

ANÁLISE DO IMPACTO DE SOLUÇÕES DE REFORÇO SÍSMICO NO DESEMPENHO TÉRMICO DE EDIFÍCIOS ANTIGOS

PEDRO GABRIEL PEREIRA ALVES

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM CONSTRUÇÕES

Orientador: Professora Doutora Eva Sofia Botelho Machado Barreira

Coorientador: Professor Doutor Ricardo Manuel dos Santos Ferreira
de Almeida

Coorientador: Professor Doutor Tiago Miguel dos Santos Ferreira

JULHO DE 2021

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2020/2021

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2020/2021 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2021.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

Ao meu Pai

Conhecimento é Poder

Francis Bacon

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho só foi possível devido à contribuição e ao apoio de um conjunto de pessoas, às quais gostaria de manifestar o meu profundo e sincero agradecimento.

Primeiramente, o meu agradecimento à Professora Doutora Eva Barreira, pela orientação, disponibilidade e motivação dada para a concretização de todas as fases do trabalho.

Aos Professores Doutores, Ricardo Almeida e Tiago Ferreira por toda a atenção, empenho e disponibilidade na coorientação deste trabalho.

À minha namorada, Eva Costa, pelo apoio, afeto, paciência e motivação que demonstrou todos os dias.

Aos meus colegas, em especial ao Francisco Carneiro e Diogo Barbosa, pela vivências e companheirismo ao longo destes anos.

Ao arquiteto Joel Marinho, meu primo, pela partilha de experiências e conhecimento importantes para a realização de diversas fases do trabalho.

À minha madrinha, Natália Marinho e seu esposo, Joel Almeida, pela preocupação, ajuda e motivação.

Por fim, um agradecimento muito especial ao meu pai que já partiu, à minha mãe e aos meus irmãos pela oportunidade, amor e educação.

RESUMO

As estruturas antigas em alvenaria de pedra estão muito presentes por toda a Europa. Geralmente, esta tipologia construtiva apresenta uma razoável resistência térmica e bom isolamento acústico. No entanto, a sua resistência sísmica é frequentemente insuficiente, podendo, em casos de eventos de elevada intensidade, apresentar mecanismos de dano e de colapso que colocam em causa não apenas a segurança estrutural do edifício, mas igualmente a segurança dos seus ocupantes e daqueles que se encontram nas imediações do edifício.

Com o intuito de resolver este problema, foram estudadas, ao longo dos anos, várias técnicas de reforço que permitem incrementar o desempenho sísmico destas estruturas e que, dessa forma, contribuem para a segurança e para salvaguarda deste património edificado. No entanto, as preocupações recentes em termos de consumos energéticos dos edifícios e de impactos ambientais levam a que as consequências provocadas por estes reforços tenham que ser avaliadas.

Assim, o objetivo fundamental desta dissertação é avaliar o impacto da aplicação de algumas soluções de reforço sísmico em edifícios tradicionais de alvenaria de pedra. Foi definido um edifício-tipo, representativo desta tipologia construtiva, e efetuada uma série de simulações numéricas com o software THERM 7.7 para avaliar o desempenho térmico dessas soluções com base no seu Coeficiente de Transmissão Térmica, U. No que diz respeito à avaliação da vulnerabilidade sísmica, apresentam-se os resultados para o edifício-tipo seguindo uma metodologia simplificada baseada num índice de vulnerabilidade.

Do ponto de vista do desempenho térmico das paredes, as melhores soluções são maioritariamente, as que apresentam, em simultâneo, reboco armado e reboco térmico devido ao aumento de espessura e à aplicação de uma camada com melhor desempenho térmico. Em relação ao comportamento sísmico do edifício, das soluções consideradas, as que apresentam melhor desempenho sísmico são as que contém, em simultâneo, a aplicação de chapas quinadas sob os pavimentos e reboco armado dado que melhoram o tipo e organização do sistema resistente e a sua qualidade (parâmetros que apresentam maior peso no cálculo do I_v). Do ponto de vista da avaliação conjunta do desempenho térmico e sísmico, a aplicação de chapas quinadas sob os pavimentos ou aplicação de chapas no centro das vigas de pavimento e introdução de uma viga cinta perimetral aliadas com a solução de reboco armado e reboco térmico são as que apresentam melhores resultados nas diversas zonas da parede, sendo que as primeiras contribuem mais para a redução do I_v e as segundas para a redução do valor de U.

Em suma, a presente dissertação pretende contribuir para o conhecimento relativo à quantificação do comportamento térmico de paredes de alvenaria de pedra, como consequência da introdução de um conjunto de técnicas de reforço estrutural amplamente utilizadas com vista à melhoria do desempenho sísmico destes edifícios.

PALAVRAS-CHAVE: Edifícios antigos, alvenaria de pedra, reforço sísmico, vulnerabilidade sísmica comportamento térmico.

ABSTRACT

Old masonry structures can be found all over Europe. In general, this type of solution presents a reasonable thermal resistance and good acoustic isolation. However, its seismic performance is in general insufficient, frequently suffering damage and failure mechanisms that may often threaten the structural safety of the building, its occupants, and the people around it.

In an attempt to fix this issue, various reinforcement techniques have been studied over the last decades, which allowed to increase the seismic performance of these buildings substantially. Despite this, recent worries regarding energetic consumption and environmental impact have forced to rethink and reassess these reinforcements from the point of view of their energetic performance.

Therefore, the main objective of this study is to evaluate the impact of some of the most widely applied seismic retrofitting solutions on traditional stone masonry buildings. A representative case study building was defined, and a series of numerical simulations using THERM 7.7 software were run to evaluate the thermal performance of these solutions based on their thermal transmission coefficient, U . Regarding the seismic performance of the case study building, before and after retrofit, it was evaluated resorting to an index-based seismic vulnerability assessment.

From the obtained results, it was possible to observe that, considering the thermal performance alone, the retrofit with insulating plasters proved to be the most efficient solution due to the increased thickness of the wall and the addition of a new layer with a better thermal performance. In the same line, when considering the seismic behaviour of the buildings alone, the solutions that include, simultaneously, the stiffening of the original flooring systems and the retrofit of the masonry wall with reinforced plasters were those that led to a greater reduction in the seismic vulnerability of the building. Finally, when considering both the thermal and the seismic performance of the building, the solution involving the stiffening of the flooring system, the introduction of a peripheral strap beam on the top of the walls, and the retrofit of façade wall using insulating reinforced plasters revealed to be the most efficient combination, leading to a significant reduction both in the vulnerability index, I_v , in the thermal transmission coefficient, U .

In summary, the present study intends to contribute to the body of knowledge on the evaluation of the thermal performance of traditional stone masonry buildings by analysing the impact that some of the most widely applied seismic retrofitting techniques have on the thermal performance of these buildings.

KEYWORDS: Old Buildings, stone masonry, seismic reinforcement, seismic vulnerability, thermal behaviour.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
ÍNDICE GERAL	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	xi
ÍNDICE DE TABELAS	xiii
SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS	xv
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	1
1.2. OBJETIVOS DO TRABALHO.....	2
1.3. ORGANIZAÇÃO E ESTRUTURA DO TEXTO.....	2
2. DESEMPENHO TÉRMICO DE EDIFÍCIOS	5
2.1. ENQUADRAMENTO.....	5
2.2. MECANISMOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR.....	5
2.3. CARACTERIZAÇÃO TÉRMICA DE PAREDES.....	6
2.3.1. CONCEITO DE COEFICIENTE DE TRANSMISSÃO TÉRMICA.....	6
2.3.2. MÉTODO DE CÁLCULO TEÓRICO DO COEFICIENTE DE TRANSMISSÃO TÉRMICA.....	6
2.3.3. CONCEITO DE PONTE TÉRMICA.....	9
2.4. LEGISLAÇÃO E DOCUMENTOS NORMATIVOS NO DOMÍNIO DA REABILITAÇÃO ENERGÉTICA DE EDIFÍCIOS DE HABITAÇÃO.....	9
2.5. SIMULAÇÃO BIDIMENSIONAL DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR.....	11
3. COMPORTAMENTO SÍSMICO DE EDIFÍCIOS TRADICIONAIS EM ALVENARIA DE PEDRA	13
3.1. ENQUADRAMENTO.....	13
3.2. VULNERABILIDADE SÍSMICA EM EDIFÍCIOS ANTIGOS.....	14
3.2.1. ENQUADRAMENTO E NÍVEIS DE ANÁLISE.....	14
3.2.2. METODOLOGIAS DE AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE SÍSMICA.....	15
3.2.2.1. Metodologia baseada na vulnerabilidade observada.....	15

3.2.2.2. Metodologia baseada em modelos simplificados.....	16
3.2.2.3. Metodologia de análise detalhada.....	16
3.3. REFORÇO SÍSMICO DE EDIFÍCIOS DE ALVENARIA DE PEDRA.....	16
3.4. ESTUDOS DE REABILITAÇÃO SÍSMICA EM EDIFÍCIOS DE ALVENARIA DE PEDRA	19
4. METODOLOGIA	21
4.1. APRESENTAÇÃO DO CASO DE ESTUDO	21
4.2. SITUAÇÕES PADRÃO ADOTADAS E SOLUÇÕES DE REFORÇO SÍSMICO	22
4.2.1. SITUAÇÕES PADRÃO ADOTADAS	22
4.2.2. SOLUÇÕES DE REFORÇO SÍSMICO.....	24
4.3. METODOLOGIA DE ANÁLISE DO DESEMPENHO TÉRMICO	29
4.3.1. PROGRAMA THERM 7.7	29
4.3.2. DESCRIÇÃO GERAL DO FUNCIONAMENTO DO THERM 7.7	30
4.3.2.1. Equação de transferência de calor.....	30
4.3.2.2. Dados de entrada	31
4.3.2.3. Saída de resultados.....	32
4.4. METODOLOGIA DE ANÁLISE DA VULNERABILIDADE SÍSMICA	33
4.4.1. APRESENTAÇÃO GERAL DO MÉTODO A UTILIZAR	33
4.4.2. ESTRATÉGIAS DE APLICAÇÃO	34
5. SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO DESEMPENHO TÉRMICO DAS PAREDES: ANÁLISE DE RESULTADOS	37
5.1. NOTA INTRODUTÓRIA	37
5.2. INFLUÊNCIA DA INTRODUÇÃO DE REFORÇOS SÍSMICOS E REBOCO TÉRMICO	37
5.2.1. ZONA CORRENTE DA PAREDE DE ALVENARIA	37
5.2.2. ZONA DA LIGAÇÃO PAVIMENTOS-PAREDES PRINCIPAIS	38
5.2.3. ZONA DA LIGAÇÃO PAVIMENTOS-PAREDES DE EMPENA.....	40
5.2.4. ZONA DA LIGAÇÃO COBERTURA-PAREDES	41
5.3. SÍNTESE CRÍTICA	43

6. VULNERABILIDADE SÍSMICA DO EDIFÍCIO: ANÁLISE DE RESULTADOS	45
6.1. ENQUADRAMENTO	45
6.2. AVALIAÇÃO DO ÍNDICE DE VULNERABILIDADE	45
6.2.1. ANTES DO REFORÇO (AR)	45
6.2.2. ANÁLISE DO IMPACTO DE REFORÇO SÍSMICO NO EDIFÍCIO EM ESTUDO	56
6.2.2.1. Reforço S1/S1_1	56
6.2.2.2. Reforço S2 ou LCP+S2	57
6.2.2.3. Reforço S3/S3_1	58
6.2.2.4. Reforço S4 ou S4_1	59
6.2.2.5. Reforço S1+S2	60
6.2.2.6. Reforço S1+S4/S1_1+S4 e S1+S2+S4	61
6.2.2.7. Reforço S2+S4 ou LCP+S2+S4	62
6.2.2.8. Reforço S3+S4/S3_1+S4	63
6.3. SÍNTESE CRÍTICA	64
7. DESEMPENHO TÉRMICO E VULNERABILIDADE SÍSMICA: ANÁLISE CONJUNTA DE RESULTADOS	67
7.1. ENQUADRAMENTO	67
7.2. ZONA CORRENTE DA PAREDE DE ALVENARIA	67
7.3. ZONA DA LIGAÇÃO PAVIMENTO-PAREDES PRINCIPAIS	68
7.4. ZONA DA LIGAÇÃO PAVIMENTO-PAREDES DE EMPENA	69
7.5. ZONA DA LIGAÇÃO COBERTURA-PAREDES	70
7.6. SÍNTESE CRÍTICA	71
8. CONCLUSÕES	73
8.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS	73
8.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	74
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	77

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Transferência de Calor através de um elemento de construção [3].....	6
Figura 2 - Componente não homogéneo termicamente [4]	8
Figura 3 - Parede em Alvenaria de Pedra (adaptado de [18])	13
Figura 4 - Pormenor da ligação dos pavimentos às paredes resistentes: (a) utilização de chapas quinas na base das vigas de madeira; (b) utilização de chapas metálicas aplicadas no centro das vigas de madeira [21]	17
Figura 5 - Utilização de tirantes ao nível dos pavimentos [21]	18
Figura 6 - Viga cinta no topo da parede de alvenaria com ligação metálica à cobertura [20]	18
Figura 7 - Aplicação de reboco armado nas duas faces da parede [22]	19
Figura 8 - Reboco armado apenas numa face da parede [22]	19
Figura 9 - Modelo tridimensional do caso de estudo	21
Figura 10 - Soluções padrão de uma parede tradicional em alvenaria de pedra: (a) zona corrente; (b) ligação das paredes principais aos pavimentos; (c) ligação das paredes secundárias aos pavimentos; (d) ligação das coberturas às paredes	23
Figura 11 - Localização dos planos de corte (adaptado de [7])	30
Figura 12- Dados de entrada: (a) Propriedades dos materiais sólidos; (b) Propriedades das cavidades [14].....	31
Figura 13 - Dados de entrada: condições fronteiras interiores e exterior [14]	32
Figura 14 - Saída de resultados [14]	33
Figura 15 - Variações do valor U consoante a aplicação de reforços sísmicos na zona corrente da parede de alvenaria.....	38
Figura 16 - Variações do valor U na zona da ligação pavimentos-paredes principais	39
Figura 17 - Variação do valor U na zona da ligação pavimentos-paredes secundárias.....	40
Figura 18 - Variação do valor U na zona da ligação cobertura-paredes	42
Figura 19 - Soluções de cobertura não impulsiva	54
Figura 20 - Parâmetros e índice de vulnerabilidade sísmica para a situação antes do reforço (AR)...	56

Figura 21 - Parâmetros e índice de vulnerabilidade sísmica do reforço S1/S1_1	57
Figura 22 - Parâmetros e índice de vulnerabilidade sísmica do reforço S2	58
Figura 23 - Parâmetros e índice de vulnerabilidade sísmica do reforço LCP+S2	58
Figura 24 - Parâmetros e índice de vulnerabilidade sísmica do reforço S3/S3_1	59
Figura 25 - Parâmetros e índice de vulnerabilidade sísmica do reforço S4	60
Figura 26 - Parâmetros e índice de vulnerabilidade sísmica do reforço S4_1	60
Figura 27 - Parâmetros e índice de vulnerabilidade sísmica do reforço S1+S2	61
Figura 28 - Parâmetros e índice de vulnerabilidade sísmica do reforço S1+S4/S1_1+S4 e S1+S2+S4	62
Figura 29 - Parâmetros e índice de vulnerabilidade sísmica do reforço S2+S4	62
Figura 30 - Parâmetros e índice de vulnerabilidade sísmica do reforço LCP+S2+S4	63
Figura 31 - Parâmetros e índice de vulnerabilidade sísmica do reforço S3+S4/S3_1+S4	64
Figura 32 - Variação dos valores de U e I_v na zona corrente	68
Figura 33 - Variação dos valores de U e I_v na zona da ligação pavimentos- paredes principais	69
Figura 34 - Variação dos valores de U e I_v na zona da ligação pavimentos - paredes secundárias....	70
Figura 35 - Variação dos valores de U e I_v na zona da ligação cobertura-paredes	71

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Coeficiente de transmissão térmica superficiais máximos de elementos opacos e de vãos envidraçados, $U_{máx}$ [W/(m ² °C)] (adaptado de [9]).....	11
Tabela 2 - Coeficientes de transmissão térmica superficiais máximos admissíveis de elementos opacos e de vãos envidraçados, $U_{máx}$ [W/(m ² °C)][13].....	11
Tabela 3 - Metodologia de avaliação da vulnerabilidade sísmica em diferentes escalas [24]	15
Tabela 4 - Matriz de probabilidade de dano [24].....	16
Tabela 5 - Propriedades dos materiais utilizados	24
Tabela 6 - Soluções de Reforço Sísmico	24
Tabela 7 - Pormenores construtivos e descrição das soluções adotadas.....	25
Tabela 8 - Índice de vulnerabilidade sísmica de edifícios [33].....	34
Tabela 9 - Síntese dos resultados da simulação numérica	43
Tabela 10 - Classes de vulnerabilidade do parâmetro P1 [24]	46
Tabela 11 - Classes de vulnerabilidade do parâmetro P2 [24]	46
Tabela 12 - Classes de vulnerabilidade do parâmetro P3 [24]	48
Tabela 13 - Classes de vulnerabilidade do parâmetro P4 [24]	48
Tabela 14 - Classes de vulnerabilidade do parâmetro P5 [24]	49
Tabela 15 - Classes de vulnerabilidade do parâmetro P6 [24]	50
Tabela 16 - Classes de vulnerabilidade do parâmetro P7 [24]	51
Tabela 17 - Classes de vulnerabilidade do parâmetro P8 - adaptado de [24].....	51
Tabela 18 - Classes de vulnerabilidade do parâmetro P9 [24]	52
Tabela 19 - Classes de vulnerabilidade do parâmetro P10 [24]	52
Tabela 20 - Classes de vulnerabilidade do parâmetro P11 [24]	53
Tabela 21 - Classes de vulnerabilidade do parâmetro P12 [24]	54
Tabela 22 - Classes de vulnerabilidade do parâmetro P13 [24]	55
Tabela 23 - Classes de vulnerabilidade do parâmetro P14 [24]	55

Tabela 24 - Síntese dos resultados da avaliação do índice de vulnerabilidade 64

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

- A_t – Área coberta [m²]
 A_x – Área de parede resistente na direção X
 A_y – Área de parede resistente na direção Y
 C – Valor de referência para a resistência convencional
 C_{conv} – Resistência convencional do edifício
 C_{vi} – Classe de vulnerabilidade no cálculo do I_v
 d – Espessura da camada de uma parede [m]
 d_{min} – Distância mínima ao elemento central
 f_a - Fração de área de uma secção
 h_e – Condutância térmica superficial exterior
 h_i – Condutância térmica superficial interior
 h_0 – Distância entre pavimento/pavimento ou cobertura/pavimentos bem ligados
 I_v – Índice de vulnerabilidade sísmica de edifícios normalizado (0-100)
 I_v^* - Índice de vulnerabilidade sísmica de edifícios, não normalizados (0-750)
 L – Distância máxima entre paredes [m]
 N – Número de camadas termicamente homogêneas
 N – Número de pisos do edifício
 p – Inclinação do terreno
 p_i – Peso de cada parâmetro no cálculo de I_v
 p_m – Peso específico da alvenaria
 p_s – Peso por unidade de área de pavimento
 q – Densidade do fluxo de calor
 R – Resistência Térmica [(m²°C)/W]
 R_{aj} – Resistência Térmica de cada camada não homogênea e de determinada secção [(m²°C)/W]
 R_{Ta} – Resistência Térmica Total de ambiente para ambiente [(m²°C)/W]
 R_{se} – Resistência superficial exterior [(m²°C)/W]
 R_{si} – Resistência superficial interior [(m²°C)/W]
 R_j – Resistência térmica de uma camada j [(m²°C)/W]
 R_{TOTAL} – Resistência térmica total
 $R_{TOTAL;SUP.}$ – Limite superior da resistência térmica total [(m²°C)/W]
 $R_{TOTAL;INF.}$ – Limite inferior da resistência térmica total [(m²°C)/W]

s – Espessura da parede resistente

T – Temperatura [°C]

U – Coeficiente de transmissão térmica [W/(m²°C)]

$U_{máx}$ – Coeficiente de transmissão térmica máximo [W/(m²°C)]

$U_{mín}$ – Coeficiente de transmissão térmica mínimo [W/(m²°C)]

U_{hom} – Coeficiente de transmissão térmica homogéneo [W/(m²°C)]

U_{real} – Coeficiente de transmissão térmica real [W/(m²°C)]

w – Peso específico [kN/m²]

α – Valor normalizado da resistência convencional

$\beta_1; \beta_2$ – Relação geométrica para calculo da classe do parâmetro P8

Δh - Diferença de cotas de fundação

λ – Condutibilidade térmica do material seco [W/m°C]

τ_k – Valor da tensão resistente ao corte

AP – Alvenaria de Pedra

AR – Antes do Reforço

HR – Humidade Relativa

LCP – Ligação Cobertura – Paredes

LPP – Ligação pavimentos – Paredes Principais

LPP (SEC.) – Ligação pavimentos – Paredes Secundárias

LSF – Lightweight Steel Framed

REH – Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação

RT – Reboco Térmico

ZC – Zona Corrente

1

INTRODUÇÃO

1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

As construções antigas em alvenaria de pedra constituem, ainda, cerca de 50% do parque construído português [1]. Apesar de inicialmente serem estruturas simples e frágeis, eram construídas devido à relativa facilidade em termos de processo construtivo e mão de obra, uma vez que se baseiam na sobreposição de elementos unitários (pedras). Para além disso, a disponibilidade do material no nosso país, sobretudo no Norte, bem como a sua elevada resistência e longevidade são fatores que despertavam o interesse para que as construções se realizassem em pedra.

Primitivamente, não são encontrados sinais da utilização de princípios de resistência sísmica em edifícios e, apesar de existirem, em muitas geografias os terremotos, não influenciaram de forma significativa a maneira de construir edifícios em alvenaria de pedra. Este fenómeno acontece, pelo facto dos sismos serem considerados um acontecimento sobrenatural com períodos de retorno de centenas de anos, levando a que eventuais tecnologias sísmicas estudadas fossem esquecidas.

Com o passar dos anos e a ocorrência de eventos sísmicos, estes edifícios expuseram a sua menor resistência sísmica, razão pela qual foram desenvolvidos vários estudos com vista à melhor compreensão e à colmatação deste problema e, dessa forma, à salvaguarda das populações e à preservação deste património construído. A solução passa, muitas vezes, pela aplicação de técnicas de reforço tanto a nível global como a um nível local permitindo que as zonas mais críticas dos edifícios sejam capazes de resistir a fenómenos deste tipo.

Por outro lado, durante muito tempo, o conforto e o desempenho energético dos edifícios não eram objetos de regulamentação própria e, por isso, a aplicação destes tipos de reforços era realizado apenas tendo em conta a capacidade resistente e melhoria estrutural que se introduzia no edifício.

No entanto, o paradigma começou a alterar-se e as exigências de conforto requeridas por parte dos utilizadores e a necessidade de reduzir o consumo de energia começaram a ter peso na escolha de determinadas soluções, até porque estas, nomeadamente as que são à base de aço, provocam alterações que podem condicionar de forma significativa o comportamento térmico dos edifícios. No início dos anos 90, o aparecimento de regulamentos térmicos para edifícios permite melhorar o seu comportamento. A regulamentação mais recente neste domínio aumenta exigências, quer na construção nova, quer no edificado recente, e impõe restrições que têm necessariamente de ser compatibilizadas com o reforço sísmico dos edifícios.

Assim o título desta dissertação é atual e relevante devido às grandes oportunidades de reabilitação que se vive em Portugal.

1.2. OBJETIVO DO TRABALHO

O principal objetivo do trabalho desenvolvido, consiste na avaliação dos efeitos provocados pelo reforço sísmico no comportamento térmico de paredes tradicionais em alvenaria de pedra e na melhoria da resistência sísmica do edifício. Para atingir este objetivo estabeleceram-se um conjunto de tarefas sintetizadas de seguida:

- Aquisição de conhecimento dos princípios teóricos sobre transferência de calor e métodos de análise da vulnerabilidade sísmica.
- Análise de trabalhos relevantes sobre o comportamento térmico de paredes tradicionais antigas e soluções de reforço realizados ao longo dos últimos anos.
- Definição do caso de estudo e da metodologia adotada para análise da vulnerabilidade sísmica.
- Seleção de um programa de cálculo adequado à análise do comportamento térmico de diversos elementos construtivos para obtenção do coeficiente de transmissão térmica, U .
- Estudo de sensibilidade, com base nos resultados obtidos com o programa de cálculo, do impacto da introdução de técnicas de reforço sísmico no valor do coeficiente de transmissão térmica, U .
- Atribuição e cálculo do índice de vulnerabilidade sísmica do edifício considerado e consequentes alterações após o reforço sísmico – alterações em diversos parâmetros e reduções no valor do índice de vulnerabilidade sísmica, I_v .
- Análise da relação entre as variações do U e do I_v . É analisado em simultâneo o impacto das soluções no comportamento térmico e sísmico com o objetivo de perceber que soluções têm mais impacto.

1.3. ORGANIZAÇÃO E ESTRUTURA DO TEXTO

A presente dissertação está dividida em sete capítulos:

- O Capítulo 1 resume os objetivos e enquadra o trabalho realizado.
- O Capítulo 2 corresponde ao estado da arte e procura definir os conceitos teóricos fundamentais sobre as transferências de calor, a caracterização térmica de paredes e a legislação a aplicar a edifícios sujeitos a intervenção de reabilitação. Também se considera importante a apresentação não exaustiva de trabalhos realizados por outros autores no âmbito do comportamento térmico de paredes tradicionais antigas.
- O Capítulo 3 apresenta as construções realizadas em alvenaria de pedra, a definição e formas de avaliar a vulnerabilidade sísmica associada a edifícios a diferentes escalas, e algumas soluções de reforço mais comumente utilizadas. Inclui, também, estudos realizados por outros autores com vista à avaliação da vulnerabilidade sísmica e à análise da eficiência e técnicas de reforço sísmico em edifícios de alvenaria de pedra.
- O Capítulo 4 apresenta o caso de estudo, descreve as soluções de reforço que serão analisadas e o programa de cálculo utilizado para a simulação numérica. Apresenta ainda a sistematização dos dados necessários para a modelação numérica e a metodologia adotada para avaliação da vulnerabilidade sísmica.
- O Capítulo 5 demonstra o trabalho de simulação realizado e inclui uma análise de sensibilidade do impacto das soluções de reforço no valor do coeficiente de transmissão térmica, U . Numa determinada

zona da parede e variando o tipo de reforço é exibido o valor de U, permitindo a quantificação das variações das soluções em termos térmicos.

- O Capítulo 6 apresenta a atribuição das classes de cada parâmetro para o caso de estudo considerado, bem como o cálculo do índice de vulnerabilidade. É realizada também uma análise de resultados das variações do I_v em função da aplicação de diversas soluções de reforço sísmico.

- O Capítulo 7 engloba os estudos realizados nos capítulos anteriores em termos de variação em relação às situações padrão, permitindo conhecer os seus efeitos, em simultâneo, na vulnerabilidade sísmica e no comportamento térmico

- O Capítulo 8 apresenta as principais conclusões desta dissertação e perspectiva de trabalhos futuros no domínio desta investigação.

2

DESEMPENHO TÉRMICO DE EDIFÍCIOS

2.1. ENQUADRAMENTO

A caracterização térmica dos edifícios apresenta cada vez maior relevância, desde logo devido às crescentes exigências de conforto dos utilizadores, que têm de ser compatibilizadas com a necessidade de se melhorar a sua eficiência energética, reduzindo assim os impactos ambientais negativos na construção.

É necessário, por isso, que as soluções construtivas sejam desenvolvidas de modo que as perdas e os ganhos entre os diversos locais com condições distintas sejam controlados. Um dos primeiros passos nesse sentido passa por uma correta seleção dos materiais a utilizar [2].

2.2. MECANISMOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

A transferência de calor entre dois pontos de um elemento construtivo ocorre devido à existência de uma diferença de temperatura entre dois sistemas. Nestas circunstâncias, a transferência de calor ocorre do sistema com temperatura mais elevada para o sistema com temperatura mais reduzida. Existem três formas de transferência de calor que, normalmente, ocorrem em simultâneo num elemento construtivo [3]:

- **Condução:** A transmissão de calor ocorre devido à agitação das moléculas ou átomos sem se verificar movimentos internos. Esta agitação provoca a colisão das moléculas ocorrendo transferência de energia de regiões com maior nível energético para regiões com menor nível energético. Este mecanismo é uma forma de transmissão de calor típica dos materiais sólidos.
- **Convecção:** A transferência de energia resulta do movimento de um fluido, normalmente o ar, que transporta o calor através das suas partículas. A convecção pode ser classificada de natural ou forçada. Diz-se natural se o movimento das partículas ocorre devido às diferenças de pressão causadas por variações de temperatura, ou forçada se for provocada por causa externas. Este mecanismo verifica-se, normalmente, no interior de um fluido ou em zonas de contacto de meios sólidos com meios gasosos.
- **Radiação:** A transferência de calor resulta da emissão e absorção de radiações eletromagnéticas que são função da temperatura absoluta e do estado das superfícies. A excitação das moléculas ou átomos, pelos motivos referidos anteriormente, provocam o transporte de energia entre as duas superfícies através de fotões ou por ondas

eletromagnéticas. A radiação térmica é uma forma de transmissão que não necessita de um meio físico de propagação e ocorre nas fases líquida, sólida ou gasosa.

