

# **AVALIAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS DE PAREDES DE TABIQUE À COMPRESSÃO NO PLANO**

**ANDREIA FREITAS REBELO**

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 2015

## **MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2012/2013**

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 - 2014/2015 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2015.*

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.

A meus Pais, Helena e Valdemar,  
e Irmã Mariana

*O começo de todas as ciências é o espanto de as coisas serem o que são.*

*Aristóteles*

## **AGRADECIMENTOS**

Ao meu orientador, Professor Doutor João Paulo Sousa Costa de Miranda Guedes pela oportunidade de trabalhar ao seu lado e pelo conhecimento, experiência e acima de tudo entusiasmo transmitidos durante todo o meu trabalho.

Ao meu coorientador, Engenheiro Bruno Luís Quelhas da Silva, pela troca de ideias e acompanhamento ao longo de todo o meu trabalho.

Ao meu coorientador, Engenheiro Tiago Ilharco de Moura Pinho Dias, pela sua disponibilidade.

Às empresas CS Construtora, Portilame e NCREP pelo apoio prestado, sem o qual não teria sido possível a realização deste trabalho.

Ao Professor António Arêde, pelo conhecimento e experiência no campo laboratorial.

Aos funcionários do Laboratório de Engenharia Sísmica e Estrutural da FEUP, em especial ao Sr. Valdemar pela eficiência, engenho e constante boa disposição ao longo de todo o trabalho laboratorial.

Ao meu colega, Engenheiro André Chéu Pires, cuja dissertação, realizada em 2013, tive o prazer de dar continuidade. Posso afirmar que foi uma das pessoas mais importantes na concretização deste trabalho, pela disponibilidade, amizade e incentivo demonstrados.

Aos meus amigos, que sempre estiveram presentes em todos os momentos da minha vida, essencialmente numa fase tão importante como esta. Um especial agradecimento à Daniela Dinis, Álvaro Araújo, Nuno Alegria, Ana Vilarinho, Tiago Gomes, Francisca Alves e Diogo Santos, pelas pessoas maravilhosas que são e por tudo o que representaram todos estes anos, cada um à sua maneira.

Aos meus pais, pelo amor incondicional transmitido ao longo de toda a minha vida e a quem não há palavras para agradecer tudo o fizeram por mim.

À minha irmã gémea e amor da minha vida, Mariana, sem a qual nada é possível.



## RESUMO

Em Portugal, particularmente na Cidade do Porto, grande parte do edificado antigo é constituído por elementos de tabique. Esta técnica construtiva utiliza materiais naturais, tendo a madeira como material principal, e é inserida essencialmente na construção de paredes. O projeto que agora se propõe tem como motivação a falta de informação e conhecimento sobre o comportamento destas paredes, resultando, na maioria dos casos, na substituição integral destes elementos em detrimento da sua reabilitação. Sendo assim, o principal objetivo deste trabalho é analisar o comportamento das paredes de tabique, integradas nas construções da cidade do Porto, de modo a promover a sua reabilitação/reforço.

O trabalho inicia-se com a caracterização das paredes de tabique, existentes nas construções antigas da cidade do Porto. Após a sua identificação e caracterização, é avaliado numericamente o comportamento estrutural de dois tipos de paredes de tabique, com e sem recobrimento, estimando a sua carga crítica para esforços verticais e a sua rigidez horizontal. Esta análise é feita através da utilização de um programa de cálculo estrutural.

Feita a avaliação numérica, é realizada uma campanha experimental em quatro paredes de tabique com o objetivo de avaliar a sua capacidade resistente à compressão.

**PALAVRAS-CHAVE:** Reabilitação, paredes de tabique, encurvadura, simulação numérica, comportamento experimental.



## **ABSTRACT**

In Portugal, particularly in the city of Porto, much of the old buildings consists of partition elements. This construction technique uses natural materials, with wood as the main material, and is substantially inserted in the construction of walls. The project now being proposed is motivated by the lack of information and knowledge about the behavior of these walls, resulting, in most cases, the complete replacement of these elements at the expense of their rehabilitation. Thus, the main objective of this paper is to analyze the behavior of partition walls, integrated into buildings in the city of Porto, in order to promote their rehabilitation / strengthening.

The work begins with the characterization of the walls of partition, the existing old buildings of the city of Porto, existing in old buildings of the city of Porto. After their identification and characterization is numerical reported the structural behavior of a set of partition walls, with or without coating, estimating its critical load for vertical forces and its horizontal stiffness. This analysis is done by using a numerical calculation program structural.

Made numerical evaluation, an experimental campaign is held in four walls of partition in order to evaluate its bearing capacity in compression.

**KEYWORDS:** Rehabilitation, Partition walls, Buckling, Numerical simulation, Experimental behavior





## ÍNDICE GERAL

<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	i
<b>RESUMO</b> .....	iii
<b>ABSTRACT</b> .....	v
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	1
1.1. OBJETIVOS, ÂMBITO E JUSTIFICAÇÃO .....	1
1.2. BASES DO TRABALHO .....	2
1.3. METODOLOGIA .....	2
1.4. ESTRUTURA E ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO .....	2
<b>2. CARACTERIZAÇÃO MATERIAL E CONSTRUTIVA DE PAREDES DE TABIQUE</b> .....	5
2.1. OBJETIVOS .....	5
2.2. INTRODUÇÃO .....	5
2.3. PAREDES DE TABIQUE PRESENTES NA CASA BURGUESA DO PORTO .....	6
2.3.1. CASA BURGUESA DO PORTO .....	6
2.3.2. FUNÇÃO DAS PAREDES DE TABIQUE .....	6
2.3.3. MATERIAIS .....	6
2.4. CARACTERIZAÇÃO DAS PAREDES DE TABIQUE .....	7
2.5. VISITA A CASAS BURGUESAS DO PORTO .....	8
<b>3. CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DE PAREDES DE TABIQUE</b> .....	15
3.1. OBJETIVOS .....	15
3.2. INTRODUÇÃO .....	15
3.3. INQUÉRITO A ESTUDANTES .....	16
3.4. ENSAIOS COM TABIQUE .....	20
3.4.1. CONSTITUIÇÃO DE PAREDES DE TABIQUE EM PORTUGAL .....	20
3.4.2. AVALIAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS DE PAREDES DE TABIQUE REFORÇADAS AO CORTE NO PLANO .....	20
3.4.3. CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DE PAREDES DE TABIQUE DO CENTRO HISTÓRICO DE VISEU .....	22

