

ANÁLISE DA VULNERABILIDADE SÍSMICA DE UM EDIFÍCIO POMBALINO DESAFIOS E SOLUÇÕES

Fábio Ferreira
Estudante de Mestrado
ESTBarreiro/IPS

Cristina Oliveira
Professora Adjunto
ESTBarreiro/IPS

SUMÁRIO

A verificação da segurança sísmica dos edifícios existentes requer uma abordagem metódica que abrange vários fatores, como definir as ações sísmicas apropriadas, modelação adequada, métodos analíticos apropriados e verificações de segurança necessárias. A análise estrutural de alvenaria existentes, com as suas características únicas e conhecimento limitado, representa um desafio.

Este artigo descreve a análise de vulnerabilidade sísmica realizada para um edifício do estilo Pombalino localizado em Lisboa. O edifício é património de interesse Municipal e foi pouco deturpado ao longo do tempo, revelando todas as características típicas, construtivas e estruturais, implementadas nos edifícios no período pós-terramoto de 1755.

Utilizando métodos de análise não lineares, os resultados oferecem informações valiosas sobre a vulnerabilidade sísmica de edifícios de pombalinos, lançando luz sobre o seu comportamento estrutural e potenciais fragilidades.

A pesquisa destaca a importância de métodos analíticos avançados e da consideração da história única da estrutura para avaliações precisas do desempenho sísmico.

ABSTRACT

Verifying the seismic safety of existing buildings requires a meticulous approach that encompasses several factors, such as defining appropriate seismic actions, appropriate modelling, adequate analytical methods, and necessary safety checks. The structural analysis of existing masonry, with its unique characteristics and limited knowledge, represents a challenge.

This article describes the seismic vulnerability analysis carried out for a *Pombalino* style building located in Lisbon. The building is a heritage site of Municipal interest and has been little distorted over time, revealing all the typical constructive and structural characteristics implemented in buildings in the post-1755 earthquake period.

Using non-linear analysis methods, the results offer valuable information about the seismic vulnerability of *Pombalino* buildings, shedding light on their structural behaviour and potential weaknesses.

The research highlights the importance of advanced analytical methods and consideration of the unique history of the structure for accurate assessments of seismic performance.

PALAVRAS-CHAVE: Vulnerabilidade Sísmica; Edifício Pombalino; Análise não-linear (pushover); património.

1. INTRODUÇÃO

O parque edificado em Portugal é maioritariamente constituído por edifícios antigos de alvenaria considerados susceptíveis a acções sísmicas. No sentido de melhorar as condições do parque edificado, é obrigatória, desde 2019, a elaboração de um relatório de avaliação de vulnerabilidade sísmica aplicável a situações de reabilitação estrutural de acordo com determinados requisitos descritos na lei.

Este artigo avalia a vulnerabilidade sísmica de um edifício de origem Pombalino com uma alteração para Gaioleiro localizado na Rua do Alecrim, nº 51–53, Lisboa. A caracterização geométrica foi realizada com recurso a visitas ao local e apoio das Empresas JSJ e DDN, foi realizada uma caracterização dinâmica através de ensaios de vibração ambiental e as propriedades dos materiais foram definidas com recurso a bibliografia sobre edifícios semelhantes.

Foi efetuada a modelação do edifício no software 3Muri através de um modelo de pórtico equivalente com a utilização de macro elementos. A calibração do modelo foi realizada com base nos resultados obtidos nos ensaios dinâmicos realizados in situ. Neste artigo é apresentada a análise global do edifício realizada através de uma análise estática não linear (*pushover*).

2. CARACTERIZAÇÃO GENÉRICA

Uma vez que o caso de estudo analisado tem uma génese de edifício Pombalino com uma alteração posterior para Gaioleiro, importa definir genericamente as características destes dois tipos de edificado.

