

# **AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO DE PAREDES DE TABIQUE AO CORTE NO PLANO**

**OLÍVIA MAFALDA AFONSO AMORIM**

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

---

Orientador: Professor Doutor João Paulo Sousa Costa de Miranda Guedes

---

Coorientador: Engenheiro Bruno Luís Quelhas da Silva

Coorientador: Engenheiro Tiago Ilharco de Moura Pinho Dias

JUNHO DE 2016

## **MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2015/2016**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ [miec@fe.up.pt](mailto:miec@fe.up.pt)

*Editado por*

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ [feup@fe.up.pt](mailto:feup@fe.up.pt)

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2015/2016 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2016.*

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

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

Aos meus pais,

*“Em qualquer aventura, o que importa é partir, não é chegar.”*

*Miguel Torga*



## **AGRADECIMENTOS**

Ao meu orientador, Professor Doutor João Paulo Miranda Guedes, pela oportunidade de estudar o tema pretendido, pelo desafio lançado de levar a cabo a campanha experimental, pelo acompanhamento atento, pelo largo conhecimento e pelo incentivo a fazer cada vez melhor.

Aos meus coorientadores, Engenheiro Bruno Silva e Engenheiro Tiago Dias, pelo conhecimento, pela disponibilidade, pela ajuda no arranque do trabalho e pelo acompanhamento desafiante durante as visitas.

Ao formador da CSI Portugal, Tomás Aires Pereira, pela amabilidade e partilha de informação.

À colega, Engenheira Andreia Freitas Rebelo, pela colaboração e simpatia.

Ao Professor Doutor António Arêde pelo auxílio à realização do presente trabalho no campo laboratorial, por ter motivado o avanço dos ensaios laboratoriais e pela sua capacidade de gestão e de liderança.

À equipa do LESE por possibilitarem o trabalho desenvolvido. Ao Nuno pelo controlo da instrumentação, ao Sr. Valdemar pelo reconhecido engenho, ao Sr. Guilherme pela dedicação ao seu trabalho e a todos por serem afáveis e pela boa disposição. Um especial agradecimento pela última semana de ensaios laboratoriais e trabalho até ao limite.

Ao Engenheiro André Furtado pela disponibilidade, amizade e incentivo demonstrados; pelo conhecimento e agradável companhia durante os ensaios.

Aos meus colegas e amigos com quem vivi um ambiente de verdadeira aprendizagem e interajuda de forma entusiasta e afetiva durante a elaboração das dissertações. Em particular, ao aventureiro Leonardo Pereira, ao imbatível João Rodrigues, à doce Adriana Nunes, à agradável Teresa Freitas e à querida Beatriz Queirós.

À fotógrafa Lauren Maganete pelas imagens deslumbrantes com o enquadramento ambicionado!

À professora Elisabete Gomes pela irrepreensível colaboração.

À minha família a quem devo o que de melhor há em mim; aos meus amigos pelo incentivo e alento durante este período; em especial, à Margarida Morais pela amizade desmedida; e ao André Rocha pelo apoio incondicional.



## **RESUMO**

As paredes de tabique são paredes de madeira com uma forte presença nos edifícios antigos, entendidos, no âmbito desta dissertação, como edifícios que integram, tipicamente, paredes resistentes em alvenaria de pedra e pavimentos em madeira, recorrendo a técnicas tradicionais e a materiais locais. Apesar de, na grande maioria dos casos, existirem apenas como paredes de compartimentação, assumem muitas vezes funções estruturais, quer pelas características das construções onde se integram, quer pela degradação dos elementos estruturais no tempo. São exemplo disso as paredes de tabique posicionadas transversalmente e sob as vigas de um pavimento que, por degradação e/ou fluência, acaba por se apoiar nessas paredes, dotando-as de funções estruturais. Quer pelas razões apontadas, quer porque fazem parte de um processo construtivo de valor técnico, material e cultural inegáveis, considera-se importante conhecer as características mecânicas e o comportamento destas paredes, com vista a garantir a sua segurança e a promover a sua preservação de forma sustentada em processos de reabilitação do edificado.

É por isso ambição desta dissertação aumentar o conhecimento sobre as características mecânicas das paredes de tabique. Em particular, pretende-se avaliar o comportamento experimental destas paredes de madeira de espessura reduzida quando submetidas a ações horizontais, nomeadamente avaliar o seu papel no comportamento das construções onde se insere. Com este objetivo, o trabalho inicia-se com a caracterização de duas tipologias de paredes de tabique particularmente abundantes nas construções antigas em Portugal: paredes de tabique simples e duplo, ou seja, com uma fileira de tábuas verticais, ou com uma segunda fileira de tábuas diagonais justaposta à anterior. Posteriormente, apresenta-se uma campanha de ensaios ao corte no plano com compressão constante sobre um conjunto de 4 espécimes de tabique simples e 4 de tabique duplo, representativos de oito paredes à escala real sem o reboco de revestimento. Estas paredes fizeram parte de uma campanha de ensaios à compressão simples realizada em data anterior.

A análise dos resultados permitiu, não só atingir o objetivo primeiro da dissertação, ou seja, perceber o comportamento ao corte das tipologias de paredes de tabique ensaiadas, como também calibrar um modelo numérico, construído por outros autores, para simulação do comportamento destas paredes à compressão simples e às ações horizontais.

**PALAVRAS-CHAVE:** Reabilitação, Paredes de tabique, Comportamento experimental, Corte



## ABSTRACT

*Tabique* walls are timber walls made of vertical boards and/or props, sometimes with diagonal elements, which are rather common in Portugal old buildings regarded, for the sake of this dissertation, as buildings which typically contain sturdy walls of stone masonry and wooden floors and roofs, built using traditional techniques and local materials. Though they are mostly considered to be just partition walls, they frequently act as structural supporting elements (e.g. a *tabique* walls transversely positioned under floor beams, due to deterioration and/or creeping end up giving support to these elements).

Not only for these reasons, but also because they are part of a rather valuable technical, material and cultural building process, it is very important to learn about the mechanical and performance characteristics of these walls in order to guarantee their safety and promote their preservation during building rehabilitation processes.

The aim of this thesis is to enhance the knowledge of the mechanical characteristics of *tabique* walls and, more specifically, to evaluate the experimental behaviour of these slim wooden walls when subjected to horizontal loads, thus assessing their role in the structural performance of the constructions where they exist. Therefore, it begins with the characterization of two types of *tabique* walls particularly abundant in the old buildings stock in Portugal: simple and double *tabique* walls, i.e. with a line of vertical boards or with a second line of diagonal boards overlapping the former ones. Afterwards, it presents an experimental campaign to evaluate the in-plane shear strength under constant vertical force of a set of 4 simple *tabique* and 4 double *tabique* walls, representative of 8 full-scale walls without plaster coating. These walls had been previously subjected to simple compression tests as part of another project.

Analysing the outcome enabled not only achieving the ultimate objective of the thesis, in other words, understanding the shear strength of the tested types of *tabique* walls, but also calibrating a numerical model built by other authors for simulating the behaviour of these walls to in-plane horizontal loads.

**KEYWORDS:** Rehabilitation, Tabique construction, Partition walls, Experimental behaviour, Shear strength



## ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS .....	i
RESUMO .....	iii
ABSTRACT .....	v
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1. OBJETIVOS, ÂMBITO E JUSTIFICAÇÃO .....	1
1.2. BIBLIOGRAFIA DE APOIO AO TRABALHO .....	1
1.3. METODOLOGIA .....	2
1.4. ESTRUTURA E ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO .....	3
<b>2. ENQUADRAMENTO E CARACTERIZAÇÃO DAS PAREDES DE TABIQUE .....</b>	<b>5</b>
2.1. OBJETIVOS .....	5
2.2. INTRODUÇÃO .....	5
2.3. REABILITAÇÃO .....	5
2.4. CASA BURGUESA DO PORTO .....	7
2.4.1. ENQUADRAMENTO HISTÓRICO .....	7
2.4.2. SISTEMA CONSTRUTIVO .....	9
2.5. CARACTERIZAÇÃO MATERIAL E CONSTRUTIVA DAS PAREDES DE TABIQUE .....	10
2.5.1. CARACTERIZAÇÃO GEOMÉTRICA .....	11
2.5.2. MATERIAIS .....	13
2.5.2.1. Madeira .....	13
2.5.2.2. Pregos .....	16
2.5.2.3. Argamassa de preenchimento .....	16
2.5.3. VISITA A CASAS BURGUESAS DO PORTO .....	17
<b>3. SETUP DO ENSAIO EXPERIMENTAL .....</b>	<b>21</b>
3.1. OBJETIVOS .....	21
3.2. INTRODUÇÃO .....	21

<b>3.3. CARACTERIZAÇÃO DOS MODELOS FÍSICOS ENSAIADOS</b> .....	21
<b>3.4. SETUP DO ENSAIO EXPERIMENTAL</b> .....	23
<b>3.5. INSTRUMENTAÇÃO</b> .....	29
<b>4. ENSAIOS EXPERIMENTAIS</b> .....	35
<b>4.1. OBJETIVOS</b> .....	35
<b>4.2. INTRODUÇÃO</b> .....	35
<b>4.3. CONSIDERAÇÕES GERAIS</b> .....	35
4.3.1. ENSAIOS MONOTÓNICOS.....	35
4.3.2. ENSAIOS CÍCLICOS .....	36
4.3.3. TÉRMINO DOS ENSAIOS.....	37
4.3.4. RIGIDEZ HORIZONTAL TANGENTE.....	37
4.3.5. REFERENCIAL UTILIZADO PARA MEDIR A ROTAÇÃO DO FRECHAL SUPERIOR DA PAREDE.....	40
4.3.6. DESLOCAMENTOS DA PAREDE NA DIREÇÃO PERPENDICULAR AO SEU PLANO .....	41
4.3.7. LISTAGEM DOS ENSAIOS REALIZADOS .....	42
4.3.8. OUTROS ENSAIOS COM PAREDES DE TABIQUE .....	43
<b>4.4. ENSAIO PTS – CCM</b> .....	45
4.4.1. ANÁLISE DA CURVA DE RESPOSTA GLOBAL FORÇA HORIZONTAL VS DESLOCAMENTO HORIZONTAL .....	45
4.4.2. ANÁLISE DA ROTAÇÃO DO FRECHAL SUPERIOR DA PAREDE .....	47
4.4.3. ANÁLISE DOS DESLOCAMENTOS NO PLANO DA PAREDE .....	47
4.4.4. ANÁLISE DO DESLOCAMENTO DA PAREDE NA DIREÇÃO PERPENDICULAR AO SEU PLANO .....	49
4.4.5. DEGRADAÇÃO DA RIGIDEZ SECANTE .....	50
<b>4.5. ENSAIO PTS – CCC</b> .....	51
4.5.1. ANÁLISE DA CURVA DE RESPOSTA GLOBAL FORÇA HORIZONTAL VS DESLOCAMENTO HORIZONTAL .....	51
4.5.2. ANÁLISE DA ROTAÇÃO DO FRECHAL SUPERIOR DA PAREDE .....	52
4.5.3. ANÁLISE DOS DESLOCAMENTOS NO PLANO DA PAREDE .....	53
4.5.4. ANÁLISE DO DESLOCAMENTO DA PAREDE NA DIREÇÃO PERPENDICULAR AO SEU PLANO .....	54
4.5.5. ENERGIA DISSIPADA .....	55
<b>4.6. ENSAIO PTD – CCM</b> .....	56
4.6.1. ANÁLISE DA CURVA DE RESPOSTA GLOBAL FORÇA HORIZONTAL VS DESLOCAMENTO HORIZONTAL .....	56
4.6.2. ANÁLISE DA ROTAÇÃO DO FRECHAL SUPERIOR DA PAREDE .....	57
4.6.3. ANÁLISE DOS DESLOCAMENTOS NO PLANO DA PAREDE .....	58
4.6.4. ANÁLISE DO DESLOCAMENTO DA PAREDE NA DIREÇÃO PERPENDICULAR AO SEU PLANO .....	59

4.6.5. DEGRADAÇÃO DA RIGIDEZ SECANTE .....	61
<b>4.7. ENSAIO PTD – CCC</b> .....	<b>61</b>
4.7.1. ANÁLISE DA CURVA DE RESPOSTA GLOBAL FORÇA HORIZONTAL VS DESLOCAMENTO HORIZONTAL .....	61
4.7.2. ANÁLISE DA ROTAÇÃO DO FRECHAL SUPERIOR DA PAREDE .....	63
4.7.3. ANÁLISE DOS DESLOCAMENTOS NO PLANO DA PAREDE .....	63
4.7.4. ANÁLISE DO DESLOCAMENTO DA PAREDE NA DIREÇÃO PERPENDICULAR AO SEU PLANO .....	64
4.7.5. ENERGIA DISSIPADA .....	67
<b>4.8. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS</b> .....	<b>68</b>
4.8.1. ANÁLISE COMPARATIVA DAS CURVAS FORÇA HORIZONTAL-DESLOCAMENTO HORIZONTAL .....	68
4.8.2. ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DAS PAREDES .....	71
4.8.2.1. Paredes de Tabique Simples .....	71
4.8.2.2. Paredes de tabique duplo .....	73
<b>5. MODELAÇÃO NUMÉRICA</b> .....	<b>77</b>
<b>5.1. OBJETIVOS</b> .....	<b>77</b>
<b>5.2. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>77</b>
<b>5.3. COMPORTAMENTO DAS PAREDES DE TABIQUE AO CORTE NO PLANO COM COMPRESSÃO CONSTANTE</b> .....	<b>77</b>
5.3.1. CONCEITOS GERAIS .....	78
5.3.2. AÇÕES .....	79
5.3.3. CONDIÇÕES FRONTEIRA .....	79
5.3.4. MODELOS NUMÉRICOS .....	80
5.3.4.1. Modelo S .....	80
5.3.4.2. Modelo D .....	81
5.3.5. ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS DOS MODELOS S E D .....	82
5.3.6. ALTERAÇÕES AOS MODELOS .....	84
5.3.6.1. Modelo S .....	85
5.3.6.2. Modelo D .....	85
5.3.7. ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS DOS MODELOS S E D ALTERADOS .....	85
<b>5.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>87</b>
<b>6. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS</b> .....	<b>89</b>



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Imagens dos programas de recuperação do património no centro histórico da cidade do Porto (fotografias de Lauren Maganete, 2016) .....	6
Figura 2.2 – Relação entre o turismo e a reabilitação na cidade do Porto: a) Rua de Mouzinho da Silveira; b) Rua do Souto (Lauren Maganete, 2016).....	7
Figura 2.3 – Variabilidade de cores e de feitios das casas do Porto: a) Rua dos Caldeireiros; b) Largo dos Loios (Lauren Maganete, 2016) .....	8
Figura 2.4 – Vista geral da Rua dos Clérigos (Lauren Maganete, 2016) .....	8
Figura 2.5 – Casa burguesa do Porto: a) Imagem de fachadas principais da Rua Arquitecto Nicolau Nasoni (Lauren Maganete, 2016); b) Corte tipo de uma fachada principal [3]; c) Corte longitudinal [3]	9
Figura 2.6 – Esquema da parede de tabique simples [2] .....	11
Figura 2.7 – Pormenor tipo do apoio da parede interior de tabique simples no sobrado [3].....	12
Figura 2.8 – Esquema do posicionamento das tábuas e das ripas: a) parede de tabique simples; b) parede de tabique duplo [10].....	13
Figura 2.9 – Relação entre o teor de humidade e a resistência mecânica da madeira [8] .....	14
Figura 2.10 – Diagrama de valores de resistência global da madeira em função do esforço instalado [9] .....	15
Figura 2.11 – Dano numa viga de madeira (perda de secção da viga) provocado por ataque biótico (fotografia da autora, 2016).....	15
Figura 2.12 – Corte transversal de uma parede de tabique simples com o pormenor da ligação pregada de cada ripa à tábua vertical [2] .....	16
Figura 2.13 – Parede de tabique de compartimentação: a) Rua Campo dos Mártires da Pátria; b) Rua de José Falcão (autora, 2016) .....	17
Figura 2.14 – Resistógrafo em funcionamento (autora, 2016) .....	18
Figura 2.15 – Paredes de tabique do último piso de um edifício da Rua do Almada (autora, 2016) ...	18
Figura 2.16 – Paredes de madeira preenchidas sem regra de um edifício da Rua dos Caldeireiros (autora, 2016).....	19
Figura 2.17 – Reforço estrutural num edifício da rua dos Caldeireiros: a) das paredes; b) do vigamento (autora, 2016).....	19
Figura 3.1 – Modelos físicos: a) espessura da parede dupla; b) conjunto dos modelos; c) espessura da parede simples .....	23
Figura 3.2 – <i>Setup</i> do ensaio experimental: a) representação esquemática em alçado; b) vista geral	24
Figura 3.3 – Atuador: a) vertical (vista sob o piso de reação); b) horizontal .....	25
Figura 3.4 – Detalhe das vigas de distribuição da carga vertical: a) vista geral dos perfis; b) representação esquemática .....	25
Figura 3.5 – <i>Setup</i> do ensaio experimental: a) varão vertical; b) representação esquemática em corte .....	26
Figura 3.6 – Base de madeira: a) alçado com a indicação das dimensões [11]; b) vista geral.....	27

Figura 3.7 – Perfis metálicos que garantem a imobilidade vertical do frechal inferior durante o ensaio: a) perfil da extremidade inferior esquerda; b) e c) perfil da extremidade inferior direita .....	27
Figura 3.8 – Sistema que impede o deslocamento do topo da parede para fora do plano: a) topo da face anterior da parede; b) face posterior da parede e pórtico metálico .....	28
Figura 3.9 – Escoras que impedem o deslocamento do topo da parede para fora do seu plano: a) esquema de escoras; b) detalhe da escora horizontal na face anterior; c) detalhe das escoras diagonais na face posterior da parede.....	29
Figura 3.10 – Numeração das células de carga.....	30
Figura 3.11 – Posicionamento e numeração dos LVDT.....	30
Figura 3.12 – LVDT de mola .....	31
Figura 3.13 – Clinómetro: a) posicionamento em cima do cabeço de madeira; b) orientação .....	31
Figura 3.14 – Sistema que permite medir os deslocamentos do pano de parede para fora do seu plano: a) pórtico fixo e respetivos LVDTs b) ligação do fio do LVDT à parede; c) LVDT de fio .....	32
Figura 3.15 – Sistema que permite medir o deslocamento horizontal do topo da parede no plano da parede: a) tripé do lado esquerdo da parede; b) ligação do fio do LVDT à parede; c) tripé do lado direito .....	32
Figura 4.1 – Representação esquemática da parede de tabique em alçado com a ação resultante vertical e a ação horizontal aplicada durante os ensaios.....	36
Figura 4.2 – Representação esquemática da parede de tabique em alçado com a força horizontal aplicada e os respetivos esforços esquemáticos instalados .....	37
Figura 4.3 – Numeração dos valores de rigidez horizontal tangente calculados, para os ensaios monotónicos, em função do comportamento observado: a) paredes de tabique simples; b) paredes de tabique duplo .....	38
Figura 4.4 - Numeração dos valores de rigidez horizontal tangente calculados, para os ensaios cíclicos, em função do comportamento observado: a) paredes de tabique simples; b) paredes de tabique duplo .....	39
Figura 4.5 – Processo de cálculo da rigidez horizontal tangente.....	40
Figura 4.6 – Referencial utilizado para medir a rotação do frechal superior da parede .....	41
Figura 4.7 – Numeração dos alinhamentos verticais que originaram os perfis transversais.....	41
Figura 4.8 – Identificação das fases do carregamento selecionadas para o desenho dos perfis transversais .....	42
Figura 4.9 – Esquema de ensaio ao corte com indicação dos pontos de leitura de deslocamento e ponto de introdução da carga [12].....	44
Figura 4.10 – Representação esquemática do <i>setup</i> do ensaio à flexão [13] .....	44
Figura 4.11 – Representação esquemática (corte) do <i>setup</i> do ensaio à compressão simples [11] ...	45
Figura 4.12 – Curvas força horizontal-deslocamento horizontal: a) PTS – CCM 2; b) PTS – CCM 6..	46
Figura 4.13 – Rotação do frechal superior: a) PTS – CCM 2; b) PTS – CCM 6 .....	47
Figura 4.14 – Deslocamentos das diagonais no plano da parede: a) PTS – CCM 2; b) PTS – CCM 647	

Figura 4.15 – Deslocamentos verticais no plano da parede: a) PTS – CCM 2; b) PTS – CCM 6.....	49
Figura 4.16 – Perfil transversal da parede no instante de aplicação da carga máxima: a) PTS – CCM 2; b) PTS – CCM 6 .....	49
Figura 4.17 – Posição do frechal superior no instante de aplicação da carga máxima: a) PTS – CCM 2; b) PTS – CCM 6 .....	50
Figura 4.18 – Evolução da rigidez horizontal secante: a) PTS – CCM 2; b) PTS – CCM 6 .....	51
Figura 4.19 – Gráfico força-deslocamento para ciclos positivos e negativos: a) PTS – CCC 1; b) PTS – CCC 5.....	51
Figura 4.20 – Rotação do frechal medida pelo clinómetro: a) PTS – CCC 1; b) PTS – CCC 5.....	52
Figura 4.21 – Deslocamentos das diagonais no plano da parede: a) PTS – CCC 1; b) PTS – CCC 5.....	53
Figura 4.22 – Deslocamentos verticais no plano da parede: a) PTS – CCC 1; b) PTS – CCC 5 .....	53
Figura 4.23 – Evolução dos perfis transversais e das posições do frechal superior em planta do ensaio PTS – CCC 1 para o sentido positivo de aplicação da força horizontal (gráficos (a), (b) e (e)) e para o sentido negativo (gráficos (c), (d) e (f)): a) alinhamento 1; b) alinhamento 3; c) alinhamento 1; d) alinhamento 3; e) e f) frechal superior .....	54
Figura 4.24 – Evolução dos perfis transversais e das posições do frechal superior em planta do ensaio PTS – CCC 5 para o sentido positivo de aplicação da força horizontal (gráficos (a), (b) e (e)) e para o sentido negativo (gráficos (c), (d) e (f)): a) alinhamento 1; b) alinhamento 3; c) alinhamento 1; d) alinhamento 3; e) e f) frechal superior .....	55
Figura 4.25 – Energia dissipada acumulada: a) PTS – CCC 1; b) PTS – CCC 5 .....	56
Figura 4.26 – Energia dissipada por ciclo: a) PTS – CCC 1; b) PTS – CCC 5.....	56
Figura 4.27 – Gráfico força horizontal-deslocamento horizontal: a) PTD – CCM 7; b) PTD – CCM 8 .....	57
Figura 4.28 – Rotação do frechal superior medida pelo clinómetro: a) PTD – CCM 7; b) PTD – CCM 8 .....	58
Figura 4.29 - Deslocamentos das diagonais no plano da parede: a) PTD – CCM 7; b) PTD – CCM 8.....	58
Figura 4.30 - Deslocamentos verticais no plano da parede: a) PTD – CCM 7; b) PTD – CCM 8 .....	59
Figura 4.31 – Perfil transversal da parede no instante de aplicação da carga máxima: a) PTD – CCM 7; b) PTD – CCM 8 .....	59
Figura 4.32 – Posição do frechal superior no instante de aplicação da carga máxima: a) PTD – CCM 7; b) PTD – CCM 8 .....	60
Figura 4.33 – Deslocamentos do alinhamento mais comprimido da parede na direção perpendicular ao seu plano: a) PTD – CCM 7; b) PTD – CCM 8 .....	60
Figura 4.34 – Evolução da rigidez horizontal secante: a) PTD – CCM 7; b) PTD – CCM 8.....	61
Figura 4.35 – Força-deslocamento para ciclos positivos e negativos: a) PTD – CCC 3; b) PTD – CCC 4 .....	61
Figura 4.36 – Rotação do frechal superior medida pelo clinómetro: a) PTD – CCC 3; b) PTD – CCC 4 .....	63
Figura 4.37 – Deslocamentos das diagonais no plano da parede: a) PTD – CCC 3; b) PTD – CCC 4.....	63

Figura 4.38 – Deslocamentos verticais no plano da parede: a) PTD – CCC 3; b) PTD – CCC 4 .....	64
Figura 4.39 – Evolução dos perfis transversais e das posições do frechal superior em planta do ensaio PTD – CCC 3 para o sentido positivo de aplicação da força horizontal (gráficos (a), (b) e (e)) e para o sentido negativo (gráficos (c), (d) e (f)): a) alinhamento 1; b) alinhamento 3; c) alinhamento 1; d) alinhamento 3; e) e f) frechal superior .....	65
Figura 4.40 - Evolução dos perfis transversais e das posições do frechal superior em planta do ensaio PTD – CCC 4 para o sentido positivo de aplicação da força horizontal (gráficos (a), (b) e (e)) e para o sentido negativo (gráficos (c), (d) e (f)): a) alinhamento 1; b) alinhamento 3; c) alinhamento 1; d) alinhamento 3; e) e f) frechal superior .....	66
Figura 4.41 – Deslocamentos dos alinhamentos extremos da parede na direção perpendicular ao seu plano: a) PTD – CCC 3; b) PTD – CCC 4 .....	67
Figura 4.42 – Energia dissipada acumulada: a) PTD – CCC 3; b) PTD – CCC 4 .....	67
Figura 4.43 – Energia dissipada por ciclo: a) PTD – CCC 3; b) PTD – CCC 4.....	68
Figura 4.44 – Comparação entre as curvas força-deslocamento: a) paredes de tabique simples; b) paredes de tabique duplo .....	69
Figura 4.45 – Comparação entre as curvas força-deslocamento: a) ensaios monotônicos; b) ensaios cíclicos .....	70
Figura 4.46 – Parede de tabique simples durante o ensaio: a) detalhe da extremidade inferior das tábuas; b) vista transversal da deformação da parede .....	72
Figura 4.47 – Representação esquemática de distorção por corte .....	72
Figura 4.48 – Dano observado durante os ensaios experimentais das paredes de tabique duplo .....	73
Figura 4.49 – Parede de tabique duplo durante o ensaio: a) detalhe da extremidade inferior das tábuas; b) vista transversal da deformação da parede .....	74
Figura 4.50 – Representação esquemática da rotação de corpo rígido .....	75
Figura 4.51 – Base dos modelos físicos durante o ensaio: a) parede simples; b) parede dupla .....	75
Figura 5.1 – Problema de Euler e formas de encurvadura [22] .....	78
Figura 5.2 – Modelo S [10,11] .....	81
Figura 5.3 – Modelo D [10,11] .....	82
Figura 5.4 – Deformada por ação da combinação das cargas horizontal e vertical em análise linear: a) Modelo S; b) Modelo D .....	83
Figura 5.5 – Deformada do primeiro modo de encurvadura do modelo D.....	84
Figura 5.6 – Deformada por ação da combinação das cargas horizontal e vertical em análise linear pós-alterações: a) Modelo S; b) Modelo D .....	86
Figura 5.7 – Deformada do primeiro modo de encurvadura pós-alterações do modelo D .....	86

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1 – Dimensões e quantidades dos materiais dos modelos físicos das paredes de tabique: a) simples e b) duplo [11] .....	22
Tabela 3.2 – Nomenclatura adotada para a identificação dos ensaios experimentais e das paredes.	23
Tabela 4.1 – Lei de deslocamentos imposta nos ensaios cíclicos de corte com compressão constante .....	36
Tabela 4.2 – Listagem dos ensaios efetuados.....	43
Tabela 4.3 – Parâmetros das curvas força horizontal-deslocamento horizontal .....	46
Tabela 4.4 – Valores da rigidez horizontal tangente exibidos pelas paredes de tabique simples nos ensaios monotônicos.....	46
Tabela 4.5 – Módulo de distorção em corte, G .....	48
Tabela 4.6 – Valores da rigidez horizontal tangente exibidos pelas paredes de tabique simples durante a aplicação da força no sentido positivo nos ensaios cíclicos .....	52
Tabela 4.7 – Valores da rigidez horizontal tangente exibidos pelas paredes de tabique simples durante a aplicação da força no sentido negativo nos ensaios cíclicos.....	52
Tabela 4.8 – Parâmetros das curvas força horizontal-deslocamento horizontal .....	57
Tabela 4.9 – Valores da rigidez horizontal tangente exibidos pelas paredes de tabique duplo nos ensaios monotônicos.....	57
Tabela 4.10 - Valores da rigidez horizontal tangente exibidos pelas paredes de tabique duplo durante a aplicação da carga no sentido positivo nos ensaios cíclicos .....	62
Tabela 4.11 - Valores da rigidez horizontal tangente exibidos pelas paredes de tabique duplo durante a aplicação da carga no sentido negativo nos ensaios cíclicos.....	62
Tabela 5.1 - Propriedades mecânicas e físicas da classe de resistência C18 da madeira de pinho nacional [11] .....	80
Tabela 5.2 - Propriedades do material aço dos pregos [11] .....	80
Tabela 5.3 – Propriedades geométricas e mecânicas das secções transversais dos elementos constituintes da parede [11] .....	82



# 1 INTRODUÇÃO

## **1.1. OBJETIVOS, ÂMBITO E JUSTIFICAÇÃO**

No âmbito desta tese, entende-se por edifícios antigos aqueles que integram paredes resistentes em alvenaria de pedra e pavimentos em madeira, recorrendo a técnicas tradicionais e a materiais locais. Estas construções reconhecem-se como tendo um valor histórico-cultural que importa ser preservado e valorizado, nomeadamente com ações de reabilitação dirigidas para a manutenção e conservação estrutural. Como se compreende, a remoção das estruturas internas, mantendo apenas as fachadas, não se adequa aos critérios de intervenção em edifícios antigos, mesmo correntes, mas com valor histórico-cultural, tal como é defendido por especialistas e organismos internacionais nesta área, nomeadamente o ICOMOS – Conselho Internacional dos Monumentos e Sítios.

O objetivo do presente trabalho é contribuir para estimular a reabilitação integrada de todos os componentes da construção, seguindo modelos de intervenção sustentados no verdadeiro conhecimento do comportamento dos materiais e elementos estruturais, perspetivando a sua manutenção e valorização. Note-se que a manutenção e reutilização de materiais de construção é uma medida sustentável que protege o ambiente, reduzindo o desperdício e a formação de aterros, e que, simultaneamente, minimiza o impacto nas construções, promovendo a preservação da identidade local.

Atualmente, a cidade do Porto, e outras cidades ao nível de todo o país atravessam processos intensos de reabilitação do construído que devem ser acompanhados por processos de intervenção que integrem todos os atores envolvidos e os sensibilizem para as questões do valor patrimonial e das metodologias de intervenção no existente, em particular para a necessidade de proceder a um levantamento prévio exaustivo do existente, das suas características e do seu estado de conservação. Para isso, é também fundamental dotar a comunidade técnica de conhecimento sobre as técnicas utilizadas e sobre o seu comportamento face às solicitações a que estão sujeitas.

É por isso ambição desta tese aumentar o conhecimento sobre as características mecânicas de um dos elementos estruturais menos valorizados nas edificações antigas, as paredes de tabique. Em particular, pretende-se avaliar o comportamento destas paredes de madeira de espessura reduzida quando submetidas a ações horizontais, nomeadamente o seu papel no comportamento das construções onde se inserem.

## **1.2. BIBLIOGRAFIA DE APOIO AO TRABALHO**

O trabalho desenvolvido nesta dissertação teve por base a consulta de dissertações de mestrado, teses de doutoramento, artigos e livros.

Numa primeira abordagem, interiorizaram-se alguns dos princípios da conservação e restauro estrutural defendidos por especialistas e recomendados por organismos internacionais nesta área, nomeadamente o ICOMOS – Conselho Internacional dos Monumentos e Sítios [1].

Em segundo lugar, procurou-se perceber o sistema construtivo da casa onde tipicamente se inserem as paredes interiores de tabique, tendo para isso sido consultado o trabalho de João Appleton [2] que no seu livro descreve as características construtivas de edifícios antigos, sem se cingir a uma localização específica no país, e inclui a análise das anomalias mais frequentes nesse tipo de edifícios. Por outro lado, e porque o trabalho irá incidir de modo particular sobre as paredes de tabique interiores mais comuns dos edifícios antigos da cidade do Porto, deu-se especial importância ao trabalho de Joaquim Teixeira [3] que descreve, exclusivamente, o sistema construtivo da designada por casa burguesa do Porto. A explicação quanto à origem deste edifício, nomeadamente, a altura em que surgiu e razão de ser da sua forma, baseou-se no livro “Arquitetura tradicional Portuguesa” de Ernesto Oliveira e Fernando Galhano [4].

A caracterização da parede de tabique propriamente dita baseou-se, essencialmente, nas referências [5] e [6]. Apoiado na dissertação de mestrado de Jerónimo Botelho Júnior, intitulada, “Avaliação não destrutiva da capacidade resistente de estruturas de madeira de edifícios antigos” [7], e nos livros “Estructuras de madera. Diseño e cálculo” [8] e “Madeiras portuguesas” [9], fez-se uma breve análise a algumas das características e propriedades da madeira que influenciam o seu comportamento mecânico, indicando também o esquema de controlo de qualidade que se aplica à madeira como material de construção.

Esta dissertação dá continuidade a um trabalho que tem vindo a desenvolver-se em torno do comportamento mecânico de paredes de tabique, tendo início com um estudo numérico do comportamento estrutural destes elementos por André Pires [10], e onde foram também testadas algumas soluções de reforço, e prosseguiu com a avaliação experimental de paredes de tabique à compressão no plano, trabalho esse desenvolvido por Andreia Rebelo [11]. Por esse motivo, a presente dissertação apoia-se fortemente nestes dois trabalhos, em particular, na simulação numérica realizada por estes dois autores.

Salientam-se ainda as referências [12] e [13] que contêm alguma informação sobre o comportamento mecânico experimental das paredes de tabique, nomeadamente com resultados experimentais de ensaios realizados nesse elemento e que serão detalhados no capítulo 4, não tendo sido encontrada outra bibliografia referente a ensaios experimentais em paredes de tabique, fator que motiva e justifica largamente o presente trabalho de investigação.

Foi consultada pontualmente outra bibliografia que esta dissertação inclui, nomeadamente páginas web e outros documentos.

### **1.3. METODOLOGIA**

A metodologia que se adotou na construção desta dissertação incluiu as seguintes ações:

- Apresentação da bibliografia principal que serviu de base ao desenvolvimento deste trabalho, e do resultado de visitas a construções antigas do centro histórico do Porto durante as fases de intervenção, conservação e restauro estrutural;
- Avaliação experimental das características mecânicas de paredes de tabique à escala real, sem revestimento, ao corte sob compressão constante. Apresentação e justificação do *setup* experimental;

- Simulação numérica do comportamento estrutural de paredes de tabique, analisando a rigidez horizontal e fenómenos de instabilidade com recurso a um programa de cálculo automático.

#### **1.4. ESTRUTURA E ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO**

O presente trabalho divide-se em seis capítulos. Nos parágrafos seguintes é feita uma breve apresentação do conteúdo, capítulo a capítulo.

O capítulo 1 (presente capítulo) aborda a questão a investigar, justificando o seu interesse, define os objetivos e apresenta a metodologia. Introduce também os elementos bibliográficos principais que serviram de base ao desenvolvimento do trabalho.

O capítulo 2 refere alguns dos princípios da reabilitação, explica sumária e simplificada o sistema construtivo da Casa Burguesa do Porto e, ainda, faz a caracterização material e construtiva das paredes de tabique. A par do mencionado, é neste capítulo que se distinguem as duas tipologias de parede a estudar e se referem algumas das propriedades da madeira.

O capítulo 3 descreve os modelos físicos a ser ensaiados e o *setup* do ensaio experimental.

O capítulo 4 apresenta os resultados obtidos na campanha experimental, devidamente tratados, e a respetiva análise comparativa do comportamento das duas tipologias face à aplicação de forças de corte no plano com compressão constante. Para cada tipologia, calculou-se a força máxima aplicada e a rigidez horizontal para diferentes fases do carregamento. Concomitantemente, faz-se uma breve revisão bibliográfica de outros ensaios experimentais realizados em paredes de tabique.

No capítulo 5 simula-se numericamente o comportamento estrutural das paredes de tabique para as condições de carregamento semelhantes às do ensaio experimental realizado, efetuando-se a calibração dos modelos face aos resultados experimentais obtidos.

Por fim, no capítulo 6 apresentam-se as principais conclusões extraídas no presente trabalho.



# 2

## ENQUADRAMENTO E CARACTERIZAÇÃO DAS PAREDES DE TABIQUE

### 2.1. OBJETIVOS

Os objetivos deste capítulo são:

- Identificar princípios e potencialidades da reabilitação dos centros históricos.
- Apresentar a casa burguesa do Porto, identificando os elementos da estrutura primária e secundária.
- Enquadrar as paredes de tabique no sistema construtivo onde se inserem.
- Fazer a caracterização material e construtiva das paredes de tabique.
- Conhecer as propriedades da madeira enquanto material de construção.

### 2.2. INTRODUÇÃO

As paredes de tabique, apesar de pouco valorizadas, são elementos presentes na grande maioria das casas antigas em território nacional. Neste capítulo, será feita uma caracterização detalhada destas paredes, considerando, em particular, as tipologias mais comuns existentes no edificado do centro histórico da cidade do Porto. Para melhor se compreender a sua importância, serão enquadradas no sistema construtivo do edificado antigo e, posteriormente, no âmbito das ações de reabilitação. Pretende-se ainda justificar a importância da reabilitação urbana, respeitando e valorizando o património material e imaterial, focando em particular o caso da cidade do Porto.

### 2.3. REABILITAÇÃO

A reabilitação urbana é um processo contínuo que envolve entidades, estatais e privadas, no combate à degradação e ao envelhecimento, dirigido para a melhoria da qualidade de vida dos cidadãos [14].

O estudo dos edifícios antigos e da sua reabilitação tem tido um interesse crescente, resultado da importância crescente atribuída à conservação do património edificado. O conceito de património evoluiu desde a consideração de somente edifícios monumentais, ou de grande importância, até à inclusão de edifícios habitacionais, industriais e comerciais correntes [2].

Em relação a este tema, vale a pena salientar alguns dos princípios defendidos por especialistas e organismos internacionais nesta área, nomeadamente o ICOMOS – Conselho Internacional dos Monumentos e Sítios. A conservação do património arquitetónico requer uma abordagem

multidisciplinar que envolve uma grande diversidade de profissionais, devendo o valor desse património ser considerado dentro do contexto cultural ao qual pertence. A metodologia de intervenção envolve a análise de informação histórica, a identificação de danos e suas causas e, finalmente, a seleção de ações de consolidação. Nenhuma ação deve ser conduzida sem se investigar os potenciais benefícios e prejuízos para a construção a intervir. Tendo em conta as exigências de segurança e durabilidade, deve dar-se preferência às técnicas menos invasivas e mais compatíveis com as características e o valor das construções. Sempre que possível, devem adotar-se medidas reversíveis e evitar a remoção ou alteração de material histórico ou com características arquitetónicas importantes [1].

O planeamento para a intervenção estrutural requer dados qualitativos baseados na observação direta do estado dos materiais e dos elementos estruturais, assim como dados quantitativos baseados em ensaios específicos e modelos matemáticos. O facto de não existirem regulamentos específicos para estruturas antigas pode resultar em ambiguidades e decisões arbitrárias, mas os regulamentos preparados para o projeto de estruturas modernas são muitas vezes aplicados de forma inapropriada a estruturas históricas [1].

