



Reforço Integrado sísmico e energético de edifícios de alvenaria: modelação numérica da resposta

Rafael Alexandre da Silva Saraiva

UMinho | 2023



**Universidade do Minho**  
Escola de Engenharia

Rafael Alexandre da Silva Saraiva

**Reforço integrado sísmico e energético de edifícios de alvenaria: modelação numérica da resposta**

dezembro de 2023





**Universidade do Minho**

Escola de Engenharia

Rafael Alexandre da Silva Saraiva

**Reforço integrado sísmico e energético de edifícios de alvenaria: modelação numérica da resposta**

Dissertação de Mestrado

Mestrado em Engenharia Civil

Área de especialização em Estruturas e Geotecnia

Trabalho efetuado sob a orientação da

**Professor Doutor Daniel Vitorino de Castro Oliveira**

**e**

**Professora Doutora Senhorinha de Fátima Capela Fortunas Teixeira**

## DIREITOS DE AUTOR E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO POR TERCEIROS

Este é um trabalho académico que pode ser utilizado por terceiros desde que respeitadas as regras e boas práticas internacionalmente aceites, no que concerne aos direitos de autor e direitos conexos.

Assim, o presente trabalho pode ser utilizado nos termos previstos na licença abaixo indicada.

Caso o utilizador necessite de permissão para poder fazer um uso do trabalho em condições não previstas no licenciamento indicado, deverá contactar o autor, através do RepositóriUM da Universidade do Minho.

Licença concedida aos utilizadores deste trabalho



**Atribuição**  
**CC BY**

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente gostaria de agradecer aos meus orientadores, Doutor Daniel V. Oliveira e Doutora Senhorinha Teixeira, pela sua disponibilidade de ajuda e pela confiança que tiveram em mim ao longo deste trabalho.

À S.T.A DATA por disponibilizar a licença do software 3MURI, em especial à Doutora Ana Simões por estar sempre disponível para o esclarecimento de possíveis dúvidas. Também gostaria de agradecer ao Doutor Rui Marques pelo esclarecimento de dúvida no software.

Ao Doutor Alexandre Costa do NCREP, por disponibilizar as plantas de um edifício de alvenaria, o que possibilitou a criação de um caso de estudo realista.

Este trabalho foi parcialmente financiado pela FCT/MCTES através do projeto 2022.01429.PTDC (<https://doi.org/10.54499/2022.01429.PTDC>), por fundos nacionais (PIDDAC) através da Unidade de I&D Instituto para a Sustentabilidade e Inovação em Engenharia de Estruturas (ISISE), com a referência UIDB/04029/2020, e do Laboratório Associado de Produção Avançada e Sistemas Inteligentes ARISE, com a referência LA/P/0112/2020.

A todos os meus amigos, por me acompanharem no meu percurso académico e por toda a ajuda.

Por fim, gostaria de aos meus pais, por me apoiarem sempre ao longo desta jornada, e por todo o seu carinho. Foram as principais pessoas que possibilitaram todo o meu percurso académico apesar de todas as dificuldades que existiram.

## **DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE**

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho académico e confirmo que não recorri à prática de plágio, nem a qualquer forma de utilização indevida ou falsificação de informações ou resultados em nenhuma das etapas conducente à sua elaboração.

Mais declaro que conheço e que respeitei o Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.

## RESUMO

Com o aumento das necessidades de eficiência energética e com a necessidade da preservação dos edifícios antigos, a utilização de métodos eficientes para a renovação e conservação dos mesmos tem sido alvo de muito interesse. Os edifícios de alvenaria, pela sua antiguidade, não têm a envolvente necessária para garantir um bom isolamento térmico, e também apresentam elevada vulnerabilidade a ações sísmicas. Assim torna-se necessário efetuar uma avaliação energética e avaliação de segurança sísmica segundo a legislação atual, e, se necessário, efetuar um reforço integrado sísmico e energético.

No âmbito desta dissertação, inicialmente é efetuada uma caracterização arquitetónica, estrutural e energética do caso de estudo em causa. A análise energética é efetuada através das temperaturas interiores e segundo os gastos energéticos, tanto de aquecimento como de arrefecimento. A análise sísmica é baseada na análise *pushover* e verificação da capacidade de deslocamento da estrutura, para os vários estados limites.

Após as análises, concluiu-se que o edifício não atende aos padrões de segurança sísmicos necessários regulamentares e decidiu-se definir e implementar um reforço integrado sísmico e energético, segundo a técnica do TRM e isolamento térmico integrado, tendo-se verificado um aumento no desempenho sísmico e uma melhoria significativa do desempenho energético.

**Palavras-chave:** Alvenaria; 3MURI; EnergyPlus; Reforço integrado

## **ABSTRACT**

With the increasing need for energy efficiency and the need to preserve ancient buildings, there has been a lot of interest in using efficient methods to renovate and conserve them. Due to their age, masonry buildings do not have the necessary envelope to guarantee good thermal insulation, and they are also highly vulnerable to seismic action. It is therefore necessary to carry out an energy assessment and seismic safety assessment in accordance with current legislation and, if necessary, to carry out integrated seismic and energy reinforcement.

As part of this dissertation, an architectural, structural and energy characterisation of the case study is carried out. The energy analysis is carried out using indoor temperatures and according to energy costs, both for heating and cooling. The seismic analysis is based on pushover analysis and verification of the structure's displacement capacity for the various limit states.

After the analyses, it was concluded that the building does not meet the required seismic safety standards as per regulations. It was decided to establish and implement an integrated seismic and energy reinforcement using the TRM technique and integrated thermal insulation. This led to an observed increase in seismic performance and a significant improvement in energy efficiency

**Keywords:** Masonary; 3MURI; EnergyPlus; integrated retrofitting

# ÍNDICE

|   |      |
|---|------|
| Agradecimentos.....   | iii  |
| Declaração de Integridade .....                                     | iv   |
| Resumo.....   | v    |
| Abstract.....   | vii  |
| Índice.....   | viii |
| Lista de Figuras .....  | xii  |
| Lista de Tabelas .....  | xvi  |
| Lista de Abreviaturas e Siglas .....                                | xvii |
| Lista de Símbolos .....   | xix  |
| 1. Introdução .....   | 1    |
| 1.1 Motivação .....   | 1    |
| 1.2 Objetivos .....   | 2    |
| 1.3 Estrutura da dissertação .....                                  | 2    |
| 2. Estado da Arte .....   | 4    |
| 2.1 Construção em alvenaria .....                                   | 4    |
| 2.2 Desempenho Sísmico .....  | 5    |
| 2.2.1 Ação sísmica.....   | 5    |
| 2.2.2 Comportamento dos edifícios de alvenaria à ação sísmica ..... | 7    |
| 2.2.3 Comportamento para fora do plano .....                        | 9    |
| 2.2.4 Comportamento no plano.....                                   | 10   |
| 2.3 Tecnologias de reabilitação sísmica.....                        | 13   |
| 2.3.1 Ancoragens .....  | 13   |
| 2.3.2 Melhoria de diafragma horizontal no plano.....                | 14   |

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 2.3.3 | Compósitos com matriz inorgânica – TRM .....                          | 14 |
| 2.4   | Consumo energético .....  | 15 |
| 2.5   | Tecnologias de reabilitação térmica.....                              | 17 |
| 2.5.1 | Isolamento térmico.....   | 17 |
| 2.5.2 | Isolantes térmicos Inovadores.....                                    | 18 |
| 2.5.3 | Sistemas de sombreamento .....  | 20 |
| 2.5.4 | Energia renovável - Painéis solares .....                             | 20 |
| 2.6   | Reforço integrado sísmico e energético .....                          | 21 |
| 2.6.1 | Exosqueletos .....  | 21 |
| 2.6.2 | Intervenções na envolvente existente (TRM + isolamento térmico) ..... | 22 |
| 2.7   | Revisão Bibliográfica .....   | 23 |
| 3.    | Análise Sísmica de Estruturas de Alvenaria.....                       | 26 |
| 3.1   | Aspetos regulamentares.....   | 26 |
| 3.1.1 | Eurocódigo 8 Parte 1 .....  | 26 |
| 3.1.2 | Eurocódigo 8 Parte 3.....   | 29 |
| 3.1.3 | Nível de conhecimento .....   | 31 |
| 3.1.4 | Métodos de Análise .....  | 32 |
| 3.1.5 | Curvas bilineares.....  | 34 |
| 3.2   | Software 3MURI.....   | 35 |
| 4.    | Análise Energética de Estruturas .....                                | 43 |
| 4.1   | Aspetos regulamentares.....   | 43 |
| 4.2   | Software EnergyPlus .....   | 45 |
| 5.    | Caso de Estudo.....   | 48 |
| 5.1   | Apresentação do caso de estudo.....                                   | 48 |
| 5.2   | Análise sísmica .....   | 49 |

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 5.2.1 | Definição do modelo numérico .....                           | 49 |
| 5.2.2 | Validação do modelo numérico .....                           | 51 |
| 5.2.3 | Análise modal .....  | 52 |
| 5.2.4 | Curvas de capacidade .....                                   | 58 |
| 5.2.5 | Definição da ação sísmica .....                              | 63 |
| 5.2.6 | Verificações regulamentares .....                            | 64 |
| 5.2.7 | Análise Paramétrica.....                                     | 68 |
| 5.3   | Análise energética.....                                      | 72 |
| 5.3.1 | Modelação do edifício no software EnergyPlus .....           | 72 |
| 5.3.2 | Ficheiro climático .....                                     | 73 |
| 5.3.3 | Perfis de ocupação.....                                      | 73 |
| 5.3.4 | Materiais e construções.....                                 | 74 |
| 5.3.5 | Cargas internas.....   | 75 |
| 5.3.6 | Consumo anual.....   | 75 |
| 5.3.7 | Consumo mensal .....   | 76 |
| 5.3.8 | Temperatura diária.....                                      | 77 |
| 6.    | Reabilitação Integrada.....                                  | 80 |
| 6.1   | Técnica da reabilitação integrada sísmica e energética ..... | 80 |
| 6.2   | Análise sísmica.....   | 80 |
| 6.3   | Análise energética.....                                      | 85 |
| 6.3.1 | Consumo anual.....   | 85 |
| 6.3.2 | Consumo mensal .....   | 86 |
| 6.3.3 | Comparação de gastos totais anuais.....                      | 87 |
| 7.    | Conclusão e Trabalhos Futuros .....                          | 88 |
| 7.1   | Principais Conclusões.....                                   | 88 |

|     |  |     |
|-----|--|-----|
| 7.2 | Trabalhos futuros.....                   | 89  |
|     | Referências .....                        | 90  |
|     | Anexo A – Planta do Edifício .....       | 94  |
|     | Anexo B – Nomenclatura das paredes ..... | 95  |
|     | Anexo C – 3MURI .....                    | 96  |
|     | Anexo D – EnergyPlus .....               | 102 |
|     | Anexo E – Designação de Danos.....       | 110 |

## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 - Modelo simplificado da estrutura da Terra (Caldeira et al., 2005).....   | 5  |
| Figura 2 – Teoria do ressalto elástico: 1) Situação inicial; 2) Atuação das forças tectónicas; 3) Rutura libertando parte das tensões acumuladas; 4) As rochas voltam parcialmente à forma inicial (Caldeira et al., 2005).....   | 6  |
| Figura 3 - Representação gráfica de um edifício de alvenaria sob a ação sísmica (Almeida, 2022). ....   | 7  |
| Figura 4 – Exemplo de danos típicos de alvenaria não reforçada sob excitação sísmica (Almeida, 2022).<br>.....  | 8  |
| Figura 5 – Comportamento dos edifícios de alvenaria à atividade sísmica: a) mecanismos locais (D’Ayala et al., 2003) e b) resposta global (Almeida, 2022).....  | 9  |
| Figura 6 - Exemplos de comportamento para fora do plano durante terremotos: a) rotação da fachada; b) derrubamento de partes da fachada; c) derrubamento parcial da fachada; d) derrubamento do cumhal (Almeida, 2022). ....  | 10 |
| Figura 7 - Comportamento no plano (Almeida, 2022). ....   | 11 |
| Figura 8 - Elementos principais de uma parede típica de alvenaria (Almeida, 2022).....  | 11 |
| Figura 9 - Mecanismos de falha de pilares de alvenaria: (a) Derrubamento; (b) Esmagamento; (c) Deslizamento; (d) Fendilhação diagonal (Almeida, 2022).....  | 12 |
| Figura 10 - Reforço com ancoragens (Solarino et al., 2019). ....  | 14 |
| Figura 11 - Aplicação do TRM (Estevan et al., 2023). ....   | 15 |
| Figura 12 - Exemplos de vidro granulado com a aerogel (à esquerda) e uma unidade de vidro monolítica com aerogel (à direita) (Lamy-Mendes et al., 2021).....  | 19 |
| Figura 13 - Constituição do painel de isolamento a vácuo (F. Silva, 2013). ....   | 19 |
| Figura 14 - Aplicação de um sistema de exosqueleto de aço para reabilitação sísmica integrada e eficiência energética de edifícios: a) estrutura externa para reforço sísmico; b) sistemas de fachada para eficiência energética e renovação estética (Ademovic et al., 2022). .... | 22 |
| Figura 15 - Intervenções no envelope existente (TRM + isolamento térmico) (Karlos et al., 2020). ....   | 23 |
| Figura 16 - Quadro 3.1 do EC8-1 (NP EN1998-3, 2017). ....   | 27 |
| Figura 17 - Classes de importância para os edifícios (NP EN1998-3, 2017).....   | 27 |
| Figura 18 - Forma do espectro de resposta elástico (NP EN1998-3, 2017).....   | 29 |
| Figura 19 - Quadro NA.I EC8-3 (NP EN1998-3, 2017).....  | 31 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 20 - Quadro 3.1 EC8-3 - Níveis de conhecimento e correspondentes métodos de análise (NP EN1998-3, 2017).....                                     | 32 |
| Figura 21 - Quadro D.5 do EC8 Parte 3: Coeficiente de reforço (NP EN1998-3, 2017).....  | 34 |
| Figura 22 – Definição da curva bilinear equivalente: a) de acordo com o EC8; b) de acordo com a norma italiana NTC 2018 (Lagomarsino et al., 2020)..... | 35 |
| Figura 23 - Discretização dos macroelementos no método FME (Almeida, 2022).....   | 37 |
| Figura 24 - Mecanismos de rotura das paredes de alvenaria (Almeida, 2022).....  | 37 |
| Figura 25 - Mecanismo de colapso global a) e <i>soft story</i> b) (Almeida, 2022). ....   | 38 |
| Figura 26 - Formulação tridimensional: a) nó 3D; b) divisão da massa fora do plano (Almeida, 2022).40   |    |
| Figura 27 - Relações força-deformação para nembos e linteis (Almeida, 2022). ....   | 40 |
| Figura 28 - Esquema do programa EnergyPlus (Esteves, 2021). ....  | 45 |
| Figura 29 - Ligação entre os programas descritos (Pinto, 2022). ....  | 46 |
| Figura 30 - Estrutura EnergyPlus (Pinto, 2022). ....  | 47 |
| Figura 31- Planta geral do edifício em estudo. ....   | 48 |
| Figura 32 - Vista em perspetiva do modelo numérico 3D. ....   | 50 |
| Figura 33 - Verificação vertical. ....  | 51 |
| Figura 34 - Evolução da massa modal direcional acumulada em função da frequência. ....  | 53 |
| Figura 35 - Primeiro modo de vibração: Planta e alçados das paredes PX1 e PX6. ....   | 54 |
| Figura 36 - Segundo modo de vibração: Planta e alçados das paredes PY1 e PY7.....   | 54 |
| Figura 37 - Terceiro modo de vibração: Planta e alçados PX1 e PX6. ....   | 55 |
| Figura 38 - Quinto modo de vibração: Planta e alçados das paredes PX1 e PX6.....  | 56 |
| Figura 39 - Oitavo modo de vibração: Planta e alçados das paredes PY1 e PY7. ....   | 57 |
| Figura 40 - Alteração da definição do deslocamento último (redução de 20% para 30% da força máxima).<br>.....   | 58 |
| Figura 41 - Curva de capacidade do caso de carga na direção X, sem excentricidade no sentido positivo.<br>.....   | 59 |
| Figura 42 - Distribuição de danos na parede PX1 para a força máxima: a) distribuição uniforme; b) modo fundamental (carga na direção +X). ....          | 59 |
| Figura 43 - Curva de capacidade do caso de carga na direção X, sem excentricidade no sentido negativo.<br>.....   | 60 |
| Figura 44 - Distribuição de danos na parede PX1 para a força máxima: a) distribuição uniforme; b) modo fundamental (carga na direção -X).....           | 60 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 45 - Curva de capacidade do caso de carga na direção Y, sem excentricidade no sentido positivo.<br>.....  | 61 |
| Figura 46 - Distribuição de danos na parede PY1 ara a força máxima: a) distribuição uniforme; b) modo fundamental (carga na direção +Y). .....   | 61 |
| Figura 47 - Curva de capacidade do caso de carga na direção Y, sem excentricidade no sentido negativo.<br>.....  | 62 |
| Figura 48 - Distribuição de danos na parede PY1 para a força máxima: a) distribuição uniforme; b) modo fundamental. Ambos para o caso de carga direção Y, sem excentricidade no sentido negativo. .... | 62 |
| Figura 49 - Espectro de resposta para Lisboa da ação sísmica Tipo 1. ....  | 63 |
| Figura 50 - Espectro de resposta para Lisboa da ação sísmica Tipo 2. ....  | 64 |
| Figura 51 - Curva de capacidade e curva bilinear. ....   | 65 |
| Figura 52 - Rácio capacidade/exigência do estado limite a NC na direção X. ....  | 68 |
| Figura 53 - Rácio capacidade/exigência do estado limite NC na direção Y. ....  | 69 |
| Figura 54 - Rácio capacidade/exigência do estado limite SD na direção X.....   | 69 |
| Figura 55 - Rácio capacidade/exigência do estado limite SD na direção Y.....   | 70 |
| Figura 56 - Rácio capacidade/exigência do estado limite DL na direção X.....   | 70 |
| Figura 57 - Rácio capacidade/exigência do estado limite DL na direção Y.....   | 71 |
| Figura 58 - Representação do modelo 3D no Sketchup 2022. ....  | 72 |
| Figura 59 – Temperatura mensal do ano 2016: média, mínimo e máximos absolutos (°C). ....   | 73 |
| Figura 60 - Consumo anual percentual do edifício. ....   | 76 |
| Figura 61 - Consumo mensal do edifício. ....   | 76 |
| Figura 62 - Temperatura interior da zona térmica 1 no dia 31 de janeiro. ....  | 77 |
| Figura 63 - Temperatura interior da zona térmica 1 no dia 16 de agosto. ....   | 77 |
| Figura 64 - Temperatura interior da zona térmica 4 no dia 31 de janeiro. ....  | 78 |
| Figura 65 - Temperatura interior da zona térmica 4 no dia 16 de agosto. ....   | 78 |
| Figura 66 - Gastos energéticos de aquecimento de 31 de janeiro. ....   | 78 |
| Figura 67 - Gastos energéticos de arrefecimento de 16 de agosto. ....  | 79 |
| Figura 68 - Características mecânicas das paredes reforçadas: a) Paredes na direção X; b) Paredes na direção Y.....  | 81 |
| Figura 69 - Comparação da evolução da massa modal antes e após o reforço na direção X. ....  | 82 |
| Figura 70 - Comparação da evolução da massa modal antes e após o reforço na direção Y. ....  | 82 |
| Figura 71 - Consumo anual percentual do edifício após reabilitação com cortiça.....  | 85 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 72 - Consumo mensal do edifício após reabilitação com cortiça. ....                       | 86  |
| Figura 73 - Comparação de gastos anuais.....   | 87  |
| Figura 74 - Planta do caso de estudo. ....   | 94  |
| Figura 75 - Nomenclatura das paredes. ....   | 95  |
| Figura 76 - Aplicação dos parâmetros do modelo. ....   | 96  |
| Figura 77 - Exemplo da definição de um material. ....  | 97  |
| Figura 78 - Modelação das paredes. ....  | 98  |
| Figura 79 - Modelação das janelas e portas.....  | 98  |
| Figura 80 - Modelação da laje. ....  | 99  |
| Figura 81 - Características das cargas presente na caixa de cargas nos pisos 1, 2 e 3.....       | 99  |
| Figura 82 - Definição da ação sísmica. ....  | 100 |
| Figura 83 - Parâmetros utilizados para a análise sísmica. ....                                   | 101 |
| Figura 84 - Introdução do ficheiro climático.....  | 102 |
| Figura 85 - Perfil de aquecimento durante a semana.....  | 102 |
| Figura 86 - Perfil de aquecimento durante o fim-de-semana. ....                                  | 103 |
| Figura 87 - Perfil de arrefecimento durante a semana. ....                                       | 103 |
| Figura 88 - Perfil de arrefecimento durante o fim-de-semana. ....                                | 104 |
| Figura 89 - Perfis de utilização dos equipamentos eletrónicos/infiltrações/renovações de ar..... | 104 |
| Figura 90 - Perfil do Uso da iluminação durante a semana. ....                                   | 105 |
| Figura 91 - Perfil do Uso da iluminação durante o fim-de-semana. ....                            | 105 |
| Figura 92 - Perfil de ocupação durante a semana.....   | 106 |
| Figura 93 - Perfil de ocupação durante o fim-de-semana. ....                                     | 106 |
| Figura 94 - Perfil de taxa metabólica. ....  | 107 |
| Figura 95 - Exemplo da adição de um novo material. ....  | 108 |
| Figura 96 - Exemplo da adição de uma carga térmica. ....   | 109 |
| Figura 97 - Designação de danos (Almeida, 2022). ....  | 110 |

## LISTA DE TABELAS

|   |    |
|---|----|
| Tabela 1 - Isolamentos térmicos de acordo com a sua natureza. ....                        | 18 |
| Tabela 2 - Tabela de Revisão Bibliográfica. ....  | 24 |
| Tabela 3 - Parâmetros característicos dos materiais. ....                                 | 39 |
| Tabela 4 - Modos de rotura por flexão. ....   | 41 |
| Tabela 5 - Modos de rotura por corte com deslizamento. ....                               | 41 |
| Tabela 6 - Modos de rotura por corte com fendilhação. ....                                | 41 |
| Tabela 7 - Propriedades mecânicas das paredes. ....                                       | 49 |
| Tabela 8 - Características mecânicas dos pavimentos. ....                                 | 49 |
| Tabela 9 - Cargas da estrutura. ....  | 50 |
| Tabela 10 - Cálculo da massa do edifício. ....  | 51 |
| Tabela 11 - Comparação da massa do modelo com a massa do edifício. ....                   | 52 |
| Tabela 12 - Características dos primeiros 10 modos de vibração. ....                      | 52 |
| Tabela 13 - Valores da ação de $a_g$ na região de Lisboa. ....                            | 63 |
| Tabela 14 - Resultados da avaliação para a ação sísmica Tipo 1. ....                      | 66 |
| Tabela 15 - Resultados da avaliação para a ação sísmica Tipo 2. ....                      | 67 |
| Tabela 16 - Definição dos perfis de ocupação. ....  | 74 |
| Tabela 17 - Definição das características térmicas dos materiais. ....                    | 74 |
| Tabela 18 - Características térmicas dos envidraçados. ....                               | 75 |
| Tabela 19 - Definição das cargas internas. ....   | 75 |
| Tabela 20 - Primeiros 10 modos da estrutura reforçada. ....                               | 81 |
| Tabela 21 - Resultados da avaliação sísmica após reforço para a ação sísmica tipo 1. .... | 83 |
| Tabela 22 - Resultados da avaliação sísmica após reforço para a ação sísmica tipo 2. .... | 84 |
| Tabela 23 - Características do material de reforço energético. ....                       | 85 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|                 |   |
|-----------------|---|
| BLAST           | <i>Building Loads Analysis System Thermodynamics</i>                      |
| CO <sub>2</sub> | Dióxido de carbono  |
| DL              | Limitação de Danos  |
| DOE-2           | <i>Department Of Energy</i>   |
| EC8             | Eurocódigo 8  |
| EPBD            | <i>Energy Performance of Buildings Directive</i>                          |
| EPS             | Poliestireno expandido  |
| EU              | União Europeia  |
| FME             | <i>Frame by Macro Elements</i>  |
| FRP             | <i>Fibre Reinforced Polymers</i>  |
| IPCC            | Painel Intergovernamental para as Mudanças Climáticas                     |
| KL1             | Nível de conhecimento 1   |
| KL2             | Nível de conhecimento 2   |
| KL3             | Nível de conhecimento 3   |
| MDOF            | Sistema de múltiplos graus de liberdade                                   |
| NC              | Colapso Iminente  |
| nZEB            | <i>nearly Zero Energy Building</i>  |
| RCCTE           | Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios    |
| RECCS           | Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços |
| REH             | Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação           |
| RNC2050         | Roteiro de Neutralidade Carbónica 2050                                    |
| RSECE           | Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em edifícios         |
| SCE             | Sistema de Certificação Energética dos Edifícios                          |
| SD              | Danos Severos   |
| SDOF            | Sistema de um grau de liberdade   |
| TRM             | <i>Textile reinforced mortars</i>   |
| URM             | Edifícios de alvenaria não reforçada                                      |
| VIP             | Painel de isolamento a vácuo  |

|         |                         |
|---------|-------------------------|
| XPS     | Poliestireno extrudido  |
| X, Y, Z | Coordenadas cartesianas |

## LISTA DE SÍMBOLOS

|           |   |                  |
|-----------|---|------------------|
| $b$       | Coeficiente de esbelteza  | -                |
| $c$       | Amortecimento da estrutura  | -                |
| $dm$      | Deslocamento máximo de um sistema com múltiplos graus de liberdade                              | $m$              |
| $dt$      | Deslocamento objetivo para um sistema com múltiplos graus de liberdade                          | $m$              |
| $E$       | Módulo de elasticidade  | $\frac{N}{mm^2}$ |
| $e$       | Espessura do elemento   | $m$              |
| $f_c$     | Resistência à compressão do elemento de alvenaria   | $\frac{kN}{m^2}$ |
| $f_{hu}$  | Resistência à compressão do elemento de alvenaria na direção horizontal do lintel               | $\frac{kN}{m^2}$ |
| $f_m$     | Resistência média à compressão  | $\frac{N}{mm^2}$ |
| $f_t$     | Resistência ao corte do elemento de alvenaria (coesão)  | $\frac{kN}{m^2}$ |
| $f_{vim}$ | Limite de resistência ao corte (valor sugerido 2,2 N/mm <sup>2</sup> ) (Mohr-Coulomb)           | $\frac{N}{mm^2}$ |
| $f_{vm0}$ | Resistência média ao corte sem esforço axial (Mohr-Coulomb)                                     | $\frac{N}{mm^2}$ |
| $G$       | Módulo de distorção   | $\frac{N}{mm^2}$ |
| $g$       | Aceleração da gravidade   | $\frac{m}{s^2}$  |
| $h$       | Altura do elemento  | $m$              |
| $H_p$     | Menor valor entre a força resistente à tração dos elementos acoplados ao lintel e $0,4f_{hu}ht$ | $m$              |
| $H'_p$    | Valor máximo entre o esforço axial (N) actante no macro elementos e $H_p$                       | $m$              |
| $i$       | Índice  | -                |
| $k$       | Rigidez do sistema com um grau de liberdade   | $\frac{kN}{m}$   |
| $l$       | Largura do elemento   | $m$              |
| $l'$      | Comprimento da secção comprimida  | $m$              |

|            |   |                  |
|------------|---|------------------|
| $m$        | Massa da estrutura  | $kg$             |
| $M_u$      | Momento fletor  | $kN \cdot m$     |
| $N$        | Esforço axial   | $N$              |
| $p$        | Força externa aplicada na estrutura   | $N$              |
| $S$        | Coefficiente do solo  | -                |
| $t$        | Tempo   | $s$              |
| $S_e(T)$   | Espetro de resposta   | -                |
| $V_u$      | Esforço transversal último  | $N$              |
| $\gamma_m$ | Coefficiente de segurança do material   | -                |
| $a_g$      | Valor de calculo da aceleração à superfície para um terreno tipo A                | $\frac{m}{s^2}$  |
| $\eta$     | Coefficiente de amortecimento dado por $\eta = \sqrt{\frac{10}{5+\xi}} \geq 0,55$ | -                |
| $\mu$      | Coefficiente de atrito  | -                |
| $\tau_o$   | Tensão de corte no elemento de alvenaria  | $\frac{kN}{m^2}$ |
| $T$        | Período de vibração de um sistema linear com um grau de liberdade (SDOF)          | $s$              |
| $T_B$      | Limite inferior do período no patamar de aceleração espectral constante           | $s$              |
| $T_C$      | Limite superior do período no patamar de aceleração espectral constante           | $s$              |
| $T_D$      | Valor que define no espectro o início do ramo do deslocamento constante           | $s$              |

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1 Motivação

A construção em alvenaria é uma das formas mais antigas e fundamentais de construção, sendo utilizada há milhares de anos numa grande variedade de edifícios, desde construções comuns até monumentos históricos. A alvenaria é um dos materiais de construção mais utilizados e confiáveis, tendo sido escolhida por muitos construtores devido à sua durabilidade, estabilidade e facilidade de uso.

As construções tradicionais de alvenaria revelam baixa resistência sísmica e mau comportamento energético o que torna essencial definir estratégias de reabilitação sísmica e energética. No caso particular do sul da Europa, os edifícios apresentam um elevado risco sísmico, tornando-se essencial realizar a reabilitação sísmica incorporando igualmente a reabilitação energética resolvendo o problema do mau comportamento térmico das estruturas de alvenaria.

Com isto em mente, a União Europeia apresentou novas diretivas (EPBDs) que requerem soluções amigas do ambiente com o objetivo de alcançar a neutralidade climática e sustentabilidade das soluções até 2050. As soluções de reabilitação comuns são incapazes de resolver o problema, pois baseiam-se em técnicas tradicionais e materiais não amigos do ambiente.

Antes de ser possível definir uma solução adequada, é necessário estabelecer os requisitos que devem ser satisfeitos. Tanto a eficiência energética como a segurança sísmica são questões decisivas e exigentes apresentadas para os edifícios europeus. Na (Diretiva 2010/31/UE, 2018) é exigido que o conforto térmico e o uso económico de energia sejam condições essenciais para um edifício, onde a sua importância não se limita apenas ao bem-estar dos habitantes, mas também à redução de custos e do seu impacto ambiental. Especialmente os edifícios antigos, são responsáveis por uma grande quantidade de gastos de energia e emissões de carbono na Europa, o que torna essencial encontrar soluções para melhorar o seu desempenho. Isto resultaria na redução desses efeitos, bem como uma redução no custo com a implementação desta solução (Ademovic et al., 2022).

Além disso, a segurança sísmica das construções existentes é uma questão fundamental a ser garantida para a preservação do património e segurança das pessoas. Grande parte dos países europeus está em áreas propensas a sismos, e sismos recentes mostraram a vulnerabilidade dos edifícios existentes. Apesar de que as técnicas de reforço sísmico sejam já adotadas, estas intervenções não são feitas de forma a considerar as vantagens de uma coordenação mais próxima com a melhoria do

comportamento térmico. Se esta coordenação for considerada, pode daí resultar numa maior eficiência e menores custos na renovação, permitindo uma redução no período de retorno do investimento (Menna et al., 2022).

Indicadores para avaliar a eficácia de uma estratégia e estabelecer as soluções mais apropriadas devem ser definidos tendo em conta cada caso. As metas de desempenho precisam de ser estabelecidas para cada aspeto da renovação, nomeadamente para as partes de energia e sísmica, bem como para os custos e a viabilidade técnica da abordagem. A maioria dessas metas advém das regulamentações atuais, tanto nacionais quanto europeias. Vale a pena mencionar que a renovação de edifícios comuns pode não ser a única ou melhor opção do ponto de vista económico ou de desempenho. Quando as condições de um edifício são muito precárias, seja do ponto de vista energético, sísmico ou de ambos, a renovação pode não representar uma escolha válida, e a demolição parcial ou total, com subsequente reconstrução, pode resultar em maiores benefícios e vantagens (Ademovic et al., 2022).

## 1.2 Objetivos

O objetivo desta dissertação engloba a análise sísmica e energética de um caso de estudo utilizando *softwares* específicos para a modelação numérica dos mesmos. De seguida é realizada uma reabilitação integrada sísmica e energéticas com o objetivo de avaliar as melhorias do caso de estudo, através de uma nova simulação.

Para completar estes objetivos, as tarefas principais do presente trabalho são:

- Revisão bibliográfica crítica sobre o desempenho sísmico e energético dos edifícios, com foco nas soluções de reforço integrado;
- Estudo da legislação atual sobre a verificação sísmica e desempenho energético, bem como dos softwares utilizados;
- Utilização dos softwares 3MURI e EnergyPlus, para a obtenção de resultados sísmicos e energéticos de um caso de estudo;
- Apresentação de uma solução de reforço integrado.

## 1.3 Estrutura da dissertação

O presente documento é estruturado em 7 capítulos e 5 anexos. No primeiro capítulo, é introduzido o trabalho desenvolvido e motivação, abrangendo as tarefas e estrutura da dissertação. No

segundo capítulo é feita uma síntese do estado de conhecimento sobre o comportamento das estruturas de alvenaria sob ação sísmica, tipos de reforço sísmicos, seguido de um enquadramento energético no que toca à indústria da construção e diversas técnicas de reforço energético, e por fim uma pequena introdução ao reforço integrado.

No capítulo 3 são discutidos os aspetos regulamentares da avaliação sísmica nas estruturas de alvenaria e uma análise do software utilizado para esta avaliação. No capítulo 4, é efetuada a análise dos aspetos regulamentares energéticos e, como no capítulo anterior, uma análise ao software utilizado.

No capítulo 5 é apresentado o caso de estudo, tendo em conta a sua localização, geometria, os materiais e as suas características sísmicas e energéticas, onde de seguida, é efetuada uma análise numérica, sísmica e energética. No capítulo 6 é discutido o reforço utilizado e efetuadas novamente a análise sísmica e energética da estrutura após o reforço. Por último, no capítulo 7, são apresentadas as considerações finais e as propostas de trabalhos futuros.

## **2. ESTADO DA ARTE**

### **2.1 Construção em alvenaria**

Em torno do globo, em diversas áreas urbanas é comum encontrar construções predominantemente feitas com alvenaria não reforçada, especialmente em edifícios históricos notáveis que se tornaram ícones culturais, e em edifícios residenciais típicos dos centros de muitas cidades.

Em termos simples, a alvenaria é um material construtivo que é constituído por blocos de pedra, tijolos argilosos, adobe, entre outros, que são unidos através de juntas - podendo ou não ser preenchidas com argamassa - para formar uma estrutura resistente e estável. Basicamente, é uma mistura de diferentes materiais que se unem para criar uma estrutura sólida.

Para avaliar a resistência sísmica das estruturas de alvenaria, é importante entender como a alvenaria funciona. As propriedades mecânicas da alvenaria são influenciadas pelos materiais usados e pelas dimensões, formas e disposição das unidades. A baixa resistência à tração é uma característica comum da alvenaria. No que diz respeito à estrutura utilizada, uma distinção é feita entre edifícios de alvenaria dimensionados às diversas ações (incluindo a ação sísmica) e aqueles que não passaram por esse dimensionamento adequado. Assim, os edifícios de alvenaria dimensionados, foram concebidos para resistir a cargas sísmicas.

Ao considerar-se os sismos ocorridos no passado, os edifícios construídos com alvenaria, especialmente quando os elementos estruturais (paredes e pavimentos) não estão devidamente interligados, têm sido identificados como altamente suscetíveis a danos durante eventos sísmicos. Um grande número de edifícios de alvenaria expostos a movimentos sísmicos resultam em perdas significativas, tanto em termos humanos quanto materiais, devido à insuficiência de resistência mecânica da estrutura. Normalmente, os edifícios de alvenaria são capazes de sustentar as cargas verticais de maneira segura e estável. No entanto, estes podem exibir um mau desempenho face às cargas sísmicas, o que coloca uma grande parte do património arquitetónico em risco devido a essa ameaça. Infelizmente, em diversas regiões da Europa, há áreas identificadas com um alto grau de perigosidade sísmica. Nessas localidades, a vulnerabilidade das estruturas antigas de alvenaria é frequentemente considerável. O crescente entendimento sobre a importância de preservar prédios históricos como forma de protegê-los para as gerações vindouras destaca a urgência de estudar e avaliar os edifícios de alvenaria (Araújo, 2014).

Além das características estruturais, devido à elevada quantidade de energia consumida por edifícios antigos e o seu impacto ambiental, é necessária avaliação da necessidade de uma intervenção energética. A alvenaria possui características únicas que influenciam suas propriedades térmicas, como a massa térmica elevada e a baixa condutividade térmica dos materiais usados na sua construção. Essas características podem resultar em um ambiente interno mais estável, reduzindo a variação de temperatura e humidade. No entanto, também podem dificultar a climatização dos espaços, tornando o edifício mais suscetível a problemas de humidade e condensação. A compreensão das características térmicas dos edifícios de alvenaria é essencial para otimizar o desempenho energético e garantir a habitabilidade e durabilidade dessas estruturas.

## 2.2 Desempenho Sísmico

### 2.2.1 Ação sísmica

Segundo o modelo presente na Figura 1, a Terra é constituída por 4 camadas: crosta, manto, núcleo externo e núcleo interno. A primeira camada está dividida em diferentes placas, ou seja, as placas tectónicas. O manto é o principal responsável pelo movimento das placas tectónicas, e encontra-se num estado semi-viscoso e a uma temperatura elevada. Por fim, o núcleo externo está no estado líquido enquanto o núcleo interno se encontra no estado sólido.

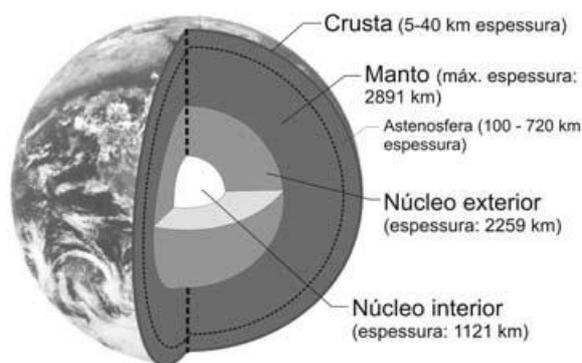


Figura 1 - Modelo simplificado da estrutura da Terra (Caldeira et al., 2005).

