

# Metodologia para avaliação de desempenho combinado sísmico e energético para paredes de alvenaria de enchimento

A new framework for combined seismic and energy performance assessment of masonry infill walls

André Furtado  
Hugo Rodrigues

## Resumo

O estudo do comportamento sísmico de paredes de enchimento localizadas nas fachadas dos edifícios tem sido, durante os últimos anos, alvo de uma especial atenção por parte da comunidade científica internacional motivado pelas observações realizadas em missões de reconhecimento de danos pós-sismo. Ao mesmo tempo, as paredes tem uma contribuição significativa na eficiência energética dos edifícios. É fundamental identificar os cenários onde deve ser prioritário realizar o reforço sísmico ou reforço energético de forma independente ou o reforço integrado sísmico e energético. Com base nesta motivação, o presente trabalho visa apresentar uma metodologia que permitirá identificar as regiões e os edifícios de betão armado prioritários em Portugal para os três diferentes tipos de reforços. Para além disso, será apresentada uma nova matriz de desempenho combinado sísmico e energético para paredes de enchimento e que permitirá identificar o tipo de reforço necessário.

## Abstract

The study of the seismic behaviour of infill walls located on the façades of buildings has been the subject of special attention from the international scientific community in recent years, motivated by observations made in post-earthquake damage reconnaissance missions. At the same time, walls make a significant contribution to the energy efficiency of buildings. It is essential to identify the scenarios in which it should be a priority to carry out seismic reinforcement or energy reinforcement independently or integrated seismic and energy reinforcement. Based on this motivation, this paper aims to present a methodology that will allow the identification of priority regions and reinforced concrete buildings in Portugal for the three different types of reinforcement. In addition, a new combined seismic and energy performance matrix for infill walls will be presented, which will allow the type of reinforcement required to be identified.

**Palavras-chave:** Paredes de Enchimento / Comportamento sísmico para fora-do-plano / Eficiência energética / Avaliação de desempenho

**Keywords:** Masonry infill walls / Out-of-plane seismic behaviour / Energy performance / Performance assessment

## André Furtado

Professor Auxiliar  
CERIS – Instituto Superior Técnico  
Lisboa, Portugal  
 0000-0003-1215-8051  
andre.furtado@tecnico.ulisboa.pt

## Hugo Rodrigues

Professor Associado  
RISCO – Universidade de Aveiro  
Aveiro, Portugal  
 0000-0003-1373-4540  
hrodrigues@ua.pt

### Aviso legal

As opiniões manifestadas na Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas são da exclusiva responsabilidade dos seus autores.

### Legal notice

*The views expressed in the Portuguese Journal of Structural Engineering are the sole responsibility of the authors.*

FURTADO, A. [et al.] – Metodologia para avaliação de desempenho combinado sísmico e energético para paredes de alvenaria de enchimento. **Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas**. Ed. LNEC. Série III. n.º 26. ISSN 2183-8488. (novembro 2024) 91-100.  
<https://doi.org/10.34638/rpee-sIII-n26-008>

## 1 Introdução

O parque edificado enfrenta desafios colocados por eventos naturais extremos, sendo os eventos sísmicos uma das preocupações mais críticas. Desde o ano 2000, os sismos foram responsáveis por mais de 1 milhão de vítimas e causaram perdas económicas (diretas) equivalentes a pelo menos cerca de 1% do PIB global. Além disso, deixaram mais de 2 milhões de pessoas sem habitação, consolidando o seu estatuto como um dos desastres naturais mais perigosos enfrentados pela humanidade. Sismos recentes têm demonstrado que a vulnerabilidade vai muito além das estruturas históricas ou patrimoniais, incluindo edifícios de alvenaria [1-3]. Estes eventos, também, trouxeram à luz o potencial para impactos catastróficos mesmo em estruturas de Betão Armado (BA) que foram projetadas de acordo com regulamentos sísmicos mais recentes, como se pode observar no recente sismo da Turquia em 2023. Após a Segunda Guerra Mundial, houve um aumento substancial na construção deste tipo de edifícios, especialmente em regiões propensas a atividade sísmica. Estima-se que cerca de 60% dessas estruturas tenham algum nível de dimensionamento sísmico. Destas, aproximadamente 60% são projetadas de acordo com regulamentos sísmicos de baixa exigência, 25% com regulamentos de exigência intermédia e apenas 15% atendem aos padrões de exigência sísmica elevado [4].

Uma característica prevalente em quase todos os edifícios de BA é a presença de paredes de alvenaria de enchimento, frequentemente utilizadas para divisórias, isolamento térmico e controlo acústico. Estas são igualmente usadas com bastante frequência nas envolturas/fachadas destes edifícios com inúmeras disposições de aberturas (janelas, portas, etc.) ou tipologia de parede (pano simples, duplo, etc.). Importa sublinhar que apesar da sua presença frequente estas não têm sido alvo de considerações específicas de segurança sísmica ou regulamentação específica que obrigue a reforçar a sua capacidade de resistir a cargas verticais ou laterais. Por exemplo, o Eurocódigo 8 [5] classifica as paredes de enchimento como elementos não-estruturais. No entanto, os relatórios de reconhecimento de danos pós-sismo em todo o mundo destacam o papel crucial das paredes de enchimento no comportamento sísmico de estruturas de BA. As paredes de enchimento são reconhecidas como uma das causas mais relevantes para o pobre desempenho de alguns edifícios onde se observaram danos extensos (ou colapsos parciais e totais) e elevadas perdas económicas [6]. Observou-se igualmente que uma parcela significativa das estruturas que se comportaram bem durante os sismos (i.e., sem danos importantes nos elementos estruturais) apresentaram danos extensos nas suas paredes de enchimento tornando a recuperação do edifício praticamente inviável. Pode-se perceber a relevância das paredes de enchimento através do estudo realizado por De Risi, *et al.* [7] onde se concluiu que estas são responsáveis por pelo menos 50% das perdas em edifícios de BA danificados após os sismos de Itália em 2009 e 2012, o que evidencia a sua grande relevância. Um dos pontos mais críticos apontados às paredes de alvenaria é a sua elevada vulnerabilidade para ações sísmicas para fora-do-plano, resultando no seu colapso parcial ou total [8]. As principais causas apontadas são: i) as soluções construtivas inadequadas que são usualmente adotadas e que aumentam a instabilidade da parede; ii) mão-de-obra pobre (não qualificada) e ausência de fiscalização