A figura 1 apresenta as três formas de transferência de calor que correm através de um elemento construtivo.

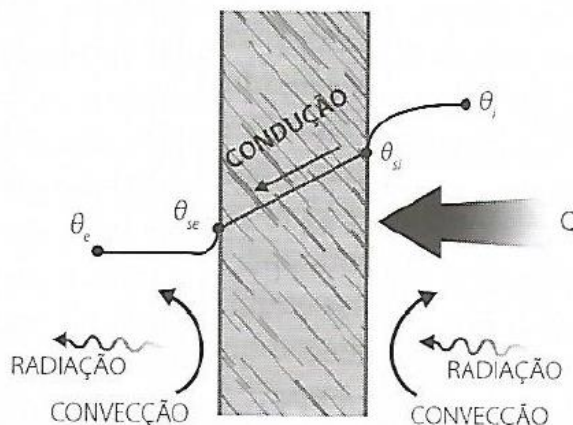


Figura 1 - Transferência de Calor através de um elemento de construção [3]

2.3. CARACTERIZAÇÃO TÉRMICA DE PAREDES

2.3.1. CONCEITO DE COEFICIENTE DE TRANSMISSÃO TÉRMICA

O aumento das exigências energéticas dos edifícios levou a que o comportamento térmico da envolvente ganhasse cada vez mais importância. É através da caracterização térmica de um determinado elemento construtivo que se verifica os impactos provocados pela introdução de diversos fatores ou materiais. O coeficiente que caracteriza, em regime permanente, o comportamento de determinadas soluções construtivas designa-se por Coeficiente de Transmissão Térmica, U.

Segundo o DL 118/2013 o Coeficiente de Transmissão Térmica é “a quantidade de calor por unidade de tempo que atravessa uma superfície de área unitária desse elemento da envolvente por unidade de diferença de temperatura entre os ambientes que o elemento separa” [4].

O Coeficiente de Transmissão Térmica pode ser calculado, para elementos construtivos compostos apenas por camadas homogêneas, de espessura constante e paralelas entre si, através do somatório das resistências térmicas associados a cada uma das camadas [3]. No entanto, os elementos construtivos apresentam, por vezes, heterogeneidades, sendo, nessas circunstâncias, necessário recorrer a métodos simplificados ou experimentais para determinar o valor do U. Este coeficiente, também pode ser calculado através de programas computacionais com modelos de cálculo baseados no método das diferenças finitas, dos elementos finitos ou dos elementos de fronteira [2].

2.3.2. MÉTODO DE CÁLCULO TEÓRICO DO COEFICIENTE DE TRANSMISSÃO TÉRMICA

Segundo a norma ISO EN 6946:2007, o coeficiente de transmissão térmica de um determinado elemento construtivo pode ser determinado a partir da seguinte equação [5]:

$$U = \frac{1}{R_{TOTAL}} \quad (1)$$

em que

U - Coeficiente de transmissão térmica [$W / m^2 \cdot ^\circ C$]

R_{TOTAL} - Resistência Térmica Total [$m^2 \cdot ^\circ C / W$]

A Resistência Térmica Total de um elemento construtivo composto por camadas termicamente homogêneas e perpendiculares ao fluxo de calor pode ser calculada pela seguinte expressão:

$$R_{TOTAL} = R_{si} + \sum_{j=1}^N R_j + R_{se} \quad (2)$$

em que

R_{TOTAL} - Resistência Térmica Total [$m^2 \cdot ^\circ C / W$]

R_{si} - Resistência Superficial Interior [$m^2 \cdot ^\circ C / W$]

R_j - Resistência Térmica de cada camada homogênea [$m^2 \cdot ^\circ C / W$]

R_{se} - Resistência Superficial Exterior [$m^2 \cdot ^\circ C / W$]

N - Número de camadas termicamente homogêneas

A Resistência Térmica de uma camada, conhecido o seu valor da condutibilidade térmica, e sendo ela homogênea pode ser calculada pela seguinte expressão:

$$R_j = \frac{d}{\lambda} \quad (3)$$

em que

R_j - Resistência Térmica da camada homogênea j [$m^2 \cdot ^\circ C / W$]

d - Espessura da camada j [m]

λ - Condutibilidade térmica do material da camada j [$W / (m \cdot ^\circ C)$]

Para situações em que as camadas não são homogêneas, a Resistência Térmica total é dada pela média entre dois limites de resistência, superior e inferior, tal como mostra a seguinte expressão:

$$R_{TOTAL} = \frac{R_{TOTAL,SUP.} + R_{TOTAL,INF.}}{2} \quad (4)$$

em que

$R_{TOTAL;SUP}$ - Limite Superior da Resistência Térmica Total [$m^2 \cdot ^\circ C/W$]

$R_{TOTAL;INF}$ - Limite Inferior da Resistência Térmica Total [$m^2 \cdot ^\circ C/W$]

Estes limites (superior e inferior) são calculados considerando-se a divisão do elemento construtivo, tanto na vertical como na horizontal, em camadas e secções homogéneas, como se ilustra na Figura 2.

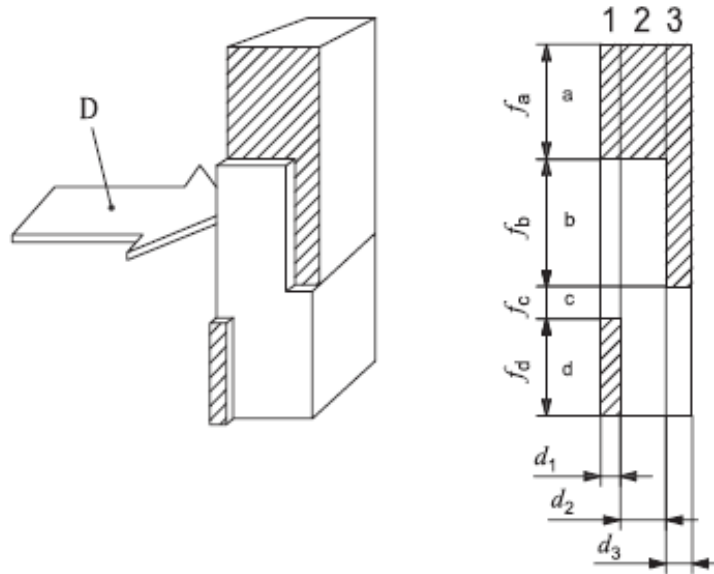


Figura 2 - Componente não homogéneo termicamente [5]

Na Figura 2, a, b, c e d representam as secções, 1, 2 e 3 as camadas e D representa o fluxo de calor a que o elemento construtivo irá estar sujeito.

A cada secção corresponde uma fração de área f_m ($m = a, b, c, d \dots$) e a cada camada j ($j=1, 2, 3 \dots$) corresponde uma espessura d_j . Assim cada parte mj tem uma determinada condutibilidade térmica λ_{mj} , espessura d_j , fração de área f_m e, conseqüentemente, uma resistência térmica R_{mj}

Assumindo que o fluxo de calor, D, é perpendicular à superfície de um determinado elemento construtivo e é unidimensional o Limite Superior da Resistência Térmica Total, $R_{TOTAL;SUP}$, é dado por:

$$R_{TOTAL;SUP} = \frac{f_a}{R_{Ta}} + \frac{f_b}{R_{Tb}} + \dots + \frac{f_q}{R_{Tq}} \quad (5)$$

em que

R_{Ta} - Resistência térmica total de ambiente para ambiente em cada secção

f_a - Fração de área de cada secção

O cálculo do Limite Inferior da Resistência Térmica Total, $R_{TOTAL; INF.}$, é efetuado admitindo que todos os planos paralelos às superfícies da solução construtiva são superfícies isotérmicas e aplica-se a expressão (2).

O valor de R_j , resistência térmica equivalente, para o cálculo do $R_{TOTAL; INF.}$, é determinado pela seguinte equação:

$$\frac{1}{R_j} = \frac{f_a}{R_{aj}} + \frac{f_b}{R_{bj}} + \dots + \frac{f_q}{R_{qj}} \quad (6)$$

em que

R_j - resistência térmica equivalente [$m^2 \cdot ^\circ C/W$]

R_{aj} - resistência térmica de cada camada não homogênea e para cada secção [$m^2 \cdot ^\circ C/W$]

2.3.3. CONCEITO DE PONTE TÉRMICA

As pontes térmicas correspondem a determinados locais da envolvente do edifício onde ocorre alteração das características térmicas, ou seja, a resistência térmica deixa de ser constante e por isso deixa de ser válido o cálculo, normalmente, realizado nas zonas correntes dos elementos de construção.

As pontes térmicas ocorrem tradicionalmente devido às seguintes causas [3]: (a) passagem de um material para outro com diferentes características térmicas; (b) alterações de espessura; (c) ligações entre elementos em diferentes planos por causa da diferença entre áreas internas e externas.

As pontes térmicas podem ser classificadas como lineares ou pontuais. As pontes térmicas pontuais dizem respeito àquelas em que as três dimensões são da mesma ordem de grandeza enquanto nas lineares uma das dimensões é superior às restantes [6]. Para esta última, a sua caracterização é realizada através do coeficiente de transmissão térmica linear ψ , definido pela norma EN ISO 10211:2007 [7].

Em termos práticos as pontes térmicas trazem adversidades para os edifícios uma vez que aumentam, na maioria dos casos, as trocas de calor numa determinada região específica da envolvente, agravando assim o risco de ocorrência de condensações superficiais e ainda potenciando o aparecimento de problemas relacionados com a diversidade da distribuição de temperaturas das superfícies internas [6].

2.4. LEGISLAÇÃO E DOCUMENTOS NORMATIVOS NO DOMÍNIO DA REABILITAÇÃO ENERGÉTICA DOS EDIFÍCIOS DE HABITAÇÃO

As preocupações com o desempenho energético e o conforto térmico nos edifícios tem crescido bastante ao longo dos anos, sempre focadas na redução dos consumos e em promover a melhoria no desempenho dos edifícios. Assim, em 2002 surge a Diretiva Europeia 2002/91/CE que apresentava como principais objetivos adotar uma metodologia de cálculo do desempenho energético dos edifícios

e estabelecer requisitos mínimos para esse mesmo desempenho, tanto em edifícios novos, como em edifícios existentes sujeitos a grandes intervenções. A adaptação desta Diretiva para a regulamentação nacional ocorreu em 2006 e forçou a revisão dos regulamentos existentes nesta área. Essa regulamentação foi mais tarde revogada pelo Decreto-Lei 118/2013, que surgiu após a transposição da Diretiva Europeia 2010/31/EU para o nosso país [4][8]. A legislação relativa ao comportamento térmico de edifícios foi atualizada em dezembro de 2020, através da publicação do DL 101-D/2020, que estabelece os requisitos aplicáveis a edifícios para a melhoria do seu desempenho energético e regula o Sistema de Certificação Energética de Edifícios, transpondo a Diretiva (UE) 2018/844 e parcialmente a Diretiva (UE) 2019/944.

O Decreto-Lei 118/2013 engloba três regulamentos, sendo eles 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. No âmbito deste trabalho dá-se mais importância ao Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH).

O REH aplica-se a edifícios de habitação novos ou em construção, edifícios sujeitos a grande intervenção tanto na envolvente como nos seus sistemas técnicos e na avaliação energética dos edifícios novos, submetidos a grande intervenção ou existentes, no âmbito do SCE. O principal objetivo do regulamento é melhorar o desempenho energético dos edifícios através da determinação de exigências, critérios e metodologias [4].

Para implementar a metodologia do REH, é necessário que, tanto os edifícios como os seus sistemas técnicos, verifiquem os requisitos estabelecidos nos artigos 24º e 25º do DL 118/2013. As exigências para edifícios sujeitos a grandes intervenções apresentam-se descritas nos artigos 28º e 29º do mesmo Decreto-Lei. Para além disso, na Portaria 379 – A/2015 [9], que corresponde à primeira alteração à Portaria 349 – B/2013 [10], são apresentados os requisitos em termos de valores máximos das necessidades energéticas dos edifícios.

Em termos de exigências de desempenho das paredes, o regulamento propõe valores máximos, $U_{máx}$, em função da zona climática em que os edifícios se inserem. A tabela 1 mostra o $U_{máx}$ para as zonas climáticas de inverno para os elementos opacos verticais (paredes) de edifícios novos com valores de 0,50, 0,40 e 0,35 para I1, I2 e I3, respetivamente

Mais tarde, em 2019 a entrada em vigor do DL 95/2019 [11], que trata da reabilitação de edifícios, entre as quais a reabilitação energética, traz alterações ao DL 118/2013 com o objetivo de melhorar os consumos de energia, garantir maior conforto habitacional e consequentemente melhorar o desempenho energético dos edifícios sujeitos a intervenções.

No que diz respeito ao comportamento térmico dos edifícios, o DL mencionado aplica-se quando o controlo prévio efetuado à construção em causa tenha sido realizado antes da entrada em vigor do DL 40/90 [12].

As alterações que este DL estabelece prende-se ao artigo 30º do DL 118/2013 e ainda ao acréscimo de um novo artigo (29º – A) que se preocupa com as situações singulares em operação de reabilitação que podem ser encontradas no capítulo IV, artigo 11º do DL 95/2019

Desta forma, caso os edifícios a ser reabilitados cumpram os requisitos estabelecidos no DL 95/2019, existe, também, um coeficiente de transmissão térmica máximo que devem cumprir e que é apresentado na Portaria 297/2019 [13].

A Portaria referida anteriormente, que determina as exigências de comportamento térmico de edifícios sujeitos a grande intervenção, é utilizada predominantemente em edifícios de habitação unifamiliar ou coletiva e os seus requisitos são em função do custo de intervenção na reabilitação. [13]

Tendo em conta o exposto, a tabela 2 apresenta, entre outros, o $U_{m\acute{a}x}$ admissível para paredes com valores de 1,70, 1,50 e 1,40 para as zonas climática de inverno I1, I2 e I3, respetivamente, para edifícios ao abrigo do DL 95/2019

Tabela 1 - Coeficiente de transmissão térmica superficiais máximos de elementos opacos e de vãos envidraçados, $U_{m\acute{a}x}$ [W/(m²°C)] (adaptado de [9])

$U_{m\acute{a}x}$ [W/(m ² °C)]		Zona Climática		
Portugal Continental				
Zona corrente da envolvente		A partir de 31 de dezembro 2015		
		I1	I2	I3
Em contacto com o exterior ou com espaços não úteis com coeficiente de redução de perdas $b_{tr} > 0,7$	Elementos opacos verticais	0,50	0,40	0,35
	Elementos opacos horizontais	0,40	0,35	0,30
Vãos envidraçados (portas e janelas) (U_w)		2,80	2,40	2,20

Tabela 2 - Coeficientes de transmissão térmica superficiais máximos admissíveis de elementos opacos e de vãos envidraçados, $U_{m\acute{a}x}$ [W/(m²°C)] [13]

Elemento exterior		I1	I2	I3
Elementos opacos verticais – paredes		1,70	1,50	1,40
Elementos opacos horizontais	Coberturas	0,80	0,70	0,60
	Pavimentos sobre o exterior	1,00	0,90	0,80
Vão envidraçados (portas e janelas) - U_{wdn}		4,50	4,00	4,00

2.5. SIMULAÇÃO BIDIMENSIONAL DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR

O comportamento térmico de paredes tem adquirido cada vez mais importância devido às crescentes preocupações com o desempenho energético dos edifícios, dado que, é por este elemento que ocorrem grande parte das trocas de calor com o exterior.

Desta forma, torna-se cada vez mais importante o recurso a estudos de análise bidimensional da transferência de calor através deste elemento construtivo. Estes estudos podem ser realizados com o

objetivo de caracterizar termicamente as paredes constituídas por materiais recentes na construção ou por materiais antigos e dos quais ainda se tem pouca informação.

Diversos são os softwares que, através de uma simulação numérica, realizam uma análise bidimensional de transferência de calor, destacando-se, neste subcapítulo, apenas dois deles: O THERM [14] e o ANSYS [15], que se baseiam no método dos elementos finitos e permitem o estudo das trocas de calor num determinado elemento construtivo. Descrevem-se de seguida dois exemplos de utilização destas ferramentas:

- O trabalho realizado por [16] estuda os efeitos do posicionamento do isolamento térmico nas paredes de fachada em LSF (Lightweight Steel-Framed), nomeadamente os problemas associados à presença de vigas de aço no desempenho energético da parede. Nesta análise, foi calculado o valor de U para diversas soluções deste tipo de fachada, designada em [16] por construção fria (introdução do isolamento na cavidade de ar, sendo atravessado pela viga de aço), construção quente (introdução do isolamento na parte exterior, fora da cavidade e sem contacto com o aço) e híbrida (junção das duas soluções anteriores).

A investigação recorreu a uma simulação numérica utilizando o programa THERM que permitiu concluir que: o comportamento térmico da parede piora quando a camada de isolamento é atravessada pela viga de aço, dado que, o aço apresenta uma grande condutibilidade térmica; a melhor solução, é a que apresenta isolamento térmico pelo exterior. Mais resultados podem ser encontrados em [16] tais como, a variação do valor de U consoante a espessura de isolamento utilizada, a comparação do U com um U_{hom} em que se considera a camada de ar e aço com uma camada homogénea e ainda as variações entre o U_{hom} e o U_{real} .

- O trabalho realizado em [17] analisou a resistência térmica de uma parede de tabique através de um método experimental e de uma simulação numérica baseada no método dos elementos finitos. A reabilitação estrutural e energética de edifícios antigos é muito importante, não só, para se conservar o património edificado, mas também para melhorar o conforto e a eficiência energética sendo, por isso, necessário estudar mais sobre o comportamento térmico das soluções construtivas utilizadas na época.

Desta forma, foi efetuada uma simulação numérica como complemento ao método experimental onde se calculou o valor de R da parede e as variações de temperatura e fluxo de calor ao longo do tempo. O software utilizado foi o ANSYS e considerou-se dois cenários distintos para os cálculos anteriores como se pode verificar em [17].

Os principais objetivos desta simulação foram: avaliar se os sensores de temperatura e medidores de fluxo de calor estavam posicionados na zona de transferência de calor 1-D, e, averiguar se as medições realizadas e os resultados alcançados são suficientes para deduzir o valor da resistência da parede para uma solução heterogénea.

3

COMPORTAMENTO SÍSMICO DE EDIFÍCIOS TRADICIONAIS EM ALVENARIA DE PEDRA

3.1. ENQUADRAMENTO

As construções realizadas em pedra podem ser agrupadas em dois tipos: cantaria, quando é realizada com unidades com faces aparelhadas, assentes em argamassa ou apenas sobrepostas e justapostas, alvenaria, quando é realizada por pedras toscas, irregulares de vários tamanhos ligadas por argamassa, terra, ou argila, normalmente de fraca qualidade – os espaços vazios entre as pedras são muitas vezes preenchidos por pedras de menores dimensões com a função de preencher ou calçar as outras pedras, ver Figura 3. No que diz respeito ao primeiro tipo, este pode ser ainda subdividido entre cantaria com ou sem guarnição quando os espaços entre pedras são ou não preenchidos com pedras de reduzidas dimensões, respetivamente [18][19].

As estruturas antigas construídas em alvenaria de pedra, estão ainda muito presentes em centros históricos e urbanos por todo o mundo, particularmente na América do Sul e na Europa. Estas estruturas apresentam vastas composições já que a disponibilidade do material depende da época e do local da construção, mas também asseguram longevidade, devido à facilidade de manutenção e substituição de elementos degradados. A sua importância cultural e arquitetónica leva a que a conservação seja vista, hoje, com grande interesse por todos. [20]

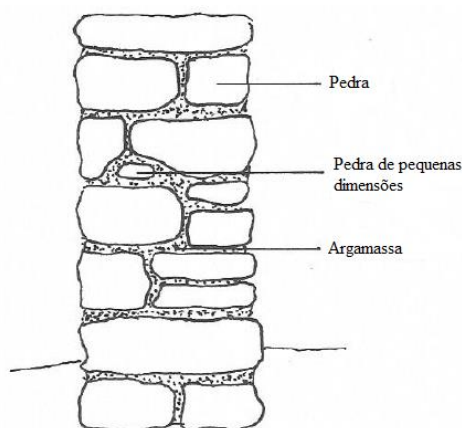


Figura 3 - Parede em Alvenaria de Pedra (adaptado de [18])

Este tipo de construção, presente em muitos edifícios antigos apresenta vantagens, tais como, a sua elevada inércia térmica e o bom isolamento acústico. No entanto, também ostenta desvantagens tais como a sua elevada massa, a qual, associada a uma resistência mecânica relativamente baixa e frequente falta de eficiência das ligações entre elementos estruturais verticais e horizontais, resulta numa elevada vulnerabilidade sísmica. O facto de ser um sistema estrutural heterogéneo pode conduzir ainda ao aparecimento de anomalias nos edifícios [21].

Pelo exposto, fica clara a necessidade de se intervir nestes edifícios de forma a incrementar a sua resistência sísmica, conferindo-lhes capacidade para que funcionem como um todo, reduzindo a sua vulnerabilidade sísmica [22].

3.2. VULNERABILIDADE SÍSMICA EM EDIFÍCIOS ANTIGOS

3.2.1. ENQUADRAMENTO E NÍVEIS DE ANÁLISE

A vulnerabilidade sísmica representa o comportamento de uma determinada estrutura quando é sujeita a uma ação sísmica descrevendo uma lei causa-efeito em que a causa é a ação sísmica e o efeito é o dano estrutural do edifício [23].

A avaliação da vulnerabilidade sísmica é muito importante quando se pretende atuar em ações de reforço proporcionando informação útil na prevenção de danos e riscos futuros. Esta avaliação depende de determinadas características dos edifícios tais como o uso, o tipo e o valor do edificado sendo os seus objetivos função da exposição e das condicionantes socioeconómicas [24]. É de salientar que, pelas suas características materiais e construtivas, os edifícios de alvenaria de pedra apresentam tradicionalmente fragilidades estruturais e pouca resistência sísmica, o que se traduz em sérios riscos, sendo, por isso, muito relevante realizar-se avaliações de vulnerabilidade sísmica.

Conceptualmente, podem definir-se três níveis de vulnerabilidade associada aos edifícios [24]:

Nível 1 - Vulnerabilidade estrutural: relacionada com a capacidade de um elemento do sistema estrutural resistente sofrer ou não um determinado grau de dano. Este nível pode ainda ser hierarquizado em outros 3 subníveis:

Nível 1.1 – Vulnerabilidade estrutural de agregados: identifica e avalia as situações de fragilidade estrutural provocadas pela interação entre edifícios adjacentes ou por mecanismos de dano complexo.

Nível 1.2 – Vulnerabilidade estrutural de edifícios: utilizada para avaliar a vulnerabilidade do sistema resistente de um edifício específico tendo em conta o comportamento de todos os seus elementos constituintes.

Nível 1.3 – Vulnerabilidade estrutural de paredes de fachada: quando se deseja avaliar isoladamente a vulnerabilidade estrutural da fachada de um determinado edifício.

Nível 2 - Vulnerabilidade não estrutural: avalia a capacidade de elementos não estruturais sofrerem dano. É importante referir que, muitas vezes, estes elementos comprometem o funcionamento dos edifícios, mesmo que o sistema estrutural resistente esteja em condições satisfatórias.

Nível 3 - Vulnerabilidade funcional: pretende avaliar a aptidão de resposta de edifícios considerados importantes após um sismo e para os quais a necessidade de manutenção de funções é imprescindível.

3.2.2. METODOLOGIAS DE AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE SÍSMICA

A necessidade de avaliar a vulnerabilidade sísmica motivou um estudo de metodologias que permitisse estimar os impactos da ocorrência deste fenómeno tanto em edifícios como em paredes de fachada. A Tabela 3 identifica as metodologias de avaliação, bem como, o campo de aplicação de cada uma delas e o esforço computacional que requerem.

As classificações das metodologias estão divididas em três níveis de acordo com o campo de aplicação e o esforço computacional que requerem: o primeiro nível, a que corresponde a vulnerabilidade observada, usa informações qualitativas e por isso é ideal para a análise da vulnerabilidade num conjunto de edifícios (larga escala); o segundo nível, a que corresponde o modelo de análise simplificada, fundamenta-se nos modelos que apresentam informações geométricas e mecânicas pormenorizadas, sendo particularmente adequado para a avaliação de pequenos conjuntos de edifícios ou edifícios individuais; o terceiro nível, ao qual corresponde o processo de análise detalhada, requerem o uso de técnicas complexas de modelação numérica, de elevado esforço computacional com vasta informação e propriedades mecânicas obtidas de forma rigorosa. [25]

Tabela 3 - Metodologia de avaliação da vulnerabilidade sísmica em diferentes escalas [24]

Metodologia	Campo de aplicação		Esforço Computacional		
	Conjunto de edifícios	Edifício Individual	Baixo	Médio	Elevado
Vulnerabilidade observada	x		x		
Modelo de análise simplificada	x	x		x	
Processo de análise detalhada		x			x

3.2.2.1. Metodologia baseada na vulnerabilidade observada

Este estudo é baseado numa matriz de probabilidade de dano que tem em conta as intensidades sísmicas e as diferentes tipologias estruturais. Estas matrizes são construídas tendo por base opiniões de especialistas e, portanto, os resultados podem ser incertos devido à sua subjetividade. A Tabela 4 identifica uma matriz de probabilidade de dano usada para definir o estado de dano de um determinado edifício.

Mais tarde surgiram outras metodologias semelhantes que tinham como objetivo melhorar e agilizar as inspeções de dano pós-sismo.

Tabela 4 - Matriz de probabilidade de dano [24]

Estado de dano	Dano estrutural	Dano não estrutural	Rácio de dano (%)	Intensidade Sísmica				
				V	VI	VII	VII	IX
0	Nenhum	Nenhum	0.00-0.05	-	-	-	-	-
1	Nenhum	Ligeiro	0.05-0.30	-	-	-	-	-
2	Nenhum	Localizado	0.10-1.25	-	-	-	-	-
3	Não assinalável	Distribuído	1.25-3.50	-	-	-	-	-
4	Ligeiro	Substancial	3.50-4.50	-	-	-	-	-
5	Substancial	Extensivo	7.50-20.0	-	-	-	-	-
6	Elevado	Quase total	20.0-65.0	-	-	-	-	-
7	Pré-Ruína		100	-	-	-	-	-
8	Colapso		100	-	-	-	-	-

3.2.2.2. Metodologia baseada em modelos simplificados

Baseia-se em modelos analíticos simplificados de edifícios, nos quais a avaliação da vulnerabilidade sísmica de um determinado edifício é realizada com base no conhecimento de alguns parâmetros. Para que a avaliação do comportamento sísmico seja realizada de forma correta é importante que estes parâmetros sejam obtidos com qualidade de modo que os resultados sejam fidedignos.

Ao longo dos anos foram desenvolvidas novas metodologias baseadas em inspeções, estudo e levantamentos de dano pós-sismo. Uma das metodologias mais recentes apoia-se no cálculo de um índice de vulnerabilidade sísmica para avaliar individualmente cada edifício. Este índice é calculado tendo em conta parâmetros que definem características dos edifícios (geometria, número de pisos, etc.)

3.2.2.3. Metodologia de análise detalhada

Aplica-se em edifícios onde temos um maior número e melhor qualidade de informação no que diz respeito às características desses mesmos (geometria, propriedades mecânicas, etc.). São utilizados modelos numéricos pormenorizados para avaliar determinados edifícios representativos de uma tipologia estrutural, com um grau de detalhe elevado e para o qual não se adequaria uma avaliação a média/larga escala.

3.3. REFORÇO SÍSMICO DE EDIFÍCIOS DE ALVENARIA DE PEDRA

A ação recorrente de atividade sísmica, um pouco por todo o mundo, e também em Portugal, com maior expressão no Arquipélago dos Açores, levou à necessidade de se compreender o comportamento estrutural dos edifícios e de desenvolver técnicas de reforço que permitissem aumentar a capacidade resistente global dos edifícios existentes, particularmente dos edifícios de alvenaria de pedra, face a futuros eventos sísmicos.