À superfície terrestre, apesar de aparentemente estável, é usual o acontecimento de fenómenos sísmicos. Este, de todos os eventos naturais, é considerado o mais severo que o Homem enfrenta desde sempre. A teoria física que explica o fenómeno sísmico denomina-se por teoria do ressalto elástico, que está diretamente ligada às falhas.

Esta teoria, representada na Figura 2, explica que as rochas (meio elástico) deformam-se quando são sujeitas a ações de forças, acumulando energia e aumentam o seu estado de tensão. Como estas ações agem de forma continuada, a partir de certo momento as tensões acumuladas igualam a resistência da rocha, acontecendo a sua rutura, ou seja, um deslocamento relativo brusco das partes que se desprendem, onde grande parte da energia é libertada, e os materiais deformados recuperam parte da sua forma inicial (Caldeira et al., 2005).

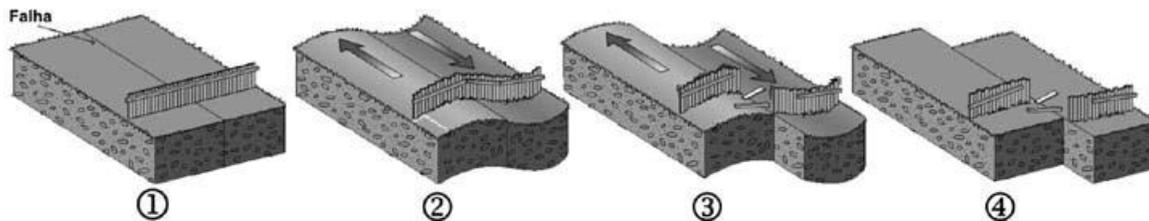


Figura 2 – Teoria do ressalto elástico: 1) Situação inicial; 2) Atuação das forças tectónicas; 3) Rutura libertando parte das tensões acumuladas; 4) As rochas voltam parcialmente à forma inicial (Caldeira et al., 2005).

Uma consequência direta do rápido deslocamento relativo ao longo da falha onde ocorre no processo de rutura, é a formação de ondas sísmicas. Estas ondas sísmicas podem ser de dois tipos: de corpo e de superfície. Dentro das ondas sísmicas de corpo, tem-se as ondas p e s, sendo aquelas as mais rápidas. Relativamente às ondas de superfície, têm-se as ondas Reyleigh e as ondas Love, sendo que as ondas Reyleigh são geradas com a interação das ondas p e s com a superfície. Em relação às ondas Love, estas consistem em ondas de corte no plano horizontal, análogas a uma onda s que se desloca horizontalmente.

Os sismos são avaliados através de duas escalas diferentes. As mais conhecidas são a Escala de Mercalli Modificada, que é uma escala de avaliação qualitativa (mede o efeito do sismo), e a Escala de Richter, que é quantitativa (mede a magnitude do sismo).

É também importante compreender os conceitos de perigosidade sísmica, vulnerabilidade sísmica, exposição de ativos e risco sísmico. A perigosidade sísmica refere-se à probabilidade da ocorrência de um sismo, a vulnerabilidade sísmica mede o grau de danos estruturais causados por um sismo, a exposição de ativos diz respeito à presença de edifícios e construções numa determinada área, e o risco sísmico está relacionado com as perdas económicas e perdas de vidas humanas (Almeida, 2022).

Para a análise da ação sísmica, a aceleração do solo varia irregularmente, o não permite ter uma solução analítica para a equação do movimento, sendo assim necessário utilizar métodos de integração numérica. Estes métodos permitem calcular a resposta para instantes temporais  $t$  ( $t_1, t_2, t_3, \dots, t_n$ ). Assim, a equação do equilíbrio dinâmico apresenta-se na equação (1) (Orlando, 2011):

$$m \cdot \ddot{u}_i + c \cdot \dot{u}_i + k \cdot u_i = p_i \quad (1)$$

Onde:

$t$  – Tempo;

$i$  – Índice;

$m$  – Massa da estrutura;

$\ddot{u}$  – Aceleração da estrutura;

$c$  – Amortecimento da estrutura;

$\dot{u}$  – Velocidade da estrutura;

$k$  – Rigidez do sistema com um grau de liberdade;

$u$  – Deslocamento ao nível do piso;

$p$  – Força externa aplicada na estrutura.

Em relação aos métodos lineares elásticos, os mais utilizados são a análise por espectros de resposta e análise da resposta temporal. Por sua vez, os métodos de análise estática não linear são usualmente mais utilizados para a avaliação da capacidade sísmica das estruturas.

### 2.2.2 Comportamento dos edifícios de alvenaria à ação sísmica

Normalmente, as estruturas de alvenaria possuem várias paredes dispostas em planos ortogonais, juntamente com diafragmas de pavimentos flexíveis. A quando da atuação da ação sísmica, considera-se que a direção do movimento do solo coincide com uma das direções principais do edifício. Assim, na Figura 3 é feita uma representação gráfica de como os elementos estruturais dos edifícios de alvenaria se encontram sob ação sísmica.

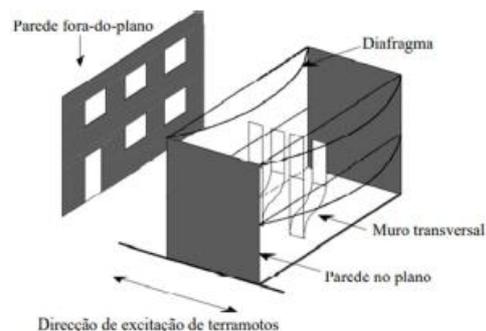


Figura 3 - Representação gráfica de um edifício de alvenaria sob a ação sísmica (Almeida, 2022).

Num edifício de alvenaria, a resposta sísmica é caracterizada pelas interações das paredes, tanto interiores como exteriores, e também pelos diafragmas. Com as observações efetuadas após a ocorrência de sismos foi possível descrever como os edifícios de alvenaria se comportam quando sujeitos à ação sísmica. A Figura 4 ilustra os tipos de danos nas paredes do edifício após a atuação de um sismo. Estes tipos de danos incluem: fissuras nos cantos e nas interseções das paredes (ligações insuficientes); fissuras diagonais nas paredes internas; flexão fora do plano (falta de ligação entre as paredes e os pisos), entre outros. Com base nestes tipos de danos, os edifícios de alvenaria sob a ação sísmica têm dois tipos de mecanismos fundamentais de colapso, ou seja, colapso para fora do plano e colapso no plano (Araújo, 2014).

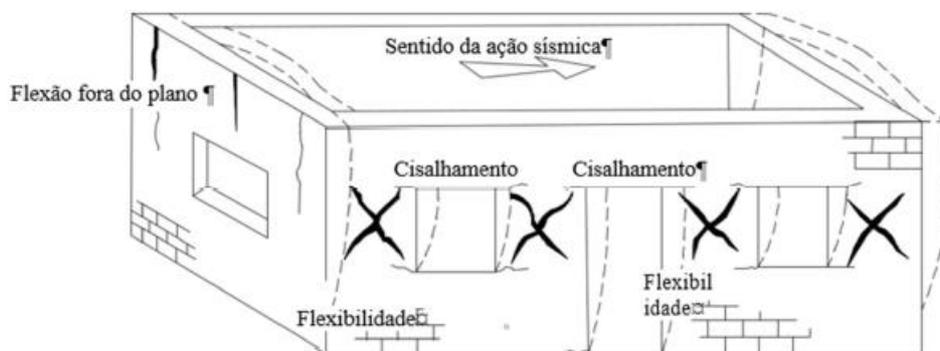


Figura 4 – Exemplo de danos típicos de alvenaria não reforçada sob excitação sísmica (Almeida, 2022).

Uma das características dos edifícios de alvenaria é ter uma elevada resistência a ações no plano, mas pouca resistência a ações fora do plano. Este comportamento está associado aos mecanismos locais, ou seja, o colapso de elementos estruturais que não estão adequadamente ligados ao restante edifício, como se pode observar na Figura 5. Por outro lado, a resposta no plano está relacionada com o desenvolvimento de um comportamento global que é influenciado pela capacidade das paredes na direção do plano e pela rigidez dos pavimentos horizontais. Desta forma, a resposta estrutural dos edifícios construídos com alvenaria tradicional durante um evento sísmico baseia-se na sua capacidade de redistribuir as forças horizontais por meio de elementos verticais. Isso permite explorar ao máximo a capacidade de resistência das paredes no seu plano e previne a ativação de mecanismos que ocorrem fora desse plano (Araújo, 2014).

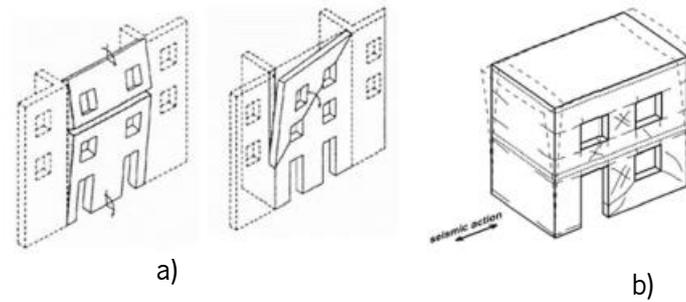


Figura 5 – Comportamento dos edifícios de alvenaria à atividade sísmica: a) mecanismos locais (D'Ayala et al., 2003) e b) resposta global (Almeida, 2022).

A maneira como cada parede se comporta fora do seu plano é bastante influenciada pelo tipo de ligação com as outras paredes e pela sua resistência. Quando há conexões entre paredes perpendiculares e a flexibilidade dos pavimentos está integrada com as paredes de alvenaria., isso resulta num comportamento similar a uma estrutura em forma de caixa. No entanto, se esse comportamento tipo caixa não for garantido a nível global, as paredes tornam-se suscetíveis a colapsos para fora do plano. Isso destaca-se como uma das principais causas de dano ou colapso resultantes da atividade sísmica. Estes mecanismos geralmente são desencadeados por forças de inércia que atuam perpendicularmente ao plano das paredes.

### 2.2.3 Comportamento para fora do plano

O comportamento de paredes de alvenaria fora do plano é considerado o maior risco para a segurança estrutural em edifícios de alvenaria. Isso ocorre porque a resposta da parede de alvenaria a cargas horizontais perpendiculares ao seu plano é geralmente deficiente. O comportamento fora do plano é um desafio exigente para a estrutura de alvenaria, que tem uma resistência limitada à tração, o que significa que a resistência à força de corte e à flexão é geralmente menor do que a resistência à compressão. Além disso, as paredes de alvenaria são relativamente rígidas e não têm capacidade significativa de deformação, o que significa que o deslocamento horizontal da estrutura pode levar a falhas catastróficas. Portanto, é crucial que as paredes de alvenaria sejam adequadamente projetadas ou reforçadas para evitar o colapso em caso de sismo. Para prevenir a falha para fora do plano das paredes de alvenaria, é essencial estabelecer uma ligação efetiva entre as paredes e os pavimentos, juntamente com uma ligação eficiente entre paredes. O comportamento fora do plano é geralmente localizado e pode ser evitado com uma análise estrutural cuidadosa e um projeto adequado. Na Figura 6 é possível observar diversos comportamentos para fora do plano durante um sismo.

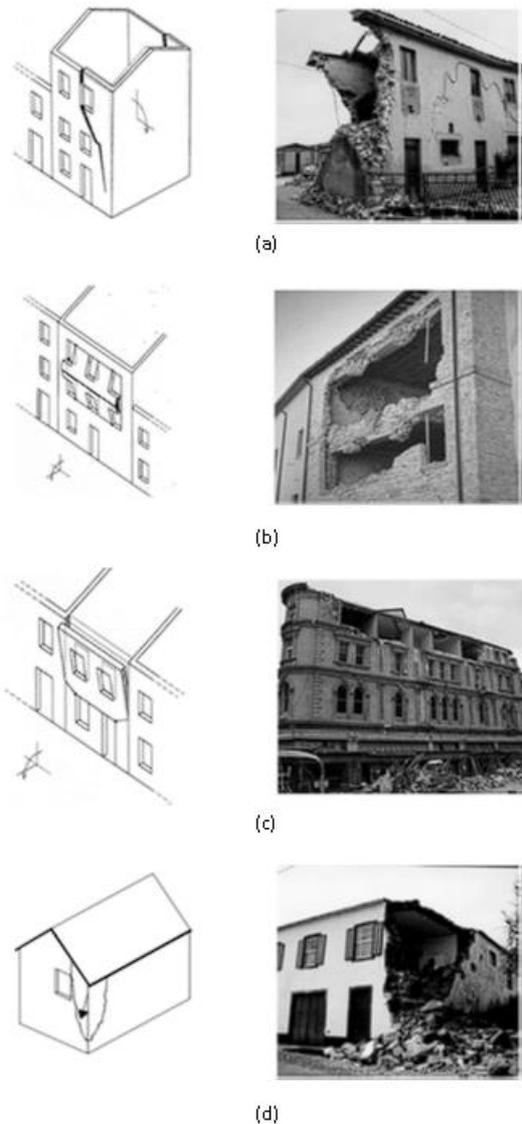


Figura 6 - Exemplos de comportamento para fora do plano durante terremotos: a) rotação da fachada; b) derrubamento de partes da fachada; c) derrubamento parcial da fachada; d) derrubamento do cunhal (Almeida, 2022).

#### 2.2.4 Comportamento no plano

O comportamento das paredes de alvenaria no seu plano é o objetivo desejado em termos de resposta sísmica. Isso é alcançado quando há uma resposta global eficaz, evitando o comportamento fora do plano por meio de ligações apropriadas entre os elementos estruturais. Logo, quando as ligações são adequadamente reforçadas para prevenir mecanismos de falha localizados, é viável alcançar um comportamento global (Almeida, 2022). Na Figura 7, é possível se observar o comportamento no plano dos edifícios de alvenaria.

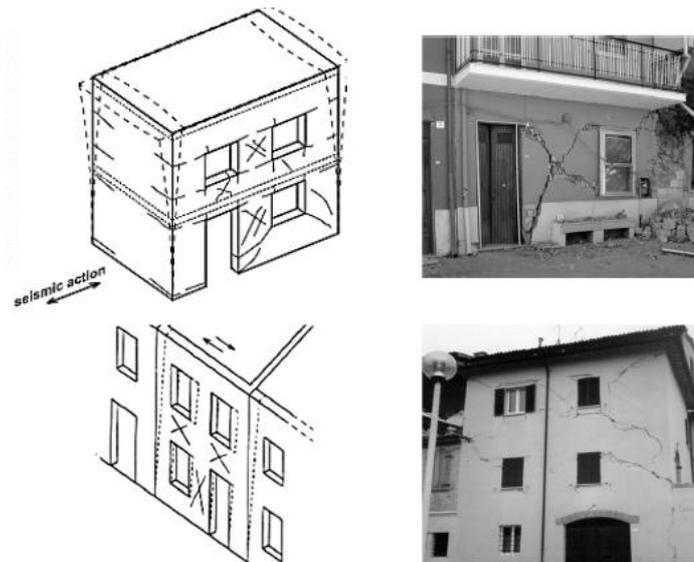


Figura 7 - Comportamento no plano (Almeida, 2022).

Os métodos atualmente disponíveis para avaliar o desempenho sísmico de edifícios de alvenaria são fundamentados na análise da resposta das paredes estruturais no plano, e essas abordagens são amplamente reconhecidas e empregadas. Nos edifícios de alvenaria com aberturas existem dois elementos principais, os nembos, as paredes entre as aberturas, e os lintéis que são as partes superiores e inferiores das aberturas, tal como demonstra a Figura 8. Os nembos são os elementos verticais que suportam as cargas sísmicas. Geralmente, as falhas no plano ocorrem principalmente em apenas um desses elementos (Araújo, 2014).

O comportamento no plano é identificado por quatro tipos de mecanismos. Dois estão associados à flexão, denominados derrubamento e esmagamento, enquanto os outros dois dizem respeito ao corte, sendo o deslizamento e a fendilhação diagonal, representados na Figura 9.

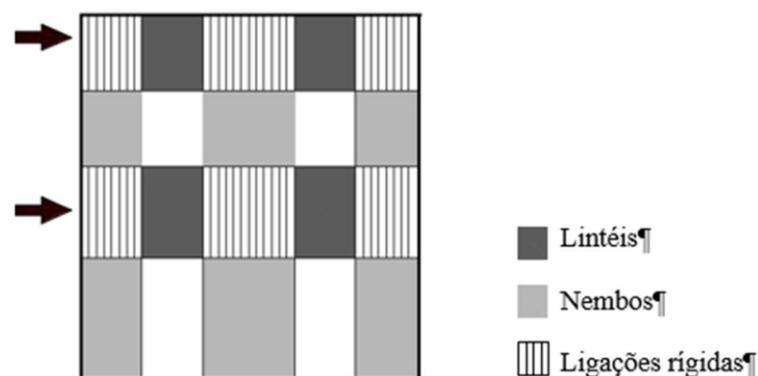


Figura 8 - Elementos principais de uma parede típica de alvenaria (Almeida, 2022).

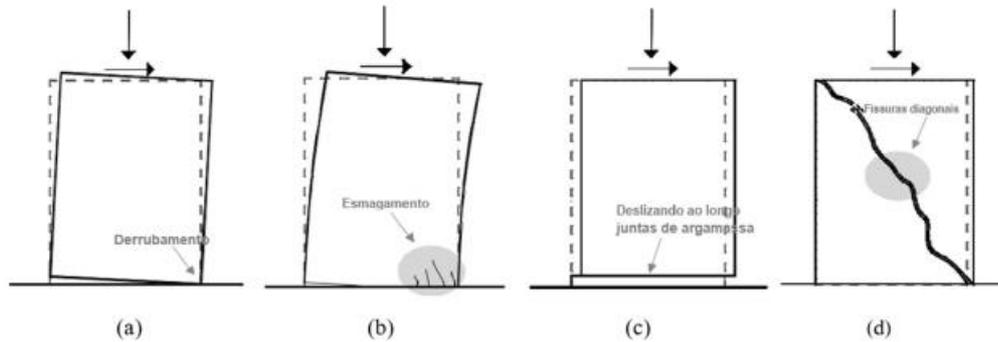


Figura 9 - Mecanismos de falha de pilares de alvenaria: (a) Derrubamento; (b) Esmagamento; (c) Deslizamento; (d) Fendilhação diagonal (Almeida, 2022).

Quando a parede exibe um comportamento quase rígido e gira em torno de sua extremidade, isso geralmente ocorre quando a carga vertical é relativamente baixa em comparação com a capacidade de resistência à compressão. Este fenómeno é conhecido como derrubamento. Por outro lado, o esmagamento está relacionado com a rotura da alvenaria devido à força de compressão. Este tipo de falha geralmente acontece quando uma carga vertical significativa é aplicada e a carga horizontal provoca o aparecimento de fissuras sub-verticais progressivas. A falha por deslizamento ocorre quando a parede se deforma ao escorregar ao longo de uma superfície horizontal. Já a fendilhação diagonal surge devido à formação de fendas diagonais que geralmente começam no centro da parede e se propagam em direção às extremidades. Isso acontece principalmente nas interfaces entre as unidades de alvenaria e a argamassa, já que essa é frequentemente a área mais vulnerável. As fissuras nas juntas de argamassa são influenciadas pela resistência relativa entre a argamassa e as próprias unidades de alvenaria. Em relação às paredes, elas cedem no modo de rotura que possui a menor capacidade resistente, sendo isso influenciado pelo estado de tensão, pela geometria da parede, condições de contorno e pelas propriedades mecânicas da alvenaria (Almeida, 2022; Araújo, 2014).

A vasta quantidade de diferentes combinações que surgem devido à geometria, às propriedades mecânicas da alvenaria, ao estado de tensão e às condições de contorno, representa um desafio quando se trata de caracterizar paredes construídas com alvenaria. A análise numérica pode ser vista como um apoio aos testes experimentais, tornando possível avaliar o comportamento no plano das paredes de alvenaria, ao realizar análises paramétricas, sem a obrigação de realizar um extenso trabalho experimental (Araújo, 2014).

## 2.3 Tecnologias de reabilitação sísmica

Ao longo do tempo, muitas das construções efetuadas foram projetadas sem a consideração da ação sísmica, o que pode resultar num comportamento inadequado da estrutura. Assim, a reabilitação sísmica pode ser conseguida através da implementação de uma ou várias estratégias de intervenção a nível local ou global dos edifícios (Piedade, 2013).

Neste contexto, existem várias soluções para a reabilitação sísmica de edifícios, tais como: ligação de parede com diafragma horizontal; ligação entre paredes adjacentes; amarração e ancoragens; injeção; melhoria do diafragma horizontal no seu plano; reforço das paredes com compósitos com matriz inorgânica (ex: TRM), entre outros.

### 2.3.1 Ancoragens

Para garantir o comportamento integral de um edifício e reduzir a altura efetiva das paredes, as paredes paralelas devem ser adequadamente ligadas. Além disso, devem ser realizadas ligações apropriadas entre paredes e pavimentos ou paredes e coberturas. Neste caso, ancoragens, fixadas à superfície das paredes externas com placas ou barras de ancoragem de aço, e/ou vigas de coroamento contínuas ao longo das paredes longitudinais. A eficácia desta técnica depende essencialmente da qualidade da instalação, dos materiais e dos detalhes.

Em geral, as vigas de coroamento de alvenaria armada representam uma solução muito eficaz para o reforço estrutural, sendo capazes de melhorar a ligação entre paredes ortogonais e criar uma ligação contínua entre o telhado e as paredes. Estas têm sido adotadas em edifícios históricos de alvenaria como uma melhoria em relação às vigas de coroamento de betão armado. As vigas de coroamento de alvenaria armada são compostas por alvenaria de boa qualidade (geralmente tijolos maciços) combinada com aço ou compósitos, ligados entre si. Os elementos que suportam o telhado devem ser adequadamente ancorados aos tijolos usando barras de aço, parafusos e injeções.

Por outro lado, as ancoragens, ver Figura 10, geralmente são colocadas nos níveis dos pavimentos e, sempre que possível, de maneira simétrica em ambos os lados da parede. Estas devem ser projetadas adequadamente para resistir à ação sísmica, seguindo os princípios hierárquicos de resistência, conforme também estabelecido nas normas atuais. Material de má qualidade adjacente à placa de ancoragem de aço pode causar o esmagamento da alvenaria, tornando a intervenção ineficaz. A instalação de ancoragens é relativamente fácil e rápida, e foi comprovadamente eficaz em edifícios do

Reforço integrado sísmico e energético de edifícios de alvenaria: modelação numérica da resposta

património cultural afetados por terremotos de magnitude média ou alta, especialmente quando comparada a construções não reforçadas.

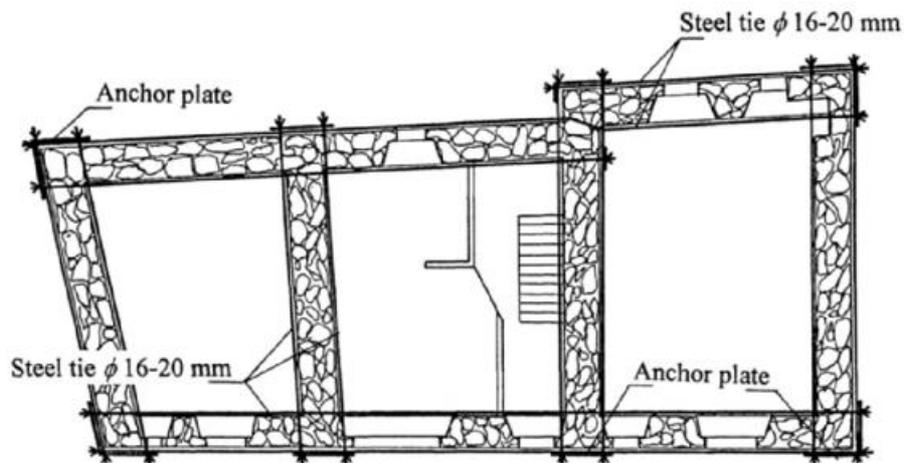


Figura 10 - Reforço com ancoragens (Solarino et al., 2019).

### 2.3.2 Melhoria de diafragma horizontal no plano

O papel principal de pisos e coberturas é suportar cargas verticais, mas durante a ocorrência de um evento sísmico, eles são responsáveis por transferir as forças sísmicas para as paredes e evitar possíveis mecanismos locais fora do plano. Deve-se notar que os mecanismos fora do plano são caracterizados por deformações admissíveis relativamente altas, portanto, nem sempre é necessária uma rigidez muito alta no plano, e a preocupação é que os pisos sejam suficientemente rígidos para distribuir a carga sísmica.

Os pavimentos dos edifícios históricos de alvenaria são geralmente de madeira, podendo ser um sistema de armação de madeira de uma ou duas direções, sobreposto por tábuas de madeira. A técnica de reforço recomendada é sobrepor uma segunda camada de tábuas de madeira, painéis, chapas de aço ou bandas de materiais compósitos sobre a existente (perpendicular ou diagonal a ela) através de pregos ou fixadores parafusados.

### 2.3.3 Compósitos com matriz inorgânica – TRM

Nos últimos anos, os compósitos reforçados com têxteis (TRM) têm sido explorados como sistemas de reforço externo para estruturas de alvenaria. Este é composto por uma matriz inorgânica (argamassa) e têxteis feitos de fibras contínuas organizadas como malhas abertas ou cordas. Estas fibras podem ser de aço, vidro, basalto, carbono, entre outros. A argamassa é responsável por proteger e

envolver as fibras de reforço, bem como por transferir as tensões entre o substrato e as fibras. A principal função do tecido é fornecer resistência à tração ao sistema, pois as tensões são transmitidas por coesão e atrito ao longo da interface entre a argamassa e as fibras (Kouris & Triantafillou, 2019).

Para a aplicação do TRM (Figura 11) primeiramente a superfície das paredes é preparada, removendo a argamassa existente e detritos; em seguida, é aplicada uma camada de argamassa na superfície e, em seguida, a malha aberta ou cordas são incorporadas, e, por fim, é aplicada a segunda camada de argamassa. Esse procedimento é repetido quando mais de uma camada de TRM é necessária.

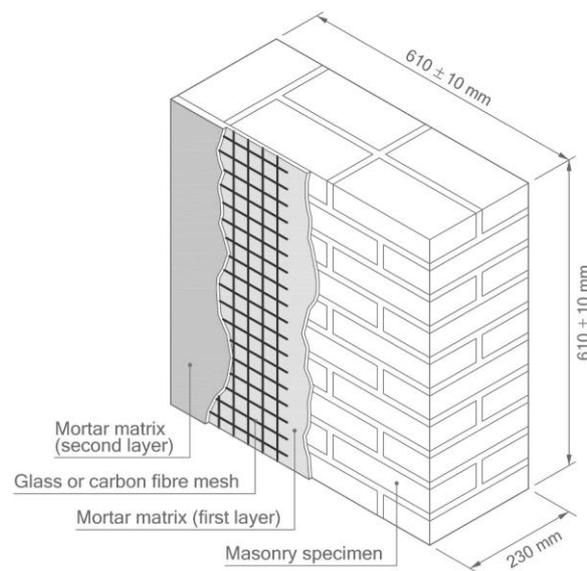


Figura 11 - Aplicação do TRM (Estevan et al., 2023).

## 2.4 Consumo energético

A União Europeia (EU) está a enfrentar grandes desafios decorrentes da crescente dependência das importações de energia, da escassez de recursos energéticos e da necessidade de combater as alterações climáticas, bem como de superar a crise económica. A eficiência energética é uma estratégia importante para abordar esses desafios, pois contribui para fortalecer a segurança no fornecimento de energia, reduzir o consumo de recursos energéticos e diminuir a dependência de importações de energia. Além disso, a eficiência energética contribui para reduzir as emissões de gases com efeito de estufa, de forma eficaz em termos de custos, ajudando a atenuar as alterações climáticas.

A transição para uma economia mais eficiente em termos energéticos irá acelerar a disseminação de soluções tecnologicamente inovadoras e melhorar a competitividade da indústria na

União Europeia, impulsionando o crescimento económico e a criação de empregos em vários setores relacionados com a eficiência energética.

No contexto dos edifícios, estes representam 40% do consumo de energia total na EU. Aproximadamente metade da energia consumida na União Europeia destina-se a aquecimento e arrefecimento, sendo que cerca de 80% desse consumo ocorre em edifícios. Este consumo excessivo de energia nos edifícios é responsável por aproximadamente 36% de todas as emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) na União Europeia. Neste contexto, uma das grandes preocupações é a pobreza energética. Esta nunca é caracterizada pela insuficiência de manter o consumo de energia para as necessidades básicas, mas sim pela falta de escolha no acesso a serviços de energia adequados, acessíveis, confiáveis, de alta qualidade, seguros e ambientalmente benignos para sustentar o desenvolvimento económico e humano.

A definição de pobreza energética enfatiza a ideia de atender às exigências por "serviços de energia". O objetivo não é apenas o consumo de energia, mas sim a prestação de serviços de energia a partir de diversas fontes de energia. Fontes primárias de energia (como carvão, petróleo, gás, biomassa, etc.) são processadas e a energia é armazenada e distribuída por meio de diferentes formas de energia (como calor, eletricidade e combustíveis sólidos, líquidos ou gasosos) para fornecer os diversos serviços de energia necessários, como cozimento, aquecimento, arrefecimento, iluminação, transporte, trabalho e acesso a tecnologias de informação e comunicação (conectividade). Embora as fontes de energia primárias e os vetores de energia possam variar de acordo com a localização geográfica e a política energética de um país, os serviços de energia procurados são muito semelhantes em todo o mundo. Normalmente, países mais ricos têm acesso a várias fontes de energia, enquanto em países mais pobres, especialmente em áreas rurais, as alternativas podem ser limitadas ou inexistentes. Em geral, a madeira é a fonte de energia primária mais amplamente utilizada em países mais pobres.

Por último, as tecnologias têm de ser acessíveis e confiáveis para toda a população comparadas às alternativas disponíveis. Em geral, à medida que os níveis de renda média das famílias aumentam, fontes de energia como biomassa tendem a ser substituídas por fontes como querosene, óleo e, por fim, eletricidade, que é o vetor de energia mais limpo e versátil de todos. Isso é conhecido como a teoria da "escada energética", e ela postula que combustíveis de baixa qualidade são substituídos por combustíveis de maior qualidade e mais versáteis à medida que o rendimento aumenta (González-Eguino, 2015).

## 2.5 Tecnologias de reabilitação térmica

Como referido, o setor de construção na Europa é responsável por consumir cerca de 40% da energia final, enquanto em Portugal esse número é de cerca de 30% e, com base nas novas diretivas, torna-se indispensável desenvolver e utilizar tecnologias de reabilitação térmica. Ao longo dos anos têm surgido várias soluções para reabilitação térmica tais como: uso de isolantes térmicos; sistemas de sombreamento; uso de energias renováveis. Nos subcapítulos seguintes apresenta-se uma breve descrição de algumas técnicas de reabilitação que podem ser utilizadas.

### 2.5.1 Isolamento térmico

Uma das abordagens mais comuns para melhorar a eficiência térmica é o isolamento térmico, que visa diminuir a transferência de calor entre o interior e o exterior de um edifício. Essa técnica contribui para aprimorar a eficiência energética do edifício e proporcionar maior conforto térmico aos seus ocupantes. Esta técnica consiste em aplicar materiais com baixa condutividade térmica. O isolamento térmico pode ser realizado tanto em edifícios novos quanto em edifícios existentes, através de diversas tecnologias, como a aplicação de placas, painéis ou espumas isolantes, o enchimento de cavidades com materiais isolantes, entre outros. Além disso, a reabilitação térmica também pode envolver a substituição de janelas, portas e sistemas de aquecimento. Este pode ser aplicado de três formas.

- Pelo exterior do edifício, normalmente a mais utilizada;
- Pelo interior não sendo a melhor opção;
- Pela caixa de ar de paredes duplas, onde é por injeção na caixa de ar.

Os materiais utilizados para o isolamento térmico, classificando de acordo com a sua natureza, podem ser classificados como materiais de natureza mineral, sintética, vegetal e animal, Tabela 1. Assim apresenta-se alguns dos isolantes térmicos mais utilizados e função da sua natureza (F. Silva, 2013):

Tabela 1 - Isolamentos térmicos de acordo com a sua natureza.

| <b>Natureza Mineral</b> | <b>Natureza Sintética</b>    | <b>Natureza Vegetal</b> | <b>Natureza Animal</b> |
|-------------------------|------------------------------|-------------------------|------------------------|
| Lã de rocha             | Poliestireno expandido (EPS) | Lã de madeira           | Lã de ovelha           |
| Vidro celular           | Poliestireno extrudido (XPS) | Cortiça                 | Penas de pato          |
| Perlite                 | Poliuretano                  | Lã de Linho             | -                      |

### 2.5.2 Isolantes térmicos Inovadores

Com os padrões e normas de eficiência energética a tornar-se cada vez mais exigentes, o uso do isolamento tradicional implica camadas mais espessas de isolamento. Na reabilitação existe uma preocupação no uso de isolamento térmico com espessuras reduzidas, de modo a limitar as alterações introduzidas. Com o contínuo desenvolvimento e investigação de novos isolantes térmicos, foi possível encontrar novas soluções. No presente subcapítulo irá apresentar-se uma pequena introdução ao aerogel de sílica e painel de isolamento a vácuo.

#### ➤ Aerogel de sílica

O aerogel é um isolante com baixa densidade, composto por sólidos nanoestruturados, mesoporosos, ou seja, constituído por partículas entre os 2 e 50 nm, com boas propriedades isolantes, o que permite uma condutibilidade térmica inferior ao do ar envolvente. O aerogel de sílica é uma estrutura sólida composta de nanopartículas de óxido de silício, que é o mesmo composto encontrado no vidro, quartzo e areia. A forma como estas nanopartículas se conectam para formar a estrutura do aerogel pode variar, dependendo da química usada para preparar o gel precursor.

O setor da indústria da construção é uma das áreas onde este material tem sido utilizado de modo a melhorar o isolamento térmico, resultado do aparecimento de vários materiais/sistemas, como a manta flexível de aerogel, o aerogel em granulado para correções de patologias na construção, ou incorporação de aerogel nos envidraçados (F. Silva, 2013). Alguns exemplos de aerogel podem ser observados na Figura 12.

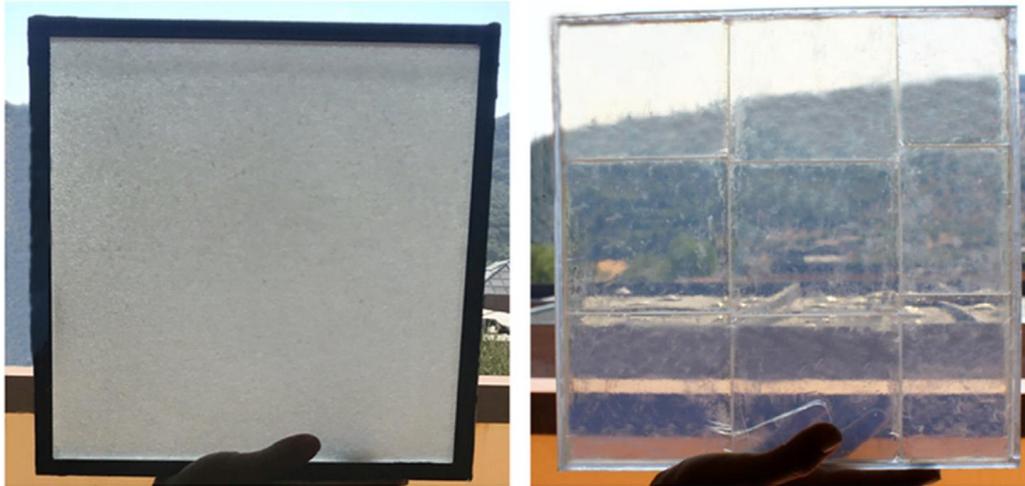


Figura 12 - Exemplos de vidro granulado com a aerogel (à esquerda) e uma unidade de vidro monolítica com aerogel (à direita) (Lamy-Mendes et al., 2021).

➤ Painel de isolamento a vácuo

O painel de isolamento a vácuo (VIP) é constituído por uma barreira de múltiplas camadas que inclui isolamento a vácuo. As soldaduras garantem a manutenção do vácuo entre as camadas da barreira do VIP. O núcleo do material possui resistência estrutural e capacidade de impedir a transferência de calor. O invólucro é selado hermeticamente para manter o vácuo durante vários anos. Os VIPs são fabricados através de uma técnica especial que envolve a inserção de moléculas unicelulares de enchimento num sistema selado (F. Silva, 2013). A constituição do painel de isolamento a vácuo pode ser observada na Figura 13.

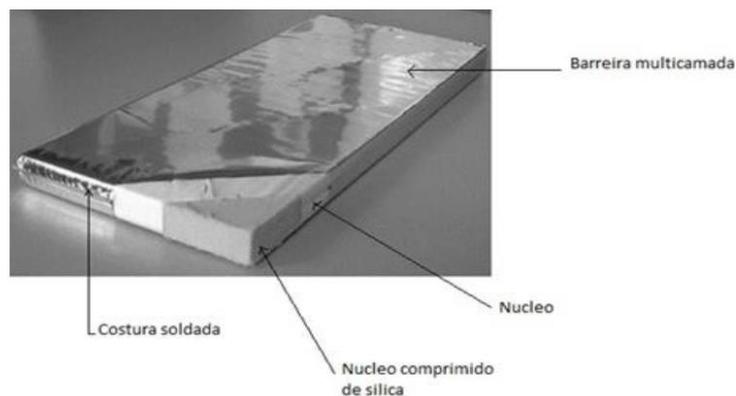


Figura 13 - Constituição do painel de isolamento a vácuo (F. Silva, 2013).

### 2.5.3 Sistemas de sombreamento

O uso de grandes áreas envidraçadas tem sido cada vez mais recorrente. Assim, existe uma maior utilização de luz natural, mas também resulta no aumento dos ganhos solares o que pode ser prejudicial, tanto com o aumento de temperatura no verão, tanto com o aumento do brilho que pode causar desconforto aos ocupantes. Assim, a utilização adequada dos sistemas de sombreamento resulta na redução do brilho excessivo melhorando também o conforto térmico.

Bellia et al., 2014 propôs classificar os sistemas de sombreamento em fixos e móveis, podendo ser utilizados tanto em espaços internos como externos. Com os mais recentes desenvolvimentos (Al-Masrani et al., 2019), a introdução de sistemas de sombreamento dinâmicos, que podem ajustar-se automaticamente ao longo do dia, tornou os sistemas tradicionais menos eficientes no controlo da luz natural e na eficiência energética (Vieira, 2020).