que potenciam o deficiente desempenho sob ações sísmicas [9]; iii) forte influência das ações sísmicas ao longo do plano da parede que reduzem abruptamente a sua resistência para fora-do-plano [10]; iv) existência de aberturas que reduzem a resistência da parede; entre outros. Observam-se anualmente diversos colapsos totais ou parciais de paredes de enchimento, sobretudo nas fachadas de edifícios.

Assim, surge uma necessidade de desenvolver uma metodologia que forneça informações sobre a vulnerabilidade destas paredes e a possível necessidade de reforço sísmico. Neste contexto, este trabalho procura colmatar essa lacuna, apresentando uma metodologia inovadora que permite avaliar a vulnerabilidade sísmica das paredes, estimar a sua classe de desempenho e identificar o tipo de técnica de reforço necessária para garantir a sua segurança em eventos sísmicos futuros.

É de conhecimento geral que o desempenho energético inadequado dos edifícios de BA contribui de forma significativa para os consumos energéticos na União Europeia (UE). Conforme indicado no mais recente relatório da Comissão Europeia, os edifícios são responsáveis por 36% das emissões de dióxido de carbono, 40% do consumo energético e 55% do consumo de eletricidade na UE. Esses números estão diretamente ligados ao aquecimento e arrefecimento dos espaços [11]. A deficiência no desempenho energético na construção deve-se, em grande parte, à implementação tardia dos primeiros regulamentos energéticos na UE, que só se tornaram oficiais em 1970, quando cerca de 66% do parque habitacional existente na Europa já estava construído [12]. Especificamente em Portugal, os edifícios de BA representam cerca de 60% do seu parque edificado e abrigam cerca de 65% da sua população [13]. Metade desses edifícios não foi projetada de acordo com regulamentos sísmicos modernos (e.g. Eurocódigo 8), e 70% não seguiram nenhum regulamento térmico. Além disso, 20% da população portuguesa não possui recursos financeiros suficientes para aquecer as suas casas. Atualmente, existe uma tremenda necessidade socioeconómica e ambiental de reabilitar o parque edificado existente para mitigar a alta pobreza energética em Portugal e outros países do mundo.

Atualmente, estão a ser implementadas diversas políticas que tem como objetivo promover uma renovação sustentável dos edifícios existentes, com ênfase na redução do consumo energético e na utilização de materiais com baixas emissões de carbono no processo de renovação/reabilitação. A maioria das intervenções em curso em Portugal, no âmbito desses instrumentos políticos, concentra-se exclusivamente na aplicação de isolamento térmico nas envolturas dos edifícios, substituição de janelas/portas, entre outras medidas. É evidente que as intervenções em curso negligenciam ou ignoram as vulnerabilidades sísmicas amplamente reconhecidas pela comunidade científica, conforme descrito no início desta secção. Assim, mesmo com o investimento significativo na renovação/reabilitação dos edifícios, a vulnerabilidade sísmica das paredes de enchimento persiste, deixando o edifício seriamente exposto a riscos, especialmente em regiões sísmicas como Portugal. Este cenário reforça a necessidade urgente de considerar a segurança sísmica nas intervenções de renovação/reabilitação, garantindo uma abordagem holística que abranja tanto o desempenho energético quanto a resistência sísmica das paredes de enchimento. A ausência

de uma metodologia que permita avaliar a segurança sísmica das paredes de enchimento e correlacionar com seu desempenho térmico é identificada como um desafio significativo.

O objetivo principal deste trabalho é desenvolver uma metodologia para a avaliação do desempenho combinado sísmico e térmico de paredes de alvenaria de enchimento situadas nas envolturas de edifícios de BA. Pretende-se que esta metodologia seja aplicável tanto no dimensionamento de novos edifícios como na avaliação de edifícios já existentes. Esta nova abordagem visa disponibilizar à comunidade técnica e científica uma ferramenta nova e essencial para identificar o desempenho conjunto sísmico e térmico, permitindo avaliar a necessidade de reforço independente (sísmico ou energético) ou reforço combinado.

## 2 Descrição da metodologia proposta

### 2.1 Descrição geral

O presente trabalho de investigação visa propor uma nova metodologia destinada à avaliação de desempenho combinado sísmico e térmico de paredes de alvenaria de enchimento localizadas nas envolturas de edifícios de BA. Esta metodologia holística apresenta a vantagem de poder ser aplicada em edifícios existentes e novos, integrando uma abordagem inovadora contribuindo de uma forma direta para um parque habitacional mais seguro e energeticamente mais eficiente.

Dividida em duas grandes vertentes, avaliação da segurança sísmica e da eficiência térmica, a metodologia foi desenhada por forma a fornecer ao seu utilizador informação sobre a necessidade de reforço (sísmico, térmico ou combinado) em função das características da parede em estudo. Nesse sentido, esta metodologia foi estruturada em quatro fases distintas (Figura 1): i) identificação da classe de prioridade do edifício (fase 1); ii) identificação das características geométricas e materiais do edifício e das paredes de alvenaria de enchimento em estudo (fase 2); iii) avaliação do desempenho combinado sísmico e energético da parede de enchimento (fase 3); e iv) identificação do tipo de reforço recomendado (fase 4).