Apesar da falta de regulamentos específicos para as construções antigas, salienta-se a realização de amplos programas de recuperação do património, nomeadamente de centros antigos, destacando-se os exemplos das cidades do Porto, Lisboa, Évora, Braga ou Guimarães [2]. Nesta dissertação, o foco vai para o centro histórico da cidade do Porto pela proximidade geográfica, por ser classificado como Património Mundial pela UNESCO desde 1996 e pelo edificado conter as paredes de tabique que esta dissertação pretende estudar com maior detalhe.

As fotografias da Figura 2.1 mostram algumas das obras de reabilitação que estão a decorrer neste centro histórico.



Figura 2.1 – Imagens dos programas de recuperação do património no centro histórico da cidade do Porto (fotografias de Lauren Maganete, 2016)

Neste seguimento, novas atividades culturais e comerciais instalam-se a grande ritmo, e a oferta habitacional expande-se no centro antigo da cidade. Com efeito, o património arquitetónico representa um bem valioso considerando os aspetos culturais e económicos, e a sua reabilitação tem também um

forte potencial no desenvolvimento do turismo (Figura 2.2) que será certamente uma das indústrias mais importantes do 3º milénio [1].



(a)



(b)

Figura 2.2 – Relação entre o turismo e a reabilitação na cidade do Porto: a) Rua de Mouzinho da Silveira; b) Rua do Souto (Lauren Maganete, 2016)

## 2.4. CASA BURGUESA DO PORTO

Após se ter verificado o forte impulso atualmente existente na reabilitação do património edificado, nomeadamente da designada por casa burguesa do Porto, prosseguiu-se com a procura de informação sobre esta casa, sobre a sua história e os seus elementos constituintes.

“Surgida no primitivo burgo das próprias condições histórico-sociais (...) a casa estreita e alta ganhou foros de padrão material de cultura”, a que se obedece por tradição e por imposição dos lotes existentes [4].

### 2.4.1. ENQUADRAMENTO HISTÓRICO

A casa burguesa do Porto, que remonta ao século XVII e se reconhece às centenas pelas ruas, foi designada por Ernesto Oliveira e Fernando Galhano como “a casa que nada recomenda especialmente, mas que afinal é uma das expressões mais típicas do Porto, que tem o seu estilo próprio e a sua tradição legítima, e que traduz as condições históricas e político-sociais do velho burgo, a índole e a vida da sua gente.” [4]

Pelo exterior, distingue-se uma variabilidade de cores e de formas, como se mostra na Figura 2.3. Embora contíguas, as casas apresentam diferentes alinhamentos, no que por vezes parece ser uma desordem total.



Figura 2.3 – Variabilidade de cores e de feitios das casas do Porto: a) Rua dos Caldeireiros; b) Largo dos Loios (Lauren Maganete, 2016)

No entanto, atentando um pouco melhor, percebem-se as semelhanças. Embora com número variável de andares, em geral três ou quatro, mas podendo ter cinco ou mais, e larguras distintas que permitem duas ou três janelas ou portas no alçado principal, são todas elas “uniformemente esguias, estreitas e altas” e “mostram um estilo comum de motivos, que afirmam o seu parentesco”. Dispersas no meio destas, há outras casas, largas e baixas, com rés-do-chão e andar nobre, com numerosas portas e janelas de fachada, que estão individualizadas e existem em número muito menor em contraste com as primeiras [4].

A casa estreita e alta era híbrida no sentido em que funcionava ao mesmo tempo como habitação e estabelecimento comercial. O estrato popular e burguês da população, dos artífices e dos comerciantes, habitava os andares superiores sem qualquer aparato e no rés-do-chão, junto à rua e abertas ao público, tinha as suas lojas, armazéns ou oficinas. A casa popular e burguesa, estreita por economia de terreno, tinha pelo menos duas portas, uma da residência e outra da loja [4].

Por sua vez, a casa urbana larga e baixa é a casa nobre, o palácio, que pertence a uma classe poderosa e possuidora de terrenos que afirma o seu estatuto pela largueza de espaço, transferindo para a cidade o conceito de casa senhorial do campo [4].

Com efeito pode dizer-se que “o Porto é uma cidade grande feita de casas pequenas – e aqui e além alguns raros palácios discretos” [4]. Na Figura 2.4 ilustra-se uma vista geral da Rua dos Clérigos no Porto.



Figura 2.4 – Vista geral da Rua dos Clérigos (Lauren Maganete, 2016)

No século XIX, o modo de vida do burguês do Porto sofre uma alteração, dissociando-se a residência da loja, aparecendo casas apenas de residência, mantendo o tipo estreito. No século XX, a casa estreita entra numa nova fase: incitada pelo alargamento do comércio, a casa volta a servir de habitação e comércio, contudo a loja do rés-do-chão já não pertence à mesma gente que habita os andares superiores [4].

É a partir do final da década de 40 do século XX que o betão armado destrona a casa estreita e alta, tornando-se o material dominante da estrutura dos edifícios, por ser moldável e permitir a continuidade entre os elementos estruturais – fundações, pilares, vigas e lajes. “(...) o betão armado corresponde a uma evolução quase explosiva no contexto da construção de edifícios, perdendo-se um referencial de tradição conservadora que se mantinha imutável há séculos.” Dos edifícios antigos para os modernos em betão armado, há um grande contraste a todos os níveis: forma, tipologia, fachada, largura e, como tal, distinguem-se facilmente, mesmo por quem não tem conhecimento da área [2].

#### 2.4.2. SISTEMA CONSTRUTIVO

Neste ponto, pretende-se identificar os principais elementos estruturais e secundários das casas burguesas do Porto para melhor se compreender como se comportam estes edifícios.

Da estrutura primária da casa burguesa do Porto, entendida como o conjunto de elementos com funções estruturais, fazem parte as fundações, as paredes, os pisos e as coberturas. Na Figura 2.5 ilustra-se a fachada e um corte longitudinal de uma casa burguesa típica, pretendendo-se mostrar a disposição e proporção dos elementos constituintes da construção e a forma que já anteriormente foi referida da casa, estreita e alta, que se estende ao comprido, com a caixa de escadas no centro e claraboia no topo.



Figura 2.5 – Casa burguesa do Porto: a) Imagem de fachadas principais da Rua Arquitecto Nicolau Nasoni (Lauren Maganete, 2016); b) Corte tipo de uma fachada principal [3]; c) Corte longitudinal [3]

Antes e durante o século XVII, as paredes de meação, paredes principais ou paredes mestras eram construídas em pedra no rés-do-chão e em tabique misto (estrutura de madeira preenchida com pedra

miúda ou com tijolos maciços) nos restantes pisos. Motivado pela abundância do material nas redondezas e pela maior resistência aos incêndios, as paredes de meação passam a ser integralmente construídas em alvenaria de granito, com espessura variável entre os 30 e os 60cm, assente com argamassa de cal, areia e saibro. Com regularidade, estas paredes eram impermeabilizadas com uma argamassa asfáltica e revestidas com reboco, podendo ser comuns a duas casas contíguas [3]. As paredes de fachada, usualmente duplas, com espessuras consideráveis, fecham os topos das paredes de meação, criando os alçados principais e de tardoz. Ao contrário das paredes de meação, são normalmente rasgadas por inúmeras aberturas, janelas e portas, que, juntamente com as claraboias, são os únicos pontos de entrada de luz para o interior das habitações.

Os pisos ou sobrados, constituídos por um vigamento de troncos de madeira com diâmetros variáveis, entre os 20 e os 30cm, e comprimentos que dependiam da largura das casas. O vigamento apoia-se nas paredes de meação, com uma entrega de cerca de dois terços da espessura dessas paredes. Os troncos de madeira, mais tarde substituídos por vigas de madeira esquadriadas, dispunham-se paralelamente entre si, com afastamento variável entre os 50 e os 70cm. Este processo começa e termina com uma viga encostada às paredes das fachadas. Todo o vigamento era travado na perpendicular por tarugos espaçados em média de 1,5m. Os pavimentos revestiam-se pelo tabuado ou soalho, normalmente em madeira de pinho com espessura variável entre os 2,5 e os 5cm, largura entre os 12 e os 30cm e comprimento que podia alcançar 10m [3].

As cargas distribuem-se dos sobrados para as paredes de meação e para as fundações, e descarregavam em solos normalmente competentes. As fundações apresentam habitualmente uma sobrelargura para aumentar a área de contacto com o terreno de fundação que é menos resistente face à alvenaria da parede, e também para absorver desvios dimensionais associados a erros de execução. As caves era uma situação corrente no Porto para adaptar o edifício à configuração do terreno marcado pelo relevo acentuado [2].

O último elemento da estrutura primária é a estrutura do telhado, de duas a quatro águas, constituída por asnas de madeira. A estrutura apoiava-se nas paredes de meação e revestia-se de telha cerâmica que era colocada com uma estrutura secundária que transmitia as ações às asnas [2,3].

Dos elementos secundários, salientam-se as paredes de compartimentação (em tabique), revestimentos de piso, caixilharias, caixas de escadas, claraboias e/ou trapeiras [2,3].

Note-se que as paredes interiores de tabique podem ter um importante contributo para a estabilidade do edifício, constituindo uma importante reserva de resistência e podendo funcionar como elementos de contraventamento [2,5]. As paredes de tabique são tradicionalmente construídas nos andares superiores porque o contacto direto do tabique com o terreno não é desejável podendo contribuir para a sua prematura deterioração [5].

Efetivamente, a madeira é um material cuja principal causa de degradação está na presença de água, sendo este o mote para o aparecimento de outras causas de dano, nomeadamente o ataque por agentes bióticos. A infiltração das águas da chuva é por isso um problema, devendo assegurar-se a estanquidade das coberturas e das caixilharias exteriores dos edifícios [2].

## **2.5. CARACTERIZAÇÃO MATERIAL E CONSTRUTIVA DAS PAREDES DE TABIQUE**

A técnica construtiva tradicional designada por tabique foi aplicada em grande escala até ao início do século XX, havendo uma herança abundante de construções com tabique ao longo do país, tanto nos centros históricos como nas zonas rurais [6]. Em particular, na casa burguesa do Porto tradicional, o tabique era usado em paredes interiores de compartimentação, paredes de caixa de escadas e paredes

exteriores na continuidade das fachadas de pedra ou em pisos recuados. O facto de ainda existirem muitos edifícios com paredes de tabique ainda funcionais prova a sua inerente durabilidade [5].

A utilização frequente da madeira como principal material de construção explica-se por ser um material fácil de transportar, fácil de trabalhar e que era barato por existir em abundância no país [3]. A caracterização incidirá sobre as paredes interiores de tabique, consideradas usualmente como paredes divisórias ou de compartimentação de uma habitação, sem função estrutural.

### 2.5.1. CARACTERIZAÇÃO GEOMÉTRICA

As paredes de tabique são formadas por uma estrutura em madeira regular, pregada, coberta em ambos os lados por uma argamassa de enchimento e uma última camada de regularização e acabamento, geralmente constituída por uma argamassa fina de cal.

A tipologia mais comum, designada por *parede de tabique simples*, é formada por uma fileira de tábuas verticais costaneiras ligadas entre si por ripas horizontais de ambos os lados [6]. Ao conjunto de tábuas designa-se habitualmente de tabuado; ao conjunto de ripas dá-se o nome de ripado ou fasquiado, e é nessa armação plana que se “agarra” a argamassa de enchimento [3]. A Figura 2.6 ilustra num esquema esta tipologia de parede, dando a conhecer os seus componentes.

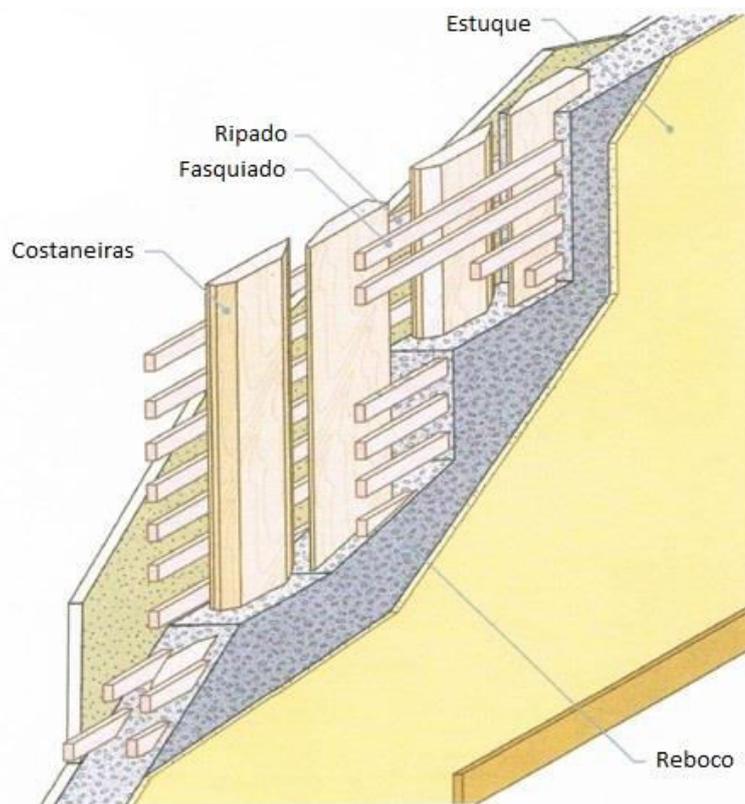


Figura 2.6 – Esquema da parede de tabique simples [2]

As paredes de tabique seriam usualmente executadas já com a habitação assoalhada ou sobradada. As tábuas costaneiras colocadas na vertical são pregadas a um barrote de madeira corrido, disposto em forma de frechal. Esse frechal apoia diretamente no soalho ou no vigaamento, como se mostra do desenho da Figura 2.7, ou num conjunto de prumos que apoiam no soalho [3].

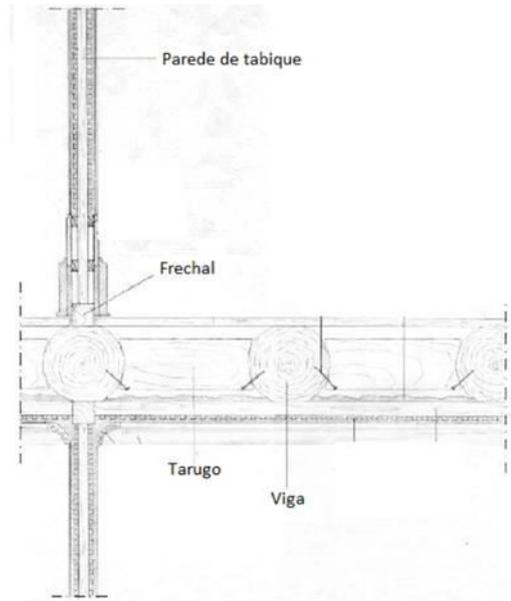
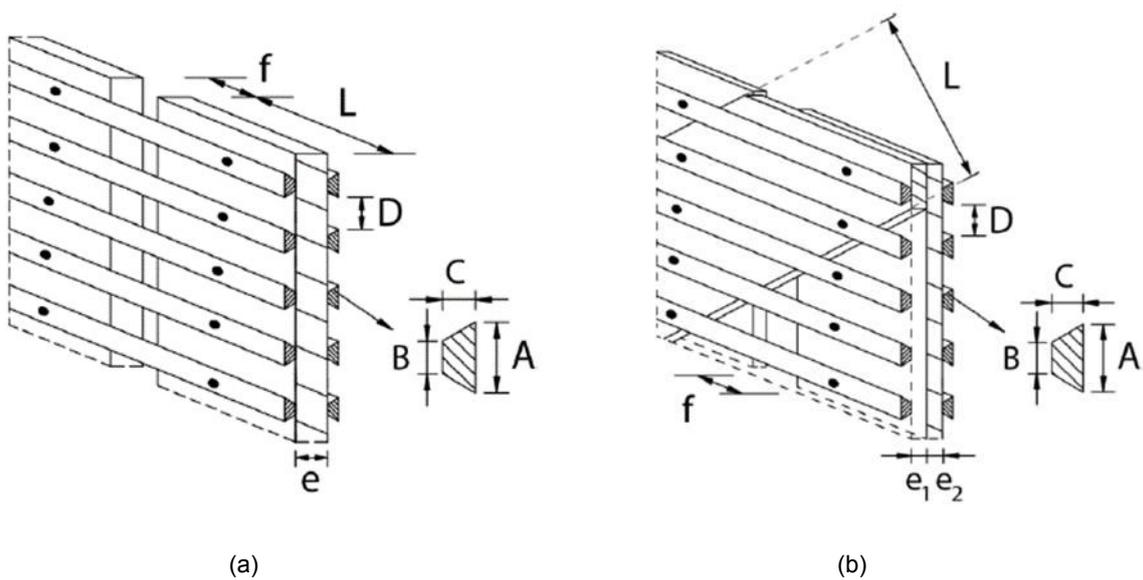


Figura 2.7 – Pormenor tipo do apoio da parede interior de tabique simples no sobrado [3]

Há ainda uma outra tipologia mais recente (final do séc. XVIII e durante todo o séc. XIX) designada por *parede de tabique duplo* que é similar à primeira, mas que, a par das tábuas verticais, contém uma fileira de tábuas inclinadas a cerca de 60° com a horizontal pregadas às anteriores [3,5].

Para caracterizar a geometria das paredes, fez-se uso dos esquemas da Figura 2.8a e da Figura 2.8b.



Legenda:

L – Comprimento da tábua

e – Espessura da tábua da parede de tabique simples

e<sub>1</sub> – Espessura da tábua diagonal da parede de tabique duplo

e<sub>2</sub> – Espessura da tábua vertical da parede de tabique simples

- f – Espaçamento entre as extremidades de duas tábuas verticais adjacentes
- A – Base maior da secção trapezoidal da ripa
- B – Base menor da secção trapezoidal da ripa
- C – Altura da secção trapezoidal da ripa
- D – Distância entre alinhamentos de duas ripas consecutivas

Figura 2.8 – Esquema do posicionamento das tábuas e das ripas: a) parede de tabique simples; b) parede de tabique duplo [10]

Em [3], Joaquim Teixeira descreve o sistema construtivo da casa burguesa do Porto, incluindo as paredes de tabique interiores, fazendo referência às dimensões que se seguem: o frechal tem secção quadrangular com 7cm de lado; as tábuas costaneiras, de secção retangular, têm 4 a 5cm de espessura (e) e encontram-se afastadas de 1cm (f); os fásquios apresentam um espaçamento de cerca de 3 a 5cm (D).

## 2.5.2. MATERIAIS

A técnica construtiva tradicional das paredes de tabique é muito versátil; utiliza diferentes espécies de madeira, tipos de argamassa, e dimensões dos componentes de madeira que constituem a estrutura da parede, constituindo diferentes tipologias de parede. Existem diversos trabalhos desenvolvidos na Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro (UTAD) que analisam algumas destas tipologias e caracterizam a geometria e as propriedades mecânicas dos materiais que as constituem [15-17]. Naturalmente, esta heterogeneidade de soluções introduz alguma complexidade e pode também justificar diferentes níveis de degradação das paredes de tabique [5,6,18].

### 2.5.2.1. Madeira

A espécie de madeira claramente mais usada no contexto das paredes de tabique é o pinho (*Pinus Pinaster*), seguida do castanho (*Castanea sativa Mill.*) e com menos expressão a espécie *Populus sp* e a *Tília cordata* [6].

A madeira resulta da transformação de um organismo vivo e, como tal, é um material heterogéneo e acentuadamente anisotrópico [7]. O conhecimento das suas propriedades físicas e mecânicas é relevante, já que se trata do elemento estrutural principal da parede [5].

As propriedades da madeira com maior relevância para a sua análise estrutural, consideradas em [7], são:

- Espécie botânica;
- Localização do elemento de madeira no tronco da árvore;
- Existência de defeitos;
- Teor em água;
- Temperatura.

A espécie botânica é uma condicionante da constituição química e do arranjo morfológico e estrutural dos elementos de madeira, definindo o seu comportamento físico-mecânico; A zona do tronco de onde é retirada a peça de madeira também influi nas suas características físico-mecânicas. O borne, camada mais externa do tronco, corresponde à madeira mais jovem e contém grande quantidade de água e de substâncias nutritivas. O cerne, camada interior, é constituído por tecido morto, sem função circulatória

de substâncias, apresenta maior densidade, resistência e estabilidade perante a humidade e agentes de degradação biológica, e tem uma coloração mais escura que o bórne. A percentagem relativa de bórne e cerne varia em função da altura da árvore; os defeitos podem provocar anomalias importantes no seu comportamento físico-mecânico e dependem do crescimento da árvore; o teor em água tem uma grande influência na resistência mecânica da madeira. Como mostra o gráfico da Figura 2.9, para valores do teor de humidade iguais ou superiores a 30% verifica-se que a resistência da madeira se mantém praticamente constante, observando-se um aumento apreciável da resistência para valores inferiores do teor de humidade; a temperatura só condiciona a resistência da madeira para valores extremos [7].

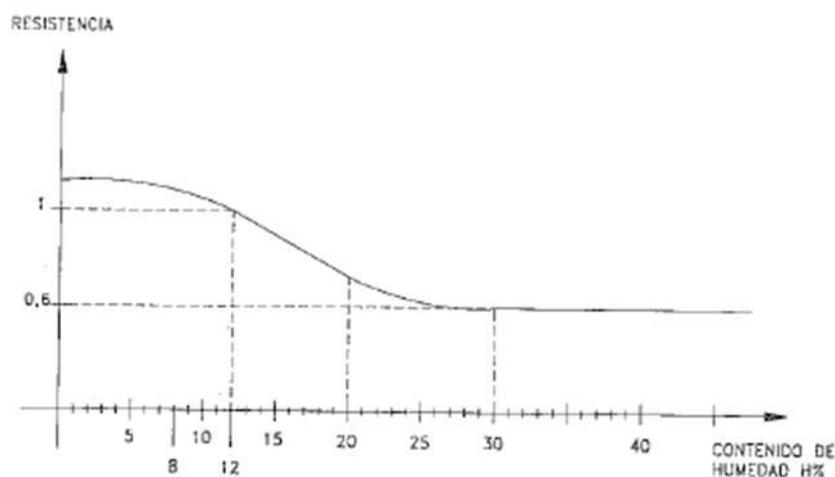


Figura 2.9 – Relação entre o teor de humidade e a resistência mecânica da madeira [8]

O estudo do comportamento mecânico da madeira implica o conhecimento da sua estrutura anatómica, dada a natureza orgânica e heterogénea que a caracteriza. A estrutura da madeira é um conjunto denso de fibras dispostas longitudinalmente. Verificam-se grandes diferenças de resistência para solicitações na direção paralela ou perpendicular às fibras, como se irá analisar de seguida. A resistência dos elementos individuais está também relacionada com o número e a distribuição dos nós ou anéis de crescimento, e com os raios medulares que se estendem radialmente de forma perpendicular ao eixo do tronco [7].

O diagrama da Figura 2.10 mostra a relação entre a resistência da madeira o esforço que lhe é imposto. Por ordem decrescente de resistência tem-se os esforços de tração paralela ao fio, flexão, compressão paralela ao fio, corte e tração perpendicular ao fio. Os três primeiros esforços compreendem tensões dispostas na direção paralela às fibras; provocam a aproximação das fibras, contribuindo para um aumento da coesão da peça e apresentam um valor da resistência significativamente superior aos dois últimos esforços que compreendem tensões dispostas na direção perpendicular às fibras, ou seja, que provocam a separação das fibras longitudinais e a diminuindo da sua coesão e resistência global [7,9].

A resistência ao corte pode ser quantificada pela ação de três tipos de tensões, em função da orientação em relação às fibras da madeira: normais às fibras, paralelas às fibras e oblíquas às fibras. A resistência dos elementos de madeira é mínima no caso de tensões tangenciais paralelas às fibras [7].

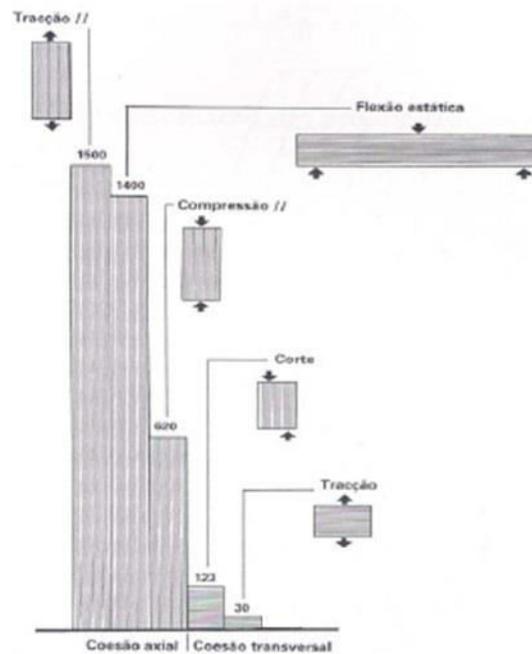


Figura 2.10 – Diagrama de valores de resistência global da madeira em função do esforço instalado [9]

Em relação às patologias, o ataque biótico de fungos e insetos é a principal causa de danos nas estruturas de madeira e ocorre, geralmente, quando a madeira está exposta a um elevado teor de humidade e temperatura [1]. O contacto da madeira com a alvenaria é frequentemente uma origem de humidade e, conseqüentemente, um ponto crítico que requer algum cuidado, como se comprova com a fotografia da Figura 2.11 que retrata o encontro de uma viga de madeira do pavimento com a parede resistente de alvenaria, registando-se uma perda significativa da secção da viga de madeira.



Figura 2.11 – Dano numa viga de madeira (perda de secção da viga) provocado por ataque biótico (fotografia da autora, 2016)

Para proteger a madeira contra ataques biológicos podem utilizar-se produtos químicos [1], mas a melhor forma de a proteger é evitar a presença de focos de entrada de água/humidade.

Para que a madeira possa ser usada com fiabilidade como material de construção, foi definido um esquema de controlo de qualidade. O procedimento atualmente seguido para esse efeito, consiste no que

genericamente se designa por classificação visual de madeiras. Os sistemas nacionais de classificação visual de madeiras assentam em normas aplicáveis e definem classes de qualidade associadas à limitação de defeitos. São exemplo dessas normas a norma portuguesa NP 4305, aplicável à madeira de pinho bravo português [7].

Neste seguimento, o sistema europeu de classificação de madeiras em classes de qualidade baseia-se nas normas da série EN14081. Estas normas definem as regras de classificação de madeiras para uso estrutural. A norma EN 14081.1 apresenta, na cláusula 5, diversos requisitos genéricos a cumprir para que a peça estrutural possa ser incluída numa determinada classe de resistência definida na EN 338. O princípio das classes de resistência é o da atribuição das principais propriedades físicas e mecânicas a uma dada população de madeiras para estruturas. Cada classe de resistência é definida por uma sigla e identifica as principais propriedades mecânicas a usar em cálculos [7].

#### 2.5.2.2. Pregos

Os pregos constituem o conetor mecânico entre os elementos de madeira das paredes de tabique. É aplicado pelo menos um prego para fixar cada ripa a cada tábua da forma como se ilustra na Figura 2.12. Deste modo, uma ripa horizontal é fixada a várias tábuas verticais e cada tábua vertical fixa várias ripas horizontais nas duas faces [5].

Segundo estudos não há nenhuma característica específica associada ao tipo de pregos usado na pregagem da estrutura de madeira [5].

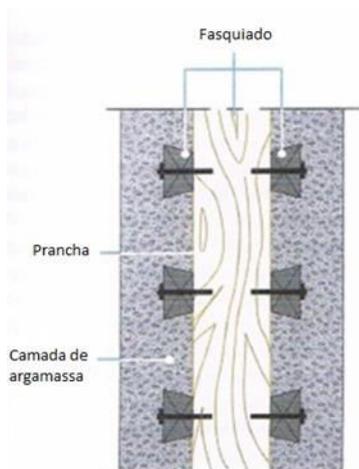


Figura 2.12 – Corte transversal de uma parede de tabique simples com o pormenor da ligação pregada de cada ripa à tábua vertical [2]

#### 2.5.2.3. Argamassa de preenchimento

A camada de argamassa usada como preenchimento da estrutura de madeira tem um contributo estrutural residual, mas tem um papel fundamental na preservação da estrutura de madeira. Protege a madeira de ataques de insetos e do fogo. A argamassa de enchimento interior pode incluir cal, ou ser exclusivamente constituída por terra, vulgarmente com fibras vegetais [6,19].

Assim, a durabilidade dos elementos estruturais, a performance do isolamento térmico e acústico e da resistência ao fogo de uma parede de tabique depende da qualidade da argamassa de preenchimento. Por sua vez, a qualidade da argamassa depende do tipo de constituintes da mistura, das proporções usadas e da aderência à madeira. [5]

Note-se que o tabique é uma técnica de construção sustentável comparada com outras técnicas de construção uma vez que a madeira e a terra, quando utilizada, é abundante, local e reutilizável [5,20].

### 2.5.3. VISITA A CASAS BURGUESAS DO PORTO

Para finalizar a caracterização material e construtiva das paredes de tabique, apresentam-se fotografias de paredes das casas burguesas do Porto tiradas durante visitas que foram possíveis graças à equipa do NCREP.

No primeiro dia, visitou-se o interior de dois edifícios antigos do centro histórico na fase de inspeção e diagnóstico estrutural, um na Rua Campo dos Mártires da Pátria e outro na Rua José Falcão, onde se registaram as imagens da Figura 2.13. A Figura 2.13a ilustra o fasquio ainda revestido pela argamassa numa das paredes de tabique de compartimentação do piso do R/C, e a Figura 2.13b mostra uma abertura numa das paredes interiores de um piso mais elevado onde se comprovou a existência de uma parede de tabique duplo. Estas visitas testemunham a abundância das paredes de tabique nos edifícios antigos do Porto e, pelo menos nos dois casos visitados, em boas condições de conservação e a desempenhar, tanto funções de compartimentação dos espaços, como, se acredita, funções estruturais, servindo como importante reserva de resistência e, consequentemente, de segurança.

A estrutura primária de ambos os edifícios visitados não estava à vista, o que foi um bom pretexto para dar a conhecer o resistógrafo (Figura 2.14). Este instrumento avalia a integridade de elementos de madeira através da penetração a velocidade constante de uma broca de pequeno diâmetro medindo a energia despendida na penetração que se relaciona com a resistência que o elemento oferece. Deste modo, permite-se identificar as zonas do elemento que apresentam degradações podridões ou vazios internos [21].



(a)



(b)

Figura 2.13 – Parede de tabique de compartimentação: a) Rua Campo dos Mártires da Pátria; b) Rua de José Falcão (autora, 2016)



Figura 2.14 – Resistógrafo em funcionamento (autora, 2016)

No segundo dia, visitou-se o interior de outros dois edifícios antigos do centro histórico do Porto, um na Rua do Almada e outro na Rua dos Caldeireiros, voltando a encontrar-se, em ambos, paredes de madeira que se mostram nas Figura 2.15 e Figura 2.16. Na Figura 2.15 ilustra-se a estrutura à vista e caiada de branco de paredes de tabique duplo do último andar do edifício onde se procurou mostrar a vista geral e o detalhe do fasquiado e, por trás, das tábuas verticais. Na Figura 2.16 ilustram-se paredes de madeira mais irregulares, que não apresentam as características típicas das paredes de tabique referidas anteriormente, e também mais degradadas. Estas paredes estavam a ser reforçadas estruturalmente com a solução que se exhibe na Figura 2.17a, assegurando a ligação adequada entre o que foi mantido e o que foi introduzido. Acrescenta-se, a título de curiosidade, a Figura 2.17b que mostra o reforço das vigas de madeira do pavimento e, como tal, a coexistência das vigas antigas capazes de desempenhar a função em conjunto com as novas vigas em madeira. O segundo dia de visitas incidiu em edifícios que se encontravam numa fase mais avançada no processo da reabilitação do que os edifícios visitados no primeiro dia, nomeadamente com os trabalhos de reforço estrutural já referidos.



Figura 2.15 – Paredes de tabique do último piso de um edifício da Rua do Almada (autora, 2016)



Figura 2.16 – Paredes de madeira preenchidas sem regra de um edifício da Rua dos Caldeireiros (autora, 2016)



(a)

(b)

Figura 2.17 – Reforço estrutural num edifício da rua dos Caldeireiros: a) das paredes; b) do vigamento (autora, 2016)



# 3

## SETUP DO ENSAIO EXPERIMENTAL

### 3.1. OBJETIVOS

Os objetivos deste capítulo são:

- Caracterização dos modelos físicos ensaiados.
- Descrição dos materiais e métodos do processo de investigação experimental.

### 3.2. INTRODUÇÃO

A campanha experimental em que se insere o presente trabalho foi promovida pelo NCREP – Consultoria em Reabilitação do Edificado e Património Lda, em parceria com as empresas PORTILAME e CS Construtora, e tem como objetivo avaliar o comportamento mecânico de paredes de tabique simples e duplo utilizando modelos construídos à escala real descritos no subcapítulo seguinte.

A campanha iniciou-se com ensaios à compressão no plano no âmbito da dissertação [11] e prossegue na presente dissertação com ensaios ao corte no plano da parede a compressão constante. Posteriormente, o trabalho de investigação terá continuidade sempre no sentido de ampliar o conhecimento sobre o comportamento estrutural destas paredes, em particular de estudar possíveis soluções de reforço.

Todos os ensaios decorreram no LESE, Laboratório de Engenharia Sísmica e Estrutural da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP).

### 3.3. CARACTERIZAÇÃO DOS MODELOS FÍSICOS ENSAIADOS

Os ensaios experimentais integrados nesta dissertação tiveram como estruturas alvo oito paredes de tabique construídas à escala real para a avaliação das suas características mecânicas quando solicitadas ao corte sob compressão constante. À data de início deste trabalho, a construção das oito paredes de tabique estava finalizada e os ensaios à compressão simples sobre essas paredes já tinham sido realizados, sem que, no entanto, tivessem sido causados danos relevantes nas paredes.

A Portilame, empresa especializada em construções de madeira que conta com vários trabalhos na área da reabilitação, foi a empresa responsável pela construção das estruturas. Os modelos físicos, com 3m de altura por 2,5m de comprimento, retratam de forma representativa as paredes de tabique existentes nas construções antigas da cidade do Porto, quer nas dimensões, quer na disposição dos seus elementos. As tábuas que as constituem apresentam 2,5cm de espessura, dotando as paredes de tabique simples e

duplo de espessuras de 2,5cm e 5,0cm, respetivamente. Note-se que para além das tábuas existe ainda o ripado horizontal, pregado sobre as tábuas e que funciona como elemento de ligação, tal como se descreve na análise dos resultados dos ensaios de compressão em [11]. Na ligação das tábuas entre si, no caso do tabique duplo, e aos frechais foram utilizados pregos de maior dimensão do que na ligação das ripas às tábuas.

Nas oito paredes construídas, encontram-se representadas em igual número as duas tipologias referidas: quatro são paredes de tabique simples e as restantes quatro de tabique duplo. As oito paredes foram construídas com pinho bravo (*Pinus pinaster*). Não se introduziu nos modelos físicos o material de enchimento nem o de revestimento, ou seja, avaliaram-se as características mecânicas somente da estrutura de madeira, embora se estime que o material de enchimento e o reboco contribuam favoravelmente para a resistência da parede.

Nas paredes de tabique simples o tabuado é constituído por uma fileira de tábuas dispostas na vertical e espaçadas de um valor médio de 2cm. Em ambas as faces desse tabuado existe o fasquio constituído pelas ripas de secção trapezoidal, com dimensões de  $A=2,5\text{cm}$ ,  $B=1,3\text{cm}$  e  $C=0,7\text{cm}$  de acordo com a legenda da Figura 2.8, dispostas na horizontal e com um espaçamento de 7cm ao eixo entre alinhamentos. Cada ripa é pregada a cada tábua que atravessa por um prego. Os frechais estão posicionados nas extremidades superior e inferior da parede. As paredes de tabique duplo seguem a mesma estrutura apenas com diferenças ao nível do tabuado; neste caso são constituídas por tábuas verticais e diagonais dispostas a cerca de  $40^\circ$  graus em relação à vertical, justapostas e pregadas entre si.

Cada parede simples e dupla é constituída pelas componentes que se refere nas Tabela 3.1a e Tabela 3.1b, respetivamente. Em [11] pode ainda encontrar-se imagens dos componentes da parede antes de serem montados e informação sobre o processo de construção das paredes incluindo imagens do faseamento construtivo.

Tabela 3.1 – Dimensões e quantidades dos materiais dos modelos físicos das paredes de tabique: a) simples e b) duplo [11]

(a)			(b)		
Materiais	Dimensões	Quantidade	Materiais	Dimensões	Quantidade
Tábuas de madeira	$26 \times 2,5 \text{ cm}^2$	9	Tábuas de madeira	$26 \times 2,5 \text{ cm}^2$	43
Ripas	$2,5 \times 1,3 \text{ cm}^2$	78	Ripas	$2,5 \times 1,3 \text{ cm}^2$	78
Ripas aos terços	$6 \times 1,3 \text{ cm}^2$	4	Ripas aos terços	$6 \times 1,3 \text{ cm}^2$	4
Frechais	$8 \times 8 \text{ cm}^2$	2	Frechais	$8 \times 8 \text{ cm}^2$	2
Pregos grandes	7,5 cm	18	Pregos grandes	7,5 cm	18 + Variável
Pregos pequenos	4,0 cm	$9 \times 78 + 9 \times 4 = 738$	Pregos pequenos	4,0 cm	738

A fotografia da Figura 3.1b mostra os modelos físicos arrumados no laboratório. Na fotografia da Figura 3.1a pode observar-se a espessura da parede dupla composta pela espessura da tábua vertical mais a das tábuas diagonais e, na mesma figura, mas em segundo plano, mostra-se a face da parede dupla com as tábuas diagonais voltadas para o observador. Na fotografia da Figura 3.1c observa-se a espessura da parede de tabique simples e, igualmente em segundo plano, mostra-se uma vista geral desta parede.

