



**FCTUC DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**  
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

# **O contributo dos movimentos naturais na fissuração das paredes de alvenaria**

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil na  
Especialidade de Construções

Autor

**João Pedro Carvalho do Vale Soares**

Orientadores

**Prof. Doutor José António Raimundo Mendes da Silva**

**Prof<sup>a</sup>. Doutora Maria Isabel Morais Torres**

Esta dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor, não tendo sofrido correções após a defesa em provas públicas. O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC declina qualquer responsabilidade pelo uso da informação apresentada

**Coimbra, maio, 2016**

## AGRADECIMENTOS

Com a presente dissertação é encerrado um capítulo bastante importante da minha vida. É com grande estima e sinceridade que manifesto a minha gratidão a todos aqueles que me apoiaram, direta ou indiretamente, na elaboração desta dissertação. De uma forma especial, agradeço:

Ao Professor Doutor José António Raimundo Mendes da Silva e à Professora Doutora Maria Isabel Morais Torres pelo apoio, disponibilidade demonstrada e pelos ensinamentos e orientações essenciais para a elaboração desta dissertação. Ao Professor Doutor João Henrique Jorge de Oliveira Negrão pela disponibilidade e ensinamentos relativos ao programa utilizado nesta dissertação (*Autodesk Robot Structural Analysis*).

Aos meus Pais e Irmão por me proporcionarem esta oportunidade, nunca faltando com o carinho, apoio e paciência transmitidos durante todo este percurso, nos bons e maus momentos.

À minha Avó pelo carinho, apoio e força demonstrada durante todo o percurso académico.

A toda a minha família, em especial ao meu Avô e Tio que tenho a certeza que ficam muito orgulhosos com a conclusão desta etapa.

À minha namorada por todo o amor, cumplicidade, carinho e por todas as palavras de incentivo e encorajamento demonstradas durante todo o percurso. Sem dúvida um grande suporte para a conclusão deste trabalho.

Por fim, a todos os meus amigos, tanto os que fiz em Coimbra como aqueles que me acompanham desde a infância.

## RESUMO

A evolução das técnicas de projeto e execução de obra permitiu, regra geral, melhorias nas construções. Apesar disto, trouxe também o aparecimento de algumas patologias que provocam desgaste e redução de desempenho dos edifícios. As paredes de alvenaria sem função estrutural são aquelas onde mais se evidencia esta problemática. O esquecimento sucessivo, em fase de projeto, da relevância que as paredes possuem nos edifícios provoca o aparecimento de diferentes patologias ao longo da vida útil dos mesmos.

Os movimentos de expansão e contração dos materiais constituintes das paredes de alvenaria, em particular os movimentos das argamassas de assentamento e dos tijolos cerâmicos, conduzem, com frequência a situações de grave fissuração. Estas surgem muitas vezes de forma inesperada e a sua reabilitação apresenta elevados custos e grandes dificuldades tecnológicas, para além das repercussões arquitetónicas.

Nesta dissertação, pretendeu-se, numa primeira fase, sistematizar a informação mais relevante neste domínio, na perspetiva do apoio ao projeto de paredes de alvenaria não estruturais. De seguida procedeu-se à caracterização de uma parede específica em tijolo face à vista, em termos de movimentos naturais, e à avaliação, com recurso a ferramentas numéricas elementares, do seu efeito, em termos de tensões e potencial risco de fissuração. Isto foi conseguido através da simulação de modelos de paredes de alvenaria, com recurso ao programa *Autodesk Robot Structural Analysis*, com diferentes disposições de juntas de dilatação e com variações geométricas pontuais. Estes modelos foram sujeitos a variações de temperatura e de humidade. Foi ainda adotado um caso de estudo de um edifício que evidenciou alguns problemas de fissuração em fase de construção.

**Palavras-chave:** Fissuração, alvenaria, movimentos naturais, paredes não estruturais, variações de temperatura, variações de humidade

## **ABSTRACT**

The evolution of design and site execution techniques has broadly allowed improvements in constructions. Never the less, it has also induced the appearance of some pathologies, which have been related to cause strain and to decrease buildings performance. Non-structural masonry walls are those in which this kind of problems are evidenced the most. The successive neglect, in design stage, of the importance which these walls have throughout buildings lifespan, has provoked the appearance of several kinds of pathologies during that period.

The contraction and expansion movements of materials which constitute masonry walls, such as displacements in settlement mortar and ceramic bricks, frequently cause the worrying occurrence of cracks. These frequently appear, in an unexpected way, and the necessary rehabilitation procedures imply great monetary costs and many technological difficulties, in its implementation, as well as possible architectural repercussions.

It was intended, in a first stage of the present dissertation, to systematize the most relevant information to the subject of non-structural masonry walls design. In a second stage, the procedure consisted in the characterisation of a ceramic brick wall, in regard to its natural movements, and in the evaluation of it effects, in a tension and cracking risk point of view, with the assistance of elementary numerical tools. Such was achieved through masonry wall models simulations, recurring to Autodesk Robot Structural Analysis software, with the study of expansion joints different dispositions and with punctual geometric variations. These models were subjected to temperature and humidity variations. It was also adopted as case study, an existing building which manifested some cracking issues during construction phase.

**Keywords:** Cracking, masonry, natural movements, non-structural walls, temperature variation, humidity variation

---

## ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO .....	1
1.1	Enquadramento .....	1
1.2	Objetivos .....	1
1.3	Estrutura da tese .....	2
2	ESTADO DA ARTE .....	3
2.1	Evolução e caracterização geral das paredes de alvenaria .....	3
2.2	Tijolo face à vista .....	5
2.2.1	Enquadramento .....	5
2.2.2	A utilização do tijolo face à vista em Portugal .....	5
2.2.3	Características e formatos do tijolo face à vista .....	7
2.2.4	Normalização aplicável e requisitos de qualidade .....	8
2.2.5	Características das argamassas de assentamento .....	9
2.2.6	Resistência das alvenarias .....	10
2.3	Juntas de dilatação .....	12
2.4	Fatores que influenciam os movimentos nas paredes .....	13
2.4.1	Enquadramento geral .....	13
2.4.2	Variações de temperatura .....	15
2.4.2.1	Descrição do fenómeno .....	15
2.4.2.2	Fissuração devido às variações de temperatura .....	16
2.4.3	Ação da humidade .....	18
2.4.3.1	Descrição do fenómeno .....	18
2.4.3.2	Fissuração devido à variação de humidade .....	18
2.4.4	Retração hidráulica da argamassa e expansão irreversível do tijolo .....	20
2.4.5	Choque térmico .....	21
2.4.6	Outros casos .....	21
2.4.7	Exemplos de fissuração típica em paredes de alvenaria .....	21

---

3	CONCEÇÃO DO MODELO .....	23
3.1	Introdução .....	23
3.1.1	Enquadramento .....	23
3.1.2	Simulação 1 (alçado) .....	23
3.1.3	Simulação 2 (alçado e planta).....	23
3.2	Modelação da estrutura .....	25
3.2.1	Descrição do programa .....	25
3.2.2	Definição da estrutura.....	25
3.2.3	Características dos elementos e dos materiais .....	26
3.2.4	Ações .....	27
3.2.4.1	Enquadramento .....	27
3.2.4.2	Variação de temperatura .....	27
3.2.4.3	Variação do teor de humidade e retração hidráulica.....	28
4	SIMULAÇÃO E COMENTÁRIOS .....	29
4.1	Introdução .....	29
4.2	Resultados obtidos .....	30
4.2.1	Enquadramento Geral .....	30
4.2.2	Simulação 1 (alçado) .....	31
4.2.2.1	Tensões principais máximas (S1) .....	31
4.2.2.2	Tensões principais mínimas (S2).....	34
4.2.3	Simulação 2 (alçado e planta).....	39
4.2.3.1	Análise em alçado .....	39
4.2.3.1.1	Tensões principais máximas (S1).....	39
4.2.3.1.2	Tensões principais mínimas (S2) .....	40
4.2.3.2	Análise em planta.....	43
5	APLICAÇÃO A CASO PRÁTICO .....	47
5.1	Enquadramento .....	47
5.2	Resultados.....	48
5.2.1	Parede Sul.....	48
5.2.1.1	Tensões principais máximas (S1) .....	48
5.2.1.2	Tensões principais mínimas (S2).....	50

---

---

5.2.2	Parede Oeste .....	53
5.2.2.1	Tensões principais máximas (S1) .....	53
5.2.2.2	Tensões principais mínimas (S2).....	55
5.3	Técnicas de reabilitação e reforço.....	58
6	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS .....	60
6.1	Conclusões .....	60
6.2	Trabalhos Futuros .....	62
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	63
8	ANEXOS.....	A-1

---

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Tipos de revestimento utilizados nas paredes exteriores até 2011 (LNEC, 2013)...	6
Figura 2.2 – Plano de rotura paralelo às juntas de assentamento ( $f_{xk1}$ ) e plano de rotura perpendicular às juntas de assentamento ( $f_{xk2}$ ), respetivamente (CEN, 2005) .....	11
Figura 2.3 – Junta de dilatação vertical retilínea e junta de dilatação vertical em zig-zag, respetivamente .....	13
Figura 2.4 – Movimentação higroscópica dos materiais (adaptado de (Ribeiro, 2006)) .....	19
Figura 3.1 – Parede modelo (alçado) com 20 m de comprimento, 3 m de altura e 0,115 m de espessura (imagem retirada de <i>Autodesk Robot Structural Analysis</i> ) .....	23
Figura 3.2 – Cortes representativos das zonas simuladas para os modelos em planta (imagem retirada de <i>Autodesk Robot Structural Analysis</i> ) .....	24
Figura 3.3 – Apoios utilizados na simulação dos modelos em planta (imagem retirada de <i>Autodesk Robot Structural Analysis</i> ) .....	24
Figura 3.4 – Exemplificação dos modelos micro e macro, respetivamente (Lourenço, 1996)...	25
Figura 4.1 – Critério de rotura de “Mohr-Coulomb” (adaptado de (Silva, 1998)).....	31
Figura 4.2 – Esquema representativo da deformação (expansão) sofrida pela parede com o aumento da temperatura, para o caso de parede sem junta de dilatação (a) e para o caso da parede com juntas de dilatação (b) .....	38
Figura 4.3 – Esquema representativo da deformação (retração) sofrida pela parede com a retração de 0,1%, para o caso de parede sem junta de dilatação (a) e para o caso da parede com juntas de dilatação (b).....	38
Figura 5.1 – Pormenor da zona da padieira (adaptado de (Ancon, 2016)).....	53
Figura 5.2 – Exemplo de armadura de aço na junta de assentamento horizontal (Ancon, 2016)	59
Figura 5.3 – Exemplo de varões de aço para reforço das juntas de assentamento (helifix@2016; twistfix@2016).....	59



---

## ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 – Exemplos de obras em alvenaria de tijolo face à vista .....	6
Quadro 2.2 – Exemplos de obras em alvenaria de tijolo face à vista (continuação do quadro 2.1) .....	7
Quadro 2.3 – Características de dois tipos de tijolos face à vista (adaptado tendo em conta as fichas técnicas de cada material) (Cerâmica Vale da Gândara, s/d).....	8
Quadro 2.4 - Exemplos de tipos de fissuração típica nas paredes de alvenaria devido a fenómenos de variação de temperatura e humidade (Silva, 1998).....	22
Quadro 3.1 – Propriedades da parede utilizada na modelação.....	26
Quadro 4.1 – Modelos de parede da simulação 1 (medidas em metros).....	29
Quadro 4.2 – Modelos de parede da simulação 2 (medidas em metros).....	30
Quadro 4.3 – Tensões de tração (Simulação 1).....	32
Quadro 4.4 – Média das tensões instaladas na parede (tensões de tração +; tensões de compressão -) (Simulação 1).....	32
Quadro 4.5 – Tensões de compressão (Simulação 1).....	35
Quadro 4.6 – Média das tensões instaladas na parede (tensões de tração +; tensões de compressão -) (Simulação 1).....	35
Quadro 4.7 – Tensões de tração e compressão, em simultâneo (Simulação 1).....	36
Quadro 4.8 – Tensões de tração (Simulação 2).....	39
Quadro 4.9 – Média das tensões instaladas na parede (tensões de tração +; tensões de compressão -) (Simulação 2).....	39
Quadro 4.10 – Tensões de compressão (Simulação 2).....	41
Quadro 4.11 – Média das tensões instaladas na parede (tensões de tração +; tensões de compressão -) (Simulação 2).....	41
Quadro 4.12 – Tensões de tração e compressão, em simultâneo (Simulação 2).....	42
Quadro 4.13 - Concentrações das tensões principais máximas de tração nos diferentes modelos (Simulação 2).....	44
Quadro 4.14 – Concentração das tensões principais máximas de compressão nos diferentes modelos (Simulação 2).....	45
Quadro 5.1 - Esquema do edifício e das paredes modeladas para o estudo .....	47
Quadro 5.2 – Modelos de paredes simulados .....	48

---

---

Quadro 5.3 – Tensões de tração (Parede Sul).....	48
Quadro 5.4 – Média das tensões instaladas na parede (tensões de tração +; tensões de compressão -) (Parede Sul).....	48
Quadro 5.5 - Tensões de compressão (Parede sul).....	51
Quadro 5.6 - Média das tensões instaladas na parede (tensões de tração +; tensões de compressão -) (Parede Sul).....	51
Quadro 5.7 – Tensões de tração e compressão, em simultâneo (Parede Sul).....	52
Quadro 5.8 – Tensões de tração (Parede Oeste).....	54
Quadro 5.9 – Média das tensões instaladas na parede (tensões de tração +; tensões de compressão -) (Parede Oeste).....	54
Quadro 5.10 – Tensões de compressão (Parede Oeste).....	56
Quadro 5.11 – Média das tensões instaladas na parede (tensões de tração +; tensões de compressão -) (Parede Oeste).....	56
Quadro 5.12 – Tensões de tração e compressão, em simultâneo (Parede Oeste).....	57

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 4.1 – Distribuição das tensões de tração para o aumento de temperatura.....	33
Gráfico 4.2 – Distribuição das tensões de tração para a retração de 0,1% .....	33
Gráfico 4.3 – Distribuição das tensões de tração para a retração de 0,1% *.....	34
Gráfico 4.4 – Distribuição das tensões de compressão para o aumento de temperatura.....	36
Gráfico 4.5 – Distribuição das tensões de tração para a retração de 0,1 % .....	40
Gráfico 4.6 – Distribuição das tensões de compressão para o aumento de temperatura.....	42
Gráfico 5.1 – Distribuição das tensões de tração para o aumento da temperatura.....	49
Gráfico 5.2 – Distribuição das tensões de tração para a retração de 0,1% .....	50
Gráfico 5.3 - Distribuição das tensões de compressão para o aumento de temperatura.....	52
Gráfico 5.4 – Distribuição das tensões de tração com o aumento da temperatura .....	55
Gráfico 5.5 – Distribuição das tensões de tração para a retração de 0,1 % .....	55
Gráfico 5.6 – Distribuição das tensões de compressão aquando do aumento de temperatura..	57

## ABREVIATURAS

A. C. – Antes de Cristo  
D. C. – Depois de Cristo  
EC 6 – Eurocódigo 6  
INE – Instituto Nacional de Estatística  
IPMA – Instituto Português do Mar e da Atmosfera  
TFV – Tijolo face à vista

## SIMBOLOGIA

E – Módulo de Elasticidade  
 $f_k$  – Resistência característica da alvenaria à compressão  
 $f_b$  – Resistência média normalizada do tijolo à compressão  
 $f_m$  – Resistência média da argamassa à compressão  
 $f_{vk}$  – Resistência característica da alvenaria ao corte  
 $f_{vko}$  – Resistência característica inicial da alvenaria ao corte, sob compressão nula  
 $f_{vlt}$  – Valor limite para  $f_{vk}$   
 $f_{xk1}$  - Plano de rotura paralelo às juntas de assentamento  
 $f_{xk2}$  - Plano de rotura perpendicular às juntas de assentamento  
G – Módulo de Cisalhamento  
K,  $\alpha$ ,  $\beta$  – Constantes dependentes do tipo de unidades e tipo de paredes.  
L – Comprimento inicial do elemento construtivo  
 $T_{ar}$  – Temperatura máxima do ar  
 $T_s$  – Temperatura máxima superficial do revestimento  
 $\nu$  – Coeficiente de Poisson  
 $\alpha$  – Coeficiente de dilatação térmica linear do material  
 $\alpha_s$  – Coeficiente de absorção da radiação solar.  
 $\sigma_d$  – Tensão de compressão atuante  
 $\Delta L$  – Variação de comprimento  
 $\Delta T$  – Variação de temperatura do material

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Enquadramento

As paredes de alvenaria são muito utilizadas em Portugal. Contudo, o sucessivo esquecimento da sua importância, em fase de projeto, tem conduzido a um mau desempenho face às exigências para as quais são projetadas e ao aparecimento de diferentes patologias ao longo da vida útil dos edifícios. As paredes de alvenaria sem função estrutural são aquelas onde mais se evidencia esta problemática uma vez que, em fase de projeto apenas se faz referência aos materiais a utilizar e à geometria das mesmas.

A fissuração das paredes de alvenaria é uma das patologias que aparecem mais frequentemente nos edifícios, sendo inúmeras as causas que estão na origem deste fenómeno. Porém, destacam-se os efeitos provocados pelas variações de temperatura e variações de humidade. Estas ações provocam diversos movimentos de expansão e de contração nos materiais constituintes das paredes de alvenaria que, por sua vez, dão origem a tensões de compressão e de tração. Movimentos relacionados com as argamassas e os tijolos cerâmicos são os mais significativos, originando diversos problemas de fissuração, cuja reabilitação apresenta custos elevados, grandes dificuldades tecnológicas, além das repercussões arquitetónicas.

São vários os tipos de alvenarias, nomeadamente as paredes de enchimento, as resistentes, e as de tijolo face à vista. Em Portugal, as paredes de tijolo face à vista nunca obtiveram grande expressão, sendo associadas frequentemente a construções de qualidade superior. O bom desempenho a nível de aspeto e durabilidade é uma das suas características, mas está dependente de uma boa pormenorização em fase de projeto, tendo em conta os diversos movimentos que estas podem sofrer ao longo da sua vida útil.

## 1.2 Objetivos

A presente dissertação tem como finalidade aprofundar o estudo da influência dos movimentos naturais dos materiais, relacionados com as variações de temperatura e de humidade, na fissuração das paredes de alvenaria não estruturais.

Para isto, pretende-se simular o comportamento de uma parede de alvenaria de tijolo face à vista, não estrutural, exposta às ações de variação de temperatura e de humidade, com recurso a um programa de elementos finitos, *Autodesk Robot Structural Analysis*. A parede será estudada com diferentes disposições de juntas de dilatação e geometrias, com vista a diminuir

as tensões atuantes na parede e melhorar o seu comportamento, reduzindo a probabilidade de fissuração. Pretende-se, também, estudar até que ponto a introdução destas técnicas será suficiente para evitar a fissuração da parede ou se esta precisa, mesmo assim, de ser reforçada com outros elementos, nomeadamente armaduras de aço ao longo das juntas.

De seguida, será feita a aplicação a um caso prático de um edifício que revelou problemas de fissuração na fase de construção, com o objetivo de estudar as melhores técnicas para diminuir as tensões atuantes na parede e, visto tratar-se de um edifício já construído, sugerir formas de reabilitação do mesmo.

### **1.3 Estrutura da tese**

Esta dissertação encontra-se dividida em seis capítulos. O Capítulo 1 faz o enquadramento do tema, expõe os objetivos do trabalho e a sua metodologia.

O Capítulo 2 é dedicado ao estado da arte, onde se expõe a evolução do tijolo cerâmico e das paredes de alvenaria, a utilização do tijolo face à vista em Portugal e as características principais deste tipo de alvenaria. São explicados também os diversos movimentos naturais existentes neste tipo de paredes.

No Capítulo 3 é descrita a metodologia utilizada para a modelação, faz-se uma breve referência ao programa utilizado, explica-se os diferentes modelos utilizados nas duas simulações e as ações simuladas (variação de temperatura e variação de humidade).

No Capítulo 4 são ilustrados os diferentes modelos utilizados nas duas simulações e analisados os resultados obtidos.

No Capítulo 5 é estudado e simulado um caso prático de um edifício com paredes de alvenaria em tijolo face à vista, que revelou diversos problemas de fissuração, na fase de construção.

Finalmente, no Capítulo 6 são apresentadas as conclusões mais relevantes do estudo realizado.

## 2 ESTADO DA ARTE

### 2.1 Evolução e caracterização geral das paredes de alvenaria

São várias as definições para o conceito de alvenaria. Segundo Hipólito de Sousa (Sousa, 1988), alvenaria é a “associação de elementos naturais ou artificiais, constituindo uma construção. Correntemente a ligação é assegurada por uma argamassa. Os elementos aglutinados naturais são pedras irregulares ou regulares, os artificiais podem ser cerâmicos, de betão ou outros”.

A alvenaria tem, desde a Antiguidade, uma importância histórica para a construção. Desde essa altura que vem sendo documentada a sua utilização na construção de habitações, monumentos e templos religiosos. Não se sabe ao certo quando teve origem a primeira construção em alvenaria, mas admite-se que terá sido por volta de 10 000 A.C., na Era do Neolítico. (Sousa, 2003; Campbell & Pryce, 2005).

Em Portugal, só a partir de meados do século XX se começou a utilizar, de uma forma generalizada, alvenaria de tijolo cozido, substituindo-se desta forma, a construção em alvenaria de pedra, utilizada até esta altura (Torgal & Jalali, 2010).

Hoje em dia, os tijolos cerâmicos podem ser classificados, segundo a NP EN 771-1:2012, consoante as suas características e relativamente ao fim a que se destinam. De acordo com esta classificação podem ser (LNEC@2016; Dias, 2011):

- Tijolos LD (*Low Density* – Baixa Densidade): unidades cerâmicas com massa volúmica seca bruta inferior ou igual a  $1000 \text{ kg/m}^3$  para utilização em alvenarias protegidas;
- Tijolos HD (*High Density* – Alta Densidade): todas as unidades cerâmicas para utilização em alvenarias não protegidas com massa volúmica seca bruta superior a  $1000 \text{ kg/m}^3$ .

Em relação à aplicação, a classificação dos tijolos cerâmicos divide-se nos seguintes grupos (Dias, 2011):

- Face à vista: quando têm como destino ficar aparentes, tanto no interior como no exterior da construção;
- Enchimento: quando os tijolos não têm função resistente, além do seu próprio peso;
- Resistentes: quando têm função estrutural na construção.

---

Segundo Hipólito de Sousa (Sousa, 1996), as paredes de alvenaria em Portugal evoluíram através da seguinte sequência cronológica: paredes simples de pedras espessas, paredes simples de tijolo maciço ou perfurado espessas, paredes de pedra com pano interior de tijolo furado e possível caixa-de-ar, paredes duplas de tijolo com panos espessos, paredes duplas de tijolo furado de panos com espessura média ou reduzida e paredes duplas de tijolo furado com a caixa-de-ar total ou parcialmente preenchida com isolamento. Atualmente existem também as paredes simples com isolamento pelo exterior.

As paredes de alvenaria são caracterizadas frequentemente em função do material constituinte dos elementos utilizados na sua construção. Contudo, isto traduz-se numa caracterização insuficiente, uma vez que existem outros fatores que influenciam o comportamento das paredes, destacando-se os seguintes (Silva, 1998):

- “(...) Tipo de argamassa de assentamento;
- Aparelho de assentamento da parede (geometria e defasamento das juntas, posição de assentamento dos blocos);
- Número de panos da parede e suas ligações, entre si e à eventual estrutura de apoio;
- Tipo de revestimento da parede;
- Existência de elementos complementares de isolamento térmico, estanquidade e controlo da difusão de vapor;
- Localização da parede (na fachada, no interior do edifício, independente no exterior);
- Posição da parede em relação ao solo (enterrada, em piso térreo, em piso elevado);
- Função estrutural a que se destina (...).”

À medida que as técnicas de projeto e de execução de obra evoluíam, os especialistas procuraram sempre materiais que possibilitassem uma construção ideal que, segundo os próprios, deveria ser o mais barato possível, o mais duradouro, mais resistente e leve. Contudo, esta busca incessante do material “perfeito” começou a trazer também muitas desvantagens para as construções, originando anomalias que provocam desgaste e redução do desempenho dos materiais que constituem os edifícios, reduzindo assim a vida útil dos mesmos. No geral, este tipo de problemas tende a evoluir e intensificar-se com o passar dos tempos (Lima & al, 2014).

Segundo o EC 6, as paredes são classificadas de acordo com o tipo de material que as constitui, o tipo de pano e as suas ligações. Desta forma, podem ser classificadas como: paredes simples; paredes duplas; paredes de face à vista; paredes compostas ou de dois panos; parede cortina (CEN, 2005).

Em Portugal tem sido notória a negligência com que se têm tratado as paredes de alvenaria em relação à sua importância social e económica. O frequente esquecimento na atividade de projeto das paredes dos edifícios, principalmente aquelas que não apresentam função estrutural, tem contribuído para uma diminuição das suas competências inerentes às fases de projeto e execução (Apicer, 2000).

A fim de responder de forma positiva às necessidades dos seus utilizadores, as paredes de alvenaria têm de satisfazer certas exigências funcionais: estabilidade; segurança ao fogo; segurança na utilização; estanquidade; conforto higrotérmico; ambiente atmosférico; conforto acústico, visual e tátil; higiene; adaptação à utilização; durabilidade (Apicer, 2000).

## **2.2 Tijolo face à vista**

### **2.2.1 Enquadramento**

No século II D.C., face à incapacidade de obtenção de revestimentos eficazes para cobrir as alvenarias, surgiu uma nova técnica que consistia em utilizar o tijolo como revestimento à vista.

A Itália e a Inglaterra são os dois países que mais apostaram nas construções em tijolo face à vista, desde o século XV. A Itália já tinha uma longa história no uso do tijolo face à vista, mas foi a partir desta altura que se evidenciou mais essa prática. A Inglaterra apostou nesta técnica a partir do momento em que um incêndio na cidade de Londres, em 1666, consumiu milhares de edifícios. A cidade foi reconstruída com recurso ao tijolo face à vista (Simões, 1966).