### 2.5.4 Energia renovável - Painéis solares

A luz solar é a fonte de energia renovável mais abundante no planeta, que pode ser captada em quase toda a Terra. É uma forma limpa e não poluente de gerar energia, que não emite gases de efeito estufa ou resíduos tóxicos. Os sistemas de energia solar residenciais têm pouco impacto ambiental e são silenciosos. Além disso, os painéis solares não possuem partes móveis e são fáceis de manter, com custos razoáveis.

O principal problema do uso da energia solar é o custo envolvido. Apesar dos avanços na tecnologia, os painéis solares ainda são caros. Mesmo quando o custo dos painéis é ignorado, o sistema necessário para armazenar a energia para uso também pode ser bastante caro. Embora alguma energia solar possa ser captada durante dias nublados, a captação eficiente de energia solar depende do sol. Mesmo alguns dias nublados podem ter um grande efeito em um sistema de energia, especialmente quando o facto de que a energia solar não pode ser captada à noite é levado em conta (Mohtasham, 2015).

## 2.6 Reforço integrado sísmico e energético

O reforço integrado sísmico e energético é uma técnica de reabilitação de edifícios que visa melhorar tanto a resistência sísmica como a eficiência energética dos mesmos. Com o aumento da consciência ambiental e da necessidade de preservação dos recursos naturais, o reforço integrado tem vindo a ganhar cada vez mais importância no setor da construção civil. Esta técnica consiste em integrar soluções de reforço sísmico e melhorias ao nível da eficiência energética de um edifício.

O objetivo do reforço integrado é tornar o edifício mais resistente a sismos, reduzir o consumo de energia e melhorar o conforto térmico dos seus ocupantes. Para atingir este objetivo, são utilizadas diversas intervenções, tais como: Exoesqueleto reforçado com aço; Exoesqueleto de casca; Intervenções na envolvente (TRM + isolamento térmico); Painéis à base de madeira; Reforço de aberturas com estrutura de aço; Substituição da envolvente existente; Intervenções nos pavimentos ou telhados (Pohoryles et al., 2022).

É importante salientar que o reforço integrado sísmico e energético não se limita a melhorar a resistência sísmica e a eficiência energética dos edifícios. Esta técnica também contribui para a preservação do meio ambiente, já que reduz o consumo de energia e, conseqüentemente, as emissões de gases de efeito estufa. Assim, o reforço integrado sísmico e energético apresenta-se como uma solução eficaz e sustentável para a reabilitação de edifícios, contribuindo para a segurança dos seus ocupantes, para a redução do consumo de energia e para a preservação do meio ambiente.

### 2.6.1 Exosqueletos

Os exosqueletos, que se representam na Figura 14, baseiam-se no design paramétrico, um conceito arquitetónico já utilizado para a reabilitação energética e funcional, permitindo uma solução flexível para atingir o desempenho desejado. Esta estratégia fornece várias vantagens, destacando-se a possibilidade de realizar uma intervenção a partir do exterior do edifício, reduzindo assim os transtornos causados pelas obras de reabilitação; permite uma certa liberdade arquitetónica no design de novas fachadas, bem como um bom nível de adaptabilidade e capacidade de reparação devido à modularidade de tais estruturas.



Figura 14 - Aplicação de um sistema de exosqueleto de aço para reabilitação sísmica integrada e eficiência energética de edifícios: a) estrutura externa para reforço sísmico; b) sistemas de fachada para eficiência energética e renovação estética (Ademovic et al., 2022).

### 2.6.2 Intervenções na envolvente existente (TRM + isolamento térmico)

Relativamente à nova classe de materiais compósitos, chamada de argamassa reforçada com têxteis (TRM), esta mostra-se bastante promissora, pois combina as propriedades favoráveis oferecidas pelos polímeros reforçados com fibras (FRP) (por exemplo, facilidade e rapidez de aplicação, mínima alteração na geometria, resistência à corrosão, alta resistência e rigidez em relação ao peso, alta capacidade de deformação), ao mesmo tempo que elimina a maioria dos problemas associados à aplicação de resinas epóxi. Mesmo oferecendo o reforço sísmico, existe necessidade de efetuar um reforço térmico que se deve ao alto consumo de energia dos edifícios antigos. O TRM tem capacidade mínima de isolamento térmico, enquanto o isolamento térmico, interno ou externo, não têm capacidade de carga (Karlos et al., 2020).

Para solucionar este problema, foi proposto um reforço integrado sísmico e térmico como uma unidade, que pode ser construída no local, ou numa placa pré-fabricada, Figura 15. O TRM pode ser aplicado com diferentes soluções de isolamento térmico para proporcionar melhorias na estrutura, eficiência energética e (potencialmente) comportamento ao fogo em uma única aplicação integrada. Um sistema desse tipo pode ser usado tanto em edifícios estruturados (betão armado, aço) com preenchimento de alvenaria, como em estruturas de alvenaria autoportantes (Pohoryles et al., 2022).

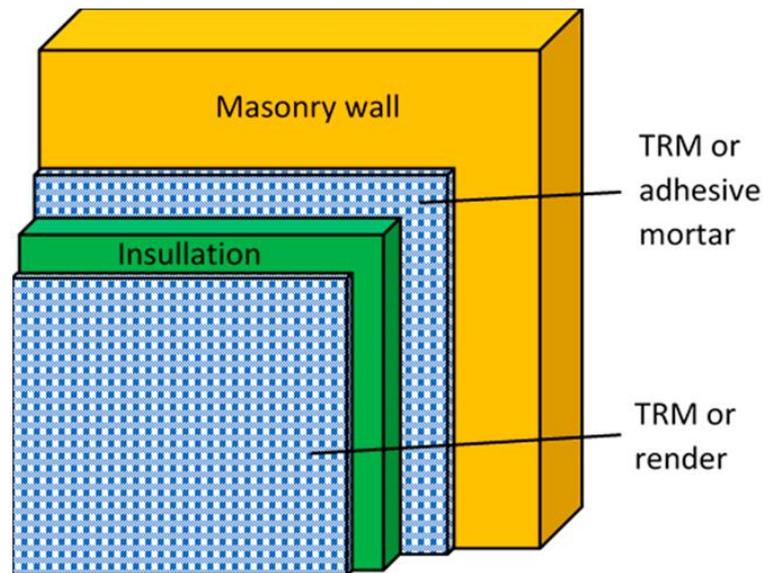


Figura 15 - Intervenções no envelope existente (TRM + isolamento térmico) (Karlos et al., 2020).

## 2.7 Revisão Bibliográfica

A Tabela 2 representa um conjunto das principais referências nas quais este trabalho se baseou. Nesta encontram-se duas referências nas quais correspondem aos manuais dos softwares utilizados, duas referências numéricas focadas na análise sísmica utilizando o 3MURI. De seguida, também se encontra uma referência de análise energética e duas sobre alguns dos possíveis reforços energéticos. Por último também estão presentes duas referências sobre os reforços sísmicos e também sobre as possíveis soluções para o reforço integrado sísmico e energético.

Reforço integrado sísmico e energético de edifícios de alvenaria: modelação numérica da resposta

Tabela 2 - Tabela de Revisão Bibliográfica.

| Autor                    | Aspetos chave   | Conclusões   | Tipo de Artigo | Software<br>(Se aplicável) | Tipo de intervenção<br>(Se aplicável) |
|--------------------------|---|--|----------------|----------------------------|---------------------------------------|
| Lagomarsino et al., 2013 | Soluções de análise estrutural usando o TREMURI   | Tremuri é uma ferramenta versátil e em constante desenvolvimento                                       | Numérico       | 3MURI                      | -                                     |
| Brackney et al., 2018    | Introdução à modelação energética de edifícios  | Livro de apoio ao software EnergyPlus  | Numérico       | EnergyPlus                 | -                                     |
| Almeida, 2022            | Avaliação da segurança sísmica de edifícios antigos de alvenaria  | Técnicas de reforço adequadas podem prevenir o colapso das estruturas de alvenaria                     | Numérico       | 3MURI                      | -                                     |
| S.T.A Data, 2017         | Modelação sísmica de edifícios  | Manual de uso do 3MURI   | Numérico       | 3MURI                      | -                                     |
| Kouris et al., 2019      | Aplicação do TRM e de materiais isolantes térmicos como meio de reabilitação estrutural e energética de paredes de alvenaria. | Efetivo como reabilitação energética e comportamento fora do plano.                                    | Experimental   | -                          | Textile reinforced mortars (TRM)      |
| Esteves, 2021            | Comparação de vários softwares para a caracterização energética.  | O Isolamento reduz de forma drástica as necessidades de aquecimento, mas, prejudica as necessidades de | Numérico       | EnergyPlus                 | -                                     |

Reforço integrado sísmico e energético de edifícios de alvenaria: modelação numérica da resposta

|                        |  |  |                       |               |  |
|------------------------|--|--|-----------------------|---------------|--|
|                        |  | arrefecimento na ausência de dispositivos de sombreamento adequados  |                       |               |  |
| Silva, 2013            | Estudo de materiais de isolamento térmico inovadores no sector da construção civil.  | Os materiais de isolamento térmico inovadores apresentam elevado desempenho térmico  | Experimental          | -             | Vários exemplos de isolamento Térmicos |
| Vieira, 2020           | Estudar a relação entre as necessidades de iluminação natural e o seu impacto nas necessidades energética.   | A cobertura de sombreamento de 0,5 metros economiza energia para manter 18°C de conforto no inverno, mas um aumento de 4°C no sistema de climatização pode ser impraticável. O equilíbrio entre economia e conforto é crucial. | Experimental/Numérico | DesignBuilder | Soluções de sombreamento               |
| Pohoryles et al., 2022 | É destacada a importância da renovação de edifícios para melhorar a eficiência energética e resistência sísmica, contribuindo para as metas climáticas e económicas da EU. | A eficácia de soluções de reforço integrado ainda é incerta em muitos casos.   | Experimental          | -             | Várias soluções de reforço integrado   |

## 3. ANÁLISE SÍSMICA DE ESTRUTURAS DE ALVENARIA

### 3.1 Aspetos regulamentares

#### 3.1.1 Eurocódigo 8 Parte 1

A Parte 1 do Eurocódigo 8 (EC8) é voltada para o projeto de edifícios e outras estruturas de engenharia civil em áreas sujeitas a atividade sísmica. Nesta seção, são estabelecidas diretrizes para a representação das ações sísmicas, e na seção 9 são definidas regras específicas para projetar edifícios construídos com alvenaria.

A estrutura deve ser planeada e construída de maneira a suportar a ação sísmica calculada, sem sofrer colapso. A intensidade do sismo é expressa através da ação sísmica de referência, que está relacionada a uma probabilidade de excedência de referência de 10% em 50 anos, ou a um período de retorno de 475 anos.

Para uma caracterização precisa da ação sísmica, é essencial conduzir estudos de reconhecimento geotécnico do terreno, classificando-o de acordo com os tipos A a E, conforme detalhado em perfis estratigráficos e os parâmetros indicados no quadro 3.1 do EC8 (ilustrado na Figura 16).

De acordo com essa categorização, é necessário classificar o terreno usando o valor da velocidade média das ondas de corte  $v_{s,30}$  ou, na ausência dessa informação, recorrer ao valor de  $N_{SPT}$  (número de pancadas do ensaio de penetração). Quando o tipo de terreno corresponde a um tipo especial, são requeridos estudos específicos para determinar a ação sísmica, levando em conta também a possibilidade de rutura do terreno devido a essa ação.

Dessa forma, o território nacional é subdividido em zonas sísmicas, levando em consideração a atividade sísmica específica de cada região, sendo constante em cada zona. Para a maioria das aplicações do EC8, a sismicidade é caracterizada por um único parâmetro, que é o valor de referência da aceleração máxima na base em um terreno do tipo A, denotado por  $a_{gr}$ . Esse valor de referência corresponde ao período de retorno de referência, que é então multiplicado pelo coeficiente de importância  $\gamma_I$ . Quando o período de retorno coincide com o valor de referência, o coeficiente  $\gamma_I$  é igual a 1, uma vez que o  $a_{gr}$  é definido para esse período.

Quadro 3.1 – Tipos de terreno

| Tipo de terreno | Descrição do perfil estratigráfico  | Parâmetros            |                               |             |
|-----------------|---|-----------------------|-------------------------------|-------------|
|                 |   | $v_{s,30}$ (m/s)      | $N_{SPT}$<br>(puncadas/30 cm) | $c_v$ (kPa) |
| A               | Rocha ou outra formação geológica de tipo rochoso, que inclua, no máximo, 5 m de material mais fraco à superfície   | > 800                 | –                             | –           |
| B               | Depósitos de areia muito compacta, de seixo (cascalho) ou de argila muito rija, com uma espessura de, pelo menos, várias dezenas de metros, caracterizados por um aumento gradual das propriedades mecânicas com a profundidade | 360 – 800             | > 50                          | > 250       |
| C               | Depósitos profundos de areia compacta ou medianamente compacta, de seixo (cascalho) ou de argila rija com uma espessura entre várias dezenas e muitas centenas de metros  | 180 – 360             | 15 - 50                       | 70 - 250    |
| D               | Depósitos de solos não coesivos de compactidade baixa a média (com ou sem alguns estratos de solos coesivos moles), ou de solos predominantemente coesivos de consistência mole a dura  | < 180                 | < 15                          | < 70        |
| E               | Perfil de solo com um estrato aluvionar superficial com valores de $v_s$ do tipo C ou D e uma espessura entre cerca de 5 m e 20 m, situado sobre um estrato mais rígido com $v_s > 800$ m/s                                     |                       |                               |             |
| $S_1$           | Depósitos constituídos ou contendo um estrato com pelo menos 10 m de espessura de argilas ou siltes moles com um elevado índice de plasticidade ( $PI > 40$ ) e um elevado teor de água   | < 100<br>(indicativo) | –                             | 10 - 20     |
| $S_2$           | Depósitos de solos com potencial de liquefação, de argilas sensíveis ou qualquer outro perfil de terreno não incluído nos tipos A – E ou $S_1$  |                       |                               |             |

Figura 16 - Quadro 3.1 do EC8-1 (NP EN1998-3, 2017).

Os edifícios são categorizados em quatro classes de importância, de acordo com as consequências do colapso em relação a vidas humanas, a relevância para a segurança pública, a capacidade de proteção civil após um terremoto e as implicações sociais e económicas decorrentes do colapso. Estas classes de importância são representadas no quadro 4.3 do EC8 parte 1 (ver Figura 17) a quais, no quadro NA.II se encontram os coeficientes de importância correspondentes para Portugal.

| Classe de importância | Edifícios   |
|-----------------------|---|
| I                     | Edifícios de importância menor para a segurança pública, como por exemplo edifícios agrícolas, etc.   |
| II                    | Edifícios correntes, não pertencentes às outras categorias.   |
| III                   | Edifícios cuja resistência sísmica é importante tendo em vista as consequências associadas ao colapso, como por exemplo escolas, salas de reunião, instituições culturais, etc. |
| IV                    | Edifícios cuja integridade em caso de sismo é de importância vital para a protecção civil, como por exemplo hospitais, quartéis de bombeiros, centrais eléctricas, etc.         |

Figura 17 - Classes de importância para os edifícios (NP EN1998-3, 2017).

Nas figuras do anexo nacional do EC8 NA.I, NA.II e NA.III, pode-se encontrar a divisão de Portugal nas diversas zonas sísmicas, tendo em conta que cada uma destas zonas, corresponde a um valor de aceleração de referência máxima  $a_g$  em  $m/s^2$  presentes no quadro NA.I, para a ação sísmica tipo 1 e tipo 2. Cada tipo de ação sísmica representa um tipo de sismo diferente, sendo que para a ação sísmica tipo 1 tem-se um sismo de magnitude elevada com grande distância focal, logo sismo afastado, enquanto para a ação sísmica tipo 2 representa um sismo de magnitude moderada e pequena distância focal, ou seja, sismo próximo (Luís Guerreiro, 2010). Para Portugal continental devem ser consideradas estes dois tipos de ações sísmicas, enquanto para o arquipélago da Madeira é a ação do tipo 2, e em contrapartida, no Arquipélago dos Açores é ação sísmica tipo 1.

Conforme definido pelo EC8, o movimento sísmico em um ponto específico da superfície do terreno é representado por um gráfico chamado "espectro de resposta elástica de acelerações", ilustrado na Figura 18, que descreve a variação da aceleração máxima de um sistema elástico de um grau de liberdade em relação à frequência. A ação sísmica horizontal é descrita por duas componentes perpendiculares entre si, que são independentes e partilham o mesmo espectro de resposta. Por outro lado, a ação sísmica vertical é definida por um espectro de resposta distinto, mantendo também a sua independência. As componentes horizontais da ação sísmica, representadas pelo espectro de resposta de elástico  $S_e(T)$  é definido pela equação 2:

$$S_e(T) = \begin{cases} a_g \cdot S \cdot \left[ 1 + \frac{T}{T_B} \cdot (\eta \cdot 2,5 - 1) \right] \\ a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2,5 \\ a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2,5 \cdot \left[ \frac{T_C}{T} \right] \\ a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2,5 \cdot \left[ \frac{T_C T_D}{T^2} \right] \end{cases} \quad \text{para} \quad \begin{cases} 0 \leq T \leq T_B \\ T_B \leq T \leq T_C \\ T_C \leq T \leq T_D \\ T_D \leq T \leq 4s \end{cases} \quad (2)$$

Onde:

$S_e(T)$  é o espectro de resposta;

$T$  o período de vibração de um sistema linear com um grau de liberdade (SDOF);

$a_g$  o valor de calculo da aceleração à superfície para um terreno tipo A;

$T_B$  limite inferior do período no patamar de aceleração espectral constante;

$T_C$  limite superior do período no patamar de aceleração espectral constante;

$T_D$  Valor que define no espectro o início do ramo do deslocamento constante;

$S$  Coeficiente do solo;

$\eta$  Coeficiente de amortecimento calculado pela equação:  $\eta = \sqrt{\frac{10}{5+\xi}} \geq 0,55$ .

$\xi$  é o amortecimento.

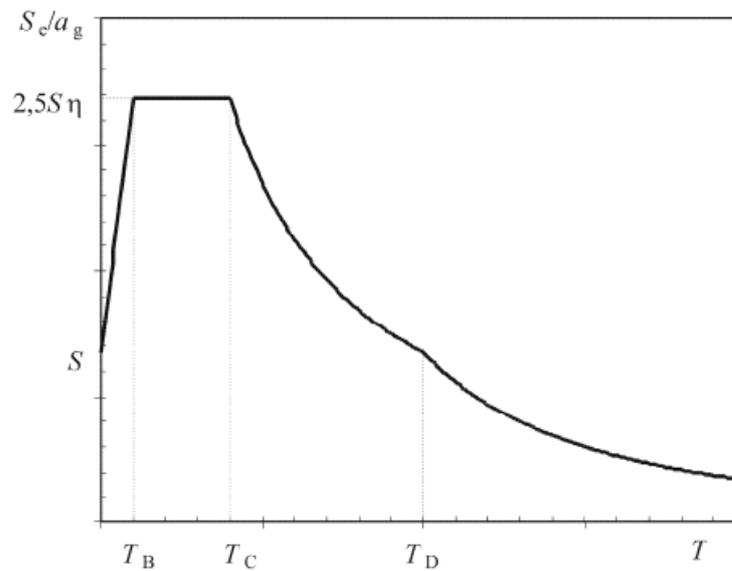


Figura 18 - Forma do espectro de resposta elástico (NP EN1998-3, 2017).

Todos os valores de  $T_B$ ,  $T_C$  e  $T_D$  e o valor do coeficiente do solo  $S$  dependem do tipo de terreno. No EC8, encontra-se nos quadros NA-3.2 e NA-3.3 os valores recomendados dos parâmetros mencionados para os sismos tipo 1 e tipo 2. Assim, para a definição dos vários espectros de resposta em Portugal, o valor dos parâmetros  $S$  é definido pela equação 3:

$$S = \begin{cases} S_{max} & a_g \leq 1m/s^2 \\ S_{max} - \frac{S_{max} - 1}{3}(a_g - 1) & \text{para } 1m/s^2 \leq a_g \leq 4m/s^2 \\ 1 & a_g \geq 4m/s^2 \end{cases} \quad (3)$$

Para períodos de vibração não superiores a 4 s, o espectro de resposta elástica de deslocamento  $S_{DE}(T)$  é obtido pela equação  $S_{DE}(T) = S_e(T) \left[ \frac{T}{2\pi} \right]^2$ .

O espectro de resposta de cálculo  $S_e(T)$  que caracteriza as componentes horizontais da ação sísmica é definido pela equação 2: Os valores de  $T_B$ ,  $T_C$ ,  $T_D$  e  $a_{vg}$  são indicados no quadro NA-3.4 do EC8.

### 3.1.2 Eurocódigo 8 Parte 3

Os requisitos essenciais relacionados ao estado de deterioração da estrutura são definidos na Parte 3 do EC8. Nessa seção, são estabelecidos três estados limites: Colapso Iminente (NC - Near

Collapse), Danos Severos (SD - Severe Damage) e Limitação de Danos (DL - Damage Limitation). Esses estados limites são determinados pelos efeitos causados na estrutura.

No estado limite NC, a estrutura sofre danos severos, resultando em uma redução significativa de sua rigidez lateral e capacidade de resistência, mesmo que os elementos verticais possam ainda manter parte de sua capacidade. Muitas das partes não estruturais da construção colapsam e são observados deslocamentos permanentes. Nesse ponto, a estrutura está na iminência do colapso e é improvável que possa resistir a outro sismo, mesmo que seja de intensidade moderada.

No estado limite SD, a estrutura exhibe danos substanciais, com alguma capacidade residual de resistência e rigidez lateral. Os elementos verticais ainda são capazes de suportar as cargas verticais. Os elementos não estruturais também sofrem danos, mas elementos de enchimento e divisórias podem não ter rompido fora do plano. São observados deslocamentos permanentes moderados. Nesse estado, a estrutura pode ser capaz de lidar com réplicas sísmicas de intensidade moderada. No entanto, a reparação da estrutura provavelmente não seria economicamente viável.

No estado limite DL, a estrutura exhibe danos leves, com os elementos estruturais mantendo-se em regime não plástico significativo e retendo suas características de resistência e rigidez. Os elementos não estruturais, como divisórias e elementos de preenchimento, podem apresentar alguma fendilhação distribuída, sendo a reparação destes danos económica. Deslocamentos laterais permanentes são insignificantes, tornando desnecessária qualquer reparação adicional na estrutura.

De acordo com a cláusula do NA-2.1(2)P em Portugal, os edifícios das classes de importância III e IV (ver EC8-1) devem ser avaliados em relação aos estados limites mencionados anteriormente. Por outro lado, para os edifícios das classes de importância I e II, é necessário verificar apenas o estado limite SD.

Na definição da ação sísmica, é necessário levar em conta os períodos de retorno conforme especificados no anexo nacional NA-2.1(3)P. Para o estado limite NC, o período de retorno é de 975 anos, o que equivale a uma probabilidade de excedência de 5% em 50 anos; no estado limite SD, utiliza-se um período de retorno de 308 anos, correspondente a uma probabilidade de excedência de 15% em um período de 50 anos.; por fim, no estado limite DL, o período de retorno é de 73 anos, associado a uma probabilidade de excedência de 50% ao longo de um período de 50 anos.

Os valores de aceleração máxima de referência  $\alpha_s$  que devem ser utilizados em cada estado limite são derivados dos valores do Quadro NA.I da Parte 1 do EC8 ,como se verifica na Figura 19 ajustados de acordo com os valores do Quadro NA.I da Parte 3. Essa multiplicação é necessária porque

Reforço integrado sísmico e energético de edifícios de alvenaria: modelação numérica da resposta

os períodos de retorno associados a cada estado limitem diferem do valor de referência de 475 anos (período de retorno usado na Parte 1 do EC8).

Quadro NA.I – Coeficientes multiplicativos da ação sísmica de referência para obtenção da aceleração máxima de referência para aplicação da NP EN 1998-3

| Estado limite             | Ação sísmica Tipo 1 | Ação sísmica Tipo 2 |        |
|---------------------------|---------------------|---------------------|--------|
|                           |                     | Continente          | Açores |
| de colapso iminente (NC)  | 1,62                | 1,33                | 1,22   |
| de danos severos (SD)     | 0,75                | 0,84                | 0,89   |
| de limitação de dano (DL) | 0,29                | 0,47                | 0,55   |

Figura 19 - Quadro NA.I EC8-3 (NP EN1998-3, 2017).

### 3.1.3 Nível de conhecimento

De acordo com o EC8-3, para viabilizar a seleção de uma análise adequada e os coeficientes de confiança apropriados, são estabelecidos três níveis de conhecimento: conhecimento limitado (KL1), conhecimento normal (KL2) e conhecimento integral (KL3), ver Figura 20. Cada nível é determinado pelos seguintes fatores:

- Geometria: As características relacionadas com a forma e disposição do sistema estrutural e dos elementos não estruturais podem ter influência na resposta estrutural a um evento sísmico;
- Disposições construtivas: Englobam a especificação detalhada das quantidades e configurações das armaduras utilizadas em elementos de betão armado, as uniões entre componentes metálicos e pavimentos, bem como a estrutura que é projetada para resistir às forças laterais. Além disso, incluem informações sobre o tipo de junta de alvenaria utilizado, bem como quaisquer elementos de reforço empregados para melhorar o desempenho da alvenaria;
- Materiais: Refere-se às propriedades mecânicas dos materiais constituintes.

| Níveis de conhecimento | Geometria  | Disposições Construtivas   | Materiais   | Análise                   | CF                |
|------------------------|--|--|---|---------------------------|-------------------|
| KL1                    | A partir dos desenhos de dimensionamento geral do projeto e de uma inspeção <b>visual</b> de uma amostragem <b>ou</b> a partir de uma inspeção <b>integral</b> . | Projeto simulado de acordo com a prática de origem <b>e</b> a partir de uma inspeção in situ <b>limitada</b> .   | Valores por defeito de acordo com as normas em vigor à data da construção <b>e</b> a partir de ensaios in situ <b>limitados</b> .       | LF-MRS (coeficiente $q$ ) | $CF_{KL1}$ (1,35) |
| KL2                    |  | A partir dos desenhos de pormenor de origem incompletos com uma inspeção in situ <b>limitada ou</b> a partir de uma inspeção in situ <b>alargada</b> . | A partir das especificações do projeto de origem com ensaios in situ <b>limitados ou</b> a partir de ensaios in situ <b>alargados</b> . | Todas as análises         | $CF_{KL2}$ (1,20) |
| KL3                    |  | A partir dos desenhos de pormenor de origem com uma inspeção in situ <b>limitada ou</b> a partir de uma inspeção in situ <b>completa</b> .             | A partir dos relatórios de ensaios de origem com ensaios in situ <b>limitados ou</b> a partir de ensaios in situ <b>completos</b> .     | Todas as análises         | $CF_{KL3}$ (1,00) |

Figura 20 - Quadro 3.1 EC8-3 - Níveis de conhecimento e correspondentes métodos de análise (NP EN1998-3, 2017).

### 3.1.4 Métodos de Análise

Em relação aos edifícios de alvenaria, os efeitos da ação sísmica podem ser determinados através de dois métodos, a análise linear e análise não linear. O método linear pode ser utilizado se as estruturas apresentarem ductilidade significativa. Assim, de acordo com o EC8, estes são aplicados quando:

- As paredes de contraventamento são posicionadas de maneira uniforme em ambas as direções;
- As paredes são contínuas em toda a sua altura;
- Os pisos são suficientemente rígidos no plano e as suas ligações às paredes exteriores permitem que eles possam redistribuir as forças de inércia entre os elementos verticais com diafragmas rígidos;
- Os pavimentos em lados opostos da mesma parede estão nivelados à mesma altura;
- Nos diferentes pisos, a relação entre as rigidezes no plano da parede da maior rigidez e da parede sísmica primária mais fraca, não pode exceder 2,5;
- Os lintéis são feitos de blocos devidamente ligados ao das paredes adjacentes.

Em edifícios históricos, é frequentemente desafiador observar todas estas condições, principalmente devido à falta das condições necessárias nas ligações entre os pavimentos e as paredes. Portanto, os métodos lineares não podem ser aplicados e, em vez disso, é necessário recorrer aos métodos não lineares, conforme descrito na seção C3.3 EC8 parte 3. Esses métodos, tanto estáticos quanto dinâmicos, definem a capacidade com base no deslocamento ao nível da cobertura (ponto de controlo). Eles são aplicáveis de forma mais geral, embora sejam mais complexos e exijam um nível mais elevado de conhecimento (KL2 ou KL3).

A análise *pushover* é um método de análise estática não linear que considera cargas gravitacionais constantes e cargas horizontais que aumentam de forma contínua. Nesse método, são usadas pelo menos duas distribuições verticais de cargas laterais para calcular a curva de capacidade, que é definida em termos do deslocamento na cobertura (ponto de controlo) e da resistência lateral total (corte basal). O deslocamento último convencionado é o deslocamento na cobertura em que o corte basal atinge 80% do seu valor máximo. As cargas aplicadas devem seguir uma distribuição "uniforme" proporcional à massa do edifício, e uma distribuição "modal" proporcional à forma deformada do modo de vibração fundamental determinada na análise elástica.

Por último, é de salientar que a segunda geração do EC8 (em fase final de aprovação), no anexo D, existe uma tabela com características mecânicas base para vários tipos de alvenaria uma segunda tabela que permite obter um coeficiente que multiplica as características base do material em função do estado do material em questão, e uma terceira tabela que tem em conta o efeito do tipo de intervenção nas propriedades mecânicas, a qual se encontra na Figura 21.

| Type of masonry   | Lime mortar grouting (*) | Reinforced jacketing (**) | Reinforced repointing and transversal bars (**) | Maximum combined factor |
|---|--------------------------|---------------------------|---|-------------------------|
| Irregular stone masonry   | 2                        | 2,5                       | 1,6   | 3,5                     |
| Roughly cut stone masonry, with wythes of irregular thickness   | 1,7                      | 2,0                       | 1,5   | 3,0                     |
| Uncut stonework with good texture   | 1,5                      | 1,5                       | 1,4   | 2,2                     |
| Masonry of irregular soft stone blocks  | 1,4                      | 1,7                       | 1,1   | 2,0                     |
| Regular masonry of soft stone blocks  | 1,2                      | 1,5                       | 1,2   | 1,8                     |
| Squared stone masonry   | 1,2                      | 1,2                       | -   | 1,4                     |
| Solid brick masonry and lime mortar   | 1,2                      | 1,5                       | 1,2   | 1,8                     |
| Semisolid brick masonry with cement-lime mortar (perforations < 40%)  | -                        | 1,3                       | -   | 1,3                     |
| * The possibility of using the proposed coefficients depends on a preliminary <i>in situ</i> test of the mortar injectability and the attained result, checked by the improved homogeneity proved, for example, by sonic tests. |                          |                           |   |                         |
| ** Values to be properly reduced in the case of very thick masonry walls (> 0,70 m).  |                          |                           |   |                         |

Figura 21 - Quadro D.5 do EC8 Parte 3: Coeficiente de reforço (NP EN1998-3, 2017).

Este coeficiente proveniente da Figura 21 deve ser usado, dependendo do tipo de alvenaria, para os parâmetros de resistência ( $f$ ,  $f_t$  e  $f_{t,d}$ ) e para os módulos de elasticidade e de distorção ( $E$  e  $G$ ).

### 3.1.5 Curvas bilineares

A exigência sísmica regulamentar é determinada pelos espectros de resposta, em termos de deslocamento. A capacidade de um edifício é calculada através de um sistema MDOF (sistema de múltiplos graus de liberdade) representativo. Portanto, é necessário, transformar a capacidade do sistema MDOF para um sistema SDOF equivalente e comparar com a exigência sísmica. Para transformar a capacidade do sistema MDOF para o sistema SDOF, os códigos europeus adotam um fator de transformação que transforma a curva pushover, representada no espaço deslocamento-corte basal MDOF, na curva de capacidade equivalente no espaço deslocamento-corte basal SDOF.

No que diz respeito ao cálculo do período, os códigos europeus preveem a definição de uma curva bilinear elasto-plástica equivalente e o cálculo do período a partir da inclinação do ramo elástico, ver Figura 22. No entanto, como não existe um procedimento teórico único para definir esta curva bilinear, os códigos adotam procedimentos diferentes, ambos baseados na equivalência da energia de deformação. Por exemplo, no EC8 assume-se a força máxima  $F_y$  como o valor máximo da curva equivalente. O ramo plástico da curva vai desde o deslocamento de cedência  $d_y$  até o deslocamento último  $d_u$ , e  $d_y$  é calculado equilibrando as áreas abaixo da curva de capacidade e da curva bilinear equivalente. No código italiano o ramo elástico passa pela origem e pelo ponto correspondente a 70% do

cutelo basal máximo. A resistência máxima  $F_y$  é calculada através da equivalência das áreas sob a curva *pushover* e da aproximação bilinear (Lagomarsino et al., 2020).

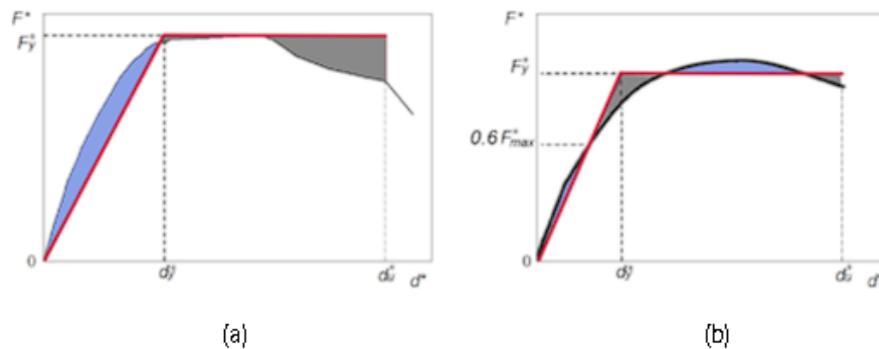


Figura 22 – Definição da curva bilinear equivalente: a) de acordo com o EC8; b) de acordo com a norma italiana NTC 2018 (Lagomarsino et al., 2020).

### 3.2 Software 3MURI

O software 3MURI é uma solução que pode ser aplicada tanto em edifícios novos quanto em edifícios existentes, isolados ou agregados, independentemente de suas dimensões. Esta solução tem como objetivo verificar a segurança regulamentar destas construções, principalmente em casos de eventos sísmicos. Em outras palavras, o software 3MURI é uma opção para verificar a segurança estrutural de edifícios em áreas com risco sísmico.

O software em questão é projetado para analisar estruturas de alvenaria e/ou materiais mistos usando uma abordagem de análise estática não linear, conhecida como "*pushover*". Especificamente, a ferramenta 3MURI emprega o método de cálculo FME (*Frame by Macro Elements*), concentrando-se principalmente no comportamento das paredes de alvenaria no seu plano, como documentado por (Lagomarsino et al., 2013). A versão mais recente do *software* permite estudar igualmente o comportamento para fora do plano, o que contribui para uma avaliação precisa das capacidades e limitações da estrutura.

A versão gentilmente disponibilizada pela S.T.A DATA é utilizada para as análises não lineares onde se considera uma relação força-deslocamento bilinear para caracterizar os elementos de alvenaria. Neste, o modelo tridimensional do edifício é obtido através da junção das paredes modeladas como uma estrutura equivalente, seguido pelos diafragmas horizontais, tais como pavimentos e cobertura, modelados como elementos de membrana (Almeida, 2022). O software permite a consideração da não

linearidade dos materiais, o que permite representar o comportamento da estrutura de forma realista, possibilitando avaliar o comportamento global na presença da ação sísmica.

Conforme previamente mencionado, o *software* faz uso do método de cálculo FME, o qual assume que o comportamento das paredes de alvenaria no plano podem ser modelados por meio de três tipos de macroelementos. Esses elementos incluem:

- Nembos: Elementos verticais que são responsáveis por suportar tanto as cargas verticais quanto horizontais;
- Lintéis: Componentes horizontais posicionados entre duas aberturas alinhadas verticalmente, contribuindo para a distribuição das cargas e deformações;
- Elemento rígidos: São os elementos confinados entre os nembos e os lintéis, desempenhando um papel importante na transmissão das forças ao longo da estrutura.

Estes macroelementos permitem uma representação simplificada do comportamento da alvenaria, tornando possível a análise do desempenho sísmico da estrutura de forma eficiente, ver Figura 23 (Almeida, 2022).

Os elementos estruturais com capacidade de deformação e onde se concentra o comportamento não-linear dos materiais, são representados pelos lintéis e pelos nembos. Esta descrição originou-se com base na observação dos edifícios sujeitos à ação sísmica, onde se verificou fendas e roturas nestes elementos (Lagomarsino et al., 2013). Já a parte onde não se observa danos, é representada pelos elementos rígidos.

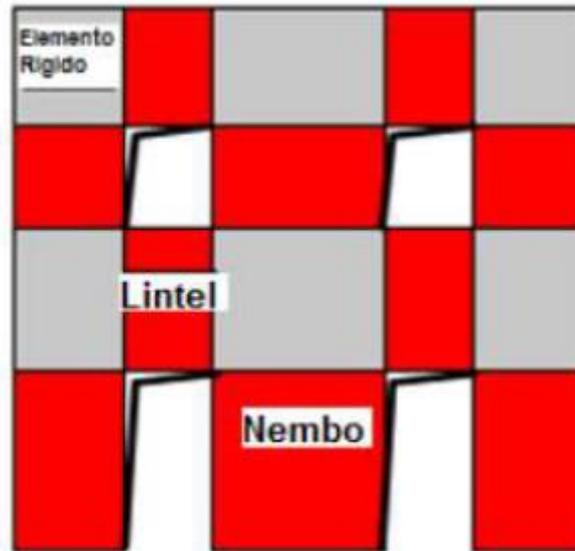


Figura 23 - Discretização dos macroelementos no método FME (Almeida, 2022).

Na análise estática não linear, a resposta não linear das paredes é desencadeada quando um dos esforços nos elementos atinge o seu valor máximo estimado, de acordo com um dos critérios de resistência de colapso no plano (Almeida, 2022).

- (a) Por flexão;
- (b) Por corte com deslizamento;
- (c) Por corte com fendilhação diagonal.