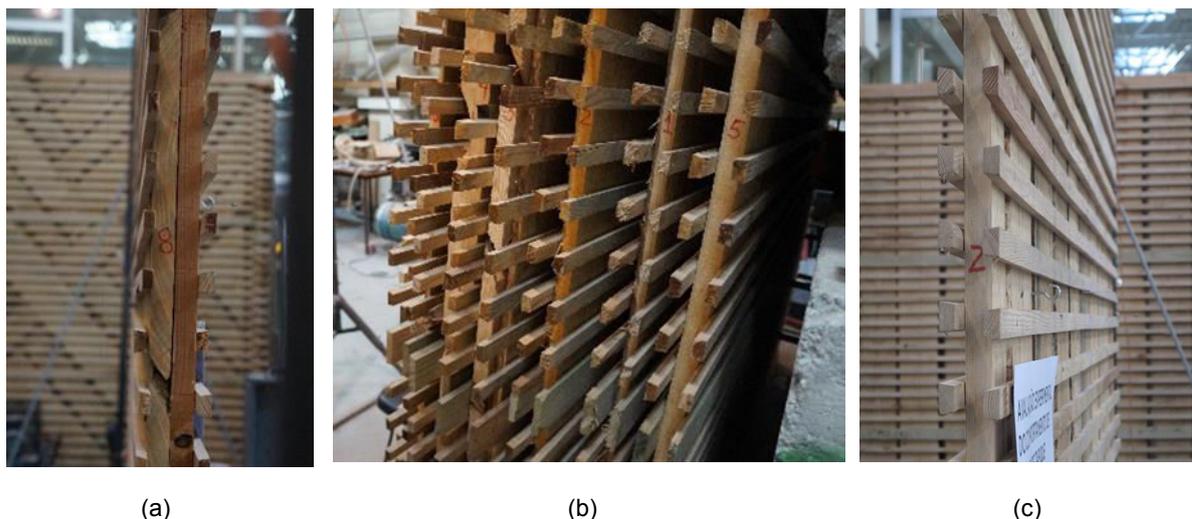


Figura 3.1 – Modelos físicos: a) espessura da parede dupla; b) conjunto dos modelos; c) espessura da parede simples

Para a identificação das paredes de tabique foi usada a nomenclatura “PTS” e “PTD” que designa Parede de Tabique Simples e Parede de Tabique Duplo, respetivamente. Em ambos os tipos de parede realizaram-se ensaios de Corte no plano com Compressão constante, Monotónicos e Cíclicos que foram designados por “CCM” e “CCC”, respetivamente. Desta associação resultaram as quatro combinações que se apresentam na Tabela 3.2, que deram origem aos oito ensaios realizados, dois por cada combinação, referidos pelas nomenclaturas anteriores e pelo número da parede: 1 a 8 de acordo com a numeração já utilizada em [11].

Tabela 3.2 – Nomenclatura adotada para a identificação dos ensaios experimentais e das paredes

Ensaio	N.º
PTS - CCM	2
	6
PTS - CCC	1
	5
PTD - CCM	7
	8
PTD - CCC	3
	4

### 3.4. SETUP DO ENSAIO EXPERIMENTAL

O ensaio experimental não seguiu nenhuma norma específica por não existir normalização para o ensaio pretendido. Todo o *setup* procurou ser representativo do cenário real das paredes de tabique, tal como se encontram instaladas nas comumente designadas por casas burguesas do Porto, e foi montado de acordo com o esquema adotado em [11]. Contudo a necessidade de introdução de uma ação horizontal, que no ensaio anterior não existia, implicou o ajuste do *setup* para responder às novas exigências do ensaio experimental.

A Figura 3.2 apresenta o *setup* adotado. O sistema é composto por dois atuadores: um atuador vertical, para aplicação da carga vertical e um horizontal para aplicação da carga horizontal, com capacidade de 176 kN de avanço e de 113 kN de recuo ( $\pm 100$ mm de curso). O atuador vertical (Figura 3.3a) está situado

no piso inferior e utiliza o pavimento como estrutura de reação. O atuador horizontal (Figura 3.3b) está ligado a um pórtico vertical de reação. Durante o ensaio, a carga vertical é aplicada no topo da parede e mantida de forma constante, enquanto a ação horizontal, monotônica ou cíclica, é aplicada, também no topo da parede, seguindo uma lei de deslocamentos controlados.

A força vertical é exercida através do tracionamento dos dois varões laterais que transmitem a força para um cabeço metálico que, por sua vez, desmultiplica a força total, através dum sistema constituído por três perfis metálicos, um de 2m e dois de 1m, em quatro forças iguais aplicadas em pontos equidistantes de forma a aproximar a aplicação da carga vertical a um carregamento uniformemente distribuído (Figura 3.4), tal como mostram os estudos numéricos em [11].

A força horizontal é aplicada no plano da parede, com sentido positivo da esquerda para a direita. A carga é transmitida ao topo oposto ao da aplicação da carga através de dois varões horizontais que ligam os topos da parede, de forma a distribuí-la da forma o mais uniforme possível por todo o comprimento da parede.

Cada varão vertical contém, além de uma célula de carga, duas “rótulas” que permitiram que, durante o deslocamento horizontal do topo da parede, a força vertical pudesse ser aplicada sem distorção dos varões. A Figura 3.5 apresenta um corte da representação esquemática do *setup*, legendado, com destaque para a fotografia de um varão vertical com a respetiva célula de carga e as duas “rótulas”.

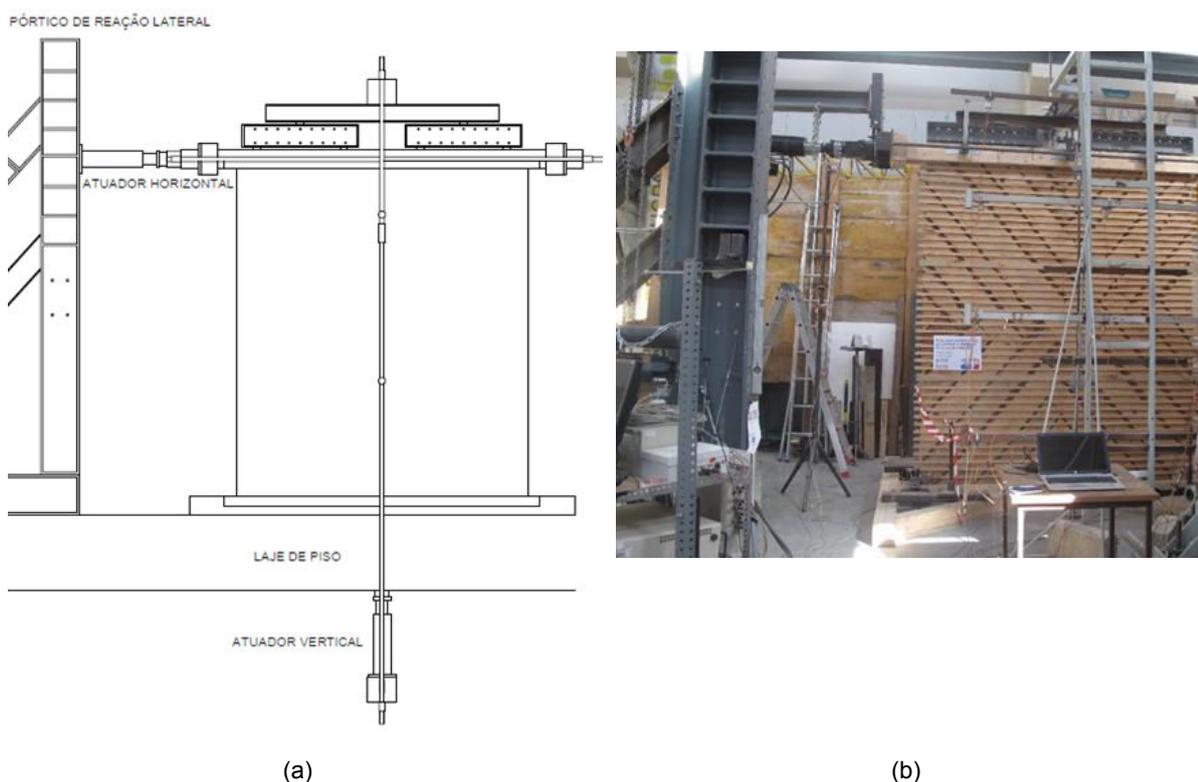


Figura 3.2 – *Setup* do ensaio experimental: a) representação esquemática em alçado; b) vista geral



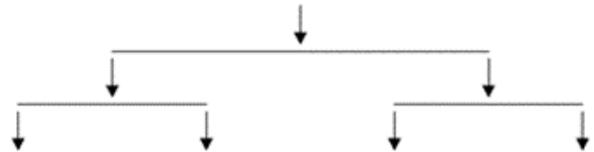
(a)

(b)

Figura 3.3 – Atuador: a) vertical (vista sob o piso de reação); b) horizontal



(a)



(b)

Figura 3.4 – Detalhe das vigas de distribuição da carga vertical: a) vista geral dos perfis; b) representação esquemática

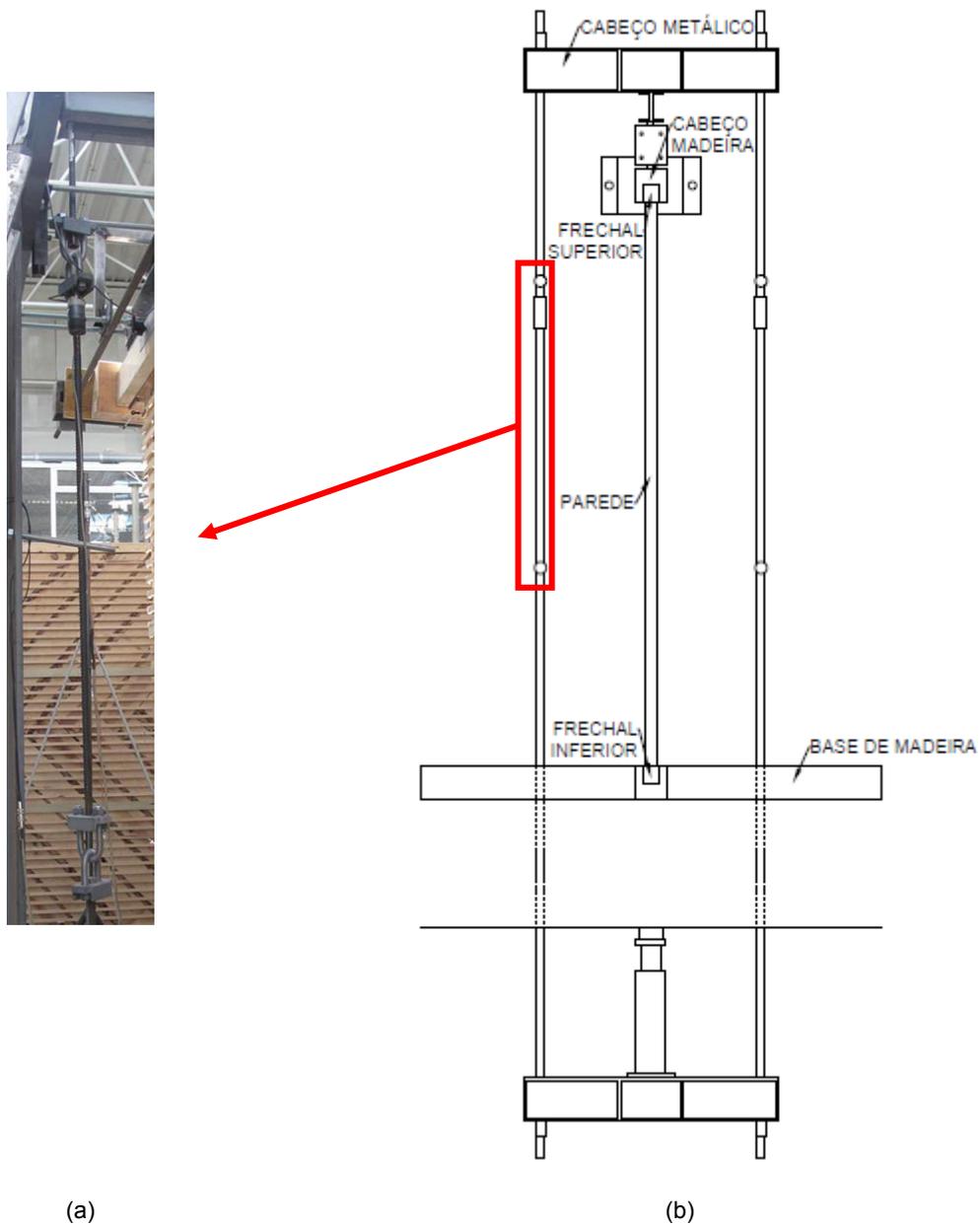


Figura 3.5 – Setup do ensaio experimental: a) varão vertical; b) representação esquemática em corte

Foi concebida uma base em madeira, com a forma e dimensões indicadas no desenho da Figura 3.6a, fixada ao pavimento com recurso a quatro perfis metálicos, um em cada extremidade, e a varões pré-esforçados, tal como se observa na fotografia da Figura 3.6b. Esta estrutura recebe o frechal inferior da parede num negativo com 8x8cm<sup>2</sup> de secção e 2,5m de comprimento, que se observa a sombreado no desenho da Figura 3.6a. Durante os ensaios, o frechal é impedido de se deslocar nas direções horizontal e vertical através da amarração das suas extremidades à viga da base, usando uma estrutura metálica que abraça o frechal, tal como se ilustra na Figura 3.7. A necessidade de efetuar esta amarração resultou do facto de, durante o primeiro ensaio, se ter observado que o frechal do lado tracionado da parede levantava, separando-se da base, situação que obrigou à interrupção do ensaio para retificação das condições de ligação do frechal, e à sua repetição.

Este esquema de fundação da parede permite considerar o frechal encastrado na base, ou seja, obriga as tábuas da parede na base a deslocar-se em relação ao frechal durante o ensaio, i.e. a solicitar os pregos da ligação, tal como se julga que acontece na realidade.

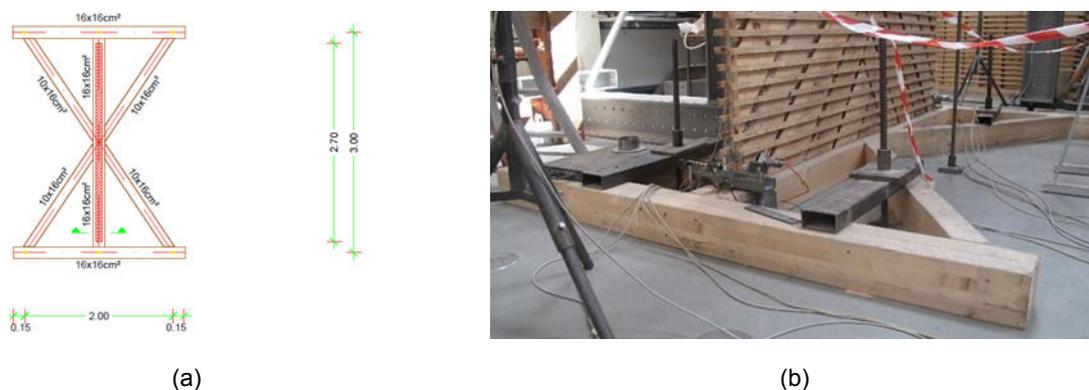


Figura 3.6 – Base de madeira: a) alçado com a indicação das dimensões [11]; b) vista geral

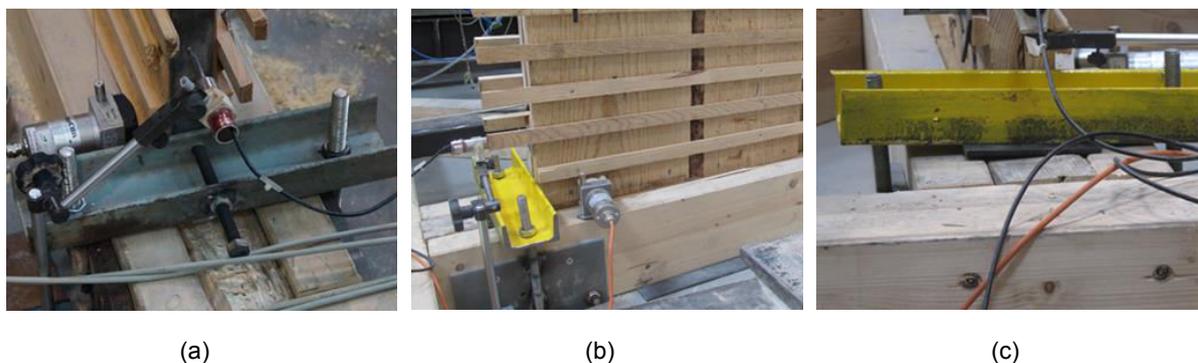
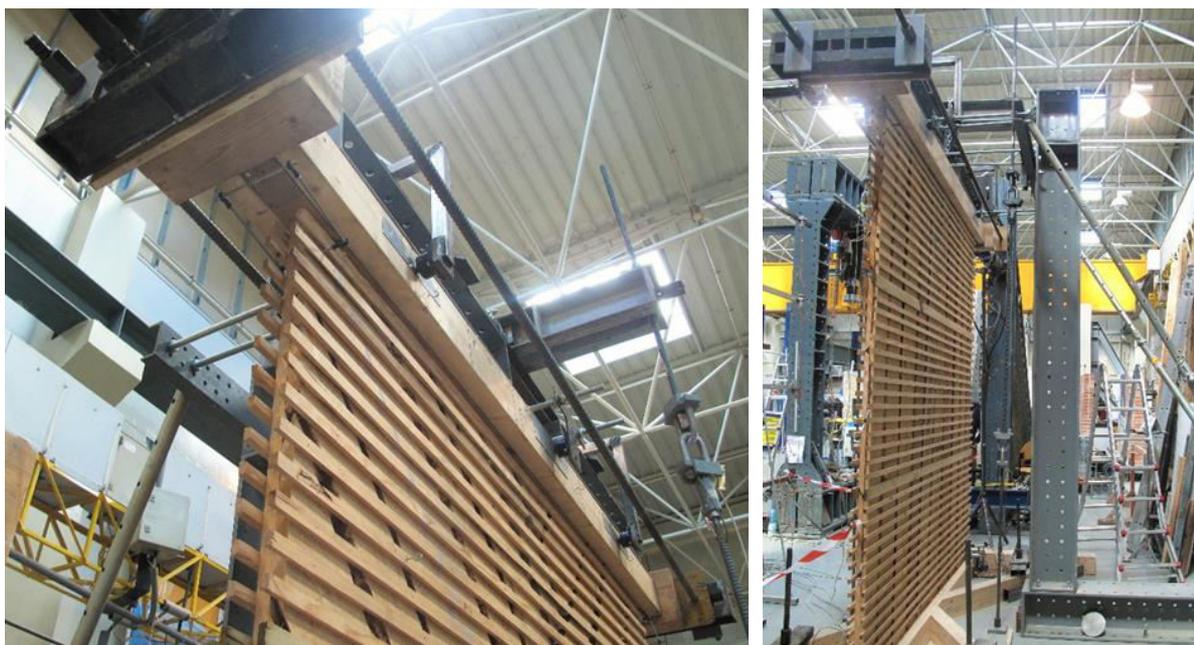


Figura 3.7 – Perfis metálicos que garantem a imobilidade vertical do frechal inferior durante o ensaio: a) perfil da extremidade inferior esquerda; b) e c) perfil da extremidade inferior direita

O frechal superior da parede de tabique foi encaixado num negativo de uma viga/cabeço de madeira idêntico ao da viga central da base, seguindo um procedimento idêntico ao que aconteceu na base. No entanto, e ao contrário do frechal da base, o frechal superior pode rodar livremente em torno dos dois eixos horizontais (rotação em torno do eixo vertical impedida) e deslocar-se livremente na direção dos dois eixos do plano da parede (deslocamento ortogonal à parede impedido).

Para bloquear o deslocamento do topo da parede para fora do seu plano, construiu-se um pórtico metálico que suportava três “braços” horizontais em consola que tocavam no cabeço de madeira em três pontos na face anterior da parede e em dois pontos na face posterior (Figura 3.8).



(a)

(b)

Figura 3.8 – Sistema que impede o deslocamento do topo da parede para fora do plano: a) topo da face anterior da parede; b) face posterior da parede e pórtico metálico

Após a realização de alguns ensaios nas paredes de tabique, verificou-se que o cabeço de madeira, que se pretendia imóvel na direção perpendicular ao plano da parede, deslocava-se excessivamente nessa direção, rodando em torno do eixo vertical. De facto, constatou-se que o pórtico metálico com três “braços” era insuficiente para impedir o deslocamento do topo da parede para fora do plano da parede. Por esta razão, adicionaram-se novos elementos ao *setup* experimental: um conjunto de três escoras que permitiram que os deslocamentos referidos reduzissem cerca de 10 vezes, Figura 3.9. Os ensaios que, entretanto, tinham sido realizados, foram posteriormente repetidos.

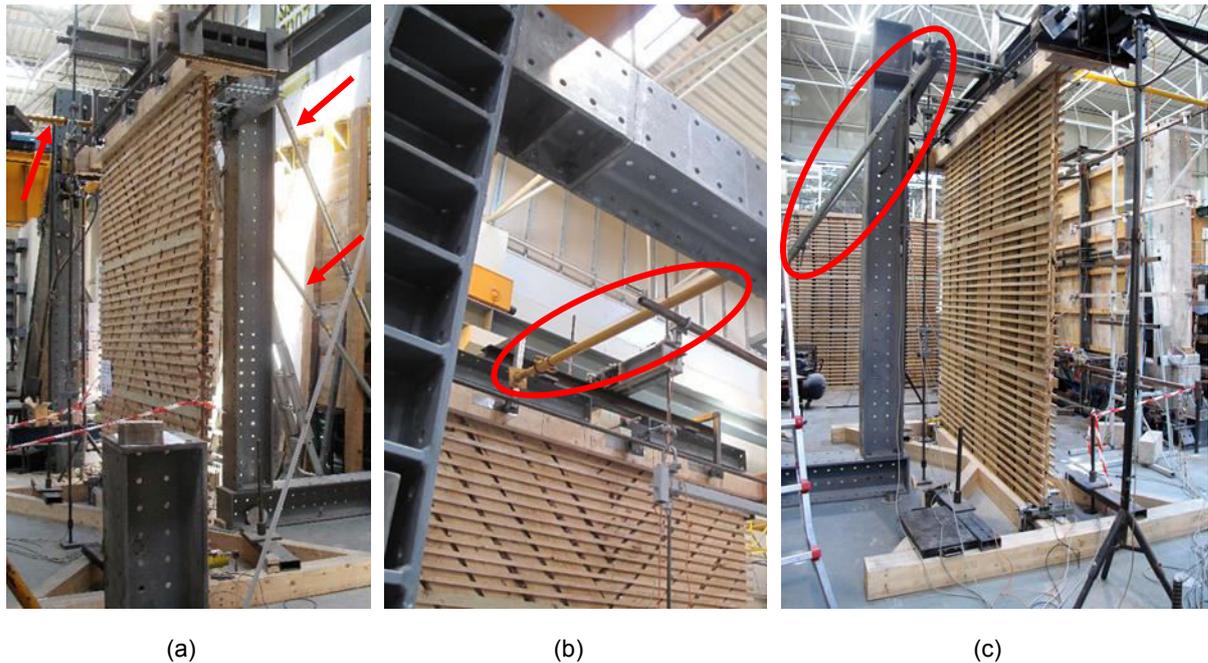


Figura 3.9 – Escoras que impedem o deslocamento do topo da parede para fora do seu plano: a) esquema de escoras; b) detalhe da escora horizontal na face anterior; c) detalhe das escoras diagonais na face posterior da parede

### 3.5. INSTRUMENTAÇÃO

Cada atuador tem uma célula de carga colocada na extremidade do êmbolo que mede a carga que o respectivo atuador exerce durante o ensaio. Existem mais duas células de carga, uma em cada varão vertical com a mesma função. A Figura 3.10 mostra, através de um esquema de alçado e corte do *setup*, a posição e numeração das células de carga.

As deformações da parede foram registadas com recurso a LVDTs (Linear Variable Differential Transformers). Indica-se na Figura 3.11 qual a disposição e a numeração desses aparelhos de medida, tendo-se adotado uma distribuição que permite caracterizar a deformada em altura na direção perpendicular ao plano da parede, assim como medir o deslocamento e a rotação do cabeço de madeira, o levantamento da parede em relação ao frechal, o deslocamento das diagonais da parede e, finalmente, o deslocamento horizontal absoluto.

Devido a restrições de instrumentação disponível, não foi possível considerar em simultâneo os três alinhamentos verticais de LDVTs para medição dos deslocamentos do pano de parede perpendiculares ao seu plano, tal como aconteceu nos ensaios de compressão [11]. Durante a apresentação dos resultados, indicar-se-á, para cada ensaio, quais os aparelhos utilizados.

Nos ensaios experimentais foram usados LVDTs de fio com 250mm ( $\pm 0,10\%$ ) ou 500mm ( $\pm 0,10\%$ ) de curso, com exceção de dois pontos (50 e 51) onde se usaram LVDTs de mola, como o que se ilustra na fotografia da Figura 3.12. Os LVDTs de mola utilizados têm apenas  $\pm 7,5\text{mm}$  ( $\pm 0,25\%$ ) de curso, mas mais precisão do que os LVDTs de fio, sendo mais indicados quando se trata de menores deslocamentos.

Foi também medida a rotação do cabeço de madeira (que coincide com a rotação do frechal superior) em torno dos dois eixos horizontais com recurso a um clinómetro que foi colocado no centro geométrico do cabeço, entre as vigas metálicas de distribuição da carga vertical, como se mostra na fotografia da Figura 3.13a. A fotografia da Figura 3.13b mostra a orientação do clinómetro.

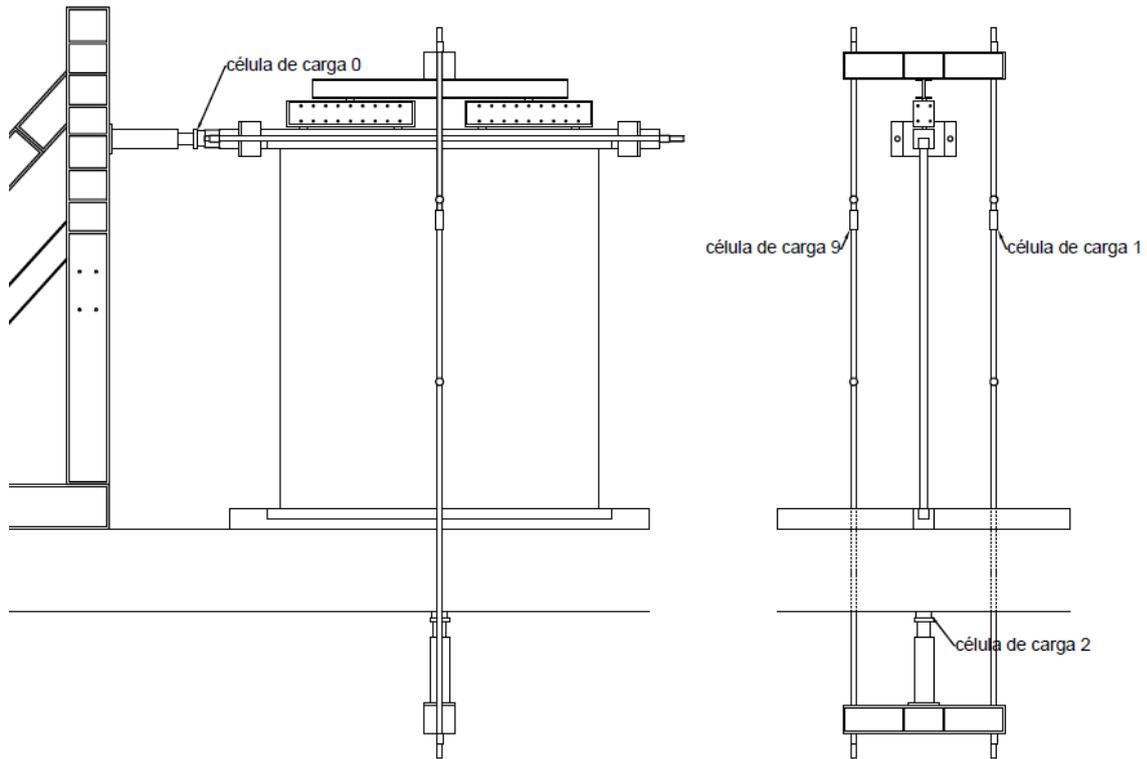
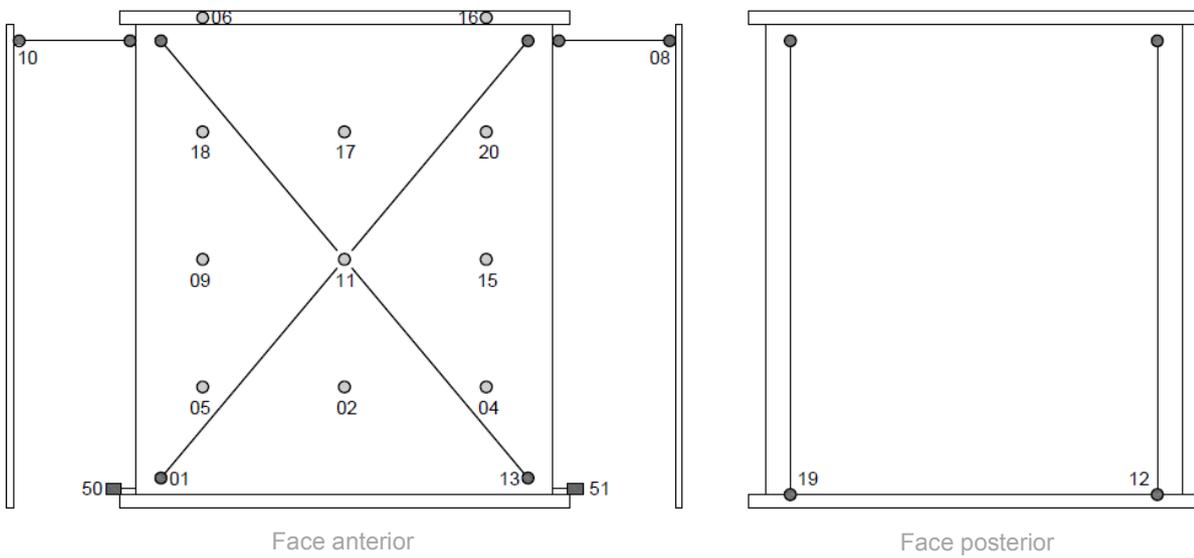


Figura 3.10 – Numeração das células de carga



Legenda:

- Pontos em análise - deslocamento perpendicular ao plano da parede
- Pontos em análise - deslocamento relativo no plano da parede
- 

Figura 3.11 – Posicionamento e numeração dos LVDT



Figura 3.12 – LVDT de mola

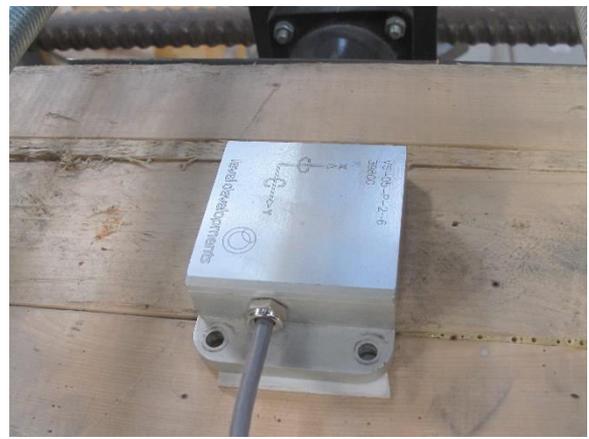


Figura 3.13 – Clinómetro: a) posicionamento em cima do cabeço de madeira; b) orientação

Para se medirem os deslocamentos do pano de parede para fora do seu plano foi utilizado um pórtico externo (Figura 3.14a) que proporciona um sistema de referência fixo em relação ao qual se medem os deslocamentos da parede em relação à posição inicial. A fotografia da Figura 3.14b mostra a ligação do fio do LVDT à parede, e a fotografia da Figura 3.14c mostra um LVDT de fio fixado no pórtico referido.



Figura 3.14 – Sistema que permite medir os deslocamentos do pano de parede para fora do seu plano: a) pórtico fixo e respetivos LVDTs b) ligação do fio do LVDT à parede; c) LVDT de fio

Para se medir o deslocamento horizontal do topo da parede no plano da parede, foi usado um tripé externo que proporciona, tal como o pórtico, um sistema de referência fixo em relação ao qual se mede o deslocamento em relação à posição inicial. O tripé repete-se em cada um dos lados da parede. As fotografias das Figura 3.15a, Figura 3.15b e Figura 3.15c mostram o tripé da extremidade esquerda da parede, a ligação do fio do LVDT à parede e o tripé da extremidade direita, respetivamente.

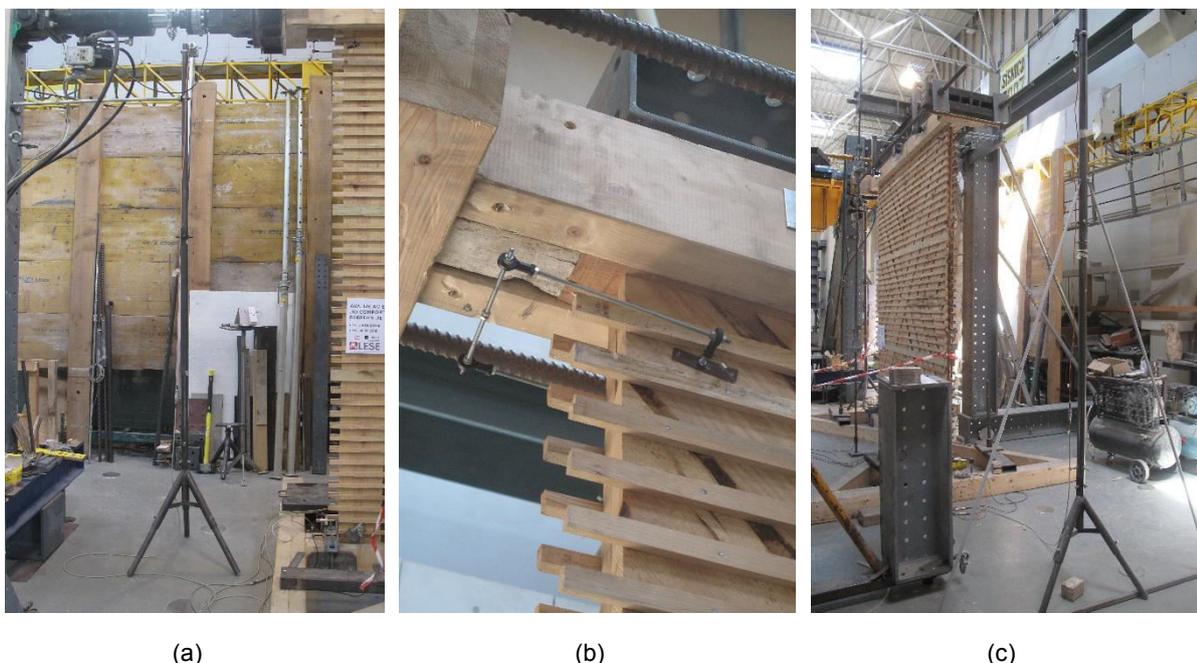


Figura 3.15 – Sistema que permite medir o deslocamento horizontal do topo da parede no plano da parede: a) tripé do lado esquerdo da parede; b) ligação do fio do LVDT à parede; c) tripé do lado direito

Em suma, os resultados que se obtiveram dos ensaios foram 4 forças, uma por cada célula de carga e que se relacionam diretamente com a carga exercida na parede; 8 deslocamentos na direção perpendicular ao plano da parede; 8 deslocamentos relativos no plano da parede; e a rotação do frechal medida pelo clinómetro. Estes dados foram recolhidos e exportados para o Excel através do *software* PECA, uma ferramenta desenvolvida pelo LESE.



# 4

## ENSAIOS EXPERIMENTAIS

### 4.1. OBJETIVOS

Os objetivos deste capítulo são:

- Apresentação da campanha experimental.
- Discussão dos resultados da campanha.

### 4.2. INTRODUÇÃO

No âmbito da presente dissertação foi realizada a campanha de ensaios experimentais ao corte no plano sob compressão constante em paredes de tabique à escala real.

Estes ensaios resultam da aplicação de uma ação horizontal variável: crescente cíclica, ou monotónica, combinada com uma ação vertical uniformemente distribuída constante, no presente caso de resultante igual a 10kN. Estas ações pretendem simular o comportamento horizontal no plano de uma parede de tabique submetida a uma carga gravítica equivalente à descarga de um pavimento de madeira com 4m de vão e submetido a uma sobrecarga de 1kN/m<sup>2</sup>. O comportamento das paredes medido e observado durante os ensaios experimentais irá permitir avaliar a capacidade das paredes para funcionarem como elementos de contraventamento às ações horizontais, nomeadamente ações sísmicas.

Esta campanha exigiu a montagem de um *setup* complexo, criado propositadamente para este efeito, tal como se descreve no capítulo 3, e que respondeu satisfatoriamente aos requisitos para que foi executado. Nos pontos seguintes apresentam-se algumas considerações relativas aos ensaios, nomeadamente aspetos considerados relevantes para a análise e compreensão do comportamento das paredes, assim como os resultados obtidos nos ensaios experimentais.

### 4.3. CONSIDERAÇÕES GERAIS

#### 4.3.1. ENSAIOS MONOTÓNICOS

Os ensaios monotónicos consistiram na aplicação de um deslocamento horizontal crescente no plano e topo da parede,  $d_H$ . Previamente foi aplicada no topo da parede a carga vertical descendente de resultante igual a 10kN, distribuída por 4 pontos de forma a simular um carregamento uniformemente distribuído que se manteve constante ao longo de todo o ensaio. O deslocamento  $d_H$  foi aplicado apenas num sentido a velocidade constante, de 0,01mm/s durante a carga e de 0,04mm/s durante a descarga.

#### 4.3.2. ENSAIOS CÍCLICOS

Os ensaios cíclicos consistiram na imposição de deslocamentos horizontais cíclicos, crescentes, no plano e topo da parede,  $d_H$ , após a aplicação da carga vertical descendente aplicada nas mesmas condições que nos ensaios monotónicos. Foi adotada a lei de deslocamentos  $d_H$  indicada na Tabela 4.1, com ciclos de amplitude crescente e velocidade variável. Os valores da amplitude crescente dos ciclos, isto é, dos deslocamentos horizontais  $d_H$  impostos em cada ciclo, foram escolhidos após a análise do comportamento da parede de tabique simples ou dupla no respetivo ensaio monotónico, nomeadamente da observação da curva força horizontal-deslocamento horizontal, tendo-se escolhido valores  $d_H$  de pico que correspondessem às várias fases de cada curva.

Tabela 4.1 – Lei de deslocamentos imposta nos ensaios cíclicos de corte com compressão constante

Ciclo	Deslocamento horizontal, $d_H$ (mm)		Velocidade de aplicação de $d_H$ (mm/s)
	PTS	PTD	
1	2,5	2,5	0,04
2			
3	7,5	7,5	0,06
4			
5	15,0	15,0	0,08
6			
7	27,5	22,5	0,08
8			
9	40,0	30,0	0,08
10			

Na representação esquemática da Figura 4.1, apresenta-se a parede de tabique em alçado, com os frechais, superior e inferior e as ações aplicadas durante os ensaios experimentais: a resultante da força vertical e a força horizontal  $F_H$  correspondente ao deslocamento horizontal no plano  $d_H$ .

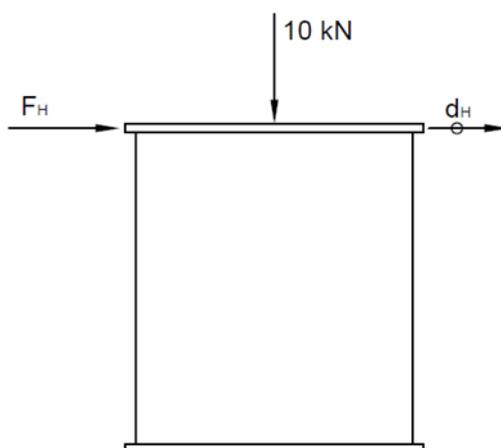


Figura 4.1 – Representação esquemática da parede de tabique em alçado com a ação resultante vertical e a ação horizontal aplicada durante os ensaios

Nos ensaios cíclicos, cada ciclo engloba a aplicação do respetivo deslocamento horizontal de pico no sentido positivo, a aplicação do mesmo valor do deslocamento no sentido negativo, e ainda as respetivas

descargas, tendo sido repetido duas vezes com o intuito de avaliar efeitos de degradação de rigidez e de possível acumulação de dano. Este procedimento permitiu ainda estimar a resistência lateral, bem como a capacidade de dissipação de energia das paredes de tabique.