Os edifícios Pombalinos surgem entre 1755 e 1880, caracterizando-se pela sua geometria regular, com paredes principais de alvenaria de pedra de razoável qualidade, paredes interiores em frontal pombalino, pisos de madeira, com exceção do primeiro, que é, nos edifícios de melhor qualidade, constituído por abóbadas de tijoleira, e possuem também dispositivos de ligação conferindo um razoável contraventamento. Estes edifícios são caracterizados pela existência de um sistema de travamento tridimensional de madeira, com elementos horizontais, verticais e diagonais – a denominada gaiola pombalina - preenchido com alvenaria composta por desperdícios de construções ligados por argamassa de cal. As paredes que incluem este sistema são as paredes de frontal, paredes resistentes da estrutura. Existem outras paredes interiores, mais finas, que têm a única função de paredes divisórias, denominadas de paredes costaneiras ou tabiques ([1] – [3]).

Com o elevado aumento da população e a necessidade de criar mais habitação, com maior rapidez, surgiu, como uma solução mais rápida, o edifício típico Gaioleiro. Este edifício surge no final do sec. XIX até aos anos 30-40 do século XX. Aqui ocorreu a deturpação da gaiola pombalina original, com o desaparecimento de alguns dos elementos horizontais nas paredes resistentes, ausência da continuidade tridimensional e estrutural, utilizando, de modo geral, materiais de qualidade inferior. Em algumas situações, existe a substituição completa das paredes de frontal por paredes de alvenaria de tijolo ou de tabique. Houve uma deterioração dos processos construtivos, com aumento da altura total dos edifícios e redução da espessura das paredes ao longo da altura. São introduzidos elementos que permitem a iluminação natural em ambientes interiores, como, por exemplo, uma claraboia na cobertura sobre a caixa de escadas ([4], [5]).

3. CASO DE ESTUDO

O caso de estudo é referente a um edifício que se localiza em pleno centro de Lisboa, na Rua do Alecrim, nº 51–53 (Fig. 1), com um total de 5 pisos. O edifício foi propriedade da Tranquilidade em 1871, não havendo qualquer registo do ano de construção. Nos últimos anos, o edifício foi utilizado como escritórios ao nível do piso 0 até ao piso 2, onde o mesmo apresenta o melhor estado de conservação, habitação nos pisos 3 e 4 (piso com aproveitamento das águas-furtadas e mansardas), que apresentam um estado de conservação mais degradado, e ainda contém um piso -1 com entrada pela rua traseira (Rua das Flores) que, até recentemente, seria utilizado para arrumos.

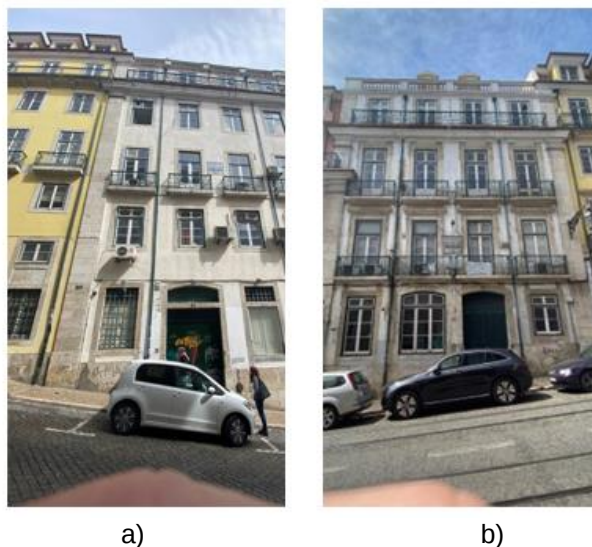


Fig. 1 – a) Rua das Flores (tardoz); b) Rua do Alecrim (fachada principal)

O edifício possui uma planta rectangular com uma área de implantação de 300m². Nas duas empenas o edifício encosta a edifícios semelhantes, originais da mesma época, com mais um piso e que aparentam ter sofrido algum tipo de reabilitação. Não se conseguiu apurar se foi realizada também reabilitação estrutural.