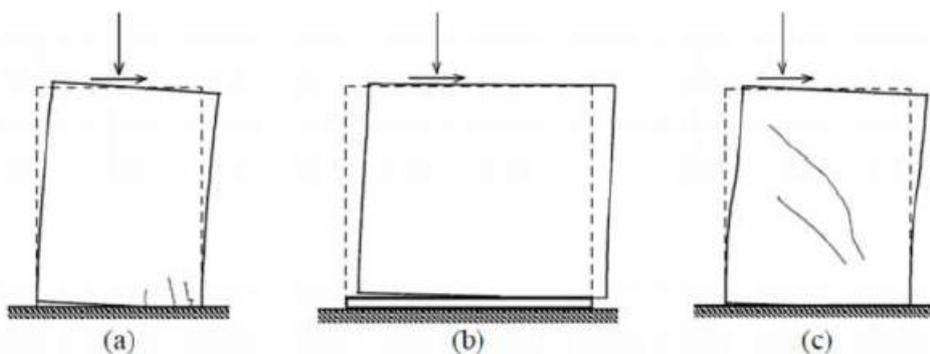


Figura 24 - Mecanismos de rotura das paredes de alvenaria (Almeida, 2022).

As situações de rutura podem ocorrer individualmente ou em conjunto, podendo haver dois modos de colapso no plano: o mecanismo global, onde ocorre uma rutura progressiva de todos os lintéis numa fachada, seguida pelos pilares; e o mecanismo de piso (*soft story*), em que ocorre apenas a rutura dos pilares do piso térreo (Silva, 2016), ver Figura 25.

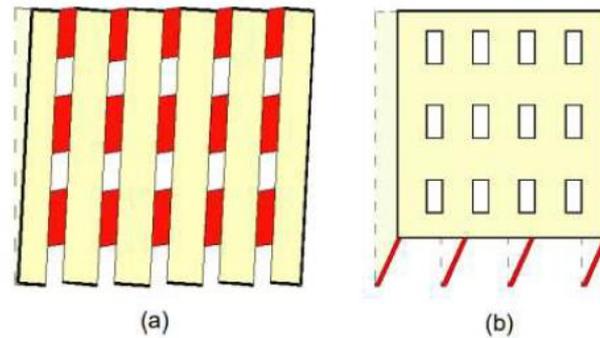


Figura 25 - Mecanismo de colapso global a) e *soft story* b) (Almeida, 2022).

O 3MURI concentra-se principalmente na resposta global da estrutura e nos elementos estruturais afetados pelo comportamento no plano das paredes de alvenaria. No caso da análise pushover, o 3MURI realiza uma análise estática não linear na qual a carga é aplicada de forma gradual. A estrutura simulada é exposta a um padrão de carga lateral estática que simula a força horizontal gerada pelo sismo. Tanto a magnitude total da força quanto o deslocamento da estrutura são incrementados gradualmente ao longo do processo. A resposta total da estrutura, que inclui efeitos não elásticos, é obtida para diversos estados limites. Isso é representado pela curva de capacidade, a qual traça a relação entre o deslocamento de um ponto específico da estrutura (um nó de referência) e a força de corte global na base do edifício. As avaliações realizadas utilizando essa curva dependem do código de construção sísmica escolhido dentre as opções disponíveis. Além disso, também dependem dos valores limite estabelecidos por esse código para determinar se a estrutura atende aos critérios de segurança estabelecidos.

O 3MURI, também fornece informação do padrão de dano da estrutura, o que torna possível ter uma previsão do comportamento de cada elemento de cada parede em nível de dano por representações visuais, tanto em 2D como em 3D.

Se a segurança não for satisfeita, é crucial determinar as intervenções mais adequadas. As intervenções serão principalmente direcionadas para o reforço dos elementos mais solicitados.

Na fase inicial da utilização do 3MURI, é necessário definir a norma adotada para a verificação de segurança, tendo em conta que no caso de estudo presente nesta dissertação é a norma NP EN 1998.

De seguida, é necessário saber os valores das características mecânicas dos materiais. O conceito de "nível de conhecimento" é aplicado somente para determinar as características do material atual e tem como finalidade estabelecer o grau de confiabilidade que o software utilizará para a

resistência média. Assim, na Tabela 3, é apresentada uma lista para cada parâmetro característico do material (S.T.A Data, 2017).

Ao adicionar um novo material ou usar um material existente, é possível selecionar o modelo de resistência ao corte apropriado. O critério de Turnsek e Cacovic descreve um tipo de falha de corte diagonal, sendo recomendado para aplicação em paredes já existentes. Por outro lado, o critério de Mohr-Coulomb representa uma falha de corte por deslizamento e é mais adequado para a alvenaria nova. A escolha entre esses modelos dependerá das características específicas do material e da situação de análise em questão.

O valor convencional da resistência à compressão é empregue para analisar a estrutura sob cargas verticais, e é definido como 70% do valor médio da resistência à compressão. No entanto, ao lidar com alvenaria pré-existente de tijolo, é aconselhável adotar a abordagem baseada no critério de Mohr-Coulomb. Isso possibilita uma análise que melhor se ajusta ao tipo de paredes em avaliação, proporcionando um critério de rotura mais adequado para essa situação específica (S.T.A Data, 2017).

Tabela 3 - Parâmetros característicos dos materiais.

|                                |  |
|--------------------------------|--|
| $E$                            | Módulo de elasticidade   |
| $G$                            | Módulo de distorção  |
| $w$                            | peso específico  |
| $f_m$                          | Resistência média à compressão   |
| $f_{vm0}$                      | Resistência média ao corte sem esforço axial (Mohr-Coulomb)  |
| $f_{vlim}$                     | Limite de resistência ao corte (valor sugerido 2,2 N/mm <sup>2</sup> ) (Mohr-Coulomb)  |
| $\tau$                         | Resistência ao corte (Turnsek e Cacovic)   |
| $f_k$                          | Valor característico resistência à compressão  |
| $\gamma_m$                     | Coefficiente de segurança do material  |
| $FC$                           | Fator de confiança   |
| $f_m, f_{vm0}, f_{vlim}, \tau$ | Estes parâmetros não devem ter em conta a redução do coeficiente de segurança, pois esta redução é efetuada na fase de cálculo do software |

No contexto dos pavimentos, estes são representados através de elementos finitos de laje ortotrópica com 3 ou 4 nós, cada um com 2 graus de liberdade. Esses elementos distribuem as ações horizontais entre as paredes de forma proporcional à sua rigidez. Quanto à contribuição das cargas

verticais, ela é incorporada através da massa modal, a qual é calculada com base no comportamento da laje, considerando se é unidirecional ou bidirecional. O 3MURI também permite definir a rigidez do pavimento, o que afeta a transferência de cargas.

No que diz respeito à formulação tridimensional, o 3MURI emprega um sistema de coordenadas cartesianas globais ( $X, Y, Z$ ). A partir da Figura 26, é evidente que as paredes são definidas pelas coordenadas globais de um ponto de referência, bem como pelo ângulo formado pelo plano com o eixo  $X$ . Isso permite a modelação das paredes como estruturas planas, onde os elementos são categorizados em um sistema de coordenadas locais (Lagomarsino et al., 2013).

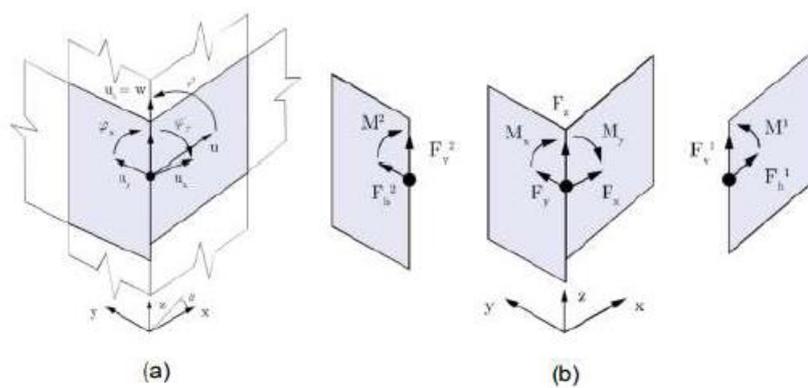


Figura 26 - Formulação tridimensional: a) nó 3D; b) divisão da massa fora do plano (Almeida, 2022).

No que se refere às relações entre força e deformação dos painéis de alvenaria, o 3MURI fundamenta-se na descrição do comportamento não linear desses painéis para diferentes níveis de danos, nomeadamente ND1 - ligeiro, ND2 - moderado, ND3 - considerável, ND4 - próximo da rotura e ND5 – rotura (Figura 27) (Simões, 2018), como se pode observar na Figura 27

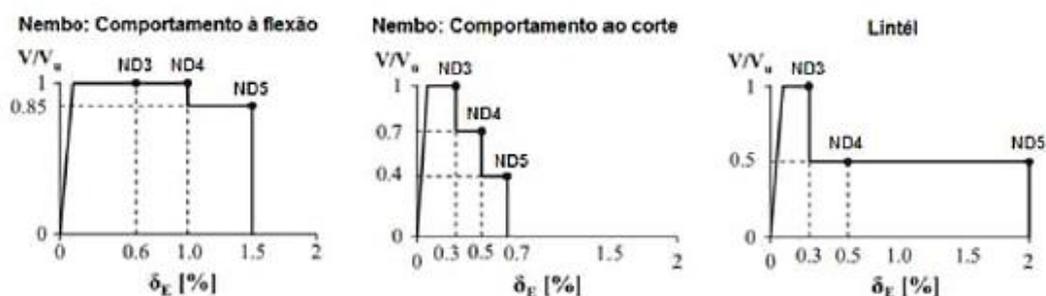


Figura 27 - Relações força-deformação para nembos e lintéis (Almeida, 2022).

É definido cada nível de dano (ND) ao considerar os limites de deslocamento ( $\delta E$ ) e as reduções correspondentes na capacidade de carga, dependendo do tipo de componente estrutural e do modo de falha (Simões et al., 2018). Na Tabela 4, Tabela 5 e Tabela 6, apresenta os critérios empregados pelo

Reforço integrado sísmico e energético de edifícios de alvenaria: modelação numérica da resposta

software 3MURI para calcular os valores finais de flexão e de corte para diferentes componentes estruturais e possíveis modos de rutura (Pedro, 2016; Almeida, 2022). O 3MURI também permite a modelação de alguns reforços sísmicos mencionados no subcapítulo 2.3

Tabela 4 - Modos de rutura por flexão.

| Macroelemento | Esforços últimos  |
|---------------|---|
| Nembo         | $M_u = \frac{Nl}{2} \left(1 - \frac{N}{0,85f_c le}\right)$          |
| Lintel        | $M_u = \frac{hH'_p}{2} \left(1 - \frac{H'_p}{0,85f_{hu} he}\right)$ |

Tabela 5 - Modos de rutura por corte com deslizamento.

| Macroelemento | Esforços últimos           |
|---------------|----------------------------|
| Nembo         | $V_u = l'ef_{vm0} + \mu N$ |
| Lintel        | $V_u = hef_{v0}$           |

Tabela 6 - Modos de rutura por corte com fendilhação.

| Macroelemento | Esforços últimos   |
|---------------|--|
| Nembo/Lintel  | $V_u = le \frac{1,5\tau_0}{b} \sqrt{1 + \frac{N}{1,5\tau_0 le}}$ |

Onde:

$h$  – altura do elemento;

$l$  – largura do elemento;

$e$  – Espessura do elemento;

$M_u$  – momento fletor;

$V_u$  – esforço transversal último;

$N$  – Esforço axial;

$f_c$  – resistência à compressão do elemento de alvenaria;

$H'_p$  – valor máximo entre o esforço axial ( $N$ ) actante no macro elementos e  $H_p$ ;

$H_p$  – menor valor entre a força resistente à tração dos elementos acoplados ao lintel e  $0,4f_{hu}ht$ ;

$f_{hu}$  – resistência à compressão do elemento de alvenaria na direcção horizontal do lintel;

$l'$  - comprimento da secção comprimida;

$f_t$  – resistência ao corte do elemento de alvenaria (coesão);

$\mu$  – coeficiente de atrito;

## Reforço integrado sísmico e energético de edifícios de alvenaria: modelação numérica da resposta

$\tau_0$  – tensão de corte no elemento de alvenaria;

$b$  – coeficiente de esbelteza.

## 4. ANÁLISE ENERGÉTICA DE ESTRUTURAS

### 4.1 Aspetos regulamentares

De acordo com o relatório especial do Painel Intergovernamental para as Mudanças Climáticas (IPCC) sobre os efeitos do aquecimento global, é destacado que a contenção do aumento médio da temperatura global a 1,5°C é um elemento essencial para reduzir consideravelmente os riscos e impactos das mudanças climáticas. Incontestavelmente, já se confirmou à escala global os impactos das alterações climáticas, conseguindo apenas variar estes impactos se, e só se, existir uma redução significativa das emissões globais (República Portuguesa, 2019).

Assim, com o pacto ecológico europeu, que tem como objetivo tornar a Europa o primeiro continente livre de carbono, Portugal aprovou o Roteiro de Neutralidade Carbónica 2050 (RNC2050). Este tem como principal objetivo a diminuição das emissões dos gases com efeitos de estufa para Portugal entre os 85% e 90% até 2050.

Para este objetivo ser possível, é necessária uma transição energética, e o RNC2050 prevê que a produção e consumo de energia deverão ser originadas a partir de fontes renováveis.

Como dito anteriormente, o setor dos edifícios contribui com 36% das emissões totais de carbono. Colocando uma perspetiva europeia, sabe-se que Portugal, no setor energético residencial, em comparação com os outros países europeus é pobre. Todavia, Portugal nunca foi indiferente, tendo participado em vários Protocolos/Acordos de modo a minimizar o aquecimento global e as suas consequências.

Posto isto, os governos portugueses têm promovido várias políticas com o objetivo de reforçar o conforto térmico habitacional, tais como:

- Aprovada em 2002 a legislação para o *Energy Performance of Buildings Directive* (EPBD). A Diretiva 2002/91/EC, é uma diretiva do desempenho energético dos edifícios onde estabelece o certificado de desempenho energético da habitação, definindo os requisitos mínimos (Diretiva 2002/91/CE, 2002);
- Em 2006 foram aprovados vários Decretos-Leis, que transpõem a Diretiva 2002/91/CE:
  - Decreto-Lei n.º 78/2006, onde é aprovado o Sistema Nacional de Certificação Energética e da Qualidade do Ar Interior nos edifícios (Decreto-Lei n.º 78/2006, 2006);

## Reforço integrado sísmico e energético de edifícios de alvenaria: modelação numérica da resposta

- Decreto-Lei n.º 79/2006, aprova o Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em edifícios (RSECE). Este passa por uma revisão do Decreto-Lei n.º 118/98, que tinha como objetivo impor limites máximos da potência dos sistemas necessário a instalar num edifício (Decreto-Lei n.º 79/2006, 2006);
- No mesmo volume do Diário da República, também é aprovado o Decreto-Lei n.º 80/2006, que nulifica o Decreto-Lei n.º 40/90 aprovando o Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE). Este decreto foi pioneiro na perspetiva de impor aos novos edifícios o conforto térmico tanto no inverno como no verão, e também a produção de águas quentes sanitárias de modo a minimizar o consumo energético (Decreto-Lei n.º 80/2006, 2006);
  - Prosseguindo para 2010, o Parlamento Europeu e do Conselho aprovou a Diretiva 2010/31/EU, onde é reformulado a diretiva anteriormente descrita sobre as EPBD. Este veio impor a obrigatoriedade de todos os Estados Membros assegurarem que todos os novos edifícios sejam edifícios nZEB (*nearly Zero Energy Building*) a partir do dia 31 de dezembro de 2020 (P. Santos, 2017);
  - Em 2013, a Diretiva 2010/31/EU foi adaptada para o Decreto-Lei n.º 188/2013, e realizou-se uma revisão a todos os Decretos-Lei de 2006. Esta nova legislação aprovou o Sistema de Certificação Energética dos Edifícios (SCE), o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH) e o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços (RECCS) (Decreto-Lei n.º 118/2013, 2013);
  - Numa nota mais recente, em 2018, o Parlamento europeu e do Conselho aprovou a Diretiva (UE) 2018/844, que visa reformular a Diretiva 2010/31/EU relativamente ao desempenho energético dos edifícios e a Diretiva 2012/27/EU sobre a eficiência energética. Neste, os Estados Membros estabelecem sistemas de automatização e controlo para edifícios não residenciais até 2025, quando os edifícios possuírem um sistema combinado de aquecimento e ventilação superiores a 290 kW. Os Estados Membros também devem realizar inspeções periódicas a estes sistemas se a sua potência nominal for superior a 70 kW (Diretiva 2010/31/UE, 2018);
  - Em 2020 apresentada para a ordem jurídica nacional a diretiva de 2018/844 no Decreto-lei 101-D-/2020 (Decreto-Lei n.º 101-D/2020, 2020). Esta diretiva teve ligeiras atualizações no Decreto-Lei n.º 102/2021 (Decreto-Lei n.º 102/2021, 2021). Estas diretivas regulam o SCE, onde também é aprovado o manual SCE mediante o despacho

da Direção-Geral de Energia e Geologia que coordenam um conjunto de orientações para o processo de avaliação de desempenho energético dos edifícios.

## 4.2 Software EnergyPlus

Devido à crescente importância de combater as alterações climáticas em todo o mundo, muitas jurisdições têm priorizado a redução da pegada de carbono de edifícios novos e existentes. Isso ocorre uma vez que as construções são uma fonte significativa de emissões de gases com efeito estufa e precisam de ser abordadas como parte de uma estratégia mais ampla para combater a mudança climática, o que torna necessário uma ferramenta de cálculo para servir estas necessidades. Assim foi desenvolvida a ferramenta EnergyPlus, que é um programa de simulação energética de edifícios usado para modelar o consumo energético para o aquecimento, arrefecimento entre outros.

Este software é uma junção de vários módulos, como demonstrado na Figura 28, que operam um conjunto de modo a calcular várias variáveis, tais como temperatura e energia necessária de aquecimento/arrefecimento.

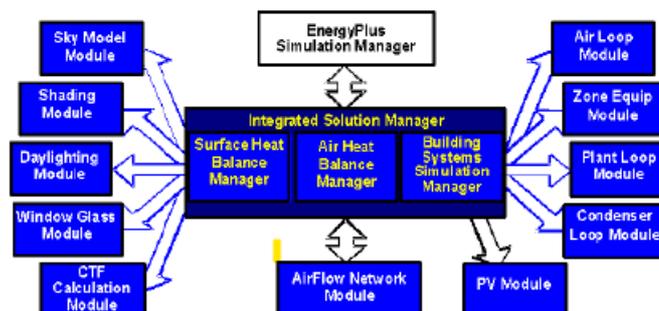


Figura 28 - Esquema do programa EnergyPlus (Esteves, 2021).

O EnergyPlus apenas foi utilizado como um motor de cálculo sendo ainda necessário o uso do OpenStudio e do SketchUp como uma interface gráfica.

O SketchUp é um programa CAD de modelação 3D, tendo como grandes vantagens a sua facilidade de utilizar, e como objetivo deste trabalho, a capacidade de suportar vários plug-ins, tal como o OpenStudio.

O OpenStudio é um plug-in associado ao SketchUp, o que possibilita a fácil utilização do SketchUp no EnergyPlus.

Com a modelação 3D efetuada a partir do SketchUp, todos os dados de entrada para a simulação, tais como, definição de zonas térmicas, definição de cargas térmicas, criação de perfis

horários, são efetuados na interface do OpenStudio para seguidamente serem calculados pelo EnergyPlus. A Figura 29 mostra a interação efetuada pelos três programas.

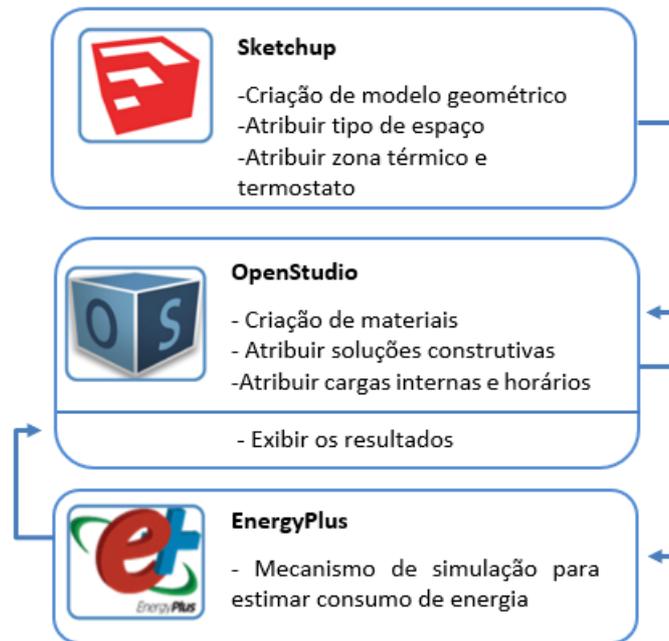


Figura 29 - Ligação entre os programas descritos (Pinto, 2022).

Este software permite a simulação numérica e dinâmica para a avaliação energética em edifício surgindo de dois programas existentes, o BLAST (Building Loads Analysis System Thermodynamics) e DOE-2 (*Department of Energy*) (Viegas, 2016).

No entanto, o EnergyPlus revela-se um software pouco intuitivo e de aprendizagem desafiante. Definir a geometria do edifício e caracterizar os seus elementos construtivos, sistemas técnicos, bem como inserir os dados de operação diretamente na interface IDF-Editor do EnergyPlus, pode ser um processo demorado e complexo. Com o objetivo de facilitar a elaboração de modelos de simulação, surgiram várias ferramentas, interfaces e programas auxiliares. Um exemplo é o OpenStudio, que utiliza o EnergyPlus como mecanismo de cálculo, como já mencionado anteriormente.

De um modo geral, o EnergyPlus é composto por três componentes, ou seja: (a) Gestor de simulação (*Simulation Manager*); (b) Módulo de simulação de balanço térmico e de massa (*Heat and Mass Balance Simulation*); (c) Módulo de simulação dos sistemas do edifício (*Building Systems Simulation*). Assim, tem-se.

- (a) Controla o processo de simulação;
- (b) Baseado no IBLAST (versão de investigação do BLAST com sistema AVAC integrados e simulação das cargas térmicas do edifício);

Reforço integrado sísmico e energético de edifícios de alvenaria: modelação numérica da resposta

- (c) Coordena a comunicação entre o motor de balanço térmico e os módulos dos equipamentos e circuitos AVAC.

A Figura 30 mostra como estas componentes trabalham entre si.

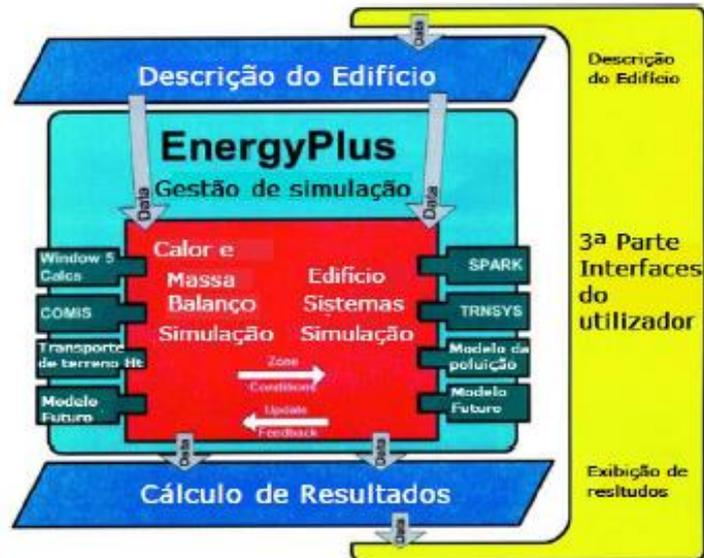


Figura 30 - Estrutura EnergyPlus (Pinto, 2022).

## 5. CASO DE ESTUDO

### 5.1 Apresentação do caso de estudo

O projeto do edifício do estudo foi desenvolvido com base em informações de literatura. O edifício compreende 4 pisos e ocupa uma área de 14,19 x 12,98 m<sup>2</sup>. Está situado na região de Lisboa e está construído em um terreno de tipo B. A planta tipo está representada na Figura 31. Para mais detalhes sobre a geometria, consultar o Anexo A.

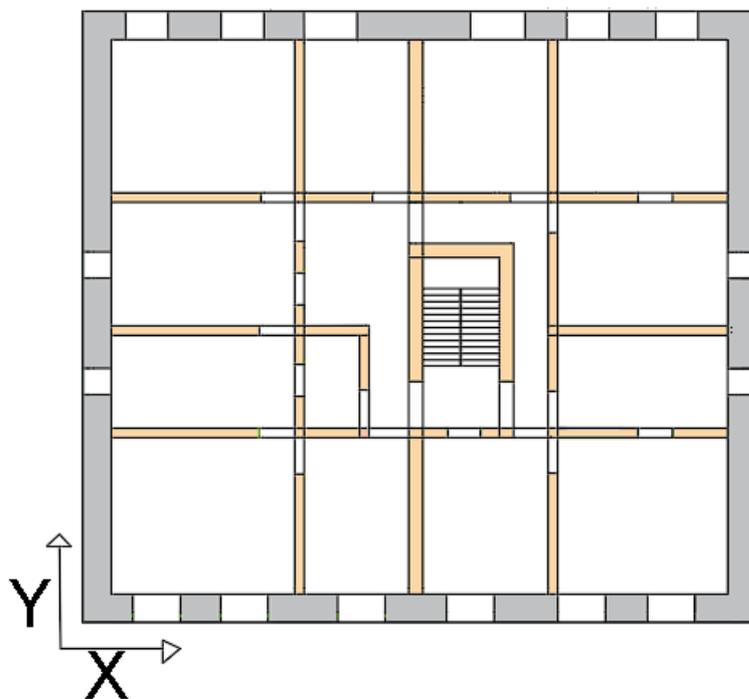


Figura 31- Planta geral do edifício em estudo.

As paredes exteriores são de pedra, onde na base têm 60 cm de espessura, no segundo piso 50 cm, e nos restantes 2 pisos 40cm. Já as paredes interiores, constituídas por tijolo maciço, são constantes em altura, apenas dependendo da sua localização da planta, onde poderão ter 30 cm ou 20 cm. As juntas na alvenaria são de argamassa e cada piso têm uma altura de 3 metros, ver características Tabela 7. Os pavimentos são de madeira, o soalho tem 2,5 cm de espessura, onde as características são demonstradas na Tabela 8. Também no primeiro piso existem 15 janelas e 22 portas, e nos restantes pisos cerca 16 janelas e 21 portas.

Tabela 7 - Propriedades mecânicas das paredes.

| Variável                       | Parede de Pedra | Parede de Tijolo |
|--------------------------------|-----------------|------------------|
| $E$ (N/mm <sup>2</sup> )       | 1000,00         | 1500,00          |
| $G$ (N/mm <sup>2</sup> )       | 350,00          | 500,00           |
| $w$ (kN/mm <sup>3</sup> )      | 20              | 18               |
| $f_m$ (N/cm <sup>2</sup> )     | 180,00          | 320,00           |
| $f_k$ (N/cm <sup>2</sup> )     | 126,00          | 224,00           |
| $\tau$ (N/cm <sup>2</sup> )    | 3,00            | 8,00             |
| $f_{vim}$ (N/mm <sup>2</sup> ) | 1,00            | 2,2              |
| CF                             | 1,2             | 1,2              |
| $\gamma_m$                     | 2,00            | 2,00             |
| Deformação ao corte            | 0,004           | 0,0053           |
| Deformação à flexão            | 0,008           | 0,0107           |

Tabela 8 - Características mecânicas dos pavimentos.

| Pavimentos | E (N/mm <sup>2</sup> ) | G (N/mm <sup>2</sup> ) |
|------------|------------------------|------------------------|
| Madeira    | 12000,00               | 750,00                 |

## 5.2 Análise sísmica

### 5.2.1 Definição do modelo numérico

Com a geometria do edifício estabelecida, é possível prosseguir com a modelação no software 3MURI. Com o auxílio do programa AutoCad, foi possível desenhar a planta do edifício, tendo em consideração que o 3MURI permite desenhar os alinhamentos correspondentes às paredes sobre a imagem. De seguida definiram-se os materiais utilizados neste edifício, ou seja, pedra, tijolo, que passa por atribuir as características mecânicas dos materiais.

De seguida, definiu-se a espessura das paredes e o material a ser utilizado em cada alinhamento, assim como a altura de casa piso. Com as paredes já definidas passou-se à modelação das aberturas onde apenas é preciso definir as alturas relativamente ao pavimento, onde as portas têm uma altura de 250 cm e janelas com 60 cm de altura.

## Reforço integrado sísmico e energético de edifícios de alvenaria: modelação numérica da resposta

Já no pavimento, este foi dividido em 15 partes, onde algumas tomam a direção X e outras a direção Y como se pode observar no anexo A. Assim, para a modelação dos outros pisos basta apenas duplicar o piso térreo, apenas alterando a espessura das paredes exteriores ao longo da altura.

Por fim, com base no EC0, foi possível construir a tabela de cargas, Tabela 9, presentes em cada elemento do edifício e os coeficientes a aplicar à ação de sobrecarga, ou seja:  $\varphi_0 = 0,7$ ;  $\varphi_1 = 0,5$  e  $\varphi_2 = 0,3$ .

Tabela 9 - Cargas da estrutura.

| Elemento  | Cargas Permanentes (Peso Próprio + restantes cargas permanentes) (kN/m <sup>2</sup> ) | Sobrecarga (kN/m <sup>2</sup> ) |
|-----------|---|---------------------------------|
| Pavimento | 0,9+0,6=1,5   | 2,0                             |
| Escadas   | 0,9+0,6=1,5   | 2,0                             |
| Cobertura | 0,9+0,6=1,5   | 0                               |

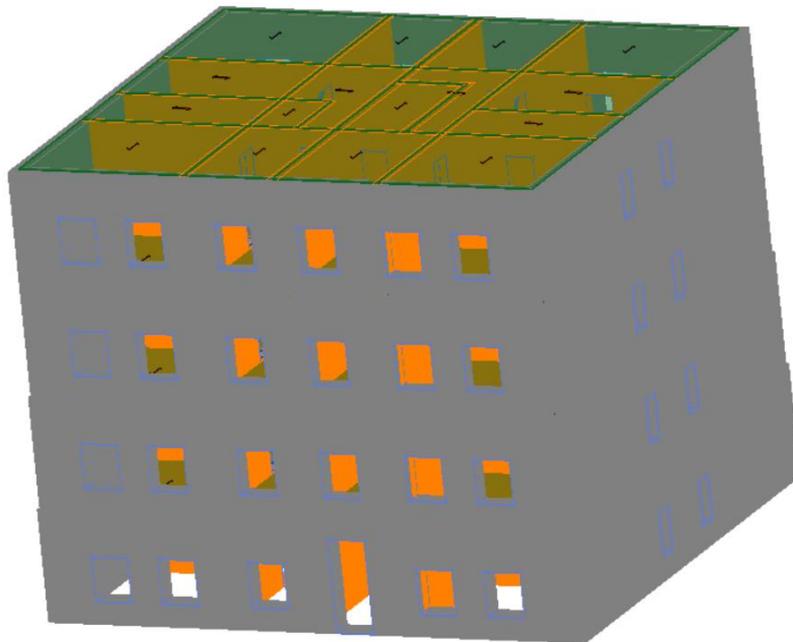


Figura 32 - Vista em perspectiva do modelo numérico 3D.

### 5.2.2 Validação do modelo numérico

De seguida, procedeu-se à verificação da estrutura face às cargas verticais e à validação do modelo. Para esta verificação fez-se uma comparação da massa obtida na análise feita pelo software com a massa calculada manualmente. Primeiramente, como se verifica na Figura 33, foi feita uma verificação vertical recorrendo ao software, onde se observa que todas as paredes estão em segurança.

| Wall | Failed piers | Ned/NRd Max | hef/tef Max |
|------|--------------|-------------|-------------|
| 1    | 0            | 0,76        | 7,05        |
| 2    | 0            | 0,66        | 7,05        |
| 3    | 0            | 0,69        | 7,05        |
| 4    | 0            | 0,66        | 7,05        |
| 5    | 0            | 0,54        | 14,55       |
| 6    | 0            | 0,32        | 9,70        |
| 7    | 0            | 0,56        | 14,55       |
| 8    | 0            | 0,43        | 14,55       |
| 9    | 0            | 0,42        | 14,55       |
| 10   | 0            | 0,56        | 14,55       |
| 11   | 0            | 0,48        | 14,55       |
| 12   | 0            | 0,27        | 9,70        |
| 13   | 0            | 0,48        | 9,70        |
| 14   | 0            | 0,32        | 14,55       |

Figura 33 - Verificação vertical.

No caso da massa calculada manualmente, as paredes de pedra e de tijolo foram obtidas através das suas dimensões e dos seus pesos volúmicos. Já para os pavimentos, estes foram calculados tendo em conta a área individual de cada laje, e as cargas presentes na mesma, tendo em conta as cargas permanentes, e 15% da sobrecarga. Assim, na Tabela 10, apresentam-se as massas. Seguidamente, após feita a análise modal, é possível obter a massa do edifício e de seguida fazer a comparação, como se pode ver na Tabela 11:

Tabela 10 - Cálculo da massa do edifício.

| Elemento         | Volume (m <sup>3</sup> ) | Área (m <sup>2</sup> ) | Massa (ton) | Total (ton) |
|------------------|--------------------------|------------------------|-------------|-------------|
| Parede de Pedra  | 292,36                   | -                      | 596,248     | 1033,847    |
| Parede de Tijolo | 168,36                   | -                      | 309,018     |             |
| Lajes            | -                        | 182,75                 | 128,580     |             |

Tabela 11 - Comparação da massa do modelo com a massa do edifício.

| Massa do edifício (ton) | Massa do modelo (ton) | Variação (%) |
|-------------------------|-----------------------|--------------|
| 1033,8                  | 1042,7                | 0,85         |

### 5.2.3 Análise modal

Na análise modal, o número de modos de vibração é calculado automaticamente, levando em consideração que a avaliação sísmica será conduzida usando um perfil de forças que abrange mais de 90% da massa da estrutura, selecionando-se os modos cujos quais a soma das massas modais direcionais acumuladas corresponde a pelo menos 90% da massa total da estrutura. Dessa forma, na Tabela 12, é possível observar os primeiros 10 modos de vibração. Os modos de vibração um e cinco ocorrem predominantemente na direção X, enquanto os modos dois e oito ocorrem na direção Y. A Figura 34 ilustra como as massas acumuladas variam em relação à frequência dos modos de vibração.

Tabela 12 - Características dos primeiros 10 modos de vibração.

| Modos | Frequência (Hz) | Mx (%) | Mx acum. (%) | My (%) | My acum. (%) | Configuração modal            |
|-------|-----------------|--------|--------------|--------|--------------|-------------------------------|
| 1     | 2,77            | 81,88  | 82           | 0,14   | 0            | Modo fundamental da direção X |
| 2     | 3,47            | 0,16   | 82           | 78,59  | 79           | Moda fundamental da direção Y |
| 3     | 4,17            | 0,10   | 82           | 0,39   | 79           | Modo fundamental de torção    |
| 4     | 6,81            | 0      | 82           | 0      | 79           |                               |
| 5     | 7,25            | 11,47  | 94           | 0,08   | 79           | Modo de vibração da direção X |
| 6     | 7,78            | 0      | 94           | 0,47   | 80           |                               |
| 7     | 8,90            | 1,76   | 95           | 0,14   | 80           |                               |
| 8     | 9,11            | 0,14   | 95           | 12,95  | 93           | Modo de vibração da direção Y |
| 9     | 9,53            | 0,01   | 95           | 0,33   | 93           |                               |

|    |       |   |    |   |    |  |
|----|-------|---|----|---|----|--|
| 10 | 10,46 | 0 | 95 | 0 | 93 |  |
|----|-------|---|----|---|----|--|

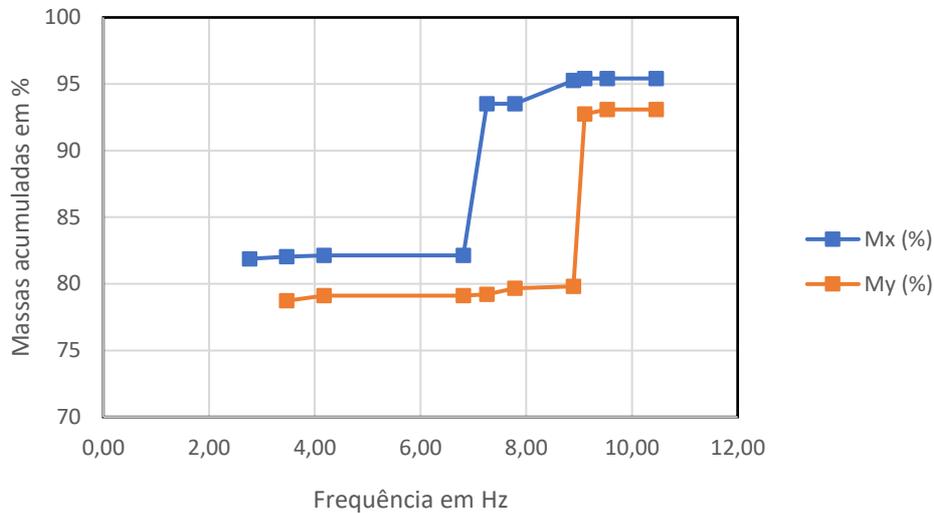


Figura 34 - Evolução da massa modal direcional acumulada em função da frequência.

A seguir, são apresentadas a planta e dois alçados correspondentes aos modos de vibração fundamentais da estrutura. Para o modo de vibração na direção X, são destacadas as paredes PX1 e PX6, enquanto na direção Y são destacadas as paredes PY1 e PY7. Detalhes adicionais sobre estas configurações podem ser encontrados no Anexo B e a legenda relativa à configuração dos danos, está presente no Anexo E.

No primeiro modo de vibração, como ilustrado na Figura 35, é notável uma translação na direção X. Observa-se que toda a massa se desloca de maneira uniforme para um único lado, caracterizando assim esse modo de vibração como o modo fundamental na direção X. No segundo modo de vibração, conforme representado na Figura 36, ocorre uma translação na direção Y. Este modo de vibração é identificado como o modo fundamental na direção Y. Na Figura 37, é possível observar uma rotação no sentido anti-horário, e os alçados deslocam-se em sentidos opostos, tornando este o modo fundamental de torção.

Na Figura 38 é possível observar uma translação na direção X, caracterizando assim um modo de vibração de segunda ordem na direção X. Na Figura 39, é visível uma translação em Y acompanhada por uma ligeira rotação no sentido horário, identificando esse modo como um modo de vibração na direção Y.