A força horizontal,  $F_H$ , instala na parede um momento equivalente ao binário de forças representado na Figura 4.2 que traciona as fibras do lado esquerdo da parede e comprime as fibras do lado direito. Naturalmente, quando se aplica a força no sentido aposto, os esforços de tração e compressão trocam de lado. Perceber os esforços instalados pela ação horizontal auxilia na compreensão do comportamento da parede que se apresenta mais à frente no presente capítulo.

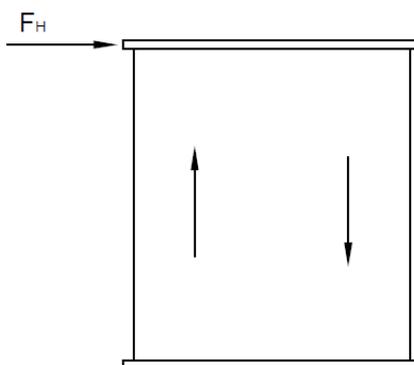


Figura 4.2 – Representação esquemática da parede de tabique em alçado com a força horizontal aplicada e os respectivos esforços esquemáticos instalados

#### 4.3.3. TÉRMINO DOS ENSAIOS

No caso das paredes de tabique simples, os ensaios terminaram quando se atingiu o curso máximo do atuador. No caso das paredes de tabique duplo os ensaios terminaram quando o declive da curva força horizontal-deslocamento horizontal tendeu para zero ou quando o deslocamento obtido se considerou representativo de uma situação de dano claro, mas sem rotura. Em todas as situações, o ensaio parou antes da rotura das paredes e sem causar danos relevantes nas estruturas, possibilitando a reutilização dos mesmos modelos físicos de paredes para a realização de novos ensaios no futuro, nomeadamente com a incorporação de medidas de reforço.

#### 4.3.4. RIGIDEZ HORIZONTAL TANGENTE

Uma das características da parede mais importantes que se pretendia determinar com este conjunto de ensaios foi a rigidez da parede aos deslocamentos horizontais no plano,  $k$ , e que se calcula a partir da equação 4.1:

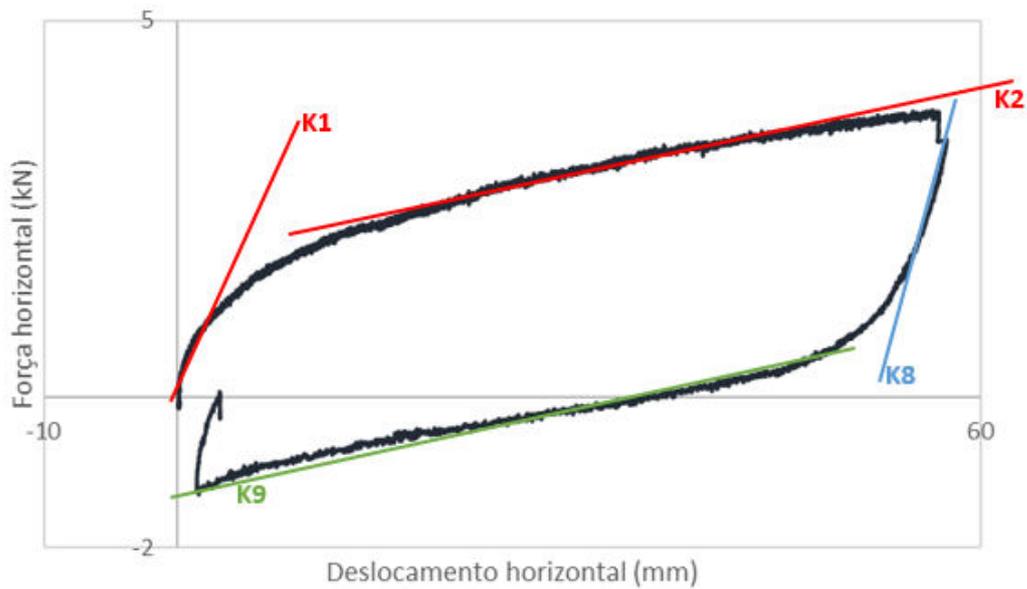
$$k = \frac{F_H}{(d_H)_m} \quad (4.1)$$

sendo  $F_H$  a força horizontal total exercida no frechal e  $(d_H)_m$  a média dos deslocamentos horizontais no plano dos dois nós extremos do frechal superior.

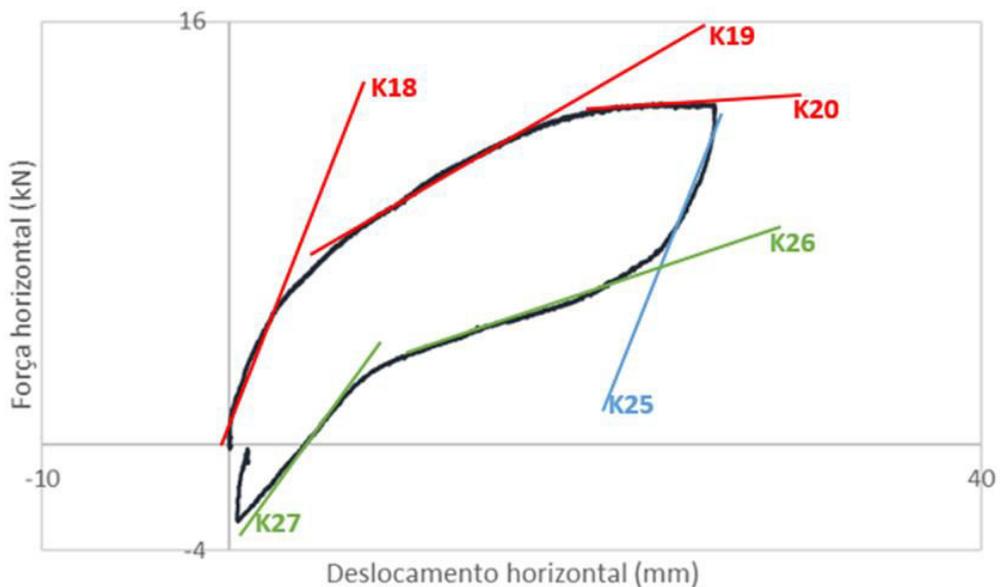
As curvas força horizontal-deslocamento horizontal denunciaram um comportamento das paredes de tabique claramente não linear; por essa razão foram calculados vários valores de rigidez correspondentes aos vários regimes de comportamento detetados. As Figura 4.3 e Figura 4.4 ilustram exemplos dessas curvas força horizontal-deslocamento horizontal, com retas auxiliares para ilustrar os

comportamentos/regimes lineares considerados, e apresentam a numeração utilizada para identificar os valores de rigidez horizontal calculados.

Observou-se que durante a carga e descarga, as paredes de tabique simples apresentavam um comportamento bilinear e as paredes de tabique duplo um comportamento trilinear. Por conseguinte, foram calculados, para cada ensaio monotónico das paredes de tabique simples, quatro valores de rigidez (Figura 4.3a) e, para cada ensaio monotónico das paredes de tabique duplo, seis valores de rigidez (Figura 4.3b). No caso dos ensaios cíclicos, o número de valores de rigidez a calcular aumentou de quatro para dezasseis, no caso das paredes de tabique simples (Figura 4.4a), e de seis para vinte, no caso das paredes de tabique duplo (Figura 4.4b), uma vez que se aplicaram múltiplas descargas e recargas em ambos os sentidos e que apresentaram diferentes valores.

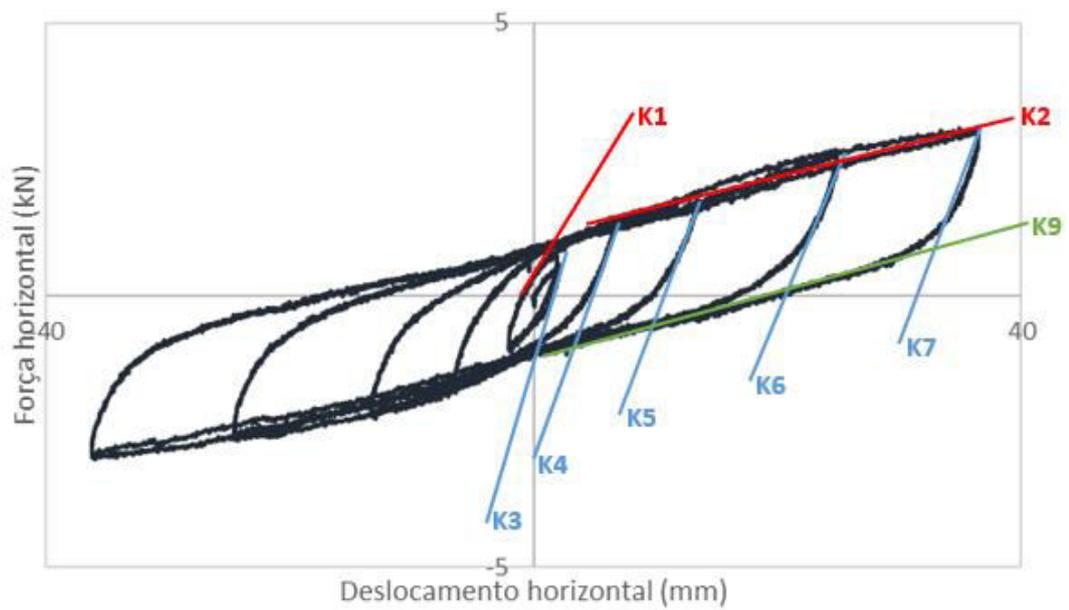


(a)

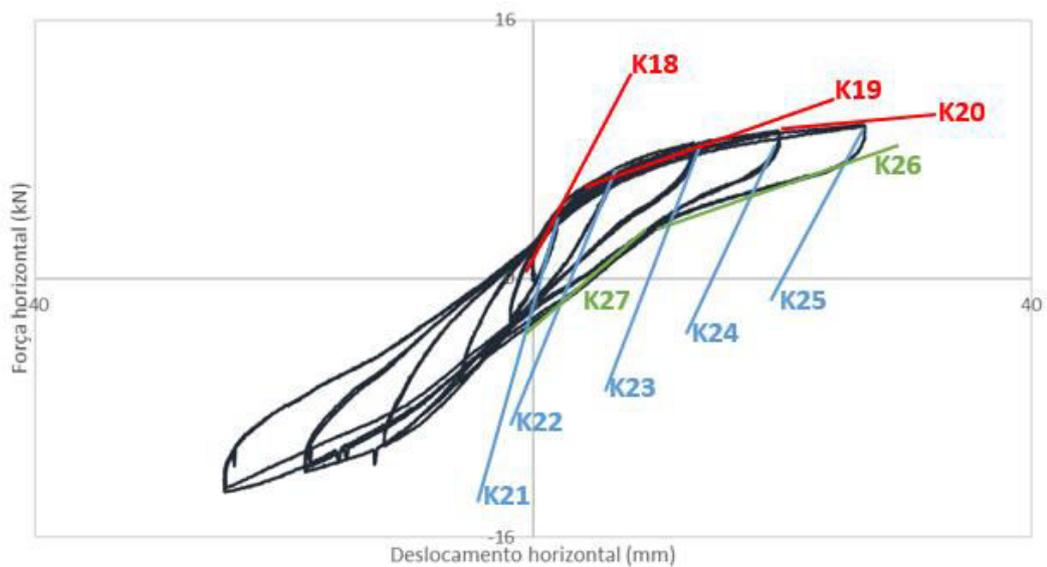


(b)

Figura 4.3 – Numeração dos valores de rigidez horizontal tangente calculados, para os ensaios monotónicos, em função do comportamento observado: a) paredes de tabique simples; b) paredes de tabique duplo



(a)



(b)

Figura 4.4 - Numeração dos valores de rigidez horizontal tangente calculados, para os ensaios cíclicos, em função do comportamento observado: a) paredes de tabique simples; b) paredes de tabique duplo

Deste modo, calculou-se uma rigidez para cada fase de comportamento observada considerada linear.

Durante a carga das paredes de tabique simples, para a primeira e segunda fases consideradas lineares calcularam-se os valores K1 e K2 ou K10 e K11, consoante o sentido de aplicação de  $F_H$ . Durante a carga das paredes de tabique duplo, para a primeira, segunda e terceira fases consideradas lineares calcularam-se os valores K18, K19 e K20 ou K28, K29 e K30, consoante o sentido de aplicação de  $F_H$ .

Na descarga, o comportamento bilinear ou trilinear da parede exprime-se por cores. A primeira fase, correspondente ao início da descarga, apresenta a cor azul. Destingiram-se os diferentes valores de

rigidez obtidos para cada amplitude de ciclo, K3, K4, K5, K6 e K7 ou K12, K13, K14, K15 e K16, consoante o sentido de aplicação de  $F_H$ , para as paredes de tabique simples, e, K21, K22, K23, K24 e K25 ou K31, K32, K33, K34 e K35, consoante o sentido de aplicação de  $F_H$ , para as paredes de tabique duplo. O segundo e terceiro regime considerado linear na descarga corresponde à cor verde e, para as paredes de tabique simples, aos valores de rigidez K9 ou K17, em função do sentido de  $F_H$ , e, para as paredes de tabique duplo, aos valores de rigidez K26 e K27 ou K36 e K37, em função do sentido de  $F_H$ .

Todos estes valores de rigidez horizontal tangente,  $K_i$ , foram calculados como sendo o declive da reta auxiliar que se aproximou à curva força horizontal-deslocamento horizontal, como exemplifica o esquema da Figura 4.5, utilizando as coordenadas de dois pontos da curva, a partir da equação 4.2:

$$k = \frac{(F_H)_2 - (F_H)_1}{((d_H)_m)_2 - ((d_H)_m)_1} \quad (4.2)$$

sendo  $(F_H)_1$  e  $(F_H)_2$  a força horizontal total exercida no frechal, em kN, e  $((d_H)_m)_1$  e  $((d_H)_m)_2$  a média dos deslocamentos horizontais dos dois nós extremos do frechal superior, em m, do primeiro e do segundo ponto comum à reta e à curva, respetivamente.

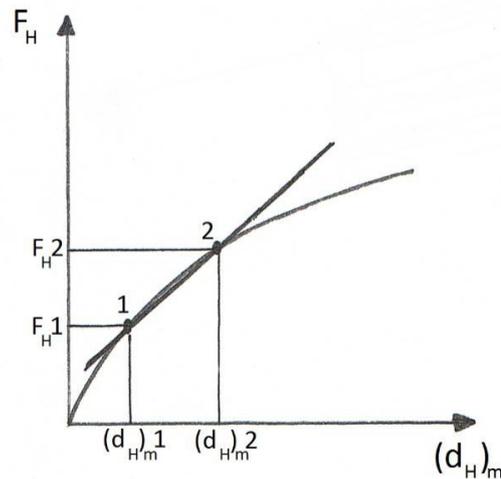


Figura 4.5 – Processo de cálculo da rigidez horizontal tangente

#### 4.3.5. REFERENCIAL UTILIZADO PARA MEDIR A ROTAÇÃO DO FRECHAL SUPERIOR DA PAREDE

De forma a analisar a rotação ocorrida no frechal superior da parede ao longo do ensaio, definiu-se o referencial cartesiano tridimensional de acordo com o referencial e sentidos positivos de rotação do clinómetro que se apresentam na Figura 4.6.

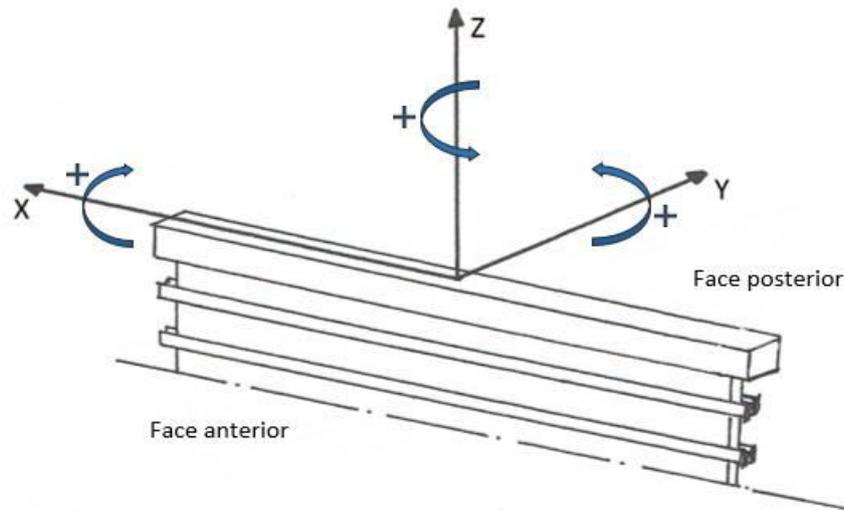


Figura 4.6 – Referencial utilizado para medir a rotação do frechal superior da parede

Note-se que o sentido positivo do eixo  $xx$  apresentado na Figura 4.6 corresponde ao sentido positivo de rotação do clinómetro, mas ao sentido negativo da aplicação da  $F_H$ , ou seja, forças e deslocamentos horizontais positivos correspondem a valores aplicados no sentido negativo do eixo  $xx$ . A nomenclatura adotada foi de “CX” para designar a rotação em torno do eixo  $xx$ , de “CY” para designar a rotação em torno do eixo  $yy$  e de “CZ” para designar a rotação em torno do eixo  $zz$ .

#### 4.3.6. DESLOCAMENTOS DA PAREDE NA DIREÇÃO PERPENDICULAR AO SEU PLANO

Para analisar os deslocamentos da parede na direção perpendicular ao seu plano, agruparam-se os LVDTs em três alinhamentos verticais, como esquematizado na Figura 4.7, e desenharam-se, para cada alinhamento, perfis transversais para diferentes fases do carregamento.

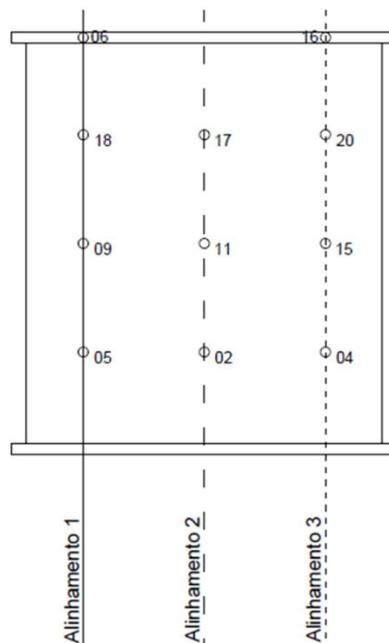


Figura 4.7 – Numeração dos alinhamentos verticais que originaram os perfis transversais

Nos ensaios cíclicos pretendeu mostrar-se a evolução dos deslocamentos na direção perpendicular ao plano da parede à medida que aumentavam os ciclos e a intensidade da força aplicada. Para isso, selecionaram-se as fases do carregamento que correspondem à força máxima aplicada em cada ciclo, indicadas no gráfico força-deslocamento exemplo da Figura 4.8, e sobrepuseram-se os perfis transversais.

A nomenclatura que se utilizou na Figura 4.8, e posteriormente nas legendas dos gráficos dos perfis transversais, foi a letra “P”, que designa pico da máxima força, associada ao sinal “-” quando se trata de resultados correspondentes à força aplicada no sentido negativo, e a um algarismo que indica o número do ciclo.

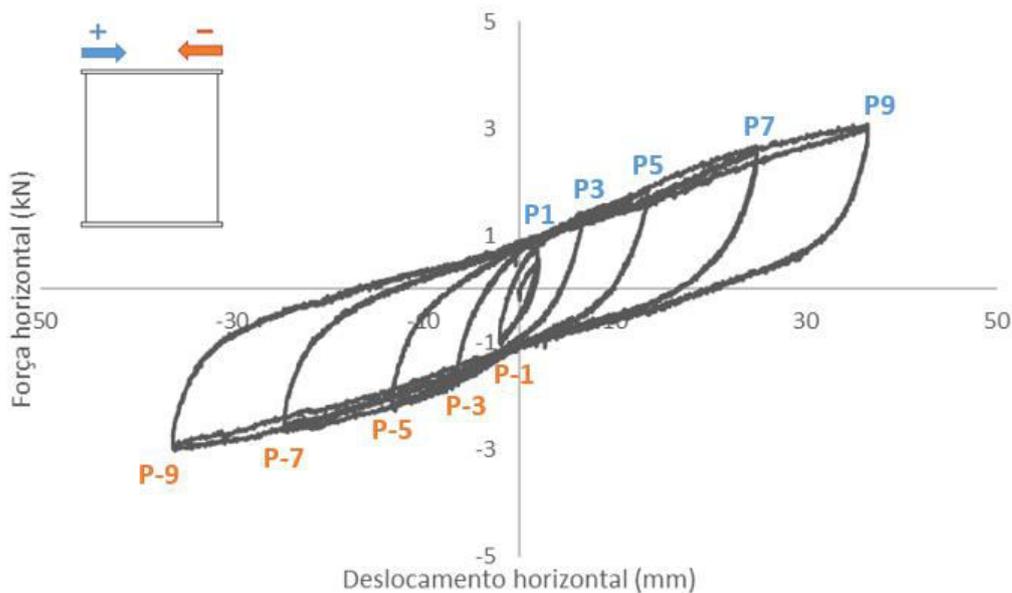


Figura 4.8 – Identificação das fases do carregamento selecionadas para o desenho dos perfis transversais

Os perfis transversais foram complementados com as posições do frechal superior em planta para as mesmas fases do carregamento. A translação  $t$  do frechal, em mm, foi calculada a partir da equação 4.3 e o valor da rotação  $\theta_z$ , em rad, em torno do eixo  $z$ , eixo vertical, foi calculada a partir da equação 4.4.

$$t = \frac{d_{06} + d_{16}}{2} \quad (4.3)$$

$$\theta_z = \frac{d_{06} - d_{16}}{1,835} \quad (4.4)$$

Sendo  $d_{06}$  e  $d_{16}$  os deslocamentos medidos na direção perpendicular ao plano da parede pelos LVDTs 06 e 16, e 1,835 a distância na horizontal, em m, entre os dois LVDTs.

#### 4.3.7. LISTAGEM DOS ENSAIOS REALIZADOS

O *setup* para a campanha experimental realizada: ensaio ao corte sob compressão constante de paredes de tabique à escala real, foi concebido de raiz, tendo tido que ser ajustado durante a campanha experimental. Como tal, realizaram-se mais do que os oito ensaios previstos inicialmente. A Tabela 4.2 apresenta a listagem de todos os ensaios realizados com as respetivas nomenclaturas e datas. Os ensaios

realizados até ao ensaio da PTD-CCC 3, do dia 11-04-2016, foram repetidos pelas razões já referidas no capítulo 3. Os oito ensaios seguintes correspondem aos ensaios considerados válidos, e cujos resultados se apresentam nos subcapítulos seguintes.

Tabela 4.2 – Listagem dos ensaios efetuados

Ensaio	Data
PTD – CCM 8	2016-01-18
PTD – CCM 8	2016-01-25
PTD – CCM 8	2016-01-25
PTD – CCM 8	2016-03-07
PTD – CCM 7	2016-03-31
PTS – CCM 6	2016-04-04
PTD – CCC 4	2016-04-07
PTD – CCC 3	2016-04-11
PTD – CCC 3	2016-04-26
PTS – CCM 2	2016-04-28
PTS – CCC 1	2016-04-29
PTS – CCC 5	2016-05-03
PTD – CCC 4	2016-05-23
PTS – CCM 6	2016-05-24
PTD – CCM 7	2016-05-25
PTD – CCM 8	2016-05-25

P-parede T-tabique S-simples/D-duplo C-corte C-compressão M-monotónico/C-cíclico

#### 4.3.8. OUTROS ENSAIOS COM PAREDES DE TABIQUE

Relacionado com o estudo do comportamento mecânico de construções em tabique, nomeadamente sobre resultados de ensaios experimentais em paredes de tabique, salienta-se o trabalho desenvolvido por Inês Fonseca *et al.* [12], a dissertação de mestrado de Rafael Pinto [13] e a dissertação de mestrado de Andreia Rebelo [11].

Na campanha experimental, realizada em [12], foi avaliada a possibilidade de reforço através da aplicação de placas de derivados de madeira (MDF e contraplacado) nas faces da parede. Os modelos físicos ensaiados foram produzidos em laboratório e constituem quarenta protótipos de parede (0,90m x 0,44m x 0,06m) da tipologia de parede de tabique simples. A estrutura de madeira foi feita com pinho bravo (*Pinus pinaster Ait.*) e à estrutura de madeira foi adicionada uma argamassa de enchimento e, por fim, um reboco. Os protótipos de painéis de parede à escala real foram ensaiados ao corte no plano do painel segundo o esquema que se ilustra na Figura 4.9. Os ensaios compreenderam painéis sem reforço, painéis com reforço após dano e painéis com reforço sem dano prévio. Após os ensaios determinou-se o módulo de distorção em corte de diafragma e o módulo de distorção no plano do painel. Os dados experimentais permitiram concluir que as paredes de tabique simples apresentam um fraco comportamento ao corte no plano da parede, apresentando uma elevada deformabilidade correspondente a um módulo médio de distorção no plano do painel de 67,87 N/mm<sup>2</sup>. Foi verificado que o reforço dos paramentos destas paredes com placas de derivados de madeira permite, em média, um aumento

substantial da sua rigidez e torna viável a sua utilização como solução do reforço em paredes de tabique que apresentem algum dano.

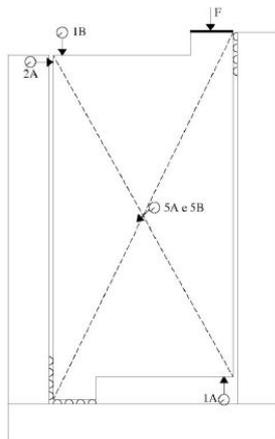
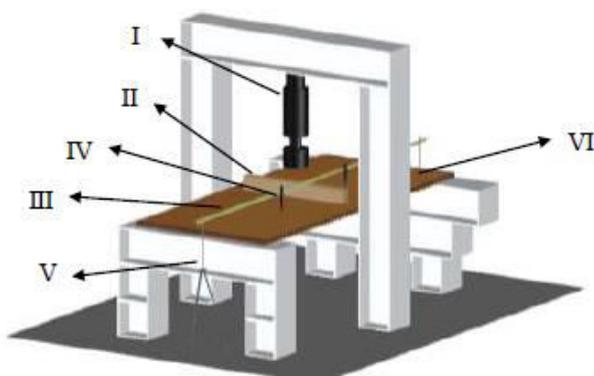


Figura 4.9 – Esquema de ensaio ao corte com indicação dos pontos de leitura de deslocamento e ponto de introdução da carga [12]

Em [13], foi desenvolvido um estudo relativo às construções no centro histórico de Viseu. Seleccionadas amostras representativas de paredes de tabique, estudaram-se os elementos constituintes, nomeadamente a madeira, as argamassas e os elementos de ligação e realizaram-se ensaios experimentais para caracterizar as suas propriedades mecânicas. No que se refere à madeira, concluiu-se, após a realização de ensaios à flexão estática, à compressão axial e à dureza, que preservava boa parte das suas características físicas. Relativamente ao material de enchimento, concluiu-se que apresentava uma curva granulométrica extensa característica de uma areia siltosa. Os ensaios laboratoriais permitiram caracterizar os pregos como sendo constituídos por uma liga metálica de aço.

Posteriormente, realizaram-se ensaios de flexão em três paredes de tabique à escala real com o objetivo de compreender o seu comportamento quando sujeita a uma força aplicada a meio vão. A representação esquemática do *setup* do ensaio encontra-se representada na Figura 4.10. Ensaiou-se uma parede que a UTAD possuía e duas paredes recolhidas durante o trabalho de campo. Verificou-se que as paredes de tabique atingem grandes deformações para fora do plano sem colapsar, e que recuperam na totalidade a sua forma inicial.



Legenda: I - Atuador de 300 kN; II - Bloco de madeira; III - Calha; IV - LVDT; V - Tripé; VI - Parede de tabique.

Figura 4.10 – Representação esquemática do *setup* do ensaio à flexão [13]

Em [11], o trabalho incide nas paredes de tabique das construções antigas da cidade do Porto. Após a identificação e caracterização dessas paredes, foi avaliado numericamente o comportamento estrutural de dois tipos de parede de tabique, com e sem recobrimento, nomeadamente estimada a carga crítica para esforços verticais e a rigidez horizontal. Feita a avaliação numérica, foi realizada uma campanha experimental na estrutura de quatro paredes de tabique à escala real, duas de tabique simples e duas de tabique duplo, com o objetivo de avaliar a sua capacidade resistente à compressão. Mostra-se na Figura 4.11 a representação esquemática do *setup* do ensaio experimental. Os ensaios terminaram quando se atingiu o patamar de instabilidade, sem atingir a rotura das paredes, ou provocar danos relevantes nos modelos físicos. As respetivas cargas críticas foram de 18,70kN/m para as paredes de tabique simples e de 24,12kN/m para as paredes de tabique duplo.

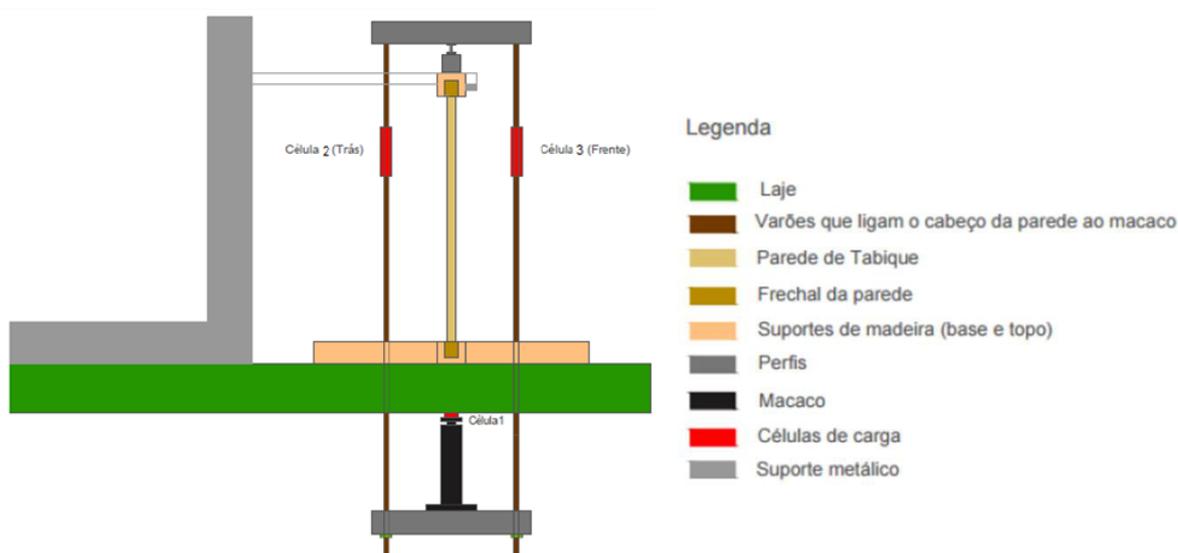


Figura 4.11 – Representação esquemática (corte) do *setup* do ensaio à compressão simples [11]

Note-se que a presente dissertação dá continuação ao trabalho desenvolvido por Andreia Rebelo, i.e., há uma estreita relação entre os dois estudos, nomeadamente foram ensaiadas as mesmas paredes.

Tal como se referiu inicialmente, a informação existente sobre o comportamento mecânico das paredes de tabique é escassa o que fortalece a pertinência do presente estudo.

#### 4.4. ENSAIO PTS – CCM

O primeiro ensaio a ser analisado, PTS – CCM, foi um ensaio monotónico ao corte com compressão constante numa parede de tabique simples, PTS – CCM. Apresentam-se de seguida os resultados dos dois ensaios deste tipo nas paredes 2 e 6, dispostos lado a lado.

##### 4.4.1. ANÁLISE DA CURVA DE RESPOSTA GLOBAL FORÇA HORIZONTAL VS DESLOCAMENTO HORIZONTAL

A Figura 4.12 ilustra as curvas de comportamento global: força horizontal aplicada no topo da parede, medida pela célula de carga 0, *versus* o deslocamento horizontal imposto, calculado pela média dos deslocamentos dos dois nós extremos do frechal superior. O deslocamento do nó extremo esquerdo do frechal é calculado fazendo a subtração entre o deslocamento medido pelo LVDT de fio 10 pelo deslocamento medido pelo LVDT de mola 50. O deslocamento do nó extremo direito do frechal superior

é calculado fazendo a subtração entre o deslocamento medido pelo LVDT de fio 8 pelo deslocamento medido pelo LVDT de mola 51, de acordo com a numeração dos LVDT que se apresenta na Figura 3.11.

Na Tabela 4.3 apresentam-se para ambas as curvas os valores das respectivas forças horizontais máximas aplicadas,  $F_{H,máx}$ , dos deslocamentos horizontais máximos obtidos,  $d_{H,máx}$ , e dos deslocamentos horizontais residuais observados,  $d_{H,residual}$ .

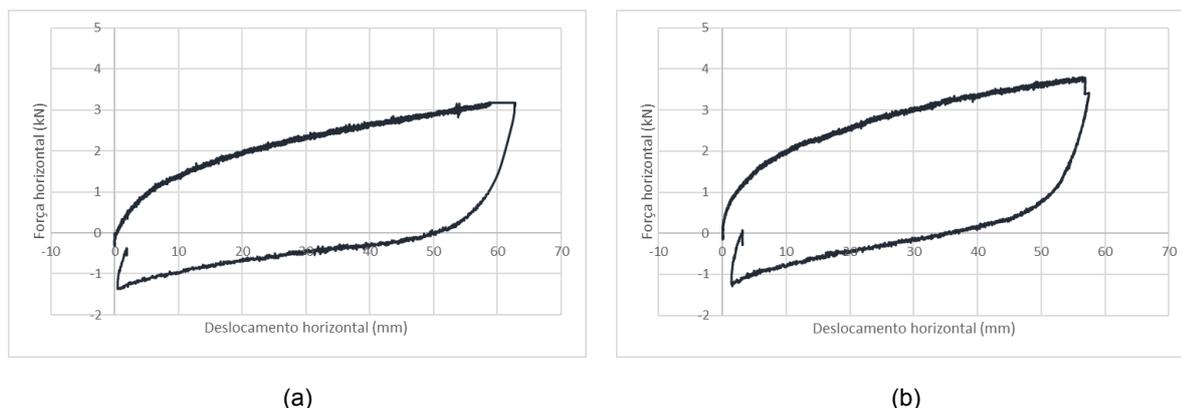


Figura 4.12 – Curvas força horizontal-deslocamento horizontal: a) PTS – CCM 2; b) PTS – CCM 6

Tabela 4.3 – Parâmetros das curvas força horizontal-deslocamento horizontal

Ensaio	$F_{H, máx}$ (kN)	$d_{H, máx}$ (mm)	$d_{H, residual}$ (mm)
PTS – CCM 2	3,19	62,8	50,0
PTS – CCM 6	3,81	57,5	35,1

Da análise das curvas pode referir-se que:

- As duas paredes exibiram uma resposta não linear.
- Embora se observe alguma recuperação do deslocamento horizontal, originaram-se deslocamentos plásticos elevados que só foram recuperados porque o ensaio descarregou, primeiro para deslocamento horizontal nulo e só depois para força horizontal nula. Neste processo, as tábuas que se tinham destacado do frechal por efeito de tração na ligação pregada, foram reposicionadas na posição original durante a descarga (efeito de pregagem).

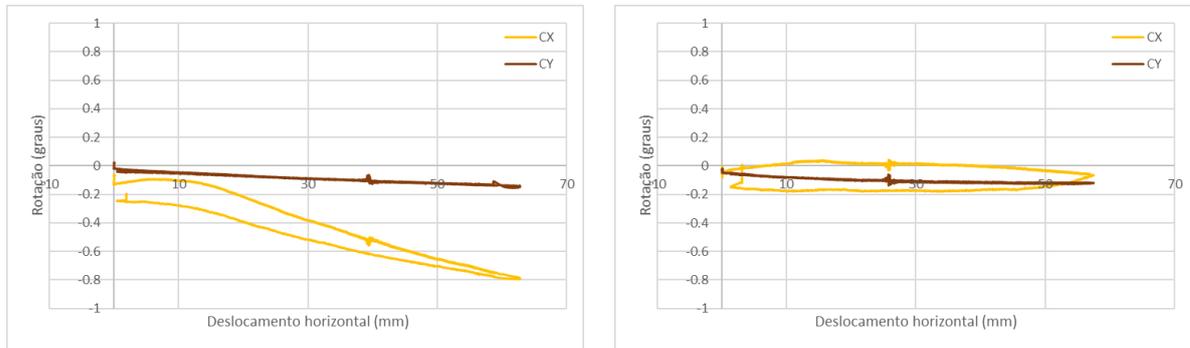
Na Tabela 4.4 apresentam-se, para ambos os ensaios, os valores da rigidez horizontal tangente em conformidade com a numeração da Figura 4.3 e com o procedimento indicado no subcapítulo 4.3.4. Da análise dos valores obtidos, verificou-se que, durante a carga, a rigidez horizontal diminui à medida que a grandeza do deslocamento horizontal aumenta.

Tabela 4.4 – Valores da rigidez horizontal tangente, em kN/m, exibidos pelas paredes de tabique simples nos ensaios monotónicos

Ensaio	Carga		Descarga	
	K1	K2	K8	K9
PTS – CCM 2	215	35	388	25
PTS – CCM 6	364	36	374	31

#### 4.4.2. ANÁLISE DA ROTAÇÃO DO FRECHAL SUPERIOR DA PAREDE

O gráfico da Figura 4.13 mostra a rotação do frechal superior em relação aos eixos horizontais xx e yy, eixo do plano da parede e eixo perpendicular ao plano da parede, respectivamente, em função do deslocamento horizontal imposto durante o ensaio. O referencial cartesiano e sentidos positivos de rotação usados foram os indicados na Figura 4.6.

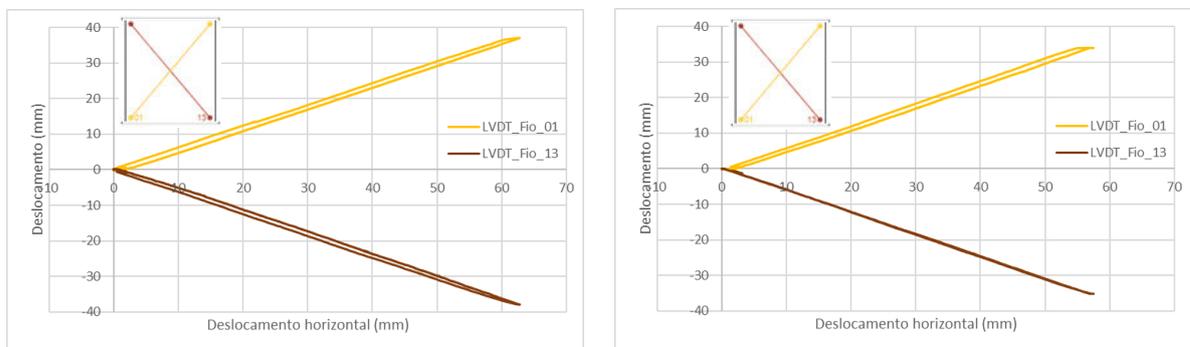


(a) (b)  
 Figura 4.13 – Rotação do frechal superior: a) PTS – CCM 2; b) PTS – CCM 6

As rotações assumem valores bastante reduzidos. Em torno do eixo xx, a rotação tem um comportamento algo irregular, rodando no sentido negativo até atingir os  $-0,8^\circ$  no final do ensaio da parede 2, e não ultrapassando os  $-0,2^\circ$  durante todo o ensaio da parede 6. Após a descarga, no primeiro ensaio o frechal não retoma a sua inclinação inicial, apresentando uma inclinação negativa de cerca de  $-0,2^\circ$ . Em torno do eixo yy, registou-se, em ambos os ensaios, uma rotação que aumentou linearmente no sentido negativo sem alcançar os  $-0,2^\circ$ .

