver Fig. 12);
- **Inserção de estruturas subterrâneas** (ex.: criação de estacionamento subterrâneo) (ver Fig. 13).



Fig. 10 – Inserção de viga cinto [16]



Fig. 11 – Inserção de elementos de betão armado embebidos [13]



Fig. 12 – Inserção de caixa de escadas [17]



Fig. 13 – Inserção de estrutura subterrânea [18]

### 3.3. Substituição

No contexto de edifícios URM-RC entende-se como **substituição** a demolição completa de alguns elementos estruturais existentes e a introdução de novos elementos estruturais de betão armado no seu lugar. Exemplos de intervenções de substituição são:

- **Substituição da estrutura da cobertura** original (de madeira) por outra equivalente com elementos de betão armado (ex.: laje de vigotas pré-esforçadas), ou **substituição da estrutura da cobertura por uma laje de betão armado** (ver Fig. 14);
- **Substituição de pisos existentes** por lajes de betão armado em casos de estado agravado de conservação dos pavimentos originais (de madeira), ou simplesmente executadas em intervenções de renovação/"reforço" estrutural (ver Fig. 15);
- **Substituição de paredes existentes** de alvenaria tradicional por novas paredes de betão armado, na posição original, em casos de estado agravado de conservação das paredes originais, ou simplesmente executadas em intervenções de renovação/"reforço" estrutural (ver Fig. 16);
- **Ampliação de vãos**, particularmente ao nível do rés-do-chão, envolvendo a demolição localizada das paredes existente por pórticos de betão armado (ex.: criação de montras, alargamento do acesso a garagem) (ver Fig. 17);
- **Renovação de pisos** envolvendo a demolição dos elementos estruturais de um ou mais pisos e a sua substituição por novos elementos estruturais de betão armado;
- **Reformulação estrutural**, comumente designada por "fachadismo", consistindo na demolição total do interior de um edifício mantendo apenas a sua fachada (por necessidades estritamente funcionais e/ou arquitetónicas), e a sua substituição por uma estrutura porticada de betão armado interior ao qual será ligada a pré-existência - fachada (ver Fig. 18).



Fig. 14 – Substituição da estrutura da cobertura [19]



Fig. 15 – Substituição de pisos existentes [20]



Fig. 16 – Substituição de paredes existentes [21]



Fig. 17 – Ampliação de vãos



Fig. 18 – Reformulação estrutural [22]

### 3.4. Danos associados a edifícios mistos intervencionados

Os sismos ocorridos nos últimos anos têm permitido evidenciar de forma clara o facto das intervenções de “reforço” com betão armado em edifícios antigos de alvenaria tradicional, resultando em URM-RC (apoiados por documentos técnicos nacionais), tem conduzido a aumento da sua vulnerabilidade sísmica. De facto, muitos relatórios de missões de reconhecimento pós-sismo mostram numerosas limitações destas intervenções estruturais intensivas [3, 4], em que a alteração da configuração estrutural original pode levar a um comportamento completamente diferente face à ação sísmica.

A observação de danos causados por sismos passados em edifícios mistos URM-RC demonstrou que o tipo de colapso dominante está associado a mecanismos cinemáticos para fora de plano, quer a nível local e global, devido à perda de equilíbrio das paredes estruturais de alvenaria tradicional induzida pelas incompatibilidades desencadeadas pela introdução do novo material (RC) [3]. Neste contexto, a Fig. 19 reúne uma lista de alguns danos recorrentes associados a diferentes tipologias de edifícios mistos URM-RC derivados, juntamente com a descrição dos prováveis mecanismos de colapso correspondentes.

Além das causas de danos habituais, comuns a diferentes tipologias de construção, - como a má qualidade dos materiais (especialmente argamassa) e das técnicas de construção, a falta de manutenção, o tamanho dos vãos, configurações estruturais irregulares, etc. -, os colapsos parciais e totais observados em edifícios mistos URM-RC são geralmente devidos a:

1. Aumento das forças sísmicas horizontais devido à massa elevada dos elementos de betão armado (particularmente ao nível dos pisos), resultando em maiores deslocamentos e maior esforço transversal e momento fletor;
2. Momentos fletores desestabilizadores para fora do plano, devidos ao aumento das cargas verticais em combinação com excentricidades e deslocamentos horizontais;
3. Incompatibilidades entre materiais e soluções construtivas novas e existentes (diferente rigidez e capacidade de deformação entre betão armado e URM);
4. Ligações estruturais inadequadas entre paredes perpendiculares (ligações verticais) e entre paredes e pisos (ligações horizontais);
5. Conhecimento insuficiente do comportamento da estrutura face a ações sísmicas (falta de uma análise rigorosa do comportamento estático/dinâmico do edifício antes e depois da intervenção).