Mais tarde, com a Revolução Industrial, no século XIX, houve um impulso significativo no processo de fabrico do tijolo. Com os meios mecanizados, era agora mais barato e rápido todo este processo. Este impulso também se deveu à descoberta do cimento Portland, que possibilitava uma maior rapidez no processo de construção das paredes de alvenaria, assim como uma melhoria significativa na durabilidade das mesmas. Com este crescimento e procura do tijolo, renasceu a utilização do mesmo como revestimento à vista, agora como fim decorativo (Mesquita, 2007).

A alvenaria de tijolo face à vista assume uma grande diversidade de aplicações, aliando a sua capacidade de fim decorativo a funções estruturais ou de enchimento. Contudo, a sua utilização nas paredes exteriores raramente assume uma função estrutural, privilegiando a função de revestimento estético, onde assume um papel autoportante (Camarneiro, 2002).

### **2.2.2 A utilização do tijolo face à vista em Portugal**

Em Portugal, ao contrário do que acontece noutros países Europeus, o recurso ao tijolo face à vista como revestimento exterior esteve, na maioria das vezes, associado a construções de qualidade superior, salientando-se o bom desempenho a nível de aspeto e durabilidade. No caso de outros países, como a Inglaterra, Itália e Países Baixos, esta prática foi sendo vulgarizada, utilizando-se em todo o tipo de construções (Dias, 2002).

Segundo os dados obtidos pelo INE nos censos de 2011, 84% das paredes dos edifícios em Portugal são revestidas exteriormente por reboco tradicional ou marmorite, 11,6% por pedra, 3,8% são revestidos por ladrilho cerâmico ou mosaico e 0,6% por outros tipos de revestimento (figura 2.1). É neste último grupo (outros tipos de revestimentos) que se insere o revestimento com tijolo face à vista, sobressaindo assim a sua pouca utilização no nosso país (LNEC, 2013).

---



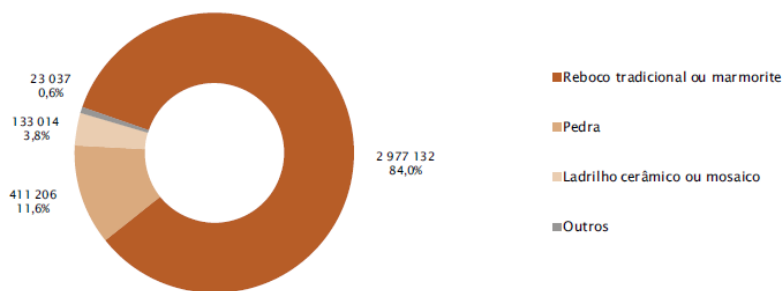


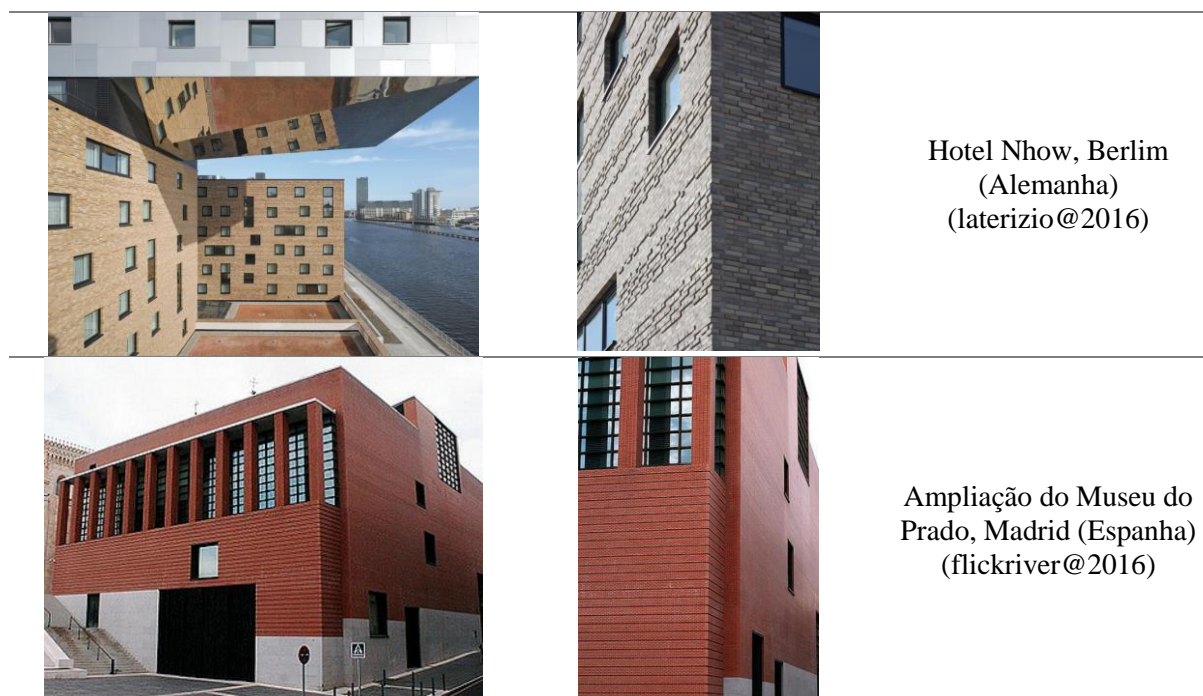
Figura 2. 1 – Tipos de revestimento utilizados nas paredes exteriores até 2011 (LNEC, 2013)

Alguns exemplos de edifícios construídos em alvenaria de tijolo face à vista, com paredes de grandes extensões, tanto a nível nacional como internacional, são apresentados em seguida (quadro 2.1 e 2.2).

Quadro 2. 1 – Exemplos de obras em alvenaria de tijolo face à vista



Quadro 2. 2 – Exemplos de obras em alvenaria de tijolo face à vista (continuação do quadro 2.1)



### 2.2.3 Características e formatos do tijolo face à vista

O tijolo face à vista apresenta, salvo raras exceções, uma forma paralelepípedica, conseguida por extrusão, secagem e cozedura de uma pasta de base argilosa, exposta a temperaturas elevadas. Tem como finalidade, quando exposta em obra, uma das faces ficar visível sem ser rebocada (Cerâmica Vale da Gândara, 2012).

Quando se utiliza armadura nas paredes de tijolo face à vista, esta pode ser equiparada a alvenaria estrutural, estando projetadas tanto para cargas verticais como horizontais. Contudo, esta não é uma prática recorrente em Portugal. As paredes são constituídas por um pano de alvenaria interior, estrutural ou não, que está separado do pano exterior de TFV por uma caixa-de-ar. Esta pode incluir isolamento térmico, como espuma de poliuretano, poliestireno expandido ou extrudido (Martins & al, 2014). Os dois panos da parede são interligados por dispositivos de fixação designados por grampos, sendo estes metálicos, na sua maioria, e devendo estar protegidos contra a corrosão para garantir a durabilidade adequada.

Os tijolos utilizados como face à vista são os maciços, também designados tijolo “burro”, e os perfurados. Os formatos utilizados para este tipo de fim são variados, mas privilegiam a coordenação modular. Alguns formatos correntes são: no tijolo maciço, 230x110x50mm e 230x110x70mm e no tijolo perfurado, 240x115x50mm, 240x115x70mm e 280x135x50mm.

Os requisitos mais importantes dos tijolos face à vista prendem-se com os seguintes aspetos: aspeto visual, resistência mecânica, ausência de eflorescências, dimensões e durabilidade. No quadro 2.3 são apresentadas as características, a título de exemplo, de dois tipos de tijolos face à vista, neste caso, produzidos e comercializados pela Cerâmica Vale da Gândara.

Quadro 2.3 – Características de dois tipos de tijolos face à vista (adaptado tendo em conta as fichas técnicas de cada material) (Cerâmica Vale da Gândara, 2012)

Configuração		Maciço		Perfurado	
<b>Dimensões (comprimento x largura x altura)</b>		225x105x50mm		240x115x50mm	
		225x105x70mm		240x115x70mm	
<b>Tolerâncias dimensionais</b>	Valor médio	T2		T2	
	Amplitude	R2		R2	
<b>Volume de todos os vazios moldados</b>		≤ 25%		≤ 45%	
<b>Massa volúmica / tolerância</b>	Aparente seca	1900 kg/m <sup>3</sup>	D1	1200 kg/m <sup>3</sup>	D1
	Absoluta seca	2000 kg/m <sup>3</sup>		2100 kg/m <sup>3</sup>	
<b>Resistência à compressão / Categoria</b>		≥ 45 N/mm <sup>2</sup>	II	≥ 45 N/mm <sup>2</sup>	II
<b>Absorção de água</b>		≤ 8 %		≤ 6 %	
<b>Taxa inicial de absorção de água</b>		≤ 0,9 kg/(m <sup>2</sup> .min)		≤ 0,6 kg/(m <sup>2</sup> .min)	
<b>Durabilidade</b>		F2		F2	
<b>Expansão com a humidade</b>		≤ 0,20 mm/m		≤ 0,20 mm/m	
<b>Teor de sais solúveis ativos</b>		S2		S2	
<b>Eflorescências</b>		Não tem		Não tem	
<b>Reação ao fogo</b>		A1		A1	
<b>Propriedades térmicas - condutividade λ</b>		0,69 W/mK		0,37 W/mK	
<b>Permeabilidade ao vapor de água</b>		50/100		50/100	
<b>Aderência</b>		≥ 0,15 N/mm <sup>2</sup>		≥ 0,15 N/mm <sup>2</sup>	

#### 2.2.4 Normalização aplicável e requisitos de qualidade

Como forma de estabelecer condições harmonizadas para a comercialização de produtos de construção no Espaço Económico Europeu, o Parlamento Europeu e o conselho da União Europeia, aprovaram o Regulamento (UE) N° 305/2011, também conhecido por Regulamento dos Produtos da Construção. Este veio substituir a Diretiva N° 89/106/CEE de 1998 e tem, como base um referencial comum para avaliar os produtos, a fim de estes cumprirem os requisitos de adequabilidade que lhes são impostos (IPQ@2016).

Os requisitos a que cada produto deve corresponder são indicados nas respetivas normas de produto, estabelecidas nas Normas Europeias harmonizadas, reconhecidas em todo o Espaço Económico Europeu. Em Portugal, a norma adotada é a NP EN 771-1:2012 - Especificações para unidades de alvenaria. Parte 1: Unidades cerâmicas (tijolos cerâmicos). Esta norma especifica os tijolos cerâmicos de alvenaria e os ensaios de características aplicáveis (IPQ@2016; LNEC@2016).

---

Na construção das paredes de alvenaria face à vista, além dos tijolos e da argamassa, também são utilizados outros componentes, de forma a tornar a parede mais segura e mais resistente. São utilizados, a título de exemplo, grampos de amarração, ligadores, lintéis e armaduras de reforço para as juntas em malha de aço, quando necessário. Todos estes componentes têm de cumprir os requisitos presentes nas respetivas normas, a saber (CEN, 2005; LNEC@2016):

- NP EN 845-1:2013. Especificações de acessórios para alvenarias – Parte 1: Ligadores, grampos, de amarração, pendurais e cachorros de apoio;
- NP EN 845-2:2013. Especificação dos componentes acessórios para alvenaria – Parte 2: Lintéis;
- NP EN 845-3:2013. Especificação de acessórios para alvenaria – Parte 3: Armadura em malha de aço para juntas horizontais.

### **2.2.5 Características das argamassas de assentamento**

Representando cerca de 20% da área visível num pano de parede em tijolo face à vista, a argamassa é um elemento com bastante importância, tanto a nível estético como funcional da parede (Camarneiro, 2002).

O Manual de Aplicação de TFV da Cerâmica Vale da Gândara (Cerâmica Vale da Gândara, 2012), indica que as argamassas utilizadas neste tipo de paredes devem ser hidrófugas, elásticas e impermeáveis, através de uma mistura de materiais inorgânicos (cimento e/ou cal), água de amassadura (reduzido ao mínimo), areia e aditivos. Devem ainda respeitar a norma NP EN 998-2:2013 – Especificação de argamassas para alvenarias. Parte 2: Argamassas de assentamento (LNEC@2016).

*Radovanović et al.*, (2015), concluíram que em paredes de alvenaria a utilização de argamassas com elevada resistência à compressão não significa, necessariamente, que a parede se torne mais resistente. A argamassa afeta não só a resistência à compressão da parede como o mecanismo global de fratura da mesma, sendo que a utilização de argamassa com elevada resistência e elementos com pequena resistência à compressão diminui a carga da parede de alvenaria, e tornando-a mais frágil. Os mesmos autores observaram ainda que, aumentando a quantidade de cal na mistura da argamassa, é possível melhorar a ductilidade da parede de alvenaria (Radovanović et al., 2015).

No caso de paredes não resistentes em TFV, as argamassas não devem ultrapassar valores de resistência à compressão superiores a 7,5 MPa. Já quando se trata de paredes resistentes em TFV, é conveniente que se estabeleça uma correlação entre a resistência do TFV e a da argamassa, nunca utilizando uma resistência de argamassa superior à do tijolo (Cerâmica Vale da Gândara, 2012). As juntas de assentamento de argamassa, segundo Camarneiro, tanto verticais como horizontais, em paredes de TFV devem ter espessura a variar entre 1 e 1,5 cm.

O autor recomenda ainda que o traço das argamassas não deve ser superior a 1:5 (cimento Portland / areia) (Camarneiro, 2002).

### 2.2.6 Resistência das alvenarias

O conhecimento do comportamento mecânico das paredes de alvenaria é fundamental mesmo no caso em que estas apresentam apenas função de preenchimento. Todas as paredes estão expostas a diferentes tipos de ações provocando-lhes variadas solicitações mecânicas. Como resposta, a estabilidade das referidas paredes tem de estar sempre assegurada, apesar do contributo resistente nem sempre ser tido em conta nas análises estruturais. Essa desconsideração pelos princípios da estabilidade mecânica das paredes de alvenaria pode causar graves anomalias (Apicer, 2000).

A resistência mecânica das paredes de alvenaria está diretamente dependente das características mecânicas dos elementos que a constituem, sendo eles os elementos de alvenaria (tijolos) e a argamassa de assentamento. Contudo, a resistência da parede vai ainda depender das resistências de aderência do conjunto, das características geométricas e das ligações da parede com a estrutura de suporte. Juntamente com os aspetos anteriormente referidos, a disponibilização de mão-de-obra qualificada, tempo de construção necessário e ainda a elaboração da construção consoante o respetivo cronograma geral são fundamentais para a resistência das alvenarias (Radovanović et al., 2015).

De acordo com o EC6, são três as propriedades mecânicas essenciais para o projeto de paredes de alvenaria: resistência à compressão, resistência ao corte e resistência à flexão. As características da parede podem ainda ser completadas com o conhecimento relativamente à relação entre tensões e deformações, ao módulo de elasticidade, fator de ductilidade, módulo de distorção e resistência à tração (CEN, 2005; Silva, 1998).

A resistência característica à compressão de paredes de alvenaria pode ser calculada através da seguinte expressão, apresentada no EC6 (CEN, 2005):

$$f_k = K \cdot f_b^\alpha \cdot f_m^\beta \quad (2.1)$$

Onde,

- $f_k$  – Resistência característica da alvenaria à compressão simples ( $N/mm^2$ );
- $f_b$  – Resistência média normalizada do tijolo à compressão ( $N/mm^2$ );
- $f_m$  – Resistência média da argamassa à compressão ( $N/mm^2$ );
- $K, \alpha, \beta$  – Constantes dependentes do tipo de unidades e tipo de paredes.

Em relação à resistência característica ao corte, o EC6 sugere que para paredes de alvenaria simples, com argamassa convencional e com todas as juntas preenchidas, esta pode ser calculada através da seguinte expressão (CEN, 2005):

$$f_{vk} = f_{vko} + 0,4 \sigma_d \quad (2.2)$$

Sendo que o valor de  $f_{vk}$  não pode ser superior a  $0,065.f_b$  ou  $f_{vlt}$ .

Onde:

- $f_{vk}$  – Resistência característica da alvenaria ao corte ( $N/mm^2$ );
- $f_{vko}$  – Resistência característica inicial da alvenaria ao corte, sob compressão nula ( $N/mm^2$ );
- $\sigma_d$  – Tensão de compressão atuante ( $N/mm^2$ );
- $f_b$  – Resistência à compressão dos elementos de alvenaria ( $N/mm^2$ );
- $f_{vlt}$  – Valor limite para  $f_{vk}$  ( $N/mm^2$ ).

Relativamente à resistência à flexão, o EC6 indica que esta pode ser determinada através de testes de acordo com a norma EN 1052-2 ou pela avaliação de dados com base nas resistências à flexão da alvenaria, obtidos a partir de combinações adequadas entre elementos de alvenaria e argamassa. Existem dois planos de rotura a ter em conta na determinação da resistência à flexão: plano de rotura paralelo às juntas de assentamento ( $f_{xk1}$ ) e o perpendicular às juntas de assentamento ( $f_{xk2}$ ) (figura 2.2) (CEN, 2005).

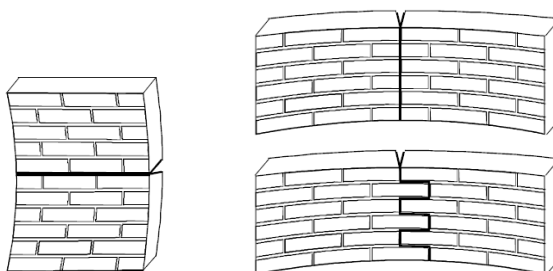


Figura 2. 2 – Plano de rotura paralelo às juntas de assentamento ( $f_{xk1}$ ) e plano de rotura perpendicular às juntas de assentamento ( $f_{xk2}$ ), respetivamente (CEN, 2005)

Muitas vezes desprezada, devido ao seu reduzido valor em comparação com a resistência à compressão, a resistência à tração das paredes de alvenaria tem uma importância fundamental no comportamento desta. Verifica-se que em muitos casos de fissuração, devido a processos de rotura, estas se desenvolvem por inadequada resistência à tração da respetiva parede. O conhecimento da resistência à tração em projetos de alvenaria sob ações térmicas é indispensável. Os valores da resistência à tração das paredes de alvenaria podem ser assumidos como cerca de 10% do valor da resistência à compressão da respetiva parede (Silva, 1998).

Em paredes de alvenaria que apresentem baixa resistência à tração este fator é limitante. Para o solucionar é possível reforçar a parede com armaduras nas juntas de assentamento, tanto verticais como horizontais. As armaduras são constituídas por varões longitudinais (resistentes) e por varões transversais (construtivos) (Apicer, 2000).

### 2.3 Juntas de dilatação

As paredes de alvenaria, estando expostas a condições ambientais externas sofrem variações de temperatura e de teor de humidade que vão provocar movimentos naturais de expansão ou contração nos elementos que constituem a parede. A inexistência de juntas de dilatação faz com que, uma vez impedidos os movimentos, estes provoquem frequentemente fenómenos de fissuração, esmagamento localizado e destacamento de revestimentos. Esta situação torna-se mais grave quando os materiais apresentam movimentos irreversíveis (Silva, 1998).

Numa parede de alvenaria, a tensão média instalada pode não ser o fator mais gravoso, quando esta é de compressão, uma vez que a parede possui, na maioria das vezes, elevada resistência para este tipo de esforços. Contudo, sendo que este fenómeno se dá principalmente na horizontal, provoca concentração de tensões em vários pontos e tensões de corte elevadas na interface entre o tijolo e as juntas horizontais de argamassa. As primeiras originam esmagamento e destacamento lateral enquanto as segundas originam fissuração horizontal com levantamento das faixas superiores da alvenaria, menos sujeitas a cargas verticais. Geralmente, quando as tensões são de tração acontece fissuração horizontal nas juntas de assentamento e fissuração vertical na ligação a elementos confinantes com maior rigidez. São criadas também tensões de corte na ligação aos revestimentos rígidos provocadas pela restrição de movimentos (Silva & Abrantes, 2007).

Segundo Camarneiro, (2002), uma vez que a Europa se encontra situada no hemisfério Norte, num edifício, a fachada Oeste é aquela que sofre variações térmicas mais significativas, uma vez que se encontra mais exposta ao sol. Desta forma, o autor propõe que as juntas de dilatação devem estar afastadas entre 7 e 8 metros de distância. A fachada orientada a Sul é a que se segue na hierarquia das mais afetadas pelas variações térmicas, pois durante o dia o Sol atinge-a com bastante incidência, devendo, assim, haver juntas de dilatação entre 8 e 9 metros. Apesar do sol incidir durante boa parte da manhã na fachada Este, esta não sofre grande variação térmica, pois, nesta altura do dia, a temperatura ainda se encontra baixa. Para este caso o autor sugere uma distância entre juntas de dilatação a variar entre 10 e 12 metros. A fachada menos afetada é a Norte, pois tem menos exposição solar, fazendo com que as variações de temperatura entre o dia e a noite sejam menores. É sugerido assim uma variação entre 12 e 14 metros de distância entre as juntas (Camarneiro, 2002). O autor defende, em sintonia com o Manual de Aplicação de TFV da Cerâmica Vale da Gândara, (2012), que as juntas de dilatação devem ter entre 15 e 20 milímetros de espessura.

As juntas de dilatação apenas devem ser realizadas no pano exterior da parede de alvenaria, uma vez que este é o mais afetado pelas variações térmicas, entre o dia e a noite. Quando a parede possui isolamento térmico entre os dois panos, a variação de temperatura do pano interior é praticamente irrelevante e o calor proveniente do interior do edifício não influencia o pano exterior. Este fica assim sujeito principalmente à variação térmica diária e à variação térmica sazonal (Cerâmica Vale da Gândara, 2012).

Quando não são executadas juntas de dilatação numa parede de alvenaria, onde elas são realmente necessárias, mais cedo ou mais tarde, os próprios materiais acabam por criar essas mesmas juntas, que se vão tornar num ponto negativo a nível estético e funcional da própria fachada (Camarneiro, 2002). Contudo, a criação de juntas de dilatação, por si só, não costuma ser suficiente para prevenir todos os defeitos que aparecem numa parede. É necessário, antes disso, um estudo sobre as características expansivas do tijolo a aplicar. Recorre-se muitas vezes a processos de pré-expansão do tijolo, ainda na fase de produção, que reduzem os fenómenos de expansão do mesmo (Silva, 1998).

As juntas de dilatação devem ser previstas e executadas junto aos cunhais, em especial nos que fazem a ligação entre as fachadas orientadas a Sul e Oeste e também, sempre que existam pontos de relativa fraqueza, como no caso de janelas e portas de grandes dimensões. Sempre que as soluções construtivas o justifiquem, ou a cada 6 metros de altura, devem ser previstas juntas de dilatação horizontais (Cerâmica Vale da Gândara, 2012). No que se refere aos revestimentos utilizados nas juntas, na maioria dos casos é utilizado mástique para tornar este dispositivo impermeável. Uma vez que o mástique é bastante solicitado, tanto pelas condições a que está exposto como pelas variações dimensionais que sofre, é essencial que se escolha um material com as características adequadas para possibilitar que a duração do mesmo seja a espectável (Pereira, 2008). A título de exemplo, na figura 2.3 apresentam-se dois exemplos de juntas.

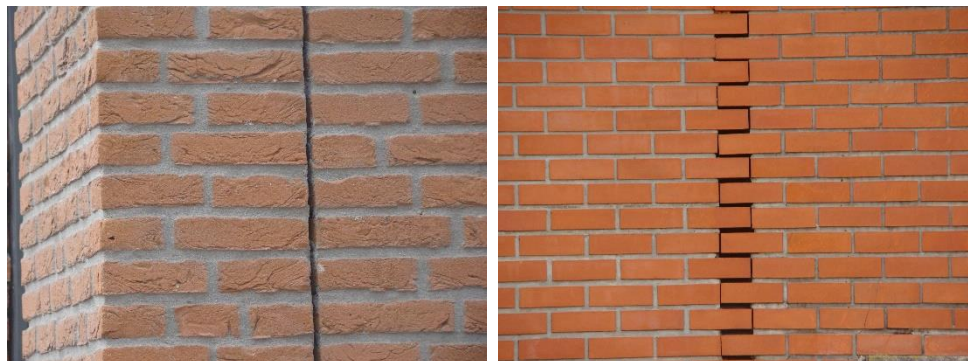


Figura 2. 3 – Junta de dilatação vertical retilínea e junta de dilatação vertical em zig-zag, respetivamente (cedidas por J. M. Silva)

## 2.4 Fatores que influenciam os movimentos nas paredes

### 2.4.1 Enquadramento geral

Quando se faz o projeto de um edifício tem de se pensar na sua estrutura considerando-a como um complexo mecanismo ativo, não sendo fisicamente inerte. A forma de construção, assim como a natureza dos materiais utilizados devem ser tidos em consideração, uma vez que os efeitos mais significativos resultam da interação entre dois ou mais materiais (Building Research Establishment Digest, 1979).



---

*Beasley*, (2012) citado em Lima et al., (2014), afirma que para se perceber o comportamento das fachadas que constituem os edifícios, é imprescindível conhecer-se as suas características e as suas vulnerabilidades. Uma vez que as paredes de fachada são o principal elemento de proteção entre o meio ambiente exterior e os diversos elementos que constituem o edifício, absorvem maior quantidade de ações resultantes das variadas intempéries climáticas, que provocam ao longo dos tempos, degradação da fachada. Caso não seja controlada, pode conduzir a graves danos nos materiais constituintes tanto da fachada como dos demais elementos do edifício (Lima et al., 2014).

Paiva, (1985), citado em Silva, (1998), defende que a fissuração é uma das quatro principais patologias não estruturais que frequentemente aparecem nos edifícios. A par desta, encontram-se ainda as anomalias provenientes da ação da humidade, as originadas pelo envelhecimento dos materiais e as provenientes dos desajustamentos face a determinadas exigências. A fissuração pode assumir, muito frequentemente, um papel de causa e efeito, sendo resultado de outros tipos de patologias (Silva, 1998).