A Fase 1 tem como objetivo enquadrar o edifício em relação ao zonamento sísmico, climático considerando a sua localização e o seu de construção (o que permitirá, de forma indireta, identificar os regulamentos sísmicos e térmicos utilizados no seu dimensionamento e na conceção das soluções construtivas). Nesta fase, introduz-se o conceito de classe de prioridade de edifícios que devem ser avaliados do ponto de vista do comportamento sísmico e/ou térmico e possível necessidade de reforço. Esta nova classificação visa identificar de forma expedita os edifícios dimensionados e construídos com regulamentação mais antiga (ou sem regulamentação) e que estejam localizados em zonas de maior exigência sísmica e/ou térmica.

A Fase 2 é dedicada à recolha de propriedades geométricas e dos materiais do edifício e em particular das paredes de enchimento. Estes dados são fundamentais para determinar a capacidade resistente à ação sísmica das paredes de enchimento, assim como o seu coeficiente de transmissão térmica.



A Fase 3 concentra-se na avaliação do desempenho combinado das paredes de enchimento, integrando as vertentes de segurança sísmica e isolamento térmico. Neste sentido, propõe-se uma nova formulação para determinar a capacidade resistente das paredes de enchimento face a ações sísmicas. É igualmente proposta a formulação para determinar o coeficiente de transmissão térmica da parede. Após determinação destes dois parâmetros, identificam-se as exigências regulamentares para a ação sísmica e para o coeficiente de transmissão térmica da parede em função da zona sísmico-climática (SC). De seguida, propõe-se uma nova matriz de avaliação de desempenho combinado para identificar o tipo de desempenho da parede. São propostas 5 classes de desempenho tipo com base nas características da parede e nas exigências regulamentares.

A Fase 4 destina-se à identificação do tipo de reforço necessário para a parede de enchimento, com base no desempenho identificado na Fase 3. Esta etapa é fundamental, fornecendo indicações precisas sobre o tipo de reforço necessário (sísmico, térmico ou combinado) e o grau de intervenção (ligeiro, intermédio ou elevado) nas paredes de enchimento em estudo. A metodologia está atualmente ajustada a Portugal Continental, mas pode ser facilmente adaptada às ilhas ou a qualquer outro país.

## 2.2 Novo mapa de zonamento sísmico-climático

O Eurocódigo 8 propõe para cada zonamento sísmico uma aceleração de pico de referência,  $a_{gr}$ , para ações do tipo 1 e tipo 2. O mapa de zonamento para a ação sísmica tipo 1 é subdividido nas zonas 1.1, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5 e 1.6, cujos acelerações de pico de referência são 2.5, 2.0, 1.5, 1.0, 0.6 e  $0,35m/s^2$ , respetivamente. De igual forma, o mapa de zonamento da ação sísmica tipo 2 é subdividido nas zonas 2.1, 2.2, 2.3, 2.4 e 2.5 cujos valores de aceleração de pico de referência são 2.5, 2.0, 1.7, 1.10 e  $0,80m/s^2$ , respetivamente. Consegue-se observar que na grande maioria das zonas o valor de aceleração pico de referência é igual ou superior para a ação sísmica tipo 2. Uma vez que a força correspondente à ação sísmica para fora-do-plano da parede é diretamente proporcional a esta aceleração, pode-se concluir que a segurança sísmica da parede pode ser subestimada caso não seja considerado o maior valor da aceleração de pico de referência das duas ações tipo, i.e., o valor da aceleração deve ser escolhido de forma a  $a_{gr} = \max(a_{gr, tipo1}; a_{gr, tipo2})$ . Apesar de ser uma abordagem conservativa considera-se que, devido à elevada fragilidade deste tipo de elementos, esta proposta permitirá prever o desempenho da parede para qualquer tipo de ação sísmica.

Do mesmo modo, o Despacho n.º 6476-H/2021 propõe dois mapas de zonamento climático para Portugal Continental de acordo com as estações do ano mais extremas, i.e., Verão e Inverno. Dado que esta metodologia visa avaliar o desempenho de paredes de alvenaria de enchimento localizadas nas envolventes dos edifícios, a atual regulamentação define que o parâmetro crítico a estudar do ponto de vista térmico da parede de envolvente é o seu coeficiente de transmissão térmico  $U_{value}$ . Naturalmente, a exigência relativa ao valor máximo do  $U_{max}$  é muito superior para o clima de inverno do que para o verão devido ao significativo consumo energético necessário para aquecimento dos espaços, variações consideráveis de temperatura, etc. Os valores máximos propostos para o  $U_{max}$  das paredes exteriores são 0.50, 0.40 e  $0.35W/(m^2 \cdot ^\circ C)$  para as zonas

climáticas de inverno tipo  $W_1$ ,  $W_2$  e  $W_3$ , respetivamente. Estes valores são indicados pelo regulamento para construções novas e existentes.

Face ao objetivo da presente metodologia, foi feita integração dos mapas de zonamento sísmico e zonamento climático (apresentados na Figura 2) por forma a propor-se um único mapa de zonamento sísmico-climático (SC) para Portugal (continental), que forneça uma indicação simultânea da aceleração pico de referência e o coeficiente de transmissão térmica máximo para cada município do território. Tal como foi dito anteriormente, foi considerado para a elaboração deste mapa o valor máximo de aceleração pico de referência entre as ações tipo 1 e 2, e o coeficiente de transmissão térmica relativos ao Inverno. O novo mapa de zonamento SC é composto por 11 zonas S#C\$, onde “#” designa o zonamento sísmico e “\$” designa o zonamento climático correspondente. O novo mapa SC de Portugal (continental) é apresentado na Figura 4 e os respetivos valores de  $a_{gr}$  e  $U_{max}$  de cada zona SC são apresentadas na Tabela 1.