<b>3.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	25
<b>4. MODELAÇÃO NUMÉRICA</b> .....	27
<b>4.1. OBJETIVOS</b> .....	27
<b>4.2. INTRODUÇÃO</b> .....	27
<b>4.3. APRESENTAÇÃO E DESCRIÇÃO DOS MODELOS ESTUDADOS</b> .....	28
4.3.1. TABIQUE SIMPLES (MODELO S) .....	28
4.3.2. TABIQUE DUPLO (MODELO D).....	29
<b>4.4. PROGRAMA DE CÁLCULO AUTOMÁTICO UTILIZADO</b> .....	30
<b>4.5. COMPORTAMENTO DAS PAREDES DE TABIQUE À ENCURVADURA</b> .....	30
4.5.1. CONCEITOS GERAIS .....	30
4.5.2. ESTUDO NUMERICO DE UMA TÁBUA DE MADEIRA .....	32
4.5.3. MODELAÇÃO NUMÉRICA DE UMA PAREDE DE TABIQUE .....	34
4.5.3.1. CONDIÇÕES FRONTEIRA .....	34
4.5.3.2 MODELOS NUMÉRICOS .....	34
4.5.3.3 ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS .....	36
4.5.4. CONTRIBUIÇÃO DO RECOBRIMENTO PARA A RESISTÊNCIA À ENCURVADURA .....	38
<b>4.6. COMPORTAMENTO DAS PAREDES DE TABIQUE A AÇÕES HORIZONTAIS</b> .....	39
4.6.1. CONDIÇÕES DE FRONTEIRA .....	40
4.6.2. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....	40
4.6.3. CONTRIBUIÇÃO DO RECOBRIMENTO PARA A RIGIDEZ HORIZONTAL .....	41
<b>4.7. CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	41
<b>5. SETUP DOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS</b> .....	43
<b>5.1. OBJETIVOS</b> .....	43
<b>5.2. INTRODUÇÃO</b> .....	43
<b>5.3. CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL UTILIZADO</b> .....	43
<b>5.4. PROCESSO DE CONSTRUÇÃO DAS PAREDES</b> .....	47
5.4.1. PAREDE DE TABIQUE SIMPLES.....	47
5.4.2. PAREDE DE TABIQUE DUPLA.....	49
<b>5.5. SETUP DO ENSAIO EXPERIMENTAL</b> .....	51
5.5.1. SETUP DO ENSAIO À COMPRESSÃO NO PLANO.....	51
5.5.2. CONDIÇÕES DE CARREGAMENTO .....	59

<b>6. ENSAIOS EXPERIMENTAIS</b> .....	61
<b>6.1. OBJETIVOS</b> .....	61
<b>6.2. INTRODUÇÃO</b> .....	61
<b>6.3. ENSAIO PTS - CM</b> .....	61
6.3.1. ANÁLISE DA CURVA DE RESPOSTA GLOBAL FORÇA VS DESLOCAMENTO .....	62
6.3.2. ANÁLISE DA ROTAÇÃO DO FRECHAL SUPERIOR DA PAREDE .....	63
6.3.3. ANÁLISE DO DESLOCAMENTO DA PAREDE NA DIREÇÃO PERPENDICULAR AO SEU PLANO.....	64
6.3.4. ANÁLISE DOS DESLOCAMENTOS NO PLANO DA PAREDE.....	68
<b>6.4. ENSAIO PTS - CC</b> .....	69
6.4.1. ANÁLISE DA CURVA DE RESPOSTA GLOBAL FORÇA VS DESLOCAMENTO .....	69
6.4.2. ANÁLISE DA ROTAÇÃO DO FRECHAL SUPERIOR DA PAREDE .....	70
6.4.3. ANÁLISE DO DESLOCAMENTO DA PAREDE NA DIREÇÃO PERPENDICULAR AO SEU PLANO.....	72
6.4.4. ANÁLISE DOS DESLOCAMENTOS NO PLANO DA PAREDE.....	77
<b>6.5. ENSAIO PTD - CM</b> .....	78
6.5.1. ANÁLISE DA CURVA DE RESPOSTA GLOBAL FORÇA VS DESLOCAMENTO .....	79
6.5.2. ANÁLISE DA ROTAÇÃO DO FRECHAL SUPERIOR DA PAREDE .....	79
6.5.3. ANÁLISE DO DESLOCAMENTO DA PAREDE NA DIREÇÃO PERPENDICULAR AO SEU PLANO.....	80
6.5.4. ANÁLISE DOS DESLOCAMENTOS NO PLANO DA PAREDE.....	84
<b>6.6. ENSAIO PTD - CM</b> .....	84
6.6.1. ANÁLISE DA CURVA DE RESPOSTA GLOBAL FORÇA VS DESLOCAMENTO .....	85
6.6.2. ANÁLISE DA ROTAÇÃO DO FRECHAL SUPERIOR DA PAREDE .....	86
6.6.3. ANÁLISE DO DESLOCAMENTO DA PAREDE NA DIREÇÃO PERPENDICULAR AO SEU PLANO.....	86
6.6.4. ANÁLISE DOS DESLOCAMENTOS NO PLANO DA PAREDE.....	92
<b>6.7. ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS</b> .....	93
<b>6.8. ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS</b> .....	94
<b>7. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS</b> .....	95