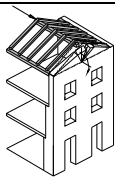

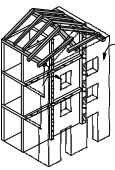



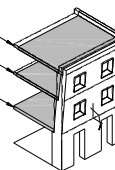



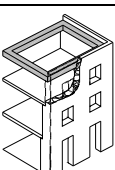
Danos observados	Esquema	Descrição		
		Intervenções	Danos observados	Mecanismos prováveis
		Substituição da estrutura do telhado.	Colapso local da empena de um edifício.	Movimento para fora do plano devido à ação da cumeeira de betão armado.
		Substituição da estrutura do telhado; Inserção de viga cinta ao nível do telhado.	Colapso da parte lateral de um edifício.	Colapso para fora do plano de paredes resistentes em um ou mais pisos devido à excentricidade das cargas verticais; Consequente colapso da estrutura do telhado.
		Substituição da estrutura do telhado; Inserção de viga cinta ao nível do telhado.	Colapso do piso superior de um edifício.	Colapso para fora do plano de paredes resistentes em um ou mais pisos devido à excentricidade das cargas verticais; Consequente colapso da estrutura do telhado.
		Substituição da estrutura do telhado; Substituição de lajes; Inserção de vigas cinta.	Colapso total de um edifício.	Deslocamento horizontal de lajes de piso; Consequente colapso das paredes resistentes.
		Substituição da laje de piso em piso intermedio.	Colapso parcial de parte de uma fachada.	Deslocamento horizontal da laje de piso; Consequente colapso para fora do plano das paredes contíguas.
		Inserção de viga cinta ao nível do telhado.	Colapso parcial de grande parte de uma fachada.	Colapso para fora do plano das paredes de alvenaria sob a viga cinta.

Fig. 19 - Danos e respetivos mecanismos de colapso observados em edifícios URM-RC derivados [3, 23]

#### 4. DESAFIOS ASSOCIADOS À AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE SÍSMICA

Apesar da diversidade de técnicas de intervenção identificadas que conduzem a novas tipologias neste artigo, são escassos os estudos realizados em relação às tipologias mistas URM-RC. Neste contexto, identificam-se os principais desafios a serem abordados em estudos futuros [1, 2, 10, 24, 25]:

1. **Ferramentas de inspeção e de avaliação.** Tendo em conta a natureza complexa dos edifícios mistos URM-RC, é importante o desenvolvimento e utilização de ferramentas práticas e fiáveis para a aquisição expedita da geometria e estado de conservação de estruturas complexas (ex.: laser scanner e/ou fotogrametria, aliadas a modelos BIM dos edifícios existentes (“*as-built*”) [26, 27]);

2. **Estudos e campanhas experimentais.** Considerando a escassez de estudos experimentais sobre edifícios mistos URM-RC, torna-se necessário um maior foco da comunidade científica na simulação do comportamento estrutural e dos tipos de dano observados em edifícios mistos afetados por sismos no passado, visando a calibração e validação de métodos de cálculo adequados;
3. **Dificuldades na modelação e análise numérica:** Tendo em conta a sua complexidade geométrica e heterogeneidade estrutural, são necessários estudos que visem a análise não-linear de edifícios mistos URM-RC tendo em conta os efeitos da interação entre elementos estruturais com diferentes materiais [28];
4. **Escassez de normas/regulamentos para o dimensionamento de soluções de reforço sísmico:** Embora sejam vários os regulamentos existentes a recomendar a utilização de estratégias de reforço sísmico com recurso a elementos de betão armado, estes fornecem pouca informação para a análise de tipologias mistas URM-RC, sendo o dimensionamento de soluções de reforço muitas vezes feito considerando os elementos de betão armado e alvenaria tradicional separadamente. Neste contexto, é importante a definição de regras específicas para estas tipologias mistas, considerando os efeitos da interação entre o betão armado e a URM, o papel dos diafragmas horizontais rígidos e flexíveis, a eficácia das ligações estruturais e dos elementos usados para esse efeito (ex.: vigas cinta), a ação dos edifícios contíguos no caso de edifícios localizados em agregados urbanos, etc.
5. **Avaliação da vulnerabilidade sísmica:** Não obstante os vários estudos realizados para edifícios antigos de alvenaria tradicional em zonas urbanas [2, 29], ainda existem muitas questões em aberto em relação aos edifícios mistos URM-RC. Neste contexto, deverão ser desenvolvidos e calibrados estudos futuros com base em metodologias híbridas já existentes para a avaliação da vulnerabilidade sísmica das estruturas tradicionais de alvenaria à escala urbana por meio da observação de danos pós-sismo e apoiados por análises numéricas [30], a fim de investigar e avaliar quantitativamente a vulnerabilidade associada a cada uma das tipologias definidas neste artigo.