#### 4.4.3. ANÁLISE DOS DESLOCAMENTOS NO PLANO DA PAREDE

A análise dos deslocamentos no plano da parede foi conseguida através da medição de quatro deslocamentos relativos no plano, dois diagonais e dois verticais, representados nos gráficos das Figura 4.14 e Figura 4.15, respectivamente.



(a) (b)  
 Figura 4.14 – Deslocamentos das diagonais no plano da parede: a) PTS – CCM 2; b) PTS – CCM 6

As duas paredes apresentaram um comportamento idêntico ao nível dos deslocamentos das diagonais da parede. O deslocamento horizontal,  $d_H$  positivo (da esquerda para a direita) deformou a parede provocando a diminuição de comprimento de uma das diagonais (LVDT 13), que funcionou como escora, e o aumento de comprimento da outra diagonal (LVDT 01), que funcionou como tirante. Os deslocamentos máximos atingidos pelos LVDTs 01 e 13 foram, respetivamente, de 37,1mm e de -38,0mm no ensaio da parede 2 e de 34,1mm e de -35,2mm no ensaio da parede 6.

Com estes resultados estimou-se um módulo da distorção em corte,  $G$  através da equação:

$$G = \frac{F_H}{\frac{A}{d_H} \cdot H} \quad (4.5)$$

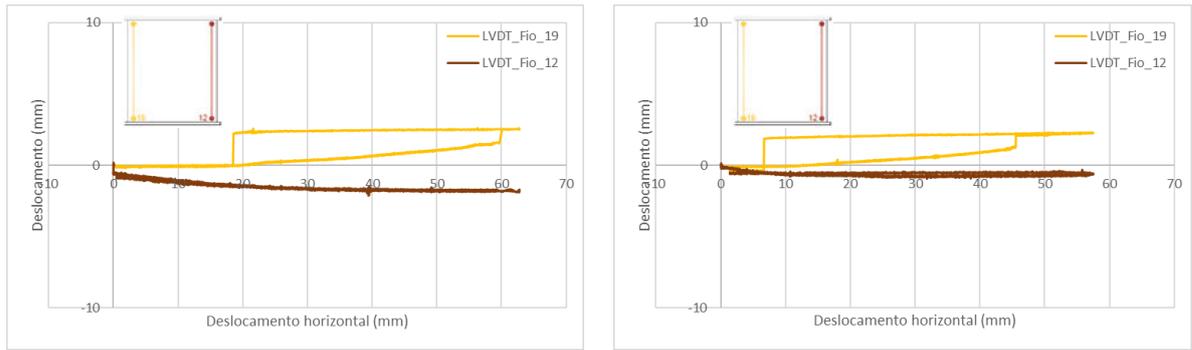
Sendo  $A$  a área da secção transversal da parede, calculada pela multiplicação da largura pela espessura da parede, e  $H$  a altura da parede.

Este módulo de distorção foi calculado para três momentos diferentes do ensaio das paredes de tabique simples: para o deslocamento horizontal de aproximadamente 3, 30 e 60mm. Os resultados obtidos apresentam-se na Tabela 4.5. Os valores que foram considerados para a altura, espessura e largura da parede foram 3,0m, 2,5cm e 2,5m que correspondem às dimensões dos modelos físicos ensaiados.

Tabela 4.5 – Módulo de distorção em corte,  $G$

Ensaio	$F_H$ (kN)	$d_H$ (mm)	$G$ (kN/m <sup>2</sup> )
PTS – CCM 2	0,66	3,1	10264
	2,36	30,0	3769
	3,19	58,8	2608
PTS – CCM 6	1,15	3,1	18034
	3,01	30,0	4812
	3,77	56,6	3200

Os LVDTs de fio 12 e 19, dispostos na vertical desde a base de madeira até ao topo da parede, pretendem essencialmente avaliar o levantamento ou rebaixamento das tábuas nas extremidades da parede em relação ao frechal. Neste ensaio, o lado onde se aplicou a força foi o lado tracionado, ou seja o lado que levantou e o lado oposto o que assentou. O LVDT 19 mediu um deslocamento máximo de 2,6mm, no ensaio da parede 2, e de 2,3mm (aumento/abertura), no ensaio da parede 6, e o LVDT 12 um deslocamento máximo de -2,1mm no primeiro ensaio e de -1,0mm no segundo (diminuição/fecho).



(a)

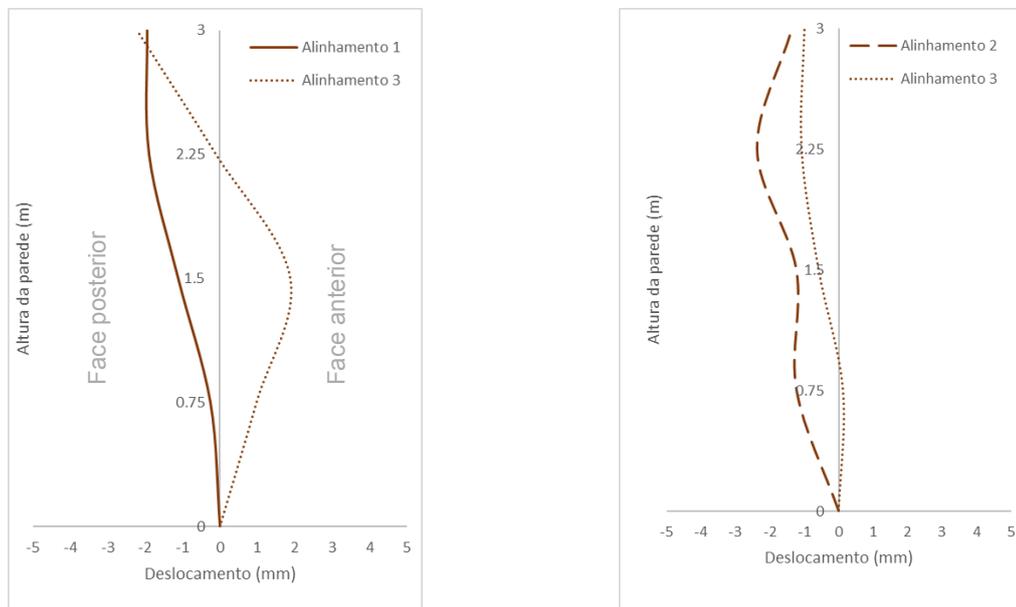
(b)

Figura 4.15 – Deslocamentos verticais no plano da parede: a) PTS – CCM 2; b) PTS – CCM 6

#### 4.4.4. ANÁLISE DO DESLOCAMENTO DA PAREDE NA DIREÇÃO PERPENDICULAR AO SEU PLANO

Para analisar o comportamento da parede na direção perpendicular ao seu plano optou-se por representar os perfis transversais da parede e a posição em planta do frechal superior durante a aplicação da carga máxima, tal como se apresenta na Figura 4.16 e na Figura 4.17, respetivamente.

Em todos os três alinhamentos da Figura 4.7 os pontos situam-se à cota de 0,75, 1,5, 2,25 e 3m de altura em relação à base. Na impossibilidade de se medir os deslocamentos para fora do plano da parede dos três alinhamentos em simultâneo devido a restrições de instrumentação, para os ensaios monotónicos optou-se por medir os deslocamentos dos alinhamentos 2 e 3, contudo no primeiro ensaio mediram-se os deslocamentos dos alinhamentos 1 e 3.



(a)

(b)

Figura 4.16 – Perfil transversal da parede no instante de aplicação da carga máxima: a) PTS – CCM 2; b) PTS – CCM 6

Todos os perfis transversais que se apresentam na presente dissertação foram desenhados com a face anterior voltada para o sentido positivo dos deslocamentos como se exemplifica na Figura 4.16b.

No primeiro ensaio, observa-se que a parede está a fazer “barriga” no alinhamento 3 que corresponde ao lado comprimido. Contudo, o mesmo não ocorre no segundo ensaio. Com efeito, a parede no alinhamento 3 (alinhamento que corresponde ao lado comprimido) do segundo ensaio apresenta a mesma deformada da parede no alinhamento 1 (alinhamento que corresponde ao lado tracionado) do primeiro ensaio. O perfil do alinhamento 2 do segundo ensaio apresenta uma deformada com tripla curvatura, difícil de interpretar.

Observa-se que todos os deslocamentos medidos na direção perpendicular ao plano nos ensaios monotónicos das paredes de tabique simples são mínimos, tendo os valores máximos obtidos sido apenas de -2,2mm no alinhamento 3 à cota de 3m no primeiro ensaio, e de -2,4mm no alinhamento 2 à cota de 2,25m no segundo ensaio.

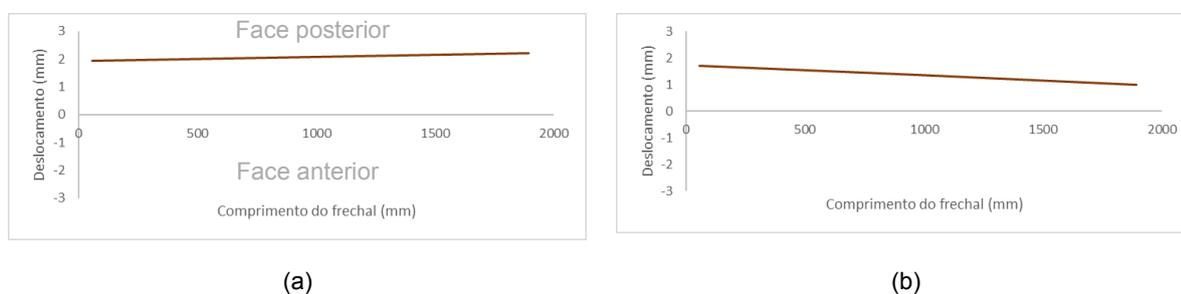


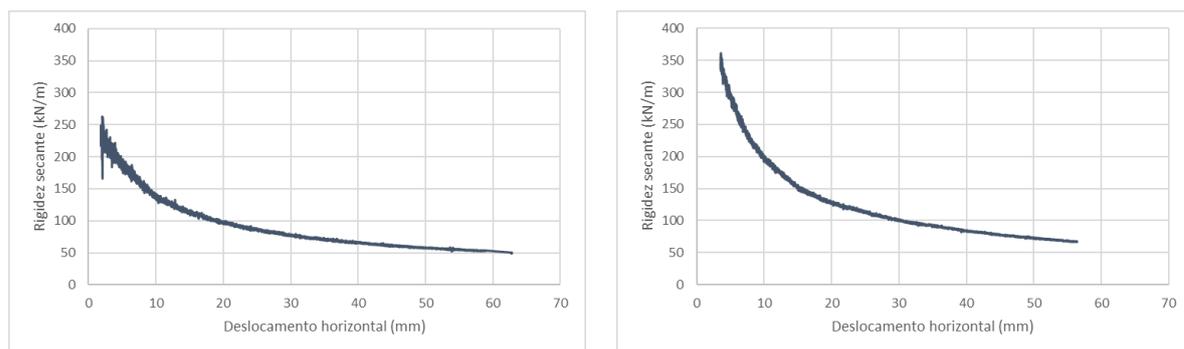
Figura 4.17 – Posição do frechal superior no instante de aplicação da carga máxima: a) PTS – CCM 2; b) PTS – CCM 6

Os gráficos da Figura 4.17 que mostram o frechal superior em planta foram desenhados com a face anterior voltada para o sentido negativo dos deslocamentos como se exemplifica na Figura 4.17a.

Em ambos os ensaios o frechal superior deslocou-se no mesmo sentido, no da face posterior, e de apenas 2,1mm no ensaio da parede 2 e 1,4mm no ensaio da parede 6. A rotação vertical foi somente de  $0,01^\circ$  e de  $-0,02^\circ$ , nos ensaios da parede 2 e 6, respetivamente.

#### 4.4.5. DEGRADAÇÃO DA RIGIDEZ SECANTE

Para mostrar a evolução da rigidez horizontal secante das paredes durante a carga (valor correspondente à divisão direta da força horizontal aplicada pelo deslocamento horizontal medido correspondente), apresenta-se na Figura 4.18 os gráficos da rigidez horizontal secante em função do deslocamento horizontal aplicado. Em ambos os ensaios, a rigidez horizontal da parede é máxima no início do ensaio e diminui exponencialmente durante a imposição dos primeiros deslocamentos, passando a ter uma redução de rigidez mais suave a partir de cerca de 1/3 do deslocamento máximo aplicado no ensaio.



(a)

(b)

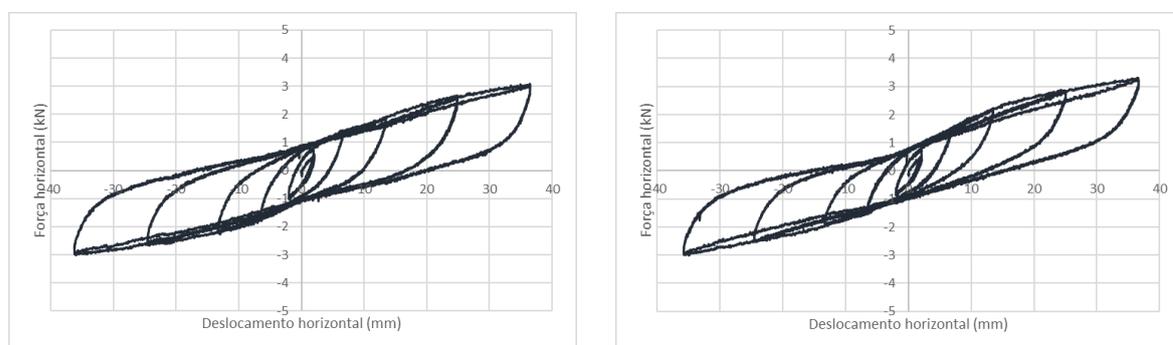
Figura 4.18 – Evolução da rigidez horizontal secante: a) PTS – CCM 2; b) PTS – CCM 6

#### 4.5. ENSAIO PTS – CCC

O segundo ensaio a ser analisado é um ensaio ao corte cíclico com aplicação de compressão constante em paredes de tabique simples, PTS – CCC. De seguida, apresentam-se os resultados dos dois ensaios deste tipo realizados nas paredes 1 e 5.

##### 4.5.1. ANÁLISE DA CURVA DE RESPOSTA GLOBAL FORÇA HORIZONTAL VS DESLOCAMENTO HORIZONTAL

A Figura 4.19 mostra as curvas de comportamento global: força horizontal aplicada no topo da parede medida pela célula de carga 0 *versus* deslocamento horizontal calculado seguindo o procedimento referido em 4.4.1.



(a)

(b)

Figura 4.19 – Gráfico força-deslocamento para ciclos positivos e negativos: a) PTS – CCC 1; b) PTS – CCC 5

Da análise das curvas pode referir-se que:

- As curvas exibem um comportamento não linear e idêntico entre si.
- A redução da resistência entre a repetição dos ciclos com a mesma amplitude foi muito reduzida, ou mesmo inexistente, indicando que as paredes não sofreram danos significativos durante o ensaio.
- A redução da rigidez entre ciclos deve-se ao desgaste das ligações dos pregos à madeira. Como o deslocamento horizontal é imposto em ambos os sentidos, os pregos na ligação das tábuas ao frechal inferior estão constantemente a ser pregados e despregados, degradando a ligação e diminuindo a rigidez do conjunto.

- Embora se observe alguma recuperação dos deslocamentos horizontais durante as descargas, vão-se acumulando deslocamentos plásticos.
- Verificou-se um comportamento simétrico da curva nos dois sentidos do movimento.

Nas Tabela 4.6 e Tabela 4.7 apresentam-se, para ambos os ensaios, os valores da rigidez horizontal tangente em conformidade com a numeração da Figura 4.3 e com o procedimento indicado no subcapítulo 4.3.4. Verificou-se que a rigidez no início da descarga (no quadro a azul) diminui com o aumento da amplitude dos ciclos.

Tabela 4.6 – Valores da rigidez horizontal tangente, em kN/m, exibidos pelas paredes de tabique simples durante a aplicação da força no sentido positivo nos ensaios cíclicos

Ensaio	Carga		Descarga					
	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K9
PTS – CCC 1	240	53	920	622	608	603	567	61
PTS – CCC 5	239	54	738	517	485	466	430	66

Tabela 4.7 – Valores da rigidez horizontal tangente, em kN/m, exibidos pelas paredes de tabique simples durante a aplicação da força no sentido negativo nos ensaios cíclicos

Ensaio	Carga		Descarga					
	K10	K11	K12	K13	K14	K15	K16	K17
PTS – CCC 1	255	41	702	687	683	679	420	53
PTS – CCC 5	261	53	763	502	486	480	453	61

#### 4.5.2. ANÁLISE DA ROTAÇÃO DO FRECHAL SUPERIOR DA PAREDE

A Figura 4.20 ilustra a rotação do frechal superior em relação aos eixos xx e yy em função do deslocamento horizontal imposto durante o ensaio cíclico. O referencial e sentidos utilizados são os indicados na Figura 4.6.

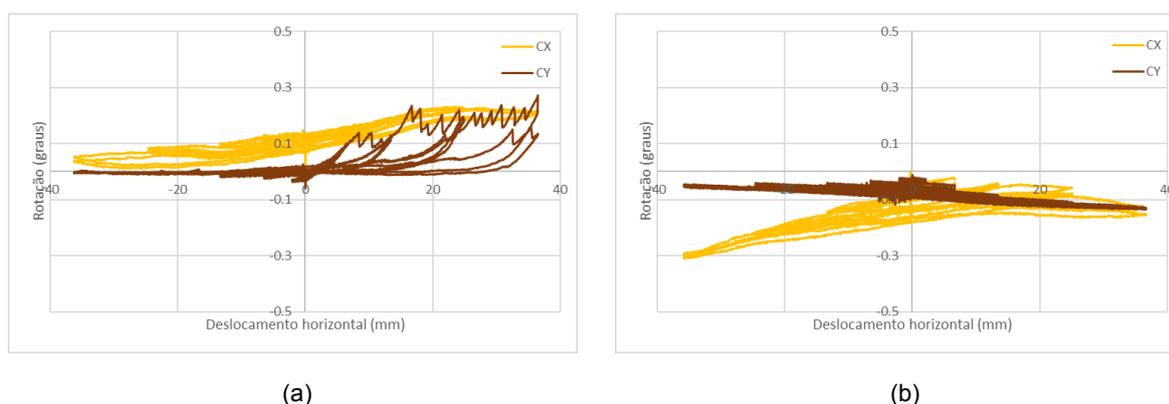


Figura 4.20 – Rotação do frechal medida pelo clinómetro: a) PTS – CCC 1; b) PTS – CCC 5

A rotação é irregular e de poucos graus. No ensaio da parede 1, as rotações em torno dos eixos xx e yy foram ambas no sentido positivo; no ensaio da parede 5, ambas no sentido negativo. Estas rotações são

muito pequenas e consideradas desprezáveis, podendo concluir-se que no comportamento global da parede de tabique simples o frechal superior não apresenta rotações significativas.

#### 4.5.3. ANÁLISE DOS DESLOCAMENTOS NO PLANO DA PAREDE

Na Figura 4.21 apresentam-se os deslocamentos das diagonais do plano da parede. Uma vez mais estes gráficos são importantes para a interpretação do comportamento da parede de tabique simples.

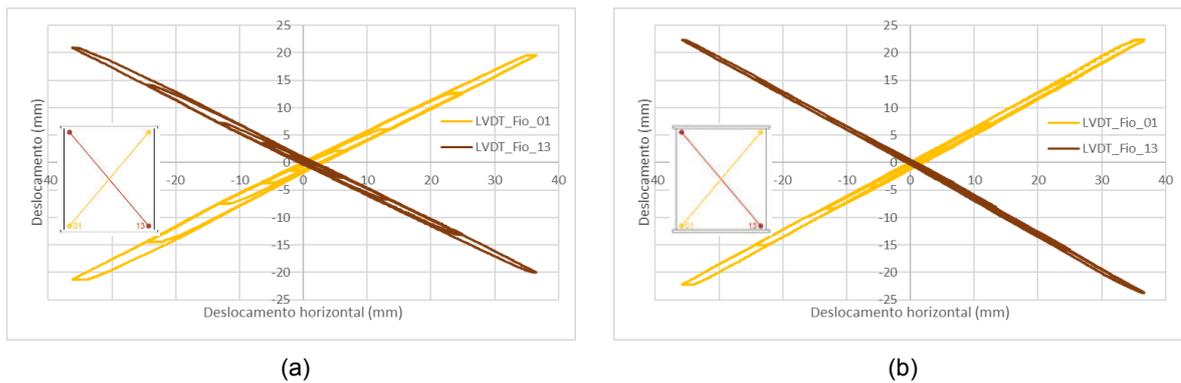


Figura 4.21 – Deslocamentos das diagonais no plano da parede: a) PTS – CCC 1; b) PTS – CCC 5

Os gráficos nos dois ensaios são idênticos: registam deslocamentos máximos da ordem dos 20mm, e distinguem claramente que quando o deslocamento é aplicado no sentido positivo (da esquerda para a direita), o deslocamento medido pelo LVDT 01 aumenta linearmente e o medido pelo LVDT 13 diminui linearmente e na mesma proporção, invertendo-se os sinais quando o deslocamento imposto troca de sentido.

Na Figura 4.22 apresenta-se o movimento das tábuas laterais da parede em relação à base de madeira.

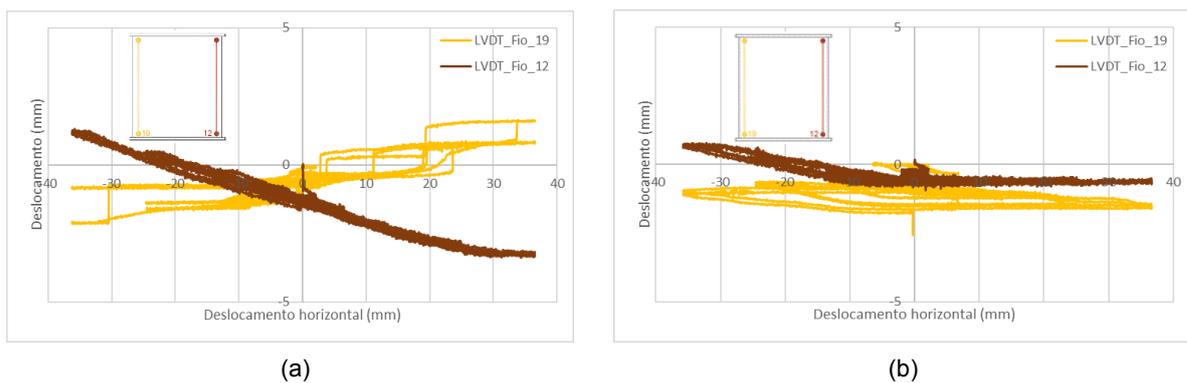


Figura 4.22 – Deslocamentos verticais no plano da parede: a) PTS – CCC 1; b) PTS – CCC 5

No ensaio da parede 1, quando a força é aplicada no sentido positivo o deslocamento medido pelo LVDT 19 é positivo e o deslocamento medido pelo LVDT 12 é negativo o que significa que a lateral esquerda da parede (tracionada) aumenta de comprimento e a lateral direita (comprimida) diminui. O inverso acontece quando a força é aplicada no sentido contrário, o LVDT 19 mede deslocamentos negativos e o LVDT 12 deslocamentos positivos. Embora fosse previsível que o mesmo acontecesse no ensaio da

parede 5, quando se aplicou a força no sentido positivo as laterias da parede não alteraram significativamente o seu comprimento medido na vertical

#### 4.5.4. ANÁLISE DO DESLOCAMENTO DA PAREDE NA DIREÇÃO PERPENDICULAR AO SEU PLANO

As evoluções dos perfis transversais das paredes de tabique simples 1 e 5, assim como das posições dos frechais superiores em planta encontram-se representadas nas Figura 4.23 e Figura 4.24, respetivamente. A legenda e fases do carregamento selecionadas para os traçados indicam-se no subcapítulo 4.3.6.

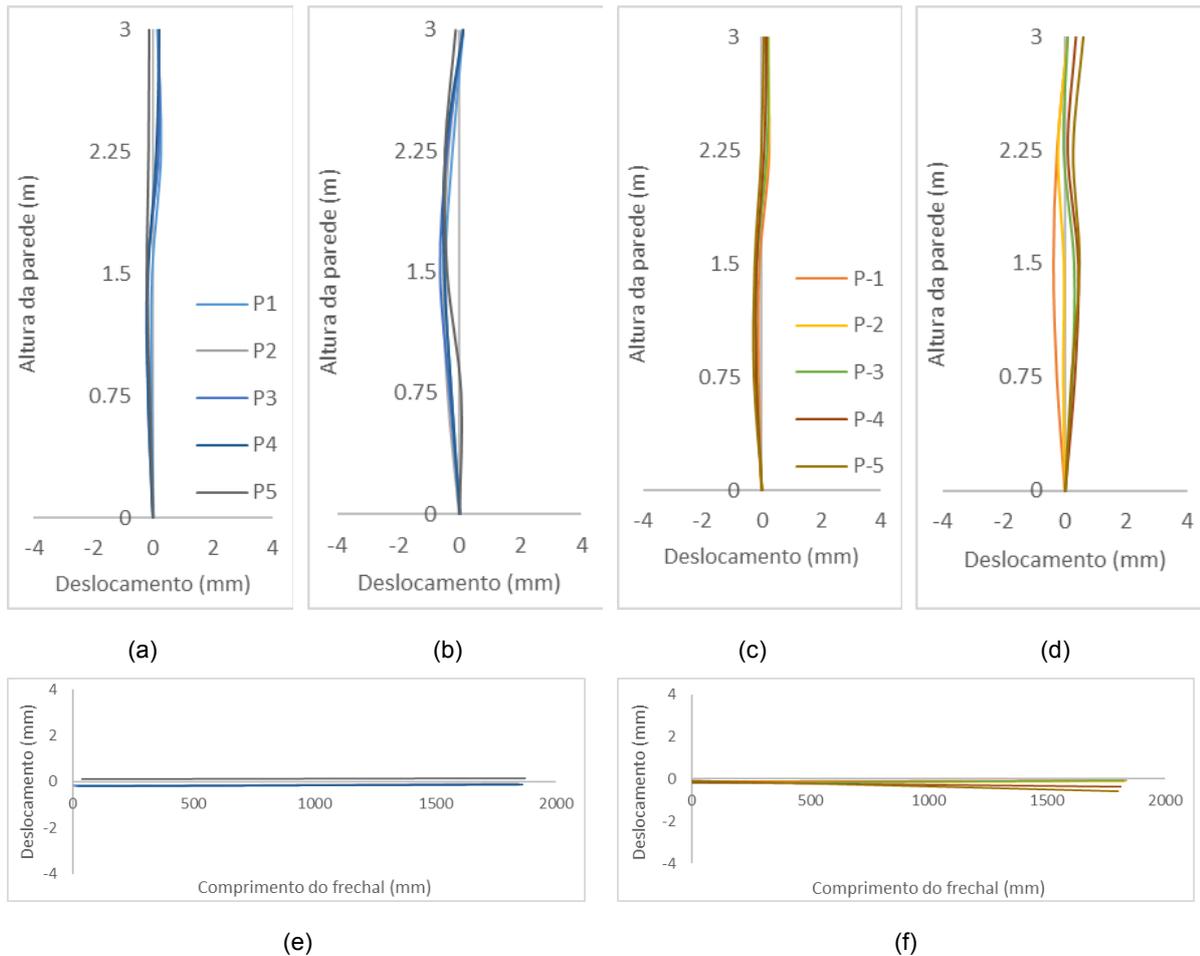


Figura 4.23 – Evolução dos perfis transversais e das posições do frechal superior em planta do ensaio PTS – CCC 1 para o sentido positivo de aplicação da força horizontal (gráficos (a), (b) e (e)) e para o sentido negativo (gráficos (c), (d) e (f)): a) alinhamento 1; b) alinhamento 3; c) alinhamento 1; d) alinhamento 3; e) e f) frechal superior

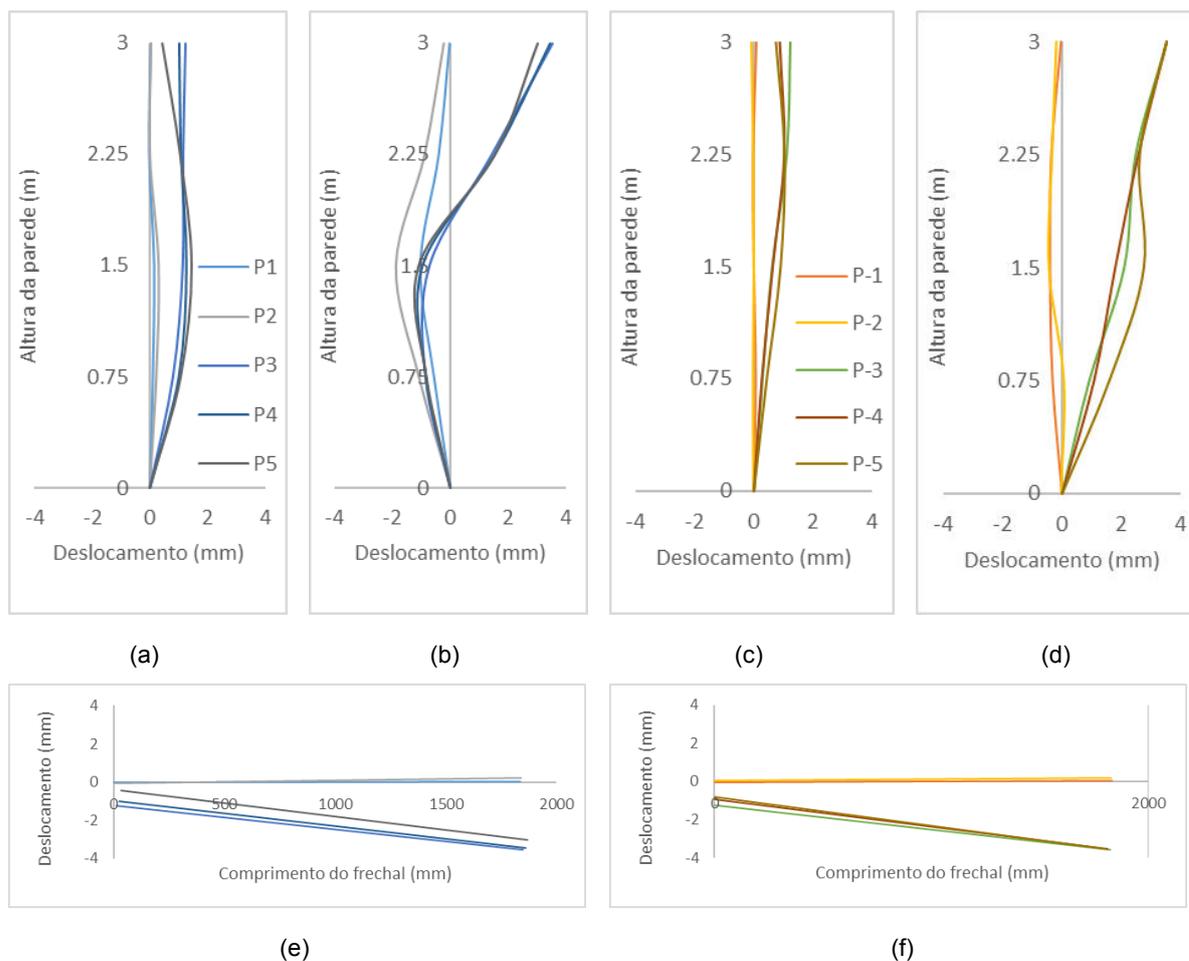
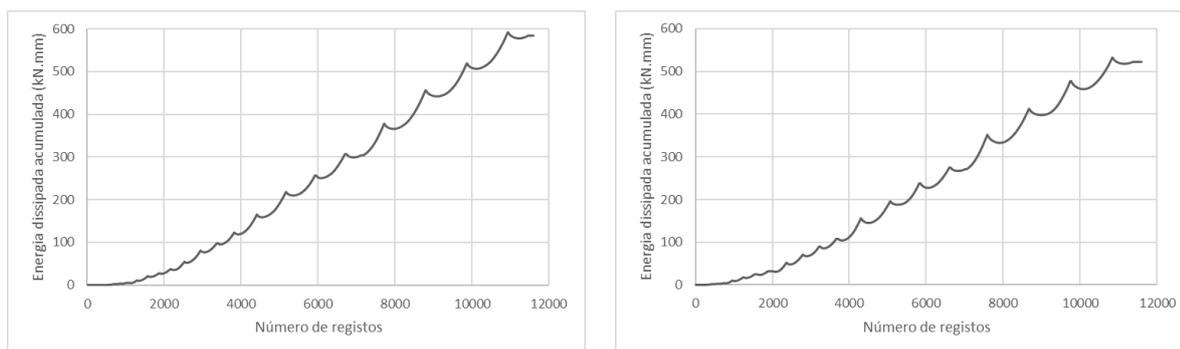


Figura 4.24 – Evolução dos perfis transversais e das posições do frechal superior em planta do ensaio PTS – CCC 5 para o sentido positivo de aplicação da força horizontal (gráficos (a), (b) e (e)) e para o sentido negativo (gráficos (c), (d) e (f)): a) alinhamento 1; b) alinhamento 3; c) alinhamento 1; d) alinhamento 3; e) e f) frechal superior

Os deslocamentos na direção perpendicular são de poucos mm e, portanto, novamente pouco significativos. Também o frechal se movimenta pouco e sofre, no ensaio da parede 5, uma translação e rotação no mesmo sentido para ambos os sentidos de aplicação de  $F_H$ . Não se conseguiu observar uma tendência que relacionasse uma deformada característica para a extremidade comprimida da parede e uma outra para a extremidade tracionada.

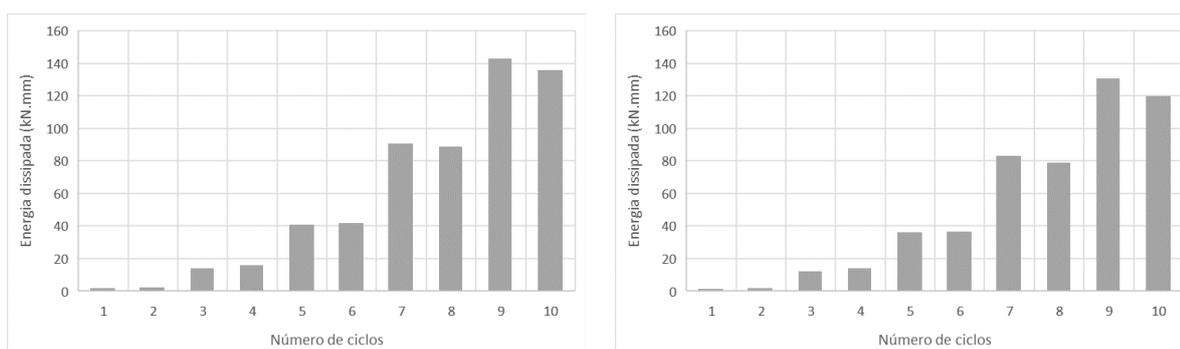
#### 4.5.5. ENERGIA DISSIPADA

Apresenta-se na Figura 4.25 o gráfico da energia dissipada acumulada. O valor máximo da energia dissipada acumulada para o ensaio da parede 1 foi de 592J, e para o ensaio da parede 5 de 532J.



(a) (b)  
 Figura 4.25 – Energia dissipada acumulada: a) PTS – CCC 1; b) PTS – CCC 5

A Figura 4.26 apresenta a energia dissipada por ciclo que é dada pela área da curva força horizontal-deslocamento horizontal de cada ciclo. A energia dissipada aumenta à medida que o número de ciclos e do deslocamento imposto aumentam. O valor médio da energia dissipada foi de 2, 14, 39, 86 e 132J para as amplitudes do deslocamento horizontal de 2,5/7,5/15,0/27,5/40mm, respetivamente.



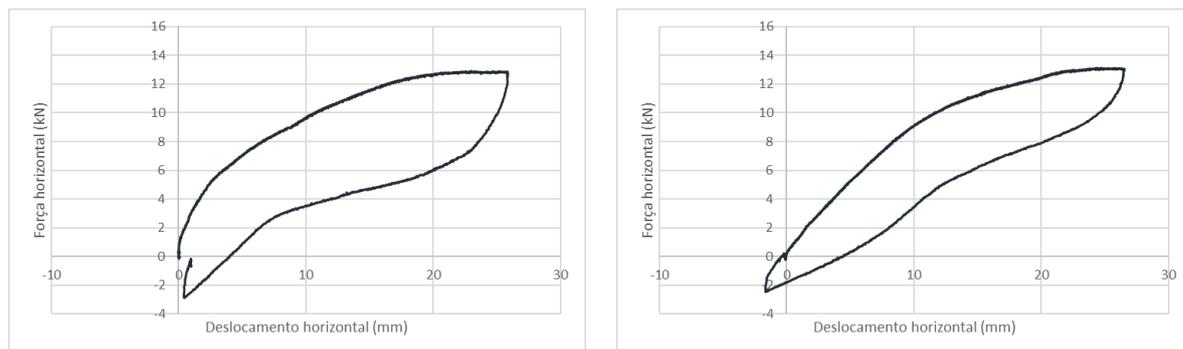
(a) (b)  
 Figura 4.26 – Energia dissipada por ciclo: a) PTS – CCC 1; b) PTS – CCC 5

#### 4.6. ENSAIO PTD – CCM

O ensaio monotónico foi repetido nas paredes de tabique duplo 7 e 8. Nos próximos pontos analisam-se os resultados obtidos nos ensaios PTD – CCM 7 e PTD – CCM 8.

##### 4.6.1. ANÁLISE DA CURVA DE RESPOSTA GLOBAL FORÇA HORIZONTAL VS DESLOCAMENTO HORIZONTAL

Na Figura 4.27 representam-se as curvas de comportamento global, força horizontal aplicada no topo da parede *versus* deslocamento horizontal verificado no topo da parede. Os resultados da análise estão indicados na Tabela 4.8.



(a)

(b)

Figura 4.27 – Gráfico força horizontal-deslocamento horizontal: a) PTD – CCM 7; b) PTD – CCM 8

Tabela 4.8 – Parâmetros das curvas força horizontal-deslocamento horizontal

Ensaio	$F_{H, \text{máx}}$ (kN)	$d_{H, \text{máx}}$ (mm)	$d_{H, \text{residual}}$ (mm)
PTD – CCM 7	12,91	25,9	4,0
PTD – CCM 8	13,15	26,6	4,5

Da análise dos diagramas pode referir-se que:

- As paredes exibem uma resposta não linear.
- Embora se observe algum deslocamento plástico, a maior parte dos deslocamentos são recuperados durante a descarga.