Desta forma, encontram-se listadas abaixo algumas soluções de reforço sísmico que podem ser aplicadas em estruturas de alvenaria de pedra, tanto ao nível global como a um nível local, dependendo das fragilidades estruturais identificadas e das suas causas [20-23][26]:

- **Refechamento de juntas:** exige que a argamassa, que se encontra em mau estado de conservação, seja removida e substituída por outra com melhores propriedades mecânicas mais resistente e com maior durabilidade. Esta solução é importante porque permite a preservação e o reforço das faces externas de parede.
- **Reforço da ligação entre pavimentos e paredes:** Este tipo de técnica de reforço consiste na introdução, através de pregagens, de elementos metálicos às paredes resistentes que por sua vez são também pregadas às vigas de madeira do pavimento tal como mostra a figura 4. Tem como objetivo confinar e ativar a capacidade de travamento dos pavimentos em relação às paredes promovendo o bom funcionamento das ligações entre elas.

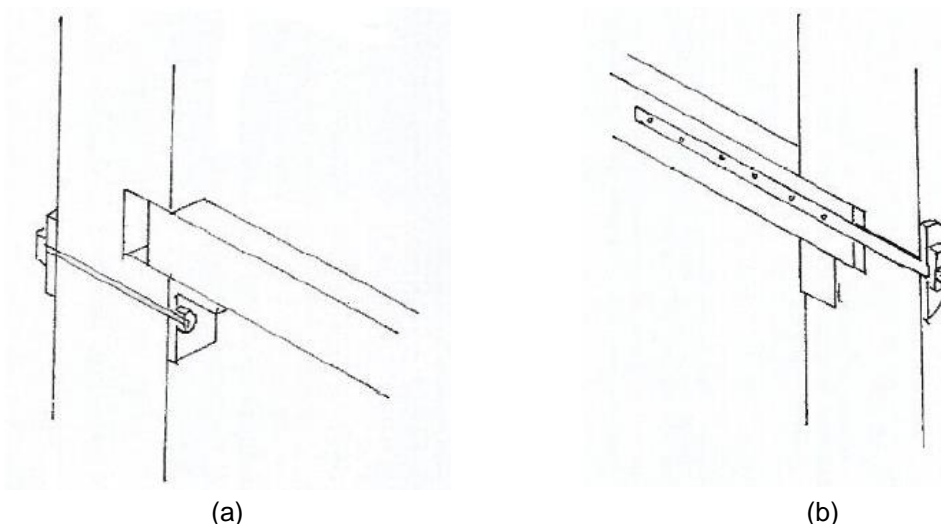


Figura 4 - Pormenor da ligação dos pavimentos às paredes resistentes: (a) utilização de chapas quinas na base das vigas de madeira; (b) utilização de chapas metálicas aplicadas no centro das vigas de madeira [21]

- **Utilização de Tirantes para reforçar ligações entre paredes:** Esta solução pode ser aplicada ao nível dos pavimentos ou cobertura e, de certa forma, melhora o funcionamento global do edifício evitando o colapso das paredes para fora do plano. É eficiente tanto na melhoria das ligações entre paredes resistentes como na melhoria da rigidez dos diafragmas horizontais. O tirante funciona à tração desempenhando normalmente, funções passivas neste tipo de construções (sendo possível desempenhar uma função ativa). A Figura 5 ilustra a aplicação de tirantes nas paredes sob os pavimentos.

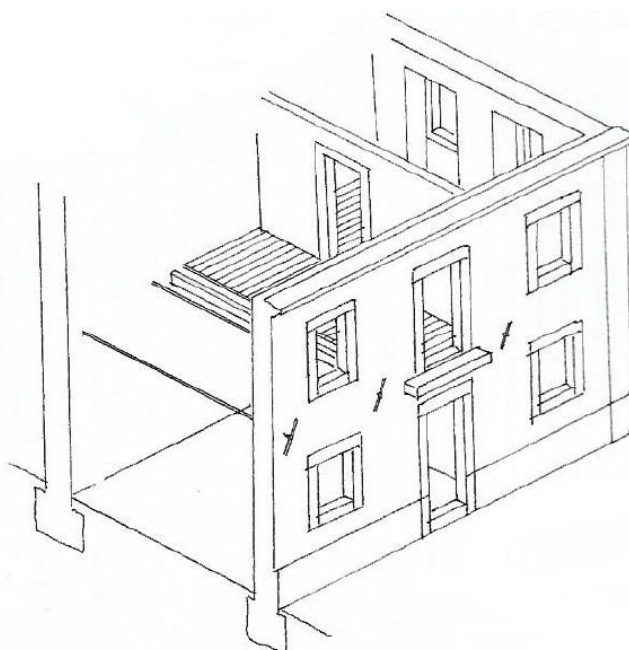


Figura 5 - Utilização de tirantes ao nível dos pavimentos [21]

- **Reforço da ligação entre cobertura e paredes:** Consiste na execução de uma viga cinto perimetral no topo das paredes de alvenaria reforçando a ligação entre a cobertura e a parede, ver Figura 6. Esta ligação entre o elemento de madeira e a viga de betão armado é, normalmente, realizada com recurso a componentes metálicos que permitem que a cobertura desempenhe, também, o cargo de unir as paredes que a delimitam. É importante referir que esta solução introduz um incremento de massa e rigidez no topo das paredes podendo trazer problemas, uma vez que existe alteração no modo de vibração da estrutura e em função disso desenvolver-se mecanismos de colapso.

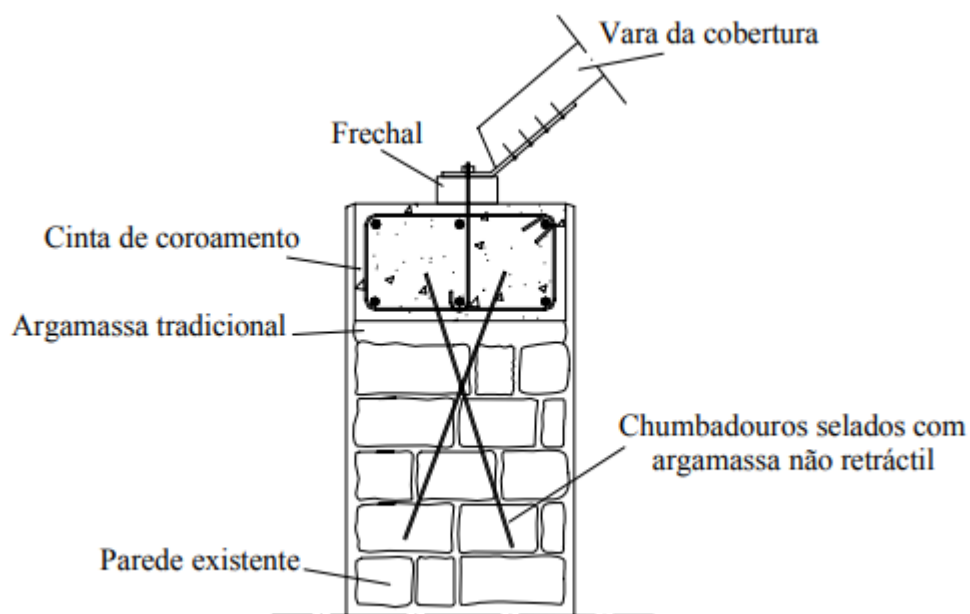


Figura 6 - Viga cinto no topo da parede de alvenaria com ligação metálica à cobertura [20]

- **Execução de Rebocos Armados:** Esta técnica, que tem como objetivo reforçar a resistência ao corte e confinar as paredes de alvenaria, consiste na realização de camadas resistentes à superfície das paredes, com aplicação de um material resistente à tração (malha de aço, polímeros, chapa de metal distendido, etc.) que posteriormente é fixada à parede por pequenas pregagens. De seguida é projetada uma argamassa de revestimento para dar o acabamento final. É importante salientar que esta técnica pode ser aplicada nos dois lados da parede (figura 7) ou apenas num (figura 8) com a armadura ligada ou não transversalmente.

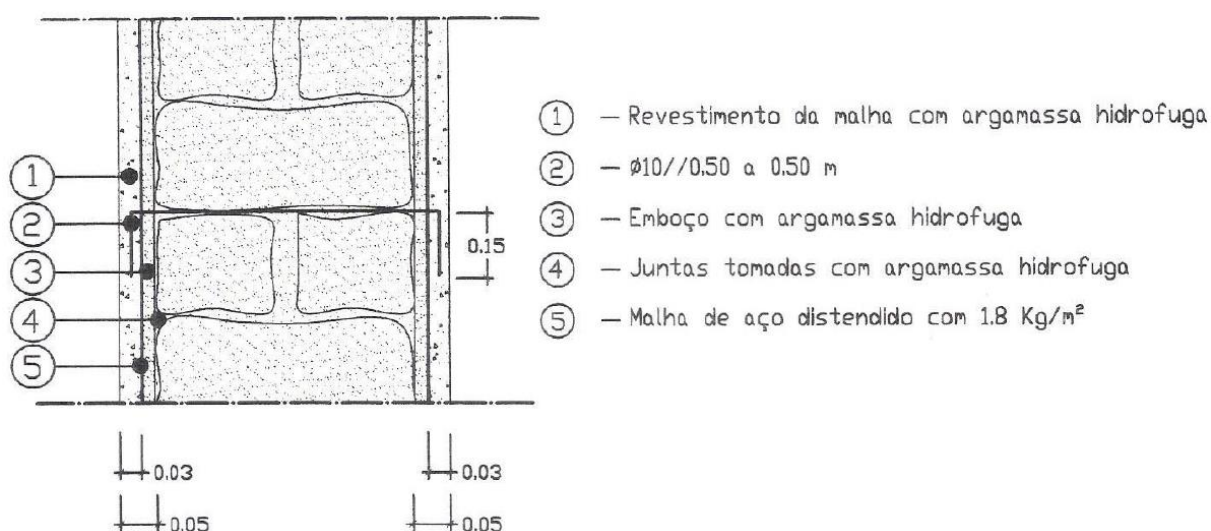


Figura 7 - Aplicação de reboco armado nas duas faces da parede [22]

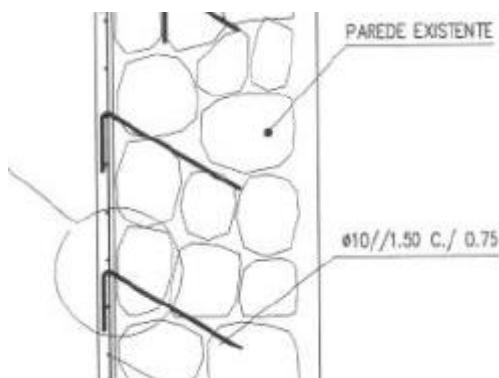


Figura 8 - Reboco armado apenas numa face da parede [22]

3.4. ESTUDOS DE REABILITAÇÃO SÍSMICA EM EDIFÍCIOS DE ALVENARIA DE PEDRA

A avaliação da vulnerabilidade sísmica, apresenta um papel muito importante na caracterização das fragilidades dos edifícios, nomeadamente em edifícios antigos de alvenaria de pedra permitindo analisar as melhores formas de intervir e melhorar o seu desempenho sísmico. É fundamental não esquecer que a capacidade de avaliar a vulnerabilidade sísmica destes edifícios é muito importante, mas não menos importante é conseguir reforçá-los sísmicamente e quantificar a eficiência dessas mesmas soluções de reforço.

Desta forma, e dado a importância do exposto acima, salienta-se três trabalhos, de muitos que se podia incluir, realizados com base neste tema:

- O trabalho realizado por [26] avalia a vulnerabilidade sísmica de edifícios tradicionais em alvenaria de pedra antes e após a introdução de reforços sísmicos com o objetivo de mitigar os impactos provocados pelos terremotos. Para além disso, e não menos importante é avaliado as perdas e custos económicos associados aos sismos e respetivas soluções de reforço. Para o efeito, foi avaliada a introdução de três pacotes de reforço, no centro da cidade da Horta, na ilha do Faial, para avaliar as variações provocados no índice de vulnerabilidade dos edifícios, com obtenção de resultados bastante positivos. Estes resultados, com o objetivo de melhorar a interpretação, mas também conseguir reunir uma maior quantidade de informação dos edifícios avaliados, foram apresentados num Software SIG (Sistema de Informação Geográfica).
- O trabalho realizado em [27] apresenta o comportamento sísmico de construções tradicionais em alvenaria de pedra, bem como, técnicas de reforço possíveis e sua eficácia após implementação. Os principais objetivos do trabalho é ampliar a informação sobre o comportamento sísmico destes edifícios, característicos do património português, de modo a conseguir atuar e conseguir preservá-los. Para isso, através de estudo numéricos e diversos tipos de ensaio experimentais (laboratoriais ou *in situ*), que não são objeto de estudo na presente dissertação, foi avaliada a capacidade resistente e comportamento estrutural tanto para fora do plano como no próprio plano.
- O trabalho realizado por [28] apresenta ensaios de seis provetes de paredes de alvenaria de pedra, construídos de modo que possam ser considerados representativos da tipologia tradicional construtiva, através da aplicação de cargas quase-estáticas com o objetivo de avaliar o comportamento para fora do plano deste tipo de paredes que é muito comum aquando da ocorrência de um sismo.

No geral, conclui-se que as técnicas de reforço são eficazes no que diz respeito à melhoria da capacidade resistente da parede e contribui-se assim para a ampliação da informação no respeitante a edifícios de alvenaria de pedra.

4

METODOLOGIA

4.1. APRESENTAÇÃO DO CASO DE ESTUDO

O caso de estudo considerado nesta dissertação é um edifício antigo de alvenaria de pedra com planta retangular ($10 \times 5 \text{ m}^2$), representado na Figura 9. As paredes apresentam uma espessura de 69 centímetros (2 cm de reboco + 65 cm de alvenaria de granito + 2 cm de reboco) e 2 pisos. As vigas do pavimento, o soalho e os elementos constituintes da cobertura são em madeira. As vigas do pavimento e cobertura encontram-se apoiadas nas paredes de alvenaria como mostram as figuras 10 (b) e (d), respetivamente. A altura média entre pisos (pé direito) é de 2,50 m. Considera-se, ainda, que o edifício está situado num terreno plano e que as fundações são realizadas também em pedra, mas com maior largura. É importante referir que, devido à geometria e constituição dos elementos considerados para cobertura, esta não provoca impulsos horizontais nas paredes – é uma cobertura não impulsiva.

Importa notar que, embora o edifício em causa não corresponda a um edifício real, a sua geometria e todos os materiais e características adotadas são representativos da tipologia de edifícios tradicionais em alvenaria de pedra.



Figura 9 - Modelo tridimensional do caso de estudo

4.2. SITUAÇÕES PADRÃO ADOTADAS E SOLUÇÕES DE REFORÇO SÍSMICO

4.2.1. SITUAÇÕES PADRÃO ADOTADAS

Neste subcapítulo será apresentada a metodologia adotada para a realização de um conjunto de simulações efetuadas com o THERM 7.7 [14] para avaliar o Coeficiente de Transmissão Térmica, U , numa parede tradicional de alvenaria de pedra, antes e após o seu reforço sísmico.

A variação do parâmetro U é assim analisada por comparação com situações padrão pré-estabelecidas e correspondentes a construções típicas de alvenaria de pedra que podem ser encontradas no território nacional.

Nesse sentido, foram consideradas quatro situações padrão, cuja descrição detalhada dos elementos construtivos é apresentada nos esquemas da Figura 10. A situação (a) refere-se à parede tradicional de alvenaria de pedra em zona corrente, a (b) à ligação das paredes principais aos pavimentos, a (c) à ligação das paredes secundárias aos pavimentos e a (d) à ligação das coberturas às paredes. Importa referir que as paredes principais são aquelas onde assentam os pavimentos e, por isso, perpendiculares ao viga principal do pavimento e as paredes secundárias são as paralelas ao viga principal.

A simulação da transferência de calor ao longo dos elementos construtivos, necessária para a determinação do valor do U , exige a definição de algumas propriedades dos materiais que os constituem (Tabela 5). Relativamente à condutibilidade térmica dos materiais foram utilizados os valores de referência publicados no ITE 50 [29], exceto para o caso do reboco térmico, que foi obtida a partir de outra referência bibliográfica [30], como se verifica na Tabela 5.

Nas simulações efetuadas, foram estabelecidos cenários em que se analisa uma intervenção de reabilitação que promova uma melhoria do desempenho térmico dos elementos. Para tal, optou-se por utilizar uma camada de reboco térmico aplicada na superfície exterior da parede. A utilização de uma camada isolante pelo interior em conjunto com a aplicação de gesso cartonado era outra possibilidade que conduziria a uma melhoria do desempenho térmico destes elementos. Contudo, esta intervenção condicionaria a inércia térmica do edifício e implica a redução da sua área útil.

Assim, para a realização das simulações com cenários de melhoria do desempenho térmico optou-se pela colocação de reboco térmico pelo exterior, resultando numa melhoria significativa do desempenho térmico destes edifícios.

Relativamente às condições fronteira definidas para as simulações, as condições ambientais no interior do edifício correspondem a uma temperatura de 20 °C e humidade relativa de 60%. No exterior considerou-se uma temperatura e humidade relativa de 0 °C e 80% respetivamente.

No que diz respeito à resistência superficial, nos elementos verticais utilizou-se o valor de 0,13 [(m²C)/W] para a Resistência Superficial Interior, R_{si} , e 0,04 [(m²C)/W] para Resistência Superficial Exterior, R_{se} , correspondentes a uma situação de fluxo horizontal. Nos elementos construtivos horizontais tomou-se o valor de 0,10 [(m²C)/W] para R_{si} e 0,04 [(m²C)/W] para R_{se} , correspondente a uma situação de fluxo vertical.

O software THERM 7.7 permite selecionar os limites do elemento construtivo que devem ser utilizados para o cálculo do coeficiente de transmissão térmica da parede. Nos cenários simulados, estes limites correspondem à superfície exterior da parede, que apresenta o mesmo comprimento em todos os pormenores construtivos.

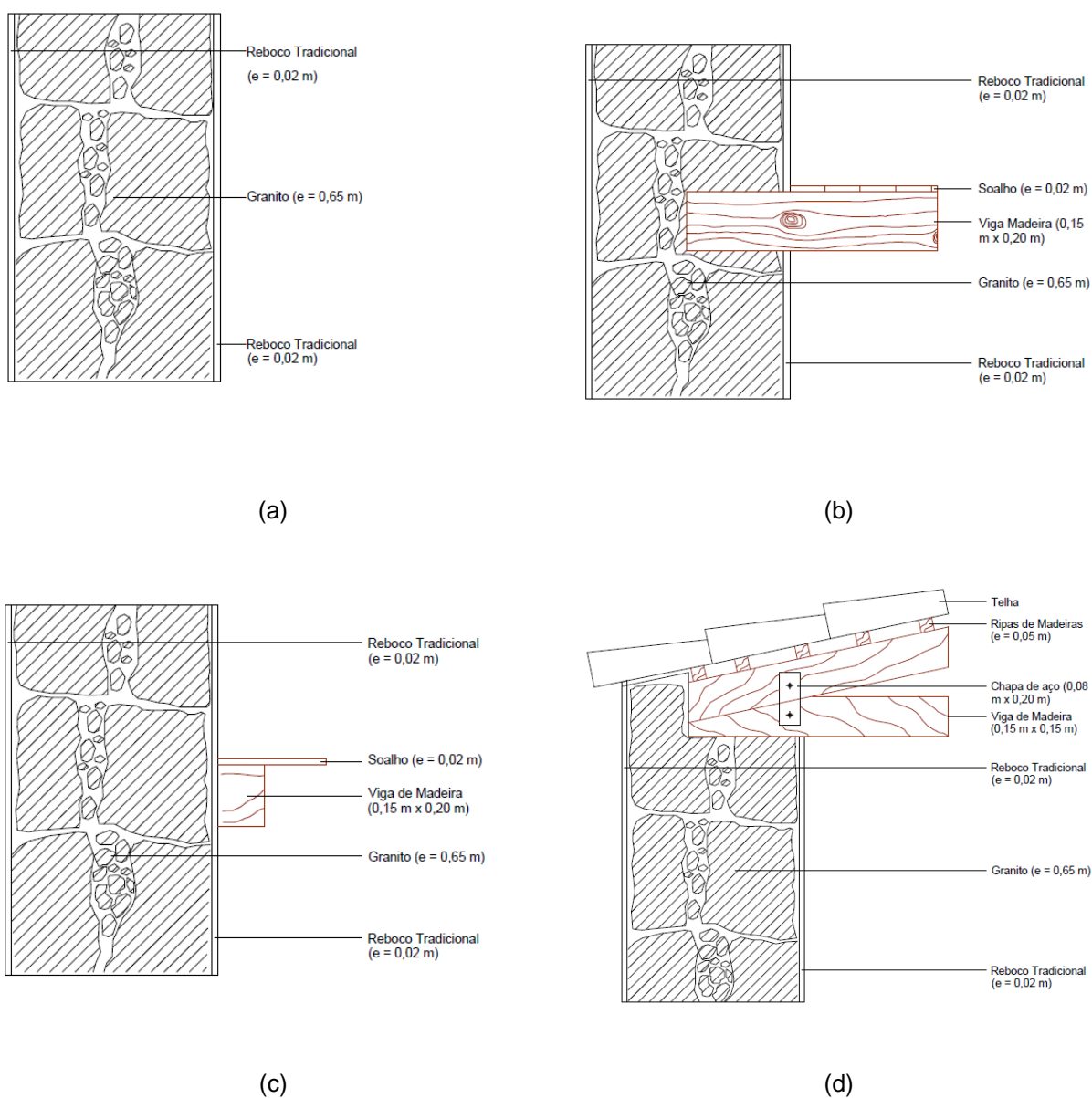


Figura 10 - Soluções padrão de uma parede tradicional em alvenaria de pedra: (a) zona corrente; (b) ligação das paredes principais aos pavimentos; (c) ligação das paredes secundárias aos pavimentos; (d) ligação das coberturas às paredes

Tabela 5 - Propriedades dos materiais utilizados

MATERIAL	Condutibilidade Térmica (λ)	Referência
Pedra (Granito)	2,80 [W/(m. °C)]	ITE 50 (2006)
Reboco Tradicional	1,30 [W/(m. °C)]	ITE 50 (2006)
Madeira (muito densa)	0,29 [W/(m. °C)]	ITE 50 (2006)
Aço	50 [W/(m. °C)]	ITE 50 (2006)
Betão Normal	1,65 [W/(m. °C)]	ITE 50 (2006)
Reboco Térmico (ISODUR ONE)	0,05 [W/(m. °C)]	SECIL

4.2.2. SOLUÇÕES DE REFORÇO SÍSMICO

As soluções de reforço estrutural e sísmico consideradas neste trabalho com o objetivo de avaliar o impacto em termos de desempenho energético num determinado edifício são as apresentadas na tabela 6. Os pormenores construtivos apresentam-se na tabela 7.

Tabela 6 - Soluções de Reforço Sísmico

PORMENOR PADRÃO	
Parede Tradicional de Alvenaria de Pedra	AP
Ligação entre pavimentos e paredes principais	LPP
Ligação entre pavimentos e paredes secundárias	LPP(SEC.)
Ligação entre coberturas e paredes	LCP
SOLUÇÃO DE REFORÇO SÍSMICO	Simulações
Introdução de chapas quinadas para ligação entre pavimentos e paredes principais	S1
Introdução de chapas quinadas para a ligação entre pavimentos e paredes secundárias	S1(SEC.)
Introdução de chapas no centro das vigas para melhorar ligação entre pavimentos e paredes	S1_1
Aplicação de tirantes metálicos	S2
Aplicação de tirantes metálicos em paredes secundárias	S2(SEC.)
Aplicação de vigas cintas nos topos das paredes	S3
Aplicação de Viga Cinta no topo da parede (outra solução)	S3_1
Execução de Reboco Armado nas duas faces da parede	S4
Execução de Reboco Armado apenas numa face da parede	S4_1

Tabela 7 - Pormenores construtivos e descrição das soluções adotadas

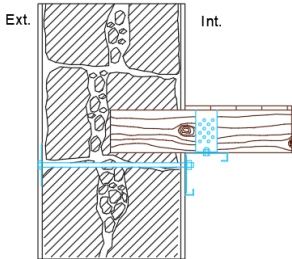
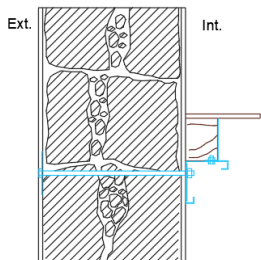
Simulações	Pormenor Construtivo	Descrição	Condições Fronteira
S1		<p>Introdução de chapas quinadas para melhorar a ligação entre pavimentos e paredes.</p> <p>Chapa quinada (0.20 x 0.20 m) com 3mm de espessura;</p> <p>Varão roscado 20mm para ancoragem à parede (chapa com 4 mm que servirá de ancoragem);</p> <p>Chapa quinada em L 200 x 60 x 3 com furação para pregagem à viga de madeira;</p> <p>Soalho de madeira (2 cm).</p>	<p>Ext.:</p> <p>$T = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$</p> <p>$R_{se} = 0,04 (m^2 \cdot ^{\circ}\text{C})/W$</p> <p>$(h_e = 25 W/(m^2 \cdot ^{\circ}\text{C}))$</p> <p>$H_r = 80\%$</p> <p>Int.:</p> <p>$T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$</p> <p>$R_{si} = 0,13(m^2 \cdot ^{\circ}\text{C})/W$</p> <p>$(h_i = 7.692 W/(m^2 \cdot ^{\circ}\text{C}))$</p> <p>$H_r = 60\%$</p> <p>Todas os limites em contacto com o espaço interior apresentam as mesmas condições fronteira.</p>
S1(SEC.)		<p>Introdução de chapas quinadas para melhorar a ligação entre pavimentos e paredes secundárias.</p> <p>Chapa quinada (0.20 x 0.20 m) com 3mm de espessura;</p> <p>Varão roscado 20mm para ancoragem à parede (chapa com 4 mm que servirá de ancoragem);</p> <p>Chapa quinada em L 200 x 60 x 3 com furação para pregagem à viga de madeira;</p> <p>Soalho de madeira (2 cm).</p>	<p>Ext.:</p> <p>$T = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$</p> <p>$R_{se} = 0,04 (m^2 \cdot ^{\circ}\text{C})/W$</p> <p>$(h_e = 25 W/(m^2 \cdot ^{\circ}\text{C}))$</p> <p>$H_r = 80\%$</p> <p>Int.:</p> <p>$T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$</p> <p>$R_{si} = 0,13 (m^2 \cdot ^{\circ}\text{C})/W$</p> <p>$(h_i = 7.692 W/(m^2 \cdot ^{\circ}\text{C}))$</p> <p>$H_r = 60\%$</p> <p>Todas os limites em contacto com o espaço interior apresentam as mesmas condições fronteira.</p>

Tabela 7 – Pormenores construtivos e descrição das soluções adotadas (continuação)

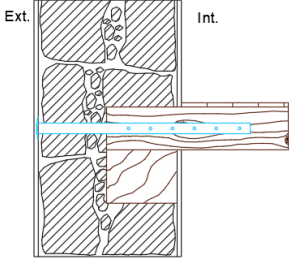
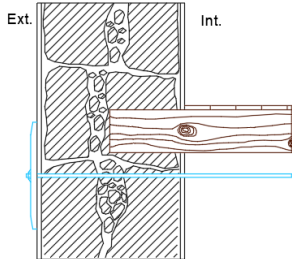
Simulações	Pormenor Construtivo	Descrição	Condições Fronteira
S1_1		<p>Introdução de chapas no centro das vigas para melhorar a ligação entre pavimentos e paredes.</p> <p>Chapa com 4 mm de espessura com furação para pregagem à viga de madeira;</p> <p>Frechal de madeira (25 x 33);</p> <p>Soalho de madeira (2 cm).</p>	<p>Ext.:</p> <p>$T = 0 \text{ } ^\circ\text{C}$</p> <p>$R_{se} = 0,04 \text{ (m}^2 \cdot \text{ } ^\circ\text{C)/W}$ $(h_e = 25 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{ } ^\circ\text{C)})$</p> <p>$H_r = 80\%$</p> <p>Int.:</p> <p>$T = 20 \text{ } ^\circ\text{C}$</p> <p>$R_{si} = 0,13 \text{ (m}^2 \cdot \text{ } ^\circ\text{C)/W}$ $(h_i = 7.692 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{ } ^\circ\text{C)})$</p> <p>$H_r = 60\%$</p> <p>Todas os limites em contacto com o espaço interior apresentam as mesmas condições fronteira.</p>
S2		<p>Aplicação de tirantes metálicos por baixo das vigas dos pavimentos em ambos os lados da parede.</p> <p>Tirantes com diâmetros a variar entre 16 e 20 mm;</p> <p>Placas de Ancoragem para conter os tirantes nas extremidades.</p>	<p>Ext.:</p> <p>$T = 0 \text{ } ^\circ\text{C}$</p> <p>$R_{se} = 0,04 \text{ (m}^2 \cdot \text{ } ^\circ\text{C)/W}$ $(h_e = 25 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{ } ^\circ\text{C)})$</p> <p>$H_r = 80\%$</p> <p>Int.:</p> <p>$T = 20 \text{ } ^\circ\text{C}$</p> <p>$R_{si} = 0,13 \text{ (m}^2 \cdot \text{ } ^\circ\text{C)/W}$ $(h_i = 7.692 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{ } ^\circ\text{C)})$</p> <p>$H_r = 60\%$</p> <p>Todas os limites em contacto com o espaço interior apresentam as mesmas condições fronteira.</p>