Segundo Silva, (2002), os movimentos mais relevantes que podem interferir no normal desempenho de uma estrutura, e posteriormente causar fissuração nos edifícios, estão relacionados com os movimentos da fundação, ações de cargas externas, deformação do suporte da parede, variações de temperatura, variações de humidade, ações do gelo e ataques químicos. Grande parte das fissuras em paredes de alvenaria resultam da incapacidade de adaptação a estes movimentos. Deste modo, é necessário definir-se, para cada um destes movimentos, as características e a ordem de grandeza das ações, o seu efeito sobre a parede e os seus constituintes, e ainda, definir medidas para assegurar que o desempenho final corresponde ao nível de qualidade pretendido (Silva, 2002).

Os diversos movimentos possíveis a atuar nas paredes de alvenaria dão origem a tensões, que tanto podem ser de compressão como de tração. Estes originam também tensões de cisalhamento na interface entre as diversas camadas. Quando as tensões criadas excedem a capacidade resistente dos materiais e das suas ligações podem dar origem a diversos problemas relacionados com a própria estabilidade do conjunto, problemas de fissuração, ou ainda, problemas relacionados com movimentos incompatíveis que podem causar falhas de aderência nas ligações entre materiais e destacamento de revestimento ((Sabbatini & al, 1990); (Fiorito, 1994) citados em (Ribeiro, 2006)).

Problemas relacionados com movimentos relativos, principalmente devido a dilatações e contrações térmicas, tendem a ser mais acentuados devido às diferentes formas de construção, em especial devido aos seguintes fatores (Building Research Establishment Digest, 1979):

- Utilização de unidades maiores e com menos juntas, o que potencia maiores movimentos em cada uma das juntas;

- Maior movimentação térmica de alguns materiais utilizados, como o caso do plástico, que apresenta coeficientes de expansão térmica até 10 vezes superiores ao da maioria dos materiais utilizados;
- A utilização de secções finas, cuja capacidade térmica é baixa, aumentando os intervalos de temperatura a que um material fica sujeito, quando submetido a condições ambientais extremas.

Um aspeto bastante importante, quando se trata de movimentos naturais nas paredes de alvenaria, é o facto desses mesmos movimentos poderem ser reversíveis ou irreversíveis. Os reversíveis referem-se àqueles que, retirando o agente causador, retomam as dimensões iniciais. Os irreversíveis referem-se aos que, mesmo depois de retirada a ação sobre o mesmo, não recuperam as características e dimensões iniciais, são permanentes (Building Research Establishment Digest, 1979).

Apesar de serem várias as possíveis fontes de movimento num edifício, neste trabalho vão ser focados os movimentos naturais (variações de temperatura, variações de humidade, ações do gelo e ataques químicos), na fissuração das paredes de alvenaria não estruturais.

## **2.4.2 Variações de temperatura**

### **2.4.2.1 Descrição do fenómeno**

Silva, (1998), afirma que no estudo da fissuração de paredes de alvenaria de tijolo, as solicitações térmicas mais significativas estão relacionadas com as variações de temperatura a que os edifícios estão sujeitos. Estas são originadas pelas variações climáticas exteriores naturais e ainda, pela variação, tanto natural como artificial, da temperatura interior (Silva, 1998).

A variação de temperatura provoca, nos elementos construtivos que constituem os edifícios, variações dimensionais na forma de expansão, quando há aumento de temperatura e contração, quando há diminuição de temperatura. Estes movimentos de origem térmica, expansão e contração, ocorrem de forma diferencial entre as camadas e são restringidos pelas ligações entre os diversos materiais. Podem provocar tensões de compressão ou de tração nas camadas e de cisalhamento na interface entre as mesmas (Ribeiro, 2006).

As variações de temperatura que os materiais constituintes das paredes de alvenaria podem sofrer dependem de diversos fatores de natureza ambiental, nos quais se enquadram a temperatura do ar, radiação solar, humidade do ar, vento, precipitação, neve e gelo. Contudo, é difícil fazer uma distinção sobre o “peso” de cada um destes fatores na variação total da temperatura dos materiais, uma vez que pode atuar em simultâneo mais do que um fator (Silva, 1998).

Todos os materiais estão sujeitos a um certo aumento das suas dimensões quando a sua temperatura também aumenta. A quantidade pela qual os diferentes materiais alteram de

tamanho para uma dada diferença de temperatura varia amplamente. Em certos casos, a dilatação térmica dos materiais é praticamente igual em todas as direções (Building Research Establishment Digest, 1979). Os elementos construtivos têm reações próprias relativamente às solicitações térmicas a que são sujeitos, sendo influenciados pela própria geometria, pelas condições de exposição, existência de eventuais elementos de proteção e ainda pelos materiais que o constituem. As diferentes temperaturas que os materiais podem atingir, sob as mesmas solicitações, dependem da condutibilidade térmica, do coeficiente de absorção da radiação solar, da massa específica e do calor específico (Silva, 1998).

As dilatações e contrações provocadas nos diversos materiais podem ser representadas através da seguinte expressão (Silva, 1998):

$$\Delta L = L \cdot \alpha \cdot \Delta T \quad (2.3)$$

Onde:

- $\Delta L$  – Variação de comprimento (m);
- $L$  – Comprimento inicial do elemento construtivo (m);
- $\alpha$  – Coeficiente de dilatação térmica linear do material (m/m°C);
- $\Delta T$  – Variação de temperatura do material (°C);

#### **2.4.2.2 Fissuração devido às variações de temperatura**

De acordo com Lucas, (1987), as fissuras relacionadas com as variações de temperatura têm, na sua maioria, um comportamento cíclico, isto porque a abertura das mesmas é proporcional às constantes variações de temperatura dos diversos materiais. No entanto, depois de formadas, as fissuras funcionam também como junta de dilatação, fazendo com que as aberturas cíclicas das mesmas não sejam influenciadas apenas pelas variações de temperatura, como também pela resposta destas aos movimentos da própria parede (Silva, 1998).

A fissuração de origem térmica nas paredes de alvenaria e nas suas ligações exteriores pode resultar, tanto de movimentos da própria parede como da dilatação ou contração de outros elementos construtivos aos quais se encontra ligada rigidamente, principalmente coberturas e estruturas porticadas. As variações de temperatura a que as paredes de alvenaria estão sujeitas podem ser de carácter uniforme, diferencial, cíclico ou brusco (Silva, 1998).

As coberturas dos edifícios, face à sua exposição à radiação solar, sofrem durante o dia um elevado aquecimento, enquanto, durante a noite, e devido às trocas de calor com a abóbada celeste, sofrem um significativo arrefecimento. Essas variações de temperatura irão provocar movimentos na cobertura que não vão ser acompanhados pelos restantes materiais que estão ligados a esta, por estarem sujeitos a menores variações de temperatura, terem menores coeficientes de dilatação térmica ou possuírem ligações rígidas e confinamentos que impedem o deslocamento horizontal, ocasionando, desta forma, fissuração nas paredes. Este

acontecimento é mais gravoso quando as coberturas são em betão ou aço, uma vez que estes materiais apresentam elevados coeficientes de dilatação térmica (Thomaz, 1989; Silva, 1998).

Os movimentos de contração e dilatação provocados por variações uniformes de temperatura podem provocar um aumento significativo das tensões e possibilitar a conseqüente fissuração em variadas situações, realçando-se (Pereira, 2008):

- “(...) Zonas de ligação da parede com outros elementos construtivos;
- Cunhais não reforçados e ligações de paredes de fachada com paredes interiores;
- Zonas da parede onde a geometria favoreça a concentração de tensões;
- Juntas, revestimentos e apoios;
- Paredes não confinadas;
- Ligação tijolo-argamassa, devido à dilatação diferencial (...)”;

As diferentes condições de insolação e sombreamento, a variação da cor e textura dos diferentes materiais de revestimento, a existência de zonas com diferentes resistências térmicas e a possibilidade de existência de fontes de calor interiores podem provocar nas paredes de alvenaria um aquecimento diferencial, provocando, em seguida, a fissuração nos pontos frágeis e nas zonas de transição de temperatura. Quando o aquecimento diferencial se dá ao longo da espessura da parede pode originar fissuras nas juntas horizontais, arqueamento ou a perda de estabilidade da estrutura, em casos onde os panos exteriores são mal apoiados ou insuficientemente grampeados (Silva, 1998).

As variações cíclicas de temperatura podem incluir, tanto variações diferenciais como uniformes, através de intervalos regulares de diferentes seqüências de evolução da temperatura. Já no que se refere a variações bruscas de temperatura, um dos exemplos mais relevantes é o caso de uma parede exposta ao sol que arrefece bruscamente devido à ação da chuva. É particularmente grave no verão, devido ao facto de ser nesta época que as temperaturas atingidas pelas paredes são mais elevadas. Representa um típico caso de choque térmico, provocando tensões elevadas entre a camada superficial e as camadas subjacentes, assim como na própria camada superficial, devido à diferente dilatação ou contração das partículas de cada material (Silva, 1998).

De acordo com a *British Standard* (BSI – BS 8200), existem duas expressões simplificadas para o cálculo da temperatura máxima superficial dos revestimentos de paredes. Estas dependem da temperatura do ar, do coeficiente de absorção solar e ainda da capacidade térmica dos materiais. A expressão 2.4 refere-se aos revestimentos com reduzida capacidade térmica, enquanto a 2.5 se refere aos que apresentam elevada capacidade térmica, admitindo pelo menos uma massa de  $100\text{kg/m}^2$  (Silva, 1998).

$$T_s = T_{ar} + 55.\alpha_s \quad (2.4)$$

$$T_s = T_{ar} + 40.\alpha_s \quad (2.5)$$

Onde:

- $T_s$  – Temperatura máxima superficial do revestimento (°C);
- $T_{ar}$  – Temperatura máxima do ar (°C);
- $\alpha_s$  – Coeficiente de absorção da radiação solar.

De acordo com a Cerâmica Vale da Gândara, os coeficientes de absorção da radiação solar ( $\alpha_s$ ), no caso de paredes com revestimento em tijolo face à vista, variam consoante a cor dos respetivos tijolos. No caso de tijolos brancos varia entre 0,2 e 0,3, enquanto nos tijolos de cor amarela, laranja ou cor de tijolo varia entre 0,3 e 0,5. Já para tijolos castanhos ou castanho-escuro, o valor do coeficiente de absorção da radiação solar varia entre 0,7 e 0,9 (Cerâmica Vale da Gândara, 2012).

### **2.4.3 Ação da humidade**

#### **2.4.3.1 Descrição do fenómeno**

A humidade nas paredes de alvenaria é caracterizada pela presença de água na forma líquida, sólida ou vapor nos materiais constituintes das mesmas. Na maioria das vezes, a sua ação provoca o aumento do volume dos elementos, aquando do aumento de humidade, e a diminuição do volume quando a humidade é reduzida (Ribeiro, 2006).

A presença de humidade nas paredes, além de provocar a fissuração das mesmas, é também responsável por outras deficiências funcionais, como infiltrações, eflorescências, degradação dos materiais, condensações, fungos, bolores, insalubridade e ataques químicos (Silva, 1998).

Segundo Silva, (1998), os problemas de fissuração presentes nas paredes de alvenaria relacionados com questões de humidade resultam dos movimentos higroscópicos dos materiais, da expansão do tijolo, da retração das argamassas, dos ataques químicos e do gelo.

Os tijolos cerâmicos e a argamassa hidráulica são designados como materiais higroscópicos, ou seja, tendem a absorver ou expulsar certas quantidades de humidade, quando envolvidos em ambientes termo-higrométricos (Silva, 1998). Thomaz, (1989) afirma que a quantidade de água que é absorvida por cada material está diretamente relacionada com dois fatores: porosidade e capilaridade. É, no entanto, o segundo que se releva mais importante, na medida em que a secagem dos materiais porosos provoca o aparecimento de forças de sucção que conduzem a água até à superfície dos elementos, evaporando-se, depois de um certo período de tempo (Thomaz, 1989).

#### **2.4.3.2 Fissuração devido à variação de humidade**

Todos os materiais porosos sofrem alterações de volume com as variações de humidade, podendo esses movimentos ser reversíveis ou irreversíveis (Building Research Establishment Digest, 1979). Os movimentos irreversíveis estão, na maioria dos casos, diretamente relacionados com o período pós fabrico, onde se dão alguns fenómenos químicos e físicos

inerentes à produção. Estes movimentos prolongam-se no tempo, durante meses ou anos, diminuindo progressivamente de intensidade, até deixarem de ter significado, situação que acontece quando a sua ordem de grandeza passa a ser inferior, tanto aos movimentos reversíveis nas condições correntes, como aos necessários para a fissuração dos elementos construtivos. Em relação aos movimentos reversíveis, estes estão relacionados com o próprio processo de construção, o contacto com o terreno, a exposição à chuva, os fenómenos de condensação e higroscopicidade e, ainda, com causas fortuitas (perda de estanquidade de coberturas, rotura de canalizações, etc) (Silva, 1998).

Os diversos tipos de materiais podem sofrer retrações ou expansões irreversíveis e, subsequentemente, movimentos reversíveis se forem sujeitos a mudanças de humidade durante a fase de utilização. Estes movimentos não têm necessariamente a mesma magnitude em todas as direções (Building Research Establishment Digest, 1979). Através da figura 2.4 podemos observar os dois tipos de movimentação higroscópica, da qual se conclui que a movimentação higroscópica irreversível ocorre em maior magnitude do que a reversível.

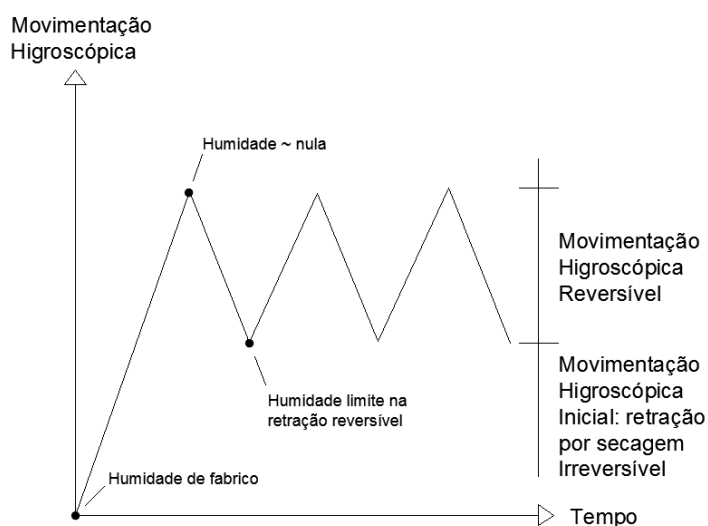


Figura 2. 4 – Movimentação higroscópica dos materiais (adaptado de (Ribeiro, 2006))

A retração inicial ou irreversível das argamassas na fase de endurecimento das mesmas origina tensões internas de tração e de cisalhamento na interface argamassa / tijolo, causando fissuras, uma vez que a resistência mecânica das camadas no início ainda é pequena. A movimentação higroscópica reversível ocorre de forma cíclica, de acordo com os ciclos de molhagem e secagem dos diferentes materiais, originando movimentos diferenciais nas várias camadas constituintes da parede. Desta forma, podem dar origem a fissuras e descolamentos entre as camadas (Ribeiro, 2006).

A fissuração devido à variação de humidade está, na maioria dos casos, relacionada com fenómenos de retração dos materiais. Estas fissuras de retração desenvolvem-se sobretudo na vertical ou com um pouco de inclinação e espaçamentos regulares entre si, dependentes das

características, tanto da parede, como das solicitações higrométricas a que está sujeita. Os casos de fissuração devido à expansão dos materiais, por aumento do teor de humidade, referem-se, maioritariamente, a situações de paredes não confinadas, fachadas cortina com apoios e grampeamento desadequados ou em elementos construtivos confinantes, como o caso de paredes perpendiculares às que sofrem a expansão (Silva, 1998).

Em paredes de alvenaria onde os tijolos apresentam baixa resistência à tração, a fissuração vertical pode atravessar esses mesmos tijolos, apresentando fissuras com larguras mais consideráveis. No caso de tijolos com maior resistência e argamassa com menor, a fissuração segue o traçado das juntas. Para certos autores, este fenómeno é mais favorável, na medida em que cria uma melhor distribuição das fissuras e faz com que a sua abertura seja menor (Silva, 1998).

#### **2.4.4 Retração hidráulica da argamassa e expansão irreversível do tijolo**

Quando se projetam paredes de alvenaria de tijolo, com juntas de argamassa hidráulica, devem ser tidos em conta os movimentos de irreversibilidade, tanto dos tijolos como das argamassas. Estes movimentos ocorrem no início de vida dos materiais, logo após o fabrico. No caso da argamassa, este processo é designado por retração hidráulica e é influenciado pelas relações entre o tipo de cimento, tipo de inertes, traço e água da amassadura e pelo processo de cura (Silva, 1998).

A retração excessiva, para o caso de juntas de assentamento, origina o enfraquecimento ou rotura das ligações entre o tijolo e a argamassa, tendo implicações diretas na resistência global da parede (Silva, 1998). Após a aplicação da argamassa no suporte, inicia-se a sua retração de secagem, a qual é restringida pela aderência ao respetivo suporte, provocando, desta forma, o aparecimento de tensões de tração na argamassa e de corte no plano de contacto da argamassa com o suporte. Este fenómeno pode originar casos de significativa fissuração na parede de alvenaria (Rodrigues, 2004).

Em relação ao tijolo, os materiais cerâmicos sofrem contrações após a cozedura, devido ao processo de arrefecimento a que são expostos, até ser atingida a temperatura ambiente. Sofrem, também, expansões resultantes da absorção de água da atmosfera, atingindo-se dessa forma a humidade de equilíbrio. Apesar destes movimentos serem considerados reversíveis, nunca chegam a sê-lo durante a vida útil dos materiais. O tijolo sofre ainda expansão irreversível resultante da absorção química de moléculas de água, que afeta principalmente aqueles que provêm de uma cozedura deficiente (Silva, 1998). Segundo Menezes et al., (2006), pode-se concluir que, o processo de expansão é caracterizado por uma expansão rápida logo após o fabrico do tijolo (dias ou horas) e uma subsequente expansão, que pode durar dezenas de anos, com menor expressão.

De acordo com um trabalho realizado por Silva et al., (2015), concluiu-se que a argamassa pode ter variações reversíveis entre 0,02 e 0,06 % e -0,1 % para o caso das irreversíveis. No caso dos

---

tijolos cerâmicos, estas variações situam-se nos 0,02 % para movimentos reversíveis e 0,1 % para os irreversíveis (Silva et al., 2015).

#### **2.4.5 Choque térmico**

Este fenómeno caracteriza-se pela criação repentina de um estado de tensão elevado, resultante da diferença de temperaturas existente entre a superfície do material e a camada interior subjacente. Este fenómeno afeta principalmente revestimentos de menor espessura, assentes em paredes com condutibilidade térmica baixa ou sobre isolante, quando expostos a variações bruscas de temperatura. Desta ação podem resultar fenómenos de fissuração elevada, superiores aos que se obteriam caso as variações de temperatura não fossem tão repentinas. Um exemplo bastante frequente, prende-se com uma situação de uma chuvada repentina sobre uma parede de cor escura, aquecida pelo sol, em que a parede sofre um arrefecimento brusco da sua temperatura (Silva, 1998).

#### **2.4.6 Outros casos**

Dentro dos fenómenos de fissuração por humidade destacam-se ainda a ação do gelo e o ataque por sulfatos. A degradação das paredes de alvenaria sob ação do gelo é provocada através da expansão de volume, que afeta cada um dos materiais constituintes das mesmas, aquando da congelação da água existente no interior dos poros de cada material. A ocorrência deste fenómeno implica a existência de materiais porosos, de água e a ocorrência de temperaturas muito baixas (Silva, 1998). As principais propriedades a ter em conta quando se avalia a resistência ao congelamento e descongelamento dos materiais são a resistência e deformabilidade (propriedades mecânicas) e ainda, a permeabilidade e porosidade (propriedades físicas). (Perrin & al, 2011; Cultrone et al., 2004).

São vários os fenómenos químicos que estão associados à construção, sendo que estes se podem desenvolver durante o próprio processo de construção ou depois da mesma. No âmbito deste estudo os fenómenos químicos com mais importância são a hidratação retardada da cal, a corrosão das armaduras e a expansão das argamassas por ataques de sulfatos (Coimbra, 2010). Destes, o ataque por sulfatos é o mais preocupante. Pode formar etringite e/ou taumasite quando, na presença de humidade, os sulfatos reagem com determinados constituintes das alvenarias. A etringite resulta da reação entre os sulfatos e os aluminatos de cálcio hidratados provocando expansão ou fendilhação da argamassa, enquanto a taumasite provém da reação entre os sulfatos e os silicatos de cálcio hidratados e provoca a perda de coesão e resistência das argamassas. Estes fenómenos podem ocorrer simultaneamente (Rodrigues, 2004).

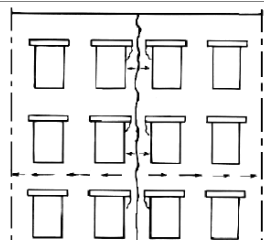
#### **2.4.7 Exemplos de fissuração típica em paredes de alvenaria**

São apresentados a seguir (quadro 2.4), alguns exemplos de tipos de fissuração que correntemente afetam as paredes de alvenaria, consoante os agentes causadores.

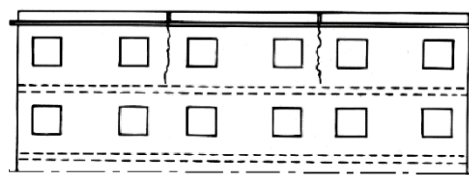


Quadro 2. 4 - Exemplos de tipos de fissuração típica nas paredes de alvenaria devido a fenómenos de variação de temperatura e humidade (Silva, 1998)

- Fissuração típica de paredes de alvenaria de grande extensão, por ausência de juntas de dilatação.

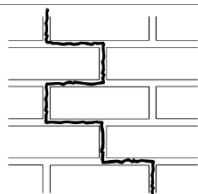


Criação de junta natural por fissuração

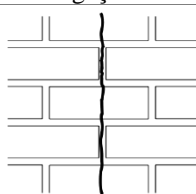


Propagação da fissuração impedida pelos pavimentos

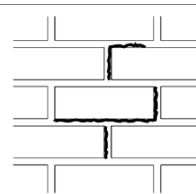
- Fissuração devido a expansão ou contração, dependentes da resistência relativa dos materiais e das ligações.



Fissuração contínua pelas juntas de argamassa (degraus)

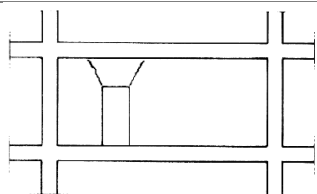


Fissuração trespassante (tijolos pouco resistentes)

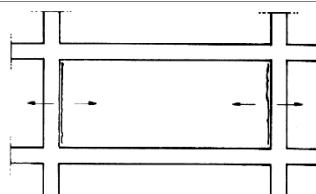


Fissuração localizada em algumas ligações

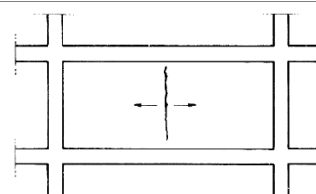
- Tipos de fissuração em paredes de alvenaria, devido à variação do teor de humidade.



Concentração de esforços junto às aberturas

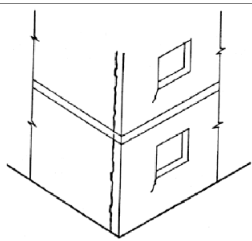


Ligações menos resistentes do que a parede

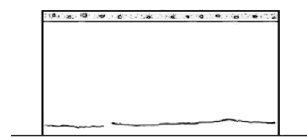


Parede com reduzida resistência à tracção

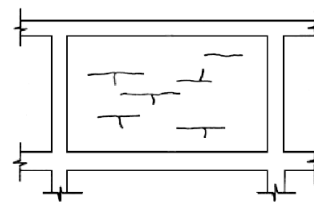
- Fissuração devido à expansão por humidade.



Fissuração por expansão em cunhais não travados



Fissuração na base da parede por expansão devida à humidade do solo



Fissuração por expansão do tijolo com a humidade

## 3 CONCEÇÃO DO MODELO

### 3.1 Introdução

#### 3.1.1 Enquadramento

Neste capítulo pretendeu-se fazer a caracterização de uma parede de alvenaria em tijolo face à vista, com o objetivo de simular e analisar as tensões induzidas pelos movimentos naturais a que esta está sujeita. Os movimentos naturais atuantes nesta modelação referem-se às ações devido às variações de temperatura e às ações devido à humidade. Este estudo realizou-se com recurso a um programa de elementos finitos, *Autodesk Robot Structural Analysis*.

Realizaram-se dois tipos de simulações, uma para a parede em alçado e outra para a parede em planta. Em cada uma destas simulações são caracterizados vários modelos, tendo em conta a disposição das juntas de dilatação e a geometria da parede.

#### 3.1.2 Simulação 1 (alçado)

Foram modeladas paredes em alçado com dimensões e geometria fixas, 20x3m, onde apenas varia a distribuição e quantidade de juntas de dilatação. A parede não dispõe de aberturas, à exceção das juntas de dilatação, é constituída por alvenaria de tijolo face à vista, encontrando-se ligada à base através de encastramento. A análise do comportamento das tensões é estudada ao longo da superfície do pano de parede. Com esta modelação pretende-se saber qual a melhor distribuição das juntas de dilatação numa parede de alvenaria sujeita às ações da temperatura e humidade.