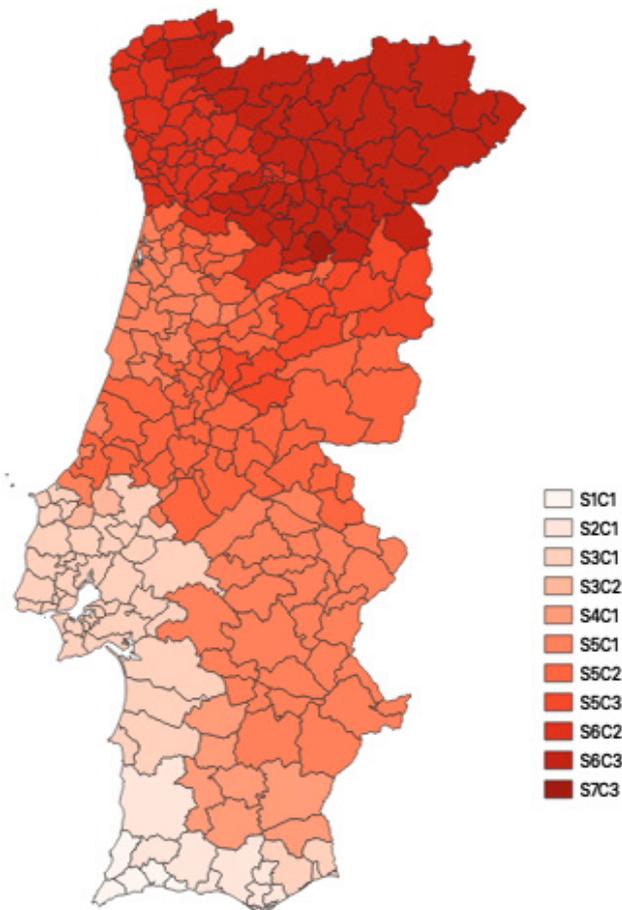


Figura 2 Mapa de zonamento SC de Portugal (continental)

Pode-se observar que dos 238 municípios de Portugal (Continental) cerca de 20,1% encontram-se situados na zona S5C2, 19,8% na zona S5C1, 17,3% na zona S6C3, 15,1% na zona S6C2 e 14,7% na zona S3C1, sendo que os restantes municípios estão distribuídos pelas

restantes zonas SC correspondendo a uma percentagem menos significativa. Importa salientar que as zonas mais críticas em termos de ação sísmica S1C1 e S2C1 apresentam uma baixa percentagem de municípios, nomeadamente 1,8% e 2,9% respetivamente. As zonas com maiores exigências térmicas são S5C3, S6C3 e S7C3, onde se localizam 4,7%, 17,3% e 0,4% dos municípios, respetivamente. Por fim, as zonas com uma maior exigência combinada sísmica e térmica S3C2, S5C2 e S5C3, abrangem 0,7%, 20,1% e 4,7% dos municípios, respetivamente.

**Tabela 1** Resumo dos valores de  $a_{gr}$  e  $U_{max}$  para cada zona SC

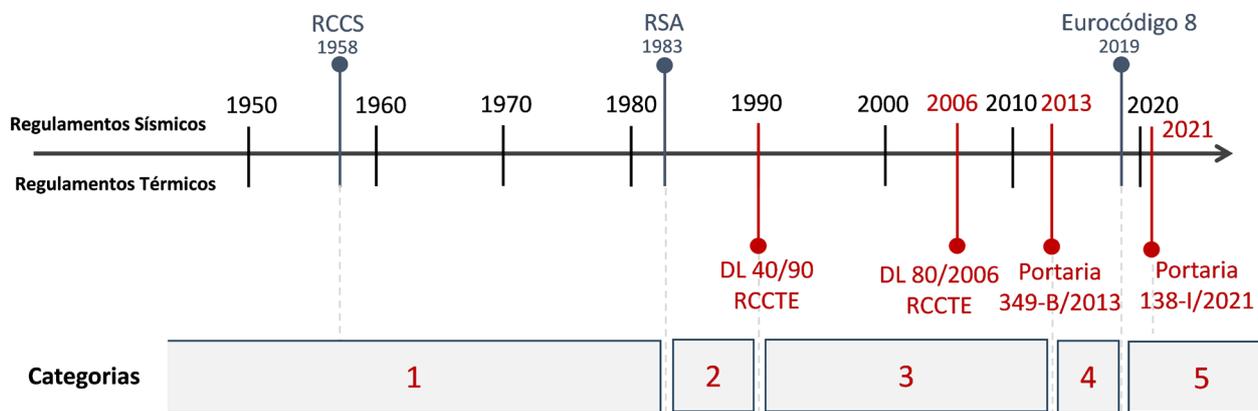
Zona SC	$a_{gr}$ (m/s <sup>2</sup> )	$U_{max}$ (W·m <sup>-2</sup> ·K <sup>-1</sup> )
S1C1	2,50	0,50
S2C1	2,00	0,50
S3C1	1,70	0,50
S3C2	1,70	0,40
S4C1	1,50	0,50
S5C1	1,10	0,50
S5C2	1,10	0,40
S5C3	1,10	0,35
S6C2	0,80	0,40
S6C3	0,80	0,35
S7C3	0,60	0,35