Tabela 7 – Pormenores construtivos e descrição das soluções adotadas (continuação)

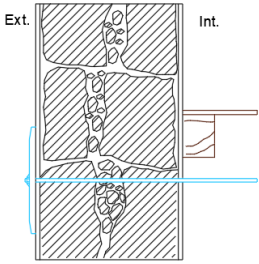
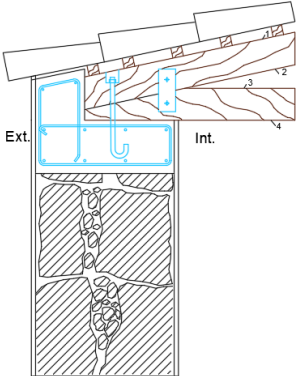
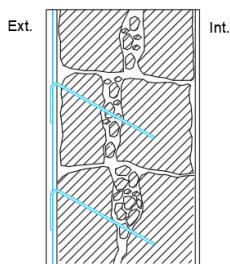
Simulações	Pormenor Construtivo	Descrição	Condições Fronteira
S2(SEC.)		<p>Aplicação de tirantes metálicos por baixo das vigas dos pavimentos em ambos os lados da parede secundária.</p> <p>Tirantes com diâmetros a variar entre 16 e 20 mm;</p> <p>Placas de Ancoragem para conter os tirantes nas extremidades.</p>	<p>Ext.:</p> <p>$T = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$</p> <p>$R_{se} = 0,04\text{ (m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C)/W}$ $(h_e = 25\text{ W/(m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C)})$</p> <p>$H_r = 80\%$</p> <p>Int.:</p> <p>$T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$</p> <p>$R_{si} = 0,13\text{ (m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C)/W}$ $(h_i = 7.692\text{ W/(m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C)})$</p> <p>$H_r = 60\%$</p> <p>Todas os limites em contacto com o espaço interior apresentam as mesmas condições fronteira.</p>
S3		<p>Aplicação de vigas cinto perimetrais no topo das paredes.</p> <p>Viga com altura de 0.25 m e espessura da parede;</p> <p>Armadura Longitudinal (8 varões de 10 mm + 2 varões de 8 mm no topo);</p> <p>Estribos de 8 mm espaçados de 0.20 m;</p> <p>Gancho com 20 mm de espessura.</p>	<p>Ext.:</p> <p>$T = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$</p> <p>$R_{se} = 0,04\text{ (m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C)/W}$ $(h_e = 25\text{ W/(m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C)})$</p> <p>$H_r = 80\%$</p> <p>Int.:</p> <p>$T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$</p> <p>$R_{si} = 0,13\text{ (m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C)/W}$ $(h_i = 7.692\text{ W/(m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C)})$</p> <p>$H_r = 60\%$</p> <p>Limite 1, 2 e 3:</p> <p>$T\text{ (exterior)} = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$</p> <p>$R_{si} = 0,10\text{ (m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C)/W}$ (ascendente)</p> <p>Limite 4:</p> <p>$T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$</p> <p>$R_{si} = 0,10\text{ (m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C)/W}$</p>

Tabela 7 – Pormenores construtivos e descrição das soluções adotadas (continuação)

Simulações	Pormenor Construtivo	Descrição	Condições Fronteira
S3_1		<p>Aplicação de vigas cinto perimetrais no topo das paredes.</p> <p>Viga com altura de 0.25 m e espessura da parede;</p> <p>Armadura Longitudinal (8 varões de 10 mm);</p> <p>Estribos de 8 mm espaçados de 0.20 m;</p> <p>Gancho com 20 mm de espessura.</p>	<p>Ext.:</p> <p>$T = 0 \text{ } ^\circ\text{C}$</p> <p>$R_{se} = 0,04 \text{ (m}^2 \cdot \text{ } ^\circ\text{C)/W}$ $(h_e = 25 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{ } ^\circ\text{C)})$</p> <p>$H_r = 80\%$</p> <p>Int.:</p> <p>$T = 20 \text{ } ^\circ\text{C}$</p> <p>$R_{si} = 0,13 \text{ (m}^2 \cdot \text{ } ^\circ\text{C)/W}$ $(h_i = 7.692 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{ } ^\circ\text{C)})$</p> <p>$H_r = 60\%$</p> <p>Limite 1, 2 e 3:</p> <p>$T \text{ (exterior)} = 0 \text{ } ^\circ\text{C}$</p> <p>$R_{si} = 0,10 \text{ (m}^2 \cdot \text{ } ^\circ\text{C)/W}$ (ascendente)</p> <p>Limite 4:</p> <p>$T = 20 \text{ } ^\circ\text{C}$</p> <p>$R_{si} = 0,10 \text{ (m}^2 \cdot \text{ } ^\circ\text{C)/W}$</p>
S4		<p>Execução de Reboco Armado nas duas faces da parede de alvenaria.</p> <p>1ª camada de enchimento de argamassa;</p> <p>Aplicação de uma malha de aço com 0,5 mm fixada em ambos os lados com varões roscados (20 mm) e placas (200 x 200 mm) espaçadas de 150 cm e com 4 mm de espessura;</p> <p>Segunda camada de acabamento de argamassa.</p>	<p>Ext.:</p> <p>$T = 0 \text{ } ^\circ\text{C}$</p> <p>$R_{se} = 0,04 \text{ (m}^2 \cdot \text{ } ^\circ\text{C)/W}$ $(h_e = 25 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{ } ^\circ\text{C)})$</p> <p>$H_r = 80\%$</p> <p>Int.:</p> <p>$T = 20 \text{ } ^\circ\text{C}$</p> <p>$R_{si} = 0,13 \text{ (m}^2 \cdot \text{ } ^\circ\text{C)/W}$ $(h_i = 7.692 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{ } ^\circ\text{C)})$</p> <p>$H_r = 60\%$</p>

Tabela 7 – Pormenores construtivos e descrição das soluções adotadas (continuação)

Simulações	Pormenor Construtivo	Descrição	Condições Fronteira
S4_1		<p>Execução de reboco armado na face exterior da parede de alvenaria.</p> <p>1ª camada de enchimento de argamassa;</p> <p>Aplicação de uma malha de aço com 0,5 mm ancorada com peças metálicas espaçadas de 0.50 m;</p> <p>Segunda camada de acabamento de argamassa.</p>	<p>Ext.:</p> <p>$T = 0 \text{ } ^\circ\text{C}$</p> <p>$R_{se} = 0,04 \text{ (m}^2 \cdot \text{ } ^\circ\text{C)/W}$ $(h_e = 25 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{ } ^\circ\text{C)})$</p> <p>$H_r = 80\%$</p> <p>Int.:</p> <p>$T = 20 \text{ } ^\circ\text{C}$</p> <p>$R_{si} = 0,13 \text{ (m}^2 \cdot \text{ } ^\circ\text{C)/W}$ $(h_i = 7.692 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{ } ^\circ\text{C)})$</p> <p>$H_r = 60\%$</p>

4.3. METODOLOGIA DE ANÁLISE DO DESEMPENHO TÉRMICO

4.3.1. PROGRAMA THERM 7.7

O programa de cálculo automático utilizado na realização deste trabalho é o THERM 7.7. Esta ferramenta foi desenvolvida no Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL) e permite uma análise bidimensional da transferência de calor por condução em elementos de construção. O seu algoritmo de cálculo baseia-se no método dos elementos finitos.

O cálculo realizado pelo programa THERM, de modo a ser correto e preciso, tem de estar de acordo com as normas EN ISO 10211 [7] e EN ISO 6946 [5]. A norma EN ISO 10211 indica as especificações que o modelo tem que respeitar, os ensaios para avaliar a fiabilidade dos algoritmos numéricos e ainda os requisitos a satisfazer para um programa ser considerado de alta precisão. Entre outros exemplos o trabalho realizado em [31] demonstra que o programa THERM está de acordo com a norma, uma vez que verifica os requisitos estabelecidos no anexo A para os 2 primeiros casos (os casos 3 e 4 são referentes a transferência de calor tridimensional). No que diz respeito à norma EN ISO 6946, que estabelece métodos de cálculo para a resistência térmica e para o coeficiente de transmissão térmica, o estudo realizado por [16] efetua uma verificação calculando a resistência térmica de uma parede constituída por materiais homogéneos, tanto analiticamente como pelo THERM e no qual se atingiu os mesmos resultados.

Assim, o programa selecionado executa o cálculo necessário para este trabalho de acordo com as normas referidas anteriormente, tendo sido necessário efetuar alguns ajustes no modelo geométrico utilizado, nomeadamente a posição dos planos de corte. A norma define que, caso não exista um plano de simetria, este plano deve-se situar a uma distância d_{\min} do elemento central, ver figura 11 – d_{\min} é o maior valor entre 1 m e três vezes a espessura do elemento. Para este caso de estudo e como as paredes de alvenaria apresentam, por norma, elevadas espessuras (neste caso específico 69 cm) não faz muito

sentido estar a adotar uma distância de 2,07 m (correspondente a três vezes a espessura) para cada lado, dado que é um valor demasiado elevado tendo-se, por isso, optado pela definição de d_{min} igual a 1 m .

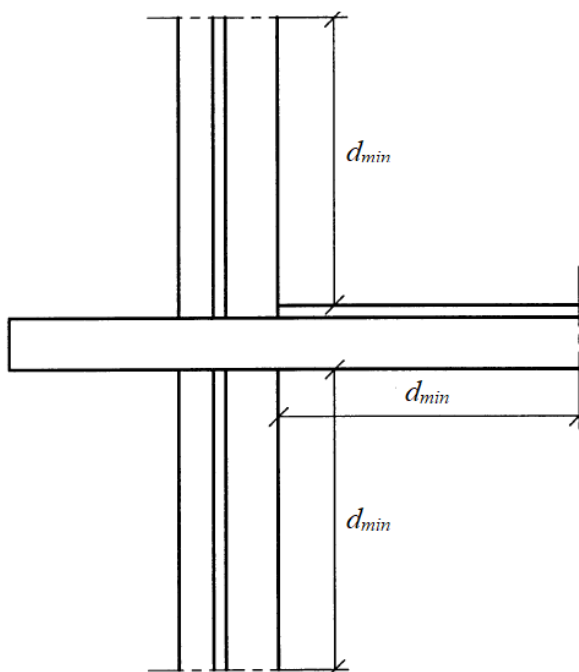


Figura 11 - Localização dos planos de corte (adaptado de [7])

4.3.2. DESCRIÇÃO GERAL DO FUNCIONAMENTO DO THERM 7.7

4.3.2.1. Equação de transferência de calor

O THERM 7.7 permite a análise de transferência de calor através de um elemento construtivo pelo uso da condução bidimensional (2D). O método dos elementos finitos, utilizado pelo programa, para realizar esta análise requer que a secção transversal seja dividida numa malha composta por elementos não sobrepostos. Para isso o programa utiliza o método Finite Quadtree que executa este processo automaticamente [32].

Para o cálculo da transferência de calor o programa tem por base, a Lei de Fourier, definida na equação (7):

$$\vec{q} = -\lambda \text{grad}(T) \quad (7)$$

em que:

\vec{q} – Densidade de fluxo de calor [W/m²]

λ – Condutibilidade térmica [W/m°C]

T – Temperatura [°C]

Todos os processos de cálculo que o programa efetua utilizam equações que se baseiam e derivam da equação geral referida anteriormente.

4.3.2.2. Dados de entrada

Para a realização das simulações, o THERM 7.7 necessita da geometria do elemento construtivo, das propriedades dos materiais que o constituem e das condições fronteira exteriores e interiores.

No que diz respeito ao elemento construtivo, o THERM 7.7 permite criar secções de várias formas. Pode ser desenhado diretamente na janela do programa com base num desenho cotado, pode-se usar um arquivo DXF como base para o desenho ou pode-se usar o modo de conversão automática que transforma um arquivo DXF diretamente num desenho THERM. É importante referir que o programa não permite a sobreposição de polígonos.

As propriedades dos materiais necessárias para a simulação térmica dividem-se em duas classes: sólidos (Figura 12(a)) ou cavidades (Figura 12(b)). Para os materiais sólidos as propriedades necessárias para os caracterizar são: (a) condutibilidade térmica do material seco $[W/(m \cdot ^\circ C)]$ e (b) emissividade [-]. As propriedades a definir nas cavidades são: (a) modelo da cavidade; (b) o tipo de gás e (c) emissividade [-].

A introdução de novos materiais e das suas propriedades ficam gravadas e disponíveis nas bibliotecas do THERM 7.7 para usos futuros. O programa permite ainda a escolha de diferentes cores para facilitar a visualização e se poder distinguir os materiais.

As características dos materiais são introduzidas diretamente pelo utilizador no THERM usando dados de ensaios realizados ou com o apoio de bibliografia já existente.

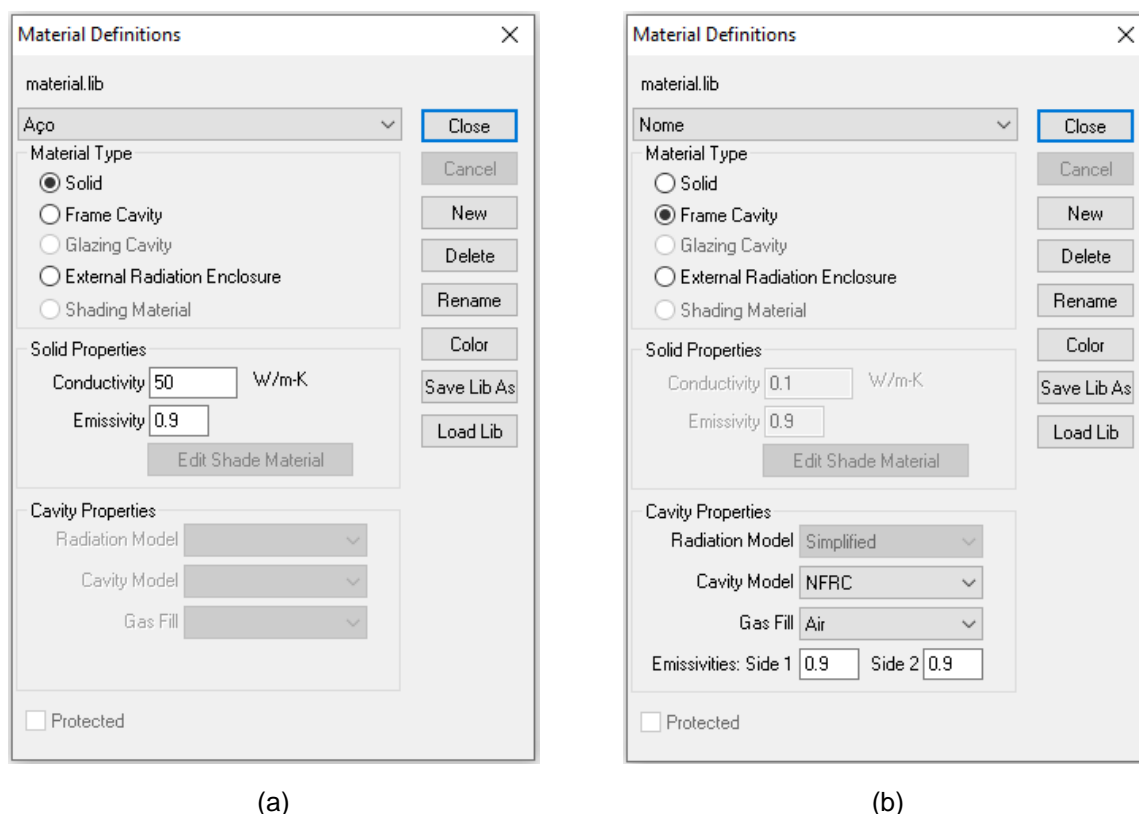


Figura 12- Dados de entrada: (a) Propriedades dos materiais sólidos; (b) Propriedades das cavidades [14]

Para a caracterização das condições fronteira exteriores e interiores é necessário definir: (a) temperatura ($^{\circ}\text{C}$); (b) condutância térmica superficial [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$]; (c) humidade relativa [%], ver Figura 13. As condições são introduzidas diretamente no programa pelo utilizador sendo a condutância térmica superficial definida consoante a posição da superfície fronteira face à direção do fluxo.

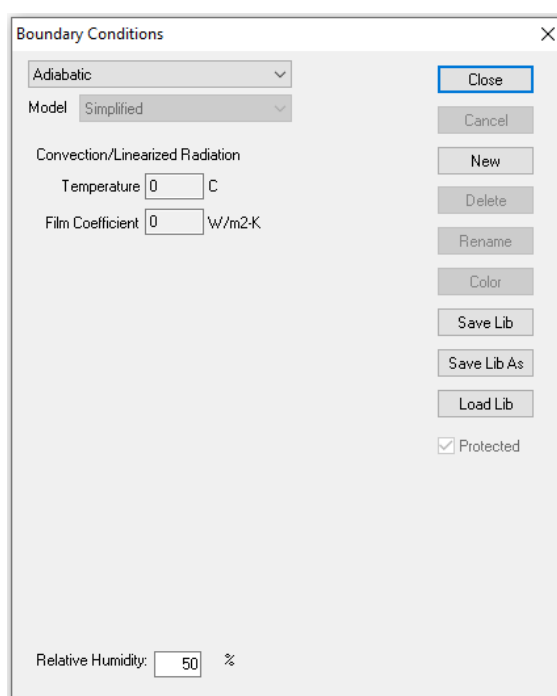


Figura 13 - Dados de entrada: condições fronteiras interiores e exterior [14]

4.3.2.3. Saída de resultados

Os resultados que o THERM 7.7 disponibiliza são diversos tais como os valores do coeficiente U (ou R), a malha de elementos finitos, linhas isotérmicas, os vetores do fluxo de calor, linhas do fluxo constante, temperaturas (num determinado local, a temperatura mínima, média e máxima) e potenciais zonas com risco de condensação superficial, como mostra a Figura 14 . Dos diversos resultados descritos anteriormente salienta-se o valor ponderado do coeficiente de transmissão térmica, U, por ser o fundamental para a realização deste trabalho. Estes resultados podem ser visualizados automaticamente no programa, com animações e mapas de cores inseridas no elemento construtivo.

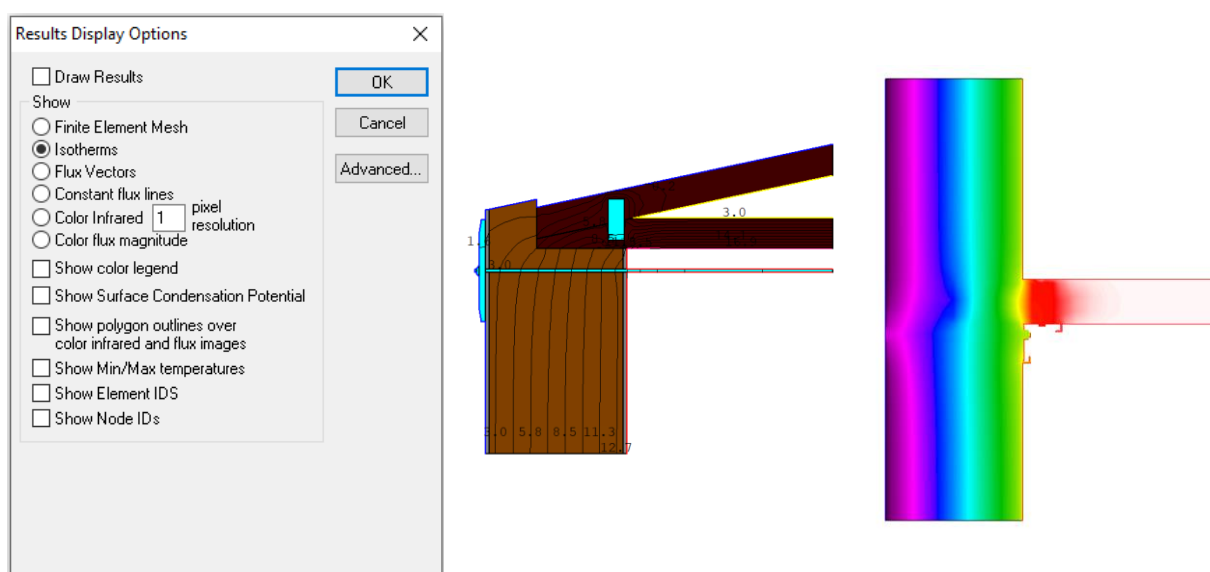


Figura 14 - Saída de resultados [14]

4.4. METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE SÍSMICA

A avaliação da vulnerabilidade sísmica de edificações antigas é, frequentemente, muito complexa devido à falta de conhecimento das características construtivas, materiais e estruturais das construções em alvenaria de pedra – um exemplo disso são as variações do tipo de alvenaria, que muitas vezes são distintas de região para região. Com efeito, a enorme variedade de soluções e frequente falta de informação sobre o existente, nomeadamente de peças desenhadas, estão entre os aspetos que mais contribuem para esta dificuldade. Assim, normalmente, quando se pretende avaliar, um determinado núcleo antigo é necessário realizar visitas aos edifícios, inspecionar e caracterizar a pré-existência e, por vezes, proceder ao estudo dos parâmetros que influenciam a vulnerabilidade sísmica dos edifícios em causa.

Como referido anteriormente, os edifícios construídos em alvenaria de pedra apresentam um conjunto bem conhecido e documentado de fragilidades face a sismos. Apesar disso a substituição ou demolição generalizada destes edifícios não é solução, tornando-se necessário implementar soluções de reforço que melhorem o seu comportamento sísmico e que, ao mesmo tempo, permitam salvaguardar as pessoas e este o património construído.

4.4.1. APRESENTAÇÃO GERAL DO MÉTODO A UTILIZAR

Tendo em conta o exposto, a presente avaliação terá como objetivo, não só a avaliação do índice de vulnerabilidade sísmica de um edifício em alvenaria de pedra, mas também o estudo do impacto de diversas soluções de reforço sísmico nessa mesma vulnerabilidade.

Para o estudo da vulnerabilidade sísmica do caso presente nesta dissertação irá adotar-se uma metodologia de avaliação da vulnerabilidade sísmica de edifícios [24][33], e que se baseia no cálculo de um índice de vulnerabilidade do edifício através de uma média ponderada de 14 parâmetros de avaliação, ver Tabela 8.

Tabela 8 - Índice de vulnerabilidade sísmica de edifícios [33]

Parâmetros	Classe, C_{vi}				Peso, p_i	Índice de Vulnerabilidade
	A	B	C	D	p	
P1 Tipo e organização do sistema resistente	0	5	20	50	2,50	$I_v^* = \sum_{i=1}^{14} C_{vi} \times p_i$ $0 \leq I_v^* \leq 750$ Índice de Vulnerabilidade normalizado: $0 \leq I_v \leq 100$
P2 Qualidade do Sistema resistente	0	5	20	50	2,50	
P3 Resistência Convencional	0	5	20	50	1,00	
P4 Distância máxima entre paredes	0	5	20	50	0,50	
P5 Altura do edifício	0	5	20	50	0,50	
P6 Posição do edifício e fundações	0	5	20	50	0,50	
P7 Localização e interação	0	5	20	50	1,50	
P8 Irregularidade em planta	0	5	20	50	0,50	
P9 Irregularidade em altura	0	5	20	50	0,50	
P10 Desalinhamento de aberturas	0	5	20	50	0,50	
P11 Diafragmas horizontais	0	5	20	50	0,75	
P12 Tipos de cobertura	0	5	20	50	2,00	
P13 Danos estruturais identificados	0	5	20	50	1,00	
P14 Elementos não-estruturais	0	5	20	50	0,75	

Cada um dos parâmetros, presentes na tabela 8, avalia um determinado aspecto relacionado com o desempenho sísmico dos edifícios. Os parâmetros apresentam quatro classes de vulnerabilidade crescente, C_{vi} , A, B, C e D, respetivamente. A cada um destes parâmetros é ainda associado um peso, p_i , que varia entre 0,5 e 2,5 – pesos menores correspondem a parâmetros com menor relevância para o comportamento global do edifício; pesos maiores correspondem a parâmetros com maior preponderância para a vulnerabilidade sísmica do edifício. Embora quando obtido diretamente através da expressão apresentada na tabela 6, o índice de vulnerabilidade, I_v^* , apresenta um valor entre 0 e 750, por questões de facilidade de interpretação e aplicação, este valor é usualmente normalizado, para variar no intervalo de 0 a 100, tomando, após normalizado, a notação I_v .

4.4.2. ESTRATÉGIA DE APLICAÇÃO

Inicialmente será avaliado o índice de vulnerabilidade sísmica do edifício acima exemplificado sem qualquer tipo de reforço, correspondendo à situação “Antes do Reforço” (AR). Posteriormente, e com o objetivo de avaliar a melhoria do desempenho sísmico do edifício em análise (quantificada através da redução da sua vulnerabilidade sísmica) mantendo a sua identidade e integridade construtiva e arquitetónica, serão analisadas individualmente cinco soluções de reforço (S1/S1_1; S2; S3/S3_1; S4 e S4_1) e mais seis soluções resultantes do cruzamento das cinco anteriores.

É importante referir que cada uma das soluções mencionadas na tabela 4 contribui para a melhoria de classes de vulnerabilidade C_{vi} , num determinado parâmetro, o que no final se traduz numa redução

gradual do índice de vulnerabilidade do edifício. É relevante frisar ainda que nas soluções que combinam vários reforços, as classes são alteradas tendo em conta a melhor classe das soluções aplicadas individualmente. Estas soluções não introduzem alterações em todos os parâmetros mantendo-se alguns inalterados, nomeadamente os parâmetros P4, P5, P6, P7, P8, P9, P10 e P14.

5

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO DESEMPENHO TÉRMICO DAS PAREDES: ANÁLISE DE RESULTADOS

5.1. NOTA INTRODUTÓRIA

Neste capítulo apresenta-se um conjunto de simulações efetuadas com o THERM 7.7 para analisar a influência da introdução de reforços sísmicos no coeficiente de transmissão térmica, U , de uma parede tradicional de alvenaria de pedra. Para cada zona da parede será, também, analisado o impacto desses mesmos reforços, mas considerando uma intervenção de reabilitação energética através da introdução de um reboco térmico para conferir à parede uma melhoria no seu comportamento térmico.

5.2. INFLUÊNCIA DA INTRODUÇÃO DE REFORÇOS SÍSMICOS E REBOCO TÉRMICO

5.2.1. ZONA CORRENTE DA PAREDE DE ALVENARIA DE PEDRA

Na figura 15 o gráfico mostra, para as soluções de reforço sísmico e melhoria térmica com reboco térmico, a variação do coeficiente de transmissão térmica ponderado na zona corrente de uma parede tradicional de alvenaria de pedra.

A introdução do reboco armado, nas duas faces (S4) ou, apenas, numa face (S4_1), agrava o valor ponderado do coeficiente de transmissão térmica, com variações de $0,04 \text{ W}/(\text{m}^2\text{C})$ e $0,07 \text{ W}/(\text{m}^2\text{C})$ respetivamente. Este fenómeno acontece devido à introdução do elemento aço, que se apresenta como um bom condutor do calor. A diferença que se verifica entre S4 e S4_1 deve-se ao facto de a espessura do reboco interior ser menor na segunda solução fazendo aumentar o valor de U , visto que, uma menor espessura leva a menor resistência e conseqüentemente a um U superior.

No entanto, a substituição do reboco tradicional pelo reboco térmico na face exterior revela alterações significativas que melhoram o desempenho térmico da parede. Repare-se que a introdução do reboco térmico, sem qualquer tipo de reforço (solução AP-RT), diminui o valor do U em cerca de 50 %. A introdução do reboco armado consegue, ainda, apresentar melhores resultados do que a situação anterior devido ao aumento da espessura de reboco quando se realiza este tipo de reforço, passando-se de 0,02 m para 0,05 m.