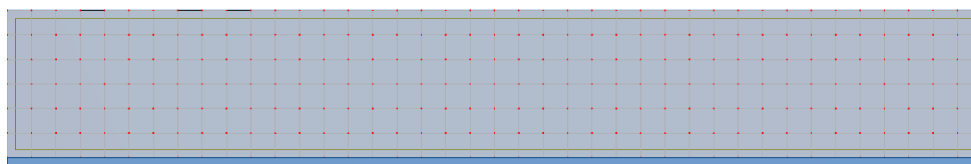


Figura 3.1 – Parede modelo (alçado) com 20 m de comprimento, 3 m de altura e 0,115 m de espessura (imagem retirada de *Autodesk Robot Structural Analysis*)

#### 3.1.3 Simulação 2 (alçado e planta)

Na segunda simulação testou-se a parede segundo diversos tipos de geometria, analisando-se, desta forma, o seu comportamento face aos movimentos naturais. Neste caso, a simulação dividiu-se em duas etapas. Inicialmente as paredes foram modeladas em alçado, tal como no caso anterior e, de seguida, analisado o seu comportamento face às diferentes ações. Desta

forma é possível comparar a distribuição das tensões obtidas na primeira modelação com as obtidas em paredes sem juntas de dilatação, mas com variações geométricas pontuais, que permitirão acomodar os movimentos de expansão / contração por deformação transversal.

Na segunda etapa, a parede foi analisada em planta, de forma a ser possível o estudo da evolução e distribuição das tensões ao longo da espessura da mesma. Uma vez que o programa utilizado não permite uma análise direta, foi necessário recorrer a um processo alternativo, a seguir explicado, para obtenção dos dados pretendidos. Inicialmente procedeu-se à realização de um corte longitudinal na zona onde a concentração e intensidade das tensões é mais elevada, ou seja, a 1/3 da altura da parede (corte AA') (figura 3.2), sendo de seguida analisados os deslocamentos obtidos na resposta às diferentes ações.

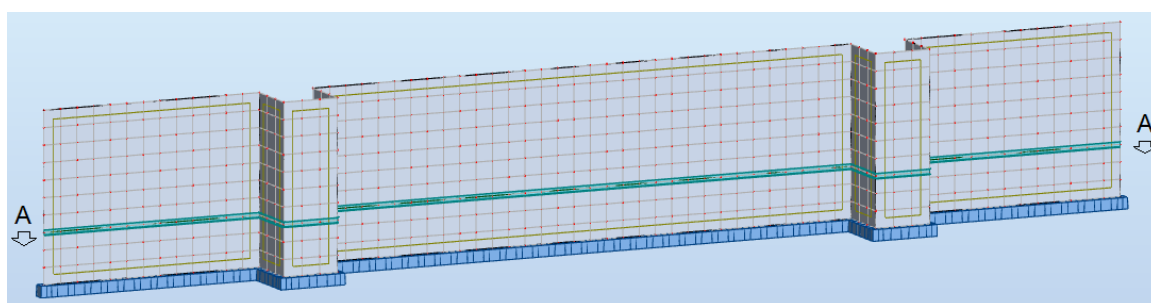


Figura 3.2 – Cortes representativos das zonas simuladas para os modelos em planta (imagem retirada de *Autodesk Robot Structural Analysis*)

Em seguida, procedeu-se à realização do respetivo modelo de parede em planta (figura 3.3), analisando-se a sua resposta às ações de temperatura e humidade, impondo como restrição os deslocamentos obtidos nos pontos extremos de cada corte. Esta restrição impôs-se através de uma força aplicada em cada extremidade lateral da parede, com intensidade necessária até ser atingido o deslocamento pretendido. Para o efeito, a parede encontrou-se apoiada num apoio duplo a meio e apoios simples ao longo do resto do comprimento, uma vez que em todos os modelos se apresentou simétrica.

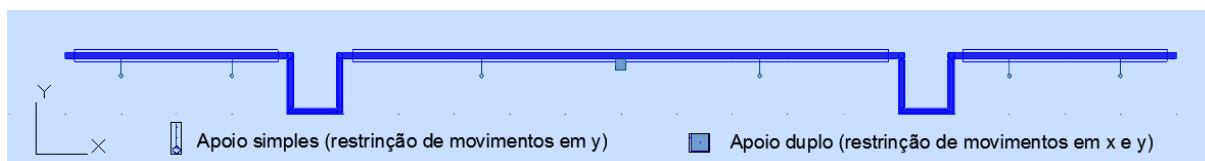


Figura 3.3 – Apoios utilizados na simulação dos modelos em planta (imagem retirada de *Autodesk Robot Structural Analysis*)

Esta abordagem, tem a vantagem de permitir analisar a parede ao longo da sua espessura, ao contrário da anterior, onde se obtêm tensões consideradas iguais ao longo da sua espessura, variando apenas ao longo do pano superficial.

Existem dois tipos possíveis de modelação, a macro-modelação e a micro-modelação (figura 3.4). A micro-modelação analisa as juntas de argamassa e os blocos de tijolo em separado, enquanto, na macro-modelação não há distinção entre os blocos de tijolo e as juntas de argamassa, admitindo a alvenaria como um material anisotrópico contínuo (Lourenço, 1996). Neste trabalho optou-se por uma análise macro.

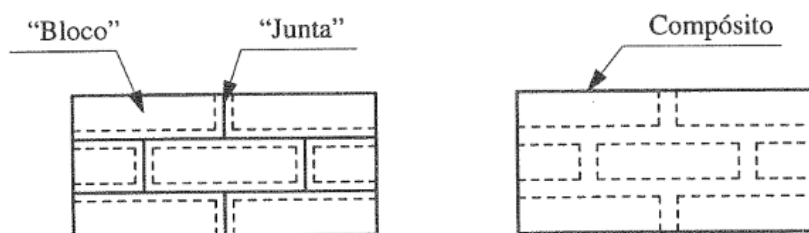


Figura 3.4 – Exemplificação dos modelos micro e macro, respetivamente (Lourenço, 1996)

## 3.2 Modelação da estrutura

### 3.2.1 Descrição do programa

O programa utilizado foi o *Autodesk Robot Structural Analysis*, visto ser um programa gráfico para modelação, desenho e análise de diversos tipos de estruturas e estar adaptado às normas técnicas e regulamentares de diferentes países. Este programa possibilita a análise de problemas mecânicos e térmicos, em regime permanente e variável, obtendo-se tensões induzidas (Coimbra, 2010).

Depois de introduzida a geometria da estrutura que se pretende, definida a malha e as condições de fronteira da mesma e introduzidas as ações, submete-se o modelo ao cálculo, podendo, em seguida, visualizar e interpretar-se os resultados obtidos através de gráficos, de cores ou numéricos, onde se apresentam as tensões induzidas, os deslocamentos, entre outros aspetos possíveis.

### 3.2.2 Definição da estrutura

Uma vez que as estruturas pretendidas se referem a paredes de alvenaria, com dimensões no comprimento e altura bastante superiores à espessura, a modelação foi realizada recorrendo, no *Autodesk Robot*, ao tipo de estrutura designada por “Projeto de estrutura de tensão plana”, uma vez que a determinação das tensões se torna um problema bidimensional.

A introdução dos dados no programa teve em conta a seguinte sequência:

- Seleção do tipo de estrutura a utilizar;
- Criação de um material a utilizar nos elementos;
- Definição das características geométricas e físicas dos elementos;

- Criação da malha de elementos finitos;
- Definição dos apoios;
- Definição das ações atuantes;
- Cálculo da estrutura.

### 3.2.3 Características dos elementos e dos materiais

A parede de alvenaria é constituída por blocos de tijolo maciço face à vista e encontra-se encastrada ao longo de toda a base. Não contém aberturas, à exceção das juntas de dilatação em alguns modelos e não se encontra reforçada com armadura (parede não armada). Quando existentes, as juntas de dilatação não se estendem ao longo de toda a altura da parede. Começam a 0,50 m da base e prolongam-se até ao topo da parede. Isto porque o trabalho efetuado é inspirado num caso de estudo, é mais viável em termos da própria estabilidade da parede e em termos de proteção contra fenómenos de humidade. A espessura das mesmas é constante em todos os modelos, 20 mm, estando de acordo com o que foi apresentado no capítulo referente às juntas de dilatação.

As dimensões da parede mantêm-se constantes em todos os modelos estudados, variando apenas as geometrias das mesmas, no caso da simulação 2. No caso da simulação 1 varia a disposição e a quantidade de juntas de dilatação. A disposição das mesmas vai de encontro ao que foi apresentado no Estado da Arte.

As paredes foram definidas como elemento “parede”, uma vez que, estão sujeitas apenas a forças no seu plano, modeladas recorrendo a elementos finitos do tipo “casca” e as suas características apresentadas no quadro 3.1. A espessura utilizada na parede teve em conta um exemplo específico de um tijolo maciço face à vista comercializado pela Cerâmica Vale da Gândara, com dimensões: 237x50x115mm.

Quadro 3.1 – Propriedades da parede utilizada na modelação

Módulo de Elasticidade, E (Mpa)	8000
Coefficiente de Poisson, $\nu$	0,2
Módulo de Cisalhamento, G (Mpa)	0,4
Peso Específico (KN/m <sup>3</sup> )	20
Coefficiente de dilatação térmica linear (m/m°C)	6,0x10 <sup>-6</sup>
Resistência da Alvenaria (Mpa)	10,35

O valor da resistência da alvenaria à compressão é conseguido através da equação 2.1, apresentada no capítulo 2.2.6, que avalia a resistência das alvenarias à compressão relacionando as resistências de cada elemento constituinte.

$$f_k = K \cdot f_b^\alpha \cdot f_m^\beta \quad (2.1)$$

Desta forma, utilizou-se como referência:

- As características dos tijolos maciços apresentadas no capítulo 2.2.2, resistência à compressão de 45 N/mm<sup>2</sup>;
- Para a argamassa os estudos realizados na Tese de Doutoramento de Silva, (1998), onde se apresenta como valor da argamassa à compressão 4,8 MPa;
- Para os coeficientes  $\alpha$  e  $\beta$  os valores fornecidos pelo EC6, 0,7 e 0,3 respetivamente e para o coeficiente K, novamente de acordo com o EC6 o valor de 0,45.
- Obtém-se desta forma a resistência da alvenaria de 10,35 MPa.

O valor utilizado para o coeficiente de dilatação térmica linear teve em conta os dados apresentados pelo Manual de Aplicação de tijolos de face à vista da Cerâmica Vale da Gândara, para as características do tijolo maciço adotado, sendo que o valor do peso específico se baseia nas características apresentadas no capítulo 2.2.2.

Os valores utilizados do módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson baseiam-se nos estudos apresentados na Tese de Doutoramento de Silva, (1998). Contudo, o valor referente ao módulo de elasticidade foi considerado um pouco elevado, tendo sido diminuído para 8000 MPa. Já o valor utilizado para o módulo de cisalhamento baseou-se nos valores apresentados na Tese de Doutoramento de Oliveira, (2001).

O valor característico da resistência da parede à tração baseia-se no que foi apresentado no capítulo do Estado da Arte, sendo utilizado 10 % do valor resistente à compressão, 1,035 MPa.

### **3.2.4 Ações**

#### **3.2.4.1 Enquadramento**

Como foi explicado anteriormente, nesta modelação foram simuladas as ações da temperatura e da humidade. O programa utilizado permite simular o comportamento das estruturas em relação a uma determinada temperatura, de forma simplificada, bastando aplicar a devida temperatura às peças que se pretende analisar. Já em relação ao comportamento exposto à ação da humidade, esta simulação não é possível efetuar da mesma forma. Para o efeito, utilizou-se um processo ligeiramente diferente que será explicado mais à frente.

#### **3.2.4.2 Variação de temperatura**

O valor da temperatura máxima atingida pela parede teve em conta a expressão 2.4 apresentada no capítulo 2.4.1, a qual permite o cálculo da temperatura máxima superficial de um revestimento, tendo em conta a temperatura do ar, a capacidade térmica dos materiais e o coeficiente de absorção solar.

$$T_s = T_{ar} + 55.\alpha_s \quad (2.4)$$

No valor da temperatura máxima do ar foram tidos em conta os valores apresentados pelo IPMA, que nos permitem concluir que a temperatura máxima atingida em Portugal nos últimos anos se situou nos 42°C (IPMA, 2015).

Para o coeficiente de absorção da radiação solar foi utilizado o valor de 0,7, valor apresentado pela Cerâmica Vale da Gândara para o tipo de tijolo usado nesta modelação. Desta forma foi obtido um valor para a temperatura máxima superficial do revestimento de 80,5°C.

Para a ação da temperatura mínima foram tidos em conta os valores apresentado nos relatórios do IPMA para a menor temperatura atingida nos últimos anos, sendo que este valor nunca ultrapassou os 10°C negativos. Desta forma, optou-se por utilizar o valor de -10°C como ação da temperatura mínima a atuar nas paredes de alvenaria (IPMA, 2015).

#### **3.2.4.3 Variação do teor de humidade e retração hidráulica**

Uma vez que o programa utilizado não permite utilizar a ação da humidade fictícia com efeito mecânico equivalente diretamente nas estruturas, a sua ação terá de ser simulada através de uma temperatura. Desta forma, recorreu-se à expressão 2.3 que permite o cálculo das dilatações ou retrações dos materiais, dependendo do comprimento inicial, coeficiente de dilatação térmica linear do material e da variação da temperatura.

$$\Delta L = L \cdot \alpha \cdot \Delta T \quad (2.3)$$

Uma vez que existe diminuição do teor de humidade do tijolo devido ao excesso de água, que é utilizada no ato de aplicação do mesmo e retração hidráulica da argamassa, ambas na fase inicial pós construção, é assumido para a simulação que a retração global é de 0,1%. A resistência da alvenaria é menor na fase inicial, coincidindo o período de retração das argamassas com o período de secagem dos tijolos após assentamento. Este valor poderá ser um pouco elevado, porém, encontra-se do lado da segurança.

O valor utilizado para o coeficiente de dilatação térmica linear é o apresentado anteriormente,  $6,0 \times 10^{-6} \text{ m/m}^\circ\text{C}$ . Obtém-se assim um valor para a variação de temperatura de 166°C, sendo este o valor a utilizar na simulação da ação da humidade.

Resumindo, as ações utilizadas na modelação da parede de alvenaria no programa *Robot Autodesk* são:

- Temperatura máxima de 80,5°C;
- Temperatura mínima de -10°C;
- Retração de 0,1%, simulada através da temperatura de -166,7°C.

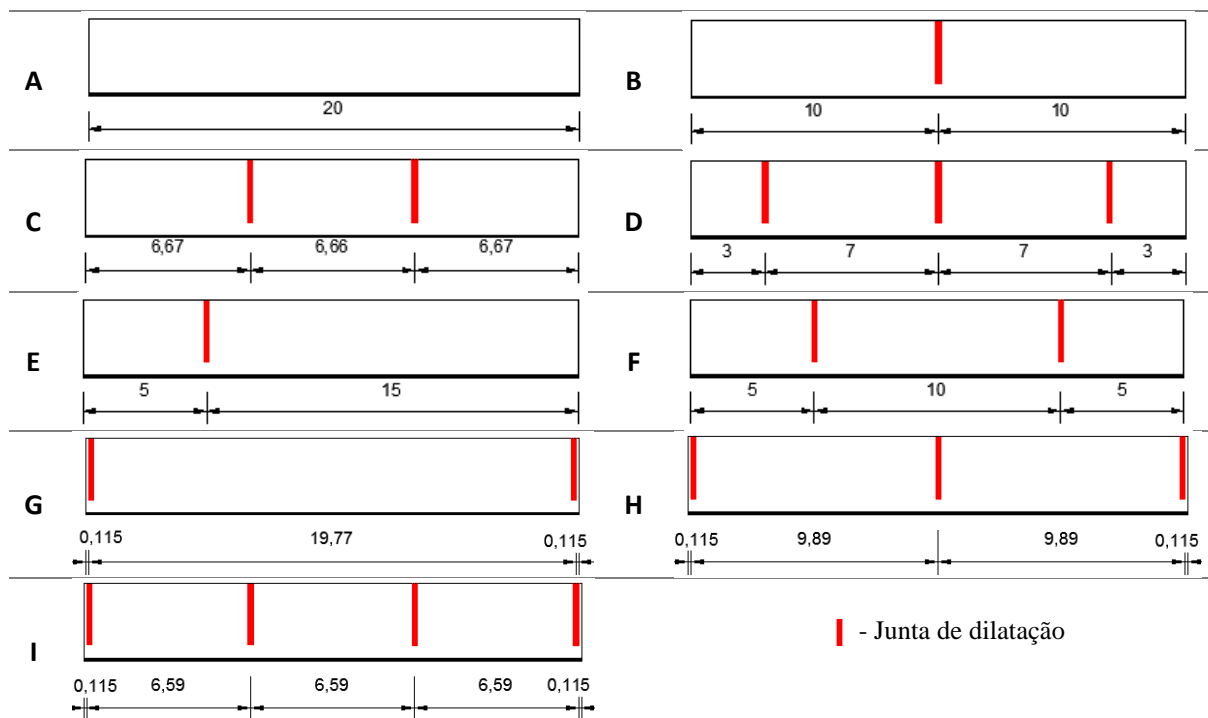
Uma vez que a retração global é simulada através de uma temperatura negativa mais gravosa para a parede do que a temperatura mínima de -10°C, ao utilizar somente a simulação para a retração está-se do lado da segurança, sendo indispensável simular para a temperatura de -10°C.

## 4 SIMULAÇÃO E COMENTÁRIOS

### 4.1 Introdução

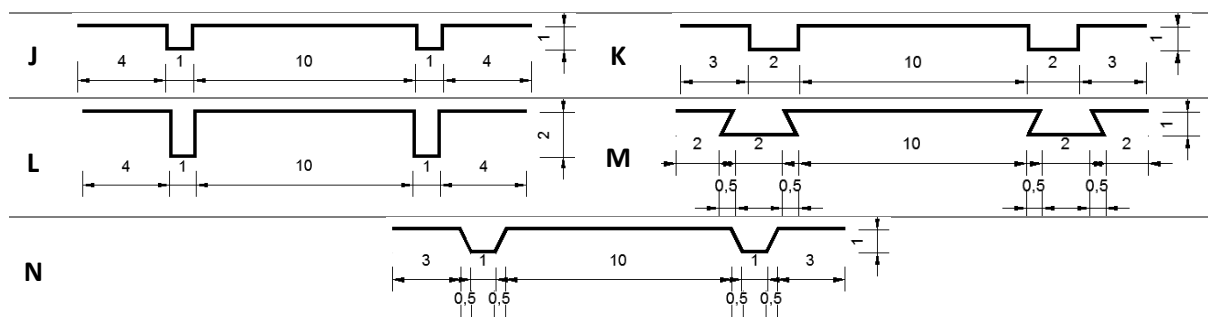
Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados obtidos nas simulações dos diversos modelos. Como explicado no capítulo anterior, as simulações foram realizadas de duas formas. No quadro 4.1 estão representados os modelos de parede estudados na simulação 1 (alçado), os quais apenas se diferenciam entre si pela quantidade e disposição das juntas de dilatação. No quadro 4.2 encontram-se representados os modelos utilizados na simulação 2 (alçado e planta), sendo neste caso simulados 5 tipos de geometrias de paredes, em alçado e em planta.

Quadro 4. 1 – Modelos de parede da simulação 1 (medidas em metros)





Quadro 4. 2 – Modelos de parede da simulação 2 (medidas em metros)



Com estas simulações pretende-se, de uma forma geral, obter respostas e explicações para um conjunto de pontos considerados mais relevantes, no estudo da fissuração de paredes de alvenaria. Algumas questões foram adaptadas de um trabalho, com a mesma finalidade, de Silva, Romeu, Torres & Negrão, (2015). Destacando-se:

- Qual o comportamento das paredes de alvenaria na resposta à variação de temperatura e à retração de 0,1 %?
- Qual a ação mais gravosa para a parede?
- Quais as tensões (tração ou compressão) que mais probabilidade têm em causar fissuração nas paredes de alvenaria?
- É vantajoso, em fase de projeto, projetarem-se juntas de dilatação ao longo da parede ou variações geométricas, como as propostas nas simulações?
- Será suficiente a criação de juntas de dilatação e variações geométricas para evitar a fissuração da parede?

## 4.2 Resultados obtidos

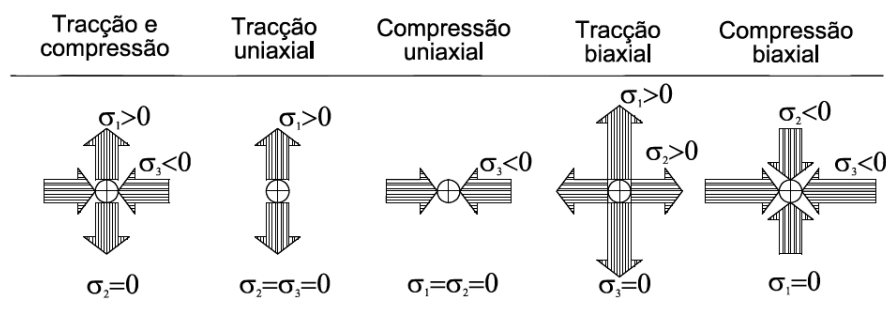
### 4.2.1 Enquadramento Geral

Uma vez inseridos os diversos modelos e ações no *Robot*, este facultava os resultados através de mapas de cores e tabelas. Sendo que se torna difícil comentar e analisar todos os modelos separadamente, com o apoio dos respetivos mapas de tensões, são apresentados em seguida quadros resumo, com as tensões obtidas para cada modelo.

A rotura da parede pode ocorrer por compressão, tração, corte ou ainda pela ação em simultâneo das tensões de tração e compressão. Pode ser avaliada através do critério de “Mohr-Coulomb”, uma vez que é um material frágil e homogéneo e se apresenta num estado plano de tensão. Este critério possui ainda a vantagem de dispensar o conhecimento da resistência ao corte dos

materiais, ao serem utilizados os valores das tensões principais de cálculo e das tensões de rutura à tração e compressão da parede (Silva, 1998). Apesar de ser sabido de antemão que, face ao comportamento real das alvenarias, a ligação tijolo argamassa é bastante relevante, considerar o modelo de material homogéneo apresenta-se como uma boa aproximação.

ESTADO PLANO DE TENSÃO



VERIFICAÇÃO DA SEGURANÇA

$$\frac{\sigma_1}{|\sigma_r|} - \frac{\sigma_3}{|\sigma_c|} \leq 1 \quad \frac{\sigma_1}{|\sigma_r|} \leq 1 \quad \frac{|\sigma_3|}{|\sigma_c|} \leq 1 \quad \frac{\sigma_1}{|\sigma_r|} \leq 1 \quad \frac{|\sigma_3|}{|\sigma_c|} \leq 1$$

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  - Tensões principais       $\sigma_{tr}, \sigma_c$  - Tensões de rutura à tração e compressão

Figura 4. 1 – Critério de rutura de “Mohr-Coulomb” (adaptado de (Silva, 1998))

O programa utilizado fornece os resultados das tensões principais máximas (S1) e principais mínimas (S2), para cada uma das simulações estudadas. As tensões principais máximas fornecem os valores mais elevados das tensões de tração instaladas na parede, ao passo que, as tensões principais mínimas fornecem as tensões mais elevadas de compressão.

4.2.2 Simulação 1 (alçado)

4.2.2.1 Tensões principais máximas (S1)

Para o estudo da parede relativamente às tensões principais máximas, são expostos os quadros e gráficos onde se apresentam, de uma forma sucinta, as percentagens de parede de alvenaria que se encontram à tração, na resposta às ações de aumento de temperatura e de retração de 0,1%. São apresentados também as percentagens de área de parede que, na resposta a cada uma das ações, estão acima da tensão de resistência à rutura à tração e ainda, a média das tensões instaladas na parede.

No quadro 4.3 é possível visualizar a percentagem de área de parede que se encontra à tração quando sujeita às diferentes ações (aumento de temperatura e retração) e a percentagem de tensões instaladas na parede superiores à tensão de resistência de rutura à tração da parede de alvenaria.

Já no quadro 4.4 são apresentados os valores da média de tensões instaladas na parede, tanto para o caso do aumento de temperatura como da retração.

Quadro 4.3 – Tensões de tração (Simulação 1)

Tensões de tração											
Área de parede à tração (%)					Tensões superiores à rotura (%)						
Modelo		Aumento de temperatura	Retração de 0,1 %		Modelo		Aumento de temperatura	Retração de 0,1 %			
A		88,9	98,6		A		0,0	92,3			
B		91,9	96,4		B		0,3	87,2			
C		85,7	92,4		C		0,2	70,8			
D		82,7	91,7		D		0,5	65,3			
E		86,7	95,3		E		0,3	83,4			
F		82,8	92,3		F		0,3	72,4			
G		84,5	95,8		G		0,0	91,7			
H		89,3	93,8		H		0,1	85,0			
I		83,3	90,0		I		0,2	69,3			
0		10	20	30	40	50	60	70	80	90	100

Quadro 4.4 – Média das tensões instaladas na parede (tensões de tração +; tensões de compressão -) (Simulação 1)

Média das tensões (MPa)			
Modelo		Aumento de temperatura	Retração de 0,1 %
A		0,21	6,22
B		0,28	4,87
C		0,19	3,93
D		0,16	3,81
E		0,23	5,2
F		0,19	4,2
G		0,23	6,14
H		0,26	4,82
I		0,19	3,83

Para o estudo das tensões principais máximas, as tensões que apresentam resultados mais significativos são as de tração, uma vez que estas apresentam os seus valores máximos. Por outro lado, as tensões de compressão não apresentam valores significativos uma vez que as tensões máximas de compressão são obtidas nas tensões principais mínimas.

Desta forma, é possível observar através da análise das tensões apresentadas nas tabelas acima, que os modelos C, D e I se apresentam como as melhores soluções, na medida em que apresentam as menores percentagens de tensões de tração acima da tensão de resistência à rotura

quando a parede é exposta à retração e os valores mais baixos para a média das tensões. No ponto extremo, encontram-se os modelos A e G, que apresentam uma elevada percentagem de parede com tensões superiores à tensão de resistência à rotura à tração e a média de tensões de tração mais elevadas. Desta forma, consideram-se como as piores soluções, isto porque caso a solução seja a introdução de armaduras ou outro tipo de reforço existe mais área a reforçar.