Este edifício é um excelente exemplo do tipo de construção da época que sofreu algumas, mas reduzidas alterações ao longo do tempo. Em 2018 o edifício deixou de ser utilizado, data em que se iniciaram os trabalhos de projeto, reabilitação e reforço do mesmo. No início dos trabalhos de remoção de revestimentos, começaram a ser expostas paredes estruturais (paredes de frontal), alguns tectos, paredes de tabique e alguns pavimentos. No piso 3 do edifício realizou-se aumento de cércea face ao edifício original. Apesar de possuir um pé direito mais reduzido, relativamente à prática pombalina, verificou-se que foram respeitadas as características pombalinas, nomeadamente a continuação das paredes de frontal e boas ligações entre as paredes perpendiculares, garantindo a continuidade da estrutura tridimensional da gaiola. Relativamente à cobertura, esta apresentava sinais de ter sofrido um incêndio nalguma fase da vida do edifício, tendo sido posteriormente reconstruída utilizando uma cobertura típica de um edifício gaioleiro com asna simplificada. Acredita-se que nesta reconstrução foi introduzida uma clarabóia sobre as escadas, trazendo luz para o interior. Na Fig. 2 estão representados os diferentes tipos de construção encontrados.



Fig. 2 – Fachadas com identificação da separação dos tipos de construção encontrados

4. MODELAÇÃO DO EDIFÍCIO

4.1. Modelação dos elementos

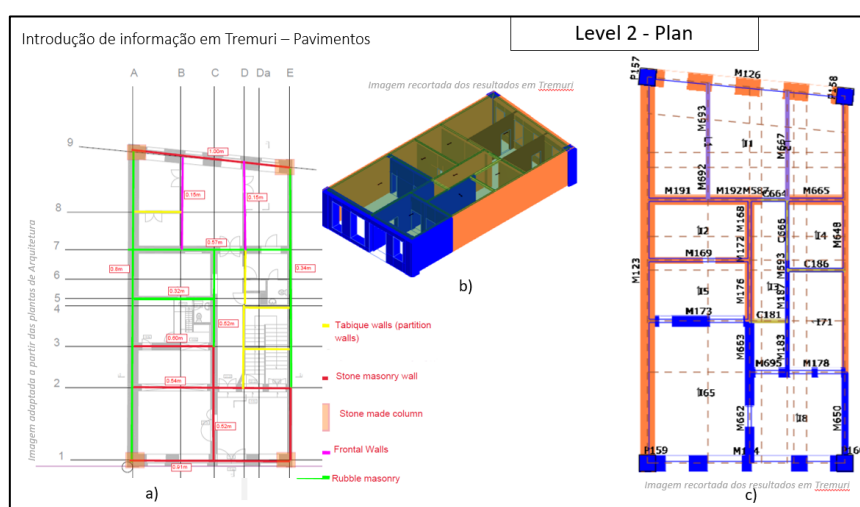
A estrutura foi modelada com o software 3Muri [6], desenvolvido por STA DATA e a Universidade de Génova, em Itália, e que permite obter a resposta de estruturas de alvenaria através de análises estáticas não lineares. A estrutura do edifício foi modelada através de um modelo de pórtico equivalente com macro elementos, divididos entre nembos e lintéis, para os elementos deformáveis, e nós rígidos como elementos indeformáveis [7].

Foi efetuado um levantamento de todos os elementos estruturais, paredes em pedra aparelhada, paredes de frontal, pavimentos e cobertura, através de visitas *in situ*, com permissão da empresa construtora responsável pela obra de reabilitação e reforço do edifício. As características mecânicas das paredes de pedra aparelhada foram obtidas através do estudo elaborado por H.A. Meireles et al., (2012) [8], onde foi formulado um macro elemento para uma estrutura equivalente de um edifício pombalino. Os pavimentos foram definidos considerando vigas de pavimento com uma secção de 10x20cm e o revestimento com 2cm, de acordo com o estudo realizado por Simões A. & Bento, R. (2012) [9]. A cobertura não é estrutural pelo que apenas foi considerado o efeito desta carga sobre o edifício. As paredes de frontal foram modeladas de acordo com [9], onde foi proposto modelar uma parede de frontal manipulando as propriedades de uma parede de alvenaria equivalente. Na Tabela 1 apresentam-se os valores iniciais considerados.