É importante referir que as soluções de reabilitação aqui apresentadas cumprem o $U_{\text{máx}}$ admissível segundo a Portaria 297/2019 para as zonas climáticas de Inverno (estação de aquecimento) I1, I2 e I3.

Neste estudo evidencia-se a comparação com o coeficiente de transmissão térmica só por uma questão de ordem de grandeza.

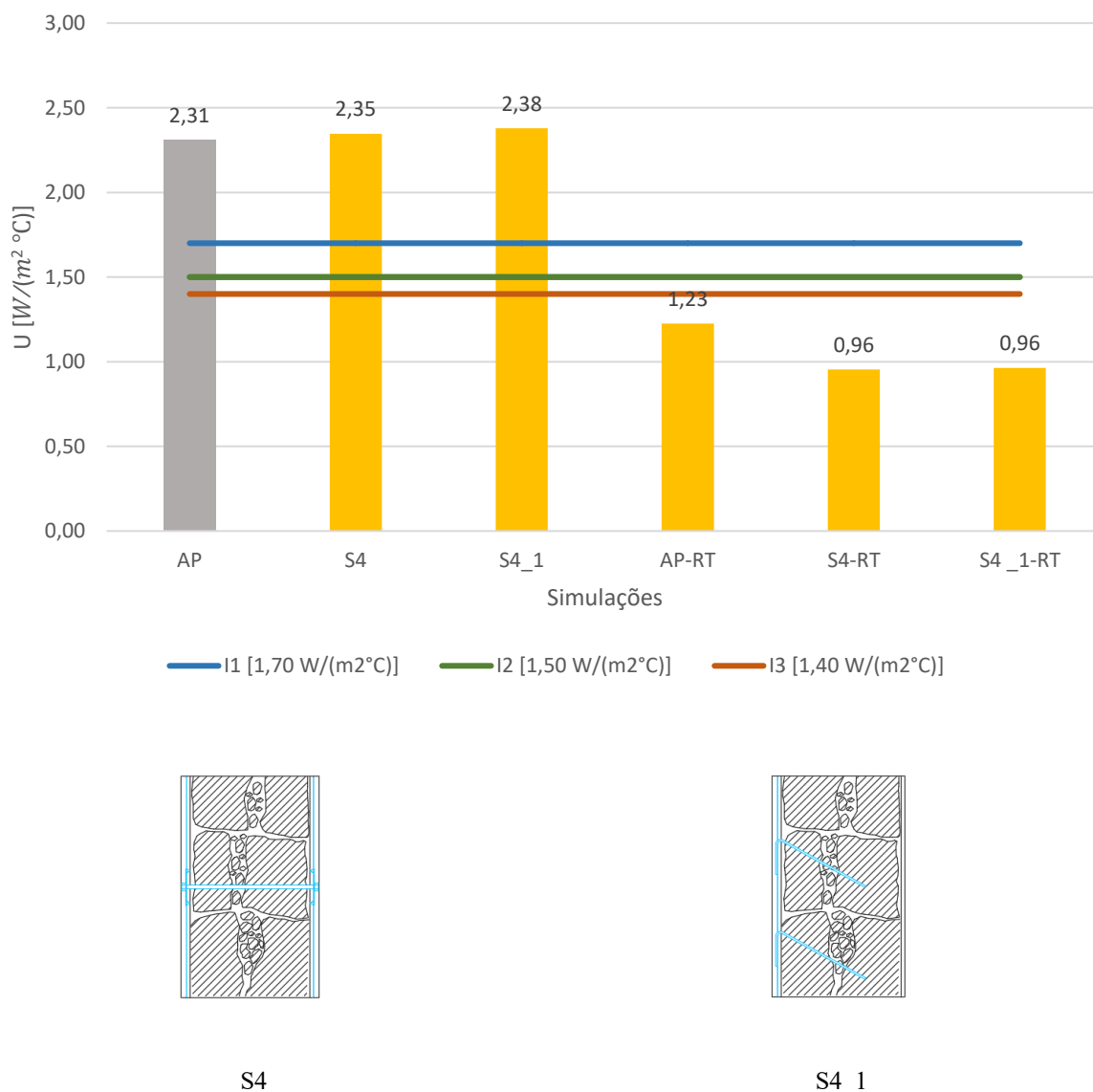


Figura 15 - Variações do valor U consoante a aplicação de reforços sísmicos na zona corrente da parede de alvenaria

5.2.2. ZONA DA LIGAÇÃO PAVIMENTOS-PAREDES PRINCIPAIS

O gráfico apresentado na figura 16 traduz o impacto da introdução das técnicas de reforço e as respetivas variações do valor de U nas zonas de ligação pavimento-parede. O valor mais elevado, $U_{máx}$, foi de 2,86 W/(m²·°C) e corresponde à solução que combina os três reforços com introdução de aço (S1+S2+S4) e o valor mínimo, U_{min} foi de 0,97 W/(m²·°C) e corresponde à solução com melhoria térmica, maior espessura de reboco e menor quantidade de aço (solução LPP+S4-RT).

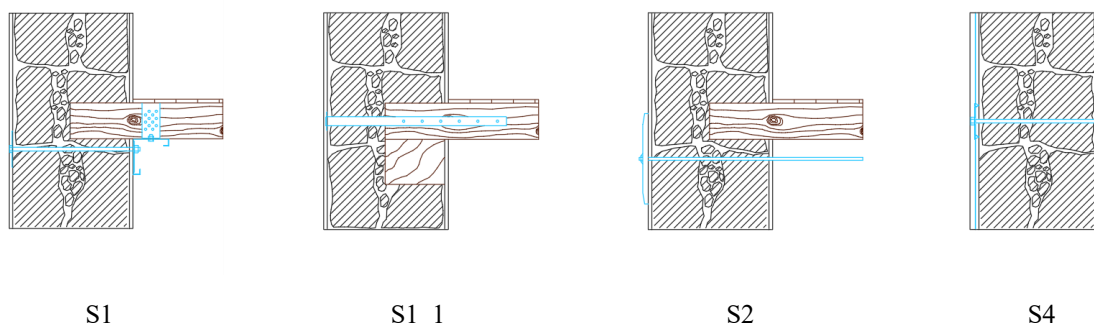
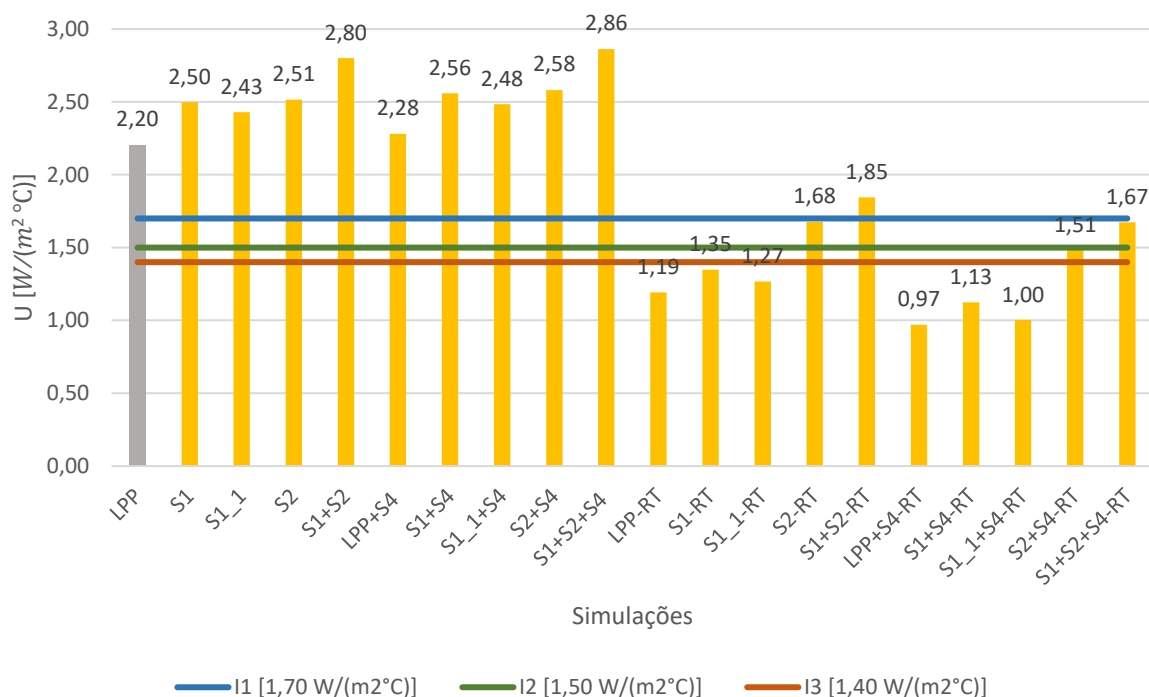


Figura 16 - Variações do valor U na zona da ligação pavimentos-paredes principais

Mais uma vez constata-se que o aço influencia, significativamente, a transferência de calor que ocorre através de um determinado elemento construtivo devido ao seu alto valor da condutibilidade térmica. Verifica-se, globalmente, que a introdução deste material afeta o comportamento térmico da parede em estudo sendo mais gravosa quando se encontra, efetivamente, em contacto com os ambientes interior e exterior devido às diferenças de temperaturas. A simulação LPP+S4, confirma a afirmação anterior, uma vez que, apresenta um reforço em que o aço está imerso na parede de alvenaria de pedra e, por este motivo, verifica-se um menor impacto no valor ponderado do coeficiente de transmissão térmica, U. Todas as outras simulações apresentam piores resultados devido ao contacto direto dos elementos metálicos com os meios ambientes (interno e/ou externo).

Também nestes exemplos, a introdução de reboço térmico promove a redução do coeficiente de transmissão térmica devido à sua elevada resistência. No entanto, mesmo com a introdução deste material, continua a confirmar-se que soluções que apresentam maior quantidade de aço em contacto com os meios ambientes e que atravessam o elemento construtivo apresentam U menos favoráveis. É

relevante referir que, após a melhoria térmica, a solução com maior quantidade de aço (S1+S2+S4-RT) deixa de ser a que apresenta o pior resultado. Este fenómeno ocorre devido à substituição do reboco tradicional pelo reboco térmico e à alteração das espessuras devido à introdução do reforço S4. O efeito combinado destas alterações conduz a um aumento significativo da resistência térmica da parede e consequentemente à redução do U.

Comparando os resultados com as exigências regulamentares, conclui-se que algumas das soluções de reabilitação não cumprem o $U_{\text{máx}}$ para as três zonas climáticas de inverno, admissível pela portaria 297/2019, nomeadamente as seguintes : LPP, S1, S1_1, S2, S1+S2, LPP+S4, S1+S4, S1_1+S4, S2+S4, S1+S2+S4 e S1+S2-RT.

5.2.3. ZONA DA LIGAÇÃO PAVIMENTOS-PAREDES SECUNDÁRIAS

O gráfico representado na figura 17 mostra os impactos provocados pela reabilitação sísmica no comportamento térmico das paredes secundárias.

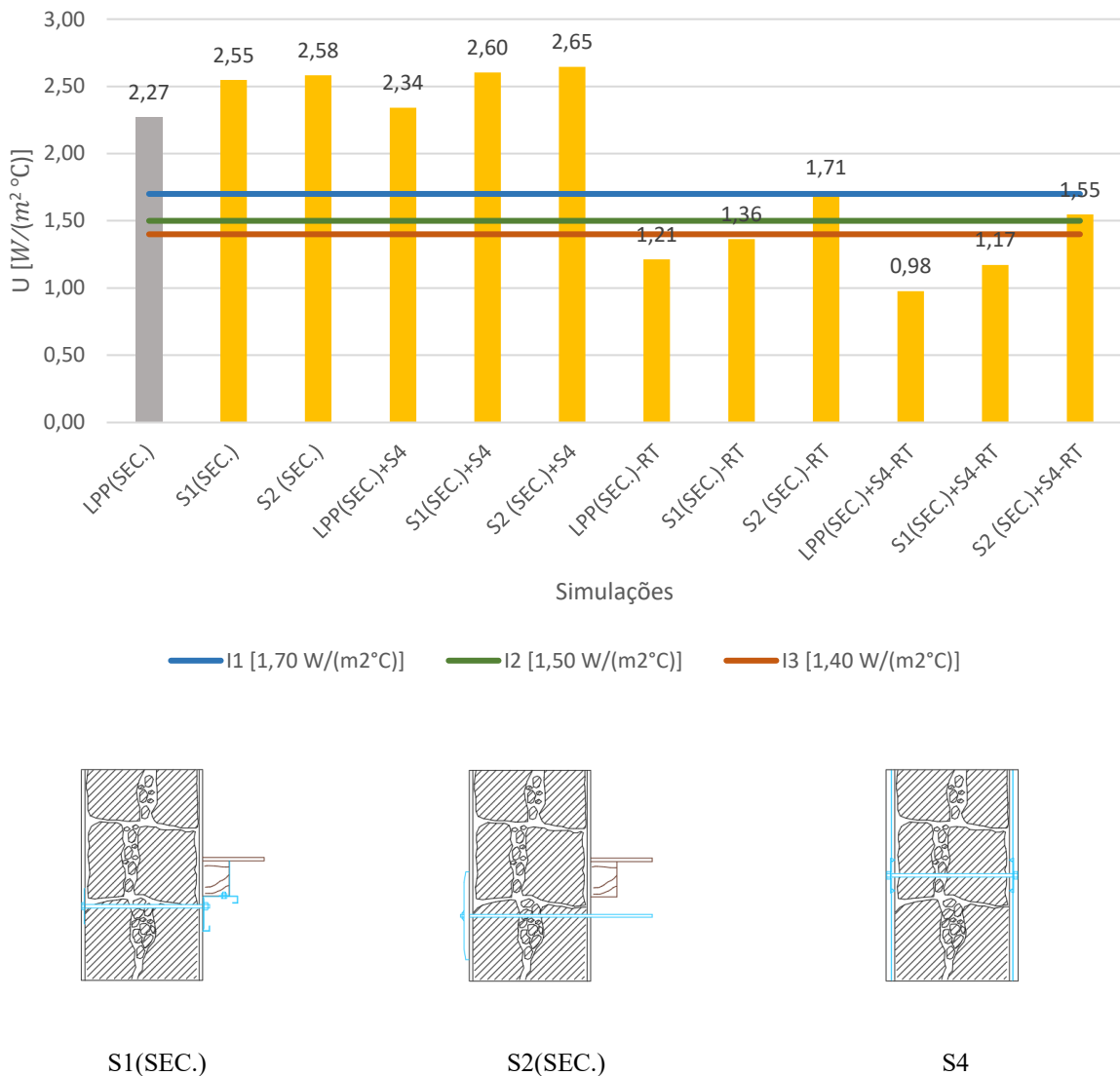


Figura 17 - Variação do valor U na zona da ligação pavimentos-paredes secundárias

A solução que apresenta pior comportamento térmico é a solução S2(SEC.)+S4 com um valor máximo de condutibilidade térmica, $U_{\text{máx}}$ de 2,65 W/(m²°C) e a que apresenta melhor desempenho é a solução LPP(SEC.)+S4-RT com o valor mínimo, U_{min} de 0,98 W/(m²°C).

Nestes cenários os elementos de madeira não estão encastrados na parede, pelo que, o seu impacto é menor e os resultados do valor ponderado do coeficiente de transmissão térmica são superiores aos verificados na parede principal. No entanto, continua a verificar-se que soluções no qual se insere o reforço S2 (elementos metálicos que atravessam a parede) são as mais prejudiciais no desempenho térmico do elemento construtivo.

Tanto no gráfico da figura 17 como no gráfico da figura 16 as variações existentes entre tipos de reforço sem e com melhoria térmica permitem discutir de forma sustentada o seu impacto no desempenho térmico dos elementos. Os reforços S1 (SEC.) e S2 (SEC.) resultam numa diferença de 0,03 W/(m²°C) quando não é aplicado qualquer material que permita melhorar o desempenho térmico. No entanto, quando se aplica o reboco térmico esta diferença passa para 0,35 W/(m²°C). Este fenómeno acontece porque, no segundo caso, estamos a atravessar uma camada com características térmicas muito diferentes e, por essa razão, o fluxo de calor aumenta e o impacto é superior, aumentando o valor de U. O mesmo fenómeno ocorre com outros reforços como S1+S4 – S2+S4 e S1+S4-RT – S2+S4-RT.

Apesar da melhoria térmica efetuada, as soluções com reforço S2 não cumprem o $U_{\text{máx}}$ admissível referido na Portaria 297/2019 para as zonas climáticas de Inverno.

5.2.4. ZONA DA LIGAÇÃO COBERTURA-PAREDES

A figura 18 mostra os resultados obtidos para o coeficiente de transmissão térmica quando é realizado um reforço sísmico e, posteriormente, uma melhoria térmica na ligação cobertura-paredes.

As soluções que apresentam piores resultados são, claramente, as soluções onde o material aço se encontra diretamente em contacto com os ambientes, ou seja, simulações que contêm reforço S2. Como o aço é um excelente condutor as trocas de calor ocorrem com maior velocidade quando existe uma diferença de temperatura. Desta forma o seu contacto direto com o exterior e o interior promove essas trocas de calor e agrava o valor ponderado do coeficiente de transmissão térmica da parede.

A introdução de vigas cintas no topo das paredes, simulações S3 e S3_1, melhoram, ainda que de forma reduzida, o valor ponderado do coeficiente de transmissão térmica em relação à situação padrão LCP. Este fenómeno deve-se à introdução do betão que apresenta maior resistência térmica que a pedra granito. O efeito produzido pela introdução do aço referente ao betão armado é atenuado pela maior quantidade de betão utilizada.

A introdução do reboco armado afeta de certa forma o comportamento térmico da parede, mas não de uma forma muito evidente verificando-se, apenas, uma variação de 0,05 W/(m²°C) em relação ao LCP.

A introdução do reboco térmico apresenta melhorias muito significativas, continuando a apresentar piores resultados as soluções que apresentam reforço S2 pelos motivos anteriormente explicados. Os melhores resultados são os que apresentam reboco armado (S4) devido ao aumento da espessura do reboco.

O valor da simulação com a situação padrão LCP é mais baixo que as situações padrões AP e LPP devido à quantidade de madeira utilizada (madeira apresenta maior resistência térmica). Repare-se,

também, que de AP para LPP o valor de U também diminui e a única diferença deve-se à introdução da madeira de pavimento.

Verificou-se ainda o valor de U neste pormenor construtivo considerando-se o comprimento para o se cálculo apenas numa zona mais próxima da zona corrente e o resultado obtido foi, como era expectável, mais próximo do resultado obtido em AP.

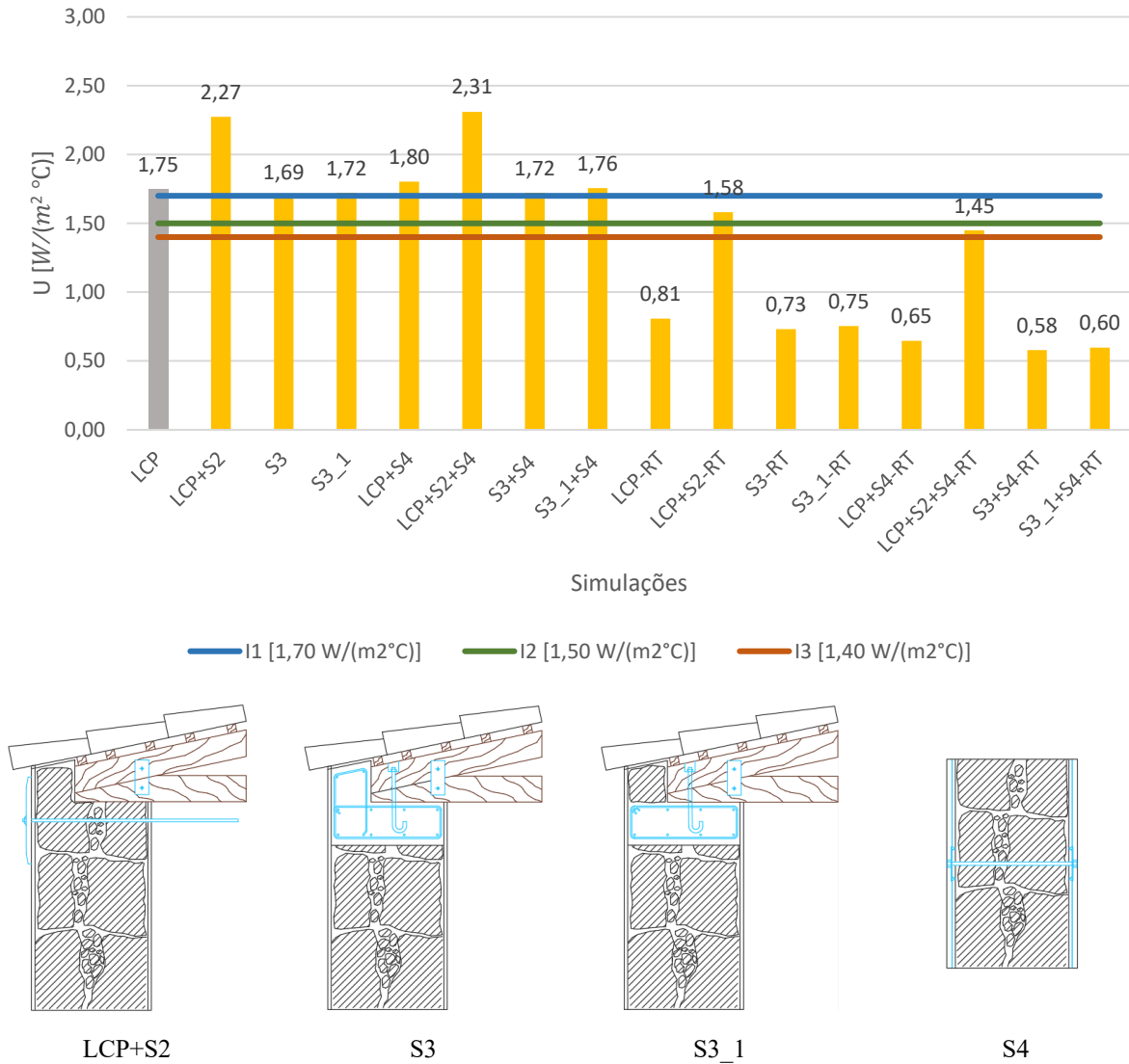



Figura 18 - Variação do valor U na zona da ligação cobertura-paredes

5.3. SÍNTESE CRÍTICA

A Tabela 9 sintetiza os resultados das simulações numéricas efetuadas, mostrando a influência dos reforços sísmicos na variação do valor U em diferentes zonas da parede, face à situação sem qualquer tipo de reforço.

Tabela 9 - Síntese dos resultados da simulação numérica



	$\Delta U < -1,00$	$-1,00 < \Delta U < -0,50$	$-0,50 < \Delta U < 0,00$	$0,00 < \Delta U < 0,50$	$0,50 < \Delta U < 1,00$
ZC	AP-RT S4-RT S4_1-RT	-	-	S4 S4_1	
LPP	LPP-RT LPP+S4-RT S1+S4-RT S1_1+S4-RT	S1-RT S1_1-RT S2-RT S2+S4-RT S1+S2+S4-RT	S1+S2-RT	S1 S1_1 S2 LPP+S4 S1+S4 S1_1+S4 S2+S4	S1+S2 S1+S2+S4
LPP - Secundárias	LPP(SEC.)-RT LPP(SEC.)+S4-RT S1+S4-RT	S1-RT S2-RT S2+S4-RT	-	S1 S2 LPP(SEC.)+S4 S1+S4 S2+S4	-
LCP	S3-RT LCP+S4-RT S3+S4-RT S3_1+S4-RT	S3+S4 LCP-RT S3_1-RT	S3 S3_1 LCP+S2-RT LCP+S2+S4-RT	LCP+S4 S3_1+S4	LCP+S2 LCP+S2+S4

As soluções que se encontram em intervalos negativos são aquelas em que houve uma redução do U e, por isso, uma melhoria do desempenho térmico (impacto positivo no comportamento térmico da parede). Já as soluções que se encontram em intervalos positivos significam aumento do valor U e consequentemente redução do desempenho térmico da parede.

Das cinquenta simulações efetuadas, apenas quatro apresentaram um ΔU superior a 0,50. Este fenómeno acontece porque estas soluções são as que apresentam maior quantidade de aço em contacto direto com o exterior e não é realizada qualquer melhoria térmica.

Observa-se também que a maioria das soluções com melhores resultados são as que apresentam uma combinação do reforço S4 com o reboco térmico. Isto deve-se à alteração de espessura que se realiza quando se aplica este tipo de reforço, visto que, passa-se de 2 cm de uma camada termicamente menos resistente para 5 cm de uma camada com características térmicas muito boas. No entanto existem algumas soluções com S4 e RT que se apresentam nos restantes intervalos. O que acontece, é que nestes casos a quantidade de aço em contacto com os ambientes agrava mais o comportamento térmico da parede do que o aumento de espessura melhora. Assim, como o impacto negativo do aço é superior ao impacto positivo do aumento da espessura e colocação de RT a diminuição do valor de U acaba por ser menor comparativamente aos casos anteriores.

Contudo, a maioria das soluções de reforço sem melhoria térmica cai no intervalo $0,00 < \Delta U < 0,50$, exceto três situações: S3, S3_1 e S3+S4. Estas soluções são as únicas que, mesmo sem RT, apresentam uma melhoria térmica em relação à situação padrão. Tal fenómeno acontece porque se introduz betão que apresenta maior resistência térmica que o granito. A substituição de um material por outro faz reduzir o valor de U ainda que de forma muito subtil.

6

VULNERABILIDADE SÍSMICA DO EDIFÍCIO: ANÁLISE DE RESULTADOS

6.1. ENQUADRAMENTO

Como referido nos capítulos anteriores, os edifícios em alvenaria de pedra apresentam um conjunto de fragilidades estruturais, relativamente bem conhecidas e documentadas, e que tornam a avaliação da vulnerabilidade sísmica de extrema importância. No caso específico deste trabalho, o tipo de análise adotado resultou do equilíbrio entre o tempo disponível para a realização do trabalho e o esforço computacional associado às múltiplas análises a realizar. Desse equilíbrio, optou-se então pela adoção da metodologia descrita na Secção 4.3.1. De acordo com essa metodologia de avaliação simplificada, a vulnerabilidade sísmica do edifício é quantificada com base num conjunto de parâmetros, os quais, quando somados de forma ponderada, permitem obter um índice de vulnerabilidade cujo valor traduz a vulnerabilidade sísmica do edifício – quanto mais alto for o índice de vulnerabilidade maior é a vulnerabilidade sísmica do edifício [24]. Contudo, e com a introdução de reforços sísmicos, é expectável que o índice se vá reduzindo tornando o edifício cada vez menos vulnerável.

6.2. AVALIAÇÃO DO ÍNDICE DE VULNERABILIDADE

6.2.1. ANTES DO REFORÇO (AR)

Para o modelo representado na figura 9, irá ser atribuída, de P1 a P14, uma classe de vulnerabilidade de modo a ser possível determinar o índice de vulnerabilidade deste edifício. De seguida irão ser aplicados reforços sísmicos com o objetivo de verificar que redução introduzem neste mesmo índice.

Parâmetro P1 - Tipo e organização do sistema resistente:

Este parâmetro analisa o tipo de sistema resistente do edifício, a sua qualidade construtiva e ainda a boa ou má ligação entre elementos verticais e horizontais. Avalia também se o edifício foi construído respeitando as regras relativas à resistência sísmica, ao reforço e consolidação. A Tabela 10 identifica e descreve as classes de vulnerabilidade para a classificação do parâmetro P1.

Para o caso de estudo identificado anteriormente, foi considerado que as ligações entre paredes resistentes são deficientes e não existe presença de elementos que melhorem o seu comportamento. Também se considerou que o edifício não está, como a maior parte dos edifícios antigos, de acordo

com as recomendações de construção sísmo-resistente, tendo-lhe sido atribuída, por isso, a classe de vulnerabilidade mais desfavorável, i.e, classe D.