Como forma de completar esta análise, nos gráficos a seguir apresentados, é possível observar a distribuição e concentração de tensões ao longo da parede. Esta foi a forma que se julgou ser mais indicada para demonstrar a concentração das tensões, importante para uma possível prevenção. Desta forma, os gráficos 4.1, 4.2 e 4.3 apresentam a percentagem do nível máximo de tensão instalado na parede em relação à área de parede afetada.

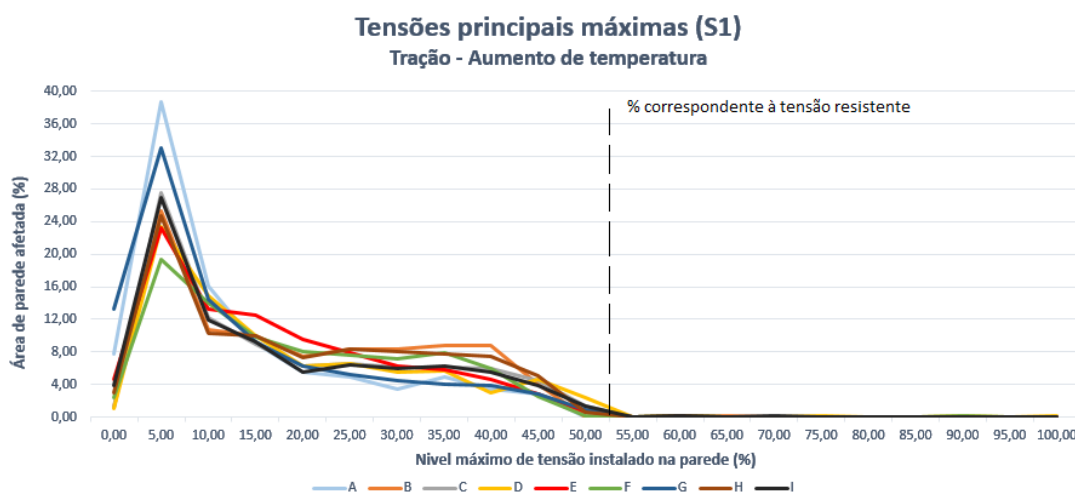


Gráfico 4. 1 – Distribuição das tensões de tração para o aumento de temperatura

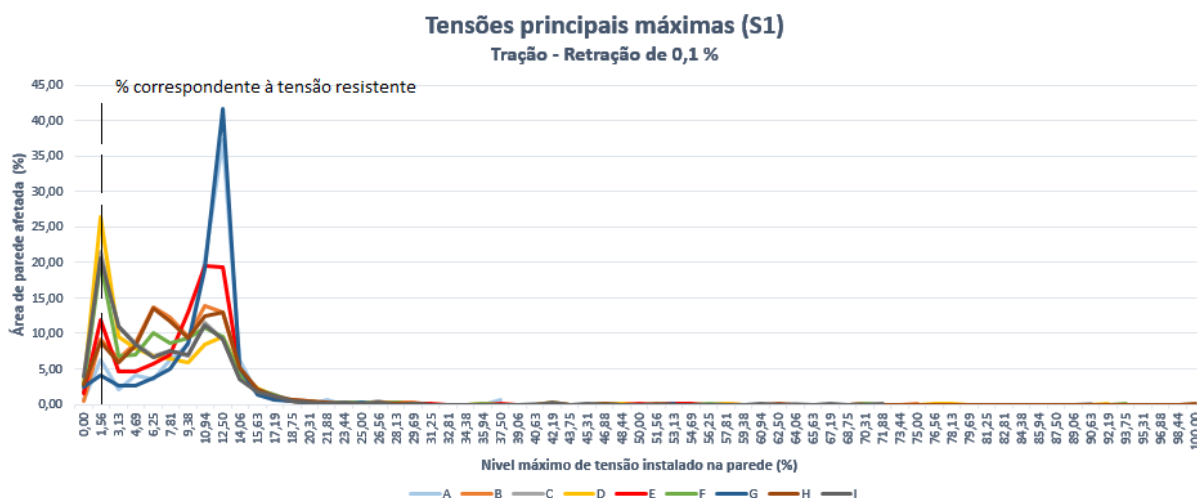


Gráfico 4. 2 – Distribuição das tensões de tração para a retração de 0,1%

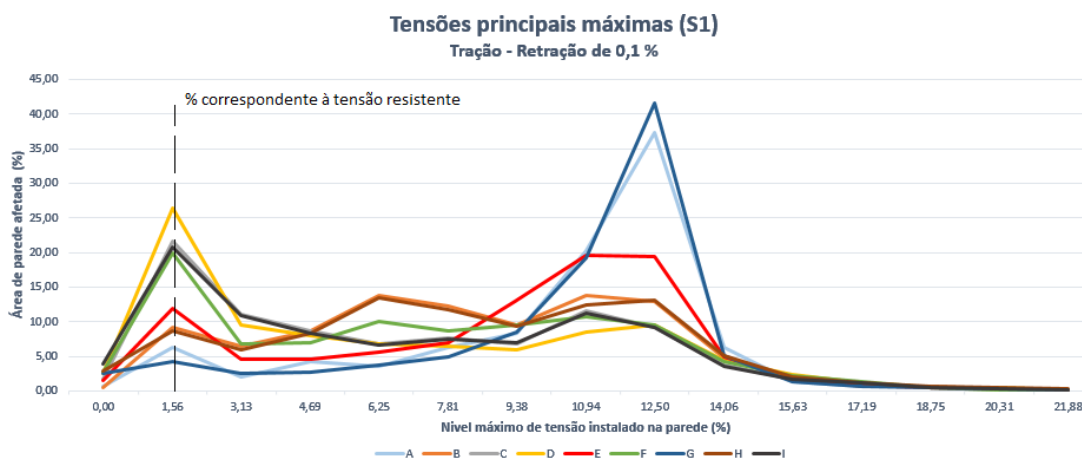


Gráfico 4. 3 – Distribuição das tensões de tração para a retração de 0,1% \*

\* O gráfico 4.3 é uma ampliação do 4.2, para melhor se visualizar as distribuições das tensões, uma vez que se concentram principalmente entre 0 e 21,88%.

Através do gráfico 4.1 é possível observar que a percentagem de área de parede sujeita a tensões de tração superiores a 55% do valor da tensão máxima instalada é muito reduzida. Sendo que a percentagem de tensão resistente se encontra próximo dos 55%, concluiu-se que, para o aumento de temperatura, as paredes dos diversos modelos necessitam de reforço numa percentagem muito reduzida de área, e que, em todos os modelos a maior percentagem de tensões se encontra em valores muito baixos.

Na situação que se apresenta como mais preocupante, retração de 0,1 %, é possível observar que os modelos C, D e I apresentam distribuições de tensões muito semelhantes, sendo que a maior percentagem das tensões, nestes modelos, se situa até à percentagem correspondente à tensão resistente. No extremo contrário situam-se, os modelos A e G, com grande percentagem de área de parede exposta a tensões de tração entre 11 e 14% do nível máximo de tensão instalado, tensões estas bastante elevadas para serem resistidas por uma parede de alvenaria não armada. Porém, em todos os modelos existe uma área bastante significativa de parede a reforçar.

#### 4.2.2.2 Tensões principais mínimas (S2)

Os resultados a seguir apresentados referem-se às tensões principais mínimas (S2). À semelhança do que foi apresentado para as tensões principais máximas, são apresentados em forma de quadros e gráficos os resultados obtidos para as tensões principais mínimas.

No quadro 4.5 encontram-se apresentados as percentagens de parede à compressão e as percentagens de tensões superiores à resistência de rotura à compressão na resposta da parede às ações impostas. Já no quadro 4.6 apresentam-se os valores da média de tensões instaladas na parede, tanto para o caso do aumento de temperatura como da retração.

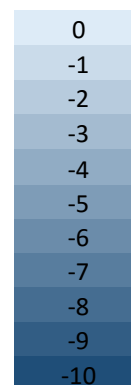
No quadro 4.7 são apresentadas as percentagens de tensões acima da qual a parede não se encontra em segurança, para a situação da ação simultânea das tensões de tração e compressão, analisada através da primeira expressão da figura 4.1.

Quadro 4. 5 – Tensões de compressão (Simulação 1)

Tensões de compressão							
Área de parede à compressão (%)			Tensões superiores à rotura (%)				
Modelo		Aumento da temperatura	Retração de 0,1 %	Modelo	Aumento de temperatura	Retração de 0,1 %	
A		99	96,5	A		0,7	0
B		97	93,5	B		0,38	0
C		92,5	88	C		0,65	0
D		92	85	D		0,8	0
E		96	92	E		0,4	0
F		93,5	87	F		0,7	0
G		98,5	96	G		0,11	0
H		96,5	92,5	H		0,4	0
I		92,5	88	I		0,7	0

Quadro 4. 6 – Média das tensões instaladas na parede (tensões de tração +; tensões de compressão -) (Simulação 1)

Média das tensões (MPa)		
Modelo	Aumento de temperatura	Retração de 0,1 %
A	-3,02	-0,52
B	-2,37	-0,7
C	-1,91	-0,48
D	-1,85	-0,41
E	-2,53	-0,57
F	-2,05	-0,48
G	-3	-0,56
H	-2,35	-0,63
I	-1,87	-0,46



Desta forma, é possível observar que, mesmo sendo ultrapassada a tensão de resistência à rotura à compressão em todos os modelos, no caso de aumento da temperatura, essa percentagem é bastante pequena, refletindo-se num número muito reduzido de pontos localizados na parede. Todos os modelos apresentam percentagens muito semelhantes.

Relativamente ao quadro 4.6 observa-se, novamente, que os modelos A e G apresentam as médias das tensões de compressão mais elevadas, para o aumento de temperatura, ao invés dos

casos C, D e I, que apresentam as médias mais baixas. Já as médias referentes à retração de 0,1 % são para todos os casos bastante semelhantes entre si.

O gráfico 4.4 a seguir apresentado permite observar a distribuição das tensões para a situação onde a tensão de resistência à rotura é ultrapassada. Esta situação é relativa às tensões de compressão para o caso de aumento de temperatura, onde se vê que a percentagem de área de parede sujeita a tensões de compressão superiores à rotura é muito pequena.

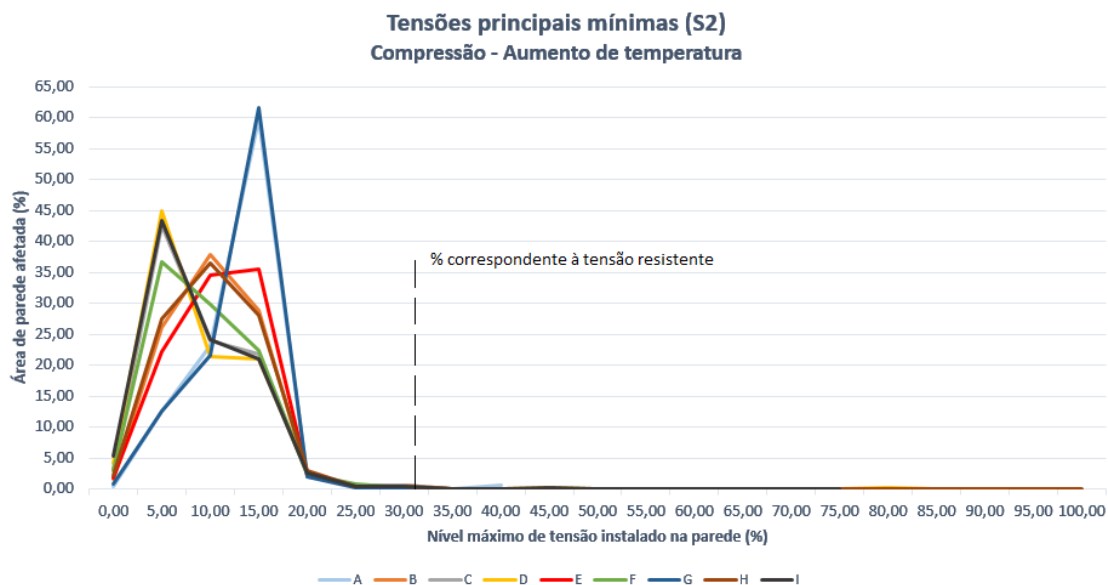
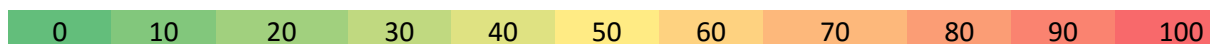


Gráfico 4. 4 – Distribuição das tensões de compressão para o aumento de temperatura

Quadro 4. 7 – Tensões de tração e compressão, em simultâneo (Simulação 1)

Tensões de tração e compressão		
Tensões superiores à rotura (%)		
Modelo	Aumento de temperatura	Retração de 0,1 %
A	9,76	92,33
B	18,38	87,13
C	14,55	70,35
D	13,02	64,92
E	12,32	83,16
F	13,17	72,25
G	10,58	91,56
H	18,22	84,98
I	13,5	68,89



Concluiu-se desta forma que, com os resultados apresentados para as tensões principais máximas e para as tensões principais mínimas, na Simulação 1, os modelos A e G apresentam as tensões mais elevadas de tração aquando da retração de 0,1 % e de compressão quando a parede é sujeita a um aumento de temperatura, para as tensões principais máximas e para as principais mínimas, respetivamente. Estes dois modelos têm em comum a grande extensão de parede sem juntas de dilatação, sendo que no caso A, essas não existem, e no B se encontram junto aos cunhais.

No ponto oposto aos modelos anteriormente referidos, estão os modelos C, D e I que se revelam como aqueles que possuem a média de tensões mais baixa tanto para as tensões principais máximas como principais mínimas na resposta às ações aplicadas. Estes modelos caracterizam-se também pela concentração das tensões em valores inferiores aos restantes, deixando claro que, a instalação de juntas de dilatação na parede de alvenaria diminuiu significativamente os valores das tensões, em comparação com as paredes sem juntas ou com juntas muito distanciadas entre si.

Tanto para uma possível reparação como para um reforço da parede, é benéfico que as tensões se encontrem concentradas, diminuindo assim a área a intervir e o custo da intervenção.

De uma forma geral, é possível concluir que, as tensões mais afetadas quando a parede é sujeita a aumento da temperatura são as tensões de compressão, ao passo que, quando esta é sujeita à retração de 0,1 % origina tensões de tração muito superiores às de compressão. Quando a parede é sujeita a um aumento de temperatura, observa-se, através dos mapas apresentados em anexo, que os materiais têm tendência a aumentar as suas dimensões (expansão). Desta forma, vão originar junto aos pontos restringidos (cantos inferiores da parede e zona inferior das juntas de dilatação) concentrações de tensões de compressão com valores bastante superiores à restante parede.

Os desenhos esquemáticos apresentados, na figura 4.2, representam a forma como a parede responde ao aumento da temperatura. Observa-se desta forma, e com o apoio dos mapas apresentados no anexo, que a concentração de tensões de tração com valores mais elevados se encontra na zona inferior da parede com direções praticamente verticais. Estas são resultantes do movimento da parede que origina o deslocamento da mesma na direção horizontal ao mesmo tempo que a zona a 1/3 e 2/3 do comprimento de cada secção de parede (designando-se secção de parede como o pano que se estende desde os cantos extremos da parede, caso esta não possua junta de dilatação, ou, no caso de possuir uma ou mais do que uma, designando o pano de parede entre juntas ou entre juntas e cantos extremos), sofre um movimento ascensional. Daí, resultando as tensões de tração com valores mais elevados.



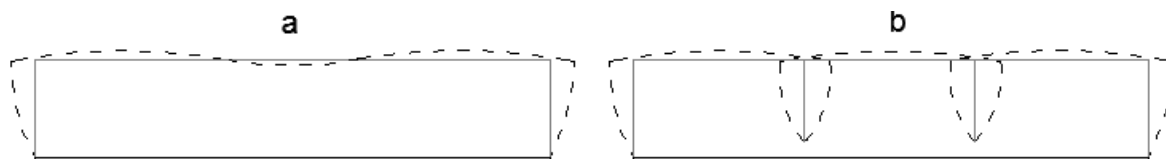


Figura 4. 2 – Esquema representativo da deformação (expansão) sofrida pela parede com o aumento da temperatura, para o caso de parede sem junta de dilatação (a) e para o caso da parede com juntas de dilatação (b)

Conclui-se assim que, na generalidade dos casos, na resposta ao aumento da temperatura, a probabilidade de ocorrer fissuração horizontal é mais elevada na zona inferior da parede, devido às tensões de tração com direção vertical aí presentes, probabilidade essa que aumenta linearmente consoante os valores das tensões (quanto mais elevadas as tensões, maior a probabilidade de fissuração). Em relação à probabilidade de fissuração provocada pelas tensões de compressão, esta é maior na zona junto aos cantos restringidos, como os cantos inferiores da parede e as zonas inferiores próximas às juntas de dilatação.

Quando a parede é sujeita à retração de 0,1 %, observa-se a retração dos materiais que a constituem (argamassa e tijolo). Desta forma, é possível verificar que as tensões de tração são bastante superiores nas zonas próximas aos pontos restringidos, em comparação com a restante parede, uma vez que o movimento que os materiais têm tendência a sofrer não são acompanhados por esses pontos.

Com o esquema ilustrado na figura 4.2 e os mapas em anexo é possível observar que quando sujeita à retração de 0,1 % toda a parede retrai, à exceção dos cantos inferiores da parede e das zonas inferiores das juntas de dilatação, que estando restringidos, originam tensões de tração com valores superiores aos da restante parede. É possível concluir também, que na zona central de cada secção de parede (designando-se secção de parede como o pano que se estende desde os cantos extremos da parede, caso esta não possua junta de dilatação, ou, no caso de possuir uma ou mais do que uma, designando o pano de parede entre juntas ou entre juntas e cantos extremos) as tensões de tração possuem valores elevados, encontrando-se praticamente na direção horizontal, enquanto na zona próxima dos pontos restringidos se encontram preferencialmente na diagonal. As tensões de compressão apresentam, praticamente em toda a parede direção vertical, resultante do movimento de retração da própria parede.



Figura 4. 3 – Esquema representativo da deformação (retração) sofrida pela parede com a retração de 0,1%, para o caso de parede sem junta de dilatação (a) e para o caso da parede com juntas de dilatação (b)

Desta forma, a fissuração provável de ocorrer na zona central da parede, é preferencialmente vertical, uma vez que as tensões de tração se desenvolvem na horizontal. Na zona inferior próxima aos pontos restringidos, as fissuras poderão apresentar-se na diagonal, uma vez que, as tensões de tração assim se desenvolvem. É importante referir que as fissuras se desenvolvem na direção perpendicular às tensões.

#### 4.2.3 Simulação 2 (alçado e planta)

##### 4.2.3.1 Análise em alçado

De igual forma aos resultados apresentados para a Simulação 1, serão apresentados numa primeira fase, os resultados obtidos para as tensões principais máximas e mínimas, para a simulação em alçado. Posteriormente apresentar-se-ão os resultados para a análise em planta.

##### 4.2.3.1.1 Tensões principais máximas (S1)

No quadro 4.8 apresenta-se a percentagem de parede que se encontra à tração quando esta é sujeita às diferentes ações (aumento de temperatura e retração) e a percentagem de tensões instaladas na parede superiores à resistência de rotura à tração da parede de alvenaria. Já no quadro 4.9 são apresentados os valores da média de tensões instaladas na parede, tanto para o caso do aumento de temperatura como da retração.

Quadro 4. 8 – Tensões de tração (Simulação 2)

Tensões de tração											
Área de parede à tração (%)						Tensões superiores à rotura (%)					
Modelo		Aumento da temperatura		Retração de 0,1 %		Modelo		Aumento de temperatura		Retração de 0,1 %	
J		81,3		90,0		J		0,2		56,0	
K		82,3		90,4		K		1,5		51,7	
L		84,9		91,0		L		1,4		52,0	
M		85,1		89,5		M		1,7		53,7	
N		81,5		92,1		N		0,2		53,1	
0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	

Quadro 4. 9 – Média das tensões instaladas na parede (tensões de tração +; tensões de compressão -) (Simulação 2)

Média das tensões (MPa)			
Modelo		Aumento de temperatura	Retração de 0,1 %
A		0,20	2,90
B		0,20	2,80
C		0,22	2,75
D		0,22	2,90
E		0,18	2,80

Através dos quadros apresentados é possível observar que não existe uma diferença muito acentuada nos resultados obtidos entre os diferentes modelos. A retração de 0,1 % é a ação mais crítica para o caso das tensões de tração, enquanto o aumento de temperatura não se revela muito preocupante, uma vez que a percentagem de tensões de tração acima da tensão de resistência de tração é pouco significativa. A média de tensões para cada modelo não apresentou diferenças muito significativas, variando muito pouco entre si.

O gráfico 4.5, a seguir apresentado, permite observar a distribuição e concentração das tensões para o caso da retração de 0,1%. Não é retratada a ação do aumento da temperatura, uma vez que a percentagem de área de parede superior à tensão de rotura não é significativa. Neste caso, seria em tudo semelhante ao ilustrado para a simulação 1 (gráfico 4.1), com grande concentração das tensões de tração em valores baixos e com pequena percentagem de área de parede afetada por tensões superiores à tensão resistente.

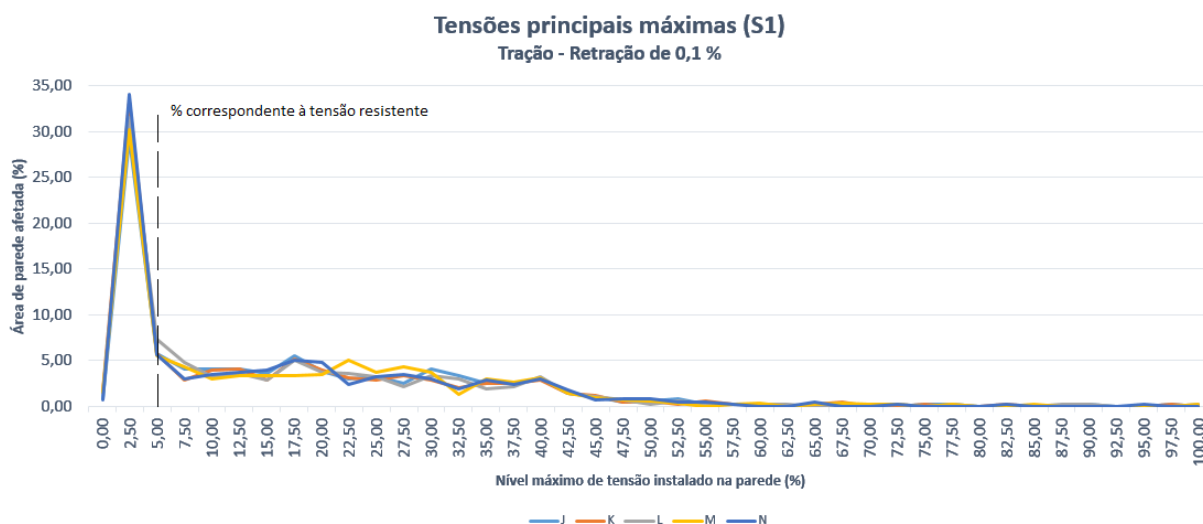


Gráfico 4. 5 – Distribuição das tensões de tração para a retração de 0,1 %

Observa-se desta forma que, todos os modelos apresentados têm distribuições em tudo semelhantes, havendo grande concentração de tensões de tração (cerca de 30%) abaixo da tensão resistente. Contudo, em todos os modelos, existe uma percentagem significativa de área de parede exposta a tensões elevadas. Grande parte dessa percentagem, encontra-se até cerca de 40% da tensão máxima apresentada na parede.

#### 4.2.3.1.2 Tensões principais mínimas (S2)

As tensões principais mínimas fornecem as tensões mais elevadas para as compressões na parede. No quadro 4.10 encontram-se apresentados as percentagens de parede à compressão e

as percentagens de tensões superiores à resistência de rotura à compressão na resposta da parede às ações impostas.

No quadro 4.11 apresentam-se os valores da média de tensões na parede, tanto para o caso do aumento de temperatura como da retração. Já no quadro 4.12 é possível observar as percentagens de tensões que se encontram acima da tensão de segurança, para o caso das tensões de tração e compressão atuarem simultaneamente.

Quadro 4. 10 – Tensões de compressão (Simulação 2)

Tensões de compressão											
Área de parede à compressão (%)					Tensões superiores à rotura (%)						
Modelo		Aumento da temperatura	Retração de 0,1 %			Modelo		Aumento de temperatura	Retração de 0,1 %		
J		91,0	86,2			J		0,0	0,0		
K		90,2	86,3			K		0,0	0,0		
L		91,5	87,2			L		0,1	0,0		
M		89,7	88,0			M		0,1	0,0		
N		93,0	86,2			N		0,1	0,0		
0		10	20	30	40	50	60	70	80	90	100

Quadro 4. 11 – Média das tensões instaladas na parede (tensões de tração +; tensões de compressão -) (Simulação 2)

Média das tensões (MPa)			
Modelo		Aumento de temperatura	Retração de 0,1 %
J		-1,42	-0,52
K		-1,35	-0,49
L		-1,34	-0,52
M		-1,42	-0,51
N		-1,37	-0,45

0  
 -1  
 -2  
 -3  
 -4  
 -5  
 -6

Como é possível observar, a tensão de resistência de rotura à compressão, praticamente, não é ultrapassada, apesar de ficar próximo do limite, quando as tensões de compressão atuam sozinhas, para o aumento da temperatura. De igual modo aos valores obtidos na média de tensões, para o caso das tensões principais máximas, os diferentes modelos não apresentam variações significativas entre si.

O gráfico 4.6 mostra a distribuição das tensões de compressão quando há aumento de temperatura na parede de alvenaria, situação que se apresenta como mais gravosa. Comprova-se desta forma, o que anteriormente foi explicado, em relação à tensão de resistência à compressão. Como se observa, esta é ultrapassada, contudo é apenas por 0,1%, para 3 modelos,

o que demonstra que um possível reforço é de muito fácil execução, uma vez que as tensões superiores à rotura se encontram concentradas em pontos muito pouco significativos.