## ÍNDICE DE FIGURAS

Fig.2.1. – Tábuas e ripas – Parede de tábuas simples e duplas [5].....	8
Fig.2.2. – Paredes de madeira na rua dos Caldeireiros .....	9
Fig.2.3. – Paredes de tabique simples (reforçadas) na rua dos Caldeireiros .....	10
Fig.2.4. – Paredes de tabique simples do edifício da rua de Cedofeita – pormenor das ripas .....	10
Fig.2.5. – Paredes de tabique simples degradadas do edifício da rua de Cedofeita.....	11
Fig.2.6. – Ligação de uma parede de tabique simples ao pavimento, presença de prumos e corte transversal de uma parede de tabique simples (edifício na rua de Cedofeita).....	11
Fig.2.7. – Paredes de tabique duplo (edifício na rua da Foz).....	12
Fig.2.8. – Ligação de uma parede de tabique dupla ao pavimento e vistas de cortes transversais de paredes de tabique duplas (edifício na rua da Foz).....	12
Fig.2.9. – Ligações metálicas em paredes de tabique (edifício na rua da foz).....	13
Fig.2.10. – Ligações entre ripas e tábuas através de pregos (edifício na rua da foz).....	13
Fig.3.1. – Inquérito dirigido a estudantes de Engenharia Civil.....	16
Fig.3.2. – Análise das respostas ao inquérito dirigido a estudantes de Engenharia Civil.....	17
Fig.3.3. – Inquérito dirigido a estudantes de outras áreas.....	18
Fig.3.4. – Análise das respostas ao inquérito dirigido a estudantes de outras áreas.....	19
Fig.3.5. – Tipologia de tabique estudada – desenho esquemático [26].....	21
Fig.3.6. – Esquema do ensaio de corte no plano do painel.....	21
Fig.3.7. – Comparação entre valores obtidos e os de referência (flexão estática).....	22
Fig.3.8. – Ensaio de flexão estática.....	22
Fig.3.9. – Comparação entre valores obtidos e os de referência (compressão axial).....	23
Fig.3.10. – Ensaio de compressão axial, modo de rotura e ensaio de dureza .....	23
Fig.3.13. – a) 1º Parede de tabique recolhida para o ensaio; b) Detalhe construtivo da parede de tabique; c) Detalhe construtivo das ripas com secção transversal trapezoidal.....	23
Fig.3.14. – 2º Parede de tabique recolhida para o ensaio – Parede de Tabique Simples; b) Detalhe construtivo da parede de tabique; c) Detalhe construtivo das ripas com secção transversal trapezoidal.....	24
Fig.3.15. – 3º Parede de tabique recolhida para o ensaio – Parede de Tabique Duplo; b) Detalhe construtivo da parede de tabique; c) Detalhe construtivo das ripas com secção transversal trapezoidal.....	24
Fig.4.1. – Esquema da Parede de Tabique Simples.....	28

Fig.4.2. – Esquema da Parede de Tabique Duplo.....	29
Fig.4.3. – O problema de Euler [4].....	31
Fig.4.4. – Modos de encurvadura [5]: a) n=1, b) n=2 e c) n= 3.....	32
Fig.4.5. – Modelo de cálculo estrutural de uma tábua vertical isolada.....	33
Fig.4.6. – 1º modo de encurvadura.....	33
Fig.4.7. – Carga vertical - a) Modelo S b) Modelo D.....	36
Fig.4.8. – Deformada do primeiro modo de encurvadura do modelo S.....	36
Fig.4.9. – Deformada do primeiro modo de encurvadura do modelo D.....	37
Fig.4.10. – Carga vertical - a) Modelo SA; b) Modelo DA.....	38
Fig.4.11. – a) Deformada do primeiro modo de encurvadura do modelo SA; b) Deformada do primeiro modo de encurvadura do modelo DA.....	39
Fig.4.12. – Carga horizontal - a) Modelo S; b) Modelo D.....	40
Fig.4.13. – Carga horizontal - a) Modelo SA; b) Modelo DA.....	41
Fig.5.1. – Pregos grandes e pequenos.....	44
Fig.5.2. – Tábuas de madeira.....	45
Fig.5.3. – Tábua de madeira.....	45
Fig.5.4. – Ripas e frechais.....	45
Fig.5.5. – Frechal (largura e espessura).....	46
Fig.5.6 – Ripas (largura e espessura).....	46
Fig.5.7. – Ripas colocadas aos terços da altura da parede.....	46
Fig.5.8. – Colocação dos frechais na mesa de construção.....	47
Fig.5.9 – Parede de Tabique Simples sem ripado.....	48
Fig.5.10. – Parede de Tabique Simples com ripado.....	48
Fig.5.11. – Parede de Tabique Simples concluída.....	49
Fig.5.12. – Espessura das tábuas de madeira (tábua vertical e diagonal).....	49
Fig.5.13. – Construção da Parede de Tabique Dupla.....	50
Fig.5.14. – Parede de Tabique Dupla sem ripado.....	50
Fig.5.15. – Parede de Tabique Dupla com ripado.....	51
Fig.5.16. – Dimensões da base de madeira.....	52