Tabela 10 - Classes de vulnerabilidade do parâmetro P1 [24]

A	Edifício construído de acordo com as recomendações de construção sísmo-resistente. Reforço ou consolidação do edifício em alvenaria de acordo com a normativa de reforço ou recuperação constante em documentos europeus [por exemplo EC6 [CEN, 2005]; EC8 [CEN, 2004], garantindo assim as condições de ligação e conexão eficiente entre elementos verticais e entre os elementos verticais e horizontais
B	O edifício apresenta ligações com bom aparelho e embricamento entre paredes ortogonais, capazes de transmitir cargas verticais e de corte (caso de cunhais em cantaria). Ao nível de todos os pisos, de forma a garantir a solidarização entre paredes, existem cintas em todo o perímetro ou tirantes de amarração em número e secção suficiente, com boa amarração (dependente das espessuras da parede) e tensionadas (no caso das alvenarias, os tirantes são normalmente passivos de forma a promover a mobilização de todo o sistema estrutural se solicitado)
C	O edifício não apresenta as ligações definidas na classe B, em nenhum ou apenas em alguns pisos, porém apresenta boa ligação entre as suas paredes ortogonais resistentes, garantida pelo adequado aparelho e embricamento em todas as paredes
D	O edifício não apresenta paredes resistentes bem unidas. Ausência total de tirantes e cintas

Parâmetro P2 - Qualidade do Sistema Resistente:

Analisa diferentes características dos materiais que compõe o sistema resistente, bem como o tipo de assentamento e as dimensões tal como mostra a Tabela 11.

Tabela 11 - Classes de vulnerabilidade do parâmetro P2 [24]

A	Alvenaria de tijolo de boa qualidade (maciço ou perfurado até 45% de vazios). Alvenaria de pedra bem talhada com unidades homogéneas e de tamanho uniforme em toda a extensão das paredes. Alvenaria de pedra irregular bem argamassada e travada/embricada, existindo ligação transversal entre as duas faces da parede
B	Alvenaria de tijolo (área perfurada <45%). Alvenaria de pedra bem talhada com unidades pouco homogéneas em toda a extensão das paredes. Alvenaria de pedra irregular com ligação transversal entre as duas faces da parede
C	Alvenaria de tijolo de baixa qualidade com irregularidades de assentamento e de ligação. Alvenaria de pedra com unidades não trabalhadas e de dimensões heterogéneas. Alvenaria de pedra irregular sem ligação transversal, no entanto bem argamassada e travada
D	Alvenaria de tijolo de má qualidade com incrustação de fragmentos de pedra. Alvenaria de pedra com unidades muito irregulares e sem travamento cuidado (criando vazios). Alvenaria de pedra irregular sem ligação transversal, mal argamassada e mal travada

Este é um aspeto fundamental uma vez que estas características condicionam o desenvolvimento de potenciais zonas frágeis levando a que a transmissão da carga ao longo da parede não seja uniforme. Desta forma, considerou-se no modelo em estudo que a alvenaria de pedra é irregular e heterogénea, mas com uma boa qualidade de assentamento. Em resultado disso, o Parâmetro P2 foi classificado com classe de vulnerabilidade C.

Parâmetro P3 - Resistência Convencional:

Avalia a resistência ao corte do edifício quando este é sujeito a uma ação sísmica. Para tal, calcula-se uma resistência convencional, C_{conv} , através das seguintes expressões evidenciadas em [24]:

$$C_{conv} = \frac{a_0 \times \tau_k}{q \times N} \sqrt{1 + \frac{q \times N}{1,5 \times a_0 \times \tau_k \times (1 + \gamma)}} \quad (8)$$

em que:

$$q = \frac{(A_x + A_y) \times h \times p_m}{A_t} + p_s \quad (9)$$

e:

$$a_0 = A_{mín}/A_t$$

$$A_{mín} = \text{mín}(A_x, A_y)$$

A_t é a área coberta (m²)

τ_k é a resistência ao corte (kPa)

N é o número de pisos do edifício

$$\gamma = A_{mín}/A_{máx}$$

A_x, A_y é a área parede resistente na direção XX e YY, respetivamente (m²)

h é o pé direito (m)

p_m é o peso específico da alvenaria (kN/m²)

p_s é o peso por unidade de área do pavimento (kN/m²)

Assim, será permitido definir a resistência ao corte na base das paredes do edifício e ao nível do piso mais desfavorável.

Para a realização dos cálculos considerou-se uma resistência ao corte da alvenaria de pedra igual a 90 kPa tal como definido em [26] para alvenaria do tipo B. O peso específico, w , foi obtido da tabela C8A.2.1 [34] e toma o valor de 19 kN/m² (alvenaria de pedra irregular). O peso por unidade de área do pavimento de madeira considerado foi o valor de 2,5 kN/m² proveniente das tabelas técnicas (0,5 kN/m² para um pavimento de soalho com vigas de madeira + 2,0 kN/m² para a sobrecarga num edifício

de habitação). Todos os restantes parâmetros estão relacionados com as dimensões do edifício sendo diretamente aplicáveis ou obtidos através das expressões contidas em [24].

Depois de calculado este valor de resistência convencional é determinado um valor α que irá definir a classe de vulnerabilidade sísmica a atribuir a este parâmetro como se apresenta na tabela 12. Este valor é calculado através do quociente entre o C_{conv} e um valor de referência, C , igual a 0,4. Seguindo este procedimento, obteve-se um valor de 1,05 o qual, de acordo com o estabelecido na tabela 12, nos leva a concluir que a classe correspondente ao edifício em análise é a classe de vulnerabilidade A. Este parâmetro, para este caso específico, não irá variar com a introdução de reforços, dado que se encontra já na classe mais reduzida (classe A).

Tabela 12 - Classes de vulnerabilidade do parâmetro P3 [24]

A	Edifício com $\alpha \geq 1.0$
B	Edifício com $0.6 \leq \alpha < 1.0$
C	Edifício com $0.4 \leq \alpha < 0.6$
D	Edifício com $\alpha \leq 0.4$

Parâmetro P4 - Distância máxima entre paredes:

A distância máxima entre elementos estruturais de contraventamento, tais como paredes transversais ou pavimentos, é um aspeto extremamente importante na medida em que estas distâncias condicionam o desenvolvimento de mecanismos de colapso para fora do plano [35]. Assim, este parâmetro permite avaliar a relação entre espessura e comprimento das paredes tendo em conta a máxima distância vertical não contraventada, h_0 , a espessura da parede, s , e a distância máxima entre paredes, L , tal como mostra a Tabela 13.

É importante referir que quando as ligações entre os pavimentos não são efetivas, como é o caso do modelo em estudo, é considerada para h_0 , a altura total da parede do edifício. Para a distância máxima entre paredes, o cálculo é realizado para as duas direções e escolhido o pior resultado. Tendo em conta as dimensões do edifício, já referidas anteriormente, a classe de vulnerabilidade a atribuir ao Parâmetro P4 é a classe A.

Tabela 13 - Classes de vulnerabilidade do parâmetro P4 [24]

A	$\left(\frac{h_0}{s}\right)_{max} \leq 10$	$\left(\frac{L}{s}\right)_{max} \leq 15$
B	$10 < \left(\frac{h_0}{s}\right)_{max} \leq 15$	$15 < \left(\frac{L}{s}\right)_{max} \leq 18$
C	$15 < \left(\frac{h_0}{s}\right)_{max} \leq 20$	$18 < \left(\frac{L}{s}\right)_{max} \leq 25$
D	$\left(\frac{h_0}{s}\right)_{max} > 20$	$\left(\frac{L}{s}\right)_{max} > 25$

Parâmetro P5 - Altura do edifício:

Este parâmetro está intimamente ligado com o número de pisos que o edifício apresenta. É plausível assumir que edifícios de alvenaria mais altos apresentem maior vulnerabilidade sísmica, em resultado dos efeitos de amplificação dinâmica no topo. A Tabela 14 identifica as classes de vulnerabilidade a atribuir em função da altura do edifício.

Tabela 14 - Classes de vulnerabilidade do parâmetro P5 [24]

A	Edifício com 1 piso
B	Edifício com 2 ou 3 pisos
C	Edifício com 4 ou 5 pisos
D	Edifício com mais de 6 pisos

O edifício considerado na presente dissertação apresenta dois pisos sendo, por isso, classificado com classe de vulnerabilidade B.

Parâmetro P6 - Posição do edifício e fundações:

O local onde se encontra o edifício e o tipo de fundação são, obviamente, fatores importantes e que condicionam a resposta sísmica do edifício. A inclinação, tipo e consistência do solo de fundação, presença de edifícios em zonas com diferença de cotas e outros fatores são muito relevantes e que, por isso, devem ser tidos em conta. As definições das classes de vulnerabilidade para o parâmetro P6 encontram-se apresentadas na Tabela 15. Como o edifício em estudo não é real nem se encontra numa região específica foi assumido que o terreno de fundação é constituído por rocha, e que o edifício apresenta fundações superficiais – continuação da parede de alvenaria, com alargamento da espessura de forma a reduzir tensões na base. Foi assumido também uma inclinação do terreno inferior a 10%. Tendo em conta os fatores descritos anteriormente, o parâmetro P6 foi classificado com classe de vulnerabilidade A.

Tabela 15 - Classes de vulnerabilidade do parâmetro P6 [24]

Terreno e fundação	Inclinação do terreno (%)	Diferença de cota de fundação	Classes
Rocha com ou sem fundação	$p \leq 10$	-	A
	$10 < p \leq 30$	-	B
	$30 < p \leq 50$	-	C
	$p > 50$	-	D
Solto sem impulso, com fundação em rocha	$p \leq 10$	$\Delta h = 0$	A
	$p \leq 10$	$0 < \Delta h \leq 1$	B
	$10 < p \leq 30$	$\Delta h \leq 1$	B
	$30 < p \leq 50$	$\Delta h \leq 1$	C
	$p > 50$	-	D
Solto sem impulso e sem fundação	-	$\Delta h > 1$	D
	$p \leq 10$	$\Delta h = 0$	A
	$p \leq 10$	$0 < \Delta h \leq 1$	B
	$10 < p \leq 20$	$\Delta h \leq 1$	B
	$20 < p \leq 30$	$\Delta h \leq 1$	C
	$p > 50$	-	D
Rocha, com ou sem fundação	-	$\Delta h > 1$	D
	$p \leq 50$	$\Delta h \leq 1$	C
	$p > 50$	-	D
Solto com impulso, sem fundação	-	$\Delta h > 1$	D
	$p \leq 30$	$\Delta h \leq 1$	C
	$p > 30$	-	D
	-	$\Delta h > 1$	D

Parâmetro P7 - Localização e interação com outros edifícios:

A interação com outros edifícios pode alterar a resposta sísmica do edifício sendo, por isso, um aspeto a ter em conta quando se realiza uma análise de vulnerabilidade. Neste caso foi considerado que o edifício se encontra isolado, não sendo desta forma afetado negativamente, pela presença de outros. Assim, tendo em conta o exposto, e como mostra a Tabela 16, foi atribuída a classe de vulnerabilidade B para este parâmetro.

Tabela 16 - Classes de vulnerabilidade do parâmetro P7 [24]

Localização	Classes	Desnível dos pavimentos
Edifício de banda meio	A	B
Edifício isolado	B	-
Edifício de gaveto	C	D
Edifício de banda extremo	D	-

Parâmetro P8 - Irregularidade em planta:

A configuração em planta do edifício tem um impacto significativo no seu comportamento estrutural, podendo contribuir para o acréscimo da sua vulnerabilidade sísmica. Existem dois critérios para avaliar este parâmetro sendo um que se baseia na geometria do edifício e outro que estima a excentricidade entre o centro de massa e o centro de rigidez [24]. Para o presente estudo, seguiu-se o primeiro critério que consiste na determinação de dois indicadores $\beta_1 = \frac{a}{L}$ e $\beta_2 = \frac{b}{L}$ de acordo com o apresentado na Tabela 17 – “a” corresponde à menor dimensão do edifício; “b” à dimensão de corpos salientes e “L” à maior dimensão do edifício. Tendo em conta que o edifício em análise apresenta uma planta retangular, de 10 m de desenvolvimento por 5 m de largura, o valor de β_1 e β_2 obtidos foram 0,5 e 0, respetivamente, correspondendo à classe de vulnerabilidade B. É importante referir que β_2 , que analisa a presença de saliências no edifício [24], é nulo devido à não presença destas (planta retangular).

Tabela 17 - Classes de vulnerabilidade do parâmetro P8 - adaptado de [24]

A	$\beta_1 \geq 0.75$	$\beta_{2(\text{agregado})} \leq 0.1$
B	$0.5 \leq \beta_1 < 0.75$	$0.1 < \beta_{2(\text{agregado})} \leq 0.2$
C	$0.25 \leq \beta_1 < 0.5$	$0.2 < \beta_{2(\text{agregado})} \leq 0.3$
D	$\beta_1 < 0.25$	$\beta_{2(\text{agregado})} > 0.3$

Parâmetro P9 - Irregularidade em altura:

Este parâmetro tem em conta alterações da forma do edifício em altura, nomeadamente a redução ou aumento da área em planta do edifício em pisos superiores, torna-o assim mais vulnerável devido à distribuição não uniforme de massa e rigidez. Para a escolha da classe de vulnerabilidade a atribuir, devem seguir-se os critérios apresentados na Tabela 18.

Tabela 18 - Classes de vulnerabilidade do parâmetro P9 [24]

A	Edifício com distribuição de massa e área de piso constante em toda a sua altura. Edifício que apresenta uma redução de área em planta inferior a 10%
B	Edifício com uma variação de área superior a 10% e inferior a 20% da área em planta. Edifício com uma torre de altura inferior a 10% da altura total do edifício. Edifício com galeria ou arcada de pequena dimensão (correspondente a menos de 10% da área total do piso)
C	Edifício com uma variação de área superior a 20% da área em planta. Edifício com uma torre de altura superior a 10% e inferior a 40% da altura total do edifício. Edifício com galeria ou arcada com área em planta superior a 10% e inferior ou igual a 20% da área total do piso
D	Edifícios com recuos que representem uma variação de área superior a 30% da área em planta. Edifício com uma torre de altura igual ou superior a 40% da altura total do edifício. Edifícios com galeria ou arcada com área superior a 20% da área total do piso

O modelo tridimensional em estudo apresenta-se regular em toda a sua altura sendo, por isso, classificado com classe A.

Parâmetro P10 - Desalinhamento de aberturas:

As aberturas realizadas nas paredes, por si só, diminuem a sua resistência, sendo mais gravosas quando se apresentam desalinhadas, horizontal e/ou verticalmente devido ao efeito de concentração de esforços na secção da paredes e padieiras. As classes de vulnerabilidade para este parâmetro estão definidas na Tabela 19. Como se pode observar no modelo 3D do edifício em análise, representado na Figura 9, as janelas e portas apresentam dimensão regular e alinhadas em altura. Assim, este parâmetro foi avaliado com classe de vulnerabilidade A.

Tabela 19 - Classes de vulnerabilidade do parâmetro P10 [24]

A	Aberturas de dimensão regular e alinhadas em altura
B	Aberturas de dimensão regular ou irregular desalinhadas horizontalmente em mais de $\frac{1}{2}$ da sua altura
C	Aberturas de dimensão regular ou irregular desalinhadas verticalmente em mais de $\frac{1}{2}$ da sua largura
D	Aberturas de dimensão regular ou irregular totalmente desalinhadas verticalmente ou horizontalmente. Casos de abertura de grandes vãos ao nível de qualquer piso

Parâmetro P11 - Diafragmas horizontais:

Este parâmetro tem em conta a influência dos pavimentos no comportamento estrutural dos edifícios. Os pavimentos são um elemento fundamental para transmitir as cargas às paredes e, caso esta ligação seja ineficiente, perde-se a estabilidade da estrutura e a capacidade de travamento das paredes. É

importante referir que quanto mais deformáveis e mal ligados estiverem os pavimentos menor a sua capacidade de redistribuição e transmissão de esforços e, em consequência disso, maior a vulnerabilidade sísmica do edifício, ver Tabela 20. Para além disso, o estado de conservação da estrutura dos pavimentos também é importante para esta classificação, pois, quanto maior for a degradação destes elementos, menor a capacidade resistente dos mesmos e por isso maior vulnerabilidade sísmica devido à não capacidade de travamento das paredes. Na presente análise considerou-se o tipo de pavimento mais comum em edifícios antigos em Portugal: pavimentos deformáveis e mal ligados. Assim, com base no exposto, atribui-se a classe de vulnerabilidade D a este parâmetro.

Tabela 20 - Classes de vulnerabilidade do parâmetro P11 [24]

Pavimentos	Classe	FZA ou DA ou FS
Rígido ou semi-rígido e bem ligado	A	B
Deformável e bem ligado	B	C
Rígido ou semi-rígido e mal ligado	C	D
Deformável e mal ligado	D	-

FZA: Fragilização dos pavimentos na zona de apoio; DA: Sinais de deformação, apodrecimento, retração e distorção grave; FS: Falta de segurança de circulação

Parâmetro P12 - Tipo de coberturas:

O tipo de solução de coberturas é muito importante, não apenas pelo papel que a estrutura da cobertura pode desempenhar enquanto elemento de contraventamento das paredes, mas igualmente pela possibilidade de provocar impulsos horizontais no topo das paredes. As classes de vulnerabilidade associadas ao parâmetro P12 apresentam-se definidas na Tabela 21.

Para o caso de estudo foi considerada uma cobertura com a tipologia estrutural representada na Figura 19. Quanto à natureza impulsiva, esta estrutura pode ser classificada de impulsiva, caso introduzam forças horizontais nas paredes de fachada, podendo levar ao colapso para fora do seu plano, ou não impulsiva quando não à incremento dessas mesmas forças [24]. Para o caso de estudo considera-se uma cobertura não impulsiva. Considerou-se ainda que não existem tirantes, nem cinta perimetral. Finalmente, assumiu-se que o material da estrutura da cobertura (madeira) se encontra degradado. Assim, e tendo por base o exposto, este parâmetro foi classificado com classe de vulnerabilidade C.

Tabela 21 - Classes de vulnerabilidade do parâmetro P12 [24]

Impulso	Cinta perimetral	Tirantes	Classe	Estado de conservação	
				Mau	Péssimo
Não impulsivo	1 (Sim)	1-0	A	B	C
	1-0	1	A	B	C
	0 (Não)	0	B	C	D
Pouco impulsivo	1	1-0	B	C	D
	1-0	1	B	C	D
	0	0	C	D	D
Impulsivo	1	1-0	C	D	D
	1-0	1	C	D	D
	0	0	D	-	-

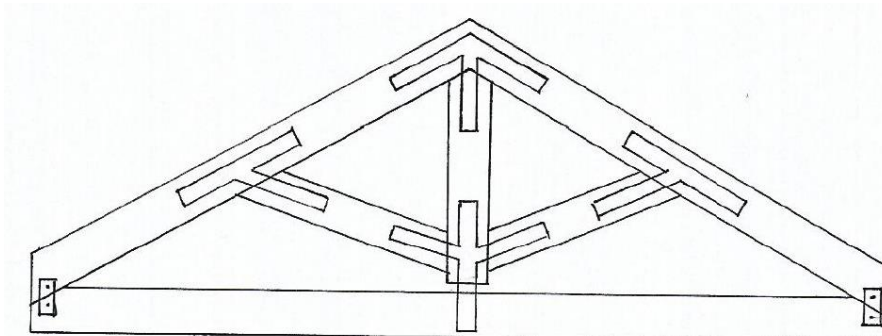


Figura 19 - Soluções de cobertura não impulsiva

Parâmetro P13 - Danos estruturais identificados:

Este parâmetro avalia os problemas exibidos numa determinada estrutura, tal como se verifica na Tabela 22 e que, com a ocorrência do sismo podem ser agravados ou despoletarem fenómenos locais inadequados. Os tipos de edifícios correspondentes aquele que está a ser analisado neste trabalho apresentam-se, vulgarmente, em baixo estado de conservação, manifestando frequentemente fenómenos de fissuração nas paredes, deformação dos pavimentos e problemas de humidade (como consequência no estado de conservação dos elementos estruturais). Assim, considerou-se que a classe de vulnerabilidade que melhor se adequa a este tipo de edifícios é a classe C.

Tabela 22 - Classes de vulnerabilidade do parâmetro P13 [24]

A	Paredes de alvenaria em boas condições, sem danos visíveis
B	Paredes com pequenas fissuras (amplitude inferior a 0.5mm) não generalizadas. Presença de sinais de humidade que deterioram as características das alvenarias e levam à degradação do revestimento das madeiras e desagregação das alvenarias. Fissuras no revestimento que não se propagam ao suporte
C	Paredes com fissuras de abertura de cerca de 2 a 3mm ou que apresentem fissuração de forma generalizada (quer poderá ser decorrente de uma anterior ação sísmica). Estruturas com um estado medíocre de conservação das paredes de alvenaria, comprometendo a sua resistência global. Problemas de deformabilidade grave da estrutura da caixa de escadas, deformações de pavimentos, fissuração inclinada em paredes interiores de tabique, fissuração a meio vão das aberturas
D	Paredes com deterioração e fissuração grave, mesmo que não generalizada. Paredes com características físicas e materiais muito degradadas que evidenciam uma diminuição grave da resistência. Fissuração em locais sensíveis, como junto aos cunhais (sinais de desligamento entre paredes ortogonais). Danos introduzidos pelos impulsos transmitidos pelas coberturas, abaulamento de paredes resistentes, fissuração decorrente de assentamento de fundações. Escorregamento do vigamento de madeira em relação às paredes, apodrecimento e degradação do vigamento de madeira junto às paredes. Sinais de rotação das paredes e paredes fora de prumo

P14 - Elementos não estruturais: A presença de elementos ligados à estrutura, que não são considerados elementos resistentes, fragilizam e agravam os elementos estruturais tornando o edifício mais vulnerável no caso de um evento sísmico. As classes de vulnerabilidade sísmica para este parâmetro são as exibidas na Tabela 23. Tendo em conta as características do edifício do caso de estudo desta dissertação, considerou-se que a classe A é aquela que melhor representa a situação do edifício em análise (ausência de elementos não estruturais).

Tabela 23 - Classes de vulnerabilidade do parâmetro P14 [24]

A	Edifício sem cornijas, parapeitos ou revestimentos suspensos (forros de teto interiores)
B	Edifício com cornijas bem ligadas às paredes, com chaminés de reduzida dimensão e peso. Edifício com varandas integradas na estrutura dos pavimentos ou paredes
C	Edifício com elementos externos à estrutura de pequena dimensão e mal ligados à estrutura principal. Edifício com revestimentos/forros de reduzida extensão mal ligados à estrutura, ou revestimentos de grande extensão bem ligados à estrutura
D	Edifício com chaminés e elementos externos à estrutura, de peso considerável (depósitos de água ao nível da cobertura, equipamento mecânico fixo às paredes), mal conectados à estrutura. Edifício com varandas com fraca ligação aos elementos horizontais, construídos posteriormente à construção das paredes com deficiente ligação às paredes de alvenaria. Edifício com revestimento/forro de teto de grande extensão e mal ligado

A figura 20 apresenta, de forma mais clara, as classes de vulnerabilidade sísmica consideradas para cada parâmetro neste estudo, os pesos associados e o valor do índice de vulnerabilidade normalizado, I_v , obtido da equação contida na tabela 8.

Importa referir que os parâmetros avaliados com classe D foram os parâmetros P1 e P11 e com classe C foram os parâmetros P2, P12 e P13, sendo por isso, considerados os elementos de maior fragilidade no edifício e com a necessidade de serem reforçados. O principal objetivo deste reforço é atuar nestes parâmetros mais frágeis e, desta forma, reduzir a vulnerabilidade do edifício relativamente aos sismos.

O valor obtido para o índice de vulnerabilidade do edifício em estudo foi de 38,00

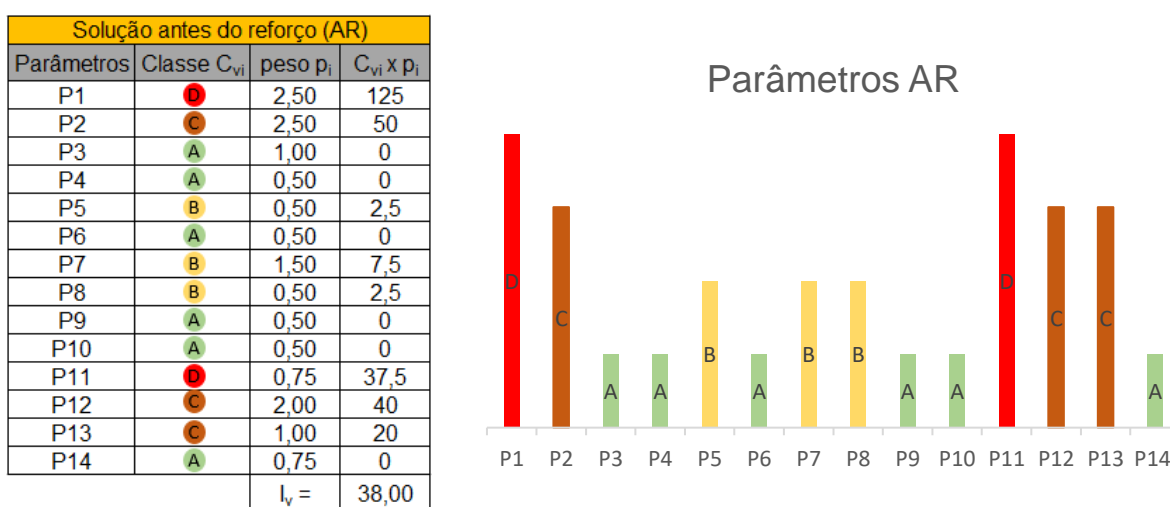


Figura 20 - Parâmetros e índice de vulnerabilidade sísmica para a situação antes do reforço (AR)

6.2.2. ANÁLISE DO IMPACTO DO REFORÇO SÍSMICOS NO EDIFÍCIO EM ESTUDO

6.2.2.1. Reforço S1/S1_1

A solução S1/S1_1 que consiste na aplicação de chapas metálicas nas vigas do pavimento tem o objetivo de melhorar as ligações entre elementos verticais e horizontais. Este tipo de reforço irá atuar sobre os parâmetros P1, P11 e P13 do índice de vulnerabilidade. Ao parâmetro P1 será atribuída, depois do reforço, a classe B, uma vez que, apesar de passar a existir uma boa ligação entre paredes e pavimentos, este parâmetro tem em conta um conjunto de requisitos de resistências aos sismos que o edifício pode não cumprir, razão pela qual não foi atribuída a classe A. Também para o parâmetro P11, que está relacionado com as ligações entre elementos verticais e horizontais, será atribuída a classe B. É importante referir que, o reforço irá melhorar essas ligações, permitindo a transmissão das cargas às paredes bem como um maior travamento das mesmas. Na maioria dos casos, e como considerado neste caso de estudo, os pavimentos são deformáveis, e por isso é plausível assumir que o nível de melhora é compatível apenas, com a classe B. Para se tornar este elemento horizontal rígido, e, portanto, poder ser atribuída a classe A, seria necessário aplicar-se um contra soalho ou outro elemento rigidificador (tarugamento ou lâmina de betão, por exemplo), situação que não foi aqui considerada.

O parâmetro P13 está relacionado com a presença de danos estruturais no edifício. Acredita-se que sempre que é realizada uma reabilitação/reforço estrutural é feito um refechamento de juntas e tratamento de outros danos para devolver a imagem inicial do edifício. Assim, não só neste reforço, mas como em todos os que serão considerados daqui em diante, este parâmetro passará a ser considerado com classe A.

A figura 21 ilustra as alterações em relação à situação AR e o novo índice de vulnerabilidade obtido com a aplicação do reforço considerado. O I_v passou de 38,00 para 15,83 sendo uma redução de aproximadamente 58%. Este fenómeno acontece devido, principalmente, à passagem do parâmetro P1 de classe D para B, uma vez que é o parâmetro que apresenta maior peso, entre os considerados.

Solução reforçada S1 e S1_1			
Parâmetros	Classe C_{vi}	peso p_i	$C_{vi} \times p_i$
P1	B	2,50	12,5
P2	C	2,50	50
P3	A	1,00	0
P4	A	0,50	0
P5	B	0,50	2,5
P6	A	0,50	0
P7	B	1,50	7,5
P8	B	0,50	2,5
P9	A	0,50	0
P10	A	0,50	0
P11	B	0,75	3,75
P12	C	2,00	40
P13	A	1,00	0
P14	A	0,75	0
		$I_v =$	15,83

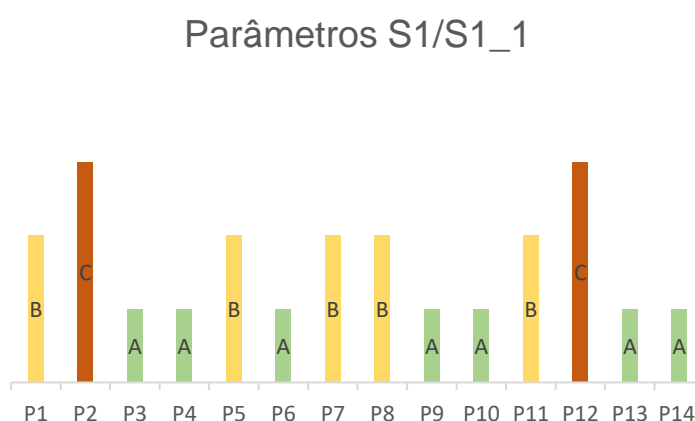


Figura 21 - Parâmetros e índice de vulnerabilidade sísmica do reforço S1/S1_1

6.2.2.2. Reforço S2 ou LCP+S2

Este reforço consiste na aplicação de tirantes sob os pavimentos (S2) ou coberturas (LCP+S2) e permite melhorar o funcionamento do edifício como um todo, diminuindo a probabilidade de colapso das paredes para fora do plano. Neste caso, o S2, irá atuar, para além do parâmetro P13, no parâmetro P1 reduzindo-se apenas uma classe: D para C. Este fenómeno acontece porque se melhora a ligação entre paredes ortogonais resistentes, mas não existe, em simultâneo, o reforço das ligações do pavimento com as paredes. Já para o caso LCP+S2, para além da redução de uma classe no parâmetro P1, existe também a redução do parâmetro P12 de C para A, dado que este reforço sob a cobertura permitirá controlar os impulsos horizontais da mesma sobre as paredes.