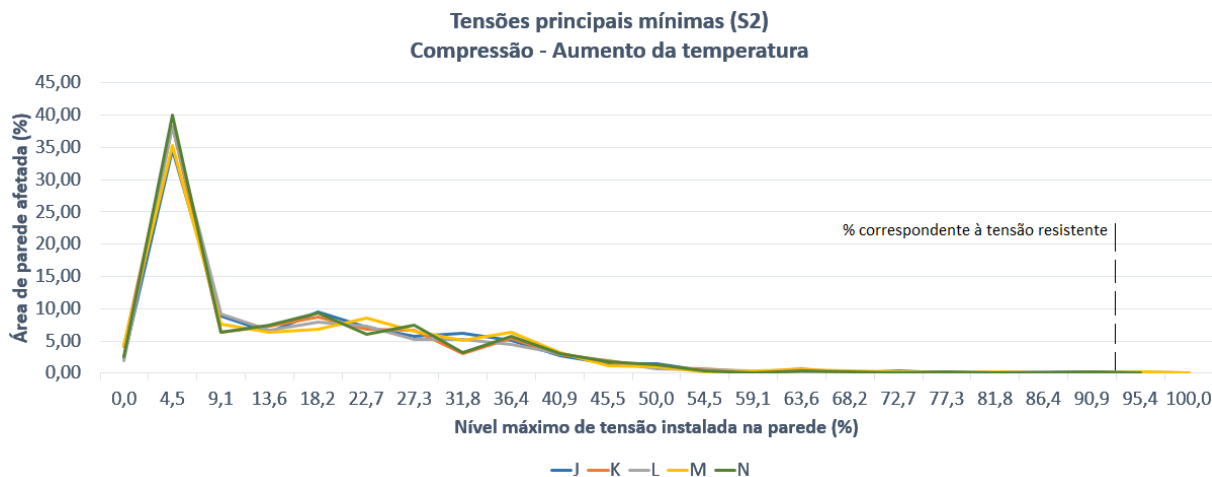
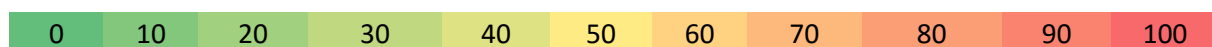


Gráfico 4. 6 – Distribuição das tensões de compressão para o aumento de temperatura

Quadro 4. 12 – Tensões de tração e compressão, em simultâneo (Simulação 2)

Tensões de tração e compressão		
Tensões superiores à rotura (%)		
Modelo	Aumento de temperatura	Retração de 0,1 %
J	12,1	55,8
K	11,2	51,7
L	10,2	54,2
M	10,5	52,2
N	9,5	52,4



Quando as tensões de tração e compressão atuam simultaneamente, os resultados das tensões acima da tensão de rotura são semelhantes aos registados para as tensões principais máximas no caso da retração de 0,1 %. Já para o aumento de temperatura, a percentagem de tensões acima da rotura revela-se superior a qualquer um dos casos anteriormente apresentados.

Através da análise, tanto das tensões principais máximas como principais mínimas, é possível concluir que todos os modelos apresentam resultados muito próximos, sendo difícil optar pela melhor solução. Contudo, é possível afirmar que, em relação aos modelos apresentados na Simulação 1, com juntas de dilatação, estes modelos (Simulação 2) apresentam no geral resultados mais benéficos em relação às tensões instaladas nas paredes de alvenaria. Em todos

os modelos apresentados nesta segunda simulação é possível observar uma diminuição da média das tensões instaladas na parede e ainda uma diminuição da percentagem de parede com tensões acima da tensão de resistência à rotura à tração e à compressão, e de ambas simultaneamente. Desta forma, num potencial reforço da parede, a área a reforçar seria menor.

Os modelos de parede apresentados na Simulação 2, quando sujeitos a variação de temperatura e a retração de 0,1 %, têm comportamentos em tudo semelhantes aos apresentados na Simulação 1. Tal facto acontece porque, cada secção de parede funciona como uma parede sem junta de dilatação, servindo as liras que as unem como junta de dilatação, permitindo movimentos de expansão e contração.

Verifica-se desta forma, que os modelos apresentados na Simulação 2, com pequenas variações geométricas, se revelam uma alternativa viável à solução de criação de juntas de dilatação. Contudo, em ambas as simulações se observa que, a criação tanto de juntas de dilatação como de variações geométricas na parede, não é suficiente para evitar a fissuração, uma vez que as tensões de resistência à rotura de tração e compressão são ultrapassadas em certos pontos da parede. Para superar este facto, teria de se reforçar a parede com dispositivos capazes de evitar este fenómeno. Um deles poderá ser o reforço da parede com armaduras de aço nas juntas de assentamento, com aço capaz de resistir às tensões mais elevadas. Mais à frente, é apresentado um subcapítulo onde se expõe algumas técnicas para o reforço e reabilitação de paredes de alvenaria.

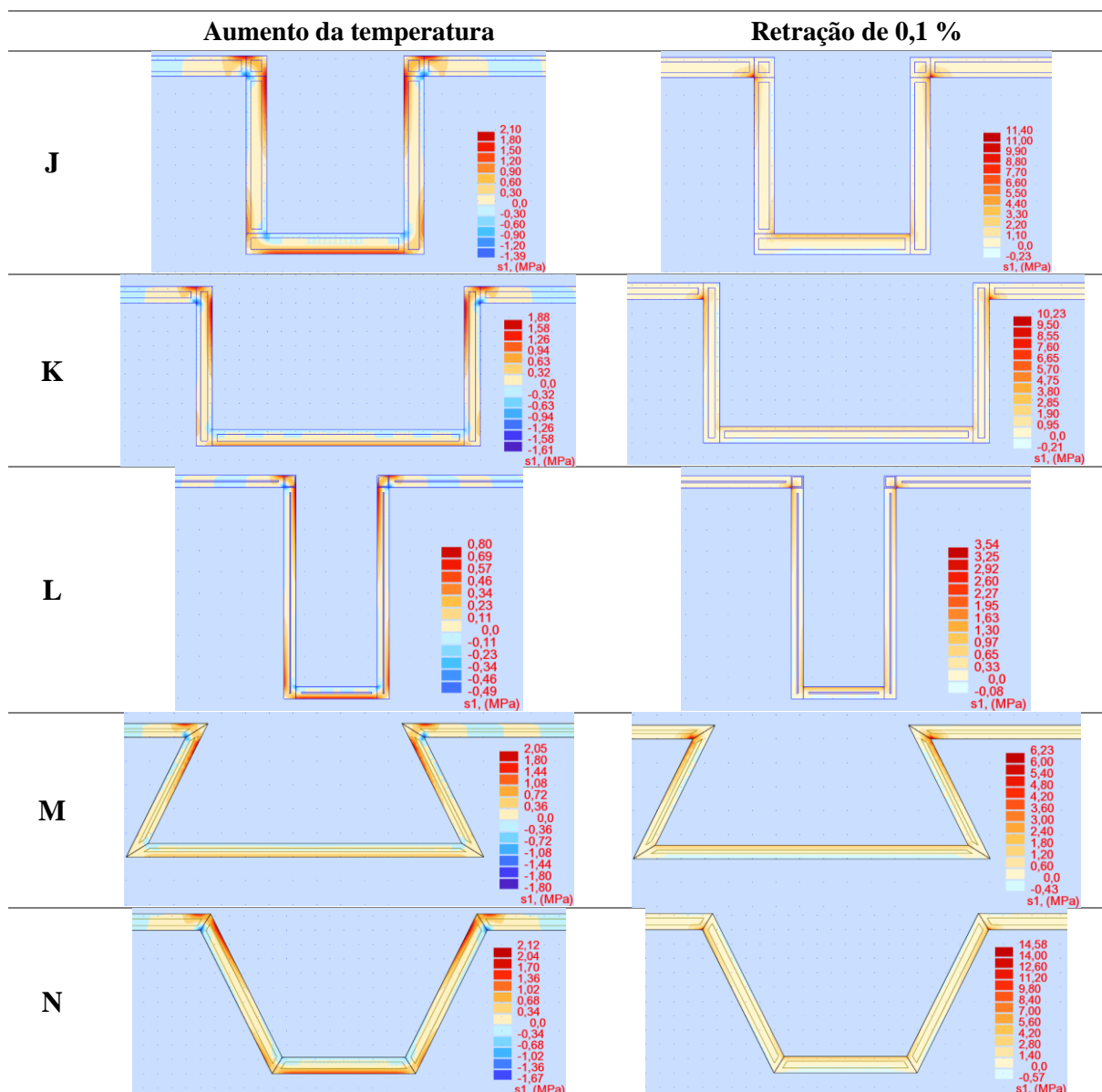
#### **4.2.3.2 Análise em planta**

Através da análise em planta pretende-se observar a distribuição das tensões ao longo da espessura da parede. Este facto pode-se tornar bastante importante na medida em que permite saber se o reforço da parede com armadura de aço é necessário ao longo de toda a espessura da mesma, ou, se apenas é necessário na zona interior ou exterior.

A análise será realizada apenas nas zonas próximas das liras, uma vez que é nesta que se encontram as tensões mais elevadas, aspeto principal para esta análise. A simulação não representará um retrato perfeito da distribuição das tensões ao longo da espessura, contudo, apresenta uma ideia aproximada da distribuição das mesmas ao longo da espessura da parede.

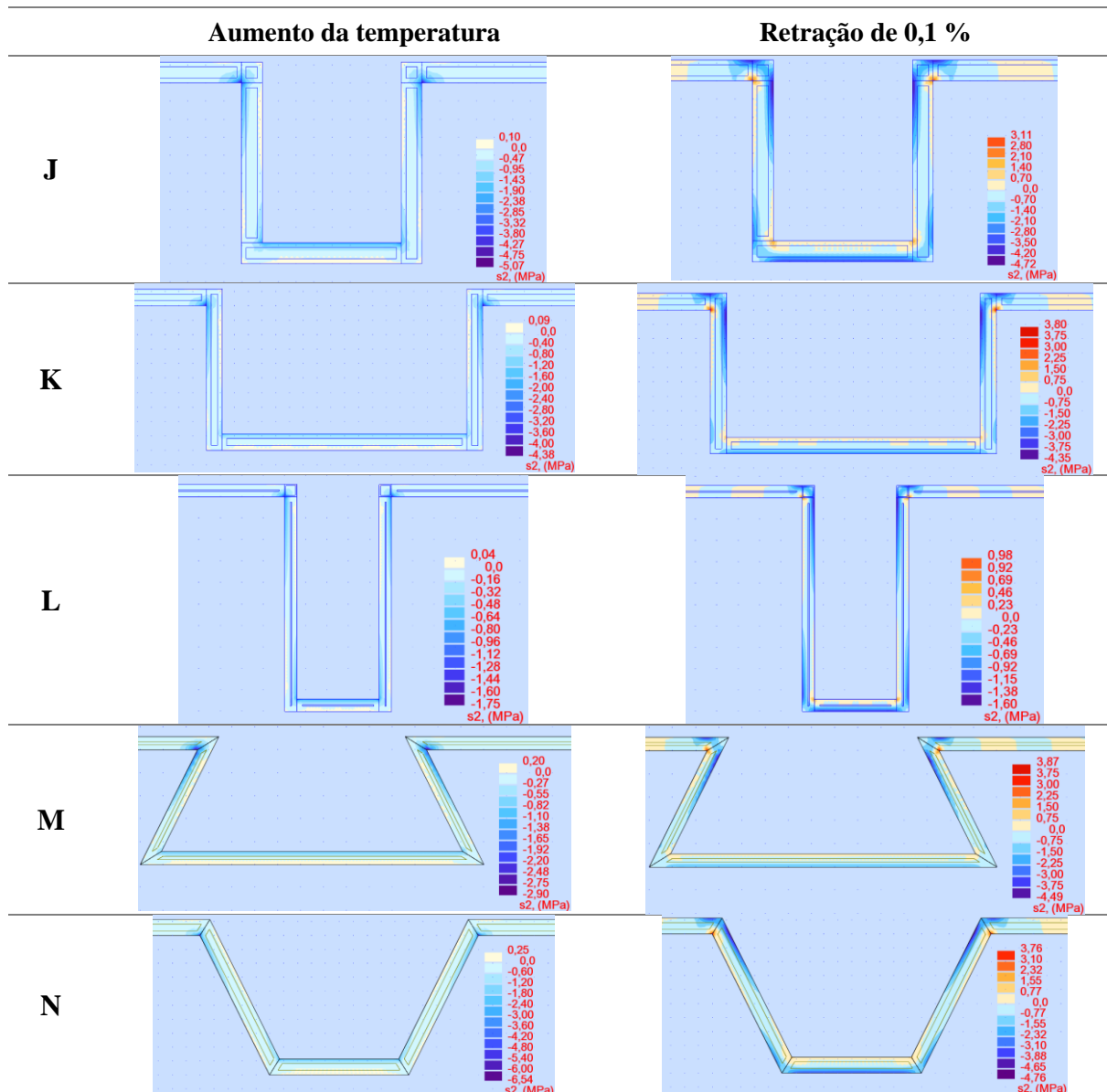
Os quadros a seguir apresentados (quadro 4.13 e 4.14) apresentam os mapas de cores, onde é possível observar a distribuição das tensões, na zona mais afetada (próximo das liras). Numa primeira fase são apresentadas as tensões principais máximas (S1), sendo de seguida, apresentadas as tensões principais mínimas (S2).

Quadro 4. 13 - Concentrações das tensões principais máximas de tração nos diferentes modelos (Simulação 2)



Todos os modelos têm respostas idênticas face às duas ações simuladas. Através dos mapas de tensões, é possível verificar que as tensões de compressão não são prejudiciais, quando analisada a parede ao longo da espessura. Isto porque, os valores mais elevados que estas atingem não se aproximam do valor da resistência à rotura por compressão. Pelo contrário, as tensões de tração, registadas na parede, ultrapassam a resistência à rotura em diversos pontos da parede. Neste caso, teria de se proceder a um reforço da parede nesses mesmos pontos.

Quadro 4. 14 – Concentração das tensões principais máximas de compressão nos diferentes modelos (Simulação 2)



Observa-se que quando há aumento da temperatura, as tensões de tração se concentram com valores mais elevados nas zonas exteriores dos cantos das liras, ao passo que, as tensões de compressão mais elevadas se concentram nas zonas interiores. Quando expostas à retração, os modelos de parede demonstram que, as tensões mais elevadas estão concentradas nas zonas interiores dos cantos das liras.

Uma vez que as tensões de compressão nestes pontos da parede não se evidenciam como prejudiciais para a mesma, a análise sobre o reforço da parede pode ser vista apenas em através



das tensões de tração. Desta forma, de modo a reduzir os custos de uma intervenção, a armadura a colocar nas juntas de assentamento poderia ser mais resistente na zona interior dos cantos da lira e menos resistente na zona exterior. Isto devido às diferenças de tensões em cada zona.

Respondendo de uma forma geral às questões inicialmente propostas no início deste capítulo, podemos concluir que:

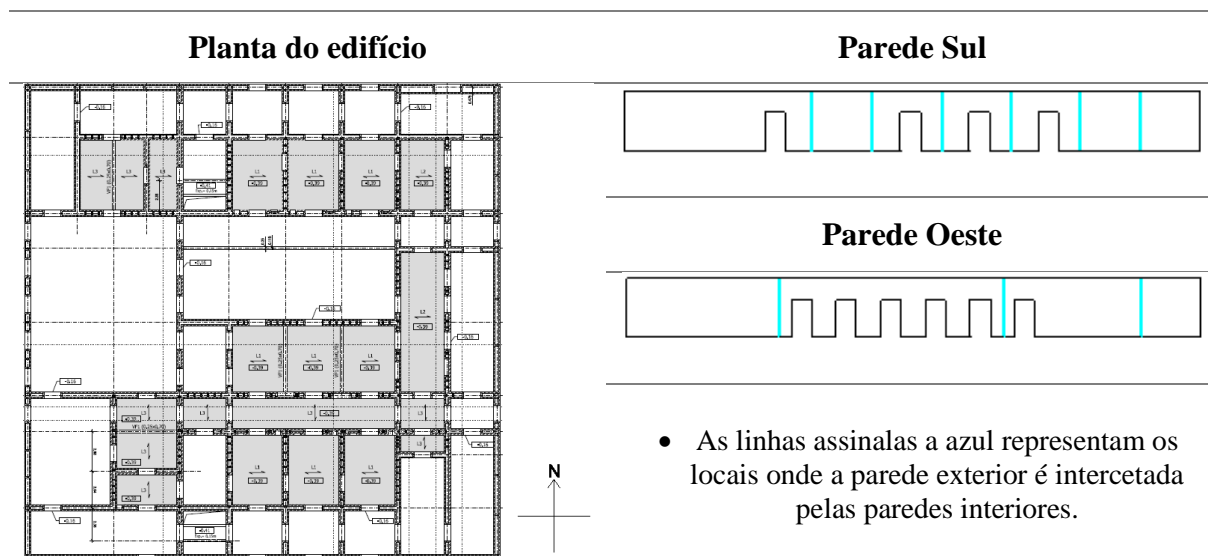
- Quando a parede é exposta a um aumento de temperatura, os materiais que a compõe têm tendência a aumentar as suas dimensões, originando desta forma tensões de compressão mais elevadas em pontos restringidos, devido à expansão da própria parede. As tensões de tração, originadas por este fenómeno, concentram-se com valores mais elevados na zona inferior da parede. Por outro lado, quando a parede é exposta à retração de 0,1%, os materiais que a constituem (argamassa e tijolo) têm tendência a retrair provocando a retração da parede. As tensões de tração com valores mais elevados concentram-se próximo dos cantos inferiores e na zona central de cada secção de parede, ao passo que, as tensões de compressão se encontram na vertical em quase toda a parede devido à retração da própria parede.
- A ação que provoca tensões mais elevadas na parede, e desta forma mais probabilidade em causar fissuração, é a retração de 0,1%, uma vez que as tensões de tração daí resultantes têm valores elevados e a tensão resistente de rotura à tração é 10% da tensão de rotura à compressão.
- Com o aumento da temperatura, a ocorrência de fenómenos de fissuração é mais provável na zona inferior da parede, devido às tensões de tração aí instaladas com direção vertical (fissuração horizontal) e na zona próxima dos cantos inferiores restringidos, devido às elevadas tensões de compressão que aí se encontram com direção diagonal (fissuração na diagonal). Quando exposta à retração, a probabilidade de ocorrer fissuração é mais elevada na central de cada secção de parede (fissuração vertical) e na zona inferior dos cantos restringidos (fissuração diagonal), devido às tensões de tração com valores elevados que aí se encontram.
- Como verificado através das simulações, ao serem projetadas tanto juntas de dilatação como variações geométricas pontuais na parede, as tensões instaladas na parede diminuem significativamente, sendo a área de parede afetada por tensões superiores à tensão resistente bastante inferior, quando comparada com paredes sem juntas ou variações geométricas.
- Contudo, estes mecanismos não são suficientemente capazes de evitar a fissuração, uma vez que, mesmo assim ainda há uma significativa área de parede com tensões superiores à tensão resistente. Teriam de ser complementados com outras técnicas de reforço.

## 5 APLICAÇÃO A CASO PRÁTICO

### 5.1 Enquadramento

De forma a estudar o fenómeno da fissuração em paredes de alvenaria relacionado com os movimentos dos materiais, é apresentado neste capítulo um exemplo prático adaptado de um edifício recente que evidenciou problemas de fissuração logo na fase da construção. O edifício em causa (quadro 5.1) apresenta forma quadrada, com 35 metros de largura, sendo composto por um único piso e paredes de tijolo face à vista. Para o estudo foram simuladas as duas paredes mais expostas às ações naturais, parede sul e oeste.

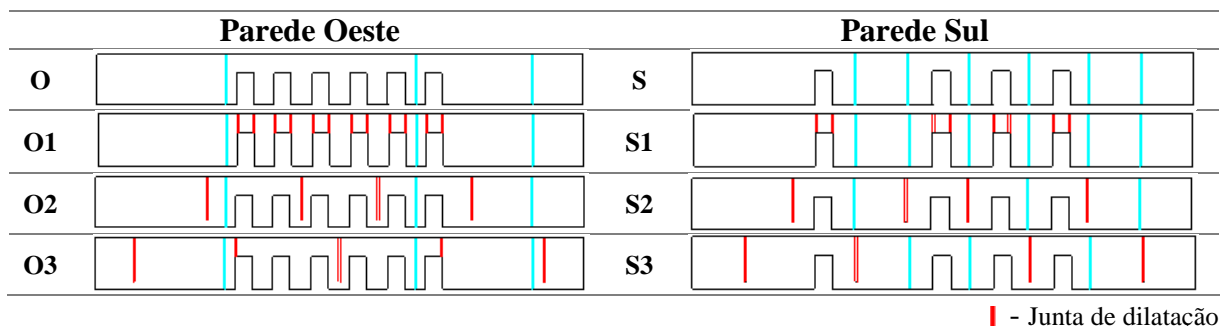
Quadro 5. 1 - Esquema do edifício e das paredes modeladas para o estudo



No quadro 5.2 encontram-se representados os modelos de paredes simulados para o estudo do edifício em causa. Os modelos O e S representam as paredes oeste e sul, respetivamente, projetadas inicialmente para o edifício. Os restantes, referem-se às alternativas estudadas com o intuito de reduzir as tensões na parede, e conseqüentemente a probabilidade de fissuração.

De referir que as características utilizadas para a alvenaria (argamassa e tijolo) foram as mesmas das Simulações 1 e 2 do capítulo anterior, com o intuito de se poder comparar mais facilmente os resultados obtidos nessas mesmas simulações.

Quadro 5. 2 – Modelos de paredes simulados



## 5.2 Resultados

### 5.2.1 Parede Sul

#### 5.2.1.1 Tensões principais máximas (S1)

Os resultados obtidos através do programa utilizado, são apresentados em seguida, de forma semelhante aos apresentados para as simulações 1 e 2. Desta forma, apresentam-se no quadro 5.3 as percentagens de parede que se encontram à tração na reposta às ações naturais e ainda, a percentagens de tensões da parede acima dos limites de resistência à rotura. Já no quadro 5.4 podem ser verificadas as médias das tensões instaladas na parede.

Quadro 5. 3 – Tensões de tração (Parede Sul)

Tensões de tração					
Área de parede à tração (%)			Tensões superiores à rotura (%)		
Modelo	Aumento da temperatura	Retração de 0,1 %	Modelo	Aumento de temperatura	Retração de 0,1 %
S	68,2	96,48	S	5,75	89,58
S1	84,85	86,91	S1	0,55	55,72
S2	80,35	88,92	S2	3,67	59,55
S3	77,96	89,89	S3	6,83	64,17

Quadro 5. 4 – Média das tensões instaladas na parede (tensões de tração +; tensões de compressão -) (Parede Sul)

Média das tensões (MPa)			
Modelo	Aumento de temperatura	Retração de 0,1 %	
S	0,23	5,55	0
S1	0,24	2,9	1
S2	0,17	3,09	2
S3	0,07	3,17	3
			4
			5
			6

É possível observar que a parede, inicialmente projetada para o edifício, apresenta grande parte das tensões acima da resistência à rotura à tração, quando exposta à retração de 0,1 %. Desta forma, a probabilidade de ocorrência de fissuração é bastante elevada. Quando exposta ao aumento de temperatura a percentagem de tensões de tração acima do limite de rotura não é tão significativa.

Nos modelos onde são introduzidas as juntas de dilatação é visível uma diminuição significativa da percentagem de tensões de tração acima da rotura, na resposta à retração de 0,1 %. A média das tensões registadas na parede também diminuiu significativamente, em comparação com a parede inicial.

Nos gráficos 5.1 e 5.2 é possível observar a distribuição das tensões nos diferentes modelos, na resposta ao aumento de temperatura e à retração de 0,1 %.

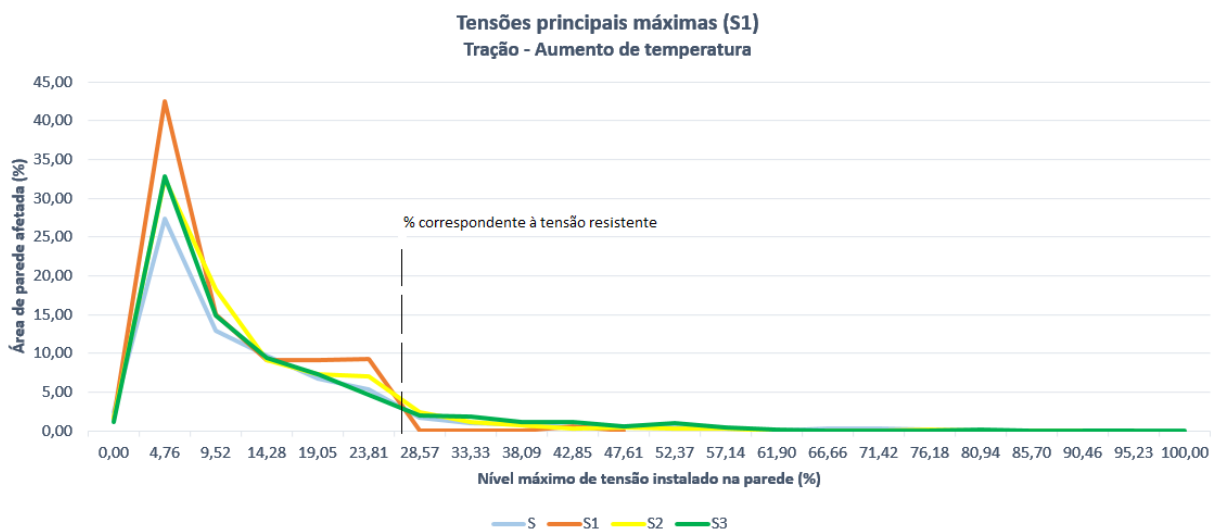


Gráfico 5. 1 – Distribuição das tensões de tração para o aumento da temperatura

Através do gráfico 5.1 é possível verificar que em todos os modelos, a maior percentagem de tensões se encontra em valores muito baixos. Verifica-se também que, estando a percentagem correspondente à tensão resistente próxima de 26%, a área de parede que necessita de reforço é reduzida e concentrada.