Fig.5.17. – Base de madeira.....	52
Fig.5.18. – Alçado do setup dos ensaios.....	53
Fig.5.19. – Distribuição de esforço axial nas tábuas, para carga vertical em 4 pontos.....	53
Fig.5.20. – Corte do setup dos ensaios.....	54
Fig.5.21. – Esquema do posicionamento dos aparelhos de medida.....	55
Fig.5.22. – Numeração dos LVDT.....	56
Fig.5.23. – Numeração das células de carga.....	56
Fig.5.24. – Pórtico metálico que contem o braço que impede o deslocamento do cabeço da parede para fora do plano da parede .....	57
Fig.5.25. – Vigas de distribuição de carga.....	57
Fig.5.26. – Varões e respectivas células de carga.....	58
Fig.5.27. – a) guias; b) perfis; c) macaco e célula de carga (no topo do macaco).....	58
Fig.5.35. – a) Pórtico fixo com respetivos LVDT's: b) LVDT de fio; c) ligação do fio do LVDT à parede .....	59
Fig.6.1 – Setup do ensaio PTS – CM.....	62
Fig.6.2 – Força vertical (Célula 1) vs Deslocamento (LVDT interno) do PTS - CM: a) sem descarga; b) com descarga.....	62
Fig.6.3 – Força vertical (Célula 1, 3 e 4) vs Deslocamento (LVDT interno) do PTS - CM: a) sem descarga; b) com descarga.....	63
Fig.6.4 – Rotação do frechal da parede vs deslocamento do PTS - CM: a) sem descarga; b) com descarga.....	63
Fig.6.5 – Vista transversal da deformação da parede – PTS – CM.....	64
Fig.6.6 – Deslocamentos medidos vs Carga medida pela Célula 1 em PTS – CM nos pontos: a) 2, 6 e 8; b) 5, 6 e 18; c) 19, 8 e 20; d) 4, 2 e 3; e) 6, 15 e 17.....	66
Fig.6.7 – Perfil transversal da parede PTS – CM para diferentes fases do carregamento.....	67
Fig.6.8 – Perfil transversal da parede PTS – CM após a descarga.....	68
Fig.6.9 – Deslocamentos relativos no plano da parede de PTS - CM: a) sem descarga; b) com descarga.....	68
Fig.6.10 – <i>Setup</i> do ensaio PTS – CC.....	69
Fig.6.11 – Força vertical (Célula 1) vs Deslocamento (LVDT interno) – PTS – CC.....	70
Fig.6.12 – Rotação do frechal da parede vs deslocamento – PTS – CC.....	71
Fig.6.13 – Vista transversal da rotação do frechal – PTS – CC.....	71

Fig.6.14 – Deslocamentos medidos vs Carga medida pela Célula 1 em PTS – CC nos pontos: a) 2, 6 e 8; b) 5, 6 e 18; c) 19, 8 e 20; d) 4, 2 e 3; e) 6, 15 e 17.....	72
Fig.6.15 – Perfil transversal da parede PTS – CC para diferentes fases do carregamento do primeiro ciclo: a) 0KN; b) 10KN; c) 15KN.....	73
Fig.6.16 – Perfil transversal da parede PTS – CC para diferentes fases do carregamento para o segundo ciclo: a) 0KN; b) 10KN; c) 20KN; d) 28KN.....	74
Fig.6.17 – Perfil transversal da parede PTS – CC para diferentes fases do carregamento para o terceiro ciclo: a) 0KN; b) 10KN; c) 20KN; d) 30KN; e) 42KN.....	75
Fig.6.18 – Perfil transversal da parede PTS – CC para diferentes fases do carregamento para o quarto ciclo: a) 0KN; b) 10KN; c) 20KN; d) 30KN; e) 40KN; f) 47KN.....	76
Fig.6.19 – Perfil transversal da parede PTS – CC após a descarga.....	77
Fig.6.20 – Deslocamentos relativos no plano da parede – PTS – CC.....	77
Fig.6.21 – Vista transversal da deformação da parede – PTS – CC.....	78
Fig.6.22 – Setup do ensaio PTD – CM.....	78
Fig.6.23 – Força vertical (Célula 1) vs Deslocamento (LVDT interno) – PTD - CM – a) sem descarga; b) com descarga.....	79
Fig.6.24 – Rotação do frechal da parede vs deslocamento – PTD - CM – a) sem descarga; b) com descarga.....	79
Fig.6.25 – Deslocamentos medidos vs Carga medida pela Célula 1 em PTD – CM nos pontos: a) 2, 6 e 8; b) 5, 6 e 18; c) 19, 8 e 20; d) 4, 2 e 3; e) 6, 15 e 17.....	81
Fig.6.26 – Vista transversal da deformação da parede – PTD – CM.....	82
Fig.6.27 – Perfil transversal da parede PTD – CM para diferentes fases do carregamento: a) 0KN; b) 10KN; c) 20KN; d) 30KN; e) 40KN; f) 50KN; g) 60,8KN.....	83
Fig.6.28 – Perfil transversal da parede PTD – CM após a descarga.....	84
Fig.6.29 – Deslocamentos relativos no plano da parede – PTD – CM.....	84
Fig.6.30 – <i>Setup</i> do ensaio PTD – CC.....	85
Fig.6.31 – Força vertical (Célula 1) vs Deslocamento (LVDT interno) – PTD – CC.....	85
Fig.6.32 – Rotação do frechal da parede vs deslocamento – PTD – CC.....	86
Fig.6.33 – Deslocamentos medidos vs Carga medida pela Célula 1 em PTD – CC nos pontos: a) 2, 6 e 8; b) 5, 6 e 18; c) 19, 8 e 20; d) 4, 2 e 3; e) 6, 15 e 17.....	87
Fig.6.34 – Perfil transversal da parede PTD – CC para diferentes fases do carregamento do primeiro ciclo: a) 0KN; b) 10KN; c) 17,6KN.....	88
Fig.6.35 – Perfil transversal da parede PTD – CC para diferentes fases do carregamento para o segundo ciclo: a) 0KN; b) 10KN; c) 20KN; d) 30KN; e) 38KN.....	89
Fig.6.36 – Perfil transversal da parede PTD – CC para diferentes fases do carregamento para o terceiro ciclo: a) 0KN; b) 10KN; c) 20KN; d) 30KN; e) 40KN; f) 48,8KN.....	90