Apresenta-se, na Fig. 3, a representação e identificação das paredes estruturais para o piso 2. Após a definição dos alinhamentos a considerar para todos pisos e identificação de todas as paredes do edifício em CAD (Fig. 3-a)), o modelo foi desenvolvido em 3Muri (Fig. 3-b) e c) e Fig. 4)

Tabela 1- Valores considerados na modelação inicial.

Elemento	Módulo de elasticidade E [N/mm ²]	Módulo de distorção G [N/mm ²]	Peso Volúmico w [kN/m ³]	Tensão de compressão f _m [N/cm ²]	Tensão de corte τ [N/cm ²]
Paredes de Frontal	345	2000	0	600	5.5
Alvenaria de Pedra Irregular	1500	410	20	250	4.3
Cunhais	2800	860	22	700	10.5
Pavimentos/Vigas Madeira	12000	400	5,8	2000	2.0
Tijolo maciço	1500	500	18	320	7.0



4.2. Calibração do modelo

De modo a conseguir garantir que o modelo desenvolvido traduz adequadamente a realidade é importante obter semelhantes valores de caracterização dinâmica, nomeadamente das frequências de vibração.

Foram realizados testes dinâmicos de vibração ambiental sobre o edifício, através dos quais se retiram os valores das primeiras frequências, apresentados na Tabela 2, com a definição das direções na Fig 5.

Tabela 2- Resultados dos ensaios dinâmicos.

Modo de vibração	Direcção	Valor [Hz]
1	Longitudinal	2.95
2	Torsão	4.30
3	Transversal	4.90

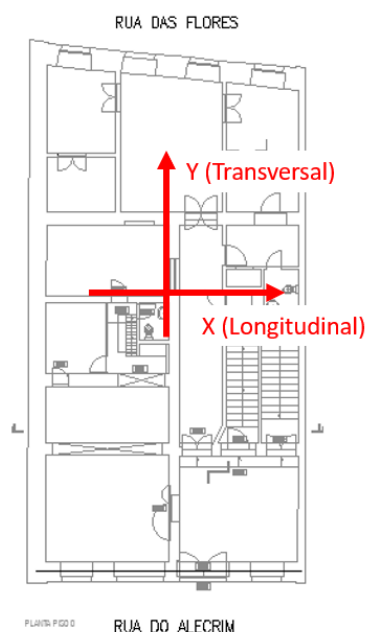


Fig. 5 – Representação das direções consideradas

Os primeiros valores obtidos com a modelação descrita não corresponderam aos medidos *in situ* em virtude do efeito dos edifícios adjacentes. De modo a introduzir este efeito no modelo, considerou-se a introdução de molas horizontais que representassem os efeitos dos edifícios adjacentes ou realizar a modelação do grupo de três edifícios com o edifício em estudo no meio. No entanto, por dificuldades de utilização do software 3Muri, tais alternativas não foram possíveis, pelo que se procedeu a uma alteração iterativa da rigidez dos vários elementos de modo que o modelo conseguisse traduzir frequências semelhantes às medidas.

Na Tabela 3 apresentam-se os valores finais considerados na modelação.

Tabela 3- Valores considerados na modelação final.

Elemento	Módulo de elasticidade E [N/mm ²]	Módulo de distorção G [N/mm ²]	Peso Volumico w [kN/m ³]	Tensão de compressão Fm [N/cm ²]	Tensão de corte τ [N/cm ²]
Paredes de Frontal	450	1500	0	600	5.5
Alvenaria de Pedra Irregular	2398	799	20	250	4.3
Cunhais	2800	1677	22	700	10.5
Pavimentos/Vigas Madeira	12000	400	5.8	2000	2.0
Tijolo maciço	2925	975	18	320	7.6