### 2.3 Identificação de edifícios prioritários para avaliação da segurança e potencial reforço

Após a delimitação do zonamento SC, torna-se imperativo identificar os regulamentos sísmicos e térmicos que orientaram o dimensionamento e construção do edifício que esteja a ser estudado. Esta etapa revela-se essencial, uma vez que as

características intrínsecas do edifício (i.e., sistema estrutural, soluções construtivas, etc.) estão diretamente ligadas às exigências regulamentares sob as quais foi concebido e construído. Assim, com base no ano de construção do edifício, torna-se possível identificar de forma célere os regulamentos térmicos e sísmicos, utilizando a cronologia apresentada abaixo. A Figura 3 e a Tabela 2 apresentam a cronologia da regulamentação sísmica e térmica em Portugal, a qual tem impacto direto ou indireto no desempenho das paredes de enchimento, fornecendo dados sobre a ação sísmica esperada e sobre o coeficiente de transmissão térmica de referência. Através da análise desta cronologia, é possível subdividir o parque edificado em cinco categorias com base no seu período de construção, a saber: Categoria 1 (data de construção até 1983); Categoria 2 (data de construção entre 1983 e 1989); Categoria 3 (data de construção entre 1990 e 2012); Categoria 4 (data de construção entre 2013 e 2018); e Categoria 5 (data de construção após 2019). É importante destacar que esta categorização é feita de forma expedita, fundamentada nas alterações significativas introduzidas pelos diversos regulamentos ao longo dos anos.

Após a definição da categoria do edifício, torna-se possível correlacioná-la com o zonamento SC em que está inserido, estabelecendo assim uma escala de prioridade para a análise e avaliação do desempenho do edifício, bem como para a necessidade de reforço. Esta escala busca, de forma eficaz, relacionar a exposição climática e sísmica do edifício com o seu conhecido dimensionamento sísmico e isolamento térmico, determinados pela sua categoria. São propostos quatro níveis para a classe de prioridade do edifício: i) PR1 – Edifícios com prioridade máxima para análise e avaliação do desempenho, assim como para a necessidade de reforço; ii) PR2 - Edifícios com prioridade média a elevada para análise e avaliação do desempenho, e necessidade de reforço; iii) PR3 - Edifícios com prioridade baixa a moderada para análise e avaliação do desempenho, e necessidade de reforço; iv) PR4 - Edifícios que dispensam análise e avaliação de desempenho, e não necessitam de reforço. Por exemplo, um edifício de categoria 1 (com dimensionamento sísmico e térmico pobre ou inexistente), localizado na zona S1C1 (elevada aceleração sísmica de referência e baixa exigência para o  $U_{max}$ ), é classificado como classe de prioridade



**Figura 3** Cronologia da regulamentação sísmica e térmica em Portugal

**Tabela 2** Sumário das categorias de edifícios de BA em função da regulamentação e época de construção

Época de construção	Regulamentação sísmica	Regulamentação térmica	Descrição	Categoria
<1983	Sem Regulamentação (<1958) RCCS (entre 1958 e 1983)	Inexistente	Dimensionamento sísmico pobre ou inexistente e Dimensionamento do isolamento térmico inexistente	1
[1983 - 1990]	RSA	Inexistente	Dimensionamento sísmico intermédio Dimensionamento do isolamento térmico inexistente	2
[1990 - 2013]	RSA	DL 40/90 RCCTE (entre 1990 e 2006) DL 80/2006 RCCTE (entre 2006 e 2013)	Dimensionamento sísmico intermédio Dimensionamento do isolamento térmico ligeiro	3
[2013 - 2019]	RSA	Portaria 349-B/2013	Dimensionamento sísmico intermédio Dimensionamento do isolamento térmico intermédio	4
[2019 - 2023]	Eurocódigo 8	Portaria 349-B/2013 (entre 2019 e 2021) e Portaria 138-I/2021 (após 2021)	Dimensionamento sísmico exigente Dimensionamento do isolamento térmico exigente	5

**Tabela 3** Classe de prioridade de edifícios

Zona SC	Classe de prioridade do edifício				
	Categoria 1	Categoria 2	Categoria 3	Categoria 4	Categoria 5
S1C1	PR1	PR1	PR2	PR3	PR4
S2C1	PR1	PR1	PR2	PR3	PR4
S3C1	PR1	PR1	PR2	PR3	PR4
S3C2	PR1	PR1	PR2	PR3	PR4
S4C1	PR1	PR1	PR2	PR3	PR4
S5C1	PR1	PR1	PR2	PR3	PR4
S5C2	PR1	PR1	PR2	PR3	PR4
S5C3	PR1	PR1	PR2	PR3	PR4
S6C2	PR1	PR1	PR2	PR3	PR4
S6C3	PR1	PR1	PR2	PR3	PR4
S7C3	PR1	PR1	PR2	PR3	PR4

PR1. Em contraste, um edifício de categoria 5 na mesma zona é classificado como classe de prioridade PR4. A Tabela 3 apresenta as diferentes classes de prioridade dos edifícios, correlacionando a sua categoria com a localização nas diversas zonas SC. Esta classificação pode também ser utilizada em futuros estudos do parque edificado (análise de risco sísmico; desempenho energético; etc.) para identificar os edifícios que carecem de forma urgente de avaliação e reforço sísmico e térmico. Esta abordagem inovadora poderá facilitar a renovação do parque edificado português e esta poderá ser adaptada para outros países da Europa ou de outro continente.