Para o reforço S2 o índice de vulnerabilidade só reduz cerca de 33% passando de 38 para 25,33 como se verifica na Figura 22 enquanto o reforço LCP+S2 conduz a um I_v de 20 (ver Figura 23), o que representa uma diminuição de aproximadamente 47% em relação ao AR.

Solução reforçada S2			
Parâmetros	Classe C_{vi}	peso p_i	$C_{vi} \times p_i$
P1	C	2,50	50
P2	C	2,50	50
P3	A	1,00	0
P4	A	0,50	0
P5	B	0,50	2,5
P6	A	0,50	0
P7	B	1,50	7,5
P8	B	0,50	2,5
P9	A	0,50	0
P10	A	0,50	0
P11	D	0,75	37,5
P12	C	2,00	40
P13	A	1,00	0
P14	A	0,75	0
$I_v =$			25,33

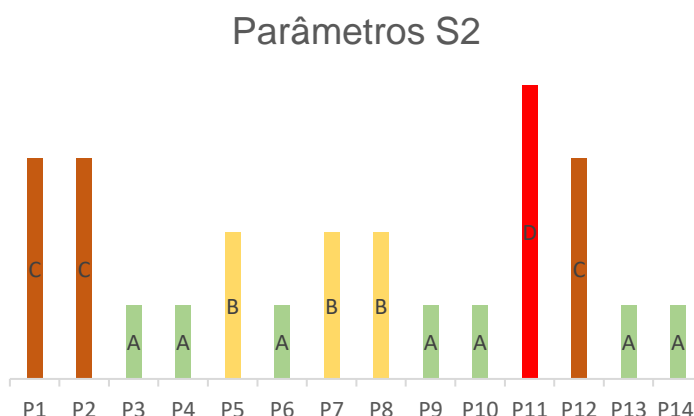


Figura 22 - Parâmetros e índice de vulnerabilidade sísmica do reforço S2

Solução LCP+S2			
Parâmetros	Classe C_{vi}	peso p_i	$C_{vi} \times p_i$
P1	C	2,50	50
P2	C	2,50	50
P3	A	1,00	0
P4	A	0,50	0
P5	B	0,50	2,5
P6	A	0,50	0
P7	B	1,50	7,5
P8	B	0,50	2,5
P9	A	0,50	0
P10	A	0,50	0
P11	D	0,75	37,5
P12	A	2,00	0
P13	A	1,00	0
P14	A	0,75	0
$I_v =$			20,00

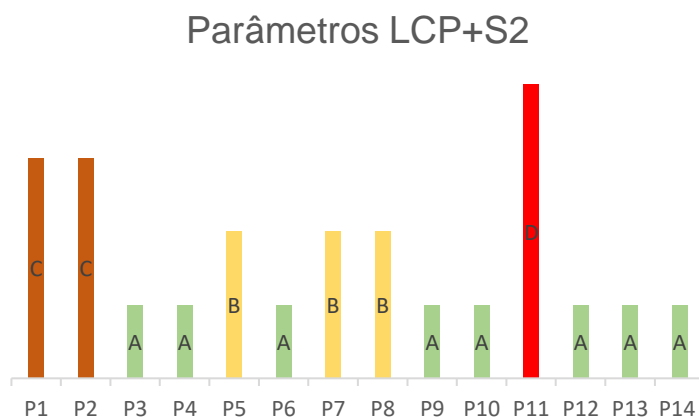


Figura 23 - Parâmetros e índice de vulnerabilidade sísmica do reforço LCP+S2

6.2.2.3. Reforço S3/S3_1

A introdução de uma viga cinta no topo das paredes, reforço S3/S3_1, é utilizado para melhorar a ligação entre a cobertura e as paredes de alvenaria. Desta forma os parâmetros onde esta solução reduz as classes de vulnerabilidade são os parâmetros P1 e P12. Para o parâmetro P1, a classe de vulnerabilidade é reduzida de D para C, uma vez que se assume a instalação de uma viga cinta perimetral contínua no último piso permitindo com que as paredes resistentes fiquem bem ligadas. Ainda assim, a instalação da viga cinta, por si só, não é suficiente para ir além da classe C.

O parâmetro P12 terá uma redução para a classe A, uma vez que se melhora a ligação das paredes com a cobertura, através da introdução de elementos metálicos ligados tanto à viga cinta perimetral como às vigas da cobertura. Normalmente, neste tipo de edifícios, as vigas de madeira e outros constituintes, também em madeira, apresentam-se em mau estado, sendo necessário proceder à sua substituição

durante a reabilitação. Desta forma passou-se de uma situação de um mau estado de conservação, para um ótimo estado de conservação e, por isso, atribuiu-se a classe A.

Em relação ao I_v , com a introdução deste reforço (ver figura 24), obteve-se uma redução de cerca de 47% em relação à situação AR. É importante referir que esta solução e a solução LCP+S2 apresentam o mesmo I_v , pois são soluções que atuam nas mesmas classes e com, aproximadamente, os mesmos efeitos no edifício. A redução destas duas soluções de 38,00 para 20,00, ocorre também porque têm influência nos parâmetros com maior peso para o cálculo do I_v .

Solução S3 e S3_1			
Parâmetros	Classe C_{vi}	peso p_i	$C_{vi} \times p_i$
P1	C	2,50	50
P2	C	2,50	50
P3	A	1,00	0
P4	A	0,50	0
P5	B	0,50	2,5
P6	A	0,50	0
P7	B	1,50	7,5
P8	B	0,50	2,5
P9	A	0,50	0
P10	A	0,50	0
P11	D	0,75	37,5
P12	A	2,00	0
P13	A	1,00	0
P14	A	0,75	0
$I_v =$			20,00

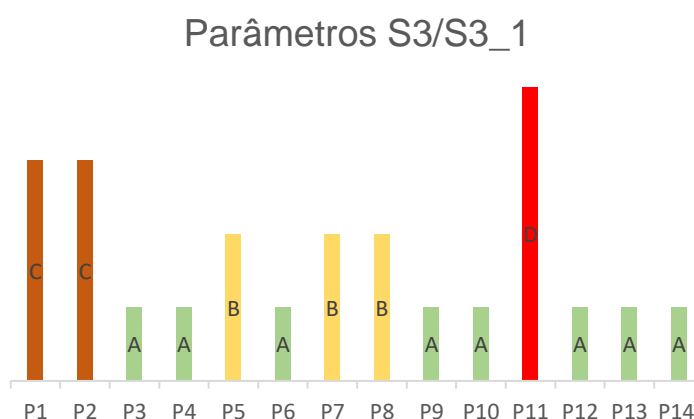


Figura 24 - Parâmetros e índice de vulnerabilidade sísmica do reforço S3/S3_1

6.2.2.4. Reforço S4 ou S4_1

A aplicação da solução S4, reboco armado, permite consolidar as paredes de alvenaria e aumentar a sua resistência ao corte. Assim o parâmetro P2 será alterado para a classe A, uma vez que a alvenaria passa a estar confinada, existindo ligação transversal entre as duas faces da parede. Já para a solução S4_1, em que o reboco armado é aplicado somente na face exterior da parede, reduz-se o parâmetro P2 apenas para a classe B, uma vez que a parede não estará tão bem travada devido à falta da ligação transversal entre as duas faces da parede. É importante referir que a aplicação deste reforço aumenta a capacidade de corte da parede. No entanto, como a parede apresentava já uma resistência ao corte significativa na versão original (não reforçada), em resultado das características materiais e geométricas do edifício, a classe de vulnerabilidade original já era classe A (ver figura 20), razão pela qual este aumento de resistência não provocará qualquer tipo de melhoria no parâmetro P3.

O valor do I_v da solução S4 é de 28,67 (figura 25) e de S4_1 é de 30,33 (figura 26), o que representa uma redução de cerca de 25% e 20%, respetivamente.

Solução S4			
Parâmetros	Classe C_{vi}	peso p_i	$C_{vi} \times p_i$
P1	D	2,50	125
P2	A	2,50	0
P3	A	1,00	0
P4	A	0,50	0
P5	B	0,50	2,5
P6	A	0,50	0
P7	B	1,50	7,5
P8	B	0,50	2,5
P9	A	0,50	0
P10	A	0,50	0
P11	D	0,75	37,5
P12	C	2,00	40
P13	A	1,00	0
P14	A	0,75	0
		$I_v =$	28,67

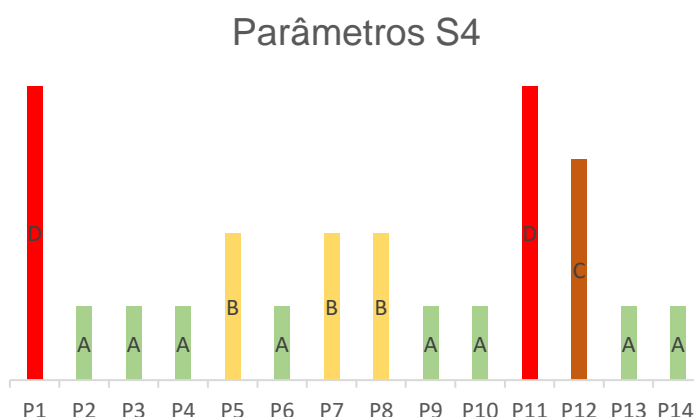


Figura 25 - Parâmetros e índice de vulnerabilidade sísmica do reforço S4

Solução S4_1			
Parâmetros	Classe C_{vi}	peso p_i	$C_{vi} \times p_i$
P1	D	2,50	125
P2	B	2,50	12,5
P3	A	1,00	0
P4	A	0,50	0
P5	B	0,50	2,5
P6	A	0,50	0
P7	B	1,50	7,5
P8	B	0,50	2,5
P9	A	0,50	0
P10	A	0,50	0
P11	D	0,75	37,5
P12	C	2,00	40
P13	A	1,00	0
P14	A	0,75	0
		$I_v =$	30,33

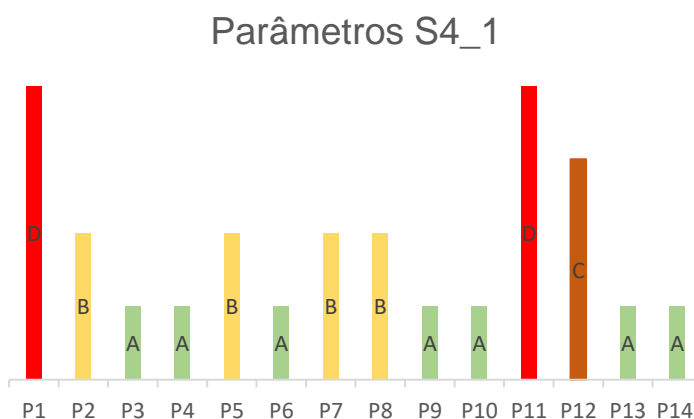


Figura 26 - Parâmetros e índice de vulnerabilidade sísmica do reforço S4_1

6.2.2.5. Reforço S1+S2

A partir deste ponto, será analisado o impacto de mais do que uma solução de reforço combinadas. É importante referir que as mudanças nos parâmetros são aquelas já descritas para as soluções “isoladas”, incluindo agora o efeito da simultaneidade. Sem surpresa, nos casos em que as soluções atuam sobre o mesmo parâmetro, considerou-se, para o cálculo do I_v , a classe de vulnerabilidade mais favorável.

Esta primeira solução impacta nos parâmetros P1, P11 e P13, tal como descrito anteriormente para a solução S1. Tendo em conta as alterações realizadas para as soluções individualmente, reduziu-se o parâmetro P1 para classe B. Apesar de ser realizada em simultâneo a melhoria da ligação entre pavimentos e paredes (S1) e entre paredes ortogonais (S2) esta alteração não se afigura suficiente para reduzir a classe de vulnerabilidade para A, uma vez que, como foi já referido, para ser classificado com classe A este parâmetro necessita de cumprir um conjunto de requisitos presentes nas normas de construção sísmo-resistente, o que não acontece.

A classe de vulnerabilidade do parâmetro P11 é reduzida para classe B, sendo a solução S1 a que promove esta alteração. Recorde-se que a solução S2 apenas atua no parâmetro P1. Desta forma, e como se pode ver na Figura 27, o I_v resultante desta solução apresenta o mesmo valor que o da solução S1.

Solução reforçada S1+S2			
Parâmetros	Classe C_{vi}	peso p_i	$C_{vi} \times p_i$
P1	B	2,50	12,5
P2	C	2,50	50
P3	A	1,00	0
P4	A	0,50	0
P5	B	0,50	2,5
P6	A	0,50	0
P7	B	1,50	7,5
P8	B	0,50	2,5
P9	A	0,50	0
P10	A	0,50	0
P11	B	0,75	3,75
P12	C	2,00	40
P13	A	1,00	0
P14	A	0,75	0
$I_v =$			15,83

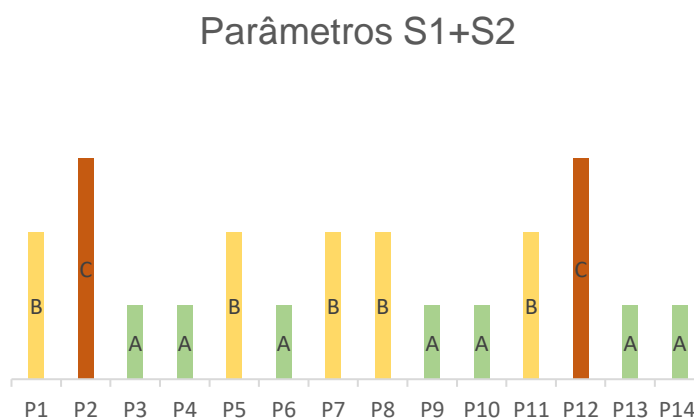


Figura 27 - Parâmetros e índice de vulnerabilidade sísmica do reforço S1+S2

6.2.2.6. Reforço S1+S4/S1_1+S4 e S1+S2+S4

As soluções S1+S4/S1_1+S4 e S1+S2+S4 atuam nos parâmetros P1, P2, P11 e P13. Ao parâmetro P1 e P11 é atribuída a classe B, em resultado da introdução do reforço S1, enquanto ao parâmetro P2 é atribuída a classe de vulnerabilidade A, por força da introdução da solução de reforço S4.

A introdução destes reforços é das que mais faz reduzir o índice de vulnerabilidade, pois influencia os parâmetros com maior peso (P1 e P2). Desta forma, e como ilustrado na Figura 28, a redução no índice de vulnerabilidade é de, aproximadamente, 76%, passando de 38,00 (AR) para 9,17. Como se pode verificar, deixamos de ter parâmetros classificados de classe D e apenas o parâmetro P12 se mantém com classe C. Todos os outros parâmetros ficam com classe A ou B.

Importa salientar que, em termos de atribuição de classes e cálculo de I_v , a solução S1+S2+S4, que apenas acrescenta a solução S2 à solução S1+S4 não introduz qualquer modificação no índice de vulnerabilidade. Este fenómeno acontece porque a solução S2 apresenta uma classe para o parâmetro P1 superior à classe de vulnerabilidade considerada em S1. Assume-se, então, para esta solução, a melhor classe de vulnerabilidade entre as duas, isso é, classe B.

Solução S1+S4/S1_1+S4 e S1+S2+S4			
Parâmetros	Classe C_{vi}	peso p_i	$C_{vi} \times p_i$
P1	B	2,50	12,5
P2	A	2,50	0
P3	A	1,00	0
P4	A	0,50	0
P5	B	0,50	2,5
P6	A	0,50	0
P7	B	1,50	7,5
P8	B	0,50	2,5
P9	A	0,50	0
P10	A	0,50	0
P11	B	0,75	3,75
P12	C	2,00	40
P13	A	1,00	0
P14	A	0,75	0
		$I_v =$	9,17

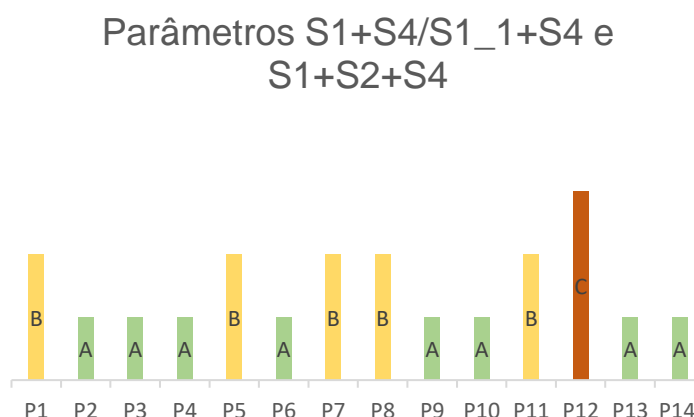


Figura 28 - Parâmetros e índice de vulnerabilidade sísmica do reforço S1+S4/S1_1+S4 e S1+S2+S4

6.2.2.7. Reforço S2+S4 ou LCP+S2+S4

A aplicação do reforço S2+S4 ou LCP+S2+S4 permite melhorar a ligação entre as paredes ortogonais e, em simultâneo, consolidar as paredes de alvenaria, tornando-as mais resistentes ao aparecimento de fissuras e outros danos.

A Figura 29 apresenta as classes de vulnerabilidade do reforço S2+S4, ou seja, quando os tirantes são aplicados sob as vigas do pavimento. Em relação à AR, repare-se que existe alteração do parâmetro P1 e P2 passando de D para C e de C para A, respetivamente. Com estas mudanças o I_v passou para 18,67, o que corresponde a uma redução de cerca de 51%. Verifica-se também que esta solução, apesar de envolver dois tipos de reforço sísmico não é tão eficaz como, por exemplo, a solução individual S1.

Solução S2+S4			
Parâmetros	Classe C_{vi}	peso p_i	$C_{vi} \times p_i$
P1	C	2,50	50
P2	A	2,50	0
P3	A	1,00	0
P4	A	0,50	0
P5	B	0,50	2,5
P6	A	0,50	0
P7	B	1,50	7,5
P8	B	0,50	2,5
P9	A	0,50	0
P10	A	0,50	0
P11	D	0,75	37,5
P12	C	2,00	40
P13	A	1,00	0
P14	A	0,75	0
		$I_v =$	18,67

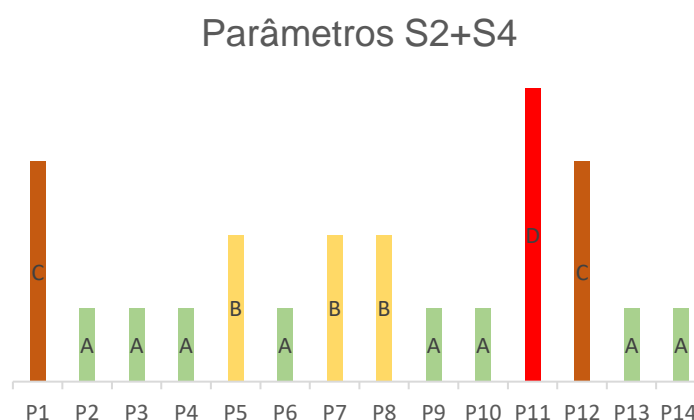


Figura 29 - Parâmetros e índice de vulnerabilidade sísmica do reforço S2+S4

Já a solução LCP+S2+S4 permite chegar ao valor de 13,33 para o I_v , como se verifica na Figura 30. Este fenómeno acontece porque desta feita os tirantes são aplicados sob a cobertura e, por isso, a classe de vulnerabilidade associada ao parâmetro P12 sofre redução de C para A.

Solução LCP+S2+S4			
Parâmetros	Classe C_{vi}	peso p_i	$C_{vi} \times p_i$
P1	C	2,50	50
P2	A	2,50	0
P3	A	1,00	0
P4	A	0,50	0
P5	B	0,50	2,5
P6	A	0,50	0
P7	B	1,50	7,5
P8	B	0,50	2,5
P9	A	0,50	0
P10	A	0,50	0
P11	D	0,75	37,5
P12	A	2,00	0
P13	A	1,00	0
P14	A	0,75	0
$I_v =$			13,33

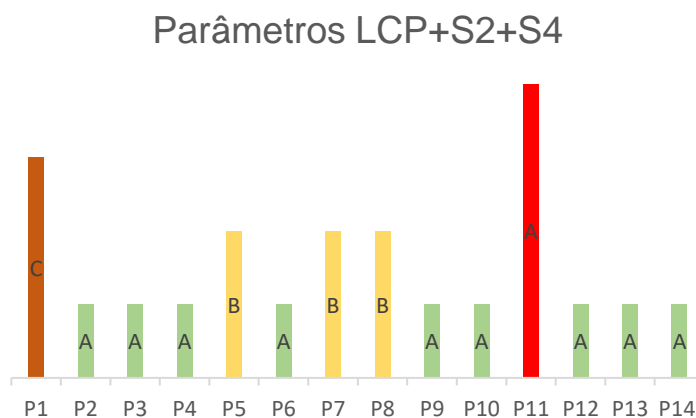


Figura 30 - Parâmetros e índice de vulnerabilidade sísmica do reforço LCP+S2+S4

6.2.2.8. Reforço S3+S4/S3_1+S4

A introdução desta solução de reforço permitirá reduzir as classes P1, P2 e P12. A viga cinta perimetral (S3) permite melhorar a ligação entre as paredes resistentes, possibilitando reduzir a classe de vulnerabilidade do parâmetro P1 de D para C. Este reforço melhora igualmente o parâmetro P12, reduzindo a sua classe para A, visto que passa a existir uma boa ligação entre as paredes e a cobertura, permitindo, de certa forma, equilibrar alguns impulsos horizontais que possam surgir. A solução S4 consolida as paredes de alvenaria e liga as duas faces transversalmente reduzindo a classe de vulnerabilidade do parâmetro P2 para classe A. A Figura 31 apresenta as classes de vulnerabilidade associadas a esta solução, assim como o índice de vulnerabilidade que, neste caso, sofreu uma redução em relação à AR de 38,00 para 13,33 (cerca de 65%).

Solução S3+S4 e S3_1+S4			
Parâmetros	Classe C_{vi}	peso p_i	$C_{vi} \times p_i$
P1	C	2,50	50
P2	A	2,50	0
P3	A	1,00	0
P4	A	0,50	0
P5	B	0,50	2,5
P6	A	0,50	0
P7	B	1,50	7,5
P8	B	0,50	2,5
P9	A	0,50	0
P10	A	0,50	0
P11	D	0,75	37,5
P12	A	2,00	0
P13	A	1,00	0
P14	A	0,75	0
		$I_v =$	13,33

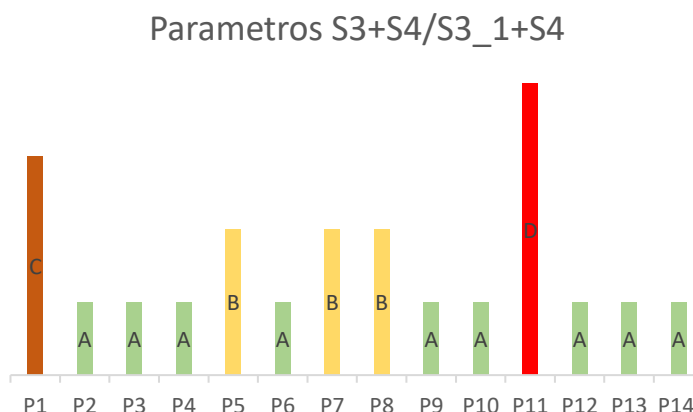


Figura 31 - Parâmetros e índice de vulnerabilidade sísmica do reforço S3+S4/S3_1+S4

6.3. SÍNTESE CRÍTICA

A tabela 24 sistematiza os resultados da avaliação do índice de vulnerabilidade do edifício em estudo, com a apresentação, para as diferentes soluções, das classes atribuídas a cada parâmetro, bem como os respetivos valores obtidos para o índice de vulnerabilidade do I_v .

Tabela 24 - Síntese dos resultados da avaliação do índice de vulnerabilidade

Parâmetros	peso p_i	Classes C_{vi}												
		AR	S1/S1_1	S2	S3/S3_1	S4	S4_1	LCP+S2	S1+S2	S1+S4/S1_1+S4	S2+S4	LCP+S2+S4	S1+S2+S4	S3+S4/S3_1+S4
P1	2,50	D	B	C	C	D	D	C	B	B	C	C	B	C
P2	2,50	C	C	C	C	A	B	C	C	A	A	A	A	A
P3	1,00								A					
P4	0,50								A					
P5	0,50								B					
P6	0,50								A					
P7	1,50								B					
P8	0,50								B					
P9	0,50								A					
P10	0,50								A					
P11	0,75	D	B	D	D	D	D	D	B	B	D	D	B	D
P12	2,00	C	C	C	A	C	C	A	C	C	C	A	C	A
P13	1,00	C	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
P14	0,75								A					
I_v		38,00	15,83	25,33	20,00	28,67	30,33	20,00	15,83	9,17	18,67	13,33	9,17	13,33

Os reforços que conduzem a soluções de menor vulnerabilidade sísmica são os que contêm S1 e S4, com o valor de 9,17, pois são as que melhoram os parâmetros que apresentam maior peso (tipo e organização do sistema resistente e qualidade do sistema resistente) para o cálculo vulnerabilidade sísmica.

A solução S1/S1_1 é a solução que, aplicada isoladamente, apresenta a maior redução do índice de vulnerabilidade com o valor de 15,83, uma vez que é a única que reduz dois parâmetros, P1 e P11, em duas classes (D para B). Todas as outras soluções, ou reduzem uma classe ou, simplesmente não resultam em qualquer redução.

Repare-se que, quando aplicadas isoladamente, as soluções S4 e S4_1 reduzem no máximo 25% do valor do índice de vulnerabilidade, enquanto as outras soluções conduzem sempre a uma redução superior a 30 % em relação ao valor inicial. Pode-se assim dizer que estas soluções são eficazes na resolução de problemas não estruturais (fenómenos de fissuração, por exemplo) mas apresentam um impacto menos relevante em termos redução do índice de vulnerabilidade do edifício.

Tal como foi já mencionado, e como evidencia a tabela 24, existem parâmetros que não sofrem qualquer alteração com a introdução das técnicas de reforço consideradas neste trabalho: parâmetros P3, P4, P5, P6, P7, P8, P9, P10 e P14. Outro pormenor que chama à atenção na tabela é o facto de, para qualquer solução de reforço, o parâmetro P13 ver a sua classe de vulnerabilidade reduzida de C para A. Isto acontece porque, tal como referido anteriormente, acredita-se que a execução de qualquer tipo de reforço envolve sempre, e invariavelmente, o tratamento dos danos superficiais nas paredes do edifício, resolvendo por isso situações de danos observados.

7

DESEMPENHO TÉRMICO E VULNERABILIDADE SÍSMICA: ANÁLISE CONJUNTA DE RESULTADOS

7.1. ENQUADRAMENTO

Neste capítulo, tendo em conta os resultados anteriores, é apresentado e discutido um conjunto de gráficos que evidenciam com os impactos provocados por cada solução de reforço, tanto no comportamento térmico, U , quantificado nas diferentes zonas da parede, como no desempenho sísmico do edifício, I_v . Estes gráficos apresentam no eixo horizontal a variação em percentagem dos valores de U em relação à situação padrão e no eixo vertical as variações em percentagem do I_v em relação ao edifício base (AR) considerado para caso de estudo. Com base nesta relação é possível ter uma melhor perceção das soluções que são mais ou menos eficazes para o comportamento do edifício, tanto em termos térmicos como em termos sísmicos.

7.2. ZONA CORRENTE DA PAREDE DE ALVENARIA DE PEDRA

Na figura 32, o gráfico evidencia as variações do valor ponderado do coeficiente de transmissão térmica e do índice de vulnerabilidade sísmica com a aplicação de reforços na zona corrente de uma parede tradicional de alvenaria de pedra.