Fig.6.37 – Perfil transversal da parede PTD – CC para diferentes fases do carregamento para o quarto ciclo: a) 0KN; b) 10KN; c) 20KN; d) 30KN; e) 40KN; f) 51KN.....	91
Fig.5.38 – Perfil transversal da parede PTD – CC após a descarga.....	91
Fig.6.39 – Vista transversal da deformação da parede – PTD – CC.....	92
Fig.6.40 – Deslocamentos relativos no plano da parede – PTD – CC.....	92
Fig.6.41 – Comparação carga <i>versus</i> deslocamento entre: a) ensaio PTS – CM e PTD – CM; b) PTS – CM e PTS – CC; c) PTD – CM e PTD – CC.....	93



## ÍNDICE DE QUADROS (OU TABELAS)

Tabela 4.1. – Dimensões dos elementos da Parede de Tabique Simples.....	29
Tabela 4.2. – Dimensões dos elementos da Parede de Tabique Duplo.....	30
Tabela 4.3. – Propriedades mecânicas e físicas da classe de resistência C18 da madeira de pinho nacional.....	32
Tabela 4.4. – Propriedades geométricas da secção da tábu de madeira.....	32
Tabela 4.5. – Propriedades do aço dos pregos.....	35
Tabela 4.6. – Propriedades geométricas e mecânicas das secções transversais dos elementos da parede.....	35
Tabela 4.7. – Resultados obtidos da análise numérica.....	42
Tabela 5.1. – Dimensões e quantidades dos materiais das paredes de tabique simples, por parede.....	44
Tabela 5.2. – Dimensões e quantidades dos materiais das paredes de tabique duplo, por parede.....	44
Tabela 6.1 – Valores das cargas críticas obtidas na análise numérica e experimental.....	94





# 1

## INTRODUÇÃO

### 1.1. OBJETIVOS, ÂMBITO E JUSTIFICAÇÃO

Grande parte dos edifícios construídos até meados do séc. XX em Portugal, maioritariamente constituídos por paredes de alvenaria resistente e pavimentos e cobertura de madeira, encontra-se bastante degradado, exigindo intervenções urgentes que permitam repor a sua boa funcionalidade através de ações de reabilitação. Estas ações podem resultar em atitudes mais ou menos conservativas, consoante o estado de degradação da estrutura e a atitude do interventor perante o edifício a intervencionar. Um dos elementos construtivos comumente presentes nestas construções são as paredes divisórias de madeira. Tipicamente são constituídas por elementos (prumos, tábuas...) de madeira (verticais, horizontais e diagonais) que criam uma estrutura/malha resistente que é preenchida por material mais ou menos resistente (argamassa, tijolos, terra...). No caso dos edifícios antigos do Porto, estas paredes são maioritariamente constituídas por tábuas ao alto, com ou sem a sobreposição de tábuas diagonais, sobre as quais assenta um fasquio horizontal que recebe o reboco, sendo batizadas como paredes de tabique. Por existir pouca ou mesmo nenhuma informação sobre a capacidade resistente destas paredes, a sua reabilitação resulta, na maior parte dos casos na sua substituição integral por outros materiais.

Posto isto, este trabalho visa estudar as características mecânicas e o comportamento estrutural das paredes de tabique face a ações de compressão, através de (i) modelação numérica e de (ii) uma campanha experimental realizada no Laboratório de Engenharia Sísmica e Estrutural (LESE) da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP) em modelos à escala real. De referir que o projeto tem como parceiros o gabinete de projeto NCREP, Consultoria em Reabilitação do Edificado e Património, Lda., e as empresas CS Construtora e Portilame.

A campanha experimental permitiu aprofundar o conhecimento relativo ao comportamento mecânico de paredes de tabique, através da determinação de características mecânicas, como: resistência, rigidez, dissipação de energia e modos de encurvadura, permitindo, deste modo, estimar o contributo destas paredes para o comportamento global dos edifícios face a solicitações verticais. No âmbito deste trabalho, os resultados obtidos nesta campanha



experimental serviram também de base para a validação/calibração dos modelos numéricos utilizados.

## **1.2. BASES DO TRABALHO**

O trabalho desenvolvido teve por base dissertações de mestrado e doutoramento, artigos publicados em conferências e livros. A caracterização da casa típica onde se integra o tipo de paredes de tabique estudado baseia-se principalmente nos trabalhos de Joaquim Teixeira [3]. Para a descrição das paredes de tabique contribui também a tese de doutoramento de Rui Cardoso [4] e a tese de mestrado de André Pires [5]. A modelação numérica presente baseou-se na tese de mestrado de André Pires [5] e foi realizada no programa de cálculo SAP2000. No que diz respeito ao comportamento mecânico das paredes de tabique, referem-se as teses de mestrado da UTAD dos alunos Joana Maria Pereira Pinto de Carvalho [10], Armando José Branco Cepeda [11] e José Manuel Gonçalves Martinho [12], uma tese de mestrado da ESTGV, do aluno Rafael Nunes Pinto [13] e uma tese de mestrado da Universidade do Minho realizada por Inês Fonseca, Artur Feio e José Machado [14].