5. ANÁLISE GLOBAL E RESULTADOS

Foi realizada a análise global da estrutura através de análises estáticas não lineares (*pushover*) considerando a aplicação de forças laterais incrementais com duas distribuições diferentes: uniforme e triangular. Considerou-se as duas direcções principais (x e y) e os dois sentidos (+ e -). Obtiveram-se as curvas de capacidade expostas na Fig. 6, que relaciona a força de corte basal com o deslocamento de um nó de controlo, que deverá servir de referência para o deslocamento máximo. O nó seleccionado localiza-se ao nível da cobertura, no cruzamento das paredes que entram em colapso primeiro segundo cada uma das direcções, correspondendo ao nó E9 representado na Fig. 3.

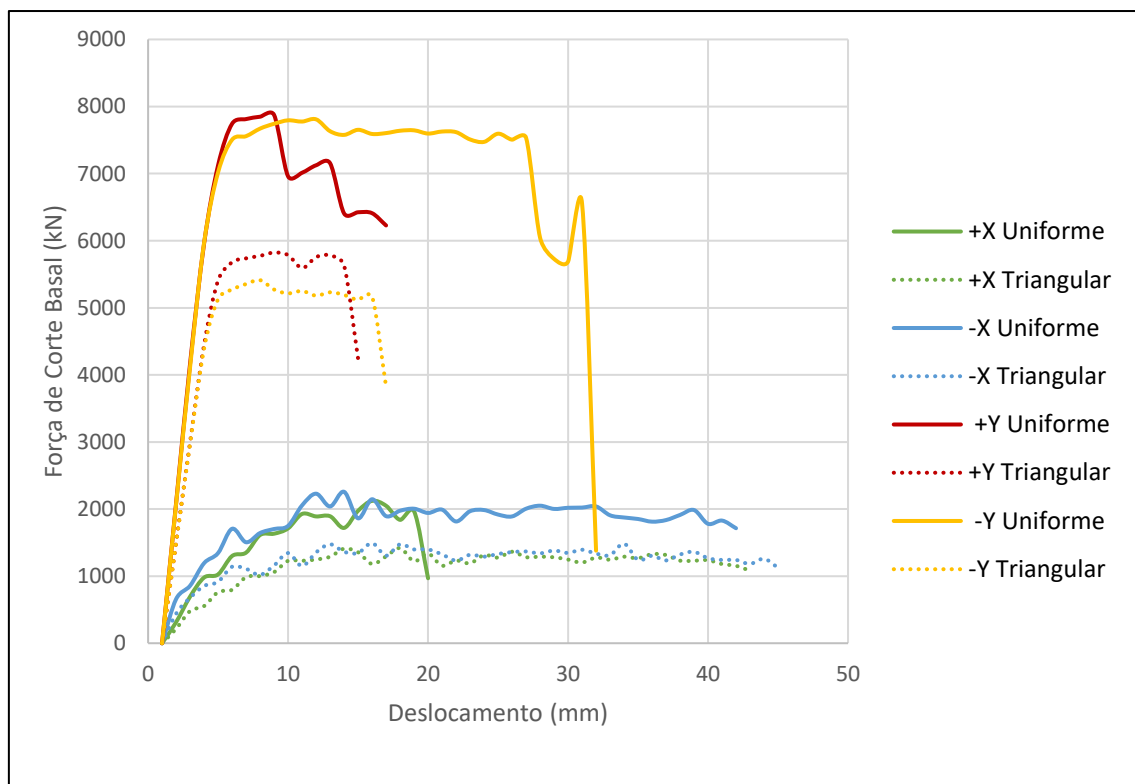


Fig. 6 – Curvas de capacidade resistente da estrutura

Apresenta-se na Fig.7 a análise de duas curvas de capacidades, uma segundo X, outra segundo Y, ambas com carregamento triangular. Verifica-se que segundo a direção X a estrutura não cumpre os requisitos de segurança, ou seja, o deslocamento alvo é superior a $\frac{3}{4}$ do deslocamento último. Na direção Y, a nível global os requisitos são cumpridos uma vez que o deslocamento alvo é inferior a $\frac{3}{4}$ do deslocamento último.