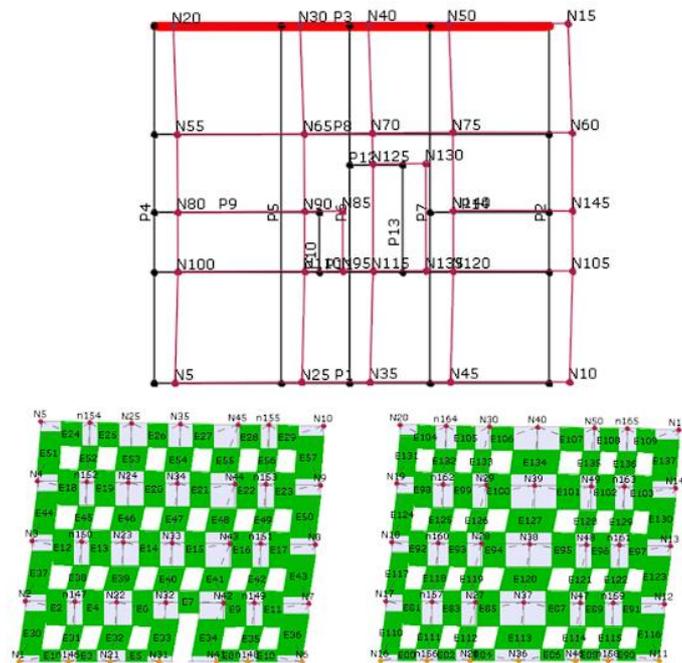


Figura 35 - Primeiro modo de vibração: Planta e alçados das paredes PX1 e PX6.

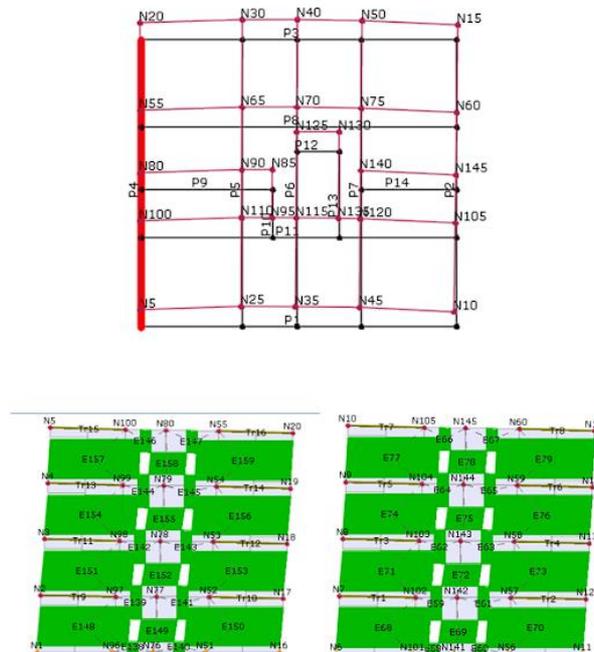


Figura 36 - Segundo modo de vibração: Planta e alçados das paredes PY1 e PY7.

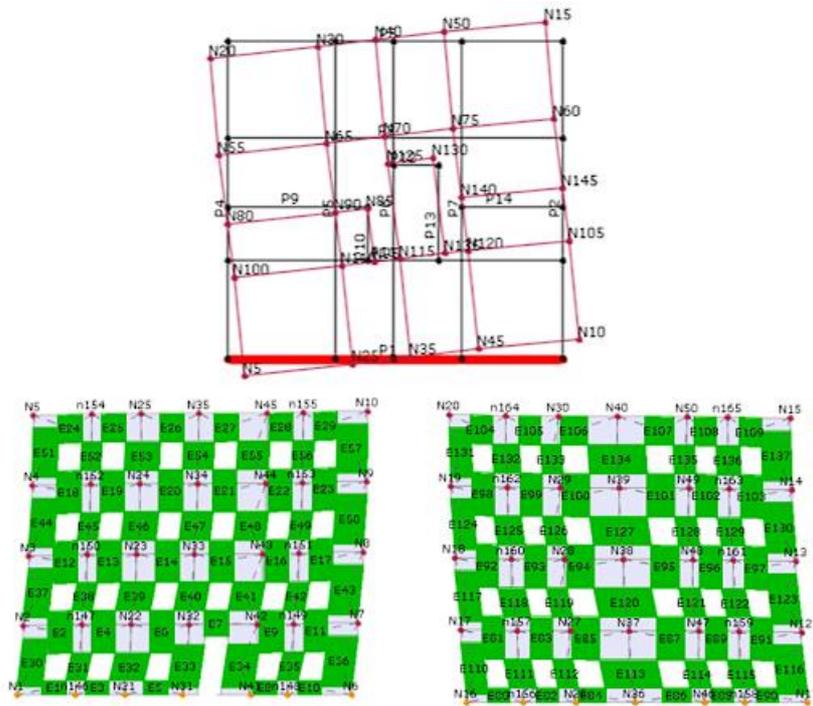


Figura 37 - Terceiro modo de vibração: Planta e alçados PX1 e PX6.

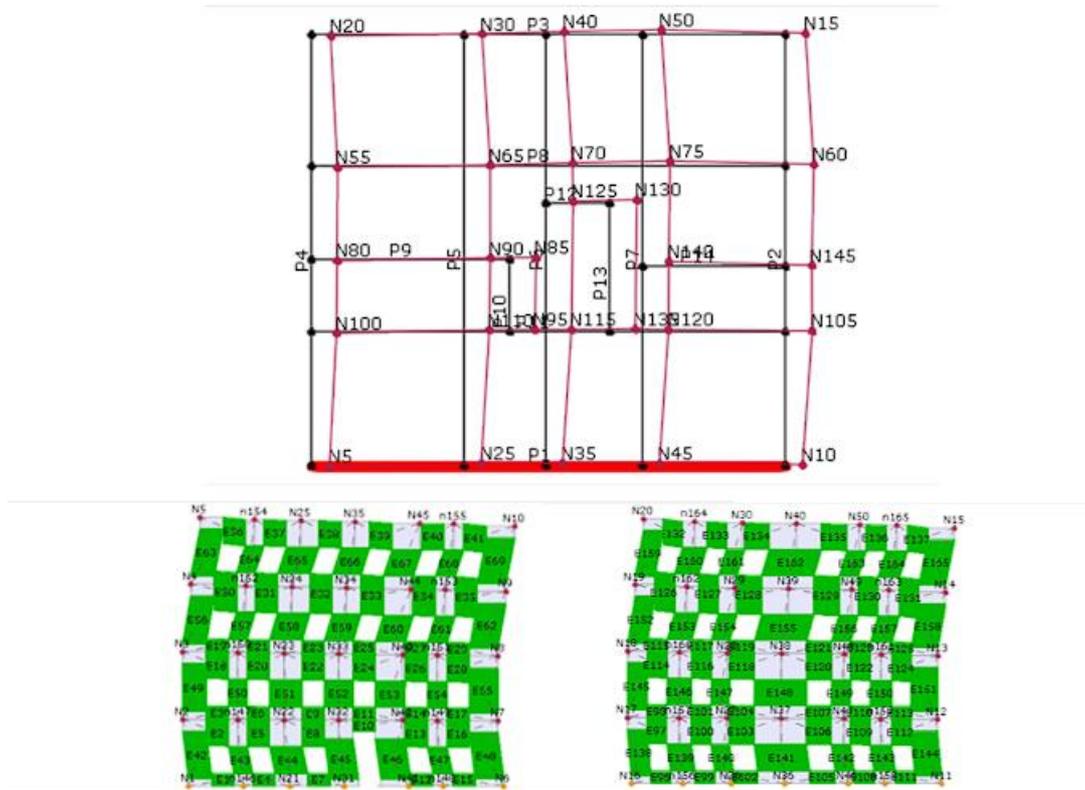


Figura 38 - Quinto modo de vibração: Planta e alçados das paredes PX1 e PX6.

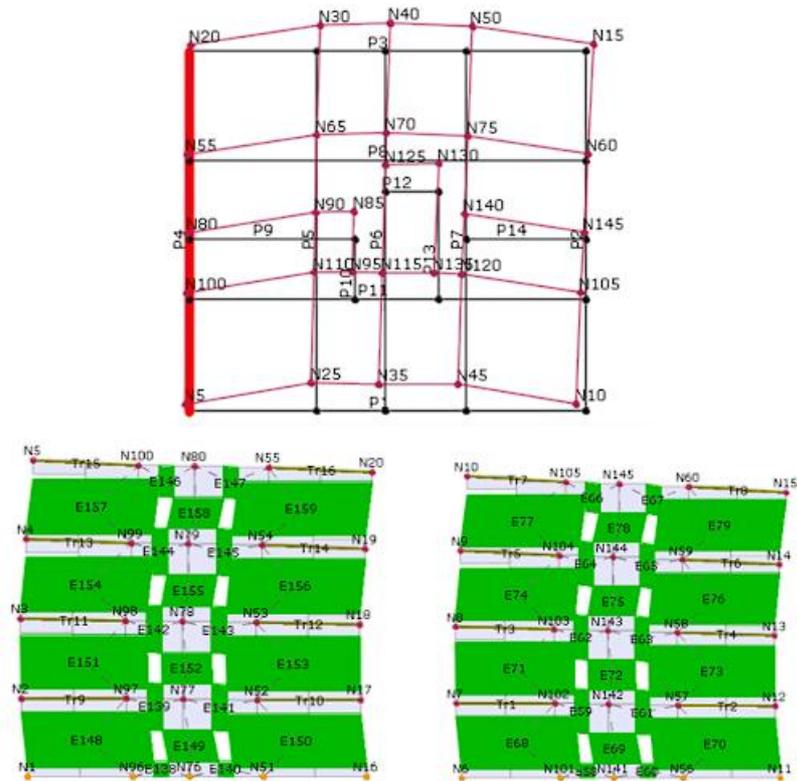


Figura 39 - Oitavo modo de vibração: Planta e alçados das paredes PY1 e PY7.

### 5.2.4 Curvas de capacidade

As curvas de capacidade são geradas ao submeter gradualmente a estrutura a forças laterais estáticas crescentes, enquanto simultaneamente se monitoriza o corte basal e o deslocamento no topo da estrutura. Normalmente, este deslocamento é medido no centro de massa do edifício do pavimento no topo do edifício. Esse procedimento é especialmente relevante para pavimentos flexíveis, como é o caso deste edifício, onde esse ponto é considerado um nó de controlo. O objetivo das curvas de capacidade é ilustrar a resposta não linear da estrutura, fornecendo informações sobre sua resistência, rigidez e capacidade de deformação (Almeida, 2022).

De maneira geral, a construção das curvas de capacidade envolve três fases distintas. A primeira fase corresponde ao comportamento elástico linear, onde a estrutura responde de forma proporcional às forças aplicadas, mantendo sua rigidez original. A segunda fase inicia quando os primeiros elementos estruturais começam a sofrer danos, resultando em uma diminuição da rigidez da estrutura, mas ainda com a capacidade de suportar cargas. Nessa fase, a estrutura atinge a sua resistência máxima. É possível observar a partir desta etapa uma eventual diminuição da força conforme os deslocamentos aumentam. Já a terceira fase termina quando se atinge o deslocamento último da estrutura (Silva, 2016). Na Figura 40, o deslocamento é estabelecido quando o valor máximo da força basal se reduz cerca de 30%, relativamente ao máximo. No EC8-3 a redução indicada é de 20%, que será usada aquando da avaliação da estrutura.

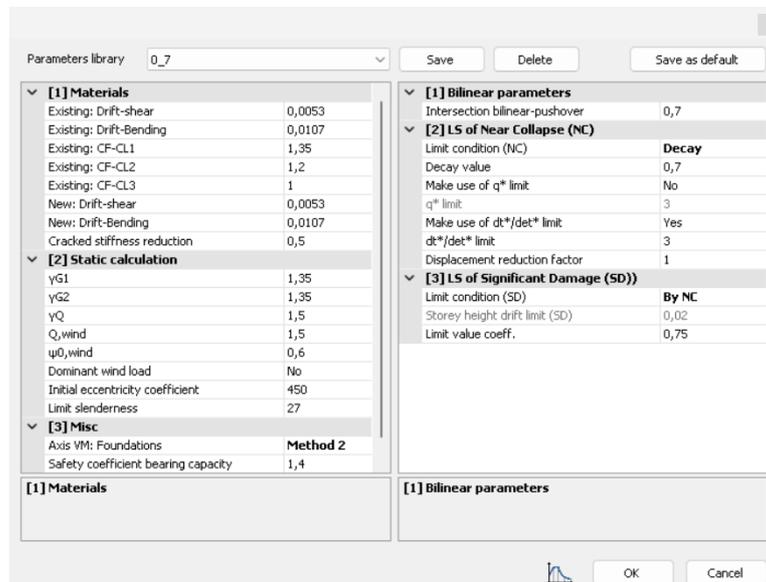


Figura 40 - Alteração da definição do deslocamento último (redução de 20% para 30% da força máxima).

São utilizados quatro perfis diferentes de distribuição vertical de forças horizontais. O primeiro perfil é chamado de "uniforme", onde as cargas são aplicadas proporcionais à massa da estrutura. O

segundo perfil é o "triangular", no qual as cargas são distribuídas de forma triangular e crescente em altura. O terceiro perfil leva em consideração a forma do modo fundamental de vibração, com a carga proporcional ao modo fundamental nas direções X e Y (modo 1 e modo 2 da Tabela 12). O último perfil, conhecido como "multi-modal", considera a distribuição das forças proporcional aos modos de vibração mais importantes, ou seja, aqueles cuja soma das massas mobilizadas excede 90%.

Como critério de paragem, o 3MURI para no último ponto antes de atingir a redução de força pretendida.

Da Figura 41 à Figura 48, observam-se resultados das curvas de capacidade e de distribuição de danos da estrutura, para os casos de carga sem excentricidade, nas diferentes direções e sentidos.

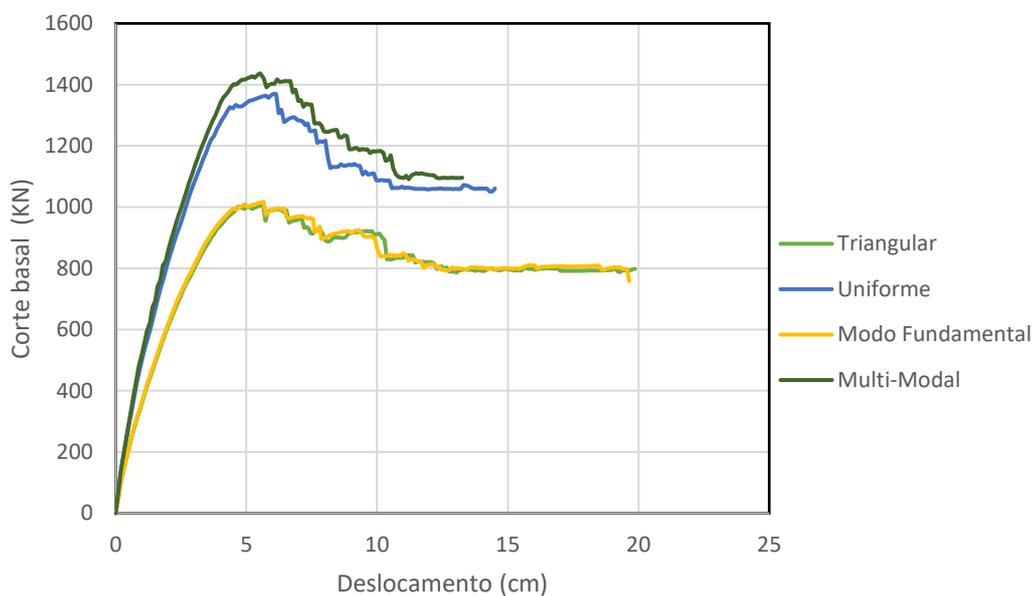


Figura 41 - Curva de capacidade do caso de carga na direção X, sem excentricidade no sentido positivo.

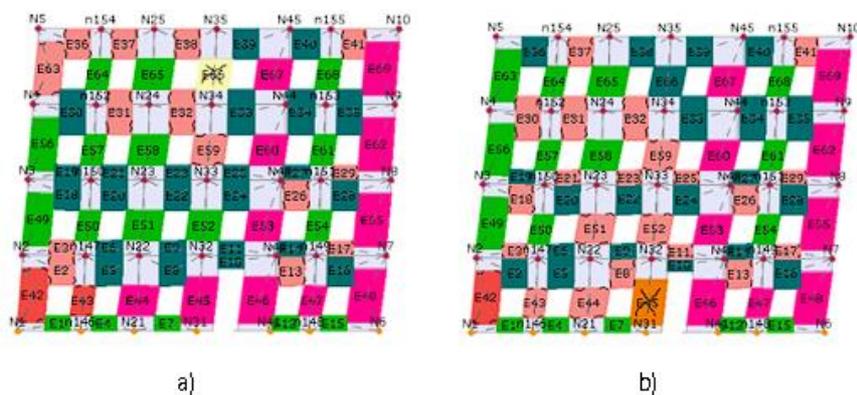


Figura 42 - Distribuição de danos na parede PX1 para a força máxima: a) distribuição uniforme; b) modo fundamental (carga na direção +X).

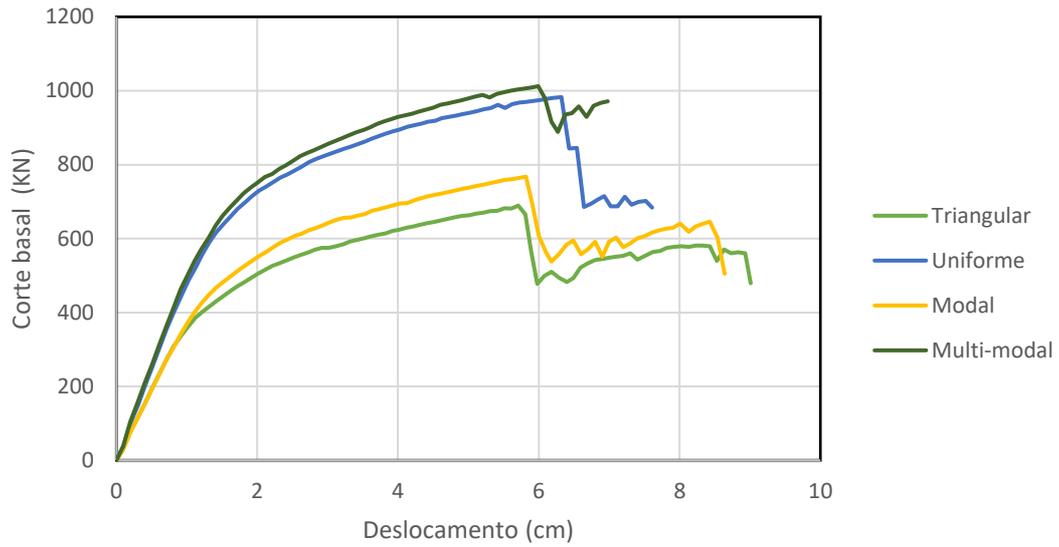


Figura 43 - Curva de capacidade do caso de carga na direção X, sem excentricidade no sentido negativo.

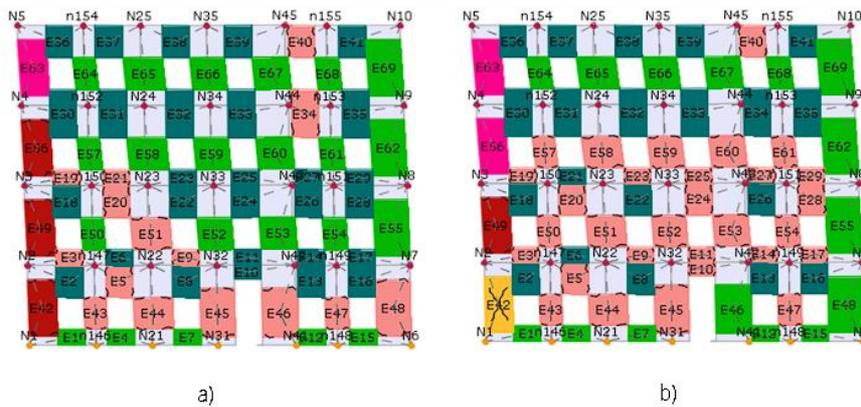


Figura 44 - Distribuição de danos na parede PX1 para a força máxima: a) distribuição uniforme; b) modo fundamental (carga na direção -X).

# Reforço integrado sísmico e energético de edifícios de alvenaria: modelação numérica da resposta

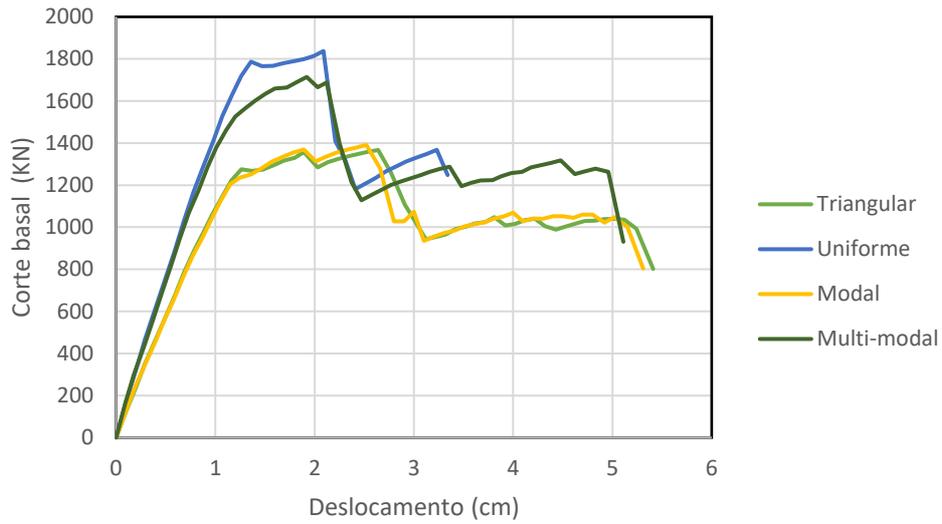


Figura 45 - Curva de capacidade do caso de carga na direção Y, sem excentricidade no sentido positivo.

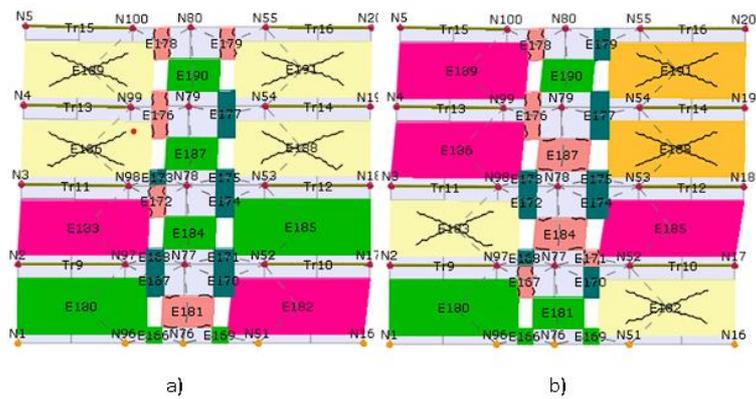


Figura 46 - Distribuição de danos na parede PY1 ara a força máxima: a) distribuição uniforme; b) modo fundamental (carga na direção +Y).

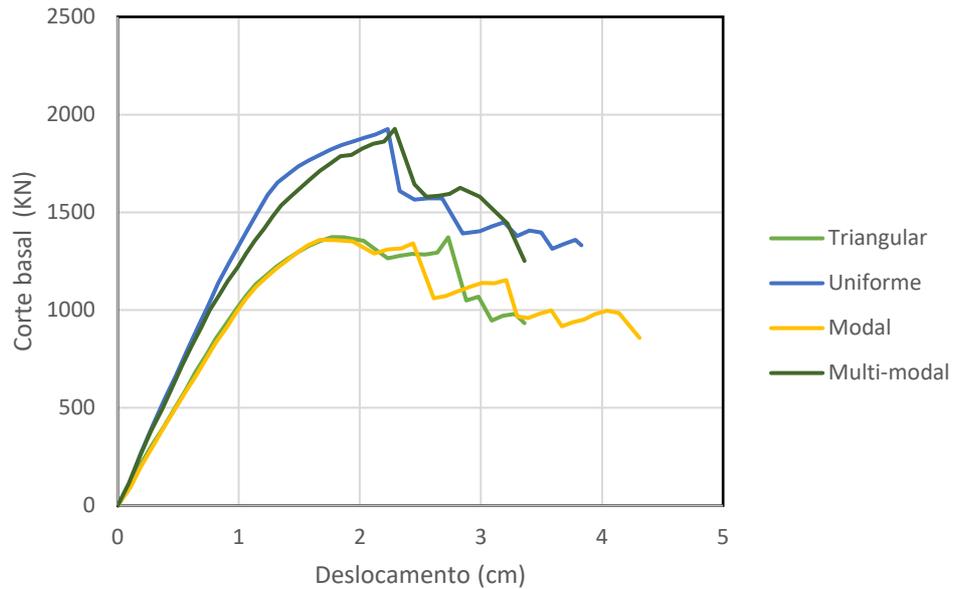


Figura 47 - Curva de capacidade do caso de carga na direção Y, sem excentricidade no sentido negativo.

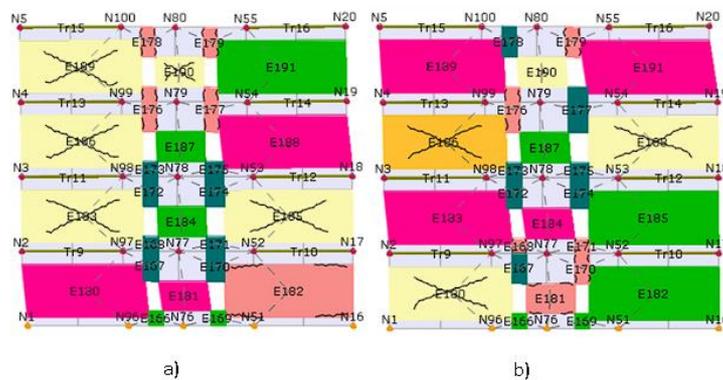


Figura 48 - Distribuição de danos na parede PY1 para a força máxima: a) distribuição uniforme; b) modo fundamental. Ambos para o caso de carga direção Y, sem excentricidade no sentido negativo.

Com as curvas de capacidade presentes, é possível verificar que a curva de capacidade uniforme é bastante semelhante à curva multi-modal, pois a curva multi-modal mobiliza mais de 90% da massa da estrutura. Também é possível concluir que a curva de capacidade do modo fundamental é bastante semelhante ao modo triangular sendo que esta emula as forças do primeiro modo de vibração. Constatase também que as curvas multi-modal e uniforme têm uma maior capacidade de corte basal em relação aos outros modos de carga, sendo isto devido ao facto de as duas primeiras curvas, mobilizarem mais massa que as restantes.

Tendo em atenção a necessidade de se considerarem 2 perfis de forças, como estipulado pelo EC8 parte 3, nesta dissertação serão considerados o perfil uniforme e o perfil do modo fundamental.

### 5.2.5 Definição da ação sísmica

Como mencionado previamente no capítulo 4, a determinação da ação sísmica é realizada com base no EC8 Parte 1. O valor de referência da aceleração máxima na base ( $a_g$ ) para a região de Lisboa está especificado no anexo nacional. Para a ação sísmica tipo 1, que corresponde à zona sísmica 1.3, o valor é  $a_{gr} = 1,5 \text{ m/s}^2$ . Já para a ação sísmica tipo 2, associada à zona sísmica 2.3, o valor é  $a_{gr} = 1,7 \text{ m/s}^2$ . Esses valores são então multiplicados pelos fatores indicados no quadro NA.I do EC8 Parte 3. A Tabela 13 apresenta os valores finais de aceleração de pico regulamentar para os dois tipos de ações.

Tabela 13 – Valores da ação de  $a_g$  na região de Lisboa.

| Lisboa | Ação Sísmica Tipo 1 ( $\text{m/s}^2$ ) | Ação Sísmica Tipo 2 ( $\text{m/s}^2$ ) |
|--------|--|--|
| NC     | 2,43                                   | 2,26                                   |
| SL     | 1,13                                   | 1,43                                   |
| DL     | 0,44                                   | 0,80                                   |

Dado que o 3MURI não permite a alteração dos parâmetros do espectro de resposta e requer o uso de parâmetros específicos, é necessário calcular os espectros de resposta externamente e então introduzi-los no software. Com a aceleração de pico que foi calculada anteriormente e utilizando as equações fornecidas (Equação 1) juntamente com os parâmetros da Tabela N.A-3.2, é possível elaborar os espectros de resposta que serão utilizados na análise. Esse processo permite gerar os gráficos que descrevem a resposta da estrutura para diferentes períodos, obtidos nas Figura 49 e Figura 50.

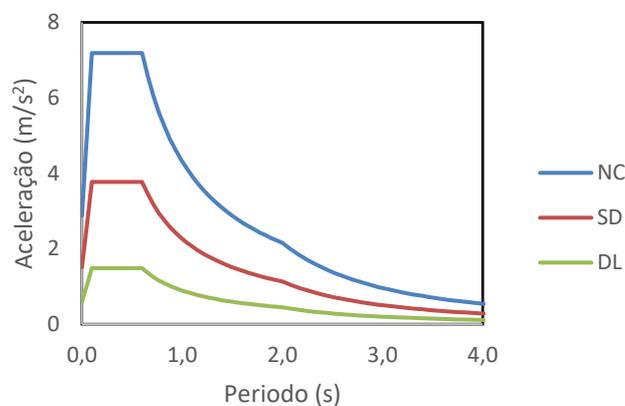


Figura 49 - Espectro de resposta para Lisboa da ação sísmica Tipo 1.

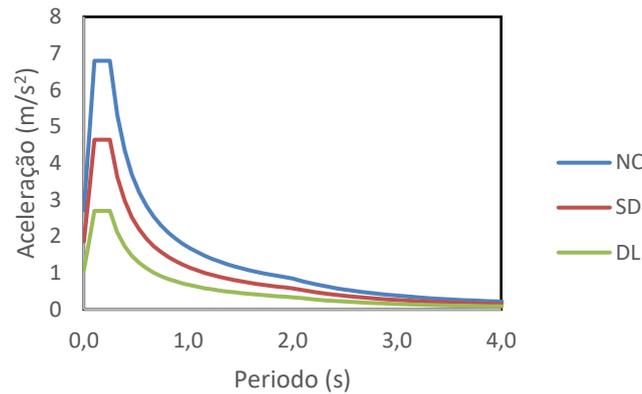


Figura 50 - Espectro de resposta para Lisboa da ação sísmica Tipo 2.

#### 5.2.6 Verificações regulamentares

Uma vez que todos os dados foram inseridos no software, é possível realizar a avaliação da estrutura. Essa avaliação é focada no comportamento da estrutura no plano das paredes. No entanto, posteriormente, também será realizada uma avaliação que considera o comportamento fora do plano das paredes.

Na Figura 51, é apresentado um exemplo de uma curva linear elaborada de acordo com a norma italiana (como referência). No início, a curva é linear até atingir um ponto de referência a 70% da força máxima. A partir desse ponto, ocorre um equilíbrio das forças acima (verde) e abaixo (amarelo) da curva original (Repubblica Italiana, 2018).

Os resultados da avaliação sísmica do edifício são mostrados usando um coeficiente que compara a capacidade do edifício com a exigência do sismo a que está sujeito, em relação ao deslocamento lateral de um ponto de referência. Quando esse coeficiente é maior que a unidade, significa que o edifício tem mais capacidade do que exigência do sismo, estando seguro regulamentarmente para esse estado limite. Na Figura 51, também se pode constatar os valores das capacidades e das exigências,  $d_m$  (deslocamento máximo de um sistema com múltiplos graus de liberdade) e  $d_t$  (deslocamento objetivo para um sistema com múltiplos graus de liberdade) respetivamente, do perfil de carga sem excentricidade, na direção X.

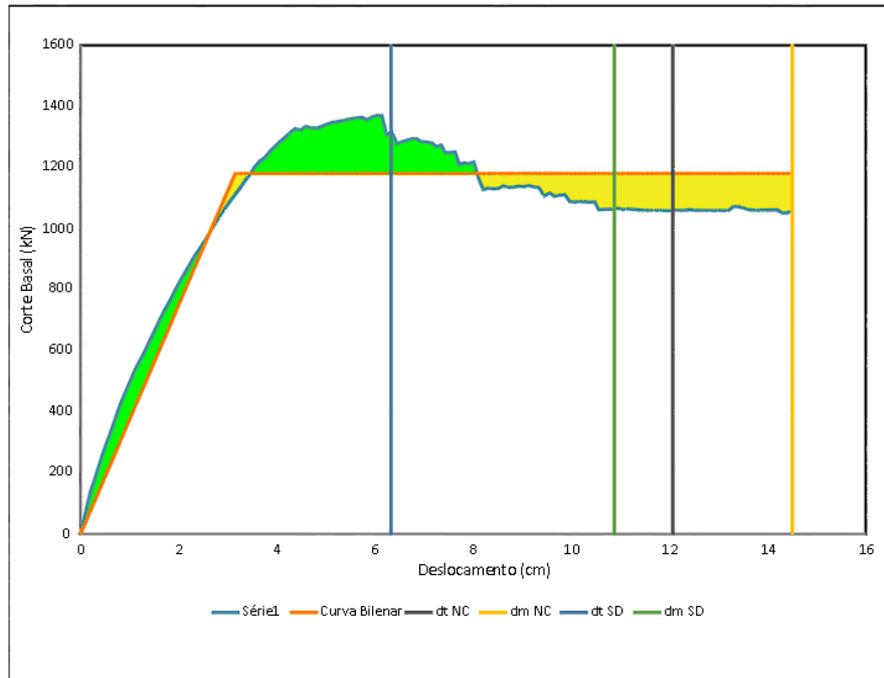


Figura 51 - Curva de capacidade e curva bilinear.

Como provado anteriormente, apenas será feita a análise para os casos de carga uniforme e do modo fundamental no subcapítulo 5.2.4. Na Tabela 14 e Tabela 15 apresentam-se os coeficientes relativos à avaliação do edifício dependendo da ação sísmica.

Tabela 14 - Resultados da avaliação para a ação sísmica Tipo 1.

| Direção X               |           |         |             |             |             |
|-------------------------|-----------|---------|-------------|-------------|-------------|
| Perfil da força sísmica | Exc. (cm) | Sentido | NC          | SD          | DL          |
| Uniforme                | 0,00      | +       | 1,12        | 1,60        | 1,30        |
|                         | 0,00      | -       | <b>0,56</b> | <b>0,80</b> | <b>0,92</b> |
|                         | 64,90     | +       | <b>0,89</b> | 1,27        | 1,30        |
|                         | 64,90     | -       | <b>0,56</b> | <b>0,80</b> | <b>0,93</b> |
|                         | -64,90    | +       | 1,10        | 1,58        | 1,29        |
|                         | -64,90    | -       | <b>0,56</b> | <b>0,80</b> | <b>0,91</b> |
| Modo fundamental        | 0,00      | +       | <b>0,94</b> | 1,34        | 1,20        |
|                         | 0,00      | -       | <b>0,60</b> | <b>0,86</b> | <b>0,86</b> |
|                         | 64,90     | +       | <b>0,87</b> | 1,24        | 1,23        |
|                         | 64,90     | -       | <b>0,67</b> | <b>0,96</b> | <b>0,85</b> |
|                         | -64,90    | +       | <b>1,00</b> | 1,42        | 1,21        |
|                         | -64,90    | -       | <b>0,60</b> | <b>0,86</b> | <b>0,86</b> |
| Direção Y               |           |         |             |             |             |
| Uniforme                | 0,00      | +       | <b>0,46</b> | <b>0,71</b> | 1,47        |
|                         | 0,00      | -       | <b>0,64</b> | <b>0,96</b> | 1,43        |
|                         | 70,95     | +       | <b>0,44</b> | <b>0,69</b> | 1,47        |
|                         | 70,95     | -       | <b>0,48</b> | <b>0,73</b> | 1,34        |
|                         | -70,95    | +       | <b>0,67</b> | 1,00        | 1,33        |
|                         | -70,95    | -       | <b>0,63</b> | <b>0,95</b> | 1,32        |
| Modo fundamental        | 0,00      | +       | <b>0,47</b> | <b>0,69</b> | 1,09        |
|                         | 0,00      | -       | <b>0,41</b> | <b>0,61</b> | 1,10        |
|                         | 70,95     | +       | <b>0,47</b> | <b>0,70</b> | 1,22        |
|                         | 70,95     | -       | <b>0,44</b> | <b>0,66</b> | 1,21        |
|                         | -70,95    | +       | <b>0,41</b> | <b>0,62</b> | 1,00        |
|                         | -70,95    | -       | <b>0,36</b> | <b>0,53</b> | <b>0,96</b> |

Tabela 15 - Resultados da avaliação para a ação sísmica Tipo 2.

| Direção X               |           |         |              |              |              |
|-------------------------|-----------|---------|--------------|--------------|--------------|
| Perfil da força sísmica | Exc. (cm) | Sentido | DL           | SD           | NC           |
| Uniforme                | 0         | +       | 2,84         | 3,121        | 1,722        |
|                         | 0         | -       | 1,426        | 1,568        | 1,217        |
|                         | 64,9      | +       | 2,263        | 2,486        | 1,716        |
|                         | 64,9      | -       | 1,415        | 1,555        | 1,223        |
|                         | -64,9     | +       | 2,802        | 3,079        | 1,707        |
|                         | -64,9     | -       | 1,419        | 1,56         | 1,207        |
| Modo fundamental        | 0         | +       | 2,373        | 2,607        | 1,585        |
|                         | 0         | -       | 1,526        | 1,677        | 1,136        |
|                         | 64,9      | +       | 2,199        | 2,416        | 1,632        |
|                         | 64,9      | -       | 1,697        | 1,864        | 1,12         |
|                         | -64,9     | +       | 2,525        | 2,774        | 1,603        |
|                         | -64,9     | -       | 1,534        | 1,686        | 1,144        |
| Direção Y               |           |         |              |              |              |
| Uniforme                | 0         | +       | <b>0,874</b> | <b>0,96</b>  | 1,224        |
|                         | 0         | -       | 1,359        | 1,493        | 1,249        |
|                         | 70,95     | +       | <b>0,832</b> | <b>0,914</b> | 1,213        |
|                         | 70,95     | -       | <b>0,973</b> | 1,069        | 1,154        |
|                         | -70,95    | +       | 1,434        | 1,576        | 1,109        |
|                         | -70,95    | -       | 1,37         | 1,505        | 1,147        |
| Modo fundamental        | 0         | +       | 1,024        | 1,125        | 1,05         |
|                         | 0         | -       | <b>0,895</b> | <b>0,983</b> | 1,11         |
|                         | 70,95     | +       | 1,017        | 1,118        | 1,179        |
|                         | 70,95     | -       | <b>0,907</b> | <b>0,996</b> | <b>0,974</b> |
|                         | -70,95    | +       | <b>0,967</b> | 1,062        | 1,215        |
|                         | -70,95    | -       | <b>0,785</b> | <b>0,863</b> | <b>0,97</b>  |

De acordo com o EC8, para os edifícios de importância II, apenas é necessário verificar o estado limite SD, mas procedeu-se à verificação dos três estados de limite (DL, SD e NC). É possível concluir que o edifício não se encontra em segurança o que torna necessário efetuar um reforço sísmico da estrutura.