## 2.4 Identificação da classe de desempenho da parede de enchimento

Na terceira etapa da metodologia procede-se à identificação do desempenho combinado da parede, realizando-se uma avaliação integrada da segurança sísmica e do isolamento térmico. Neste sentido, é proposta uma nova matriz de desempenho combinado para paredes de enchimento, conforme ilustrado na Figura 4. Nesta matriz, são propostas 5 classes de desempenho tipo:

Desempenho tipo 1: Paredes que exibem um comportamento

sísmico e térmico recomendado, evidenciando uma probabilidade muito baixa de colapso para ações sísmicas para fora-do-plano e um isolamento térmico excelente. Este desempenho é alcançado quando  $F_a/F_R \leq 0,75$  e  $U_{value} \leq U_{ref}$ ;

**Desempenho tipo 2:** Paredes com comportamento moderado, seja sísmico ou térmico. Este tipo de desempenho é subdividido em duas categorias, nomeadamente: i) Desempenho tipo 2.1: verifica-se quando  $0,75 < F_a/F_R \leq 1,0$  e  $U_{value} \leq U_{ref}$ , recomendando-se um reforço sísmico (independente) com uma extensão ligeira a intermédia; ii) Desempenho tipo 2.2: ocorre quando  $F_a/F_R \leq 0,75$  e  $U_{ref} < U_{value} \leq U_{max}$ , sugerindo-se um reforço térmico (independente) com uma extensão ligeira a intermédia. Paredes classificadas com desempenho tipo 2 não necessitam de reforço combinado sísmico e térmico;

**Desempenho tipo 3:** Paredes com comportamento sísmico ou térmico desadequado (i.e., não é verificada a exigência regulamentar), requerendo reforço independente sísmico ou energético de extensão intermédia a elevada. De igual forma, este desempenho tipo é subdividida em duas categorias: i) Desempenho tipo 3.1: verifica-se quando  $F_a/F_R > 1,0$  e  $U_{value} \leq U_{ref}$ , aconselhando-se reforço sísmico (independente) de extensão intermédia a elevada; ii) Desempenho tipo 3.2: ocorre quando  $F_a/F_R \leq 0,75$  e  $U_{value} > U_{max}$ , recomendando-se um reforço térmico (independente) de extensão intermédia a elevada. Assim como no Desempenho Tipo 2, não se sugere reforço combinado para paredes com Desempenho Tipo 3;

**Desempenho tipo 4:** Paredes com comportamento combinado sísmico e térmico pobre a intermédio. Este desempenho ocorre nos seguintes cenários: i)  $U_{ref} < U_{value} \leq U_{max}$  e  $F_a/F_R > 1,0$ ; ii)  $U_{ref} < U_{value} \leq U_{max}$  e  $0,75 < F_a/F_R \leq 1,0$ ; e iii)  $U_{value} > U_{max}$  e  $0,75 < F_a/F_R \leq 1,0$ . Recomenda-se um reforço

combinado sísmico e energético de extensão ligeira a intermédia para atender às exigências regulamentares e garantir um desempenho considerado recomendado, característico do Desempenho Tipo 1;

**Desempenho tipo 5:** Paredes com desempenho combinado sísmico e térmico inadequado (muito insatisfatório), onde ambas as exigências regulamentares não são atendidas ( $U_{value} > U_{max}$  e  $F_a/F_R > 1,0$ ). Para paredes com este desempenho, recomenda-se um reforço combinado sísmico e energético com uma extensão significativa. É crucial destacar que o reforço independente (sísmico ou energético) não é suficiente para paredes com Desempenho Tipo 5 e Tipo 4.

Importa realçar que  $F_a$  e  $F_R$  são a força sísmica atuante e força resistente da parede, respetivamente. Para a avaliação da segurança sísmica são propostos três níveis de referência, nomeadamente: i) nível recomendado quando  $F_a/F_R \leq 0,75$ ; ii) nível intermédio quando  $0,75 < F_a/F_R \leq 1$ ; e iii) não verificado quando  $F_a/F_R > 1$ .

Por outro lado,  $U_{value}$ ,  $U_{ref}$  e  $U_{max}$  são respetivamente o valor do coeficiente de transmissão térmica da parede, o valor de referência proposto neste trabalho e o valor máximo sugerido pela regulamentação para essa zona SC. Adicionalmente, ao valor máximo  $U_{max}$  exigido pelo regulamento, foi acrescentado um valor de referência  $U_{ref}$  correspondente a 80% do valor  $U_{max}$ .

O objetivo principal é propor um novo limite de referência que permita classificar o desempenho térmico das paredes de enchimento como excelente. Esta escolha ( $U_{ref} = 80\% U_{max}$ ) é fundamentada com a progressiva redução dos valores de  $U_{max}$  observada ao longo dos últimos anos pelos regulamentos. Além disso, as temperaturas extremas provocadas pelas alterações climáticas requerem uma maior exigência de isolamento térmico assumindo-se assim de forma conservativa este valor de referência. Importa salientar que não é imperativo que os valores  $U_{value}$  das paredes sejam inferiores a