Verifica-se que, em termos de I_v , as reduções oscilam entre os 20 e os 25% sendo a solução S4 a que apresenta maior redução na vulnerabilidade sísmica do edifício. Em termos térmicos, o cenário altera-se e resultam reduções entre 55 e 60% quando é aplicado o RT. Também neste caso a solução S4 é a que apresenta melhor comportamento (maior redução no valor de U). Já as soluções sem qualquer melhoria térmica apresentam variações mínimas no valor de U com valores a agravar o comportamento térmico entre 0 e 3%.

Desta forma, conclui-se que a solução que mais contribui para um melhor comportamento térmico e sísmico do edifício na zona corrente é a solução S4-RT, ou seja, aplicação de reboco armado em conjunto com a aplicação de reboco térmico. É importante referir que a melhoria do comportamento sísmico do edifício com esta solução é muito reduzida tendo em conta outras soluções consideradas, sendo mesmo a solução que menos contribui para a melhora do comportamento sísmico do edifício (i.e., para a redução do I_v), ver Tabela 24.

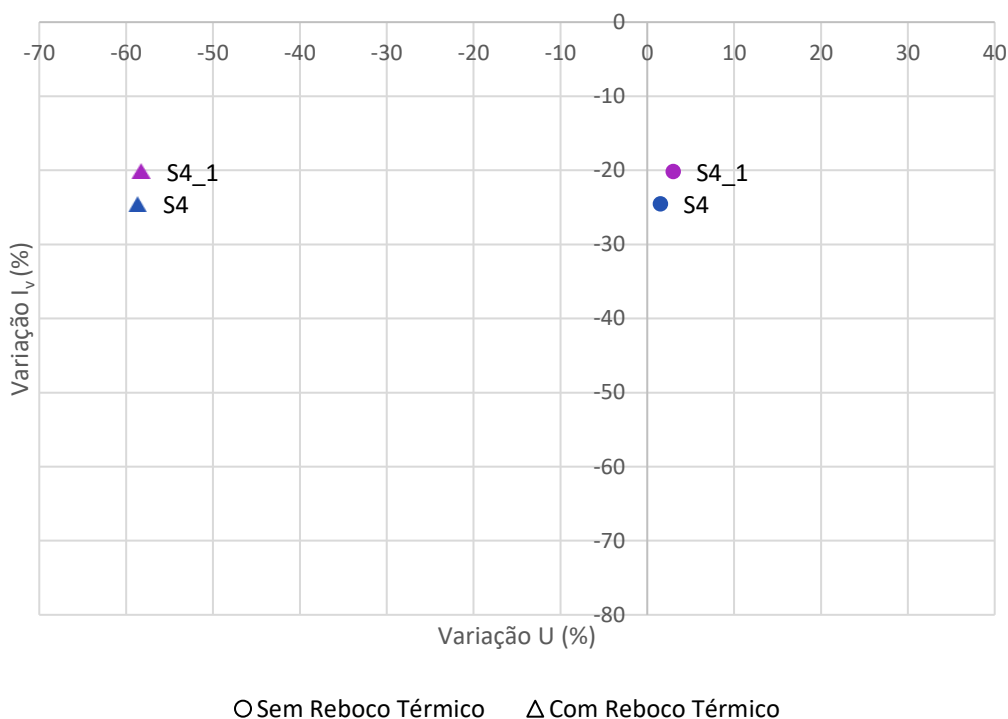


Figura 32 - Variação dos valores de U e I_v na zona corrente

7.3. ZONA DA LIGAÇÃO PAVIMENTOS-PAREDES PRINCIPAIS

Os impactos provocados no valor de U e I_v na zona da ligação pavimentos-paredes principais encontram-se evidenciados na figura 33. Em relação à redução do I_v, as soluções que apresentam melhores resultados são as que incluem, de forma conjunta as soluções S1/S1_1 + S4 com reduções acima dos 70%. Em termos térmicos as melhores soluções são a solução S4 e S1_1+S4, com reduções de 56% e 55% respetivamente.

As soluções que mais prejudicam em termos térmicos esta zona da parede são as soluções S1+S2+S4 e S1+S2, com aumentos no valor de U de 30% e 27%, respetivamente. No entanto, em termos de índice de vulnerabilidade, as reduções são consideráveis e tomam valores de 76% (S1+S2+S4) e 58% (S1+S2)

Através da análise do gráfico é possível identificar o impacto de se acrescentar uma solução a soluções já existentes. Por exemplo, repare-se na solução S1+S2 que apresenta no valor de U e I_v, reduções de 16% e 58%, respetivamente. Já a solução composta apenas por S1+S2+S4 apresenta reduções de 24% e 75%. Esta diferença deve-se à introdução da solução S4, que, por si só, provoca um impacto bastante significativo.

Por fim, conclui-se que nesta situação a melhor solução é a S1_1+S4, pois é a que em simultâneo permite uma grande redução em termos térmicos como uma grande redução do índice de vulnerabilidade.

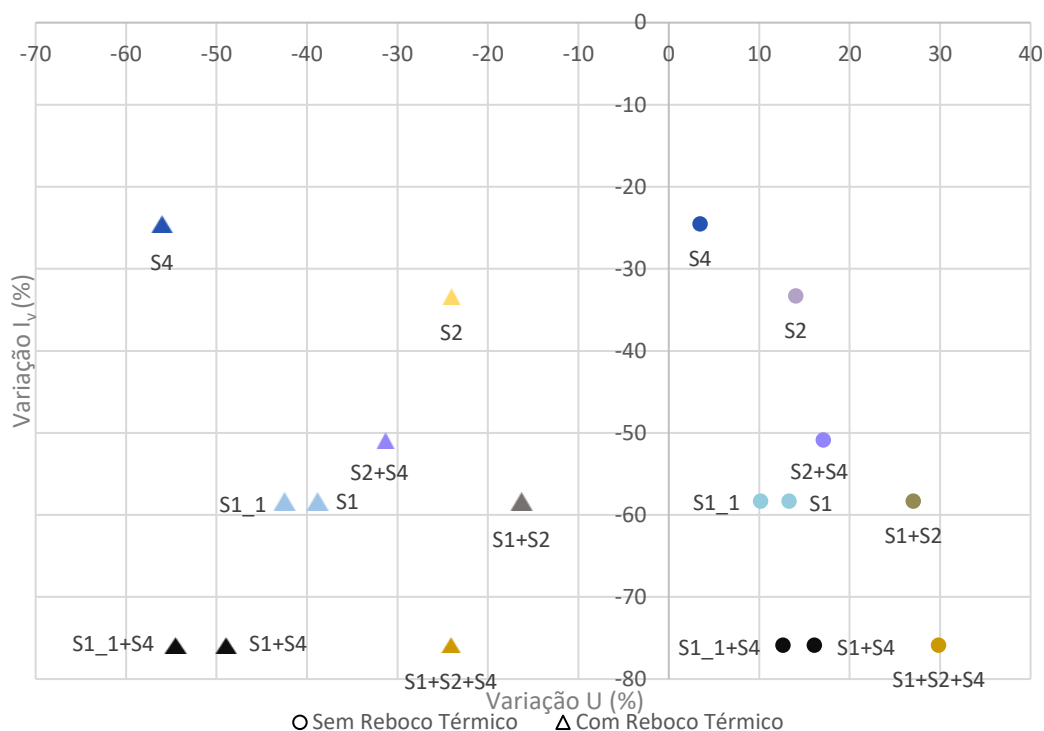


Figura 33 - Variação dos valores de U e I_v na zona da ligação pavimentos- paredes principais

7.4. ZONA DA LIGAÇÃO PAVIMENTOS-PAREDES SECUNDÁRIAS

O gráfico representado na figura 34 apresenta, consoante a aplicação de determinado reforço, as variações tanto no valor de U como no I_v na ligação dos pavimentos com as paredes secundárias.

A solução que apresenta uma melhor relação na variação U-I_v é a solução S1+S4-RT, pois é a que apresenta ao mesmo tempo uma maior redução no valor de U e de I_v com valores de 48% e 76%, respetivamente. Já a solução S1+S4 agrava o valor de U em 15%, mantendo-se a redução no valor de I_v, uma vez que se trata do mesmo reforço.

A solução para esta zona que apresenta o resultado globalmente mais desfavorável é a S2+S4, uma vez que é a solução em que os elementos do reforço apresentam maior contacto com os ambientes exterior e interior. A solução S2 apresenta um agravamento no U de 14% e uma redução no I_v de 33%. Em termos comparativos, caso fosse necessário selecionar uma destas soluções, seria preferível optar pela solução S2+S4, uma vez que, em termos térmicos, o aumento é apenas de 3% superior à solução S2 (passa de 14% para 16%) mas a redução do I_v, é muito significativa com uma diferença de 18%.

A solução S1-RT também apresenta bons indicadores, pois, com a introdução de uma solução de reforço apenas, e com a melhoria térmica (implementação de reboco térmico), é possível obter uma redução de aproximadamente 40% no valor do U da parede, e de 58% no valor do I_v , que são valores manifestamente elevados no contexto deste tipo de edifícios.

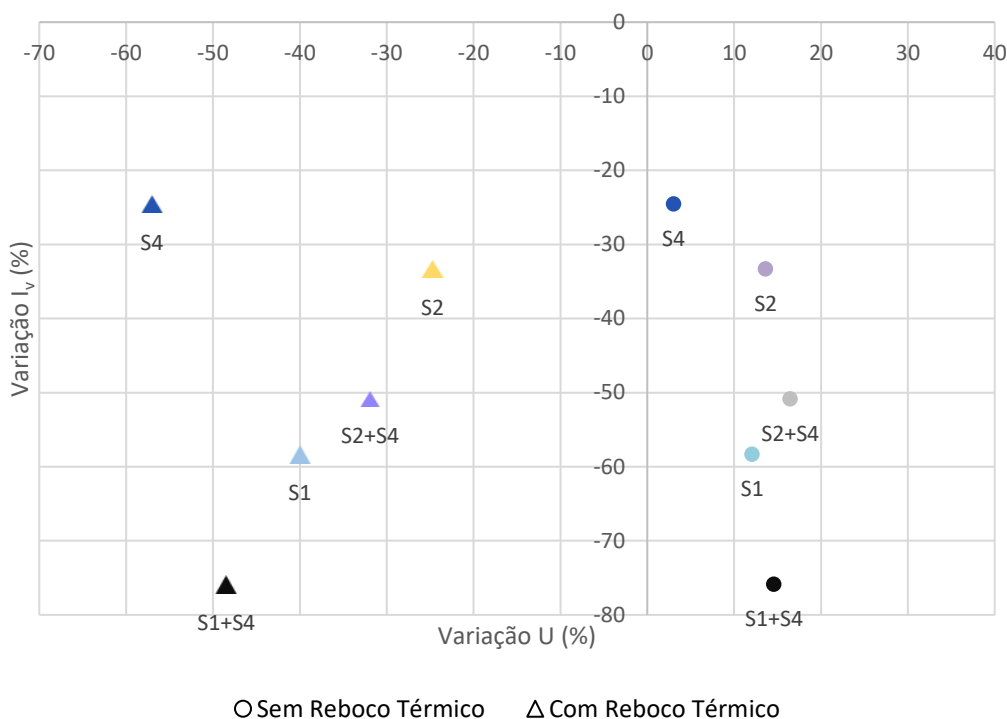


Figura 34 - Variação dos valores de U e I_v na zona da ligação pavimentos - paredes secundárias

7.5. ZONA DA LIGAÇÃO COBERTURA-PAREDES

A figura 35 mostra a variação provocada pelas soluções de reforço, nos valores de U e I_v , na zona de ligação da cobertura com as paredes do edifício.

Verifica-se que existem três níveis de redução do I_v : uma situada entre reduções de 20% e 30% que são as soluções que para este caso produzem um menor impacto; outra situada entre os 40% e 50% correspondente a situações intermédias; e, finalmente, um terceiro nível de impacto, com reduções entre ao 60% e 70%.

Assim, as soluções que introduzem maior impacto no edifício são a S3+S4-RT e a S3_1+S4-RT, na medida em que conseguem melhorar simultaneamente, o comportamento térmico do edifício e o seu comportamento sísmico, com reduções de aproximadamente 65%.

No entanto, existem soluções que são interessantes do ponto de vista sísmico, mas muito pouco interessantes em termos térmicos. A solução LCP+S2+S4-RT é um exemplo disso, apresentando reduções no I_v de 65%, mas de menos de 20% no valor de U. Caso esta solução seja aplicada sem recurso a reboco térmico (RT), o comportamento térmico agrava-se em 32%

Na figura 35 é observável ainda o impacto das soluções sem reboco térmico S3 e S3_1 e das soluções S3+S4 e S3_1+S4, sendo as soluções de reforço que não alteram, ou alteram de forma pouco significativa, o comportamento térmico, mas que apresentam um impacto relevante em termos de redução do valor do I_v .

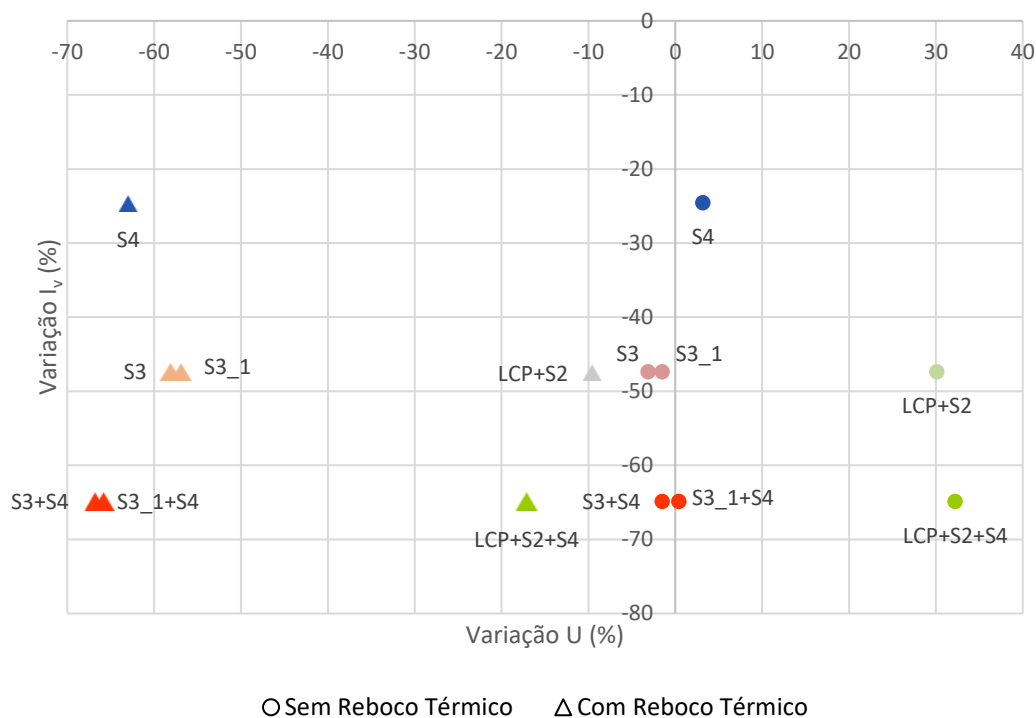


Figura 35 - Variação dos valores de U e I_v na zona da ligação cobertura-paredes

7.6. SÍNTESE CRÍTICA

Esta análise combinada dos dois fenómenos permite escolher, de forma fundamentada, para cada zona a melhor solução tanto em termos térmicos como em termos sísmicos. Essas soluções são as seguintes:

- Zona Corrente: Solução S4-RT
- Zona da ligação pavimento-parede principal: Solução S1_1+S4-RT
- Zona da ligação pavimento-parede secundária: Solução S1+S4-RT
- Zona da ligação cobertura-paredes: Solução S3/S3_1+S4-RT

Em síntese, as soluções S4-RT melhoram o comportamento térmico devido à introdução de uma camada resistente termicamente e aumento da espessura de 0,02 m para 0,05 m, enquanto as soluções, S1, S1_1, S3 e S3_1 melhoram o comportamento sísmico do edifício por via da mitigação das suas fragilidades estruturais mais significativas, nomeadamente as ligações entre elementos verticais e horizontais, e as ligações entre a estrutura da cobertura e as paredes

8

CONCLUSÕES

8.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente dissertação apresenta-se dedicada ao tema do reforço sísmico de edifícios antigos, sob o ponto de vista da avaliação do comportamento térmico de parede (valor de U) e da vulnerabilidade sísmica (valor de I_v) global do edifício. Numa primeira fase foram estudados um conjunto de técnicas de reforço sísmico com o objetivo de enriquecer o nível de conhecimento dos mesmos, bem como em relação aos materiais utilizados e à sua aplicação no edifício. Numa segunda fase, com base na informação recolhida, foi analisado o impacto destas soluções. Desta forma, esta segunda fase pode ser dividida em duas subfases: a primeira que analisa, com base numa simulação numérica, o impacto positivo ou negativo dos reforços no valor do coeficiente de transmissão térmica da parede; e a segunda o impacto no índice de vulnerabilidade sísmica de um edifício-tipo representativo da construção tradicional de alvenaria de pedra. A terceira e última fase corresponde a uma análise conjunta dos resultados anteriores com o objetivo de permitir descodificar as soluções com melhores ou piores resultados em termos térmicos e sísmicos.

Assim, a realização deste trabalho contribui para o desenvolvimento do conhecimento na área do comportamento térmico de paredes tradicionais de alvenaria de pedra quando reforçadas com técnicas com vista à melhoria do comportamento sísmico do edifício e permitiu a avaliação e clarificação de alguns aspetos importantes neste domínio, tais como: o impacto provocado por elementos de aço no comportamento de paredes; os efeitos das soluções de reforço que atravessam completamente, ou não, a secção da parede e o impacto da introdução de uma camada de elevado desempenho térmico, como o caso do reboco térmico, em conjunto com soluções de reforço no coeficiente de transmissão térmica, U . Para além disso permitiu, ainda, analisar que tipo de soluções mais impactam na redução do índice de vulnerabilidade, I_v , de um edifício de alvenaria de pedra. As conclusões mais significativas obtidas do trabalho realizado são as seguintes:

- A análise de sensibilidade realizada com base na simulação numérica permitiu retirar várias conclusões acerca da introdução de elementos de aço nas paredes de alvenaria antiga entre as quais: os valores do U da parede (não rebocada termicamente) são superiores quando se introduz este elemento, em resultado da sua elevada condutibilidade térmica; o impacto do aço é superior quando o material atravessa toda a secção do elemento construtivo (apresenta-se em contacto com o ambiente interior e ambiente exterior); a solução S4 (aplicação de reboco armado) apresenta, em geral, pouco impacto devido ao elemento aço estar imerso no interior do reboco e ocorrer a passagem de 0,02 m para 0,05 m na sua espessura; a substituição de

pequenas zonas da parede de pedra por betão, ainda que armado, permitem melhorar o valor do U devido à propriedade λ do betão ser menor que o da pedra, tal como mostram as soluções S3 e S3_1. Também permitiu concluir que a introdução do reboco térmico tem bastante impacto para a redução do valor do U em todas as zonas da parede pelo facto de a ser um material com elevada resistência térmica. Para além disso, clarificou que, ao contrário do que seria de esperar, a zona LCP apresenta um valor de U menor que a zona corrente AP devido à presença de madeira na primeira zona (a madeira apresenta maior resistência térmica).

- A avaliação da vulnerabilidade sísmica, segundo a metodologia correspondente ao índice de vulnerabilidade, permite quantificar a vulnerabilidade sísmica do parque construído antigo em alvenaria de pedra. As conclusões mais importantes a retirar são as seguintes: os edifícios antigos apresentam inúmeras fragilidades, principalmente devido às fracas ligações entre os seus diversos elementos estruturais; esta metodologia permite verificar que certas soluções de reforço conseguem ser muito eficazes na mitigação da vulnerabilidade sísmica destes edifícios, com reduções entre os 50% e os 80%; a solução que menos reduz o I_v é a solução de reboco armado apenas na face exterior (S4_1) porque apenas permite aumentar a resistência de corte da parede e, de alguma forma, controlar a fendilhação. Por outro lado, as soluções que permitem uma maior redução são aquelas que atuam nos parâmetros P1, P2 e P3 pois são os parâmetros que mais contribuem para a vulnerabilidade sísmica do edifício (i.e. que têm maior peso p_i).
- A análise conjunta dos dois parâmetros referidos acima, permite, de forma simples, mas com um nível de rigor adequado, retirar conclusões acerca das soluções que permitem, em simultâneo, reduzir o coeficiente de transmissão térmica e o índice de vulnerabilidade sísmica. Desta forma, e através da análise gráfica apresentada e discutida no Capítulo 7, é possível concluir que soluções que se encontram no canto inferior esquerdo dos gráficos apresentados nas figuras 32 a 35 são as mais apelativas tendo em conta os dois parâmetros de estudo, dado que são as que apresentam uma maior redução relativa nos valores de U e de I_v .

Como nota final a esta dissertação, destaca-se a importância destes trabalhos de investigação numa época em que a melhoria da eficiência energética dos edifícios e a redução dos impactos ambientais nas populações e no ambiente edificado se assumem como vetores estratégicos fundamentais. Para além disso, as construções antigas, muitas com valor patrimonial relevante, são, em muitos casos, um foco de perigo para os seus utilizadores, razão pela qual a quantificação da sua vulnerabilidade sísmica, na perspetiva de conhecer para intervir de forma informada, é absolutamente fundamental.

Neste sentido, importa que o reforço estrutural e sísmico seja acompanhado de uma análise em termos energéticos, para que se caminhe no sentido de soluções mais eficientes do ponto de vista sísmico e energético, contribuído assim para a segurança e conforto dos seus utilizadores e para obtenção de soluções mais sustentáveis.

8.3. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

A realização desta simulação contribui, mas não esgota o diverso campo de investigação no que diz respeito à avaliação do impacto de soluções de reforço sísmico em edifícios antigos. Assim salientam-se alguns tópicos que poderiam constituir trabalhos futuros nesta área:

- Análise do impacto das soluções de reforço no comportamento térmico global de edifícios, com recurso a modelos de simulação 3D.
- Análise do desempenho sísmico do edifício com recurso a modelos numéricos avançados, nomeadamente modelos baseados em elementos finitos, elementos discretos ou macro elementos
- Definição de novas soluções de reforço e análise crítica do seu impacto em termos de desempenho térmico
- Avaliar o impacto do reforço sísmico nouro tipo de paredes que não de alvenaria de pedra
- Estudar as variações do valor do U após reforço com diferentes valores de temperatura e humidade relativa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Censos 2011, Recenseamento da População e Habitação, Instituto Nacional de Estatística, Lisboa 2011
- [2] Simões, N.; Tadeu, A.; Prata, J.; Castro, I. *Caracterização Térmica: Uma Perspetiva sobre Exigências de Ensaio e de Simulação*. Paredes divisórias: Passado, presente e futuro (P.B. Lourenço et al.), Junho 2011, Guimarães, pág. 83-96, Universidade do Minho
- [3] Moret Rodrigues, A. Piedade, A., Braga, A. *Térmica de Edifícios*. Orion, Amadora, 2009
- [4] *Diário da República*, 1ª série – N.º 159 – 20 de agosto de 2013 – Decreto-lei n.º 118/2013
- [5] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION – CEN (2017) *EN ISO 6946:2017 – Buildings components and building elements – Thermal resistance and thermal transmittance – Calculation methods*. CEN, Brussels, Belgium.
- [6] Corvacho, H. *Estudo das Pontes Térmicas na Envolvente dos Edifícios*. Dissertação de Mestrado, FEUP, 1987.
- [7] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION – CEN (2017) *EN ISO 10211:2017 – Thermal bridges in building construction – Heat flows and surface temperatures – Detailed calculations*. CEN, Brussels, Belgium
- [8] Freitas, V (Coord.) – *Manual de Apoio ao Projeto de Reabilitação de Edifícios Antigos*. Porto: FEUP. Ordem dos Engenheiros da Região Norte, 2012
- [9] *Diário da República*, 1ª série – N.º 207 – 22 de outubro de 2015 – Portaria n.º 379-A/2015
- [10] *Diário da República*, 1ª série – N.º 232 – 29 de novembro de 2013 – Portaria n.º 349-B/2013
- [11] *Diário da República*, 1ª série – N.º 136 – 18 de julho de 2019 – Decreto-lei n.º 95/2019
- [12] *Diário da República*, 1ª série – N.º 31 – 6 de fevereiro de 1990 – Decreto-lei n.º 40/90
- [13] *Diário da República*, 1ª série – N.º 172 – 9 de setembro de 2019 – Decreto-lei n.º 297/2019
- [14] THERM 7.7 – <https://windows.lbl.gov/software/therm>. 17/02/2021
- [15] ANSYS – <https://www.ansys.com/>. 24/03/2021
- [16] Roque, E., Santos, P. *The Effectiveness of Thermal Insulation in Lightweight Steel-Framed Walls with Respect to Its Position*. Buildings, 2017, pág. 1-18
- [17] Roque, E., Vicente, R., Almeida, R., Silva, J., Ferreira, A. *Thermal characterisation of traditional wall solution of built heritage using the simple hot box-heat flow meter method: In situ measurements and numerical simulation*. Elsevier, 2020, pág.1-12
- [18] Mascarenhas, J. *Sistemas de Construção III- Paredes (2ª parte) 5ª edição*. LIVROS HORIZONTE, Lisboa, 2010
- [19] Sousa, H. *Construções em Alvenaria*. FEUP, Porto, 2003
- [20] Roque, J. *Reabilitação Estrutural de Paredes Antigas de Alvenaria*. Dissertação de Mestrado, Universidade do Minho, 2002

- [21] Mascarenhas, J. *Sistemas de Construção XIII – Reabilitação Urbana 2ª edição*. LIVROS HORIZONTE, Lisboa, 2018
- [22] Costa, A., Oliveira, C. *Reabilitação e Reforço Sísmico de Construções Antigas*. Sísmica 2010 – 8º Congresso de Sismologia e Engenharia Sísmica, outubro 2010, Aveiro, pág. 1 -14
- [23] Costa, A., Costa, A., Oliveira, C. Varum, H., Estevão, J., Vicente, R., Maio, R., Ferreira, T. *URBSIS – Avaliação da vulnerabilidade e gestão do risco sísmico à escala urbana*, Tipografia Lusitânia, Aveiro, 2016
- [24] Ferreira, T. *Avaliação da Vulnerabilidade Sísmica de Núcleos Urbanos Antigos*. Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do Diploma de Estudos Avançados, FEUP, 2010
- [25] Ferreira, T., Mendes, N., Silva, R. *Multiscale Seismic Vulnerability Assessment and Retrofit of Existing Masonry Buildings*. Buildings, 2019, pág. 1-22
- [26] Ferreira, T., Maio, R. Vicente, R., *Analysis of the impact of large scale seismic retrofitting strategies through the application of a vulnerability – based approach on traditional masonry buildings*. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Abril 2017, pág. 329-348
- [27] Arêde, A., Costa, A., Costa A., *Construções Tradicionais de Alvenaria de Pedra: Comportamento e Reforço Sísmico*. 10º Congresso Nacional de Sismologia e Engenharia Sísmica, abril 2016, Ponta Delgada pág. 1-33
- [28] Ferreira, T., Costa, A., Arêde, A., Gomes, A., Costa, A. *Caracterização laboratorial do comportamento para fora do plano de paredes de alvenaria de pedra regular*. Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas. Ed. LNEC. Série III. nº3. ISSN 2183-8488, março 2017, pág. 35-48
- [29] Santos, Carlos. Matias, Luís. *Coeficientes de Transmissão Térmica de Elementos da Envoltura dos Edifícios – ITE50*. LNEC, Lisboa, 2006
- [30] Secil – https://secilpro.com/produtos/solucoes_construtivas/isolamento-termico/argamassas-termicas/isodur-one#produto. 18/03/2021
- [31] Hilderson, W. *Therm 7.4 validation according to EN ISO 10211:2007*. Maio de 2016, Berchem
- [32] THERM 2.0 – *Program Description for Analyzing Two-Dimensional Heat Transfer Through Building Products*, June 1998
- [33] Ferreira, T., Maio, Rui., Vicente, R. *Seismic vulnerability assessment of the old city centre of Horta, Azores: calibration and application of a seismic vulnerability index method*. Bulletin of Earthquake Engineering, 15(7), 2017, pág. 2879-2899
- [34] Decreto Ministeriale 14/1/2008 – Norme tecniche per le costruzioni,
- [35] Ferreira, T., Costa, A., Costa, A. *Analysis of the Out-of-Plane Seismic Behavior of Unreinforced: A Literature Review*. International Journal of Architectural Heritage, 9(8), 2015, pág. 949-972.