### 5.2.7 Análise Paramétrica

Neste capítulo é apresentada uma análise paramétrica para avaliar a influência da ação sísmica na avaliação da segurança sísmica do edifício em estudo. Para esta finalidade considerou-se uma ação sísmica com base na aceleração da gravidade, em que cada valor de  $PGA$  ( $m/s^2$ ) será uma percentagem da aceleração da gravidade,  $g$  ( $9,81 m/s^2$ ). A verificação é feita através do EC8, onde é feita a análise dos perfis de carga uniforme e do modo fundamental. Para além dos valores simulados, também foi calculado, em função de percentagem de  $g$ , o valor do  $PGA$  de Beja (terreno tipo B), e feita uma avaliação deste valor sobre os resultados das curvas. Da Figura 52 à Figura 57, é possível observar os resultados obtidos.

Para o coeficiente de NC, os valores de Beja correspondem a 21% de  $g$  no tipo 1 e 19% de  $g$  no tipo 2. Assim é possível observar se o edifício, quando situado em Beja, está em segurança.

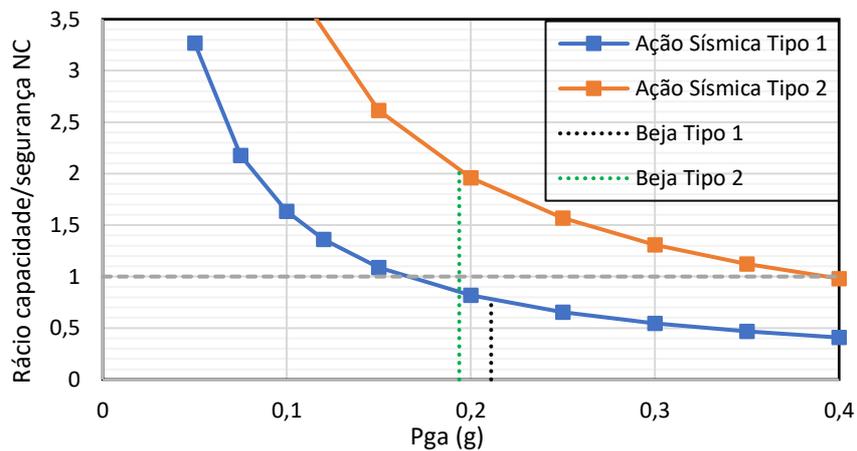


Figura 52 - Rácio capacidade/exigência do estado limite a NC na direção X.

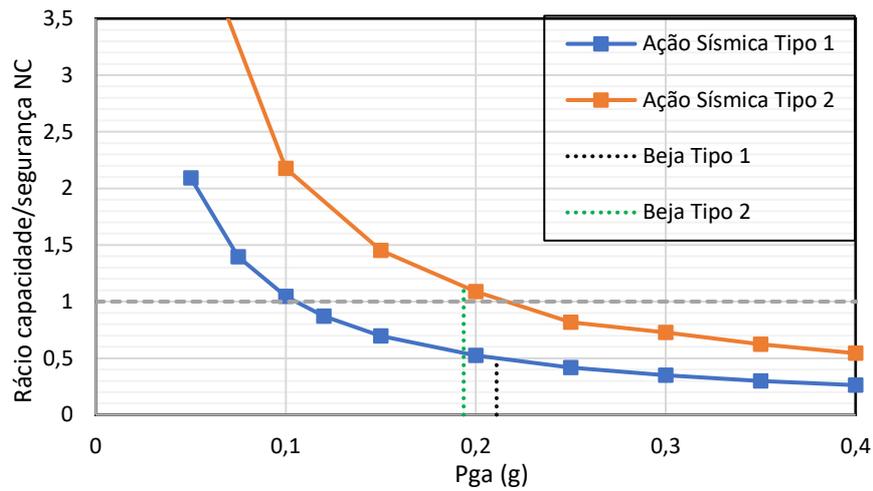


Figura 53 - Rácio capacidade/exigência do estado limite NC na direção Y.

Como o EC8 parte 3 indica, o estado limite necessário verificar é o SD. Assim, é possível dizer que em Beja, ao sismo tipo 1 corresponde um PGA de 10% e ao tipo 2 de 13%, o que indica que não verifica a segurança para o tipo 1, enquanto para o tipo 2 já se verifica.

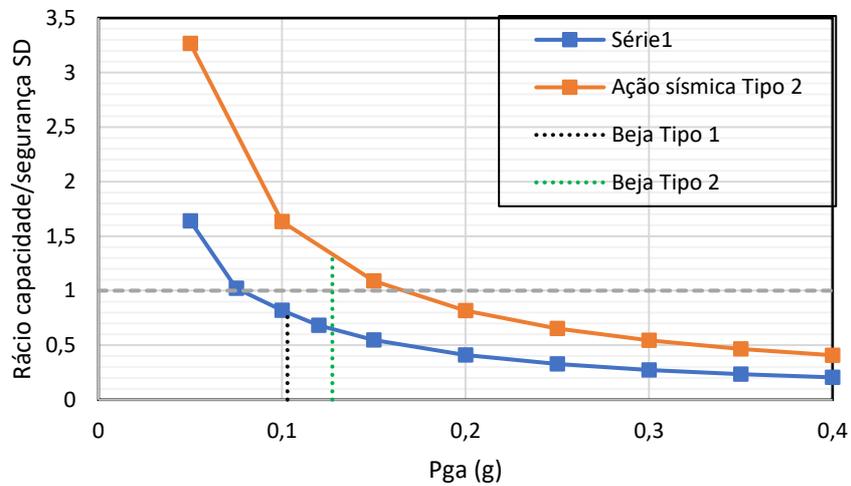


Figura 54 - Rácio capacidade/exigência do estado limite SD na direção X.

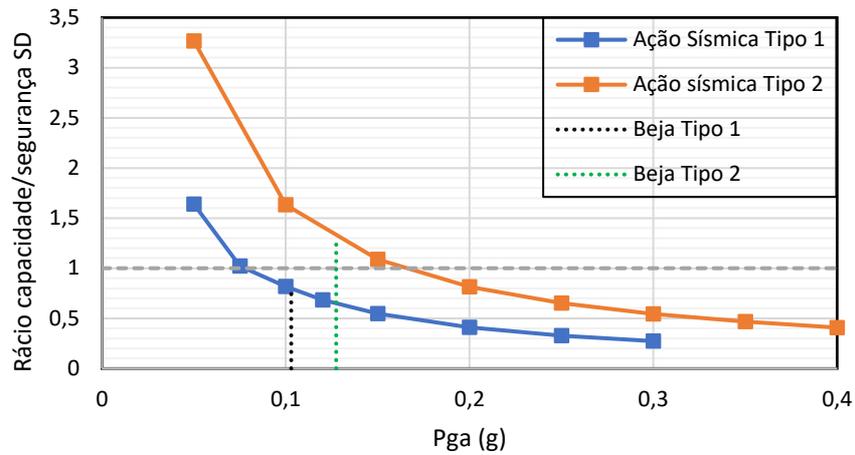


Figura 55 - Rácio capacidade/exigência do estado limite SD na direção Y.

No que toca ao estado limite DL, é possível verificar que para o sismo tipo 1, como a percentagem em g de Beja é muito pequena (4%) conclui-se que é sempre verificado. O mesmo se pode dizer para tipo 2 apesar deste ter uma percentagem maior (7%).

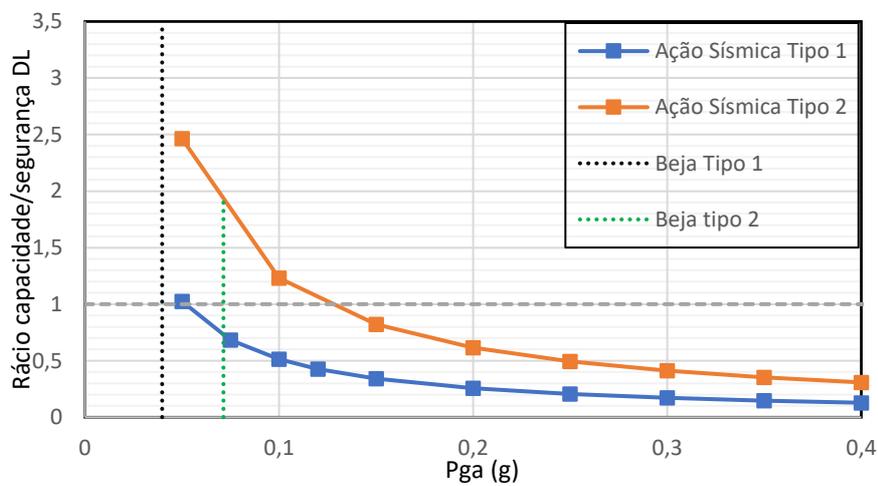


Figura 56 - Rácio capacidade/exigência do estado limite DL na direção X.

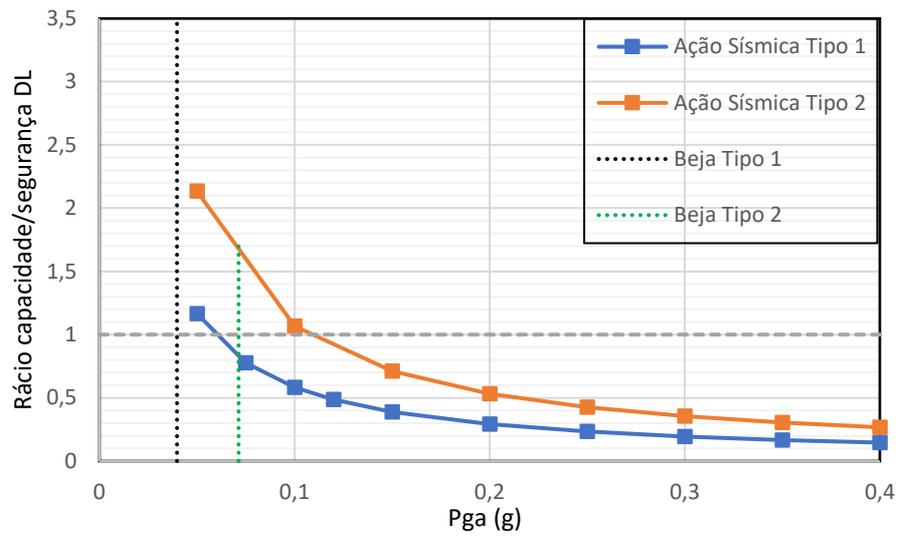


Figura 57 - Rácio capacidade/exigência do estado limite DL na direção Y.

### 5.3 Análise energética

#### 5.3.1 Modelação do edifício no software EnergyPlus

Para a modelação do edifício foi necessário a definição da sua geometria, Figura 58. Para o efeito, usou-se o software SketchUp 2022 para ser possível utilizar o EnergyPlus. O SketchUP 2017 é um software CAD intuitivo que se destaca pela facilidade na criação, edição e visualização de modelos tridimensionais e admite uma elevada compatibilidade com outros programas. Este modelo concebido no SketchUp 2022, foi associado ao Plugin do OpenStudio.

No caso do presente edifício, cada piso corresponde a uma zona térmica diferente, resultando em 4 zonas térmicas.

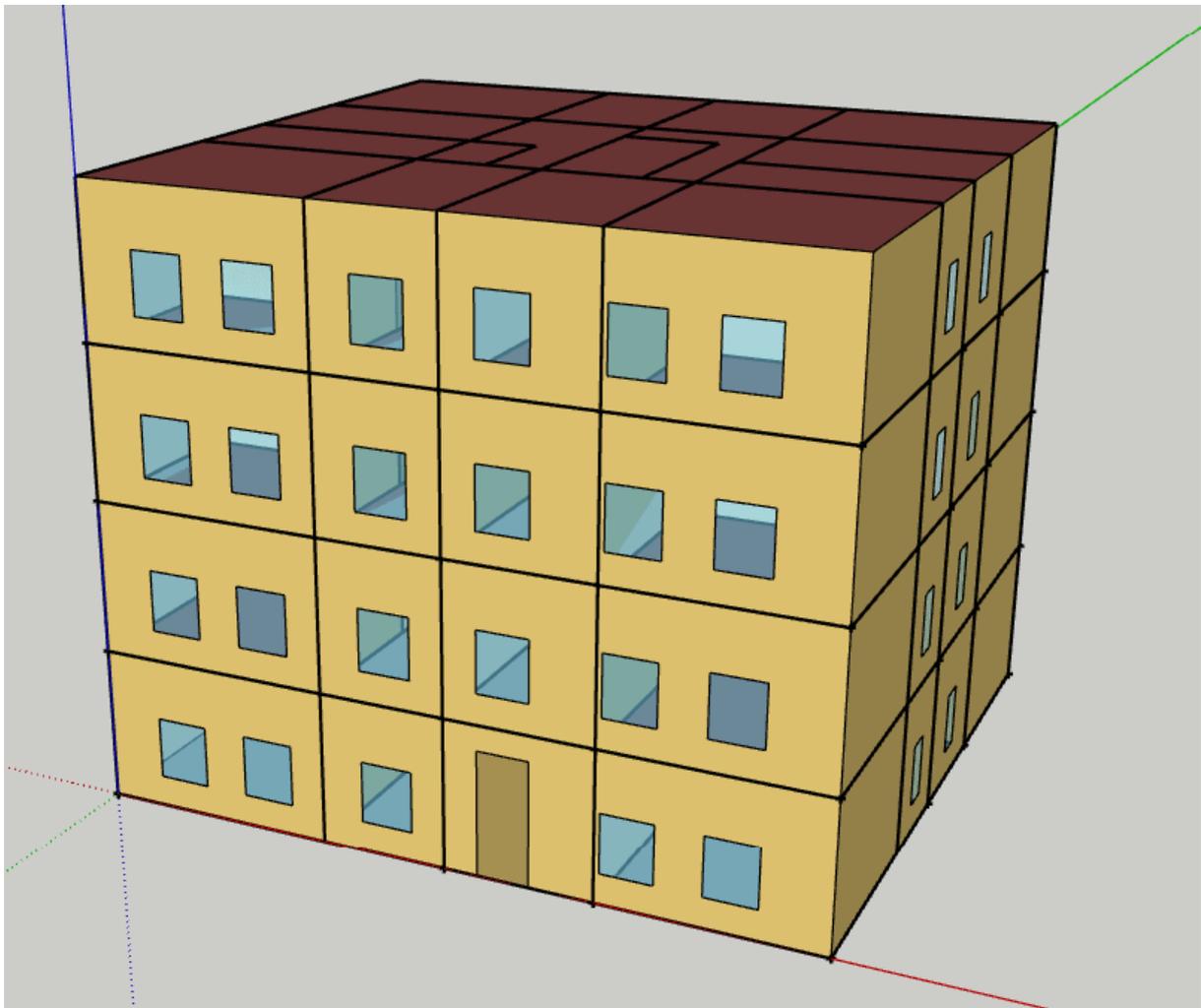


Figura 58 - Representação do modelo 3D no Sketchup 2022.

### 5.3.2 Ficheiro climático

Os dados climáticos são parâmetros fundamentais na simulação térmica do modelo. Com base nos ficheiros climáticos fornecidos pelo EnergyPlus foi possível encontrar os dados para Lisboa. Este ficheiro insere-se no OpenStudio, sendo a variável mais importante no caso desta dissertação as temperaturas médias exteriores, que se representa na Figura 59.

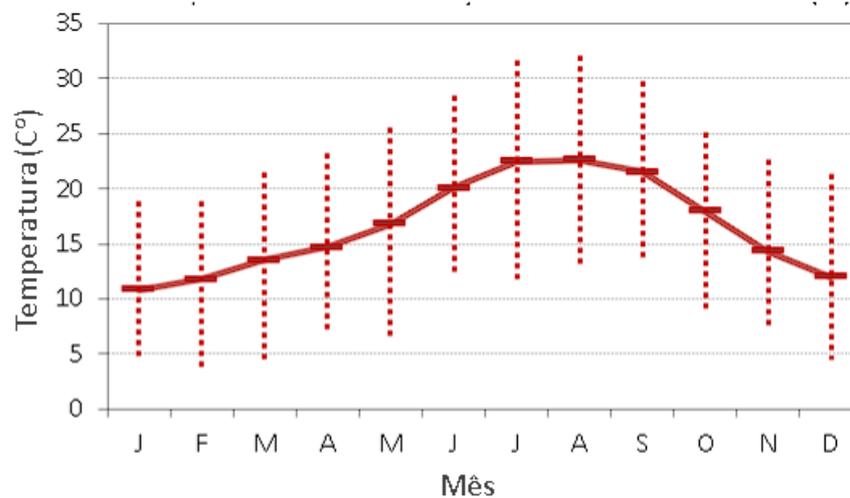


Figura 59 – Temperatura mensal do ano 2016: média, mínimo e máximos absolutos (°C).

### 5.3.3 Perfis de ocupação

Os perfis de ocupação são correspondentes aos horários de atividade. Estes são definidos para o ano inteiro sendo inseridos os horários para a atividade metabólica, equipamentos elétricos, iluminação, infiltração de ar e ocupação. Na Tabela 16 estão definidos os perfis utilizados para o EnergyPlus.

Tabela 16 - Definição dos perfis de ocupação.

| Tipo de Perfil           | Horário Semanal                | Horário de Fim-de-Semana | Temperatura (°C)    |
|--------------------------|--------------------------------|--------------------------|---------------------|
| Aquecimento              | 19h00 - 08h00                  | Todo o dia               | 18                  |
| Arrefecimento            | 19h00 - 08h00                  | Todo o dia               | 25                  |
|                          |                                |                          | Ocupação (%)        |
| Equipamentos Eletrónicos | Todo o dia                     | Todo o dia               | 100                 |
| Iluminação               | 07h00 – 08h00<br>19h00 – 00h00 | 08h00 – 00h00            | 100                 |
| Infiltrações             | Todo o dia                     | Todo o dia               | 100                 |
| Renovações de ar         | Todo o dia                     | Todo o dia               | 100                 |
|                          |                                |                          | Taxa metabólica (W) |
| Ocupação                 | 19h00 - 08h00                  | Todo o dia               | 126                 |

#### 5.3.4 Materiais e construções

De modo a definir os elementos construtivos, os constituintes dos materiais são caracterizados em termos de rugosidade, espessura, condutividade, densidade e calor específico.

Os materiais já foram definidos anteriormente no subcapítulo 5.1, apenas tendo-se de adicionar algumas características enumeradas no parágrafo anterior. Na Tabela 17 pode-se observar as características adicionadas no software, para além das existentes, retirados da literatura (Santos et al., 2006).

Tabela 17 - Definição das características térmicas dos materiais.

| Material               | Rugosidade | Condutividade térmica (W/m·K) | Capacidade calorífica (J/kg·K) |
|------------------------|------------|-------------------------------|--------------------------------|
| Alvenaria de Pedra     | Rugoso     | 2,3                           | 1000                           |
| Alvenaria de Tijolo    | Rugoso     | 0,39                          | 1400                           |
| Argamassa              | Liso       | 1,3                           | 1000                           |
| Madeira Para Pavimento | Liso       | 0,3                           | 2000                           |

|                     |      |      |      |
|---------------------|------|------|------|
| Madeira Para Portas | Liso | 0,15 | 2000 |
|---------------------|------|------|------|

Em relação ao vidro utilizado, foi decidido utilizar um vidro com 3 mm de espessura com as seguintes características:

Tabela 18 - Características térmicas dos envidraçados.

| Material | Condutividade (W/mK) | Coefficiente de ganhos solares | transmissão visível |
|----------|----------------------|--------------------------------|---------------------|
| vidro    | 0,9                  | 0,837                          | 0,898               |

### 5.3.5 Cargas internas

As cargas internas são, simplificadaamente, o calor gerado por um sistema ao longo do tempo. Assim, e já tendo sido definido o perfil, na Tabela 19 define-se as cargas referentes a cada fonte de carga térmica.

Tabela 19 - Definição das cargas internas.

| Carga                    | Unidade de Medida |
|--------------------------|-------------------|
| Pessoas                  | 20 pessoas        |
| Iluminação               | 360 W             |
| Equipamentos Eletrónicos | 1000 W            |

### 5.3.6 Consumo anual

Neste subcapítulo são apresentados e discutidos os resultados para o caso sem isolamento térmico. Os resultados presentes são os valores de consumo de energia de aquecimento/arrefecimento necessários para o edifício observar a legislação. Numa primeira análise, Figura 60, serão apresentados os valores totais de consumo energético do caso de estudo presente, para que o edifício esteja de acordo com a legislação.

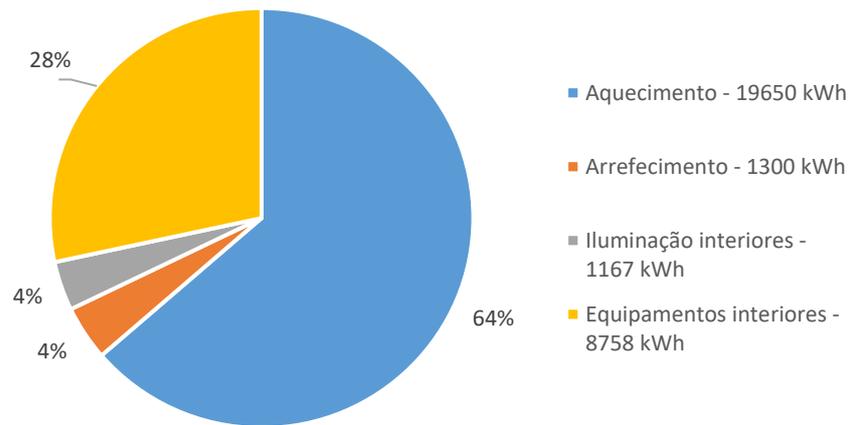


Figura 60 - Consumo anual percentual do edifício.

### 5.3.7 Consumo mensal

Na Figura 61, é possível observar que os meses de janeiro e julho são os meses mais críticos em consumo de energia para aquecimento e arrefecimento, respetivamente. Verifica-se também que o consumo para aquecimento é muito superior que o de arrefecimento.

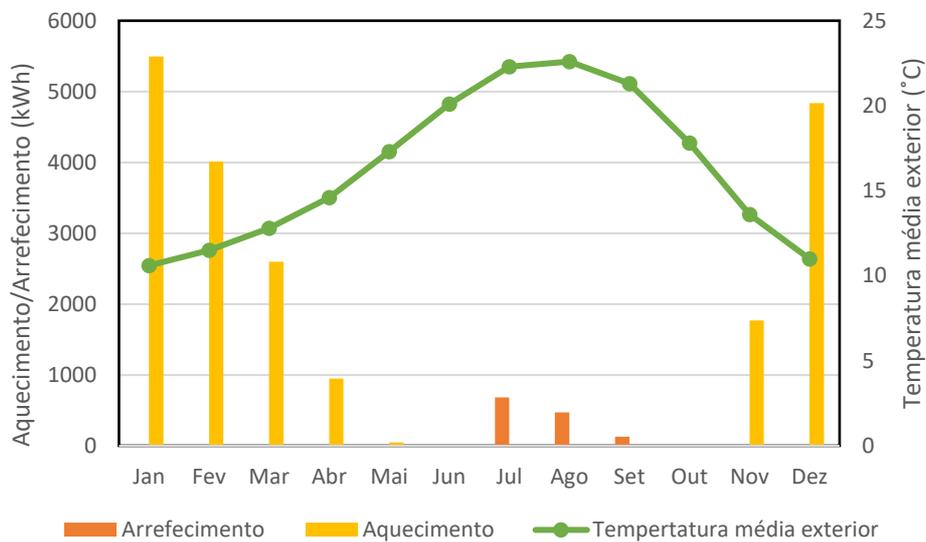


Figura 61 - Consumo mensal do edifício.

### 5.3.8 Temperatura diária

Da Figura 62 à Figura 67 apresentam-se resultados das temperaturas interiores em duas zonas térmicas (correspondentes ao rés-do-chão, Zona Térmica 1, e ao 4 Piso, Zona Térmica 4), aos dias mais frio e quente, 31 de janeiro e 16 de agosto respetivamente, e as necessidades de aquecimento e arrefecimento do edifício nesses mesmos dias.

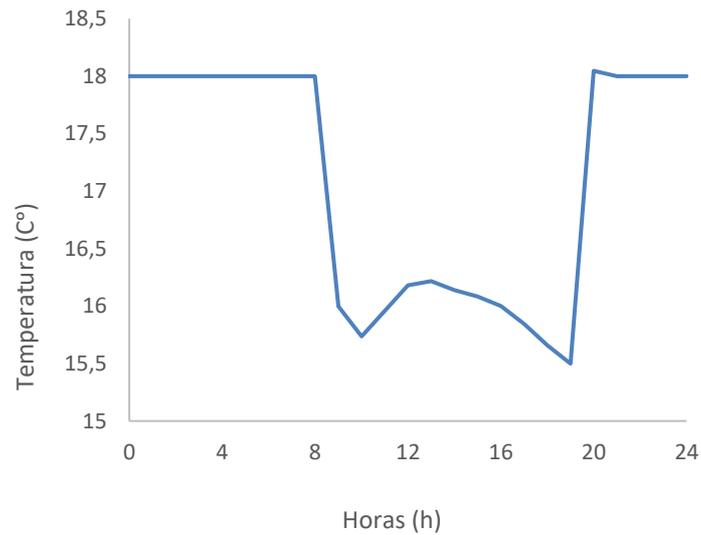


Figura 62 - Temperatura interior da zona térmica 1 no dia 31 de janeiro.

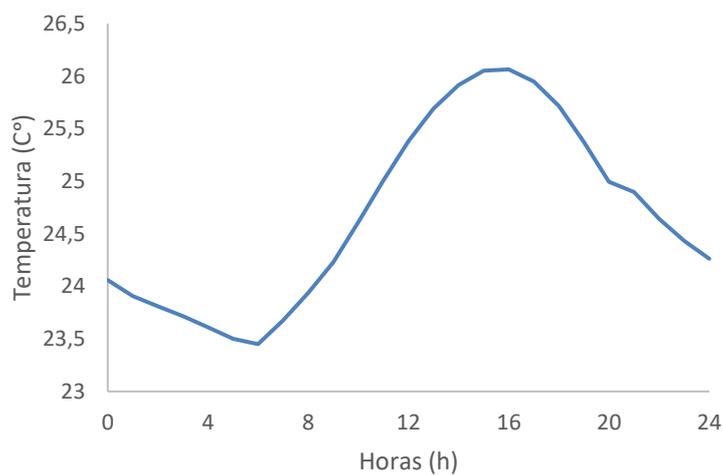


Figura 63 - Temperatura interior da zona térmica 1 no dia 16 de agosto.

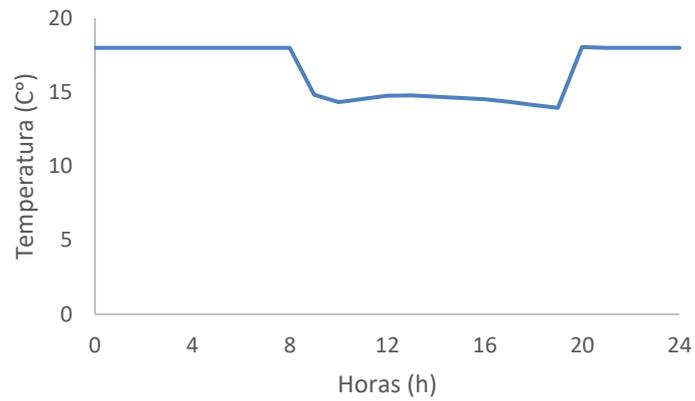


Figura 64 - Temperatura interior da zona térmica 4 no dia 31 de janeiro.

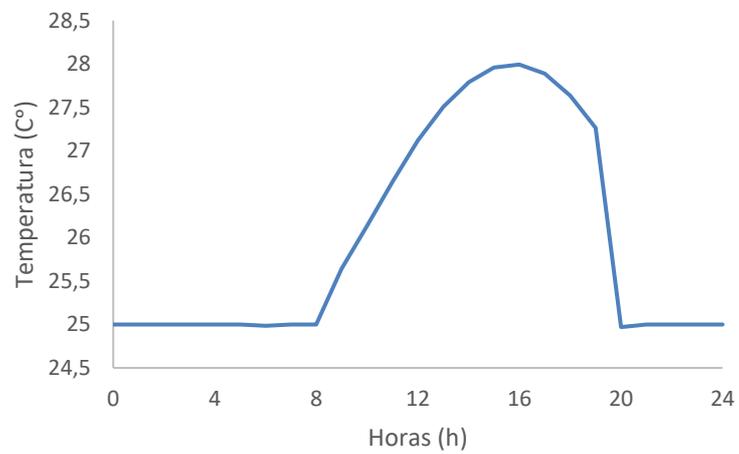


Figura 65 - Temperatura interior da zona térmica 4 no dia 16 de agosto.

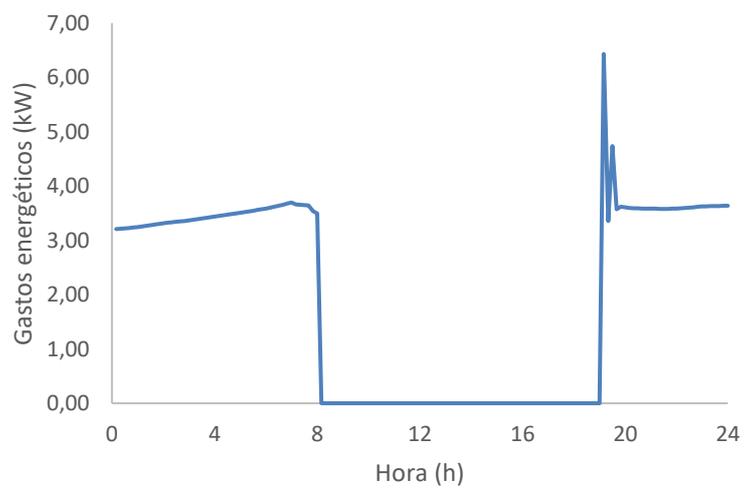


Figura 66 - Gastos energéticos de aquecimento de 31 de janeiro.

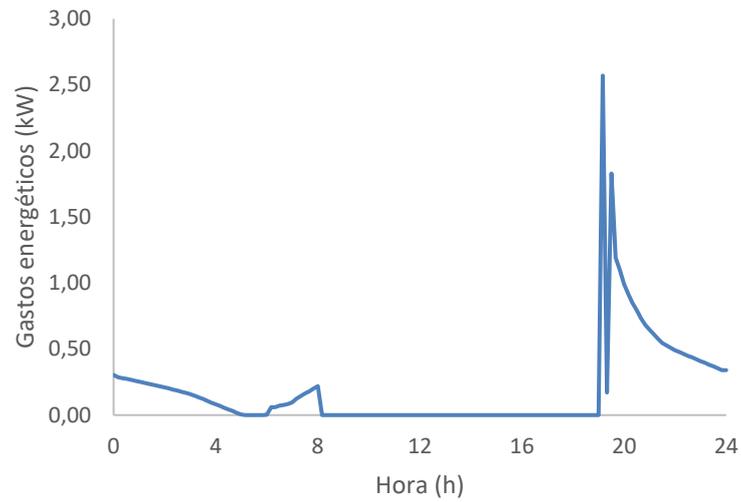


Figura 67 - Gastos energéticos de arrefecimento de 16 de agosto.

Com os dados destas figuras, tanto para os de temperatura como para os gastos energético, observa-se que o sistema de aquecimento e arrefecimento, estão a funcionar nos horários pretendidos, e que quando estes estão a trabalhar, as temperaturas nunca são inferiores a 18°C e superiores a 25°C.

## **6. REABILITAÇÃO INTEGRADA**

### **6.1 Técnica da reabilitação integrada sísmica e energética**

De acordo com os capítulos anteriores, é possível concluir que o edifício deve ser reforçado, tanto sísmica como energeticamente. Como já discutido no subcapítulo 2.5, existem várias formas de realizar o reforço integrado. No contexto deste trabalho, a intervenção utilizada é o uso da técnica TRM com a integração de um isolante térmico.

Na análise sísmica, uma vez que o 3MURI não permite simular explicitamente a maior parte dos reforços utilizados, é necessário recorrer ao EC8 parte 3 - Anexo D. De acordo com a Figura 21, para além do reforço TRM utilizado, também irão ser feitas as outras duas intervenções propostas pela mesma tabela. Apesar da figura indicar que o coeficiente máximo a ser utilizado seria de 2,0, para as paredes exteriores na direção Y, como será feita uma solução mais robusta de reforço, irá ser utilizado um coeficiente multiplicativo de 2,5. Para as paredes na direção X, usou-se o valor de 2,0.

Na análise energética, vai ser feita uma comparação entre um isolamento amigo do ambiente e um isolamento convencional (XPS). Assim, será possível observar as diferenças e eficiência de cada material e como estes se comportam na envolvente.

### **6.2 Análise sísmica**

Na Figura 68 é possível observar as novas características mecânicas das paredes, tanto na direção X como na direção Y, após a adição do reforço. Na Tabela 20 também se observa os novos 10 primeiros modos da estrutura reforçada. Na Figura 69 e Figura 70 é feita a comparação das massas acumuladas em função da frequência destes modos de vibração antes e após a adição do reforço.

Analisando os 10 primeiros modos da nova estrutura e a comparação das massas modais, é possível verificar que o comportamento dinâmico do edifício reforçado é bastante diferente do edifício original, tendo em conta, que nas paredes da direção Y, os valores têm uma diferença maior, o que está em concordância com os coeficientes utilizados para a melhoria das paredes.

Reforço integrado sísmico e energético de edifícios de alvenaria: modelação numérica da resposta

| Name                                   | Pedra X  | Name                                   | Pedra Y  |
|--|----------|--|----------|
| E [N/mm <sup>2</sup> ]                 | 2 000,00 | E [N/mm <sup>2</sup> ]                 | 2 500,00 |
| G [N/mm <sup>2</sup> ]                 | 700,00   | G [N/mm <sup>2</sup> ]                 | 875,00   |
| w [kN/m <sup>3</sup> ]                 | 20       | w [kN/m <sup>3</sup> ]                 | 20       |
| f <sub>m</sub> [N/cm <sup>2</sup> ]    | 360,00   | f <sub>m</sub> [N/cm <sup>2</sup> ]    | 450,00   |
| f <sub>k</sub> [N/cm <sup>2</sup> ]    | 252,00   | f <sub>k</sub> [N/cm <sup>2</sup> ]    | 315,00   |
| τ [N/cm <sup>2</sup> ]                 | 6,00     | τ [N/cm <sup>2</sup> ]                 | 7,50     |
| f <sub>vlim</sub> [N/mm <sup>2</sup> ] | 2,0      | f <sub>vlim</sub> [N/mm <sup>2</sup> ] | 2,5      |
| CF                                     | 1,20     | CF                                     | 1,20     |
| γ <sub>m</sub>                         | 2,00     | γ <sub>m</sub>                         | 2,00     |
| Shear drift                            | 0,0040   | Shear drift                            | 0,0040   |
| Bending drift                          | 0,0080   | Bending drift                          | 0,0080   |
| φ <sub>∞</sub>                         | 0,0      | φ <sub>∞</sub>                         | 0,0      |
| Damage condition                       | Existing | Damage condition                       | Existing |
| Description                            |          | Description                            |          |
| Library                                |          | Library                                |          |

a)

b)

Figura 68 - Características mecânicas das paredes reforçadas: a) Paredes na direção X; b) Paredes na direção Y.

Tabela 20 - Primeiros 10 modos da estrutura reforçada.

| Modos | Frequência (Hz) | Mx (%) | Mx acum. (%) | My (%) | My acum. (%) |
|-------|-----------------|--------|--------------|--------|--------------|
| 1     | 3,40            | 81,86  | 82           | 0,06   | 0            |
| 2     | 4,40            | 0,10   | 82           | 73,7   | 74           |
| 3     | 5,93            | 0,00   | 82           | 0,00   | 74           |
| 4     | 7,63            | 0,96   | 83           | 0,01   | 74           |
| 5     | 7,74            | 6,84   | 90           | 0,12   | 74           |
| 6     | 8,93            | 0,01   | 90           | 2,09   | 76           |
| 7     | 9,59            | 3,30   | 93           | 1,07   | 77           |
| 8     | 9,76            | 0,72   | 94           | 12     | 89           |
| 9     | 10,08           | 0,51   | 94           | 0,23   | 89           |
| 10    | 10,80           | 0,00   | 94           | 0,13   | 89           |

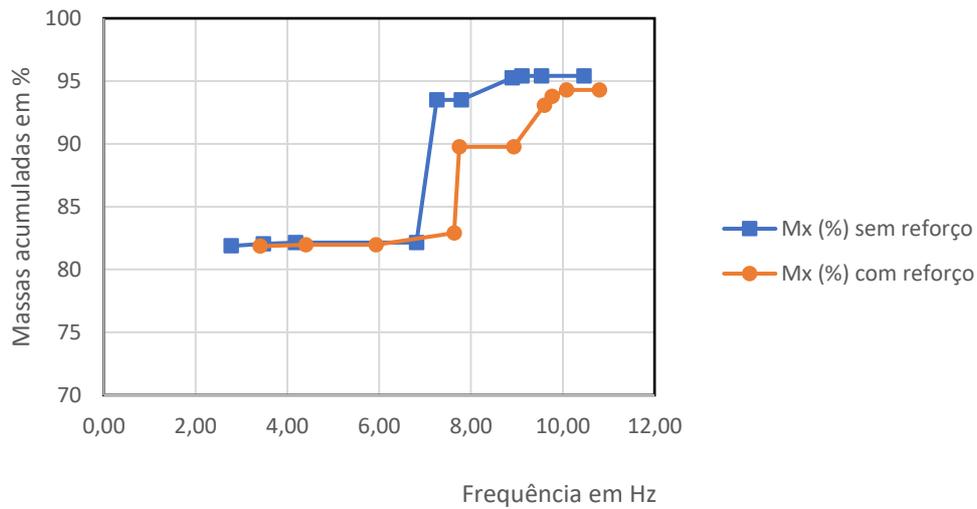


Figura 69 - Comparação da evolução da massa modal antes e após o reforço na direção X.