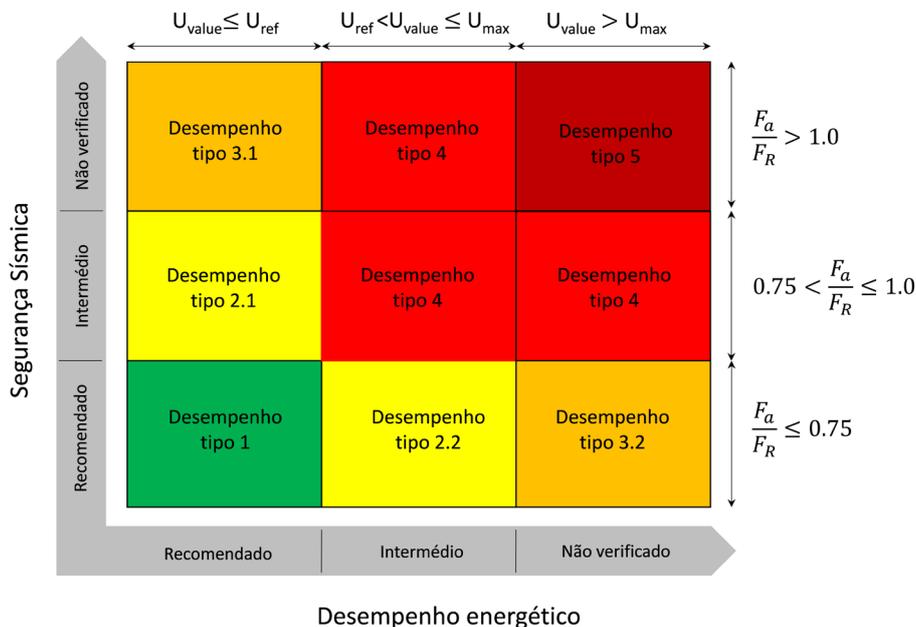


Figura 4 Matriz de avaliação de desempenho combinado

80% de  $U_{max}$ . Esta recomendação é sugerida de forma conservadora para que as paredes contribuam positivamente para um desempenho energético global do edifício eficiente.

Considerando as exigências potencialmente mais rigorosas dos regulamentos térmicos no futuro, as futuras intervenções de reabilitação poderão impor desafios económicos importantes aos projetistas e proprietários de edifícios (i.e., custo da intervenção de reforço). Contudo, a longo prazo, espera-se que os benefícios sejam substanciais, não apenas pela redução do consumo energético para aquecimento, mas também pelo aumento do conforto térmico dos ocupantes.

Importa destacar que o valor de  $U_{Ref}$  pode ser adaptado/ajustado, permitindo uma abordagem mais ou menos exigente. Análises detalhadas de custo-benefício podem permitir otimizar o valor de  $U_{Ref}$  de caso para caso, podendo este ser ajustado em conformidade. Em suma, os argumentos apresentados anteriormente justificam a sugestão do valor proposto para  $U_{Ref}$ .

De forma análoga à abordagem adotada para a segurança sísmica, são propostos três níveis de desempenho térmico da parede: desempenho térmico insatisfatório/não verificado ( $U_{value} > U_{max}$ ), adequado/intermédio ( $U_{Ref} < U_{value} \leq U_{max}$ ) e excelente/recomendado ( $U_{value} \leq U_{Ref}$ ). Estes níveis visam proporcionar uma avaliação abrangente do desempenho térmico das paredes, alinhando-se com as diretrizes regulamentares e as necessidades de eficiência energética.

Por último, é essencial esclarecer que a extensão da intervenção visa indicar o nível de necessidade de reforço. Por outras palavras, uma extensão ligeira destina-se a paredes com baixa exigência de reforço, enquanto uma extensão significativa é destinada a paredes com elevada necessidade de reforço. Finalmente, deve-se salientar que o objetivo recomendado de qualquer intervenção de reforço, seja ela independente ou combinada, para paredes de enchimento

classificadas com desempenho tipo 2, 3, 4 ou 5 deve ser sempre garantir que a parede, após reforço, apresente um desempenho tipo 1.

## 2.5 Seleção do tipo de reforço necessário para as paredes de enchimento

A última fase da metodologia é dedicada à seleção do tipo de reforço mais adequado em função da classe de desempenho da parede de enchimento. Importa referir imediatamente antes de descrever as técnicas de reforço mais adequadas para cada cenário que estas são sugeridas unicamente para a parede de enchimento e não para reforçar elementos estruturais (e.g., vigas, pilares, etc.). A necessidade de reforço e o tipo de técnica mais adequado para esse tipo de elementos e do sistema estrutural no seu todo deve ser abordado com uma metodologia diferente da que é aqui proposta neste trabalho. Na Figura 5 são apresentadas as técnicas de reforço recomendados para cada classe de desempenho tipo.

Para paredes com uma classe de desempenho tipo 1 não é recomendado qualquer tipo de intervenção de reforço na medida em que estas já apresentam um desempenho sísmico e energético excelente. As paredes que foram avaliadas com um tipo de desempenho 2 requerem uma intervenção de reforço independente ligeira a moderada, ou seja, se a parede corresponder a um desempenho tipo 2.1, recomenda-se a adoção de medidas de reforço sísmico. Por outro lado, se corresponder a um tipo de desempenho 2.2, recomenda-se a adoção de medidas de reforço térmico. A mesma observação pode ser feita para as paredes avaliadas com o tipo de desempenho 3. No entanto, neste caso, as paredes com o tipo de desempenho 3.1 requerem medidas de reforço sísmico moderado a elevado uma vez que a verificação da segurança sísmica não é satisfeita. Da mesma forma, as paredes com o tipo



Figura 5 Indicação do tipo de reforço recomendado

de desempenho 3.2 necessitam de medidas de reforço térmico moderado a elevado para reduzir o valor de  $U_{value}$  por forma a cumprir as exigências do regulamento. Existem diferentes técnicas para a reforço independente sísmico ou térmico de paredes exteriores de edifícios de BA, no entanto a validação experimental ainda não é suficiente. Finalmente, as paredes com classes de desempenho tipo 4 e 5 requerem medidas de reforço combinado sísmico e térmico moderado a elevado, respetivamente.