Na Tabela 4.9 apresentam-se os valores da rigidez horizontal tangente calculados segundo a metodologia descrita em 4.3.4 e a numeração da Figura 4.3. Verifica-se que nas paredes de tabique duplo, assim como nas paredes de tabique simples, a rigidez horizontal diminui à medida que a grandeza do deslocamento horizontal aumenta.

Tabela 4.9 – Valores da rigidez horizontal tangente, em kN/m, exibidos pelas paredes de tabique duplo nos ensaios monotónicos

Ensaio	Carga			Descarga		
	K18	K19	K20	K25	K26	K27
PTD – CCM 7	1657	441	38	1880	308	839
PTD – CCM 8	965	253	32	1600	404	604

#### 4.6.2. ANÁLISE DA ROTAÇÃO DO FRECHAL SUPERIOR DA PAREDE

Apresenta-se na Figura 4.28 a rotação do frechal em relação aos eixos xx e yy, de acordo com o referencial e sentidos positivos representados na Figura 4.6.

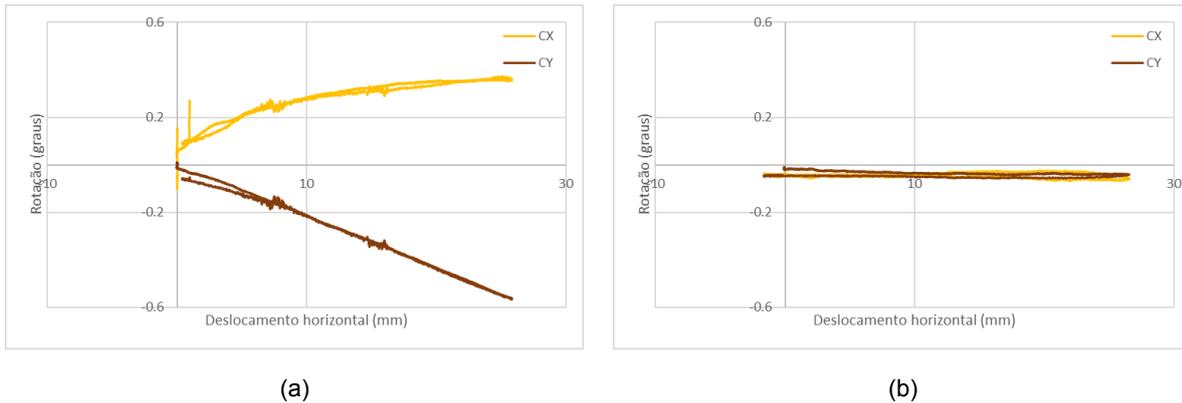


Figura 4.28 – Rotação do frechal superior medida pelo clinómetro: a) PTD – CCM 7; b) PTD – CCM 8

No ensaio da parede 7 o frechal rodou  $0,37^{\circ}$  no sentido positivo de rotação em torno do eixo xx e  $-0,57^{\circ}$  no sentido negativo de rotação em torno do eixo yy. No ensaio da parede 8 as rotações foram mais reduzidas, de  $-0,07^{\circ}$  e  $-0,06^{\circ}$  em torno dos eixos xx e yy, respetivamente.

#### 4.6.3. ANÁLISE DOS DESLOCAMENTOS NO PLANO DA PAREDE

Na Figura 4.29 estão representados os deslocamentos das diagonais da parede.

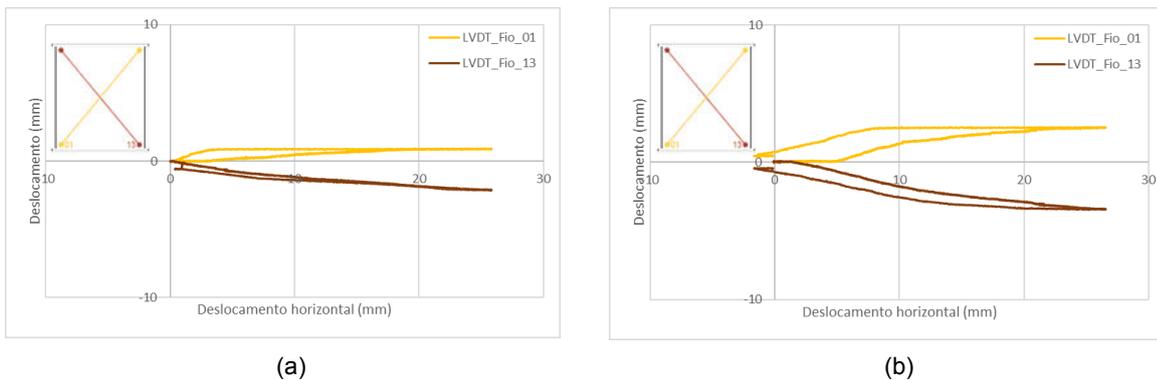


Figura 4.29 - Deslocamentos das diagonais no plano da parede: a) PTD – CCM 7; b) PTD – CCM 8

O deslocamento horizontal imposto da esquerda para a direita provocou novamente o aumento de comprimento do fio do LVDT 01 e a diminuição de comprimento do fio do LVDT 13. No ensaio da parede 7, o aumento e diminuição de comprimento máximos foi de 0,9mm e -2,2mm, respetivamente. No ensaio da parede 8 foi de 2,6mm e de -3,5mm.

Na Figura 4.30 estão representados os deslocamentos verticais no plano da parede medindo-se os aumentos ou diminuições dos deslocamentos das laterais extremas das paredes em relação à base de madeira/frechal inferior.

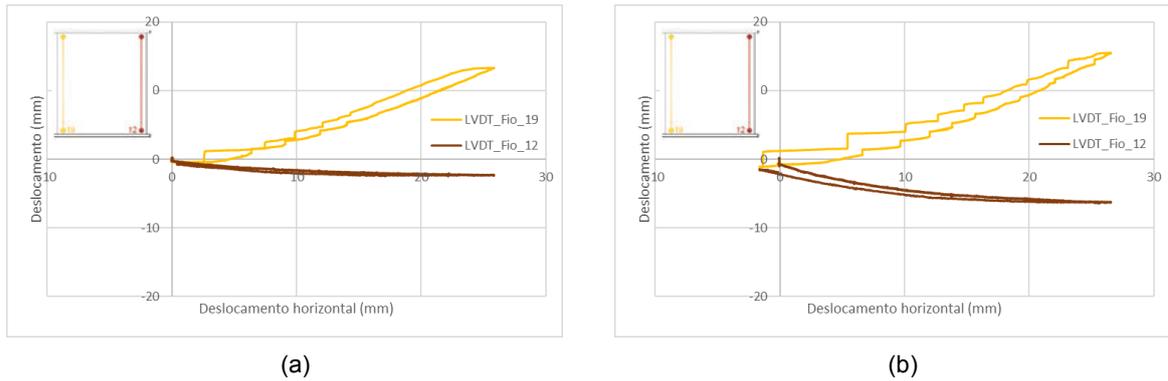


Figura 4.30 - Deslocamentos verticais no plano da parede: a) PTD – CCM 7; b) PTD – CCM 8

Em ambos os ensaios registou-se que o comprimento do fio do LVDT 19 aumentou (o deslocamento medido foi positivo) e que o comprimento do fio do LVDT 12 diminuiu (o deslocamento do fio foi negativo) o que significa que as tábuas do lado esquerdo da parede levantaram e/ou aumentaram de comprimento e que as tábuas do lado esquerdo assentaram e/ou diminuíram de comprimento. Os valores máximos dos movimentos medidos pelos LVDTs 19 e 12 foram de 13,3mm e de -2,5mm no primeiro ensaio e de 15,5mm e de -6,4mm no segundo.

#### 4.6.4. ANÁLISE DO DESLOCAMENTO DA PAREDE NA DIREÇÃO PERPENDICULAR AO SEU PLANO

A Figura 4.31 apresenta os perfis transversais da parede durante a aplicação na carga máxima.

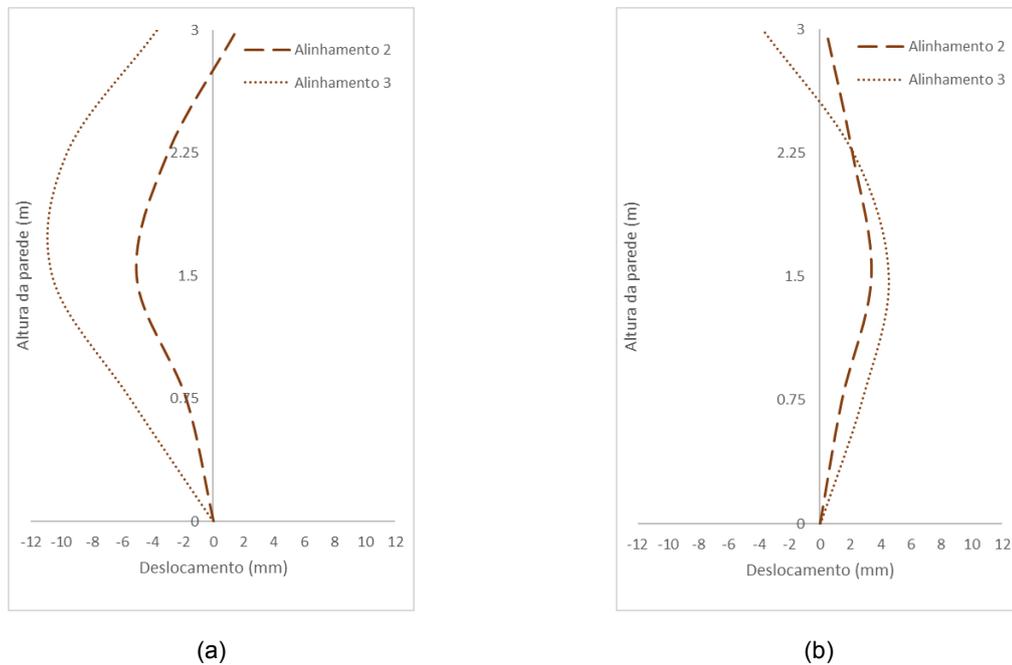


Figura 4.31 – Perfil transversal da parede no instante de aplicação da carga máxima: a) PTD – CCM 7; b) PTD – CCM 8

A parede faz uma “barriga” nos dois alinhamentos em ambos os ensaios, mais acentuada do lado comprimido da parede e que vai desvanecendo à medida que avança para o lado tracionado. O

deslocamento máximo para fora do plano medido no primeiro ensaio foi de 10,6mm no alinhamento 3 à cota de 1,5m (corresponde à meia altura da parede) e no segundo ensaio foi de -4,5mm no alinhamento 3, igualmente à cota de 1,5m.

A Figura 4.32 apresenta a posição do frechal em planta para o mesmo instante em que se desenharam os perfis transversais. No ensaio da parede 7, o frechal sofreu uma translação máxima de -1,5mm e rodou no sentido positivo  $0,34^\circ$ . No ensaio da parede 8 a translação máxima foi de -0,4mm acompanhada de uma rotação máxima que foi de  $0,29^\circ$  e no mesmo sentido do ensaio anterior.

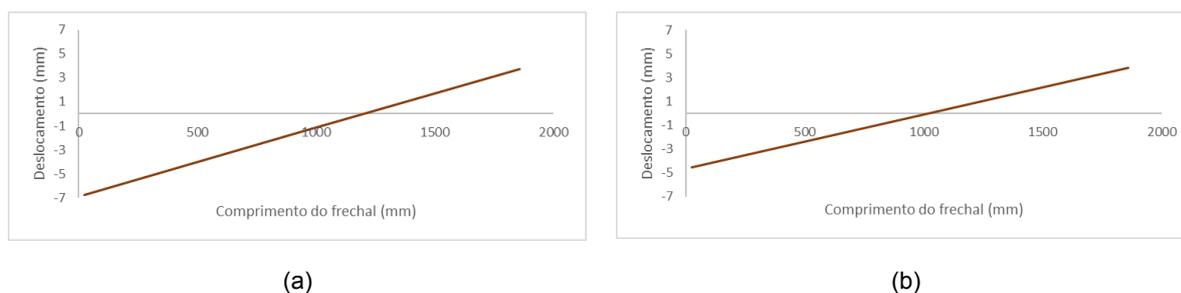


Figura 4.32 – Posição do frechal superior no instante de aplicação da carga máxima: a) PTD – CCM 7; b) PTD – CCM 8

Depois de observar a deformação do perfil transversal da parede para o instante de carga máxima, surgiu a necessidade de investigar mais a fundo a ocorrência, ou não, de fenômenos de instabilidade por encurvadura. Para isso, traçaram-se as curvas dos três deslocamentos do pano de parede na direção perpendicular ao seu plano relativos ao alinhamento comprimido (alinhamento 3), em função da força horizontal aplicada, e que se representam na Figura 4.33.

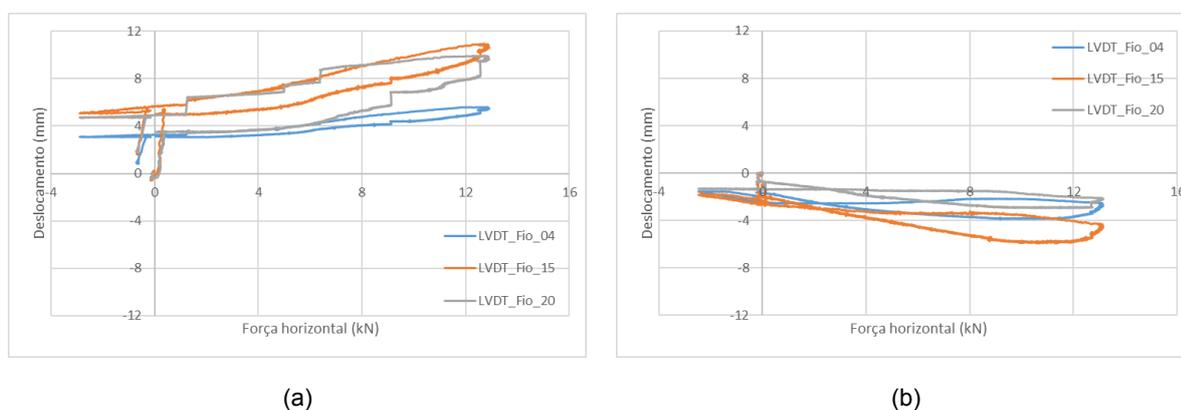
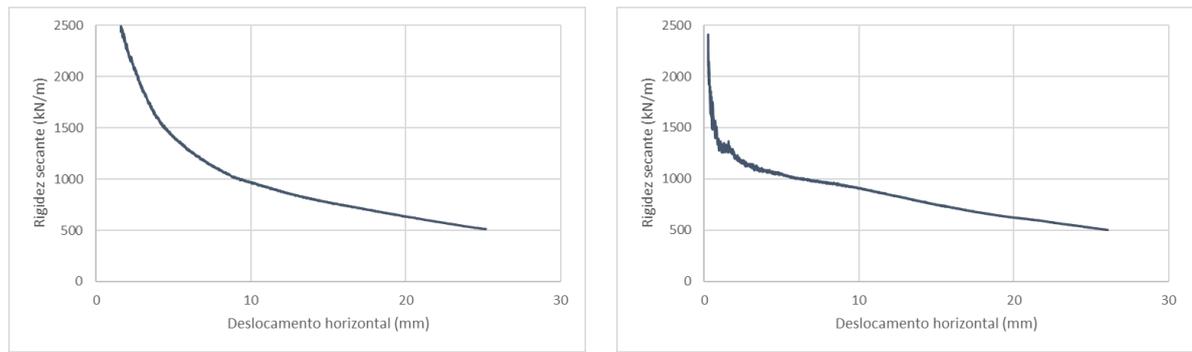


Figura 4.33 – Deslocamentos do alinhamento mais comprimido da parede na direção perpendicular ao seu plano: a) PTD – CCM 7; b) PTD – CCM 8

Para os ensaios monotônicos nas paredes de tabique duplo, e para valores próximos da força horizontal máxima aplicada, não se verificaram aumentos acentuados dos deslocamentos na direção perpendicular ao plano da parede, indiciando não terem ocorrido fenômenos de encurvadura.

#### 4.6.5. DEGRADAÇÃO DA RIGIDEZ SECANTE

Seguindo o mesmo procedimento da tipologia de parede anterior, na Figura 4.34 representa-se a evolução da degradação da rigidez com a imposição do deslocamento horizontal, observando-se para as paredes de tabique duplo uma tendência exponencial decrescente semelhante à obtida nas paredes de tabique simples, embora agora para valores de rigidez significativamente maiores.



(a)

(b)

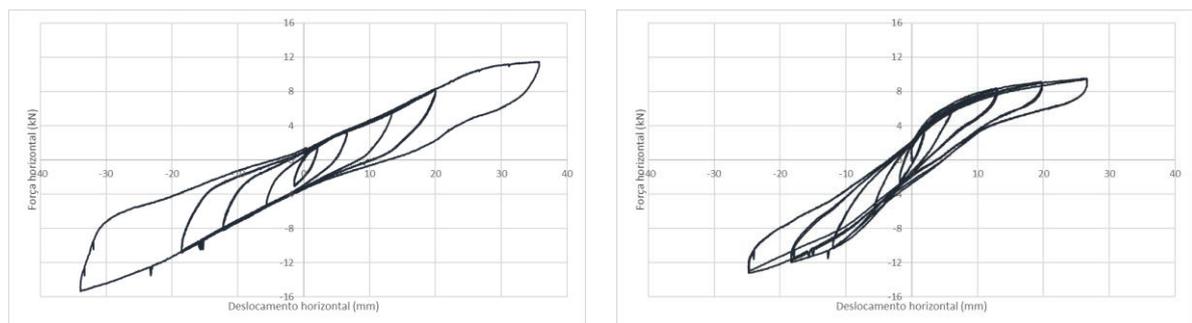
Figura 4.34 – Evolução da rigidez horizontal secante: a) PTD – CCM 7; b) PTD – CCM 8

#### 4.7. ENSAIO PTD – CCC

O ensaio cíclico foi repetido nas paredes de tabique duplo 3 e 4. Nos próximos pontos analisam-se os resultados obtidos nos ensaios PTD – CCC 3 e PTD – CCC 4.

##### 4.7.1. ANÁLISE DA CURVA DE RESPOSTA GLOBAL FORÇA HORIZONTAL VS DESLOCAMENTO HORIZONTAL

Na Figura 4.35 representam-se as curvas de comportamento global, força horizontal aplicada no topo da parede versus deslocamento horizontal verificado no topo da parede.



(a)

(b)

Figura 4.35 – Força-deslocamento para ciclos positivos e negativos: a) PTD – CCC 3; b) PTD – CCC 4

Da análise das curvas pode concluir-se que:

- Ambas as paredes apresentam um comportamento não linear.
- Verificou-se um comportamento quase simétrico da curva nos dois sentidos do movimento com um aumento pouco expressivo da força horizontal máxima nos ciclos negativos.

- As paredes de tabique duplo 3 e 4 exibiram diferentes respostas quando sujeitas ao mesmo tipo de carregamento.
- A redução de resistência entre a repetição dos ciclos com a mesma amplitude foi muito reduzida ou mesmo inexistente.
- A redução da rigidez entre ciclos, mais visível no ensaio da parede 4, deve-se igualmente ao desgaste das ligações dos pregos à madeira.
- Grande parte dos deslocamentos horizontais impostos foram recuperados durante a descarga, resultando em deslocamentos plásticos reduzidos.

Apresentam-se nas Tabela 4.10 e Tabela 4.11 os valores da rigidez horizontal tangente calculados segundo a metodologia descrita em 4.3.4 e a numeração da Figura 4.3, consoante o sentido da ação horizontal aplicada. Da análise dos valores obtidos, verificou-se que, durante a carga, a rigidez horizontal diminui à medida que a grandeza do deslocamento horizontal aumenta. Observou-se também que a rigidez no início da descarga (no quadro a azul) diminui com o aumento da amplitude dos ciclos.

Tabela 4.10 - Valores da rigidez horizontal tangente, em kN/m, exibidos pelas paredes de tabique duplo durante a aplicação da carga no sentido positivo nos ensaios cíclicos

Ensaio	Carga					Descarga				
	K18	K19	K20	K21	K22	K23	K24	K25	K26	K27
PTD – CCC 3	772	360	68	3081	2369	1778	1591	1541	318	320
PTD – CCC 4	1445	192	78	3135	1422	1094	1033	956	295	586

Tabela 4.11 - Valores da rigidez horizontal tangente, em kN/m, exibidos pelas paredes de tabique duplo durante a aplicação da carga no sentido negativo nos ensaios cíclicos

Ensaio	Carga					Descarga				
	K28	K29	K30	K31	K32	K33	K34	K35	K36	K37
PTD – CCC 3	965	385	225	2797	2323	2201	2060	1832	253	270
PTS – CCC 4	1147	329	177	2652	1829	1590	1480	1372	457	542

#### 4.7.2. ANÁLISE DA ROTAÇÃO DO FRECHAL SUPERIOR DA PAREDE

Representa-se nos gráficos da Figura 4.36 a rotação em relação ao eixo xx e yy da Figura 4.6.

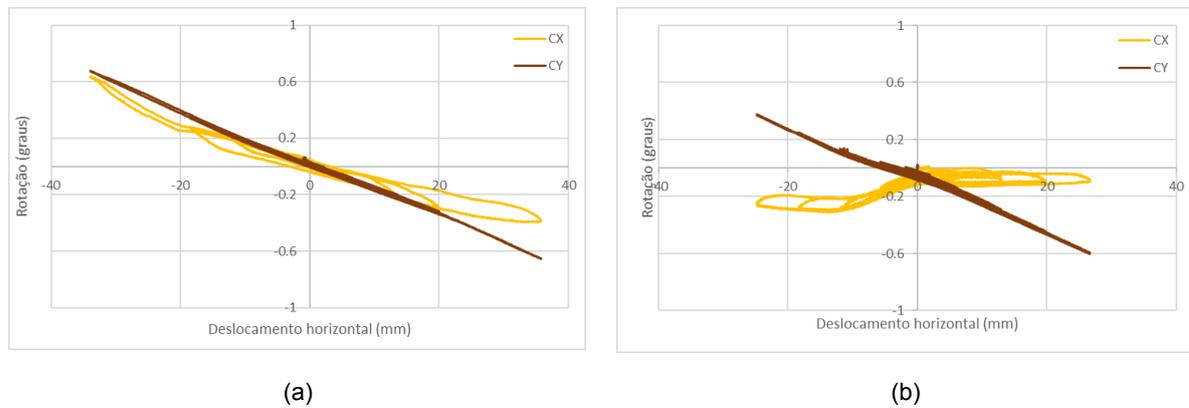


Figura 4.36 – Rotação do frechal superior medida pelo clinómetro: a) PTD – CCC 3; b) PTD – CCC 4

A rotação em relação ao eixo yy aumentou de forma aproximadamente linear com o aumento do deslocamento horizontal imposto. Quando se aplica a carga no sentido positivo a rotação máxima em relação ao eixo yy é de  $-0,65^{\circ}$  na parede 3 e de  $-0,60^{\circ}$  na parede 4. Quando a carga é aplicada no sentido contrário, a rotação máxima em relação ao eixo yy é de  $0,68^{\circ}$  na parede 3 e de  $0,38^{\circ}$  na parede 4. A rotação em relação ao eixo xx tem um comportamento mais irregular. Os valores máximos de rotação são de  $-0,39^{\circ}$  na parede 3 e de  $-0,08^{\circ}$  na parede 4 para a força aplicada no sentido positivo e de  $0,64^{\circ}$  na parede 3 e de  $-0,51^{\circ}$  na parede 4 para a força aplicada no sentido negativo.

#### 4.7.3. ANÁLISE DOS DESLOCAMENTOS NO PLANO DA PAREDE

A Figura 4.37 ilustra os deslocamentos das diagonais da parede.

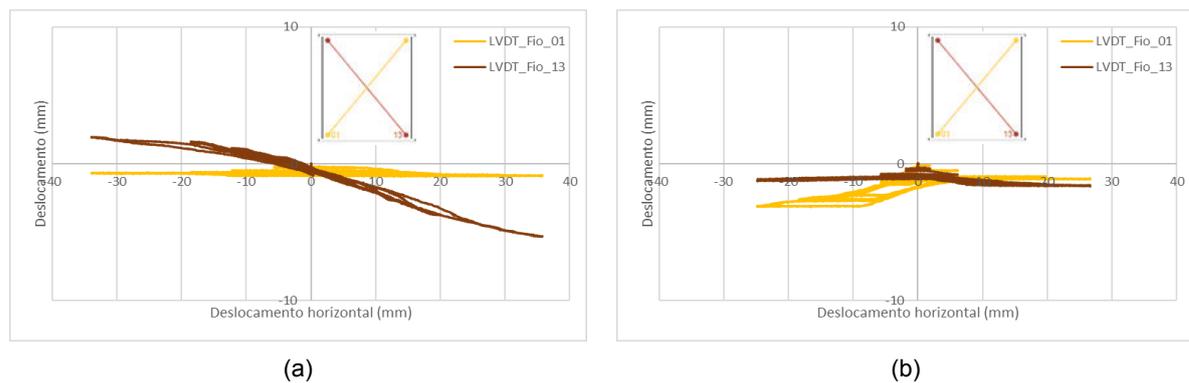


Figura 4.37 – Deslocamentos das diagonais no plano da parede: a) PTD – CCC 3; b) PTD – CCC 4

No ensaio da parede 3, o LVDT 1 mediu deslocamentos negativos para ambos os sentidos de aplicação da força, que não atingiram 1mm e o LVDT 13 mediu um deslocamento máximo negativo de  $-5,3\text{mm}$  quando se aplica a força no sentido positivo e positivo de  $2,0\text{mm}$  quando se aplica a força no sentido negativo. No ensaio da parede 4, registaram-se deslocamentos das diagonais negativos ao longo de todo o ensaio. O valor máximo de encurtamento do fio do LVDT 01 foi de  $-3,2\text{mm}$  e do fio do LVDT 13 foi

de -1,7mm. Nestes ensaios não foi clara a relação entre o sentido da aplicação da força e da deformação das diagonais.

A Figura 4.38 ilustra os deslocamentos verticais da parede em relação à base de madeira.

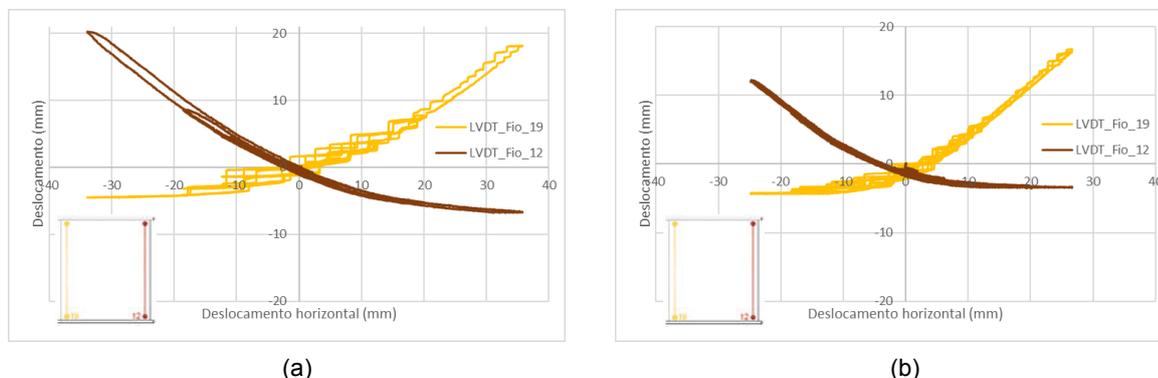


Figura 4.38 – Deslocamentos verticais no plano da parede: a) PTD – CCC 3; b) PTD – CCC 4

Da análise das curvas, conclui-se que o comportamento das duas paredes é similar. Para a aplicação da força no sentido positivo, o deslocamento máximo registado pelo LVDT 19 é de 18,2mm na parede 3 e de 16,7mm na parede 4, e pelo LVDT 12 é de -6,8mm na parede 3 e de -3,6 na parede 4. Para a aplicação da força no sentido negativo, o aumento máximo registado pelo LVDT 12 é de 20,3mm na parede 3 e de 12,3mm na parede 4 e a diminuição máxima registado pelo LVDT 19 é de -4,6mm na parede 3 e de -4,4mm na parede 4. Note-se que o valor dos deslocamentos da parte tracionada da parede é sempre superior ao valor dos deslocamentos da parte comprimida da parede. Este resultado está associado à abertura da ligação pregada entre as tábuas e o frechal inferior e que foi claramente visível durante o ensaio.

#### 4.7.4. ANÁLISE DO DESLOCAMENTO DA PAREDE NA DIREÇÃO PERPENDICULAR AO SEU PLANO

Nas Figura 4.39 e Figura 4.40 encontram-se representados os perfis transversais e as posições do frechal em planta para o ensaio das paredes 3 e 4, respetivamente. A nomenclatura utilizada nas legendas e a identificação das fases do carregamento seleccionadas para o desenho dos perfis e das posições do frechal indicam-se em 4.3.6.

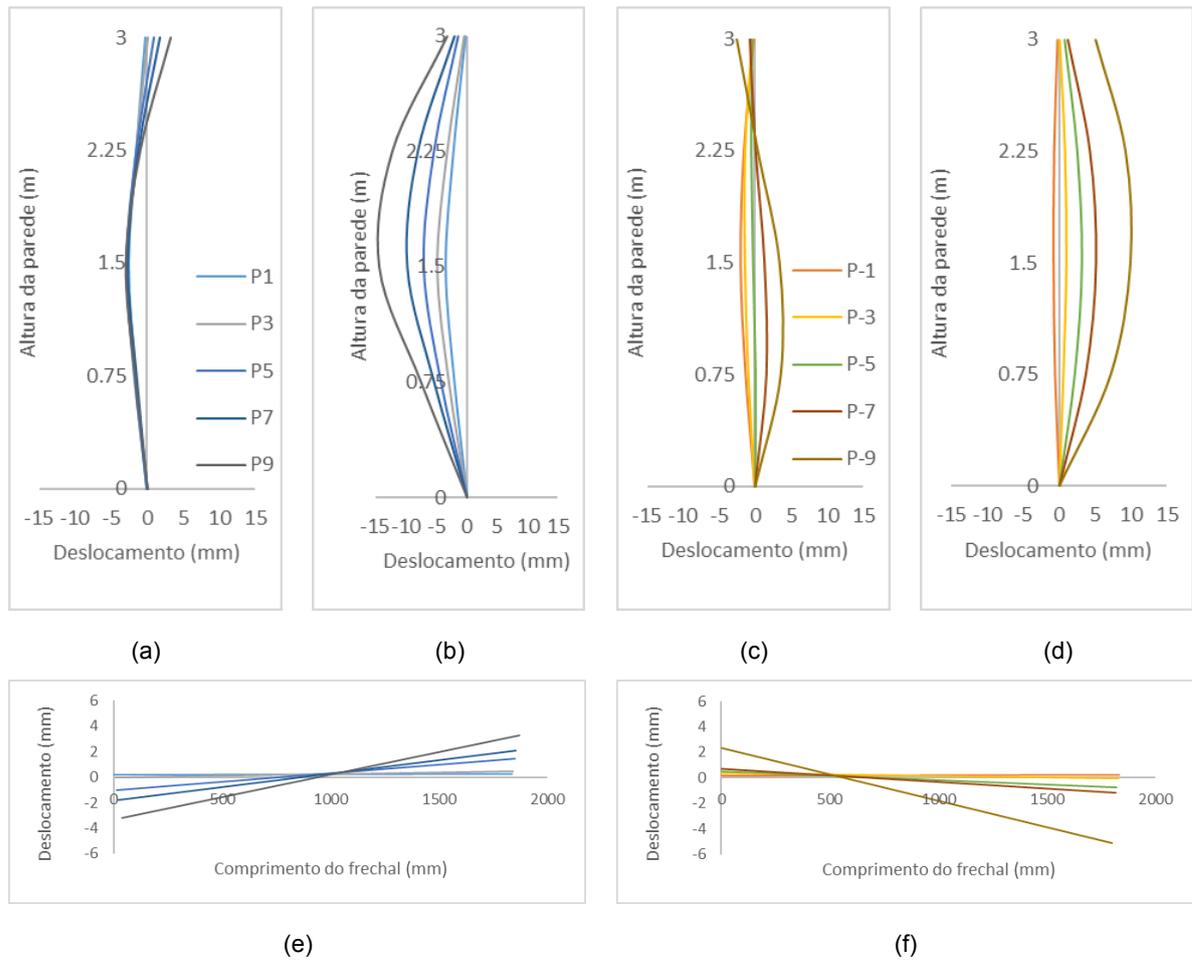


Figura 4.39 – Evolução dos perfis transversais e das posições do frechal superior em planta do ensaio PTD – CCC 3 para o sentido positivo de aplicação da força horizontal (gráficos (a), (b) e (e)) e para o sentido negativo (gráficos (c), (d) e (f)): a) alinhamento 1; b) alinhamento 3; c) alinhamento 1; d) alinhamento 3; e) e f) frechal superior

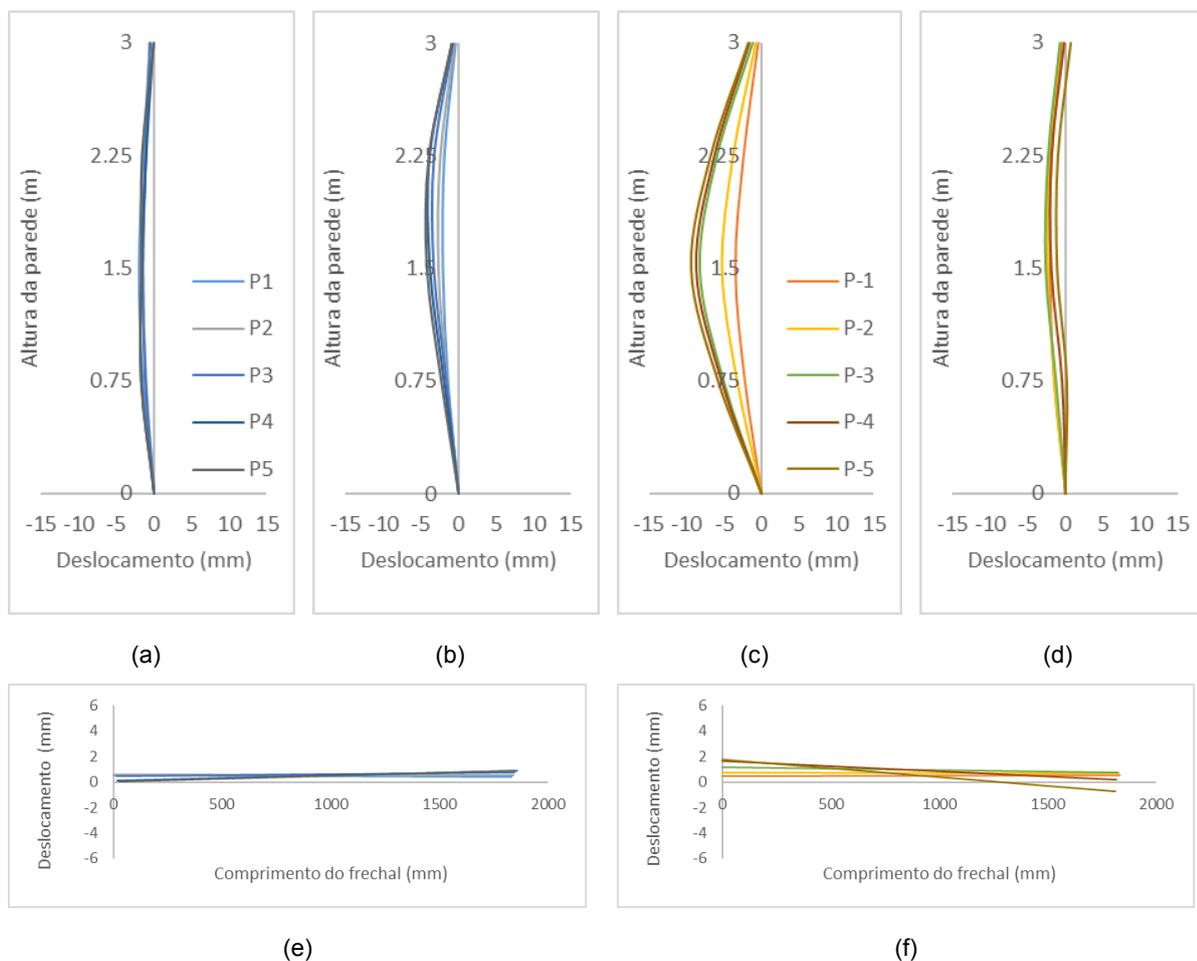
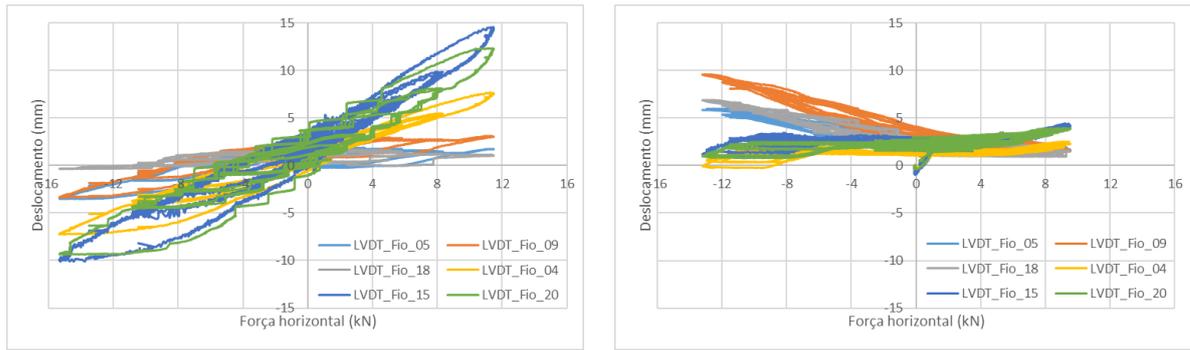


Figura 4.40 - Evolução dos perfis transversais e das posições do frechal superior em planta do ensaio PTD – CCC 4 para o sentido positivo de aplicação da força horizontal (gráficos (a), (b) e (e)) e para o sentido negativo (gráficos (c), (d) e (f)): a) alinhamento 1; b) alinhamento 3; c) alinhamento 1; d) alinhamento 3; e) e f) frechal superior

Quando se aplicou  $F_H$  no sentido positivo da força, em ambos os ensaios o frechal rodou no sentido positivo em relação ao eixo  $zz$ , de acordo com o referencial e sentidos representados na Figura 4.6; quando se aplicou  $F_H$  no sentido negativo da força, o frechal superior rodou no sentido negativo em relação ao eixo  $zz$ .

A parede fez uma “barriga” que evoluiu de forma crescente à medida que aumentou a grandeza de  $F_H$ . A “barriga” é muito mais acentuada num dos alinhamentos do que no outro, naturalmente mais acentuada onde se encontram maiores tensões de compressão para cada sentido de aplicação da força horizontal. O máximo deslocamento atingido na direção perpendicular ao plano foi de 14mm na parede 3 e de 9mm na parede 4.