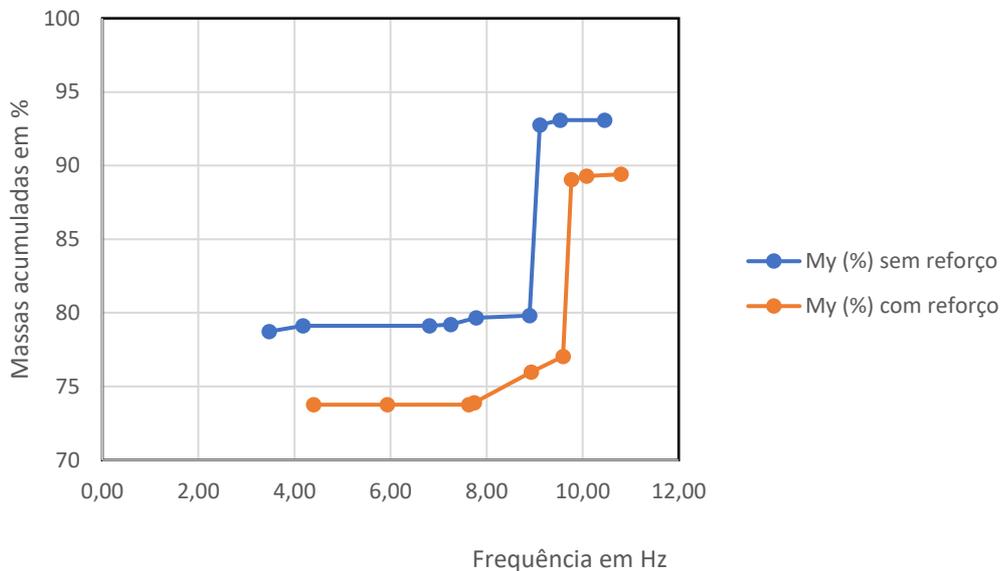


Figura 70 - Comparação da evolução da massa modal antes e após o reforço na direção Y.

De seguida, na Tabela 21 e Tabela 22 é demonstrado os novos resultados em relação ao coeficiente capacidade/exigência da estrutura reforçada.

Com estes resultados é possível concluir que o reforço aplicado não é suficiente para a verificação de segurança sísmica, o que seria necessária uma intervenção mais profunda. Contudo, os coeficientes capacidade/exigência sofrem uma melhoria significativa, sendo que antes do reforço este coeficiente SD era de 0,53, e após reforço aumentou para 0,81.

Tabela 21 - Resultados da avaliação sísmica após reforço para a ação sísmica tipo 1.

| Direção X               |           |         |             |             |             |
|-------------------------|-----------|---------|-------------|-------------|-------------|
| Perfil da força sísmica | Exc. (cm) | Sentido | NC          | SD          | DL          |
| Uniforme                | 0,00      | +       | 1,24        | 1,78        | 1,22        |
|                         | 0,00      | -       | <b>0,65</b> | <b>0,93</b> | <b>0,95</b> |
|                         | 64,90     | +       | 1,22        | 1,75        | 1,26        |
|                         | 64,90     | -       | <b>0,66</b> | <b>0,95</b> | <b>0,96</b> |
|                         | -64,90    | +       | 1,25        | 1,79        | 1,22        |
|                         | -64,90    | -       | <b>0,67</b> | <b>0,95</b> | <b>0,94</b> |
| Modo fundamental        | 0,00      | +       | <b>0,94</b> | 1,34        | 1,19        |
|                         | 0,00      | -       | <b>0,65</b> | <b>0,92</b> | <b>0,85</b> |
|                         | 64,90     | +       | <b>0,97</b> | 1,38        | 1,19        |
|                         | 64,90     | -       | <b>0,65</b> | <b>0,93</b> | <b>0,85</b> |
|                         | -64,90    | +       | 1,49        | 2,13        | 1,14        |
|                         | -64,90    | -       | <b>0,65</b> | <b>0,92</b> | <b>0,83</b> |
| Direção Y               |           |         |             |             |             |
| Uniforme                | 0,00      | +       | <b>0,55</b> | <b>0,87</b> | 1,63        |
|                         | 0,00      | -       | <b>0,68</b> | 1,05        | 1,61        |
|                         | 70,95     | +       | <b>0,51</b> | <b>0,81</b> | 1,64        |
|                         | 70,95     | -       | <b>0,70</b> | 1,07        | 1,56        |
|                         | -70,95    | +       | <b>0,52</b> | <b>0,81</b> | 1,45        |
|                         | -70,95    | -       | <b>0,64</b> | <b>0,99</b> | 1,50        |
| Modo fundamental        | 0,00      | +       | <b>0,67</b> | 1,02        | 1,35        |
|                         | 0,00      | -       | <b>0,60</b> | <b>0,90</b> | 1,33        |
|                         | 70,95     | +       | <b>0,78</b> | 1,17        | 1,42        |
|                         | 70,95     | -       | <b>0,58</b> | <b>0,88</b> | 1,36        |
|                         | -70,95    | +       | <b>0,61</b> | <b>0,92</b> | 1,26        |
|                         | -70,95    | -       | <b>0,55</b> | <b>0,83</b> | 1,25        |

Tabela 22 - Resultados da avaliação sísmica após reforço para a ação sísmica tipo 2.

| Direção X               |           |         |             |             |             |
|-------------------------|-----------|---------|-------------|-------------|-------------|
| Perfil da força sísmica | Exc. (cm) | Sentido | NC          | SD          | DL          |
| Uniforme                | 0,00      | +       | 3,16        | 3,47        | 1,62        |
|                         | 0,00      | -       | 1,64        | 1,80        | 1,25        |
|                         | 64,90     | +       | 3,10        | 3,41        | 1,66        |
|                         | 64,90     | -       | 1,68        | 1,84        | 1,26        |
|                         | -64,90    | +       | 3,18        | 3,49        | 1,62        |
|                         | -64,90    | -       | 1,68        | 1,84        | 1,23        |
| Modo fundamental        | 0,00      | +       | 2,36        | 2,60        | 1,57        |
|                         | 0,00      | -       | 1,63        | 1,79        | 1,12        |
|                         | 64,90     | +       | 2,44        | 2,68        | 1,57        |
|                         | 64,90     | -       | 1,64        | 1,80        | 1,12        |
|                         | -64,90    | +       | 3,76        | 4,13        | 1,50        |
|                         | -64,90    | -       | 1,63        | 1,79        | 1,10        |
| Direção Y               |           |         |             |             |             |
| Uniforme                | 0,00      | +       | <b>0,96</b> | 1,05        | 1,06        |
|                         | 0,00      | -       | 1,32        | 1,45        | 1,11        |
|                         | 70,95     | +       | <b>0,84</b> | <b>0,93</b> | 1,06        |
|                         | 70,95     | -       | 1,37        | 1,50        | 1,07        |
|                         | -70,95    | +       | <b>0,92</b> | 1,01        | <b>0,94</b> |
|                         | -70,95    | -       | 1,24        | 1,36        | 1,03        |
| Modo fundamental        | 0,00      | +       | 1,40        | 1,54        | 1,04        |
|                         | 0,00      | -       | 1,24        | 1,36        | 1,10        |
|                         | 70,95     | +       | 1,66        | 1,83        | 1,10        |
|                         | 70,95     | -       | 1,20        | 1,32        | 1,12        |
|                         | -70,95    | +       | 1,26        | 1,38        | <b>0,97</b> |
|                         | -70,95    | -       | 1,13        | 1,25        | 1,02        |

### 6.3 Análise energética

Na Tabela 23, é possível observar as características dos dois materiais utilizados para a reabilitação energética, cortiça e XPS.

Tabela 23 - Características do material de reforço energético.

| Material | Rugosidade  | E (m) | Condutividade térmica (W/m·K) | Massa volúmica (kg/m <sup>3</sup> ) | Capacidade calorífica (J/kg·K) |
|----------|-------------|-------|-------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|
| Cortiça  | Semi rugoso | 0,06  | 0,039                         | 120                                 | 1800                           |
| XPS      | Liso        | 0,06  | 0,036                         | 105                                 | 795                            |

#### 6.3.1 Consumo anual

Na Figura 71 é possível verificar os novos valores de consumos anual da estrutura reforçada com cortiça. É possível observar uma grande descida nos valores de aquecimento e arrefecimento, o que permite verificar que o reforço com cortiça é funcional.

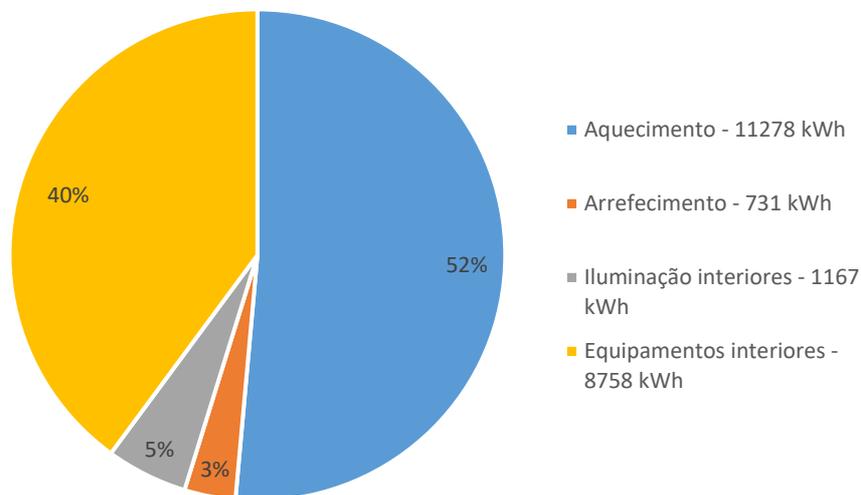


Figura 71 - Consumo anual percentual do edifício após reabilitação com cortiça.

### 6.3.2 Consumo mensal

Em termos de consumo mensal, na Figura 72 observa-se o consumo mensal comparado com a temperatura média exterior. Verifica-se que quando a temperatura média é mais baixa, o consumo de aquecimento é maior, e quando a temperatura média é maior, o consumo de arrefecimento também aumenta. Nesta figura, também vale realçar que a escala em termos de aquecimento e arrefecimento alterou.

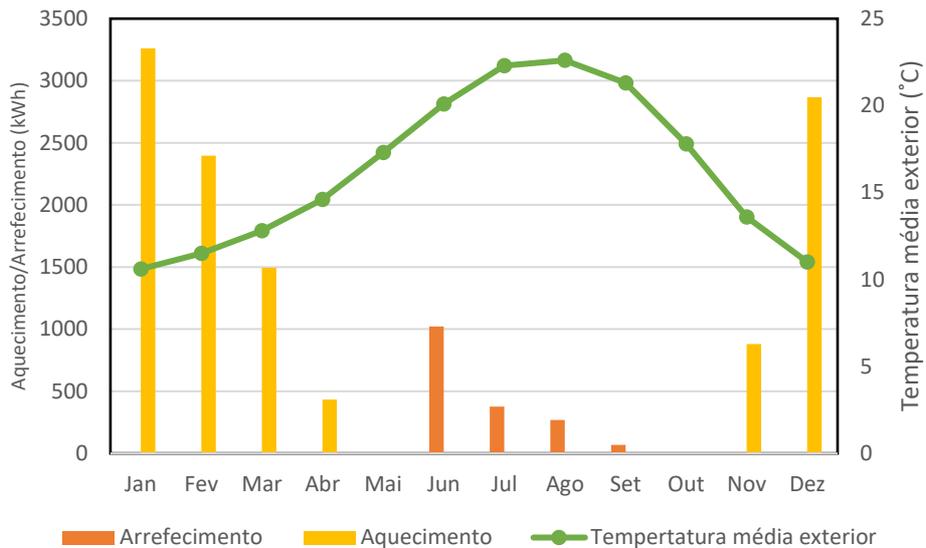


Figura 72 - Consumo mensal do edifício após reabilitação com cortiça.

### 6.3.3 Comparação de gastos totais anuais

Para uma melhor comparação dos resultados, na Figura 73 é analisado os consumos totais da estrutura original, e da estrutura após reabilitação com cortiça e com XPS.

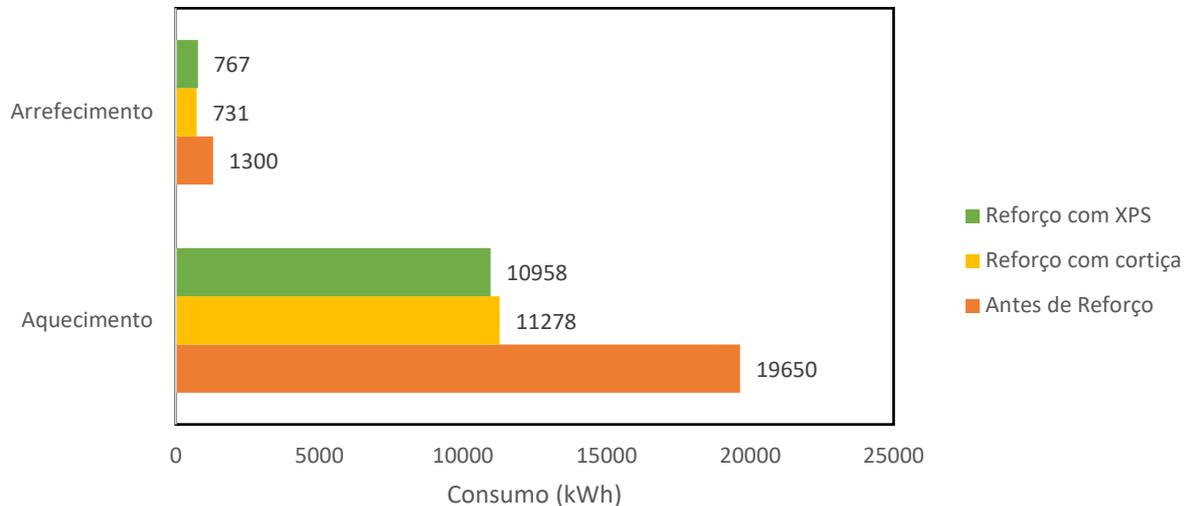


Figura 73 - Comparação de gastos anuais.

Assim, com os resultados acima demonstrados, é possível verificar que com o emprego da cortiça ou do XPS, os valores de aquecimento e arrefecimento descem substancialmente.

Em relação à cortiça, é possível perceber que este foi mais eficaz nos valores de arrefecimento, enquanto o XPS conseguiu diminuir melhor os valores de aquecimento. Mesmo assim, em comparação, os dois materiais foram de forma idêntica eficazes na melhoria do desempenho térmico do edifício.

## **7. CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS**

### **7.1 Principais Conclusões**

Ao longo desta dissertação, foram efetuadas as análise sísmica e energética de um edifício de alvenaria, e uma possível reabilitação integrada implementando TRM + isolamento térmico. Em relação à avaliação da vulnerabilidade sísmica, antes e após o reforço, foi utilizada a metodologia presente no EC8, sendo o objetivo proposto alcançado. Na avaliação térmica foram utilizados os regulamentos existentes, sendo que o objetivo principal deste tópico foi alcançado. Também foi efetuada uma análise paramétrica sísmica, de modo a verificar a influência da ação sísmica na avaliação da segurança do edifício.

Através da validação do modelo numérico, foi possível verificar que, havendo um erro residual, a modelação foi bem realizada. A análise do comportamento sísmico do edifício foi focada na resposta global. Isto depende principalmente da capacidade das paredes do edifício no seu próprio plano para resistir à ação sísmica. Descobriu-se que o edifício não cumpre aos padrões de segurança sísmicos necessários regulamentares. Assim conclui-se que edifícios antigos de alvenaria podem representar um perigo para as vidas humanas, pois podem colapsar devido à força do sismo previsto para Lisboa. O comportamento sísmico global desses edifícios de alvenaria depende de como a estrutura é capaz a redistribuir as cargas horizontais entre os seus elementos, a fim de tirar o máximo proveito da resistência das paredes de alvenaria. Isso pode ser influenciado pelos modos de flexão ou pela falha por corte, que, por sua vez, dependem da geometria da estrutura e das propriedades mecânicas do material utilizado. Seguidamente, foi realizada a análise energética do edifício, sendo que inicialmente foram indicados os parâmetros necessários para a correta simulação segundo o software. Nesta simulação foi possível extrair vários resultados, nomeadamente o consumo de energia anual e mensal do edifício, e as temperaturas diárias do dia mais frio e mais quente, e o seu gasto de energia diário.

Por último, foi estudada a influência da aplicação do reforço integrado segundo a técnica do TRM+ isolamento térmico. Na análise sísmica foi possível concluir que a aplicação da solução TRM é bastante benéfica para a estrutura, mas que se revelou insuficiente para verificar a segurança sísmica. De seguida, foram implementadas duas situações de reabilitação energética, uma amiga do ambiente, a cortiça, e outra mais usualmente utilizada, o XPS. De uma forma geral, ambas as abordagens beneficiam o edifício da mesma maneira, reduzindo os consumos energéticos necessários para verificar

o regulamento. Sendo um dos objetivos da dissertação encontrar uma abordagem amiga do ambiente, é possível concluir que a cortiça tem um bom comportamento térmico, equiparável ao XPS, e que deve ser preferida. Faz-se notar que esta opção não leva em linha de conta quaisquer análises de índole financeira.

## **7.2 Trabalhos futuros**

Como trabalhos futuros, propõe-se considerar e desenvolver os seguintes temas:

- Análise das paredes para fora do plano, interpretando os mecanismos mais gravosos para o edifício;
- Estudo mais aprofundado da capacidade do reforço adotado para a estrutura, de forma que esta possa melhorar o seu desempenho sísmico e que verifique a segurança sísmica, realizando-se uma análise custo-benefício dos reforços a usar;
- Análise custo-benefício dos diferentes reforços energéticos de forma a entender e resolver o problema da sustentabilidade;
- Estudo de novas soluções de coberturas com o objetivo de melhorar as capacidades térmicas do edifício;
- Estudo sobre a classe energética do edifício e perceber como se pode melhorar a mesma e alcançar o conforto térmico.

## REFERÊNCIAS

- Ademovic, Naida, Formisano, Antonio, Penazzato, Luca, & Oliveira, Daniel V. (2022, Novembro 17). Seismic and energy integrated retrofit of buildings: A critical review. *Frontiers in Built Environment*, Vol. 8. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2022.963337>
- Al-Masrani, Salwa M., & Al-Obaidi, Karam M. (2019). Dynamic shading systems: A review of design parameters, platforms and evaluation strategies. *Automation in Construction*, *102*, 195–216. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.01.014>
- Almeida, Francisca (2022). *Avaliação da segurança sísmica de edifícios antigos de alvenaria* (Universidade do Minho). Obtido de <https://hdl.handle.net/1822/81622>
- Araújo, Ana (2014). *Modelling of the Seismic Performance of Connections and Walls in Ancient Masonry Buildings* (Universidade do Minho). Obtido de <https://hdl.handle.net/1822/35338>
- Bellia, Laura, Marino, Concetta, Minichiello, Francesco, & Pedace, Alessia (2014). An overview on solar shading systems for buildings. *Energy Procedia*, *62*, 309–317. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.12.392>
- Brackney, Larry, Parker, Andrew, Macumber, Daniel, & Benne, Kyle (2018). Building Energy Modeling with OpenStudio. Em *Building Energy Modeling with OpenStudio*. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-77809-9>
- Caldeira, Bento, Bezzeghoud, Mourad, & Borges, José (2005). *Localização e dimensionamento de sismos num enquadramento conceptual de sismologia*. Obtido de <http://hdl.handle.net/10174/5509>
- D’Ayala, D., & Speranza, E. (2003). Definition of Collapse Mechanisms and Seismic Vulnerability of Historic Masonry Buildings. *Earthquake Spectra*, *19*(3), 479–509. <https://doi.org/10.1193/1.1599896>
- Decreto-via arenula, 70-00186* (Vol. 20, pp. 23–35) (2018, Janeiro 17). Roma: MINISTERO DELLE INFRASTRUTTUREE DEI TRASPORTI.
- Decreto-Lei n.º 78/2006 (2006, Abril 4). *Decreto-lei relativa ao desempenho energético dos edifícios*. Lisboa: Ministério da Economia e da Inovação.

- Decreto-Lei n.º 80/2006 (2006, Abril 4). *Decreto-lei visa impor requisitos ao projeto de novos edifícios e de grandes remodelações por forma a salvaguardar a satisfação das condições de conforto térmico*. Lisboa: Ministério das Obras Públicas, Transportes e Comunicações.
- Decreto-Lei n.º 101-D/2020 (2020, Dezembro 7). *Decreto-lei onde estabelece os requisitos aplicáveis a edifícios para a melhoria do seu desempenho energético e regula o Sistema de Certificação Energética de Edifícios*. Lisboa : Presidência do conselho de ministros.
- Decreto-Lei n.º 102/2021 (2021, Dezembro 10). *Decreto-Lei Aprova o regime geral da gestão de resíduos, o regime jurídico da deposição de resíduos em aterro e altera o regime da gestão de fluxos específicos de resíduos*. Lisboa: Presidência do Conselho de Ministros.
- Decreto-Lei n.º 118/2013 (2013, Agosto 20). *Decreto-lei que Aprova o Sistema de Certificação Energética dos Edifícios, o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação e o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços*. Lisboa: Ministério da Economia e do Emprego.
- Decreto-Lei n.º 79/2006 (2006, Abril 4). *Decreto de Lei visa regulamentar a instalação de sistemas de climatização em edifícios*. Lisboa : Ministério das Obras Públicas, Transportes e Comunicações.
- Diretiva 2010/31/UE (2018, Janeiro 1). *Reformulação da Diretiva europeia que promove a melhoria do desempenho energético dos edifícios na União*. Parlamento europeu e do conselho.
- Diretiva 2002/91/CE (2002, Dezembro 16). *Decreto-lei relativa ao desempenho energético dos edifícios*. Lisboa: Parlamento Europeu e do Conselho.
- Estevan, L., Torres, B., Varona, F. B., Baeza, F. J., & Ivorra, S. (2023). Shear strengthening of masonry walls with Textile Reinforced Mortars (TRM) under high temperature exposure. *Journal of Building Engineering*, 63. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105511>
- Esteves, Diogo (2021). *Simulação Energético de um Edifício usando o EnergyPlus em comparação com outros programas certificados*. Universidade do Minho.
- González-Eguino, Mikel (2015). Energy poverty: An overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 47, 377–385. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.03.013>
- Karlos, Kyriakos, Tsantilis, Aristomenis, & Triantafillou, Thanasis (2020). Integrated seismic and energy retrofitting system for masonry walls using textile-reinforced mortars combined with thermal insulation: Experimental, analytical, and numerical study. *Journal of Composites Science*, 4(4). <https://doi.org/10.3390/jcs4040189>

- Kouris, Leonidas Alexandros S., & Triantafillou, Thanasis C. (2019). Design Methods for Strengthening Masonry Buildings Using Textile-Reinforced Mortar. *Journal of Composites for Construction*, 23(1). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000906](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000906)
- Lagomarsino, Sergio, Marino, Salvatore, & Cattari, Serena (2020). Linear static procedures for the seismic assessment of masonry buildings: Open issues in the new generation of European codes. *Structures*, 26, 427–440. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.04.003>
- Lagomarsino, Sergio, Penna, Andrea, Galasco, Alessandro, & Cattari, Serena (2013). TREMURI program: An equivalent frame model for the nonlinear seismic analysis of masonry buildings. *Engineering Structures*, 56, 1787–1799. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2013.08.002>
- Lamy-Mendes, Alyne, Pontinha, Ana Dora Rodrigues, Alves, Patrícia, Santos, Paulo, & Durães, Luisa (2021). Progress in silica aerogel-containing materials for buildings' thermal insulation. *Construction and Building Materials*, 286. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122815>
- Luis Guerreiro (2010). *A definição da acção sísmica na regulamentação actual*.
- Menna, Costantino, Felicioni, Licia, Negro, Paolo, Lupíšek, Antonín, Romano, Elvira, Prota, Andrea, & Hájek, Petr (2022, Fevereiro 1). Review of methods for the combined assessment of seismic resilience and energy efficiency towards sustainable retrofitting of existing European buildings. *Sustainable Cities and Society*, Vol. 77. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103556>
- Mohtasham, Javid (2015). Review Article-Renewable Energies. *Energy Procedia*, 74, 1289–1297. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.774>
- NP EN1998-3 (2017). *Eurocódigo 8-Projeto de estruturas para resistência aos sismos Parte 3: Avaliação e reabilitação de edifícios*. Obtido de [www.ipq.pt](http://www.ipq.pt)
- Orlando, Fábio (2011). *Análise sísmica de estruturas de edifícios pela técnica do meio contínuo* (Universidade do Porto). Obtido de <http://www.fe.up.pt>
- Piedade, Andreia (2013). *Soluções de Reforço Sísmico de Paredes de Alvenaria de Enchimento*. Universidade do Minho.
- Pinto, Bernardino (2022). *Universidade do Minho Escola de Engenharia*.
- Pohoryles, Daniel A., Bournas, Dionysios A., Da Porto, Francesca, Santarsiero, Giuseppe, Triantafillou, Thanasis, Oliveira, Daniel, ... Europäische Gemeinschaften Gemeinsame

- Forschungsstelle (2022). *Technologies for the combined seismic and energy upgrading of existing buildings*.
- República Portuguesa (2019). *Roteiro para a neutralidade carbónica 2050 (RNC2050)*. Lisboa.
- Santos, Carlos; Matias, Luis (2006). *LNEC ITE 50-2006 - Coeficientes de transmissão térmica de elementos da envolvente dos edifícios*.
- Santos, Pedro (2017). *NZEB: Nearly Zero Energy Building: metodologias para implementação NZEB: aplicação a edifício unifamiliar novo*. Instituto Politécnico de Coimbra, Coimbra.
- Silva, Filipe (2013). *Estudo de Materiais de Isolamento Térmico Inovadores* (Universidade do Porto).  
Obtido de <http://www.fe.up.pt>
- Silva, João (2016). *Caracterização e Avaliação Sísmica de um Edifício Misto Alvenaria- Betão Engenharia Civil*.
- Simões, Ana (2018). *Evaluation of the seismic vulnerability of the unreinforced masonry buildings constructed in the transition between the 19 th and 20 th centuries in Lisbon, Portugal*. Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- Solarino, Fabio, Oliveira, Daniel V., & Giresini, Linda (2019, Novembro 15). Wall-to-horizontal diaphragm connections in historical buildings: A state-of-the-art review. *Engineering Structures*, Vol. 199. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109559>
- S.T.A Data (2017). *3Muri Manual*.
- Viegas, Duarte (2016). *Avaliação de sistemas solares térmicos combinados para aquecimento, arrefecimento e produção de AQS*. Universidade do Algarve.
- Vieira, Nuno (2020). *Iluminação Natural e Ganhos Solares em Edifícios*. Universidade de Coimbra.

### ANEXO A – PLANTA DO EDIFÍCIO

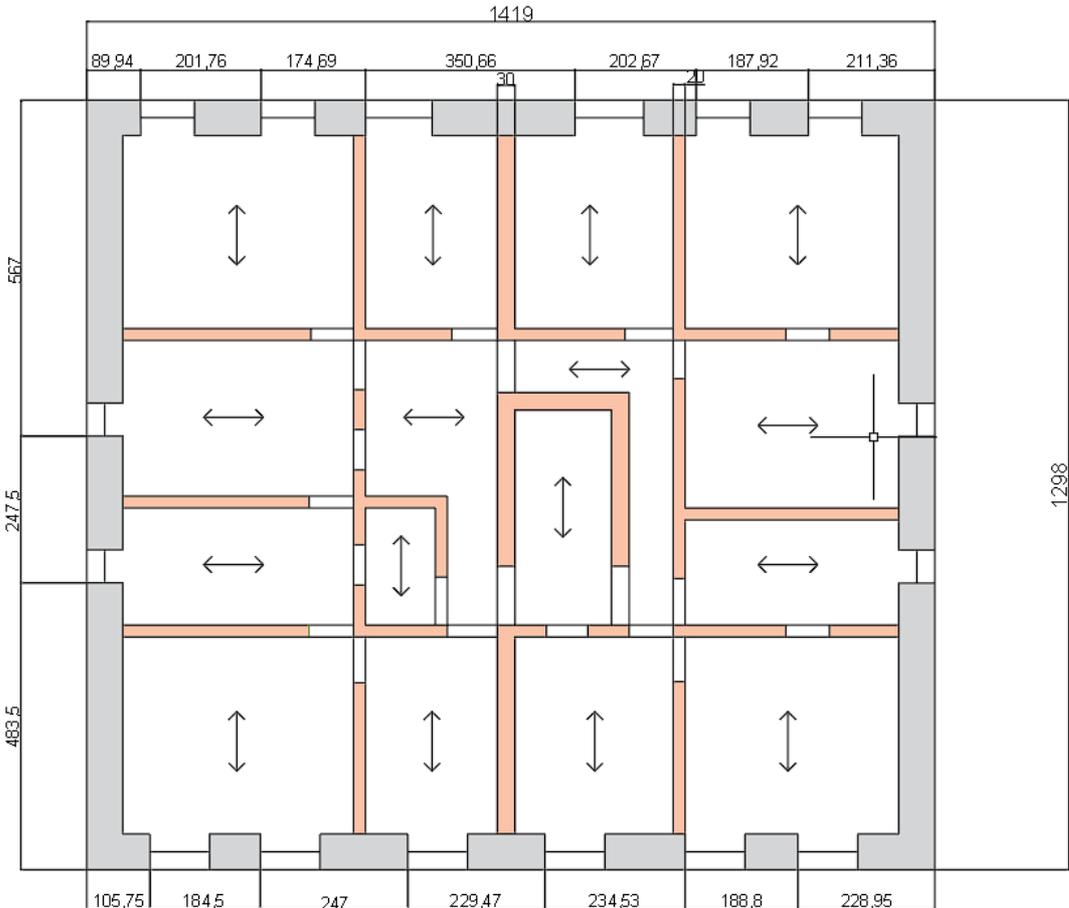


Figura 74 - Planta do caso de estudo.

## ANEXO B – NOMENCLATURA DAS PAREDES

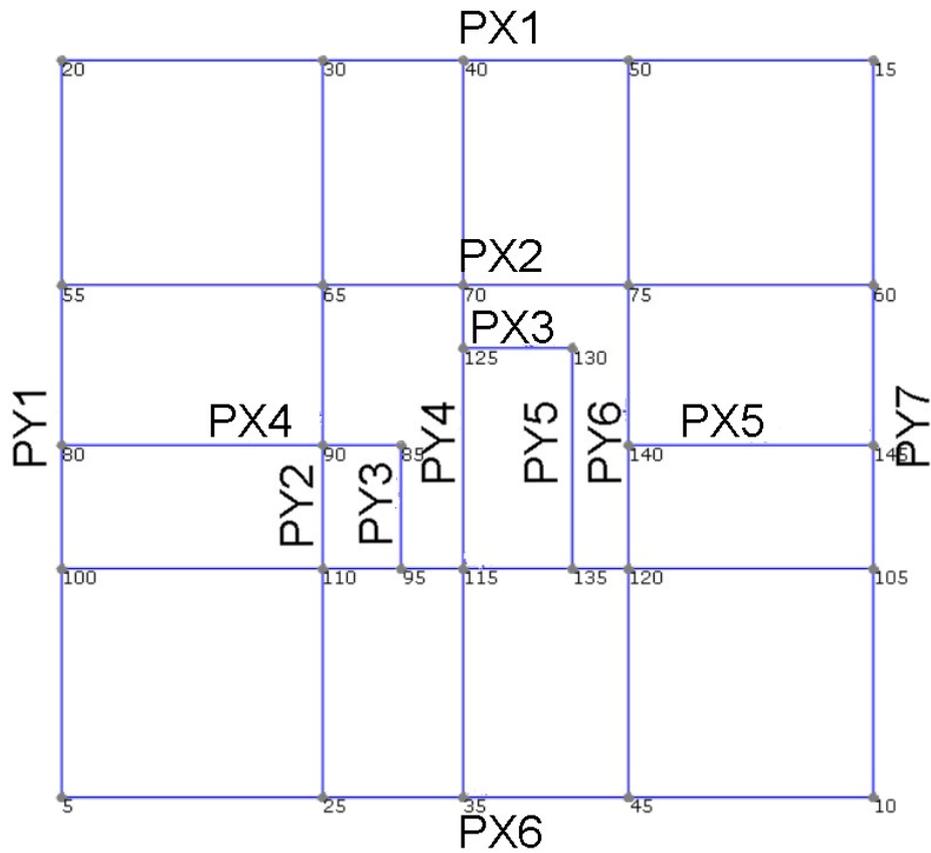


Figura 75 - Nomenclatura das paredes.

## ANEXO C – 3MURI



Figura 76 - Aplicação dos parâmetros do modelo.

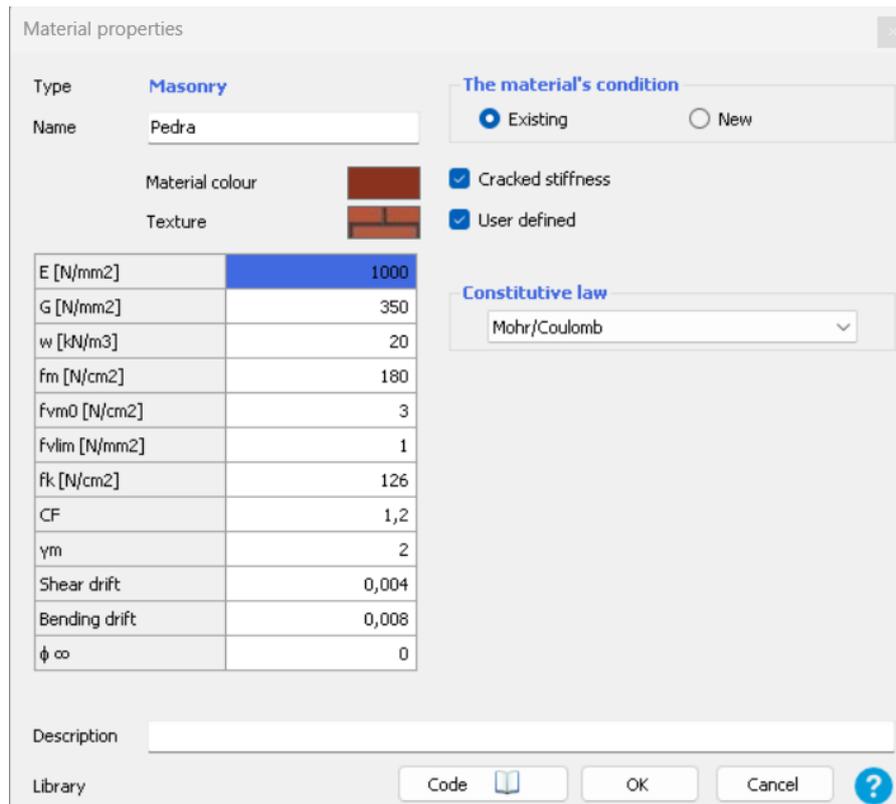


Figura 77 - Exemplo da definição de um material.

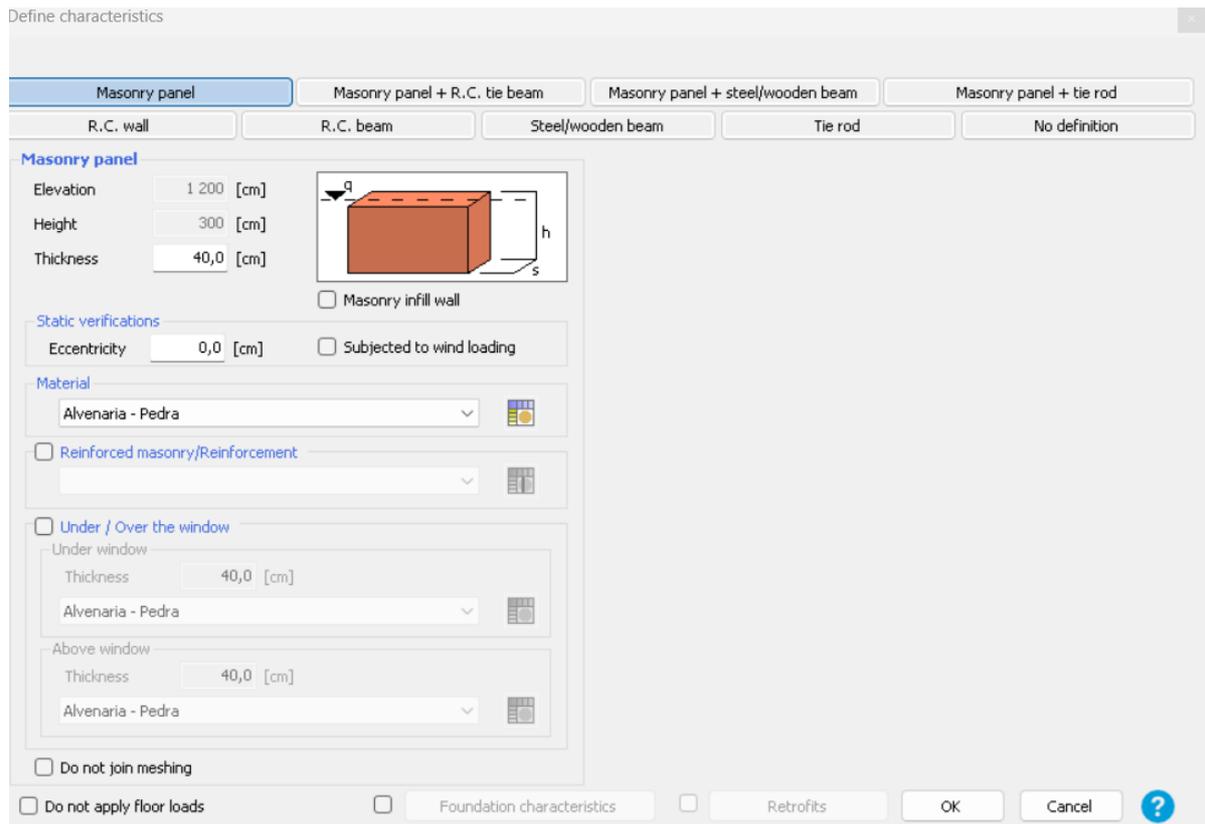


Figura 78 - Modelação das paredes.