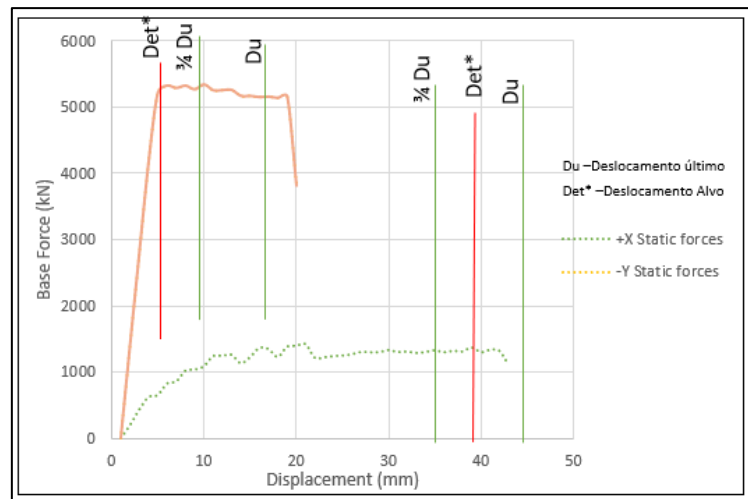


Fig. 7 – Análise do deslocamento último e curva de capacidade

Na Fig. 8, apresentam-se os mecanismos de colapso dos alçados de tardo (linha de grelha 9 representado na Fig. 3) e principal (linha de grelha 1 representado na Fig. 3), associados à direção X. Na Fig. 9, está o exemplo das paredes meeiras segundo Y (alinhamentos A e E representados na Fig.3), para o qual é importante salientar o colapso ao nível do piso 3, devido a uma alteração de espessuras das paredes em altura.

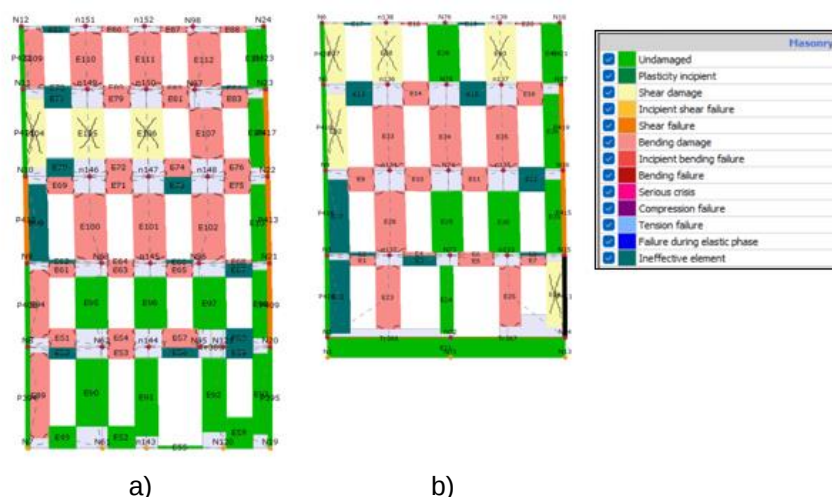


Fig. 8 – Resultados dos alinhamentos correspondentes à direção X:
a) fachada tardo do edifício; b) alçado principal