Procuraram-se outros elementos bibliográficos relacionados com o estudo de paredes de tabique, tendo-se concluído que existe muito pouca informação, principalmente no que diz respeito ao seu comportamento mecânico. A escassa informação bibliográfica determina a necessidade de investigação nesta área, sendo pretendendo-se com este trabalho, inovador na avaliação experimental do comportamento de paredes de tabique, contribuir para o desenvolvimento do conhecimento neste domínio.

## **1.3. METODOLOGIA**

A metodologia associada à realização deste trabalho contém as seguintes tarefas:

- Revisão bibliográfica relacionada com o tema;
- Modelação numérica de paredes de tabique;
- Simulação numérica do comportamento estrutural de paredes de tabique, com e sem reboco, analisando o fenómeno de instabilidade a ações verticais e a rigidez horizontal destas;
- Avaliação experimental do comportamento estrutural de paredes de tabique sem reboco, às ações verticais.

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

Este trabalho encontra-se dividido em 5 capítulos. No presente capítulo é feito o enquadramento do trabalho realizado; são apresentados os objetivos e motivos que desencadearam a sua realização, assim como a metodologia usada na execução das diversas tarefas discriminadas.

No capítulo 2 faz-se a caracterização histórica, material e construtiva das paredes de tabique. Em primeiro lugar realiza-se uma breve descrição do tipo de edifício onde estas paredes

normalmente se inserem, analisando aspetos como o número de pisos e o tipo de utilização. Faz-se depois a caracterização das dimensões e do material presente nas paredes de tabique.

No capítulo 3 é feita a recolha de resultados de ensaios experimentais com paredes de tabique, realizados em dissertações de mestrado. O capítulo 4 trata da modelação numérica das paredes de tabique. Procura-se, numa primeira fase, descrever o fenómeno da encurvadura, já que o maior problema deste tipo de paredes é a sua instabilidade. Explicado o conceito envolvido, faz-se a apresentação e descrição dos modelos estudados e da forma como foram modelados no programa de cálculo estrutural. Posteriormente simula-se comportamento estrutural de paredes de tabique, analisando-se os fenómenos de instabilidade associados às ações verticais; é também avaliada a sua rigidez horizontal no plano, a carga vertical constante e verificado o contributo do reboco para a capacidade resistente das paredes em estudo.

No capítulo 5 é apresentada a campanha experimental realizada em paredes de tabique construídas para o efeito. Descreve-se a construção dos provetes e a definição do *setup*. No capítulo 6 é descrita a realização dos ensaios e dos resultados, depois de devidamente tratados. No final deste capítulo é também feita a comparação entre os resultados obtidos numericamente e os resultados obtidos experimentalmente.

Por último, no capítulo 7 apresentam-se as principais conclusões obtidas no decurso deste trabalho.



# 2

## CARATERIZAÇÃO MATERIAL E CONSTRUTIVA DE PAREDES DE TABIQUE

### 2.1. OBJETIVOS

Os objetivos deste capítulo são:

- Justificar a necessidade do estudo/análise de paredes de tabique.
- Caracterizar as paredes de tabique da casa Burguesa do Porto.
- Identificar ensaios com elementos de características semelhantes às paredes de tabique.

### 2.2. INTRODUÇÃO

Antes de qualquer estudo experimental é necessário conhecer a estrutura a analisar, neste caso as componentes e características das paredes de tabique. Este capítulo caracteriza as paredes de tabique, em particular as existentes na zona do Porto e que representam a tipologia de paredes analisadas na presente dissertação.

Um elemento construtivo de tabique é formado por uma estrutura de madeira que é revestida em ambas as faces por uma argamassa à base de terra ou cal [1]. Este tipo de construção é muitas vezes considerado como uma técnica construtiva de terra, tal como a taipa e o adobe, distinguindo-se destas pelo facto de recorrer a uma estrutura resistente de madeira, sendo a terra um elemento de enchimento [2]. No âmbito desta tese, as paredes de tabique serão integradas na categoria das estruturas de madeira. Em relação aos tabiques integrados nas construções de terra, as paredes em análise apresentam um menor espaçamento entre as tábuas de madeira que é preenchido, não por terra/saibro, mas por uma argamassa à base de saibro e cal. Contudo, em ambas o acabamento final é efetuado com um reboco à base de cal.

Uma parede de tabique tem normalmente como função a divisão/compartimentação de um espaço interno, mas ao longo deste trabalho ir-se-á constatar não ser essa a sua única função.

### 2.3. PAREDES DE TABIQUE PRESENTES NA CASA BURGUESA DO PORTO

Nesta secção descreve-se a tipologia da casa típica do Porto, bem como das paredes de tabique existentes. É identificada a tipologia construtiva destas paredes, realçando as técnicas de construção e materiais utilizados e a sua funcionalidade no edifício.

#### 2.3.1. CASA BURGUESA DO PORTO [3]

A casa burguesa do Porto é caracterizada por ser alta, esbelta, regular, inicialmente de apenas uma frente, sendo, posteriormente, tipicamente de duas frentes com dois ou três pisos.

No século XVII, a casa de uma só frente apresentava profundidades entre os 10 e 15 m e larguras que não excediam os 4,5 m, enquanto na de duas frentes, a profundidade rondava os 20 a 30m e largura típica de 5 a 6m. Ambas são polifuncionais, servindo como habitação e local de trabalho, sendo este último localizado no rés-do-chão. As paredes de todos os pisos eram construídas em tabique, com a exceção do rés-do-chão, que eram em pedra.

Atualmente a casa burguesa do Porto não se apresenta da maneira referida anteriormente, como podemos ver nas secções seguintes.