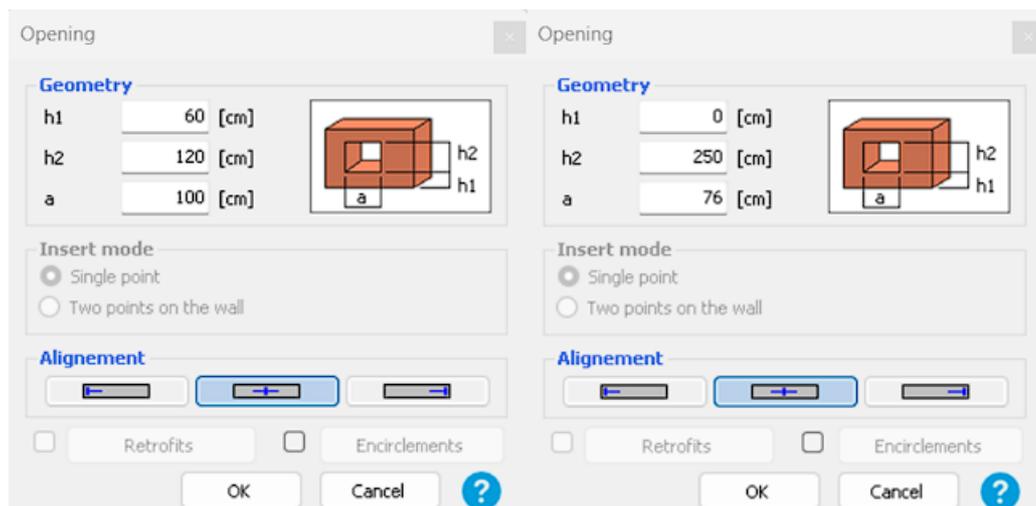
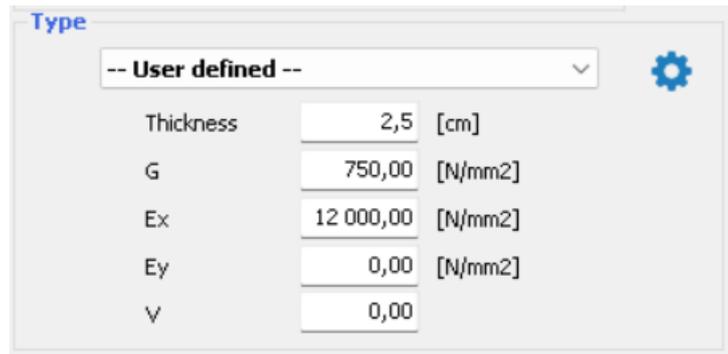
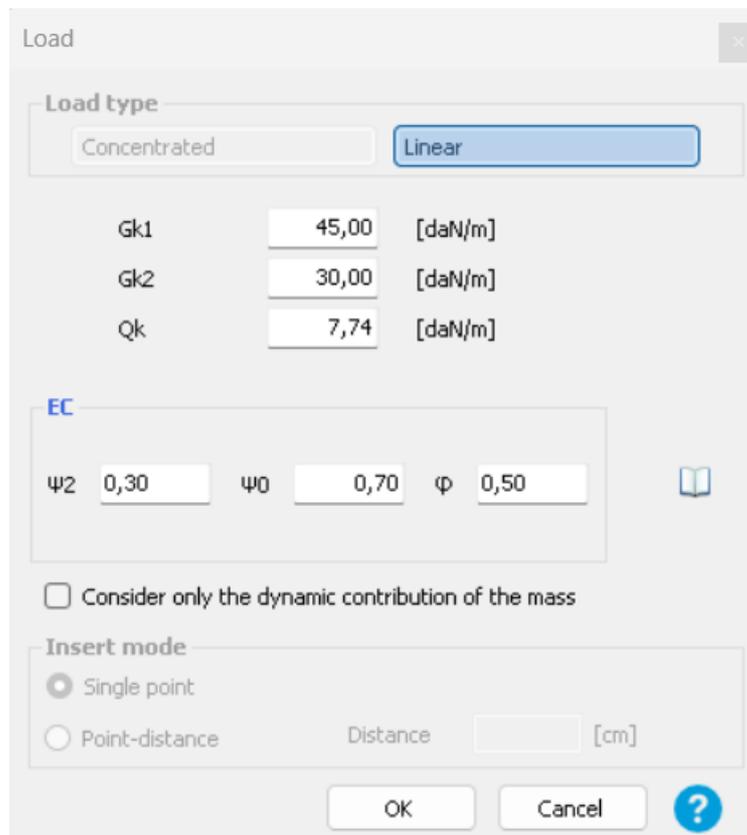


Figura 79 - Modelação das janelas e portas.



| Type               |           |                      |
|--------------------|-----------|----------------------|
| -- User defined -- |           |                      |
| Thickness          | 2,5       | [cm]                 |
| G                  | 750,00    | [N/mm <sup>2</sup> ] |
| Ex                 | 12 000,00 | [N/mm <sup>2</sup> ] |
| Ey                 | 0,00      | [N/mm <sup>2</sup> ] |
| v                  | 0,00      |                      |

Figura 80 - Modelação da laje.



| Load  |       |         |
|---|-------|---------|
| Load type   |       |         |
| <input type="radio"/> Concentrated <input checked="" type="radio"/> Linear  |       |         |
| Gk1   | 45,00 | [daN/m] |
| Gk2   | 30,00 | [daN/m] |
| Qk  | 7,74  | [daN/m] |
| EC  |       |         |
| ψ <sub>2</sub>  | 0,30  |         |
| ψ <sub>0</sub>  | 0,70  |         |
| φ   | 0,50  |         |
| <input type="checkbox"/> Consider only the dynamic contribution of the mass |       |         |
| Insert mode   |       |         |
| <input checked="" type="radio"/> Single point                               |       |         |
| <input type="radio"/> Point-distance  |       |         |
| Distance  |       | [cm]    |
| OK  |       | Cancel  |

Figura 81 - Características das cargas presente na caixa de cargas nos pisos 1, 2 e 3.

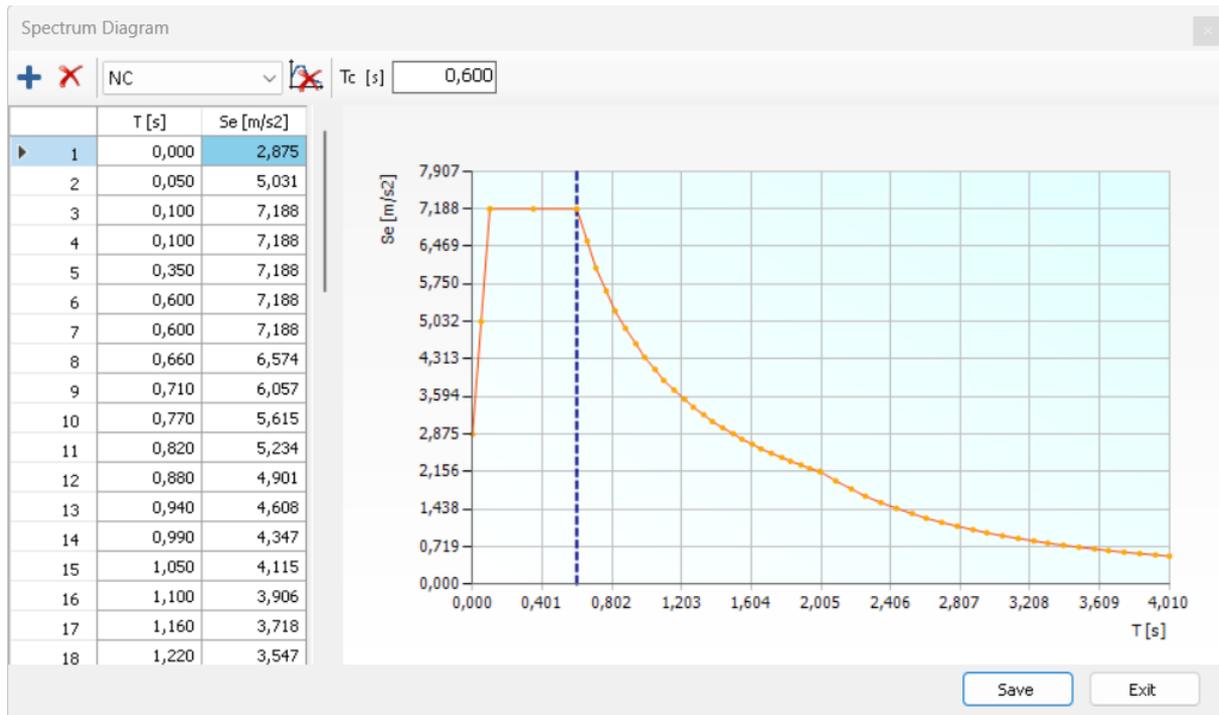


Figura 82 - Definição da ação sísmica.

Analysis

**Control node**

Level: [4] Level 4    Node: 125

Displacement: Use weighted average displacement

| No. | Compute analysis                    | Seism dir. | Seismic load       | Eccentricity [cm] |
|-----|-------------------------------------|------------|--------------------|-------------------|
| 1   | <input checked="" type="checkbox"/> | +X         | Uniform            | 0,0               |
| 2   | <input checked="" type="checkbox"/> | +X         | Modal distribution | 0,0               |
| 3   | <input checked="" type="checkbox"/> | -X         | Uniform            | 0,0               |
| 4   | <input checked="" type="checkbox"/> | -X         | Modal distribution | 0,0               |
| 5   | <input checked="" type="checkbox"/> | +Y         | Uniform            | 0,0               |
| 6   | <input checked="" type="checkbox"/> | +Y         | Modal distribution | 0,0               |
| 7   | <input checked="" type="checkbox"/> | -Y         | Uniform            | 0,0               |
| 8   | <input checked="" type="checkbox"/> | -Y         | Modal distribution | 0,0               |
| 9   | <input checked="" type="checkbox"/> | +X         | Uniform            | 64,9              |
| 10  | <input checked="" type="checkbox"/> | +X         | Uniform            | -64,9             |
| 11  | <input checked="" type="checkbox"/> | +X         | Modal distribution | 64,9              |
| 12  | <input checked="" type="checkbox"/> | +X         | Modal distribution | -64,9             |
| 13  | <input checked="" type="checkbox"/> | -X         | Uniform            | 64,9              |
| 14  | <input checked="" type="checkbox"/> | -X         | Uniform            | -64,9             |
| 15  | <input checked="" type="checkbox"/> | -X         | Modal distribution | 64,9              |
| 16  | <input checked="" type="checkbox"/> | -X         | Modal distribution | -64,9             |
| 17  | <input checked="" type="checkbox"/> | +Y         | Uniform            | 70,9              |
| 18  | <input checked="" type="checkbox"/> | +Y         | Uniform            | -70,9             |
| 19  | <input checked="" type="checkbox"/> | +Y         | Modal distribution | 70,9              |
| 20  | <input checked="" type="checkbox"/> | +Y         | Modal distribution | -70,9             |
| 21  | <input checked="" type="checkbox"/> | -Y         | Uniform            | 70,9              |
| 22  | <input checked="" type="checkbox"/> | -Y         | Uniform            | -70,9             |
| 23  | <input checked="" type="checkbox"/> | -Y         | Modal distribution | 70,9              |
| 24  | <input checked="" type="checkbox"/> | -Y         | Modal distribution | -70,9             |

Definition by seism angle

Rot. angle: 0 [°]

Add: -- None --

Increases

Delete

**General data**

Land level: 0,0000 [cm]

Maximum iteration no.: 500

Self weight precision: 0,0050

**Computation parameters**

Apply to All

Substeps: 200

Tolerance: 0,0005

Maximum displacement: 20,00 [cm]

Eccentricity: [ ] [cm]

**Select analysis**

Seism dir.: [ ]

Seismic load: [ ]

Eccentricity: [ ]

Select all    Deselect all

**Seismic load**

Proportional static forces

Modal distribution

OK    ?

Figura 83 - Parâmetros utilizados para a análise sísmica.

## ANEXO D – ENERGYPLUS

The screenshot shows the 'Weather File & Design Days' configuration window in EnergyPlus. The 'Weather File' section includes a 'Change Weather File' button and fields for Name (Lisboa), Latitude (38.73), Longitude (-9.15), Elevation (71), and Time Zone (0). A link to download weather files is provided. The 'Measure Tags (Optional)' section has dropdown menus for ASHRAE and CEC Climate Zones. The 'Design Days' section has an 'Import From DDY' button. The 'Select Year by:' section has radio buttons for 'Calendar Year' (set to 2000) and 'First Day of Year' (set to Sunday). The 'Daylight Savings Time:' section has a toggle set to 'off'. The 'Starts' and 'Ends' sections have radio buttons for 'Define by Day of The Week And Month' and 'Define by Date', with corresponding dropdown menus for date selection.

Figura 84 - Introdução do ficheiro climático.

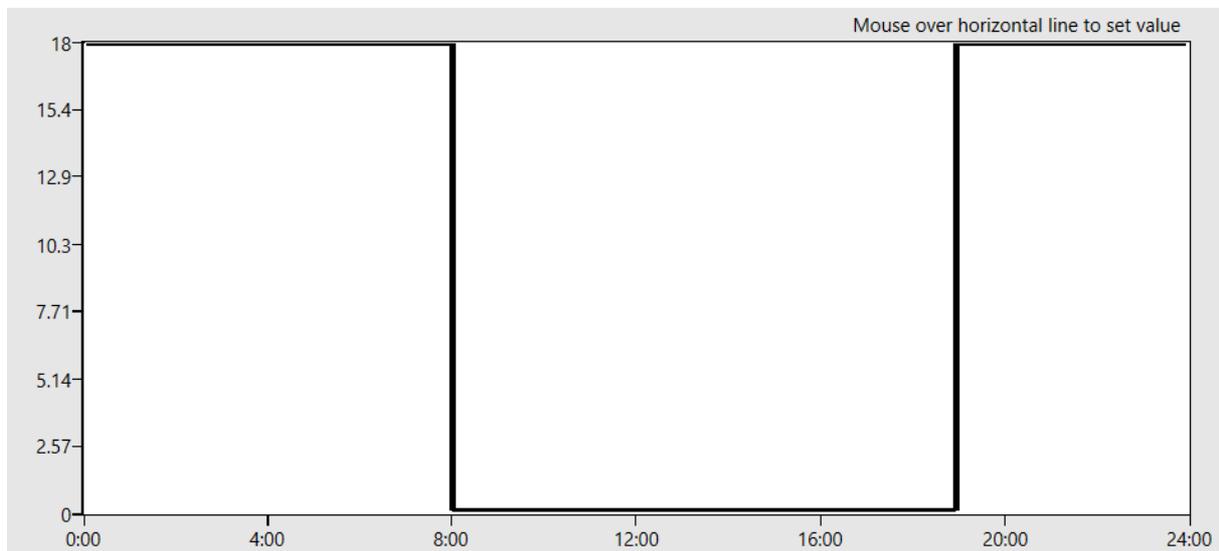


Figura 85 - Perfil de aquecimento durante a semana.

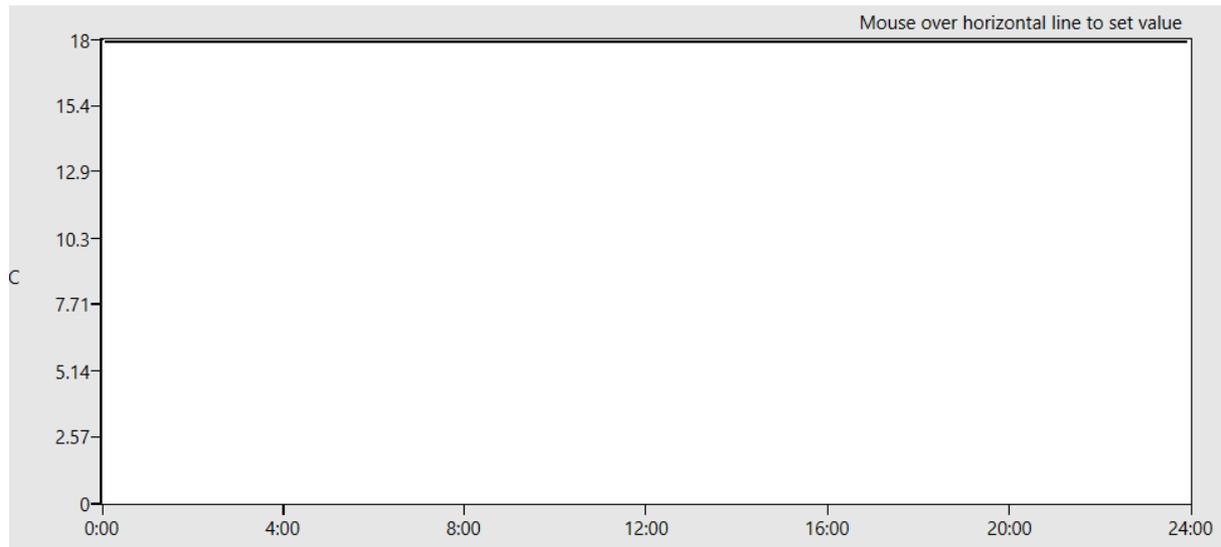


Figura 86 - Perfil de aquecimento durante o fim-de-semana.

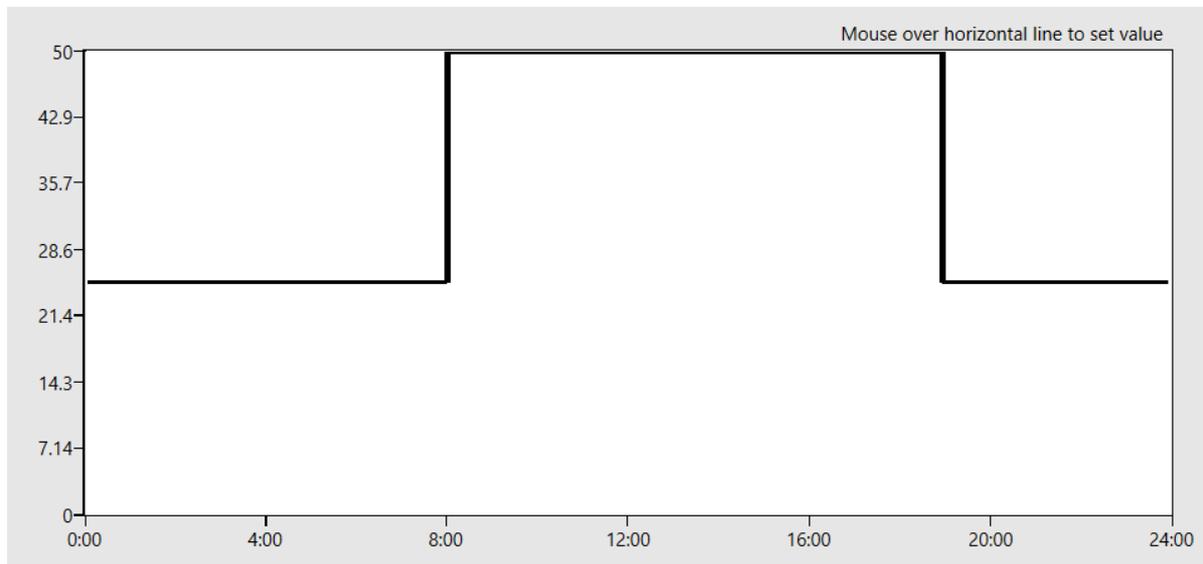


Figura 87 - Perfil de arrefecimento durante a semana.

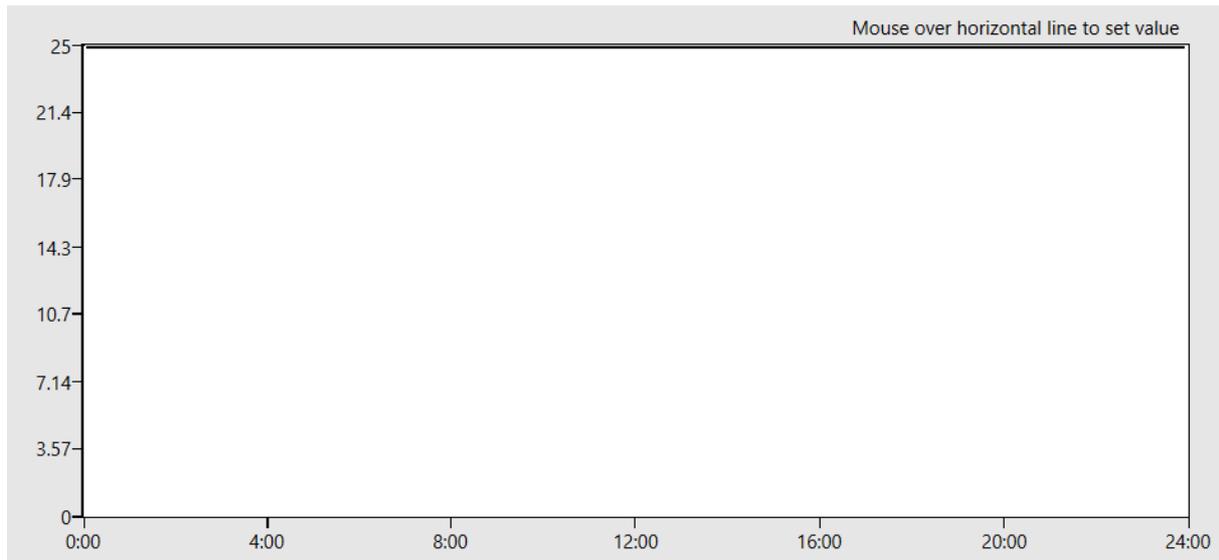


Figura 88 - Perfil de arrefecimento durante o fim-de-semana.

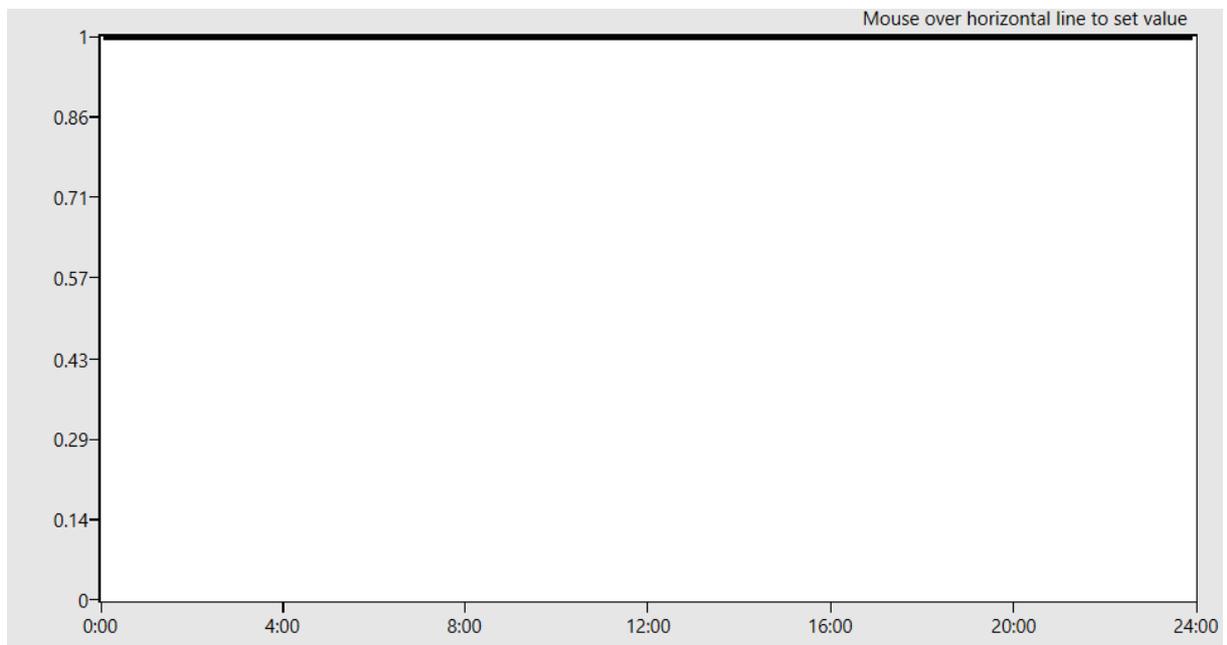


Figura 89 - Perfis de utilização dos equipamentos eletrónicos/infiltrações/renovações de ar.

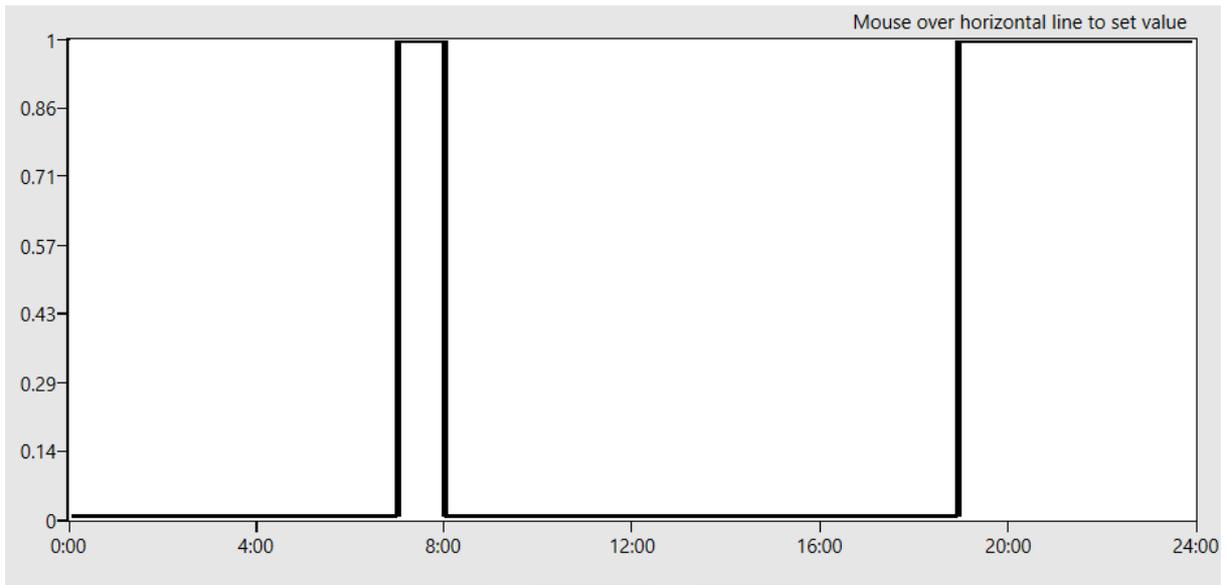


Figura 90 - Perfil do Uso da iluminação durante a semana.

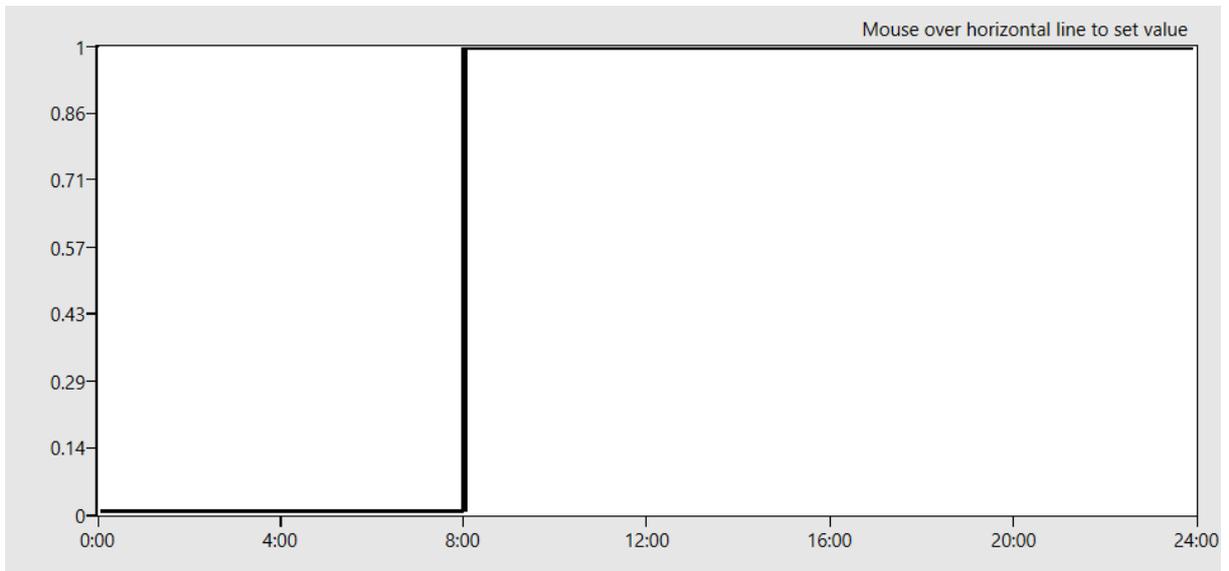


Figura 91 - Perfil do Uso da iluminação durante o fim-de-semana.

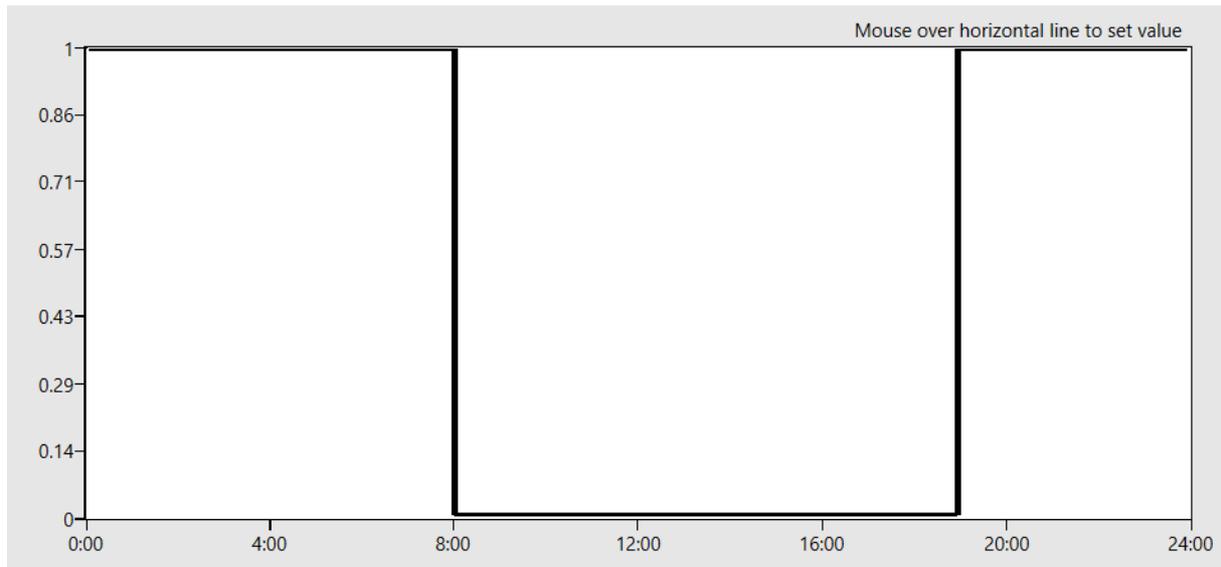


Figura 92 - Perfil de ocupação durante a semana.

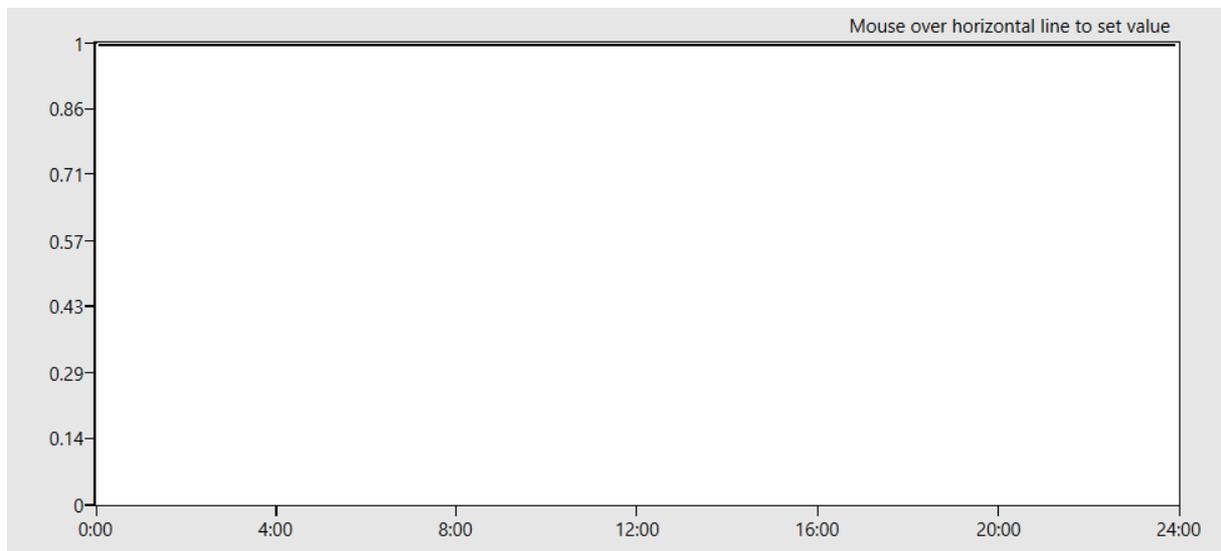


Figura 93 - Perfil de ocupação durante o fim-de-semana.

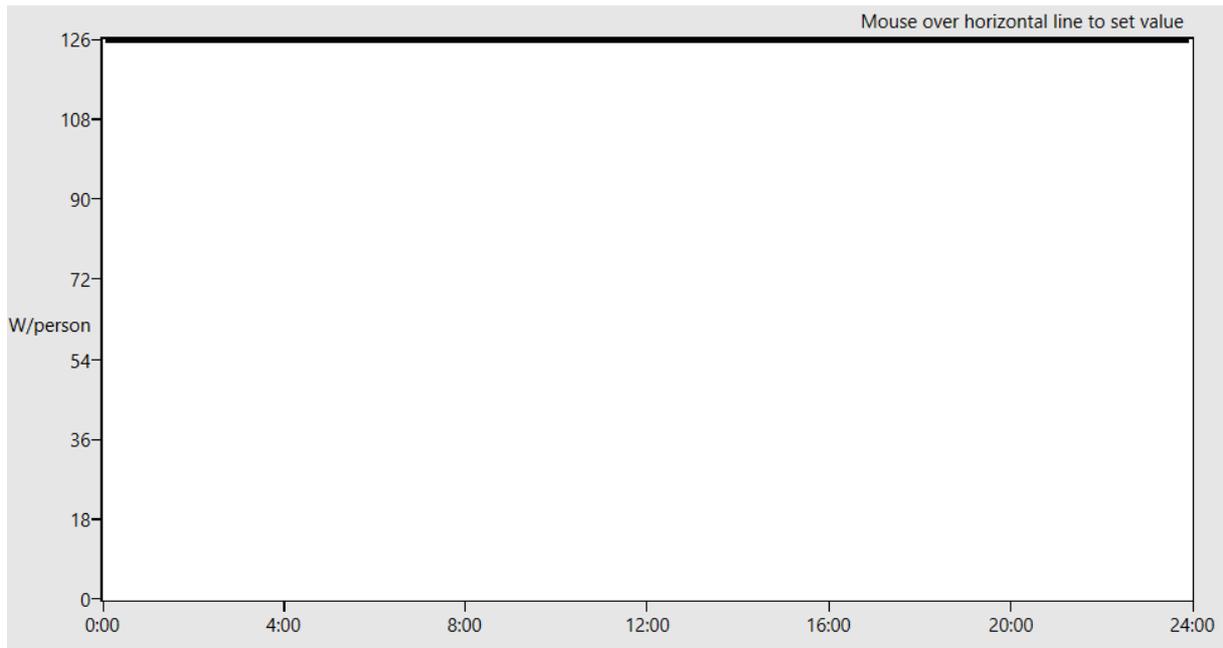


Figura 94 - Perfil de taxa metabólica.

**Name:**  
Alevanaria de Pedra-0,4

---

**Measure Tags (Optional):**

*Standard:*  *Standard Source:*

*Standards Category:*  *Standards Identifier:*

*Composite Framing Material:*  *Composite Framing Configuration:*

*Composite Framing Depth:*  *Composite Framing Size:*

*Composite Cavity Insulation:*

---

**Roughness:**  **Thickness:**  m

**Conductivity:**  W/m-K **Density:**  kg/m<sup>3</sup>

**Specific Heat:**  J/kg-K **Thermal Absorptance:**

**Solar Absorptance:**  **Visible Absorptance:**

Figura 95 - Exemplo da adição de um novo material.

**Name:**  
Equipamentos Elétronicos

**Design Level:**  W    **Watts Per Space Floor Area:**  W/m<sup>2</sup>    **Watts Per Person:**  W/person

**Fraction Latent:**     **Fraction Radiant:**

**Fraction Lost:**

Figura 96 - Exemplo da adição de uma carga térmica.

## ANEXO E – DESIGNAÇÃO DE DANOS

|   |                              |  |
|---|------------------------------|--|
|    | Undamaged                    | Sem danos  |
|    | Plasticity incipiente        | Regime plástico iminente: Quando um elemento está no campo elástico mas está próximo da plastificação  |
|    | Shear damage                 | Dano por corte   |
|    | Incipient shear failure      | Colapso por corte iminente   |
|    | Shear failure                | Colapso por corte  |
|    | Bending damage               | Dano por flexão  |
|    | Incipient bending failure    | Colapso por flexão iminente  |
|    | Bending failure              | Colapso por flexão   |
|    | Serious crisis               | Colapso crítico  |
|    | Compression failure          | Colapso por compressão   |
|    | Tension failure              | Colapso por tração: Alvenaria reforçada: A tração provocou a rutura do reforço, este é um estado irreversível  |
|   | Failure during elastic phase | Colapso durante o regime elástico  |
|  | Ineffective element          | Elemento ineficiente (pode evoluir para qualquer tipo de colapso): A alvenaria comum: A alvenaria não é eficaz; isto não é uma rutura real, mas um estado temporário reversível que pode evoluir para qualquer outro tipo de rutura. |

Figura 97 - Designação de danos (Almeida, 2022).