### 3 Conclusões

A elevada vulnerabilidade sísmica das paredes de alvenaria de enchimento, associada ao facto de uma considerável parte do parque edificado em BA ter sido construída antes da implementação dos primeiros regulamentos térmicos, conduziu a um número expressivo de fachadas que podem carecer de reforço, seja de forma independente ou combinada, abordando as vertentes sísmica e térmica, dependendo da tipologia de parede e da zona SC. A avaliação conjunta do desempenho sísmico e térmico de paredes de enchimento de alvenaria exteriores nunca foi explorada anteriormente, sendo que os regulamentos existentes (sísmicos e energéticos) não oferecem especificações para a interpolação de ambos os parâmetros, a fim de otimizar o reforço necessário. Atualmente, as intervenções nas envolventes de edifícios em BA estão predominantemente focadas na reabilitação/reforço energético, dada a ausência de abordagens específicas para garantir a segurança sísmica e eficiência térmica das paredes de enchimento situadas nas fachadas.

Motivado por esta lacuna, este trabalho de investigação procurou apresentar uma nova abordagem holística para a avaliação do desempenho de paredes de enchimento de alvenaria. Esta inovadora metodologia classifica cada parede com base no seu desempenho combinado sísmico e energético, proporcionando uma identificação precisa do tipo de reforço necessário. Essa abordagem integrada destaca-se pela sua aplicabilidade tanto em edifícios existentes como em novas construções, contribuindo de forma direta para um parque habitacional mais seguro e energeticamente eficiente.

Estruturada em duas vertentes principais – avaliação da segurança sísmica e eficiência térmica –, a metodologia abrange quatro fases distintas: identificação da classe de prioridade do edifício, recolha de dados geométricos e materiais, avaliação combinada do desempenho sísmico e térmico combinado da parede de enchimento, e identificação do tipo de reforço recomendado. A Fase 1 contextualiza o edifício, introduzindo a classe de prioridade para identificar edifícios construídos de acordo com regulamentação mais antiga ou desprovidos dela, localizados em zonas de maior exigência sísmica e térmica. A Fase 2 centra-se na recolha de propriedades geométricas e materiais essenciais para determinar a capacidade resistente à ação sísmica e o coeficiente de transmissão térmica. A Fase 3 abrange a avaliação de desempenho integrada, propondo formulações para a capacidade resistente e coeficiente de transmissão térmica. Uma nova matriz de avaliação de desempenho é apresentada, classificando as paredes em 5 tipos com base em

características e regulamentações. Por fim, a Fase 4 concentra-se na identificação do tipo de reforço necessário, com base no desempenho da parede identificado na Fase 3. Essa etapa fornece diretrizes precisas sobre o tipo (sísmico, energético ou combinado) e grau de intervenção (ligeiro, intermédio ou elevado) necessários para as paredes em análise.

Esta metodologia representa uma mudança, onde se pretende combinar as componentes funcionais (energética) com a componente de segurança à ação sísmica, visando tornar as envolventes de edifícios de BA mais seguras e eficientes. Além disso, destaca-se como uma ferramenta extremamente útil para os projetistas, fornecendo orientações precisas sobre o tipo de reforço necessário para as paredes exteriores existentes de alvenaria de enchimento.

### Agradecimentos

Este trabalho foi financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) através do financiamento à unidade de investigação CERIS com a referência UIDB/04625/2020. Este trabalho foi também desenvolvido com o apoio da Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) – Centro de Investigação em Riscos e Sustentabilidade na Construção (RISCO), Universidade de Aveiro, Portugal [FCT/UIDB/ECI/04450/2020].

### Referências

- [1] Qu, Z.; Wang, F.; Chen, X.; Wang, X.; Zhou, Z. – "Rapid report of seismic damage to hospitals in the 2023 Turkey earthquake sequences," *Earthquake Research Advances*, vol. 3, no. 4, p. 100234, 2023/10/01/ 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.eqrea.2023.100234>.
- [2] Okamura, M.; Bhandary, N.P.; Mori, S.; Marasini, N.; Hazarika, H. – "Report on a reconnaissance survey of damage in Kathmandu caused by the 2015 Gorkha Nepal earthquake," *Soils and Foundations*, vol. 55, no. 5, pp. 1015-1029, 2015/10/01/ 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2015.09.005>.
- [3] Rai, D.C.; Singhal, V.; Raj S, B.; Sagar, S.L. – "Reconnaissance of the effects of the M7.8 Gorkha (Nepal) earthquake of April 25, 2015," *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, vol. 7, no. 1, pp. 1-17, 2016/01/02 2016, doi: [10.1080/19475705.2015.1084955](https://doi.org/10.1080/19475705.2015.1084955).
- [4] Crowley, H. *et al.* – "Model of seismic design lateral force levels for the existing reinforced concrete European building stock," *Bulletin of Earthquake Engineering*, vol. 19, no. 7, pp. 2839-2865, 2021/05/01 2021, doi: [10.1007/s10518-021-01083-3](https://doi.org/10.1007/s10518-021-01083-3).
- [5] CEN – "Eurocode 8 – Part 1: Design of structures for earthquake resistance: General rules, seismic actions and rules for buildings," 2010.
- [6] Braga, F.; Manfredi, V.; Masi, A.; Salvatori, A.; Vona, M. – "Performance of non-structural elements in RC buildings during the L'Aquila, 2009 earthquake," *Bulletin of Earthquake Engineering*, vol. 9, no. 1, pp. 307-324, 2011/02/01 2011, doi: [10.1007/s10518-010-9205-7](https://doi.org/10.1007/s10518-010-9205-7).
- [7] De Risi, M.T.; Del Gaudio, C.; Verderame, G.M. – "Evaluation of Repair Costs for Masonry Infills in RC Buildings from Observed Damage Data: the Case-Study of the 2009 L'Aquila Earthquake," *Buildings*, vol. 9, no. 5, p. 122, 2019. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2075-5309/9/5/122>.