Verifica-se ainda que, o modelo S1 é aquele que apresenta menor percentagem de área de parede exposta a tensões superiores à tensão resistente.

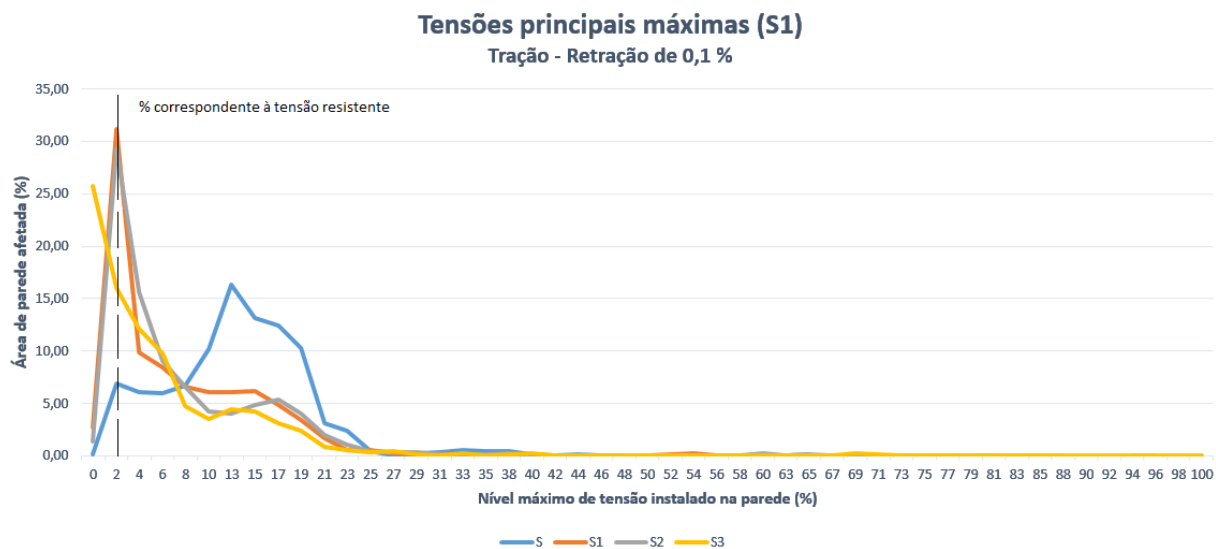


Gráfico 5. 2 – Distribuição das tensões de tração para a retração de 0,1%

Verifica-se através do gráfico 5.2 que, o modelo S, ao contrário de todos os outros, apresenta uma pequena percentagem de área de parede exposta a tensões inferiores à tensão resistente. Este modelo apresenta ainda uma grande concentração de tensões entre 13 e 21% do valor da tensão máxima instalado na parede.

Tanto nos dados fornecidos pelos quadros como nos gráficos, o modelo S1 apresenta os melhores resultados. Apresenta as menores percentagens de tensões acima da tensão de resistência à rotura, assim como a melhor média. A distribuição das tensões, neste modelo, também apresenta bons resultados, estando as maiores concentrações de tensões nos valores mais baixos dos intervalos. Face a um possível reforço da parede, a área a reforçar seria menor.

### 5.2.1.2 Tensões principais mínimas (S2)

As tensões principais mínimas apresentam os valores máximos das tensões de compressão presentes na parede. Desta forma, são apresentados, no quadro 5.5, as percentagens de tensões de compressão e as percentagens de tensões acima da resistência à rotura de compressão. Já no quadro 5.6 é possível analisar as médias das tensões na parede.

São apresentados ainda, no quadro 5.7, os resultados obtidos para as percentagens de área de parede com tensões superiores à tensão resistente, para o caso das tensões de tração e compressão atuarem simultaneamente.

Quadro 5. 5 - Tensões de compressão (Parede sul)

Tensões de compressão												
Área de parede à compressão (%)			Tensões superiores à rotura (%)									
Modelo		Aumento da temperatura	Retração de 0,1 %	Modelo	Aumento de temperatura	Retração de 0,1 %						
S		96,48	72,12	S	0,14	0						
S1		87,33	87,74	S1	0,41	0						
S2		88,92	83,21	S2	0,95	0						
S3		89,42	81,51	S3	2,48	0						
		0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100

Quadro 5. 6 - Média das tensões instaladas na parede (tensões de tração +; tensões de compressão -) (Parede Sul)

Média das tensões (MPa)			
Modelo		Aumento de temperatura	Retração de 0,1 %
S		-2,69	-0,55
S1		-1,41	-0,56
S2		-1,51	-0,41
S3		-1,85	-0,4

Pode-se observar através dos resultados apresentados, que, tanto quando há aumento de temperatura como retração de 0,1 %, as tensões de compressão registadas nos diferentes modelos não são muito significativas. No caso da retração de 0,1%, a tensão de resistência à rotura não é ultrapassada, ao passo que, quando há aumento de temperatura, esta é ultrapassada ligeiramente, sendo o modelo S3 aquele que apresenta a percentagem, de tensões acima da rotura, mais significativa.

No gráfico 5.3 podemos constatar o que foi anteriormente explicado, onde se verifica que os valores elevados das tensões de compressão são concentrados em pontos específicos, não tendo muita expressão na restante parede. À exceção do modelo inicialmente projetado (S), todos os outros apresentam a maior percentagem de parede sujeita a tensões de compressão abaixo de 9,5% do valor da tensão máxima instalada na parede, ou seja, com valores de tensões de compressão muito baixos.

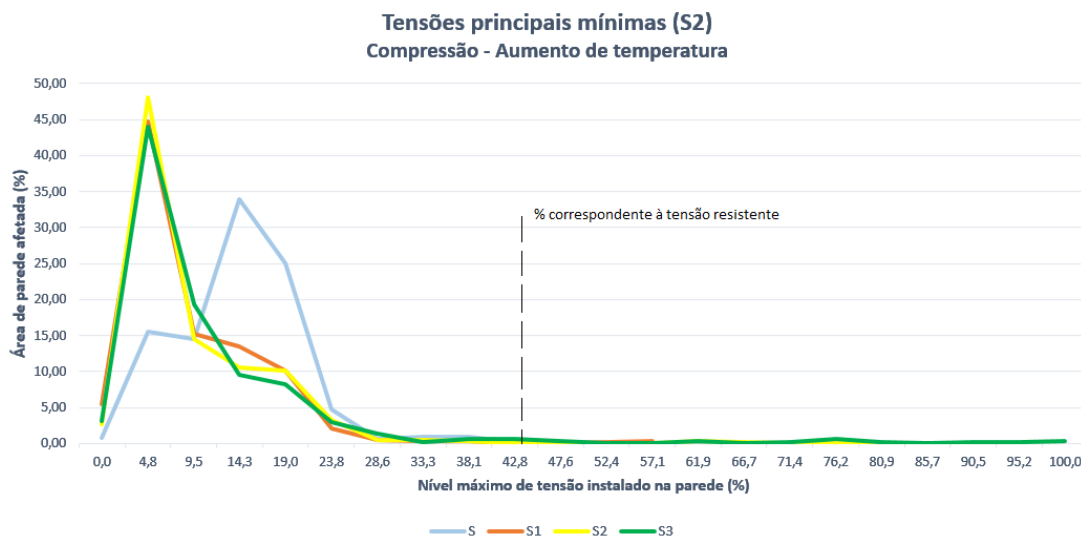
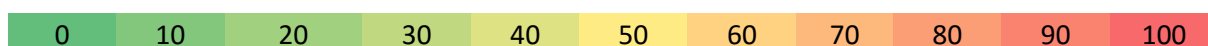


Gráfico 5. 3 - Distribuição das tensões de compressão para o aumento de temperatura

Quadro 5. 7 – Tensões de tração e compressão, em simultâneo (Parede Sul)

Tensões de tração e compressão			
Tensões superiores à rotura (%)			
Modelo		Aumento de temperatura	Retração de 0,1 %
S		12,92	90,23
S1		12,95	55,65
S2		14,21	59,62
S3		14,33	64,17



Observa-se através dos resultados apresentados no quadro 5.7 que, novamente, o modelo S1 se apresenta como a melhor solução quando as tensões de tração e compressão atuam simultaneamente. Apesar de metade da parede estar acima dos valores de resistência à rotura, na resposta à retração de 0,1 %, a diferença para o modelo projetado inicialmente é bastante considerável. No caso do aumento de temperatura, essa diferença não é tão acentuada, nos quatro modelos.

A alternativa S1, com as juntas de dilatação acima das portas, apresenta-se como a melhor opção, face aos valores apresentados. De realçar que, esta opção necessita de um mecanismo diferente dos outros, na medida em que, o suporte que vai servir de apoio para a zona de parede acima das portas tem de ser suficientemente capaz de aguentar todo o peso da alvenaria aí presente. Isto porque com a inclusão das juntas de dilatação, as zonas acima das portas ficam

separadas do resto da parede. O esquema a seguir apresentado (figura 5.1) demonstra a técnica utilizadas para este caso.

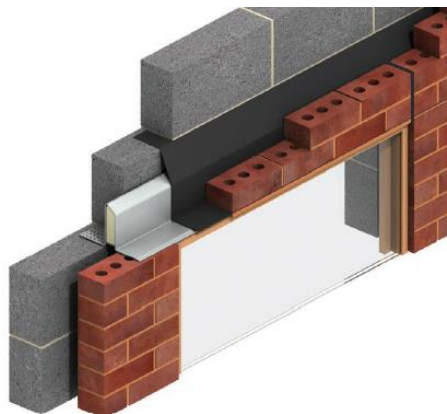


Figura 5. 1 – Pormenor da zona da padieira (adaptado de (Ancon, 2016))

Com os mapas de cores apresentados em anexo, é possível verificar que os valores de compressões mais elevados se encontram nos cantos inferiores restringidos da parede, precisamente quando há aumento de temperatura, devido ao facto de esses pontos não acompanharem o movimento de expansão dos materiais, e consequentemente da parede. No caso da retração de 0,1 %, é precisamente nesses pontos, também, que as tensões são mais elevadas, neste caso de tração.

É possível observar que, apesar dos modelos alternativos à parede inicial poderem apresentar tensões máximas mais elevadas, estas só se encontram em pontos localizados da parede. Na restante parede as tensões diminuem, como se observa através das médias das tensões apresentadas.

Nos mapas apresentados em anexo verifica-se também que, existindo aberturas (portas) na parede de alvenaria, a probabilidade de ocorrer fissuração nesses pontos é elevada, devido à concentração de tensões aí presentes.

## 5.2.2 Parede Oeste

### 5.2.2.1 Tensões principais máximas (S1)

De forma semelhante aos resultados apresentados para a parede sul, serão apresentados para a parede oeste as tensões principais máximas, e as tensões principais mínimas.

De seguida são apresentados, no quadro 5.8, as percentagens de área de parede que se encontra à tração para cada uma das ações, assim como a percentagem de tensões acima da rotura. No quadro 5.9 são apresentadas as médias das tensões instaladas na parede na resposta às ações de aumento da temperatura e retração de 0,1 %.



Quadro 5. 8 – Tensões de tração (Parede Oeste)

Tensões de tração										
Área de parede à tração (%)			Tensões superiores à rotura (%)							
Modelo	Aumento da temperatura	Retração de 0,1 %	Modelo	Aumento de temperatura	Retração de 0,1 %					
O		70,49	94,23	O		1,8	82,68			
O1		81,81	81,39	O1		0,98	56,6			
O2		80,31	89,39	O2		3,27	51,52			
O3		77,25	85,75	O3		2,98	51,95			
0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100

Quadro 5. 9 – Média das tensões instaladas na parede (tensões de tração +; tensões de compressão -) (Parede Oeste)

Média das tensões (MPa)			
Modelo	Aumento de temperatura	Retração de 0,1 %	
O		0,2	5,33
O1		0,26	2,93
O2		0,18	2,48
O3		0,16	2,72

0
  1
  2
  3
  4
  5
  6

Os modelos O2 e O3 apresentam os melhores resultados quando a parede é exposta à retração de 0,1 %, enquanto o modelo O1 apresenta os valores das tensões mais baixos, na resposta ao aumento da temperatura. O modelo O1 ao possuir grande extensão de parede sem junta de dilatação, faz com que as tensões nas duas secções exteriores sejam elevadas, impedindo grande parte da secção de parede de resistir às tensões de tração, na resposta à retração de 0,1 %. Nos casos O2 e O3, as secções de parede exteriores já possuem juntas de dilatação, o que diminui as tensões, quando há retração de 0,1 %.

As médias das tensões, registadas no quadro 5.9, indicam que, à exceção do modelo inicial (O), todos os outros apresentam valores muito idênticos.

Através dos gráficos 5.4 e 5.5 podemos observar as distribuições das tensões nos diferentes modelos de parede para os casos de aumento de temperatura e de retração de 0,1 %. Os gráficos apresentados realçam mais uma vez a situação mais gravosa para a parede de alvenaria, relativamente às tensões de tração. A retração de 0,1 % provoca, na parede, tensões bastante mais elevadas do que as que são provocadas aquando do aumento da temperatura. Como se constata, no aumento da temperatura é muito pequena a percentagem de tensões de tração acima da tensão de rotura. Por outro lado, aquando da retração a percentagem de parede com tensões superiores à tensão resistente é bem mais significativa.

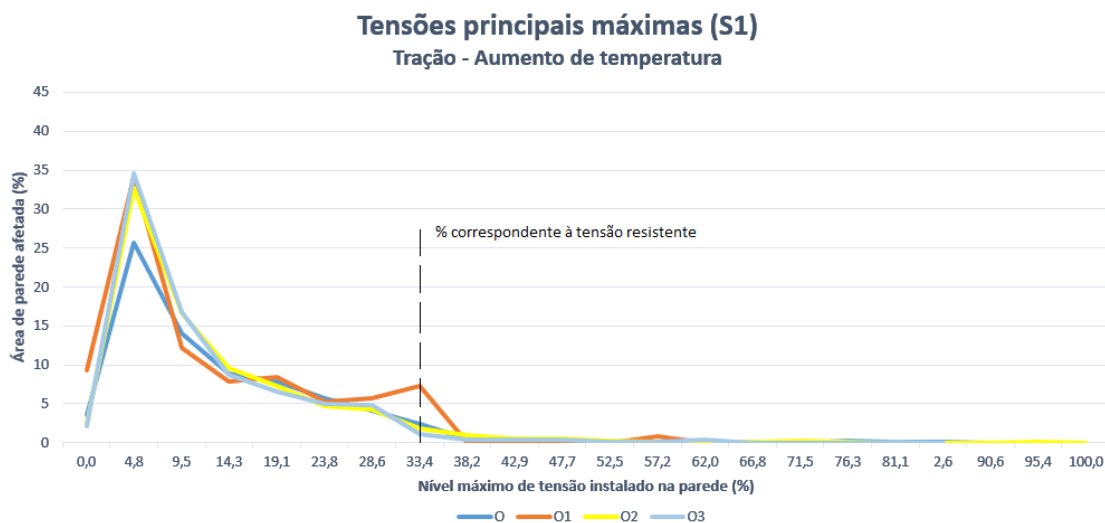


Gráfico 5. 4 – Distribuição das tensões de tração com o aumento da temperatura

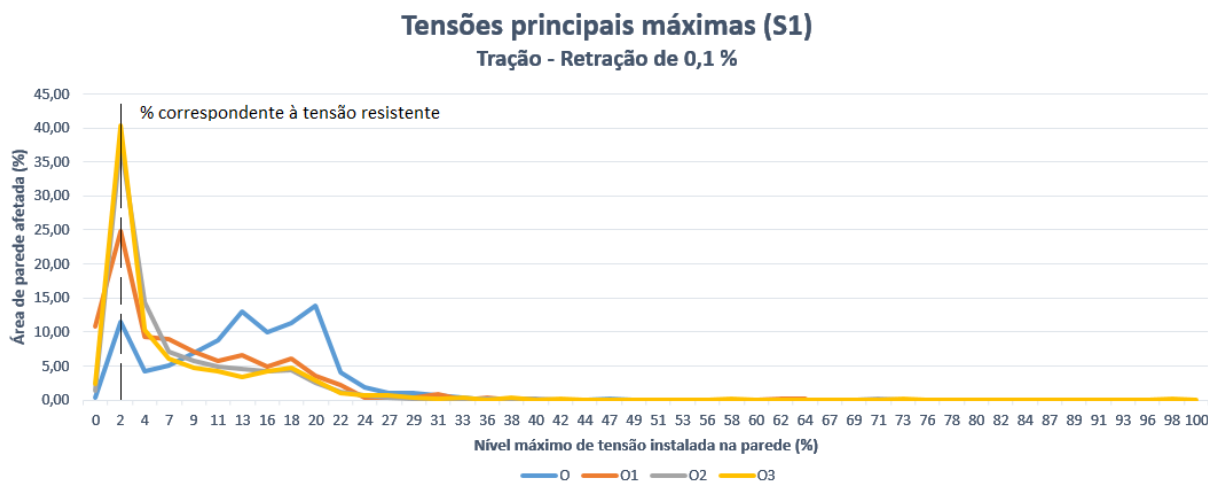


Gráfico 5. 5 – Distribuição das tensões de tração para a retração de 0,1 %

### 5.2.2.2 Tensões principais mínimas (S2)

Neste subcapítulo são apresentados os valores máximos das tensões de compressão. São apresentadas, no quadro 5.10, as percentagens de parede que se encontra à compressão, na resposta às diferentes ações e ainda, as percentagens de tensões acima da rotura. Já no quadro 5.10 é possível verificar as médias das tensões apresentadas pelos diferentes modelos.

Quadro 5. 10 – Tensões de compressão (Parede Oeste)

Tensões de compressão												
Área de parede à compressão					Tensões superiores à rotura							
Modelo		Aumento da temperatura	Retração de 0,1 %			Modelo		Aumento de temperatura	Retração de 0,1 %			
O		94,66	74,6			O		0,29	0			
O1		79,92	83,08			O1		0,28	0			
O2		90,26	85,79			O2		0,27	0			
O3		87,14	82,64			O3		0,57	0			
		0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100

Quadro 5. 11 – Média das tensões instaladas na parede (tensões de tração +; tensões de compressão -) (Parede Oeste)

Média das tensões (MPa)			
Modelo		Aumento de temperatura	Retração de 0,1 %
O		-2,59	-0,48
O1		-1,41	-0,52
O2		-1,23	-0,54
O3		-1,35	-0,47

Como é possível observar, as tensões de compressão, quando atuam isoladamente, não apresentam, ao contrário das de tração, grandes preocupações para a fissuração da parede, uma vez que apenas ultrapassam a tensão de rotura em pontos localizados da parede. Desta forma, é fácil evitar a fissuração por tensões de compressão, atuando nos pontos onde as tensões são mais elevadas.

No gráfico 5.8 é possível observar a distribuição das tensões de compressão nos diferentes modelos para o caso do aumento da temperatura, situação que mais afeta as tensões de compressão, onde se verifica mais uma vez, que as tensões de compressão acima da tensão resistente são concentradas e muito pouco significativas.

De outra forma, quando as tensões de tração atuam em simultâneo com as de compressão, a probabilidade de fissuração da parede aumenta. É possível observar, através do quadro 5.12, que na resposta da parede ao aumento da temperatura, as percentagens de tensões acima da rotura são muito elevadas, comparando com as mesmas tensões quando apenas atuam as de compressão.

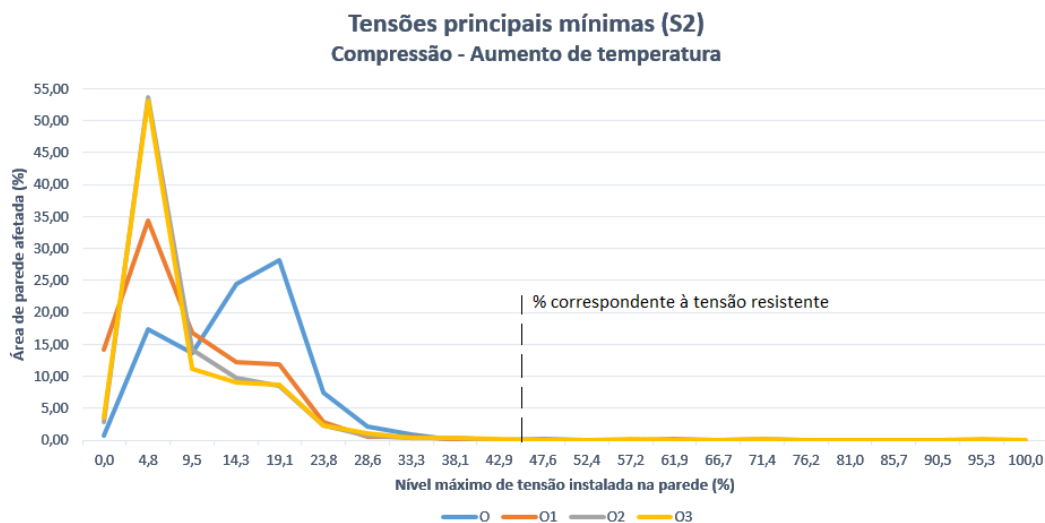


Gráfico 5. 6 – Distribuição das tensões de compressão aquando do aumento de temperatura

Quadro 5. 12 – Tensões de tração e compressão, em simultâneo (Parede Oeste)

<b>Tensões de tração e compressão</b>			
<b>Tensões superiores à rotura</b>			
Modelo		Aumento de temperatura	Retração de 0,1 %
O		8,87	82,68
O1		14,26	56,32
O2		9,44	51,75
O3		9,36	52,02

Com todos os resultados apresentados e com o apoio dos mapas em anexo, observa-se mais uma vez, que os modelos O2 e O3 apresentam os melhores resultados em termos de tensões e que a principal causa de fissuração nos diversos modelos se prende com as tensões de tração provocadas pela retração de 0,1 % dos materiais. É possível verificar que a incorporação de juntas de dilatação na parede, apesar de aumentar as tensões máximas, reduz o valor das tensões em grande parte da parede, reduzindo dessa forma a probabilidade de fissuração da mesma. Contudo, como verificado nas simulações anteriores, não é suficiente para evitar a fissuração da parede, uma vez que mesmo assim, as tensões instaladas em certos pontos da parede ultrapassam a tensão de rotura. De referir que, nos casos dos modelos O1 e O3 seria necessário, nas zonas das padieiras incorporar a mesma técnica utilizada no caso S1 da parede sul.

Observa-se, de igual forma aos modelos apresentados para a parede sul, que, existindo aberturas (portas) na parede de alvenaria, as tensões se vão concentrar à sua volta, aumentando a probabilidade de fissuração nesses pontos.

### 5.3 Técnicas de reabilitação e reforço

A presente dissertação tem como objetivo a avaliação do risco e a prevenção de fenómenos de fissuração. As técnicas de reforço e reabilitação a seguir apresentadas são apenas uma pequena sugestão face às existentes no mercado. O estudo das técnicas existentes daria tema suficiente para outro trabalho.

Como se constatou através das várias simulações ao longo deste trabalho, as variações de temperatura e a retração dos materiais provocam, nas paredes de alvenaria, tensões elevadas, às quais estas não conseguem resistir quando são não armadas. Este subcapítulo tem como objetivo apresentar algumas soluções de reabilitação e reforço das paredes de alvenaria estudadas no caso prático. Sendo alvenaria de tijolo face à vista, trata-se de um caso particular de reabilitação, uma vez que não existe revestimento, sendo o próprio pano da parede a assegurar as exigências funcionais e o aspeto visual.

As soluções para a reabilitação de paredes de alvenaria não estruturais enquadram-se na, sua maioria, em seis pontos (Silva, 2002): “eliminação das anomalias; substituição dos elementos e materiais; ocultação de anomalias; proteção contra os agentes agressivos; eliminação das causas das anomalias; reforço das características funcionais.”

Através das simulações do capítulo 4 e 5, verificou-se que a introdução de juntas de dilatação ou variações geométricas pontuais, diminuiu as tensões em grande parte da parede, contudo, essas intervenções não são suficientes. Sabe-se, contudo, que a introdução de variações geométricas não é uma solução viável quando a obra é de reabilitação, sendo apenas uma boa solução na fase de projeto da mesma. Desta forma, as soluções viáveis para o caso em estudo passam pela criação de juntas de dilatação, reparação das fissuras e o reforço da parede com armaduras de aço.

Para a criação de juntas de dilatação deve-se ter em conta as diferentes distribuições apresentadas ao longo das simulações, escolhendo desta forma aquela que melhores resultados evidencia. De seguida procede-se à abertura das juntas verticais, tendo em conta o espaçamento da mesma, preenchendo-se de seguida com mastique, de forma a tornar este dispositivo estanque à água. Importa referir que, face às tensões elevadas que se registam nas zonas envolventes às juntas de dilatação, estas necessitam de ser reforçadas com armaduras de aço, de modo a resistir.

Para a reparação das fissuras são várias as técnicas existentes, porém, numa primeira fase é necessário perceber a gravidade da mesma. Em situações de fissuração grave poderá ser necessário a substituição do pano de parede. Outra solução corrente em casos de fissuração, passa pela introdução de varões de aço helicoidais nas juntas de assentamento.

Quando a fissuração atravessa a argamassa e o tijolo cerâmico é necessário proceder-se à remoção do pano de alvenaria afetado. De seguida reconstrói-se as zonas demolidas com

materiais e acessórios adequados. Um dos acessórios possíveis é a colocação de armaduras de aço (figura 5.2) nas juntas de assentamento, de forma a fazer com que a parede resista às tensões impostas.