Nas paredes de tabique duplo e tal como foi feito nos ensaios monotónicos, também nos ensaios cíclicos se traçaram os gráficos dos deslocamentos do pano de parede na direção perpendicular ao seu plano em função da força horizontal aplicada, e que se apresentam na Figura 4.41 para averiguar a ocorrência de fenómenos de instabilidade.



(a)

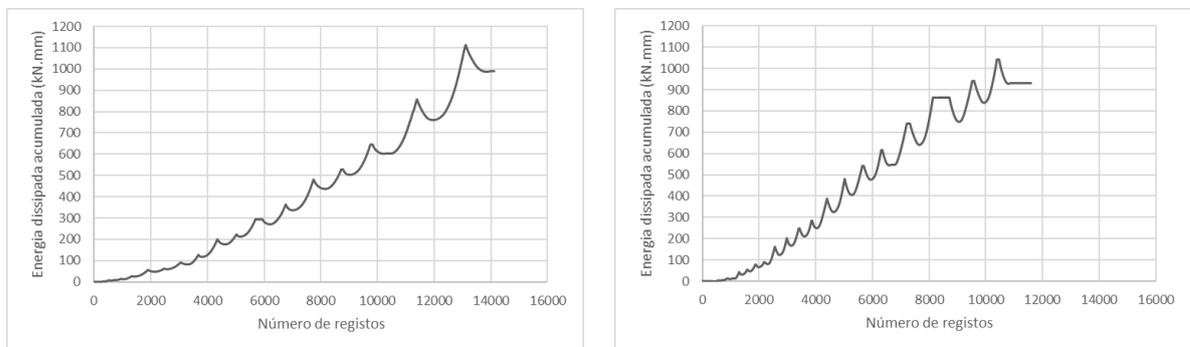
(b)

Figura 4.41 – Deslocamentos dos alinhamentos extremos da parede na direção perpendicular ao seu plano: a) PTD – CCC 3; b) PTD – CCC 4

Também aqui não se notaram sinais evidentes de ocorrência de fenómenos de encurvadura, ou seja não se observa um crescimento exponencial dos deslocamentos quando nos aproximamos da carga horizontal máxima aplicada.

#### 4.7.5. ENERGIA DISSIPADA

Foram traçados os diagramas da evolução da energia dissipada acumulada que se representam na Figura 4.42, e que atingiu os valores de 1112J no ensaio da parede 3 e de 1043J no ensaio da parede 4.

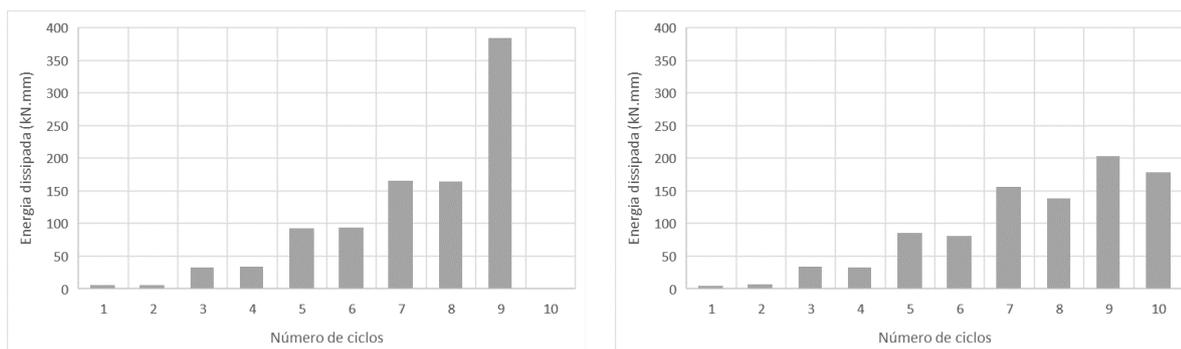


(a)

(b)

Figura 4.42 – Energia dissipada acumulada: a) PTD – CCC 3; b) PTD – CCC 4

Na Figura 4.43 apresenta-se a energia dissipada em cada um dos ciclos e que foi próxima nos dois ensaios, com exceção dos últimos dois ciclos: no ensaio da parede 3 não se realizou o décimo ciclo, e no nono ciclo foi ultrapassado o deslocamento de referência para este ciclo. O valor médio da energia dissipada foi de 6, 34, 89 e 157J para as amplitudes do deslocamento horizontal de 2,5/7,5/15,0/22,5mm, respetivamente.



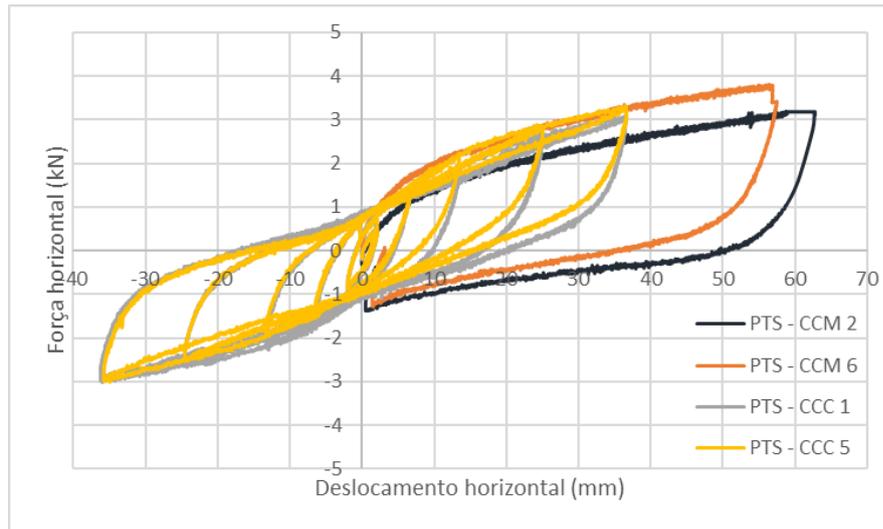
(a) (b)  
Figura 4.43 – Energia dissipada por ciclo: a) PTD – CCC 3; b) PTD – CCC 4

#### 4.8. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

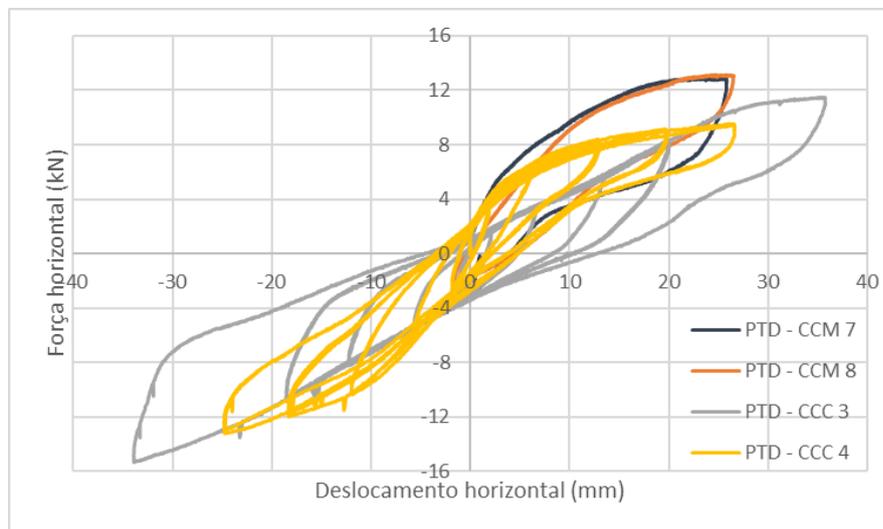
Nesta secção pretende-se tirar conclusões sobre o comportamento das paredes de tabique simples e duplo tendo por base os resultados e a análise apresentada anteriormente.

##### 4.8.1. ANÁLISE COMPARATIVA DAS CURVAS FORÇA HORIZONTAL-DESLOCAMENTO HORIZONTAL

Nas Figura 4.44a e Figura 4.44b encontram-se representadas as curvas força horizontal-deslocamento horizontal dos ensaios cíclicos e monotónicos sobrepostas, para as paredes de tabique simples e duplo, respetivamente.



(a)



(b)

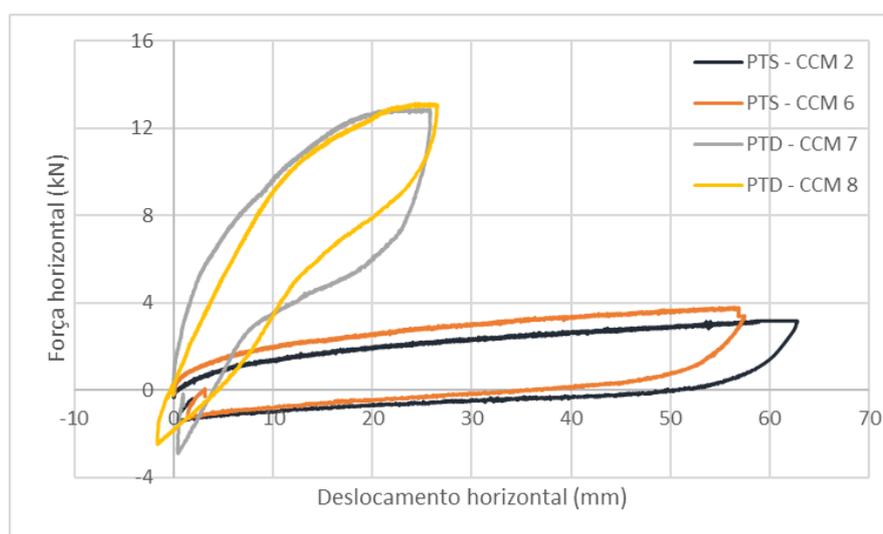
Figura 4.44 – Comparação entre as curvas força-deslocamento: a) paredes de tabique simples; b) paredes de tabique duplo

As principais conclusões extraídas desta análise foram as seguintes:

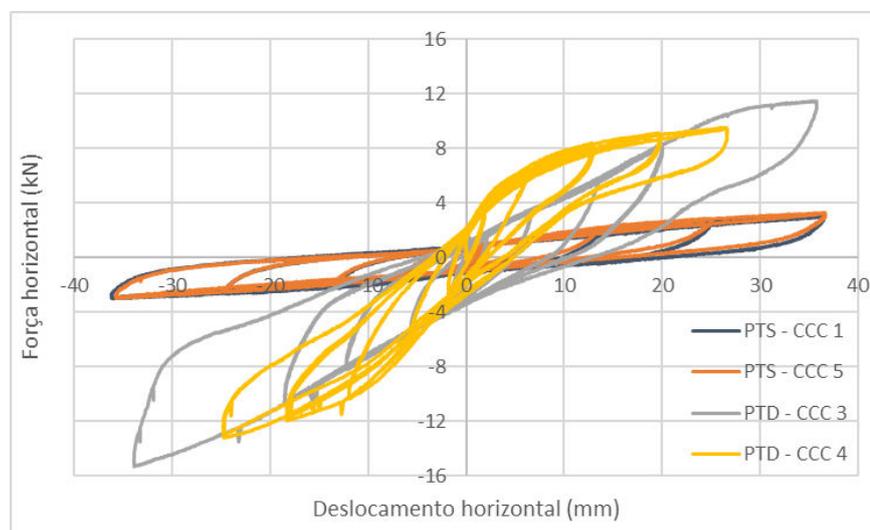
- A forma dos diagramas das paredes de tabique simples é bastante próxima entre si, embora com algumas diferenças ao nível da rigidez, o que revela que a capacidade resistente e o comportamento entre os diferentes elementos que compõem esta tipologia de parede não variam muito;
- Nas paredes de tabique duplo, observou-se alguma heterogeneidade entre a forma das curvas das paredes. Verificou-se também um certo distanciamento entre as curvas dos ensaios monotônicos e as curvas dos ensaios cíclicos. Com efeito, quando se aplicou a força no sentido positivo, as paredes de tabique duplo que foram ensaiadas com carga monotónica exibiram uma capacidade resistente maior do que as paredes de tabique duplo ensaiadas com carga cíclica, provavelmente devido ao desgaste das ligações pregadas das tábuas ao frechal, resultantes dos

movimentos cíclicos, que diminuiu a capacidade resistente, em particular da parede 4. Contudo, é desejável obterem-se mais resultados para confirmar essa hipótese.

Na Figura 4.45 apresentam-se as mesmas oito curvas força horizontal-deslocamento horizontal, mas agrupadas de forma diferente. Desta vez pretende-se fazer a comparação entre as paredes de tabique simples e duplo, reunindo na Figura 4.45a as curvas dos ensaios monotónicos e na Figura 4.45b as curvas dos ensaios cíclicos.



(a)



(b)

Figura 4.45 – Comparação entre as curvas força-deslocamento: a) ensaios monotónicos; b) ensaios cíclicos

Nos ensaios desta dissertação, as paredes de tabique simples resistiram a uma força máxima horizontal de valor médio igual a 3,5kN enquanto as paredes de tabique duplo resistiram a uma força horizontal máxima de valor médio igual a 12,6kN. Lembra-se que no caso das paredes de tabique simples, não foi aplicada uma força de valor superior por restrições de curso do atuador horizontal, tanto nos ensaios monotónicos como nos ciclos.

Ao nível da rigidez horizontal, a ordem de grandeza de cada regime linear detetado durante a carga foi de 240 e 45 kN/m para as paredes de tabique simples e de 1100, 300 e 70kN/m para as paredes de tabique duplo, ou seja, quando submetidas a ações horizontais, as paredes de tabique duplo apresentam uma rigidez horizontal muito superior às paredes de tabique simples. Com efeito, para atingir um dado deslocamento, as paredes de tabique duplo requerem uma força bastante maior do que as paredes de tabique simples que, no entanto, acomodam maiores deslocamentos sem apresentar danos significativos. Estes resultados indiciam que a rigidez horizontal é maioritariamente conferida pelas tábuas diagonais.

#### 4.8.2. ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DAS PAREDES

Nesta secção analisa-se o comportamento das paredes de tabique simples e duplo durante o ensaio experimental ao corte sob compressão constante.

##### 4.8.2.1. Paredes de Tabique Simples

As rotações do frechal superior das paredes de tabique simples em torno dos três eixos de referência não foram conclusivas, não apresentando nenhuma tendência ou rotação significativas.

Nas paredes de tabique simples destacam-se os deslocamentos relativos das diagonais que são fundamentais para compreender o comportamento destas paredes. Com efeito, para as paredes de tabique simples os gráficos dos deslocamentos das diagonais são idênticos para as quatro paredes ensaiadas. Os deslocamentos na diagonal têm um comportamento linear crescendo à medida que é imposto o deslocamento  $d_H$ , até atingir, nos ensaios monotónicos, valores máximos da ordem de grandeza dos 35mm. Este valor é muito significativo quando comparado com os restantes deslocamentos medidos. Em todos os ensaios, verifica-se claramente que uma das diagonais comprime e que a outra traciona consoante o sentido de imposição de  $d_H$ .

É importante referir que para as paredes de tabique simples se registou um levantamento/deformação das tábuas em relação ao frechal inferior e à base de madeira pouco relevante, com valores máximos de apenas cerca de 2mm medidos pelos LVDTs de fio dispostos na vertical. Os deslocamentos das paredes simples na direção perpendicular ao seu plano são igualmente pouco expressivos, novamente com valores de cerca de 2mm e apresentam deformadas próximas nos três alinhamentos.

Nas fotografias das Figura 4.46a e Figura 4.46b apresenta-se, respetivamente, parte da base e a vista transversal da parede durante o decorrer do ensaio. Na vista transversal destaca-se a verticalidade da parede observada e esperada face aos pequenos deslocamentos medidos na direção perpendicular ao plano.



Figura 4.46 – Parede de tabique simples durante o ensaio: a) detalhe da extremidade inferior das tábuas; b) vista transversal da deformação da parede

Com base nas rotações e nos deslocamentos mencionados, conclui-se que a tipologia de parede de tabique simples face a ações horizontais sofre, essencialmente, distorção por corte, como se esquematiza na Figura 4.47, apresentando uma elevada deformabilidade correspondente a um módulo de distorção por corte,  $G$ , estimado de cerca de 3500kPa.

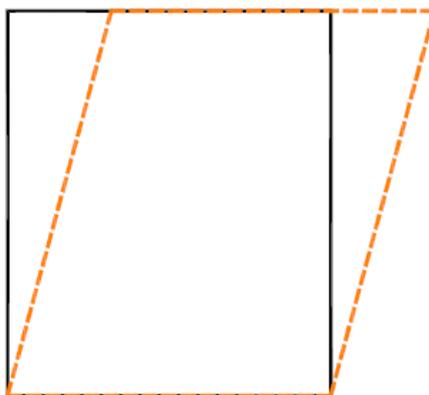


Figura 4.47 – Representação esquemática de distorção por corte

Com efeito, constatou-se experimentalmente que as paredes de tabique simples, quando sujeitas a ações horizontais, comportam-se como uma sequência de vários elementos verticais (tábuas) ligados por pequenas barras horizontais (fasquio) e que funcionam isoladamente, rodando em torno do seu centro como se observa na tábua da fotografia da Figura 4.46a.

#### 4.8.2.2. Paredes de tabique duplo

No que diz respeito às rotações do frechal superior em relação aos eixos xx e yy, medidas pelo clinómetro, todos os valores em módulo registados nos ensaios foram inferiores a  $1^\circ$ . Nas paredes de tabique duplo, verificou-se que a rotação em relação ao eixo yy foi sempre coerente com o sentido de aplicação da carga, ou seja quando se aplicou a carga horizontal positiva, foi sempre a lateral tracionada que se destacou do frechal e vice-versa. A rotação em relação ao eixo xx indica se a parede fez “barriga” para a “frente” ou para “trás” da parede; observaram-se os dois casos sem se ter verificado qualquer relação com a tipologia da parede, ou com o tipo de ensaio em causa. É uma tendência de cada parede individualmente, que depende de como foi construída e dos seus próprios elementos e ligações.

Nas paredes de tabique duplo, os deslocamentos diagonais relativos foram incoerentes (para a aplicação da força no sentido positivo durante os ensaios cíclicos ambas as diagonais diminuíram de comprimento, enquanto que nos ensaios monotónicos uma das diagonais aumentou de comprimento e a outra diminuiu) e com valores da ordem de grandeza dos 2 a 5mm. Conclui-se, logo à partida que o comportamento das paredes de tabique duplo é distinto do comportamento das paredes de tabique simples aquando da aplicação de ações horizontais.

De facto, os deslocamentos mais ilustrativos do comportamento das paredes de tabique duplo, e de ordem de grandeza superior foram os deslocamentos verticais e os deslocamentos da parede na direção perpendicular ao seu plano.

Todas as quatro paredes de tabique duplo ensaiadas apresentaram um comportamento idêntico ao nível do levantamento das tábuas de um dos lados da parede, com valores máximos totais de aumento da lateral tracionada de 17mm e de diminuição da lateral comprimida de -6mm. Esta deformação provocou algum dano das paredes, nomeadamente na base do lado da parede que levantou, onde se despregaram os pregos que ligavam as tábuas verticais e diagonais ao frechal inferior, como se mostra nos dois exemplos da Figura 4.48.

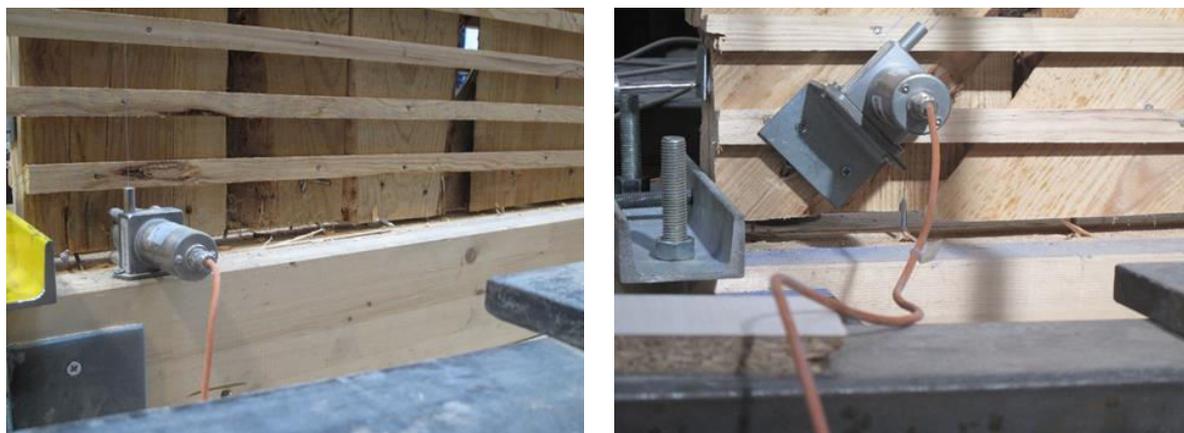


Figura 4.48 – Dano observado durante os ensaios experimentais das paredes de tabique duplo

As paredes de tabique são elementos esbeltos e passíveis de sofrerem encurvadura quando comprimidos como se verificou em [11]. Efetivamente, nas paredes de tabique simples não se registou sinais de encurvadura, mas o valor das ações e, conseqüentemente, da compressão não era muito elevado. Nas paredes de tabique duplo, estamos perante cargas significativamente superiores, como se observa na Figura 4.45 e, por conseguinte, o valor de compressão a que as paredes estão sujeitas também é maior, propiciando a ocorrência de fenómenos de instabilidade, embora ainda assim com pouca expressão.

Quando se aplica a força  $F_H$ , traciona-se um dos lados da parede, aliviando a compressão imprimida pela força vertical constante, e comprime-se o lado oposto da parede, agravando a compressão imposta pela força vertical. É naturalmente do lado mais comprimido que se verifica a deformada da parede com maior “barriga”; este efeito dissipa-se à medida que se caminha para a extremidade tracionada da parede. A ordem de grandeza dos deslocamentos atingidos pelas paredes de tabique duplo na direção perpendicular ao seu plano é de 15mm.

Verificou-se que as paredes de tabique duplo dissipam mais energia do que as paredes de tabique simples. Este facto está associado à maior capacidade resistente da parede, mas também ao movimento de pregagem e arranque dos pregos na ligação das tábuas no frechal, situação que configura um maior dano imposto. No entanto, e para as paredes ensaiadas e o número de ciclos de deslocamento impostos, a parede após o ensaio não apresenta valores de deformação plástica ou de perda de rigidez relevantes. Aparentemente, estas paredes apresentam no final características idênticas às que apresentavam antes dos ensaios.

Em semelhança ao que se mostrou para as paredes de tabique simples, nas fotografias das Figura 4.49a e Figura 4.49b apresenta-se a deformada da extremidade inferior de algumas das tábuas das paredes de tabique duplo e uma vista transversal de uma das paredes durante o ensaio, respetivamente. Embora não seja muito visível a deformada da parede para fora do seu plano a olho nu, nota-se ligeiramente, na fotografia da Figura 4.49b, que a parede não está completamente vertical.

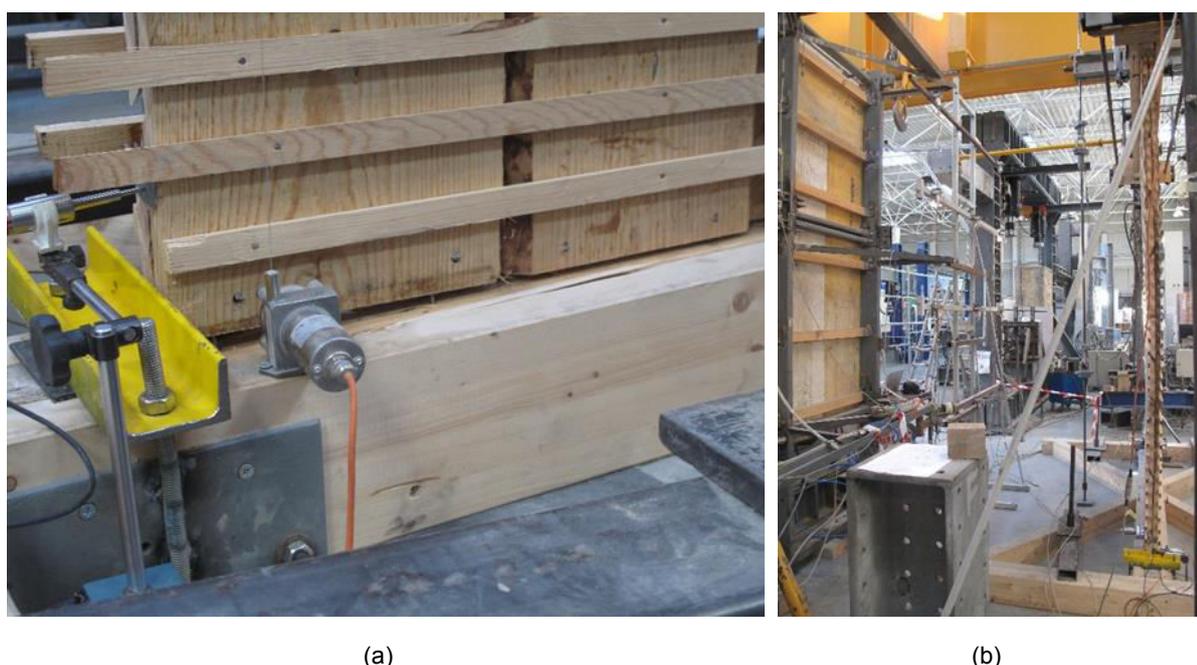


Figura 4.49 – Parede de tabique duplo durante o ensaio: a) detalhe da extremidade inferior das tábuas; b) vista transversal da deformação da parede

Da análise dos deslocamentos e rotações das paredes de tabique duplo, conclui-se que os componentes constituintes dessas paredes estão bem ligados e a trabalhar em conjunto. Com efeito, graças à contribuição das tábuas diagonais, as paredes de tabique duplo comportam-se como uma peça monolítica. Nos ensaios experimentais, como consequência da aplicação da carga horizontal as paredes de tabique duplo experimentaram, essencialmente, um movimento de corpo rígido como o que se apresenta esquematizado na Figura 4.50. O que mais condicionou o comportamento das paredes de

tabique duplo sujeitas à ação das forças horizontais com compressão constante foram as condições de ligação entre as tábuas e o frechal inferior. O patamar das curvas força horizontal-deslocamento horizontal das paredes de tabique duplo reflete, para além de outros fenómenos associados, a relação entre o momento derrubador (gerado pelas ações horizontais e pela ligação das tábuas ao frechal inferior) e o momento estabilizador (gerado pela ação vertical). A inflexão das curvas força horizontal-deslocamento horizontal durante a descarga coincide com o fecho das aberturas na base, e que fazem com que a partir desse ponto (transição da rigidez  $K_{26}$  para  $K_{27}$ , ou de  $K_{36}$  para  $K_{37}$ ) toda a parede volte a funcionar em contacto com a base, ou seja, com um valor de rigidez semelhante ao inicial.

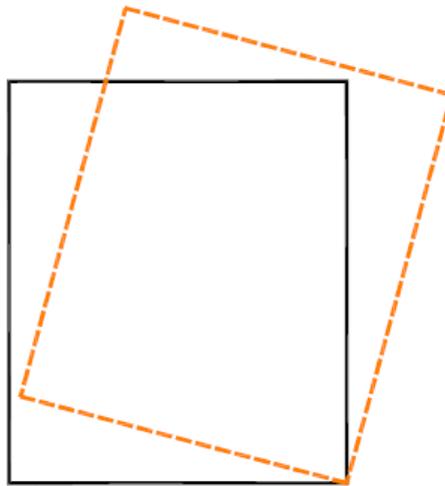


Figura 4.50 – Representação esquemática da rotação de corpo rígido

Como conclusão, apresentam-se as fotografias das Figura 4.51a e Figura 4.51b com a vista geral das bases das paredes de tabique simples e duplo, respetivamente, enquanto o ensaio estava a decorrer para se poder observar e comparar os comportamentos descritos neste capítulo e esquematizados na Figura 4.47 e na Figura 4.50.



(a)



(b)

Figura 4.51 – Base dos modelos físicos durante o ensaio: a) parede simples; b) parede dupla



# 5

## MODELAÇÃO NUMÉRICA

### 5.1. OBJETIVOS

Os objetivos deste capítulo são:

- Ajustar os modelos numéricos desenvolvido por André Chéu Pires [10], para simulação do comportamento de paredes de tabique simples e duplo, aos modelos físicos ensaiados.
- Avaliar numericamente a rigidez horizontal das duas tipologias de parede.

### 5.2. INTRODUÇÃO

Depois de concluída a campanha experimental, neste capítulo é estudada, numericamente, a resposta a ações horizontais das duas tipologias de parede de tabique apresentadas anteriormente, permitindo estimar a rigidez horizontal, em regime linear elástico.

Os modelos numéricos utilizados foram disponibilizados pela Andreia Freitas Rebelo e baseiam-se nos modelos desenvolvidos por André Chéu Pires [10], tendo sido adaptados às dimensões dos modelos físicos das paredes de tabique ensaiados em [11] à compressão no plano e, na presente dissertação, ao corte no plano com compressão constante.

Tendo-se concluído em [11] que a simulação numérica permitiu obter resultados do valor da carga crítica vertical à encurvadura coerentes com os resultados experimentais, pretende-se agora verificar a capacidade destes mesmos modelos numéricos para simularem os ensaios físicos de corte no plano com compressão constante.

Todos os cálculos efetuados neste âmbito recorreram ao programa de cálculo automático SAP2000.

### 5.3. COMPORTAMENTO DAS PAREDES DE TABIQUE AO CORTE NO PLANO COM COMPRESSÃO CONSTANTE

Nesta secção será avaliado numericamente o comportamento estrutural de paredes de tabique face a ações horizontais, supondo aplicada uma carga vertical constante. Como um dos cálculos realizados passará pela tentativa de obter a carga crítica horizontal que, em conjunto com os esforços instalados pela carga vertical constante, provoca a instabilidade da parede, introduziram-se alguns conceitos breves sobre o assunto.

### 5.3.1. CONCEITOS GERAIS

Para que uma estrutura sujeita à ação de forças esteja em segurança, além de satisfazer as condições de equilíbrio e equações de compatibilidade de deformações, terá que satisfazer a condição de estabilidade [22].

A estabilidade da estrutura representa a capacidade para suportar determinado carregamento sem sofrer uma mudança abrupta na sua configuração [23]. O problema da instabilidade põe-se sempre que existam tensões de compressão instaladas na estrutura, e consiste no afastamento lateral da estrutura em relação à direção de atuação do esforço de compressão. Esse afastamento introduz fortes interações entre deformações e esforços (influência da deformação nos esforços internos e vice-versa), justificando a designação das teorias que estudam os fenómenos de instabilidade de *teorias de segunda ordem* [22].

Para avaliar se um sistema é estável ou instável, considere-se uma peça comprimida pela ação de uma carga  $P$ . Quando o equilíbrio é perturbado, o sistema voltará à sua posição de equilíbrio inicial desde que  $P$  não exceda um certo valor  $P_{cr}$  designado por carga crítica. No entanto, se  $P > P_{cr}$ , o sistema afastar-se-á da sua posição inicial, não encontrando uma nova posição de equilíbrio. No primeiro caso dizemos que o sistema é estável, e no segundo caso que é instável [23]. O fenómeno que resulta na instabilidade de uma peça comprimida designa-se por encurvadura e consiste no desvio da peça para fora do seu eixo [22].

Euler determinou a carga crítica de uma barra linear em compressão axial. A situação crítica traduz a transição da fase estável para a fase instável. O esforço axial crítico é aquele que está em equilíbrio com o momento fletor e que mantém a peça numa configuração ligeiramente curva como a representada na Figura 5.1 [22].

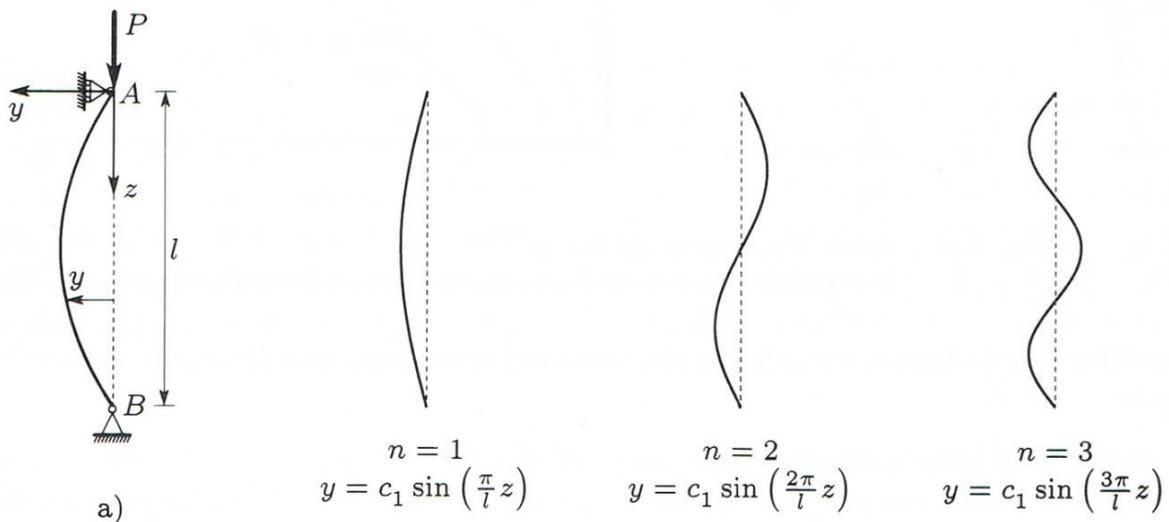


Figura 5.1 – Problema de Euler e formas de encurvadura [22]

Na configuração indicada na Figura 5.1a, o momento fletor é dado pela equação 5.1:

$$M = Py \tag{5.1}$$

Em que  $y$  é a deflexão de um dado ponto da peça. A equação diferencial da linha elástica é dada pela equação 5.2:

$$\frac{M}{EI} = -\frac{d^2y}{dz^2} \quad (5.2)$$

A resolução em simultâneo das equações 5.1 e 5.2 permite determinar o valor das cargas crítica através da expressão 5.3:

$$P = \frac{n^2\pi^2EI}{l^2} \quad (5.3)$$

Em que  $n$  é o número inteiro de formas para as quais existe equilíbrio entre a carga axial e os momentos fletores instalados quando a peça toma uma forma curva sinusoidal (os três valores mais baixos de  $n$  encontram-se representados na Figura 5.1),  $E$  é o módulo de elasticidade longitudinal,  $I$  é o momento de inércia da seção em relação ao eixo principal central de inércia que mobiliza a direção de menor inércia,  $z$  é a abcissa do eixo longitudinal da peça de um dado ponto e  $l$  é o comprimento de encurvadura da peça linear biarticulada [10,23].

A carga crítica,  $P_{cr}$  será a correspondente a  $n=1$  e será tanto maior quanto menor for o coeficiente de esbelteza da peça,  $\lambda$  dado pela equação 5.4:

$$\lambda = \frac{l}{i} \quad (5.4)$$

Que depende apenas de características geométricas da peça, nomeadamente do comprimento de encurvadura,  $l$ , e do raio de giração da sua secção transversal,  $i$ .

As equações referidas não são aplicáveis para uma parede por não reunir os requisitos de peça linear em que uma das dimensões é consideravelmente superior às outras duas e que pode ser vista como gerada por uma figura geométrica plana que se desloca ao longo de uma linha reta (ou curva, com grande raio de curvatura), mantendo-se perpendicular a essa linha [22]. Contudo, verificou-se em [11] que a capacidade resistente das paredes de tabique pode ser condicionada por fenómenos de encurvadura já que se trata de um elemento esbelto e, embora não seja aplicável para a parede como um todo, pode utilizar-se a fórmula de Euler para determinar a carga crítica de encurvadura (equação (5.3)) de cada tábua vertical da parede que isoladamente constitui uma peça linear, e extrapolar o resultado para toda a parede.

### 5.3.2. AÇÕES

Na determinação da eventual carga crítica horizontal da parede, consideraram-se duas ações uniformemente distribuídas a atuar no plano da parede e aplicadas ao longo do frechal superior: uma ação horizontal de valor igual a 1kN/m, a atuar da esquerda para a direita, e outra vertical, de resultante igual a 10kN e a atuar no sentido descendente.

### 5.3.3. CONDIÇÕES FRONTEIRA

Relativamente às condições de fronteira, as duas tipologias de paredes estão ligadas ao exterior pela ligação das tábuas verticais ao frechal. Inferiormente estão impedidas as três translações, ou seja, a parede está impedida de se deslocar na direção do seu plano,  $xx$  e  $zz$ , e na direção perpendicular ao plano,  $yy$ . No que diz respeito ao topo da parede, apenas se impede a translação perpendicular ao seu plano,  $yy$ .

#### 5.3.4. MODELOS NUMÉRICOS

Foram estudados dois modelos distintos: o modelo S, que representa as paredes de tabique simples, e o modelo D, que representa as paredes de tabique duplo. Como foi visto anteriormente, estas duas tipologias pretendem ser ilustrativas de paredes interiores de tabique existentes nas construções antigas da zona do Porto.

Nos dois modelos numéricos, todos os componentes que constituem as paredes são modelados adotando elementos de viga tridimensional (*Frame*). O elemento de viga é usado para modelar peças lineares e tem seis graus de liberdade por nó: três translações e três rotações. O material usado apresenta as propriedades mecânicas e físicas correspondentes à madeira de pinho da classe C18 indicadas na Tabela 5.1, com exceção dos únicos elementos que não são de madeira, os pregos, que são de aço e que apresentam as propriedades mecânicas indicadas no Tabela 5.2 [10].

Tabela 5.1 - Propriedades mecânicas e físicas da classe de resistência C18 da madeira de pinho nacional [11]

E (GPa)	E <sub>0,05</sub> (GPa)	G <sub>mean</sub> (GPa)	ρ <sub>mean</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	f <sub>o,0,k</sub> (MPa)	f <sub>t,0,k</sub> (MPa)	f <sub>v,k</sub> (MPa)	f <sub>m,k</sub> (MPa)
9	6	0,56	380	18	11	2	18

Tabela 5.2 - Propriedades do material aço dos pregos [11]

E (GPa)	ν	ρ <sub>mean</sub> (kN/m <sup>3</sup> )
199	0,3	76,9

##### 5.3.4.1. Modelo S

O modelo S é constituído por 9 tábuas verticais (simuladas por 43 elementos de viga por tábua), 42 ripas em cada face (simuladas por 10 elementos de viga por ripa) e por 2 frechais, superior e inferior (simulados por 10 elementos de viga por frechal) [11]. Garante-se, assim, a discretização de cada tábua em pelo menos 5 elementos, número determinado em [10] e considerado necessário para a resolução de problemas de encurvadura de elementos lineares sujeitos a esforços de compressão. Foi criada uma grelha com 3 planos na direção yy para posicionar de forma excêntrica as ripas e as tábuas, localizando-se no plano central as tábuas de madeira, e nos laterais as ripas. A ligação entre as ripas e as tábuas é feita através de pregos (um por cada ligação ripa-tábua), de secção quadrada de 3mm e dispostos na direção yy. Os pregos foram modelados considerando uma rigidez axial e à flexão elevada e uma rigidez à torção baixa [11], de forma a simular realisticamente o seu efeito na parede.