## 5. CONCLUSÕES

Os sismos mais recentes têm mostrado como algumas técnicas de intervenção com recurso ao betão armado em edifícios antigos podem ser ineficazes para a prevenção de danos, podendo mesmo ser responsáveis pela ocorrência de colapsos parciais e globais. Além disso, embora o uso do betão armado seja por vezes recomendado por códigos e normas nacionais e internacionais, o efeito estrutural dessas intervenções sobre o comportamento sísmico global do edifício ainda é insuficientemente conhecido. Assim, a consciencialização e o conhecimento das várias tipologias existentes é crucial para a correta avaliação das suas consequências na vulnerabilidade sísmica da estrutura, bem como para a execução de intervenções apropriadas de reforço sísmico, de modo a evitar desastres futuros.

Neste contexto, o presente artigo tem como objetivo a categorização das principais tipologias estruturais de edifícios mistos URM-RC, de acordo com três estratégias básicas de intervenção – adições, inserções ou substituições –, e o discernimento sobre as consequências associadas para o comportamento global da estrutura. Dependendo o seu nível de intrusividade, estas ações, para além de alterarem permanentemente o valor cultural dos edifícios originais, contribuem para o aumento da heterogeneidade estrutural e do potencial risco de dano do edifício quando sujeito a ações sísmicas. Entre as principais causas de dano identificadas, podem referir-se as

consequências do aumento da massa e da rigidez dos elementos de betão armado, juntamente com a execução de ligações estruturais inadequadas, a má compreensão dos fenómenos de interação, a falta de confiança nos métodos de análise, etc. Adicionalmente, a última secção deste artigo é dedicada aos desafios atuais no âmbito da avaliação da vulnerabilidade sísmica de edifícios mistos URM-RC. Acredita-se que tal entendimento seja uma prioridade para a definição de melhores ferramentas de avaliação da vulnerabilidade sísmica e para o desenvolvimento de melhores métodos de análise e de modelação, bem como de estratégias e técnicas de reforço adequadas.

## 6. AGRADECIMENTOS

O primeiro autor agradece a bolsa de doutoramento (referência: PD/BD/135201/2017) concedida pela FCT (Fundação para a Ciência e a Tecnologia), ao abrigo do programa doutoral InfraRisk- (Analysis and Mitigation of Risks in Infrastructures). São igualmente devidos agradecimentos à Universidade de Aveiro e FCT/MEC pelo apoio financeiro à unidade de investigação RISCO – Aveiro Research Centre of Risks and Sustainability in Construction – (FCT/UID/ECI/04450/2013), e à unidade de investigação ISISE – Institute for sustainability and Innovation in Structural Engineering – (POCI-01-0145-FEDER-007633).

## 7. REFERÊNCIAS

- [1] Sangirardi, M. (2016) Seismic Behaviour of Mixed Masonry-Reinforced Concrete Buildings. An insight into Modelling Approaches. (PhD thesis).
- [2] Lagomarsino, S., Magenes, G. (2009) Evaluation and Reduction of the Vulnerability of Masonry Buildings. In: Manfredi, G. and Dolce, M. (eds.) The state of Earthquake Engineering Research in Italy: the ReLUIS-DPC 2005-2008 Project. pp. 1–50. , Doppiavoce, Napoli, Italy.
- [3] Cimellaro, G.P., Christovasilis, I.P., Reinhorn, A.M., Alessandro, D.S., Kirova, T. (2010) L'Aquila Earthquake of April 6th, 2009 in Italy: Rebuilding a Resilient City to Multiple Hazard.
- [4] NIKER Project (2010) D3.1: Inventory of earthquake-induced failure mechanisms related to construction types, structural elements, and materials. 56.
- [5] Tomažević, M. (1999) Earthquake-Resistant Design of Masonry Buildings. Imperial College Press.
- [6] Klingner, R.E. (2010) Masonry Structural Design. McGraw-Hill.
- [7] Cattari, S. (2007) Modellazione a telaio equivalente di strutture esistenti in muratura e miste muratura-c.a.: formulazione di modelli sintetici. (PhD thesis).
- [8] Liberatore, L., Decanini, L.D., Benedetti, S. (2007) Le strutture miste muratura-cemento armato, uno stato dell'arte. In: Atti del XII Convegno Nazionale L'Ingegneria Sismica in Italia. Edizioni PLUS-Pisa University Press, Pisa, Italy [in Italian].
- [9] Monteiro, M., Bento, R. (2012) Characterization of 'Placa' buildings, Report ICIST, DTC n° 02/2012.
- [10] Augenti, N., Parisi, F. (2010) Learning from Construction Failures due to the 2009 L'Aquila, Italy, Earthquake. *J. Perform. Constr. Facil.* 24, 536–555.
- [11] Meireles, H., Bento, R. (2013) Rehabilitation and strengthening of old masonry buildings. Report ICIST, DTC n° 02/2013.
- [12] Forell / Elsesser Engineers Seismic Retrofits, <http://www.forell.com/seismic-retrofits/>.
- [13] Aguilar, A. (2016) The Seismic Rehabilitation of Historic Buildings. *Natl. Park Serv.* 1–20.
- [14] Echavarri, P. Apartment Building Rehabilitation And Expansion, [https://www.mimoa.eu/projects/Spain/Madrid/Apartment Building Rehabilitation and Expansion](https://www.mimoa.eu/projects/Spain/Madrid/Apartment%20Building%20Rehabilitation%20and%20Expansion).