#### 2.3.2. FUNÇÃO DAS PAREDES DE TABIQUE

Na casa típica do Porto, as paredes de tabique estão presentes tanto como paredes interiores como exteriores, sendo as primeiras construídas apenas com a função de compartimentação dos espaços, não apresentando, aparentemente, qualquer função estrutural. No entanto, como estes elementos estão ligados a outros elementos construtivos, intervêm no contraventamento do edifício [4 in 5]. Quando presentes em paredes exteriores, já se pode afirmar que têm função estrutural; fecham o edifício e estão sujeitas a ações verticais, nomeadamente das coberturas, e horizontais, por exemplo da ação do vento, devendo apresentar adequadas capacidades resistentes [4 in 5].

#### 2.3.3. MATERIAIS

As paredes de tabique existentes na zona do Porto são constituídas por tábuas de madeira e argamassa à base de cal, que serve tanto como material de enchimento, como revestimento. Segundo o arquiteto Joaquim Teixeira, as espécies de madeira que geralmente se utilizavam são o pinho (*Pinus Pinaster*) e o castanho (*Castanea Sativa* Mill.), sendo o pinho o mais correntemente usado [5].

#### Madeira

Poucos materiais de construção possuem os benefícios ambientais da madeira, que a tornam um material extremamente apelativo na área da construção. Não só é o material de construção mais utilizado, mas também o mais sustentável, de fácil acesso e instalação, respondendo facilmente a problemas de natureza estrutural quando utilizados em estruturas adequadamente projetadas; apresentam algumas vantagens em relação a outros materiais, nomeadamente no funcionamento à tração [6, 7]. No entanto, quando utilizada em ambientes agressivos, deve ser protegida para garantir um desempenho adequado; é combustível, atacável por insetos e fungos e particularmente sensível à presença de água [8].

Em termos de capacidade resistente, a madeira é um material anisotrópico, ou seja comporta-se de maneira diferente consoante a direção do carregamento em relação à orientação das fibras. Os anéis que a constituem são o resultado do crescimento natural da árvore, dividindo-se em anéis de Primavera (menos densos, mais claros e menos resistentes) e de Outono (densos, mais escuros e resistentes). Desta forma, a resistência depende da orientação das fibras face ao carregamento, sendo mais resistente quando o carregamento é paralelo ao fio da madeira, visto serem os anéis de Outono que asseguram a transmissão do carregamento [8]. Para além da orientação das fibras, a resistência também depende de:

- Espécie botânica.
- Localização dentro do lenho.
- Humidade.
- Massa volúmica.
- Defeitos.

Neste âmbito, é de grande importância a atribuição de classes de qualidade e de resistência às madeiras. Esta atribuição é possível com o auxílio das normas europeias pertencentes à série EN 14081 e da Norma NP EN 338 [9].

#### Argamassa

A argamassa, normalmente constituído por uma mistura de saibro e cal, contribui para a coesão e solidez da parede, mas também para a sua proteção, funcionando como a camada de suporte do reboco de acabamento, também designado por “camada de sacrificio” [4].

## **2.4. CARACTERIZAÇÃO DAS PAREDES DE TABIQUE [3, 5]**

Nos edifícios da zona do Porto, existem dois tipos de paredes em tabique: paredes simples e duplas, sendo as primeiras constituídas por um tabuado vertical e as segundas por um tabuado duplo, vertical e diagonal sobrepostos. Estas paredes são geralmente executadas após a habitação ser assoalhada ou sobradada, ou seja já na fase de acabamentos.

As paredes mais antigas, referentes ao século XVII, são usualmente formadas por prumos (barrotes) de 7cm, de secção quadrangular, espaçados entre si de 1 metro, ligados e/ou apoiados nas suas extremidades a frechais, superior e inferior, de 7 a 8cm, de secção quadrangular. Estes elementos nem sempre estão presentes desta forma, podendo nem mesmo existir, como se verifica nalguns edifícios antigos da cidade do Porto.

Verifica-se, de acordo com a informação obtida, que as paredes de tabique não apresentam dimensões completamente standardizadas, sendo que os valores para a espessura, largura e comprimento, tanto das paredes como das tábuas constituintes, variam de edifício para edifício, embora balizados entre valores extremos. Por esta razão foram feitas visitas de campo, de forma a averiguar as características das paredes de tabique presentes na cidade do Porto.

Com base na visita a casas antigas da cidade do Porto, apresentadas na secção seguinte, e a elementos bibliográficos, determinou-se que nas paredes simples a estrutura de madeira é constituída, em média, por um tabuado de madeira com uma espessura de 2,5cm a 3,0cm, com largura entre os 24 e 28cm, afastado de cerca de 2cm, sobre o qual é pregado um fasquiado pelo interior e exterior, com um prego em cada tábua, servindo de apoio ao revestimento de

argamassa. O fasquio tem formato trapezoidal com a face maior do trapézio de 2,5cm, a face menor de 2cm e espessura de 1,3cm, sendo a folga entre fasquios de cerca de 3 a 4cm. Na base e no topo da parede pode existir um frechal com secção de 8x8cm<sup>2</sup>. Tal como se referiu, todos os valores apresentados resultaram de uma média aproximada dos valores encontrados em cada edifício. A única diferença entre a parede de tabique simples e duplo está no tabuado que, nesta última, é constituído por tábuas dispostas na vertical e diagonal com larguras e espessuras idênticas às já referidas, embora as tábuas diagonais parecem ter, tendencialmente, uma largura superior. O tabuado diagonal pode apresentar variações na sua disposição, sendo, usualmente, distribuído a partir dos cantos ou do centro.

Na figura 1 apresentam-se esquemas ilustrativos de uma parede de tabique simples e uma parede de tabique dupla, respetivamente [5].