O esquema do modelo S da Figura 5.2 inclui a forma e dimensões das secções transversais de cada elemento da parede. A par do mencionado, refere-se que a folga entre tábuas verticais é de 2cm e que a distância entre eixos de ripas é de 7cm. Os pregos que ligam as ripas às tábuas apresentam cerca de 4cm de comprimento [11].

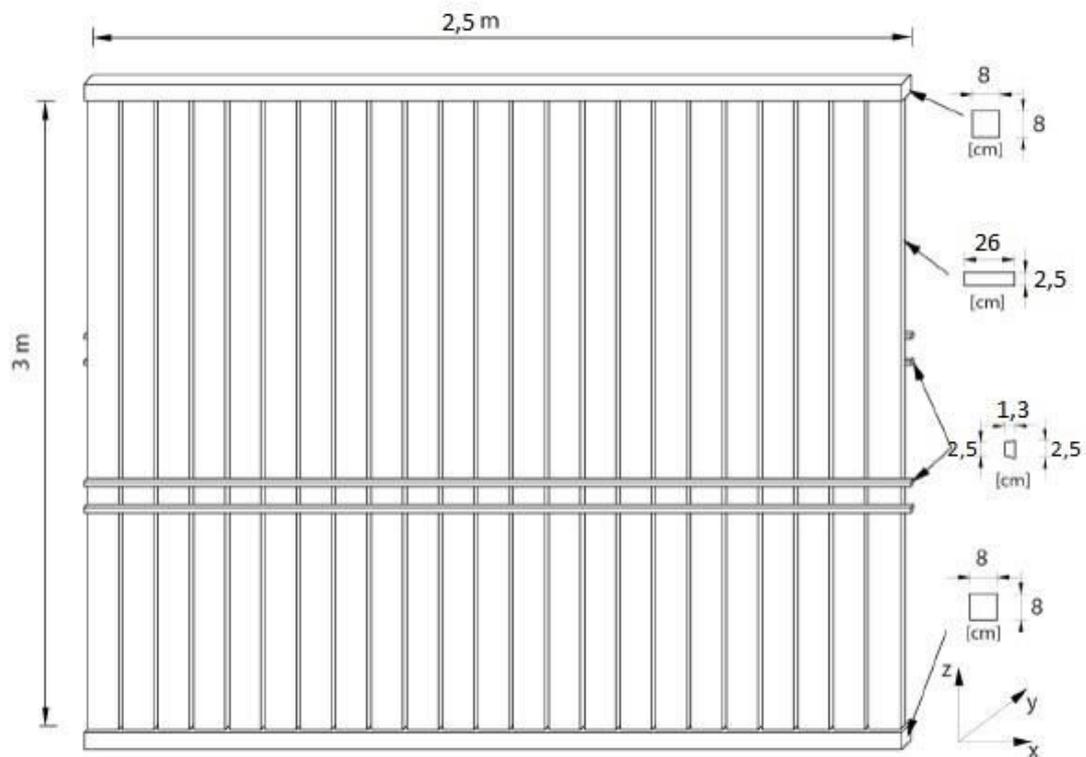


Figura 5.2 – Modelo S [10,11]

#### 5.3.4.2. Modelo D

Naturalmente, o modelo D difere do modelo S porque além das tábuas verticais, tem também tábuas diagonais, justapostas às anteriores e com a mesma secção. No modelo D, por simplicidade e porque estão rigidamente ligadas entre si, as tábuas verticais e diagonais foram modeladas no mesmo plano. O modelo D contém 9 tábuas verticais e 35 tábuas diagonais [11].

Na Figura 5.3 apresenta-se um esquema do modelo D com a forma e dimensões das secções transversais dos componentes da parede. As tábuas verticais têm o mesmo espaçamento entre si nos modelos S e D, assim como a mesma distância ao eixo entre ripas consecutivas. Importa acrescentar que as tábuas diagonais estão orientadas cerca de  $60^\circ$  em relação à horizontal [11].

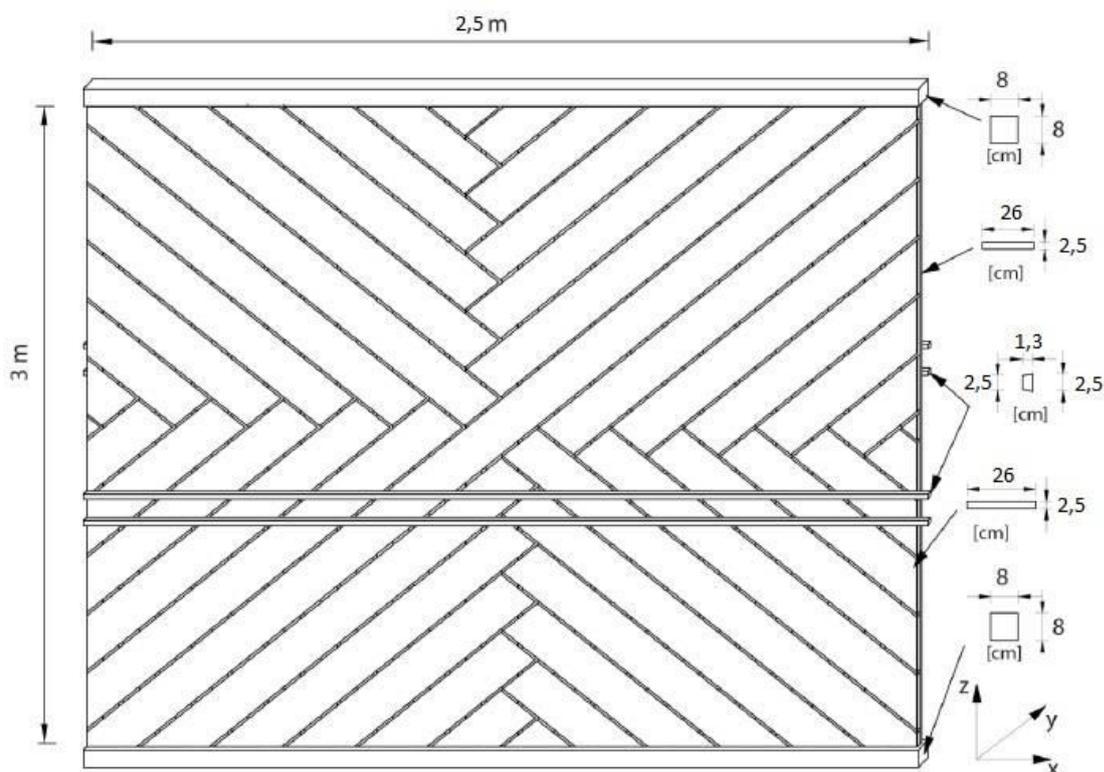


Figura 5.3 – Modelo D [10,11]

As propriedades geométricas e mecânicas dos constituintes dos dois modelos são as mesmas, estando apresentadas na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Propriedades geométricas e mecânicas das seções transversais dos elementos constituintes da parede [11]

Elementos	Área ( $m^2$ )	$I_{xx}$ ( $m^4$ )	$I_{yy}$ ( $m^4$ )	$R_{xx}$ (m)	$R_{yy}$ (m)
Tábuas	0,0065	3,39E-07	3,66E-05	7,22E-03	0,075
Ripas	0,0002925	4,10E-09	1,25E-08	3,75E-03	6,54E-03
Frechais	0,0064	3,41E-05	3,41E-05	0,0231	0,0231
Pregos	9,00E-06	6,75E-12	6,75E-12	8,66E-04	8,66E-04

Nota: I – inércia; R – raio de giração.

### 5.3.5. ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS DOS MODELOS S E D

Feita a apresentação dos modelos em estudo, prossegue-se com a avaliação da rigidez horizontal de forma numérica e em comportamento linear elástico. Determinou-se para o modelo S e para o modelo D, os respectivos valores de rigidez horizontal usando a equação (4.1).

No cálculo da rigidez horizontal, utilizou-se o valor de 2,5kN para a força total exercida no frechal,  $F_H$  que resultou da multiplicação da ação horizontal uniformemente distribuída aplicada no modelo, 1kN/m, pela largura da parede, 2,5m. O valor da média dos deslocamentos horizontais no plano dos dois nós extremos do frechal superior,  $(d_H)_m$ , obteve-se diretamente do programa de cálculo, sendo um dos *outputs* fornecidos.

Assim, os valores obtidos numericamente para a rigidez horizontal, em regime linear elástico, foram de 1145kN/m para o modelo S e de 12600kN/m para o modelo D. Estes valores da rigidez horizontal contrastam muito quando comparados com os valores da rigidez horizontal equivalentes obtidos experimentalmente, que foram cerca de 240kN/m para as paredes de tabique simples (K1 e K10) e cerca de 1100 kN/m para as paredes de tabique duplo (K18 e K28). Nas Figura 5.4a e Figura 5.4b encontram-se representadas as deformadas dos modelos S e D, respetivamente.

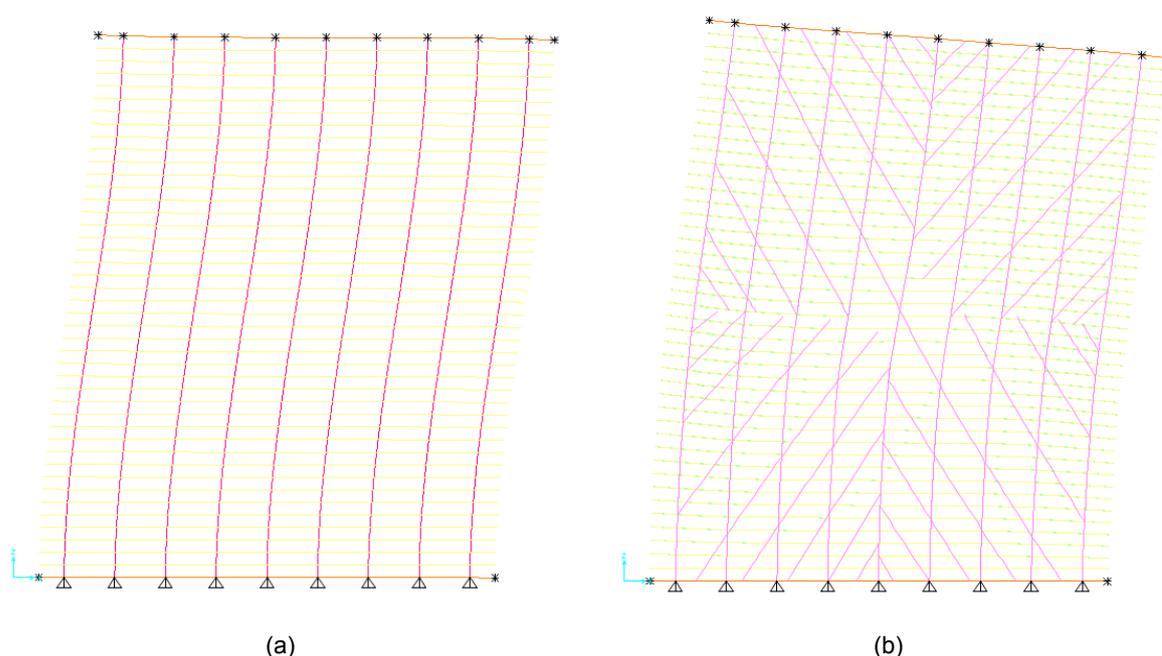


Figura 5.4 – Deformada por ação da combinação das cargas horizontal e vertical em análise linear: a) Modelo S; b) Modelo D

Ambos os modelos numéricos apresentaram uma rigidez muito superior à verificada no ensaio experimental da respetiva tipologia de parede: cerca de 5 vezes superior para as paredes de tabique simples/modelo S e cerca de 11 vezes superior para as paredes de tabique duplo/modelo D. Conclui-se que os modelos numéricos são bastante mais rígidos que os modelos físicos o que provoca que o topo da parede se movimente na horizontal menos do que o que acontece na realidade.

A par da análise numérica em comportamento linear elástico, tirou-se partido das potencialidades avançadas do SAP2000 para calcular no modelo D os modos de encurvadura a partir da rigidez obtida no final de análises não lineares [24]. Desta forma, pretendia obter-se numericamente o valor da carga crítica horizontal que, combinada com a análise de uma ação uniformemente distribuída vertical e descendente de resultante 10kN, provocasse a instabilidade da parede.

Esta análise apenas foi realizada no modelo D que corresponde ao modelo das paredes de tabique duplo por ter sido somente nos ensaios experimentais desta tipologia que foram detetados eventuais sinais de

ocorrência de encurvadura. Na Figura 5.5 apresenta-se a deformada obtida para o primeiro modo de encurvadura.

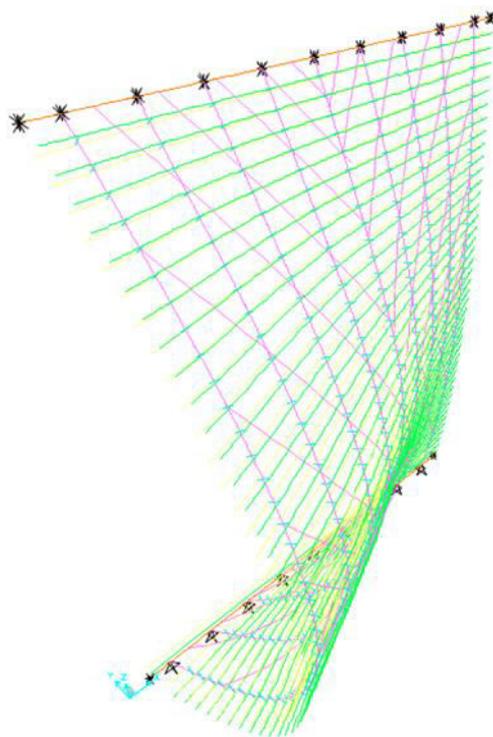


Figura 5.5 – Deformada do primeiro modo de encurvadura do modelo D

A carga crítica calcula-se multiplicando o fator de encurvadura,  $\lambda$ , pelo valor inicial da carga. No modelo D, o valor  $\lambda$  obtido foi de -12,0 para o primeiro modo e, conseqüentemente, a carga horizontal crítica calculada numericamente foi de 30kN. Note-se que, experimentalmente, registaram-se sinais de encurvadura, ou de patamar da curva força horizontal-deslocamento horizontal do frechal superior para valores da força horizontal de cerca de 12kN. Ou seja, numa análise à encurvadura os valores obtidos numericamente para o valor da carga crítica horizontal são também bastante superiores aos estimados experimentalmente.

#### 5.3.6. ALTERAÇÕES AOS MODELOS

Para que os modelos S e D tenham capacidade para simular, respetivamente, o real comportamento das paredes de tabique simples e duplo face a ações horizontais, foi necessário introduzir alterações em ambos os modelos. Após alguma reflexão, percebeu-se que a diferença entre os resultados numéricos e os experimentais se devia ao facto de se ter adotado ligações rígidas entre as tábuas e o frechal.

Sabendo que as duas tipologias de parede apresentaram comportamentos distintos nos ensaios ao corte: nas paredes de tabique simples ocorreu distorção por corte e as tábuas funcionaram individualmente e nas paredes de tabique duplo houve movimento do corpo rígido conjugado com possíveis fenómenos de encurvadura em que a parede funcionou em bloco, facilmente se compreende que as soluções a adotar para cada modelo deverão também ser distintas. Em seguida, apresentam-se as alterações que foram introduzidas em cada um dos modelos.

### 5.3.6.1. Modelo S

No modelo S, a ligação rígida entre as tábuas verticais e o frechal garante sempre ângulos retos entre as tábuas e o frechal, impondo um quase encastramento perfeito das tábuas na base (a menos da deformação do frechal). No ensaio experimental, as tábuas rodam sobre o frechal, solicitando os pregos da ligação.

Para simular no modelo S, o comportamento real da parede de tabique simples, optou-se por isso por novas condições de fronteira na base das tábuas:

- Excluiu-se o frechal inferior;
- Introduziram-se apoios com rigidez à rotação em relação ao eixo  $yy$  nos apoios inferiores, simulando uma ligação semirrígida correspondente à união pregada entre as tábuas verticais e o frechal inferior, permitindo alguma rotação das tábuas na base durante o movimento de distorção da parede;
- Introduziram-se também molas rotacionais em relação ao eixo  $yy$  no topo das tábuas verticais na ligação ao frechal superior para obter o mesmo efeito e condições idênticas às da ligação das tábuas ao frechal inferior; foi utilizado o comando *Releases/Partial fixity*.

A rigidez à rotação foi calibrada de modo a que o valor da rigidez horizontal obtido numericamente em regime linear elástico, coincidissem com o valor da rigidez horizontal obtido através dos valores experimentais correspondentes ao primeiro regime linear considerado durante a carga, tendo-se obtido um valor de 130kN.m/rad.

### 5.3.6.2. Modelo D

No modelo D também se atuou no sentido de corrigir a ligação rígida entre as tábuas e o frechal, facilitando o movimento do corpo rígido das paredes de tabique duplo observado durante o ensaio experimental, condicionado novamente pelo comportamento das ligações pregadas das tábuas (verticais e diagonais) ao frechal inferior.

Neste caso, as alterações consistiram em:

- Retirar o frechal inferior;
- Substituir, na extremidade esquerda da parede (uma vez que a carga horizontal é aplicada da esquerda para a direita) e na direção no eixo  $zz$ , os apoios rígidos verticais por apoios elásticos.

A rigidez dos apoios elásticos foi ajustada tendo-se obtido o valor de 50kN/m de modo a alcançar-se numericamente (em regime linear elástico) e experimentalmente (para a primeira fase linear verificada) o mesmo valor de rigidez horizontal da parede. Neste processo substituiu-se a carga horizontal de 1kN/m pela carga horizontal que se verificou durante o ensaio nesse regime, que é de aproximadamente 4kN, ou seja 1,7kN/m. Note-se que, para que as molas pudessem simular as várias fases do comportamento das paredes, seria necessário que também as molas apresentassem um comportamento não linear.

### 5.3.7. ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS DOS MODELOS S E D ALTERADOS

Na Figura 5.6a encontra-se representada a nova deformada do modelo S, que é consistente com o movimento das paredes de tabique simples identificado durante os ensaios experimentais, e que se encontra esquematizado na Figura 4.47.

Na Figura 5.6b encontra-se representada a nova deformada do modelo D, com os apoios elásticos introduzidos na base na direção vertical representados a verde, em oposição aos apoios que impedem as três translações representados com forma triangular.

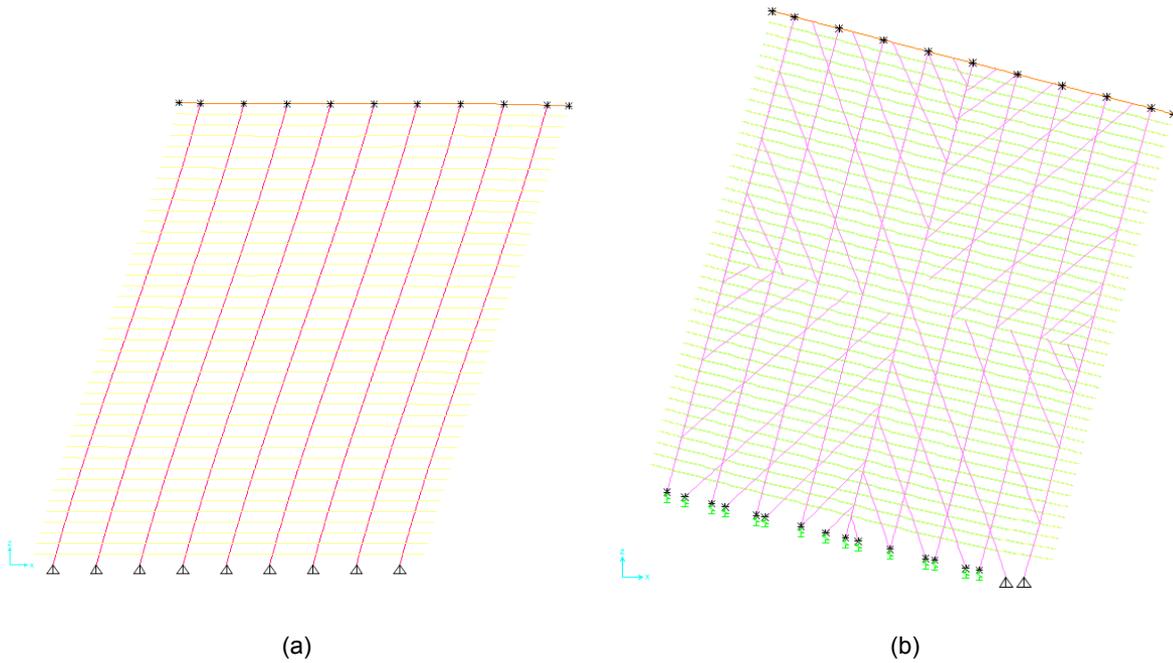


Figura 5.6 – Deformada por ação da combinação das cargas horizontal e vertical em análise linear pós-alterações: a) Modelo S; b) Modelo D

O novo valor obtido para a rigidez horizontal em regime linear elástico foi de 211kN/m para o modelo S e de 1071kN/m para o modelo D, que são valores idênticos aos obtidos experimentalmente na fase inicial dos ensaios das paredes de tabique simples e duplo, respetivamente.

Para o novo modelo D, também se realizou a análise à encurvadura a partir da rigidez obtida no final da análise não linear da ação vertical. A deformada resultante encontra-se representada na Figura 5.7.

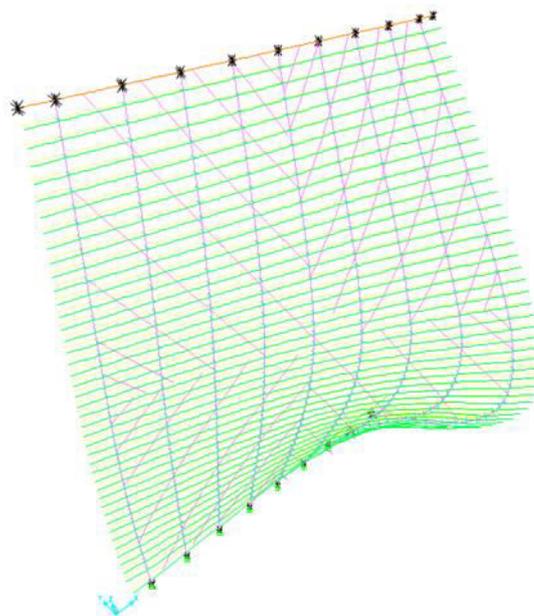


Figura 5.7 – Deformada do primeiro modo de encurvadura pós-alterações do modelo D

No novo modelo D, o fator de encurvadura  $\lambda$  obtido para o primeiro modo de encurvadura foi de 2,89 que, multiplicado pela ação horizontal total aplicada, 2,5kN, permite estimar numericamente o valor da carga crítica horizontal, 12,4kN.

Os resultados numéricos obtidos indicam que a parede de tabique duplo instabiliza quando se aplica uma força horizontal de 12,4kN após a aplicação de uma carga vertical constante e descendente de 10kN. Efetivamente os ensaios experimentais vieram comprovar que para valores dessa ordem de grandeza as paredes de tabique duplo atingem a sua capacidade resistente. No entanto, embora numericamente a capacidade resistente pareça ter sido condicionada pela encurvadura, experimentalmente não se verificaram sinais evidentes de encurvadura.

#### **5.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

As principais conclusões extraídas do capítulo foram:

- Numericamente também se comprova que as paredes de tabique duplo são mais rígidas do que as paredes de tabique simples.
- Através da introdução de molas rotacionais e axiais é possível dotar os modelos S e D, respetivamente, de capacidade para simularem o comportamento das paredes de tabique a ações horizontais.
- O cálculo da carga crítica horizontal à encurvadura nos modelos de paredes de tabique duplo calibradas para a rigidez horizontal experimental permitiu estimar valores para a capacidade resistente destas paredes idênticos aos valores experimentais.



## 6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Em Portugal, existe um vasto número de edifícios antigos, integrados no património arquitetónico, quer monumental, quer corrente, que integra paredes de tabique na sua edificação. Em muitas das construções, a estrutura em madeira destas paredes encontra-se em bom estado de conservação, em particular quando mantém a argamassa de enchimento e revestimento em boas condições, permitindo a sua manutenção, ou seja que continuem a desempenhar a função para a qual foram criadas, quer seja estrutural, quer apenas de compartimentação. A manutenção destes elementos não só constitui uma medida sustentável, diminuindo a produção de resíduos, como permite preservar uma técnica tradicional que, apesar das variantes temporais e regionais, já tem séculos de existência. Apesar deste valor inquestionável, a consulta da bibliografia existente permitiu obter alguma informação sobre as características geométricas e mecânicas dos componentes isolados que constituem as paredes de tabique, mas pouca informação sobre o comportamento e as características mecânicas destas paredes como um todo.

Esta dissertação pretende colmatar algumas destas lacunas, em particular dar continuidade a um estudo sobre paredes interiores de tabique que tem vindo a ser realizado no LESE da FEUP, com o apoio do NCREP, Lda, da Portilame e da CS Construtora, com o objetivo de aumentar o conhecimento sobre o comportamento e as características mecânicas deste elemento. Em particular, pretende-se conhecer o contributo que pode ter para a segurança/estabilidade estrutural dos edifícios onde se integram. Com efeito, as paredes de tabique, quando posicionadas transversalmente e sob as vigas de um pavimento, acabam por assumir uma função estrutural quando essas vigas, quer por degradação no tempo, quer por fluência, se apoiam nas paredes. Por outro lado, as paredes de tabique podem também funcionar eventualmente como elementos de contraventamento horizontal quando submetidas a ações horizontais no seu plano.

O estudo em que se insere o presente trabalho, iniciou-se com a caracterização das paredes de tabique das construções antigas do centro histórico da cidade do Porto. Nesse trabalho anterior identificaram-se duas tipologias como sendo as mais representativas e abundantes na comumente designada por casa burguesa do Porto: *paredes de tabique simples* e *paredes de tabique duplo*. Para ambas as tipologias, conceberam-se modelos numéricos usando um programa de cálculo automático com capacidade para simular o comportamento estrutural, modelando os elementos que constituem as paredes como elementos tipo viga tridimensional (*Frame*). Numericamente, foi estimada a carga crítica vertical à encurvadura para esforços verticais, a rigidez horizontal das paredes no seu plano e foram também estudados alguns cenários de reforço propostos. Realizou-se uma campanha experimental em paredes de tabique de ambas as tipologias, construídas à escala real, sem o reboco de revestimento, tendo-se avaliado a sua capacidade resistente à compressão simples. A simulação numérica permitiu obter

resultados do valor da carga crítica vertical à encurvadura coerentes com os resultados experimentais realizados.

A contribuição da presente dissertação para esse estudo passa, essencialmente, pela avaliação experimental do comportamento ao corte no plano sob compressão constante, das mesmas duas tipologias de paredes de tabique. De facto, esta nova campanha de ensaios experimentais realizou-se nos modelos físicos que tinham sido previamente ensaiados à compressão simples. Posteriormente, com os resultados experimentais obtidos, calibraram-se os modelos numéricos referidos, agora para a análise do comportamento das paredes de tabique quando submetidas a ações horizontais.

Previamente à apresentação dos resultados desta campanha, fez-se uma abordagem ao tema da reabilitação do edificado, tendo-se analisado os princípios da intervenção estrutural defendidos por especialistas e organismos internacionais, e que realçam a importância de, em processos de reabilitação, valorizar a integridade de todos os componentes e não apenas a aparência de elementos isolados. Neste âmbito, fez-se uma identificação dos elementos resistentes principais e de alguns dos elementos secundários típicos das construções do centro histórico do Porto, nomeadamente das casas burguesas do Porto, de forma a compreender o seu sistema construtivo. Fez-se uma caracterização material e construtiva mais detalhada dessas paredes por constituírem o alvo de estudo desta dissertação. Para esta fase do trabalho foi de muita utilidade as visitas realizadas.

Uma vez compreendido o enquadramento real das paredes interiores de tabique nas edificações antigas, passou-se para o laboratório onde se realizou a campanha experimental. Nos ensaios realizados, procurou-se simular as condições existentes nos edifícios, em particular as condições de fronteira dos modelos físicos das paredes no topo e na base.

Ao longo do ensaio das paredes de tabique aplicou-se, no plano e no topo da parede, uma carga horizontal variável e uma carga vertical descendente, de resultante igual a 10kN, aplicada em 4 pontos de forma a simular um carregamento uniformemente distribuído que foi mantido constante. Dos ensaios extraíram-se os seguintes resultados: carga horizontal e vertical exercida na parede; deslocamento horizontal no plano do topo da parede; 8 deslocamentos na direção perpendicular ao plano da parede; 4 deslocamentos relativos no plano da parede, nomeadamente 2 diagonais e 2 verticais; e a rotação do frechal superior. Foram ensaiadas 4 paredes de tabique simples e 4 paredes de tabique duplo. Para além disso, metade das paredes de cada tipologia foram ensaiadas com a aplicação da ação horizontal de forma crescente monotónica, e a restante metade de forma cíclica. A conclusão extraída deste estudo foi que as duas tipologias de paredes de tabique em análise apresentaram um comportamento distinto.

A rigidez da parede aos deslocamentos horizontais no plano foi uma das características da parede mais importantes que se pretendia determinar com este conjunto de ensaios. Salienta-se que foram calculados, para cada tipologia de parede de tabique, vários valores de rigidez devido ao comportamento claramente não linear apresentado pelas paredes, um valor por cada regime aproximadamente linear observado.

Da análise dos resultados realizada, concluiu-se que a tipologia de parede de tabique simples face a ações horizontais no plano sofre, essencialmente, distorção por corte, comportando-se como uma sequência de vários elementos verticais (tábuas) ligados por pequenas barras horizontais (fasquio) que funcionam isoladamente, rodando em torno do prego que une o fasquio às tábuas. A força máxima horizontal aplicada durante o ensaio foi de cerca de 3,5kN para um deslocamento horizontal de cerca de 60mm. O limite da força máxima horizontal aplicada deveu-se a restrições do curso do atuador. A rigidez horizontal apresentada pelas paredes de tabique simples foi da ordem de grandeza de 240kN/m numa primeira fase, passou para 45kN/m no segundo regime linear identificado e continuou a decrescer lentamente à medida que a grandeza do deslocamento horizontal aumentou. Para as paredes ensaiadas e o número de ciclos de deslocamento impostos, a parede após o ensaio não apresentou perda de rigidez

ou de resistência relevantes, contudo originaram-se deslocamentos plásticos elevados que só foram recuperados porque o ensaio descarregou, primeiro para deslocamento horizontal nulo e só depois para força horizontal nula. Neste processo, as tábuas que se tinham destacado do frechal por efeito de tração na ligação pregada, foram reposicionadas na posição original durante a descarga (efeito de pregagem). Da análise dos resultados, concluiu-se que as paredes de tabique simples apresentam um fraco comportamento ao corte no plano da parede, apresentando uma elevada deformabilidade correspondente a um módulo de distorção por corte estimado de cerca de 3,5MPa.

Da análise dos deslocamentos e rotações obtidos durante os ensaios experimentais nas paredes de tabique duplo conclui-se que, graças às tábuas diagonais pregadas às tábuas verticais, as paredes de tabique duplo tendem a funcionar como uma peça monolítica. Como consequência da aplicação da carga horizontal, as paredes de tabique duplo experimentaram, essencialmente, movimentos de corpo rígido até se ter interrompido o ensaio quando o declive da curva força horizontal-deslocamento horizontal tendeu para zero, ou quando o deslocamento obtido se considerou representativo de uma situação de dano claro, mas sem rotura. O patamar das curvas força horizontal-deslocamento horizontal das paredes de tabique duplo reflete, para além de outros fenómenos associados, a relação entre o momento derrubador (gerado pelas ações horizontais e pela ligação das tábuas ao frechal inferior) e o momento estabilizador (gerado pela ação vertical). Nos ensaios experimentais das paredes de tabique duplo não se notaram sinais evidentes de fenómenos de encurvadura. Para as condições de carregamento do ensaio experimental realizado, a capacidade resistente máxima da ação horizontal das paredes de tabique duplo foi de cerca de 12,5kN para deslocamentos horizontais de cerca de 30mm. A rigidez horizontal verificada no ensaio das paredes de tabique duplo foi da ordem de grandeza de 1100kN/m na primeira fase do ensaio, e de 300kN/m na segunda fase, continuando a decrescer à medida que o deslocamento horizontal aumentou. Para as paredes ensaiadas e o número de ciclos de deslocamento impostos, as paredes após o ensaio não apresentavam valores de deformação plástica ou de perda de rigidez relevantes.

Uma das principais conclusões que se extrai deste estudo é que o comportamento mecânico das paredes de tabique ao corte no plano é essencialmente condicionado pelas ligações pregadas entre os seus elementos, nomeadamente entre as tábuas e o frechal inferior. Outro aspeto a referir é que as tábuas diagonais apresentam uma contribuição muito significativa para a capacidade resistente a ações horizontais e para a resistência horizontal apresentada pelas paredes, dotando as paredes de tabique duplo de uma capacidade de contraventamento no plano muito superior à das paredes de tabique simples.

Após a campanha experimental, calibraram-se os modelos numéricos já existentes para simularem o comportamento de paredes de tabique simples e duplo tendo por base os modelos físicos ensaiados. Concluiu-se que, através da introdução de molas rotacionais e axiais, é possível dotar os modelos de tabique simples e duplo, respetivamente, de capacidade para simularem o comportamento das paredes de tabique a ações horizontais, obtendo-se numericamente para o regime linear elástico valores da rigidez horizontal idênticos aos valores obtidos experimentalmente para a fase inicial. Note-se que, para que as molas pudessem simular as várias fases do comportamento das paredes, seria necessário que também as molas apresentassem um comportamento não linear.

Por fim, para futuros trabalhos de investigação propõem-se:

- A repetição do ensaio experimental ao corte no plano sob compressão constante, realizado no presente trabalho, em mais paredes de tabique para se obter uma média de valores mais representativa;
- Realizar ensaios experimentais ao corte no plano em paredes de tabique com a aplicação de outra gama de valores para a compressão que se manteve constante ao longo do ensaio;

- Realizar ensaios experimentais à compressão e ao corte no plano em paredes de tabique com revestimento/argamassa e/ou medidas de reforço estrutural implementadas;
- A modelação numérica de paredes de tabique através de bielas calibrando os modelos com os resultados experimentais obtidos;
- A simulação de edifícios onde se inclua a participação das paredes de tabique de forma a melhor compreender o papel estrutural destas paredes no comportamento global da estrutura.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Comité Científico Internacional para a Análise e Restauro de Estruturas do Património, A. *Recomendações para a análise, conservação e restauro estrutural do património arquitectónico*. ICOMOS, Lisboa, 2004.
- [2] Appleton, J. A. d. S. *Reabilitação de edifícios antigos patologias e tecnologias de intervenção*. Edições Orion, Alfragide, 2011.
- [3] Teixeira, J. J. L. *Salvaguarda e Valorização do Edificado Habitacional da Cidade Histórica. Metodologia de Intervenção no Sistema Construtivo da Casa Burguesa do Porto*. Tese de Doutoramento, FAUP, 2014.
- [4] Oliveira, E. V., Galhano, F. *Arquitectura tradicional portuguesa*. Dom Quixote, Lisboa, 2003.
- [5] Pinto, J., Gulay, G., Vieira, J., Meltem, V., Varum, H., Bal, I., Costa, A., Save the tabique construction. In *Structural rehabilitation of old buildings*, p. 157-185, vol. 2, Costa, A., Guedes, J., Varum, H., Ed. Heidelberg: Springer, 2014.
- [6] Cunha, S., Pinto, J., Paiva, A., Briga-Sa, A., Soares, N., Varum, H., Ferreira, D. *A contribution for the improvement in thermal insulation of tabique walls coated with metal corrugated sheets. Building Services Engineering Research and Technology*, 06/01/2015 p. 439-454, SAGE Publications, UK.
- [7] Júnior, J. A. B. *Avaliação não destrutiva da capacidade resistente de estruturas de madeira de edifícios antigos*. Dissertação de Mestrado, FEUP, 2006.
- [8] Alvarez, R. A., Martitegui, F. A. *Estructuras de madera. Diseño y cálculo*. AITIM, Madrid, 1996.
- [9] Carvalho, A. *Madeiras Portuguesas - Vol. I*. Instituto Florestal, Lisboa, 1996.
- [10] Pires, A. *Análise de paredes de tabique e de medidas de reforço estrutural estudo numérico*. Dissertação de Mestrado, FEUP, 2013.
- [11] Rebelo, A. *Avaliação das características mecânicas de paredes de tabique à compressão no plano*. Dissertação de Mestrado, FEUP, 2015.
- [12] Fonseca, I., Feio, A. O., Machado, J. S. *Utilização de derivados de madeira no reforço de paredes de tabique*. 1º Congresso Luso-Brasileiro de Materiais de Construção Sustentáveis, 5-7 Março, UMinho, CLB-MCS 2014.
- [13] Pinto, R. *Caracterização das paredes de tabique do centro histórico de Viseu*. Dissertação de Mestrado, IPV, 2013.
- [14] Valença, P. d. Q. *Mouzinho/Flores - Um Eixo de Mudança para o Centro Histórico*. Porto Vivo, SRU Sociedade da Reabilitação Urbana da Baixa Portuense, S.A. , Porto 2014.
- [15] Cepeda, A. *Construções de tabique existentes na associação de municípios do alto tâmega* Dissertação de Mestrado, UTAD, 2009.
- [16] Carvalho, J. *Construções em tabique na região de Trás-os-Montes e Alto Douro*. Dissertação de mestrado, UTAD, 2009.
- [17] Martinho, J. *Construção de tabique na associação de municípios da terra fria do nordeste transmontano* Dissertação de Mestrado, UTAD, 2010.

- [18] Carvalho, J., Pinto, J., Varum, H., Jesus, A., Lousada, J., Morais, J. *Construções em tabique na região de Trás-os-Montes e Alto Douro*. 4th Internacional Conference on Structural Defects and Repair, Aveiro CINPAR 2008.
- [19] Pinto, J., Varum, H., Cruz, D., Sousa, D., Morais, P., Tavares, P., Lousada, J., Silva, P., Vieira, J. *Tabique construction characterization in Douro North Valley, Portugal: A first step to preserve this architectural heritage*. Proceedings of the 2nd WSEAS International Conference on Natural Hazards, NAHA '09, Climate Changes, Global Warming, Biological Problems, CGB '09, Urban Rehabilitation and Sustainability, URES '09, p. 48-53,
- [20] Pinto, J., Varum, H., Nunes, L., Ramos, L. *Building Details of a Tabique Dwelling in Trás-os-Montes e Alto Douro Region*. XII DBMC - 12th International Conference on Durability of Buildings Materials and Components, (Freitas, V., Carvalho, H., and Lacasse, M.), April 12th-15th, 2011, Porto, p. 729-736 Volume II, FEUPedições.
- [21] <http://www.ncrep.pt/section.php?id=1434>. 21/06/2016.
- [22] Silva, V. D. d. *Mecânica e resistência dos materiais*. Zuari - Edição de Livros Técnicos, Coimbra, 2004.
- [23] Beer, F. P., Johnston, J. E. R., Dewolf, J. T. *Mecânica dos materiais*. McGraw-Hill de Portugal, Lisboa, 2003.
- [24] <http://www.csiportugal.com/software-features/2/sap2000#submenu-top>. 11/06/2016.