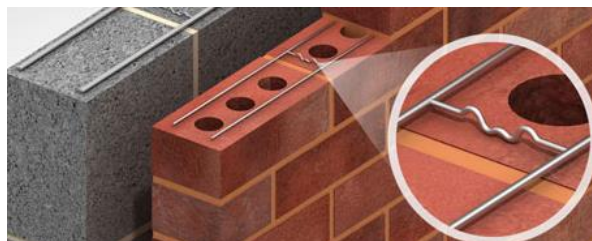


Figura 5. 2 - Exemplo de armadura de aço na junta de assentamento (Ancon, 2016)

Em situações em que as fissuras se desenvolvem apenas através das juntas de assentamento, uma possível reabilitação passa pela colocação de varões de aço helicoidais, como apresentado na figura 5.3. Para isto, começa-se por remover a argamassa da junta de assentamento horizontal em torno da fissura. De seguida procede-se à limpeza das ranhuras e coloca-se silicone ao longo da mesma. Introduce-se o varão de aço na ranhura e volta-se a colocar silicone, fechando em seguida a junta com argamassa. Esta solução pode ser utilizada também ao longo dos pontos da parede onde as tensões são mais elevadas, mesmo que não tenham evidenciado fissuração.



Figura 5. 3 – Exemplo de varões de aço para reforço das juntas de assentamento (helifix@2016; twistfix@2016)

Face às tensões elevadas nos cunhais, a probabilidade de ocorrer fissuração é elevada. Desta forma, deve-se proceder ao reforço do mesmo. Uma das técnicas possíveis é a introdução de armaduras nas juntas de assentamento (de ambos os lados do cunhal), removendo a argamassa das mesmas, introduzindo de seguida a armadura de aço e fechando a mesma com argamassa. As armaduras a utilizar para este caso podem ser iguais às apresentadas na figura 5.2 ou 5.3. Outra forma de reforçar os cunhais pode ser realizada através da introdução de varões de aço ao longo dos tijolos cerâmicos. Para isto é realizado um furo ao longo dos tijolos cerâmicos, introduzido silicone ao longo do mesmo para em seguida ser colocado o varão em aço. Desta forma, o cunhal torna-se bastante mais resistente.

## 6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

### 6.1 Conclusões

Ao longo desta dissertação procurou-se determinar a magnitude da problemática da fissuração em paredes de alvenaria relacionada com os movimentos naturais dos materiais constituintes das mesmas. Para isso, foram simulados, numa fase inicial, diversos modelos de paredes com diferentes disposições de juntas de dilatação e geometria, expondo-os às ações de variação de temperatura e de humidade, recorrendo a um programa de elementos finitos (*Autodesk Robot Structural Analysis*). As diferentes disposições da parede tinham como objetivo a diminuição das tensões instaladas ao longo da mesma, diminuindo, dessa forma, a probabilidade de ocorrência de fissuração. Tentou-se perceber até que ponto seria suficiente a introdução destes mecanismos para evitar a fissuração. O estudo foi completado com a aplicação a um caso prático de um edifício em alvenaria de tijolo face à vista, que apresentou grandes tensões ao longo dos diferentes panos de parede, os quais provocaram o aparecimento de fissuras.

Na primeira simulação realizada, foram introduzidas diferentes disposições de juntas de dilatação verificando-se que, nos modelos sem junta de dilatação ou com juntas de dilatação muito distanciadas entre si (modelos A e G), as tensões instaladas na parede possuíam valores muito elevados. Por outro lado, os modelos com disposições mais uniformes de juntas ao longo da parede apresentaram uma diminuição muito significativa da área de parede com tensões superiores à tensão resistente, assim como da média de tensões instaladas. De todos os modelos testados, realçam-se os modelos C, D e I por apresentarem melhores resultados, na perspetiva de uma intervenção de reforço, visto que a área de parede a reforçar seria menor.

Verifica-se que, com o aumento da temperatura, a parede tem tendência a expandir as suas dimensões, provocando tensões de compressão muito elevadas nas zonas inferiores, junto aos pontos restringidos. As fissuras prováveis de aparecer nesses pontos desenvolvem-se na diagonal, perpendiculares à direção das tensões. Com o aumento da temperatura, existe também, uma forte concentração de tensões de tração na zona inferior da parede, sendo que a fissuração se desenvolve preferencialmente na direção horizontal, uma vez que, as tensões de tração estão praticamente na vertical. Na resposta à retração, os diversos modelos de paredes apresentaram tensões de tração muito elevadas na zona próxima aos cantos inferiores restringidos, devido à tendência da parede retrair, e não poder ser acompanhado esse movimento nesses mesmos pontos. As tensões aí instaladas apresentam-se na diagonal, originando fissuração que se desenvolve perpendicularmente a essa direção. Obtêm-se também, valores bastante elevados de tensões de tração na zona central de cada secção de parede, sendo

estas praticamente horizontais, originado dessa forma, fissuras verticais na alvenaria. As tensões de compressão não são muito significativas aquando da retração.

Com a segunda simulação obtiveram-se resultados muito semelhantes em todos os modelos simulados, sendo difícil destacar o melhor. Verificou-se que a introdução de variações geométricas na parede (liras) se apresenta uma alternativa bastante viável à introdução de juntas de dilatação. As liras funcionam como uma espécie de juntas de dilatação, acomodando os movimentos da parede. As tensões obtidas nestes modelos apresentaram uma significativa diminuição quando comparadas com as obtidas nos modelos da simulação 1. A área de parede exposta a tensões superiores à tensão resistente diminuiu em todos os modelos, assim como a média das tensões instaladas. O comportamento dos diferentes modelos, quando expostos às diferentes ações naturais (variação de temperatura e de humidade), apresentou-se, em tudo, semelhante aos dos modelos da Simulação 1.

Através da análise em planta da distribuição das tensões nos modelos da segunda simulação (com variações geométricas) tentou-se perceber se a parede necessita de reforço (armadura de aço) ao longo de toda a espessura, ou se apenas necessita na zona interior ou exterior. Esta análise foi realizada apenas na zona próxima das liras, uma vez que é a mais afetada pelas tensões e permitiu perceber que apenas as tensões de tração provocam tensões assinaláveis nestes pontos. Desta forma, e de modo a reduzir custos numa intervenção de reforço, verificou-se que as armaduras a colocar poderiam ser mais resistentes na zona interior dos cantos das liras e menos resistentes na zona exterior. Isto porque, com o aumento de temperatura, as tensões de tração concentram-se com valores mais elevados nas zonas exteriores dos cantos das liras; com a retração concentram-se com valores mais elevados na zona interior dos cantos das liras. Porém, os valores apresentados pelas tensões de tração na resposta à retração são bastante superiores aos apresentados para o aumento da temperatura.

Nas duas simulações realizadas verifica-se que, mesmo com a introdução destes mecanismos, a parede não resiste às tensões nela instaladas, sendo necessário um reforço nessas áreas de parede. Verifica-se, contudo, que são opções viáveis na diminuição das tensões ao longo da parede, e que, completadas com um possível reforço de armaduras de aço nas juntas de assentamento das áreas afetadas por tensões superiores, diminui significativamente a probabilidade de fissuração. Verifica-se também, que a ação da retração de 0,1% é aquela que provoca, na parede de alvenaria, tensões mais elevadas, sendo as tensões de tração as que mais probabilidade têm de causar fissuração.

Na aplicação ao caso prático, foram simuladas as paredes mais expostas às ações naturais, parede sul e oeste, com introdução de diferentes disposições de juntas de dilatação. Tanto a parede sul como a oeste não possuíam juntas de dilatação ao longo dos 35 metros de comprimento, fazendo com que quase toda a área de parede apresentasse tensões superiores à tensão de rotura aquando da retração de 0,1%. Com a introdução de juntas de dilatação devidamente distribuídas, foi notório a diminuição de área de parede com tensões acima da



tensão resistente, sendo o modelo S1 aquele que melhores resultados apresentou, para o caso da parede Sul. Em relação à parede Oeste, os modelos com resultados mais positivos foram o O2 e O3, visto que a área de parede a reforçar nestes modelos é inferior à registada em todos os outros casos. O comportamento registado em todos os modelos realizados no caso prático foi semelhante aos apresentados nas duas primeiras simulações. A única exceção deveu-se ao facto de existirem aberturas na parede (portas), havendo também uma concentração significativa de tensões em volta das mesmas, contrariamente a todas as outras simulações, que não possuíam aberturas, para além das juntas de dilatação. Verificou-se, com esta aplicação a um caso real, que a retração de 0,1% é aquela que provoca tensões mais elevadas ao longo da parede de alvenaria e, desta forma, ser a principal causa de fissuração, sendo que as tensões mais prejudiciais são as de tração.

De um modo geral, conclui-se que as paredes de alvenaria não conseguem resistir às tensões provocadas pelas variações de temperatura e de humidade se não forem devidamente reforçadas. A criação de juntas de dilatação e variações geométricas pontuais na parede revela-se um bom mecanismo para a diminuição das tensões em grande parte da parede. Porém, tem de ser acompanhado por um reforço nas zonas onde, apesar de tudo, as tensões são superiores à tensão resistente. Conclui-se ainda que, apesar do aumento de temperatura provocar tensões elevadas na parede, é a retração de 0,1% aquela que mais probabilidade tem de causar fissuração, sendo as tensões de tração aquelas que atingem valores mais elevados.

## **6.2 Trabalhos Futuros**

Como trabalhos futuros, para melhor se perceber o fenómeno da fissuração em paredes de alvenaria de tijolo seria importante simular os diferentes tipos de parede com modelos de micro-modelação. Tratando-se de um método de modelação muito complexo, que implica a caracterização detalhada dos diversos materiais que compõem a parede, seria benéfico simular apenas os modelos que apresentam melhores resultados, estudando-se, dessa forma, os critérios de rotura ao longo das ligações tijolo/argamassa. Contrariamente ao que foi realizado nesta dissertação, o estudo seria feito em termos de tensões normais.

Relativamente ao trabalho desenvolvido nesta dissertação, poderia ser vantajoso simular os modelos de parede com diferentes características de materiais, comparando-se dessa forma a possível variação de tensões que ocorreria entre eles.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ancon. (2016). "Masonry Support Systems & Lintels for the construction industry". Ancon Building Products.
- Apicer. (2000). "Manual de Alvenaria de Tijolo". Coimbra: Centro Tecnológico da Cerâmica e do Vidro.
- Beasley, K. J. (2012). "Building facade failures". *Forensic Engineering*, 165, 13–19.
- Building Research Establishment Digest. (1979). "Estimation of thermal and moisture movements and stresses: Part 1". Watford : Building Research Establishment.
- Camarneiro, L. (2002). "A importância da pormenorização no comportamento das alvenarias". In Seminário sobre paredes de alvenaria (pp. 169–186). Porto.
- Campbell, J., & Pryce, W. (2005). "História Universal do Tijolo". Lisboa: Caleidoscópico.
- CEN. (2005). "Eurocode 6 - Design of masonry structures. Part 1-1: General rules for reinforced and unreinforced masonry structures" (Vol. EN 1996–1-). ENV 1996-1-1, 2005.
- Cerâmica Vale da Gândara. (2012). "Manual de Aplicação de tijolos face à vista e de pavers cerâmicos".
- Coimbra, T. (2010). "Patologias em Alvenarias de Preenchimento Induzidas por Deformação dos Suportes". Dissertação De Mestrado em Engenharia Civil. Faculdade de Engenharia. Universidade do Porto.
- Cultrone, G., Sebastián, E., Elert, K., de la Torre, M. J., Cazalla, O., & Rodriguez-Navarro, C. (2004). "Influence of mineralogy and firing temperature on the porosity of bricks". *Journal of the European Ceramic Society*, 24(3), 547–564.
- Dias, A. (2002). "Construção em tijolo cerâmico: Das exigências normativas do produto à prática de aplicação". In Seminário sobre paredes de alvenaria (pp. 41–64). Porto.
- Dias, A. (2011). "Uma breve retrospectiva de soluções de paredes de elementos cerâmicos". In *Paredes divisórias: Passado, presente e futuro*. Porto.
- Fiorito, A. J. S. I. (1994). "Manual de argamassas e revestimentos: Estudo e procedimentos de execução" (1a ed.). São Paulo: Editora PINI.
- IPMA. (2015). "Boletim Climatológico Sazonal". Instituto Português do Mar e da Atmosfera.
- Lima, G., Sousa, K., & Tibiriçá, A. (2014). "Investigação e diagnóstico de patologias relacionadas às fachadas de uma edificação". In *XV Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído*. Maceió.
- LNEC. (2013). "O Parque Habitacional e a sua Reabilitação. Análise e Evolução, 2001-2011". Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
-

- 
- Lourenço, P. B. (1996). "Um micro-modelo para análise de estruturas de alvenaria". Guimarães: Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho.
- Lucas, J. A. C. (1987). "Revestimentos para paramentos interiores de alvenaria de blocos de betão celular autoclavado - VOL. II: Betão celular autoclavado - Fissuração de paredes de alvenaria em geral; Fissuração de paredes de alvenaria de betão celular autoclavado no nosso País". Relatório 109/87-NCCT, LNEC. Lisboa.
- Martins, A., Vasconcelos, G., & Costa, A. C. (2014). "Comportamento sísmico de paredes de alvenaria de fachada - uma breve revisão". In 5as Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas (pp. 1–16).
- Menezes, R. R., Campos, L. F., Neves, G. de A., & Ferreira, H. C. (2006). "Aspectos fundamentais da expansão por umidade: revisão. Parte II: cinética de expansão e sua determinação". *Cerâmica*, 52, 114–124.
- Mesquita, D. F. da S. (2007). "Viabilidade técnico-económica do tijolo face à vista em fachadas de edifícios em Portugal". Dissertação De Mestrado em Engenharia Civil. Instituto Superior Técnico. Universidade Técnica de Lisboa.
- Oliveira, F. (2001). "Reabilitação de paredes de alvenaria pela aplicação de revestimentos resistentes de argamassa armada". Tese de Douturamento em Engenharia de Estruturas. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo.
- Paiva, J. V. et al. (1985). "Patologia da Construção". In 1º Encontro sobre Conservação e Reabilitação de Edifícios de Habitação. Lisboa: LNEC.
- Pereira, F. (2008). "Influência das variações de temperatura no desempenho de fachadas de alvenaria". Dissertação De Mestrado em Engenharia Civil. Faculdade de Engenharia. Universidade do Porto.
- Perrin, B., Vu, N. A., Multon, S., Volland, T., & Ducroquetz, C. (2011). "Mechanical behaviour of fired clay materials subjected to freeze-thaw cycles". *Construction and Building Materials*, 25(2), 1056–1064.
- Radovanović, Ž., Grebović, R. S., Dimovska, S., Serdar, N., Vatin, N., & Murgul, V. (2015). "The Mechanical Properties of Masonry Walls - Analysis of the Test Results". *Procedia Engineering*, 117, 865–873.
- Ribeiro, F. A. (2006). "Especificação de juntas de movimentação em revestimentos cerâmicos de fachadas de edifícios: levantamento do estado da arte". Dissertação De Mestrado em Engenharia. Departamento de Engenharia de Construção Civil e Urbana. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica.
- Rodrigues, M. (2004). "Argamassas de revestimento para alvenarias antigas - Contribuição para o estudo da influência dos ligantes". Dissertação de Douturamento em Engenharia Civil. Departamento de Engenharia Civil. Faculdade de Ciências e Tecnologia. Universidade Nova de Lisboa.
- Sabbatini, F. H., Barros, M. M. S. B., Dias, A. M. N. D., & Flain, E. P. (1990). "Recomendações para a produção de revestimentos cerâmicos para paredes de vedação em alvenaria. Projeto EP/EN - 6 - Desenvolvimento de métodos construtivos de revestimento de piso". Convênio Escola Politécnica da USP e ENCOL. São Paulo.
-

- Silva, J. (1998). "Fissuração das alvenarias. Estudo do comportamento das alvenarias sob ações térmicas". Dissertação de Doutoramento em Engenharia Civil. Departamento de Engenharia Civil. Universidade de Coimbra.
- Silva, J. (2002). "Alvenarias Não Estruturais: Patologias e Estratégias de Reabilitação". Seminário Sobre Paredes de Alvenaria, 187–206.
- Silva, J., & Abrantes, V. (2007). "Patologia em paredes de alvenaria: causas e soluções". In Seminário sobre paredes de alvenaria (pp. 65–84).
- Silva, J. M., Romeu, V., Torres, I., & Negrão, J. (2015). "Risks and effects of shrinkage and expansion of clay brick walls : A less conventional case study". In CIB Commission W023 - Wall Structures (pp. 1–6). Porto, Portugal: 52th Meeting, September 28-29.
- Simões, A. (1966). "O tijolo, velho e sempre novo material de construção". Lisboa: LNEC.
- Sousa, H. (1988). "Materiais para Alvenaria. Apreciação de algumas produções e sugestões visando a melhoria da sua qualidade". Dissertação De Mestrado em Engenharia Civil. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Sousa, H. (1996). "Melhoria do Comportamento Térmico e Mecânico das Alvenarias por Atuação na Geometria dos Elementos. Aplicação a Blocos de Betão de Argila Expandida". Dissertação de Doutoramento em Engenharia Civil. Faculdade de Engenharia. Universidade do Porto.
- Sousa, H. (2003). "Construções em alvenaria - Apontamentos". Porto: Faculdade de Engenharia. Universidade do Porto.
- Thomaz, E. (1989). "Trincas em edifícios - Causas, prevenção e recuperação". São Paulo.
- Torgal, F. P., & Jalali, S. (2010). "Tendências na sustentabilidade de unidades para alvenarias". Teoria E Prática Na Engenharia Civil, 16, 19–28.

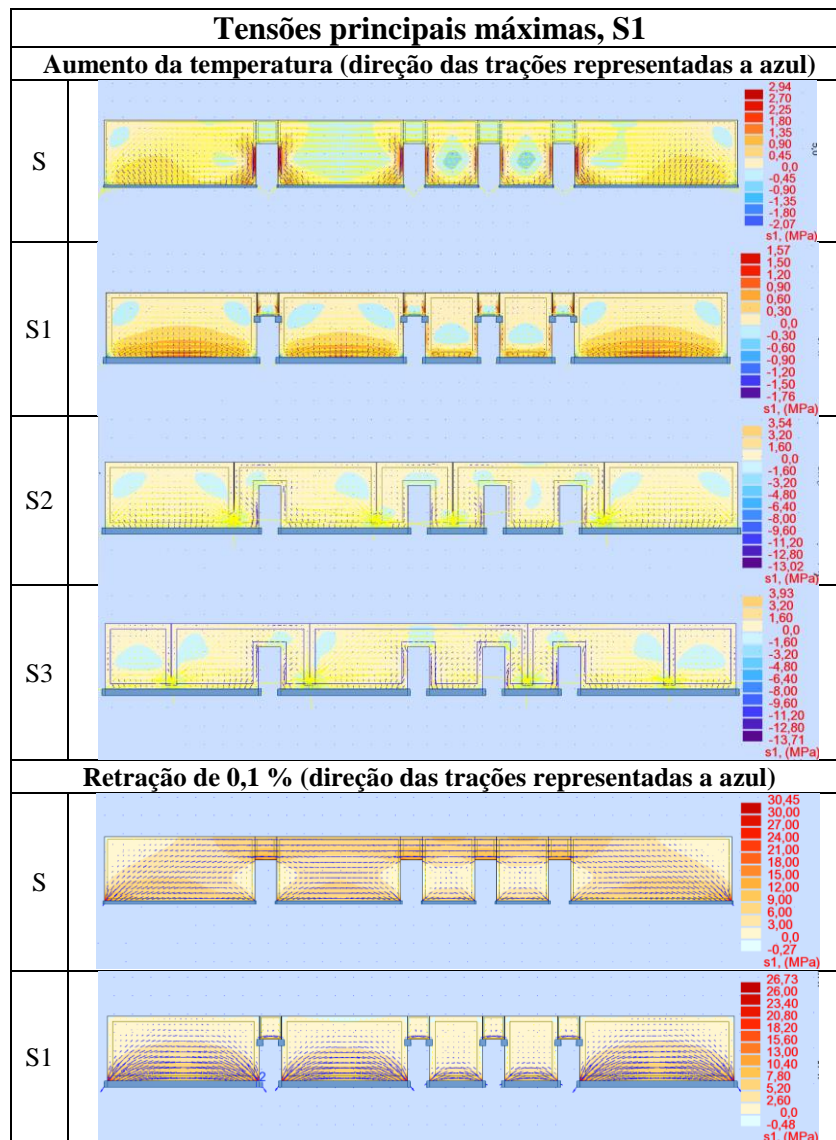
## Sites consultados

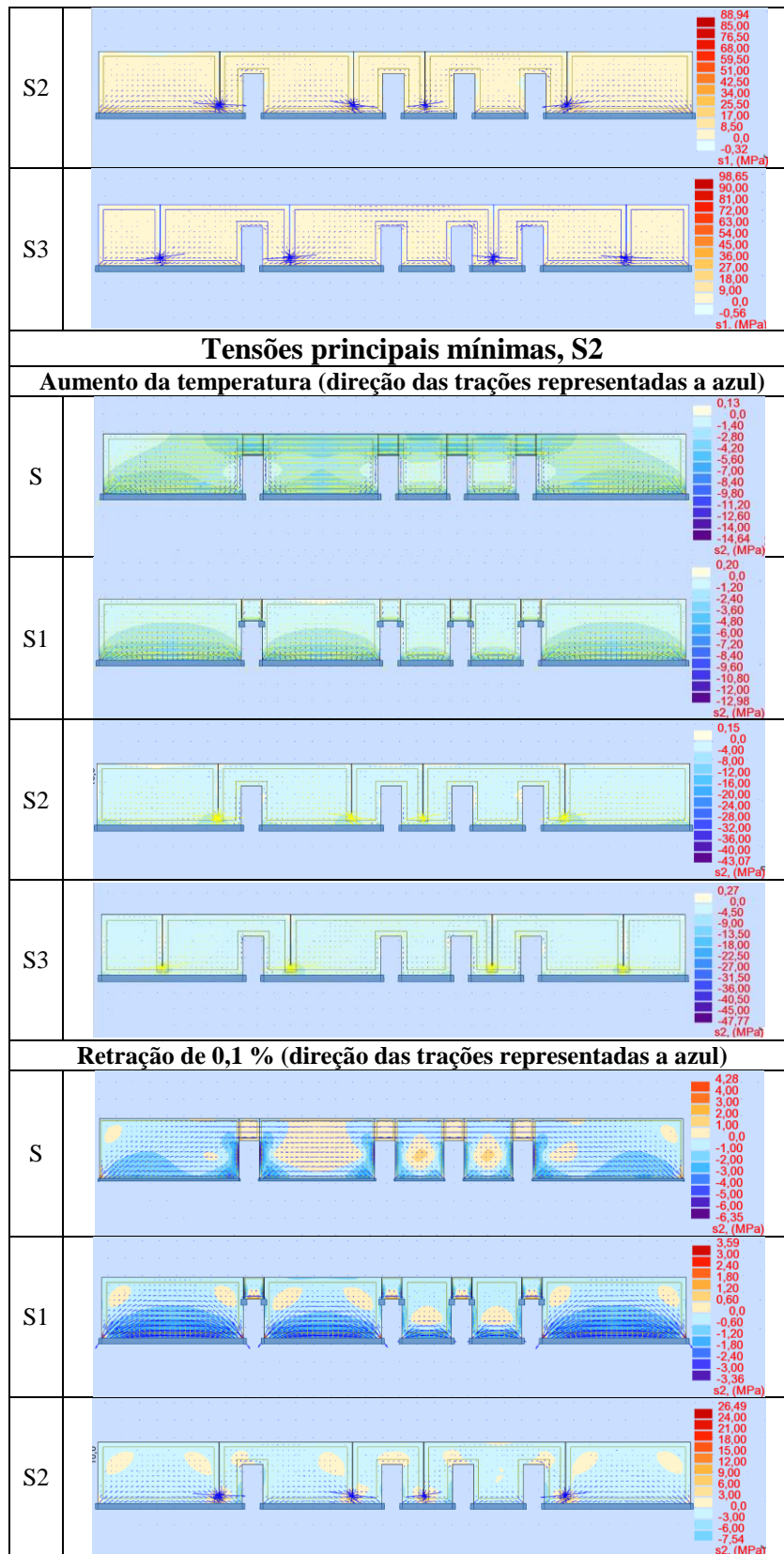
- flickriver@2016 - <http://www.flickriver.com/photos/ekain/tags/moneo/>. Acedido em fevereiro de 2016
- helifix@2016 - <http://www.helifix.co.uk/applications/strengthening-against-disproportionate-collapse/>. Acedido em abril de 2016
- IPQ@2016 - [http://www1.ipq.pt/PT/AssuntosEuropeus/MarcacaoCE/ListaDasDirectivas/Pages/Por%20Diretiva/Produtos\\_construcao.aspx](http://www1.ipq.pt/PT/AssuntosEuropeus/MarcacaoCE/ListaDasDirectivas/Pages/Por%20Diretiva/Produtos_construcao.aspx). Instituto Português da Qualidade. Acedido em janeiro de 2016
- laterizio@2016 - <http://www.laterizio.it/>. Acedido em fevereiro de 2016
- LNEC@2016 - [http://www.lnec.pt/fotos/editor2/QPE/mandato\\_116.pdf](http://www.lnec.pt/fotos/editor2/QPE/mandato_116.pdf). Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Acedido em maio de 2016
- valegandara@2016 - <http://www.valegandara.com/catalogos/premio0405/premio0405.html>. Acedido em fevereiro de 2016
- twistfix@2016 - <https://www.twistfix.co.uk/masonry-ties-thin-joint>. Acedido em abril de 2016

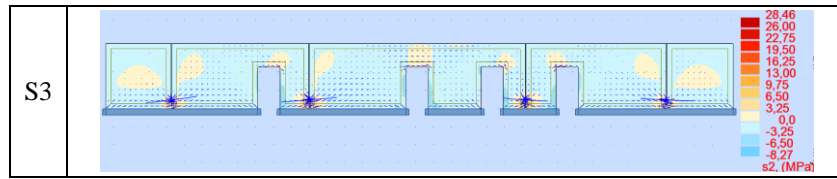
## 8 ANEXOS

Face à limitação de espaço, apresentam-se apenas as saídas gráficas das simulações do caso de estudo, estando, no entanto, executadas todas as restantes.

### Parede Sul







Parede Oeste