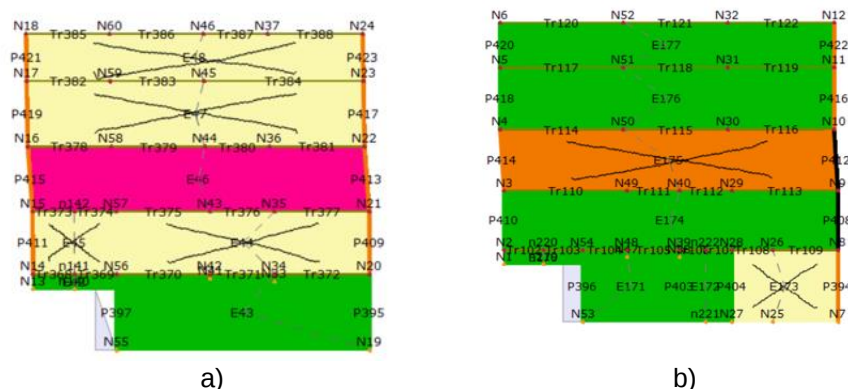


Fig. 9 –Resultados dos alinhamentos correspondentes à direcção Y:
a) parede meeira sul; b) parede meeira norte

6. CONCLUSÕES

Este artigo apresenta o estudo de vulnerabilidade sísmica de um edifício de génese Pombalino com alteração para Gaioleiro a dada altura. A modelação da estrutura foi realizada através do software 3Muri, com definição das propriedades e características de todos os materiais e elementos constituintes do edifício. O modelo foi calibrado com os resultados obtidos em ensaios dinâmicos in-situ, tendo-se os autores deparados com a tradução dos efeitos dos edifícios adjacentes. Foi realizada a análise global da estrutura através do software 3Muri e utilizando o método N2 descrito no EC8.

De acordo com os resultados apresentados conclui-se que a estrutura não cumpre os requisitos do critério do EC8 com base no método N2, pelo que será necessário proceder ao reforço estrutural.

Deve ser referido que a realização da análise global pressupõe que existem boas ligações entre paredes perpendiculares. No entanto, tal pode não se verificar, pelo que o estudo deveria ser complementando com a análise de mecanismos locais de colapso de roturas para fora do plano.

Desta forma, as técnicas de reforço a propor devem garantir a verificação da segurança necessária para a análise global e local.

7. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer às Empresas JSJ e DDN, em particular nas pessoas do Eng. Miguel Lourenço e do Eng. Rodrigo Rodrigues pela disponibilização de peças desenhadas do projecto de reforço e acesso ao edifício que permitiram a realização deste trabalho. Os autores agradecem também à preciosa ajuda do Prof. Carlos Sousa Oliveira que, com a sua energia habitual, coordenou e realizou os ensaios dinâmicos ao edifício em estudo.

8. REFERÊNCIAS

- [1] APPLETON, J. (2003), Reabilitação de Edifícios Antigos, Patologias e Tecnologias de Intervenção, 1.^a Edição, Edições Orion, Setembro 2003.
- [2] França, J. A. (1989). A reconstrução de Lisboa e a arquitectura pombalina. Biblioteca Breve, 1989.
- [3] Lopes, M. (2010). Construção pombalina: Património histórico e estrutura sísmo-resistente. 8º Congresso de sismologia e engenharia sísmica, 2010.
- [4] Appleton, J. G. 2005. Reabilitação de Edifícios “Gaioleiro” - Um quarteirão em Lisboa. Edições Orion, 1.^a Edição. ISBN: 9728620055.
- [5] MASCARENHAS, J. (2004) – Sistemas de Construção V: O Edifício de Rendimento da Baixa Pombalina de Lisboa – Processo evolutivo dos edifícios; inovações técnicas; sistema construtivo; Materiais Básicos (3.^a Parte): O Vidro; Livros Horizonte.
- [6] STA DATA. 2023. 3muri program: Seismic analyser of 3d masonry buildings.. Torino. [www.3muri.com].
- [7] Lagomarsino, S., Penna, A., Galasco, A., e Cattari, S. 2013. Tremuri program: An equivalent frame model for the nonlinear seismic analysis of masonry buildings. Engineering Structures, 56, pp. 1787–1799. DOI:10.1016/j.engstruct.2013.08.002.
- [8] Meireles, H. A., Bento, R., Cattari, S., & Lagomarsino, S. (2012). Formulation and validation of a macro-element for the equivalent frame modelling of internal walls in Pombalino buildings.
- [9] Simões A. & Bento, R. (2012) Characterization and Classification of Old Masonry Buidlings