- [15] Lopes, M., Meireles, H., Cattari, S., Bento, R., Lagomarsino, S. (2014) Pombalino Constructions: Description and Seismic Assessment. In: Costa, A., Guedes, J.M., and Varum, H. (eds.) *Structural Rehabilitation of Old Buildings*. pp. 187–234. Springer-Verlag.
- [16] Magenes, G., Penna, A., Rota, M., Galasco, A., Senaldi, I. (2012) Shaking table test of a full scale stone masonry building with stiffened floor and roof diaphragms. *15th World Conf. Earthq. Eng. - WCEE*.
- [17] Fessenden, M. (2015) The White House is Mostly a Reconstruction of the Original, <https://www.smithsonianmag.com/smart-news/white-house-mostly-reconstruction-original-180955229/>.
- [18] Geocimenta (2008) Curiosidade: Microestacas, <https://engenhariacivil.wordpress.com/2008/02/17/curiosidademicroestacas/>.
- [19] SIPA Igreja de São João Baptista, Ilha Terceira, Angra do Heroísmo, Açores, Portugal.
- [20] Arbuckle, A.Q. Gutting the White House, <https://mashable.com/2016/01/06/white-house-renovation/?europa=true#.uHQlf.lyuqb>.
- [21] WHE (2014) Retrofit Information, <http://db.world-housing.net/building/17/>.
- [22] Irmãos Gigante (2016) Timelapse Construção Hotel Fabrica do Chocolate, <https://www.youtube.com/watch?v=dRraWYwZdpg>.
- [23] Valluzzi, M.R. (2006) On the vulnerability of historical masonry structures: analysis and mitigation. *Mater. Struct.* 40, 723–743.
- [24] Paparo, A., Beyer, K. (2016) Modeling the Seismic Response of Modern URM Buildings Retrofitted by Adding RC Walls. *J. Earthq. Eng.* 20, 587–610.
- [25] Paparo, A. (2015) Seismic Behaviour and Design of Mixed RC-URM Wall Structures. (PhD thesis).
- [26] Arce, D., Retamozo, S., Aguilar, R., Castañeda, B. (2016) A mixed methodology for detailed 3D modeling of architectural heritage. In: Van Balen, K. and Verstrynge, E. (eds.) *Structural Analysis of Historical Constructions: Anamnesis, diagnosis, therapy, controls*. pp. 104–111. , Leuven, Belgium.
- [27] Zeibak-Shini, R., Sacks, R., Ma, L., Filin, S. (2016) Towards generation of as-damaged BIM models using laser-scanning and as-built BIM: First estimate of as-damaged locations of reinforced concrete frame members in masonry infill structures. *Adv. Eng. Informatics*. 30, 312–326.
- [28] Liberatore, L., Tocci, C., Masiani, R. (2008) Non linear analyses for the evaluation of seismic behavior of mixed R.C.-Masonry structures. In: *Proceedings of the 2008 Seismic Engineering Conference Commemorating the 1908 Messina and Reggio Calabria Earthquake (MERCEA'08)*. pp. 1211–1218. , Reggio Calabria.
- [29] Vicente, R., D'Ayala, D.F., Ferreira, T.M., Varum, H., Costa, A., Mendes da Silva, J.A.R., Lagomarsino, S. (2014) Seismic Vulnerability and Risk Assessment of Historic Masonry Buildings. In: *Building Pathology and Rehabilitation*.
- [30] Ferreira, T.M., Costa, A.A., Vicente, R., Varum, H. (2015) A simplified four-branch model for the analytical study of the out-of-plane performance of regular stone URM walls. *Eng. Struct.* 83, 140–153.