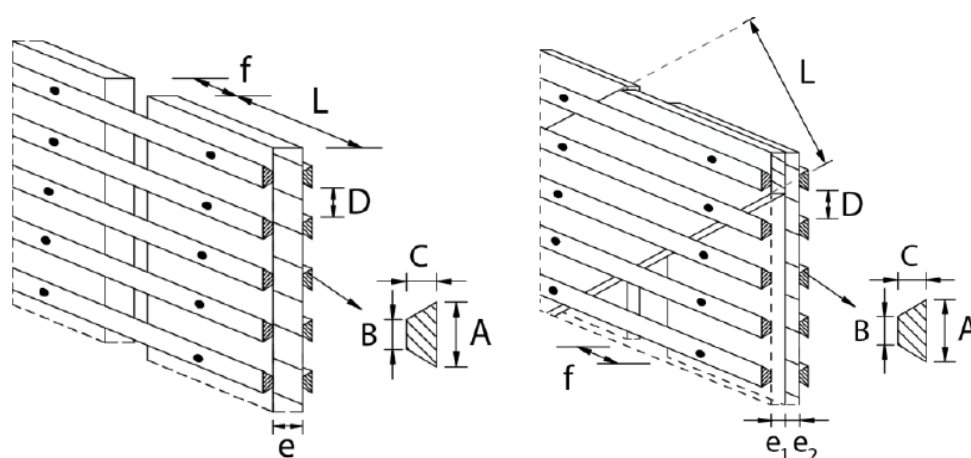


Fig.2.1 – Tábuas e ripas – Parede de tabique simples e duplas [5]

Legenda:

L - comprimento da tábua

f - espaçamento entre tábuas

A - maior face do trapézio

B - menor face do trapézio do fasquio

C - espessura do fasquio

e - espessura da tábua do tabique simples

e1 - espessura da tábua vertical do tabique duplo

e2 - espessura da tábua diagonal do tabique duplo

## 2.5. VISITA A CASAS BURGUESAS DO PORTO

Com o apoio da equipa do NCREP, foi feita uma visita a três casas típicas do Porto: uma na rua dos Caldeireiros, outra na rua de Cedofeita e por fim uma terceira na zona da Foz. Como estes

edifícios estavam a ser reabilitados foi possível observar as paredes de tabique, sem recobrimento, algumas danificadas, outras reabilitadas. Foi feito o levantamento de várias paredes de tabique de forma a caracteriza-los.

Na figura 2.2, correspondente o edifício da rua dos Caldeireiros, são apresentadas várias fotografias e a descrição dos elementos presentes em cada uma. Como se pode observar, este conjunto de paredes não apresenta as características típicas de uma parede de tabique, tal como as definimos anteriormente, tendo sido construídas um pouco aleatoriamente, sem regras definidas, apresentando, na sua constituição, elementos de pedra (pela sua estrutura, sendo constituídas por prumos formando células preenchidas com, neste caso, tijolo, encaixam-se nas paredes designadas de frontal). As tábuas de madeira têm dimensões e orientações totalmente diferentes entre si. De referir também a existência de grandes vazios na estrutura destas paredes. Na figura da esquerda podemos ver uma parede de tabique típica encostada a uma parede aleatoriamente construída.

Uma possível solução de reabilitação/reforço pode passar por se construir uma estrutura de madeira nova na face das paredes de tabique existentes, tal como se ilustra na figura 2.3 ainda para a o edifício da rua dos Caldeireiros.



Fig.2.2 – Paredes de madeira na rua dos Caldeireiros

As paredes de tabique presentes nas imagens da figura 2.3 não contêm os frechais superior e inferior. Não existe qualquer tipo de ligação entre as paredes de tabique e as paredes inferiores em alvenaria de pedra, estando apenas encostadas nestas, como mostra a fotografia da esquerda. O mesmo se pode dizer sobre a ligação da parede às vigas de madeira do piso superior. Neste edifício foram apenas encontradas paredes de tabique simples.

Na figura 2.4, correspondente ao edifício da rua de Cedofeita, observam-se as ripas mais largas, situadas geralmente a 1/3 e a 2/3 da altura da parede, podendo no entanto variar, como mostram as fotografias. A largura destas varia entre os 4 e 8cm.





Fig.2.3 – Paredes de tabique simples (reforçadas) na rua dos Caldeireiros



Fig.2.4 – Paredes de tabique simples do edifício da rua de Cedofeita – pormenor das ripas

No edifício situado na rua da Torrinha foram encontradas paredes completamente degradadas, apresentadas na figura 2.5, não havendo possibilidade de reabilitação, o que levará à sua substituição integral.

Na figura 2.6 apresenta-se outra imagem que mostra que também esta parede não apresenta qualquer ligação com o pavimento, estando apenas “pousada” em cima do pavimento, ainda a existência de prumos, espaçados de 1m, e de uma viga a substituir os frechais (viga entre pisos). Na mesma figura observa-se o corte de uma parede simples, com tábuas de espessura de cerca de 2,5cm, ripas com espessura média de 1,3cm e argamassa com 2,5cm de espessura média. No edifício da rua de Cedofeita não foi possível observar paredes de tabique duplo. Já no edifício da Foz foi possível levantar a geometria de paredes de tabique simples e duplo.



Fig.2.5 – Paredes de tabique simples degradadas do edifício da rua da Torrinha



Fig.2.6 – Ligação de uma parede de tabique simples ao pavimento, presença de prumos e corte transversal de uma parede de tabique simples (edifício na rua de Cedofeita)

Na figura 2.7 apresentam-se dois tipos de paredes de tabique duplo, separadas por um prumo. O que distingue as duas paredes é a disposição das tábuas inclinadas, sendo que na da esquerda as tábuas estão inclinadas todas na mesma direção e na da direita estão inclinadas em duas direções. Na figura 2.8 apresentam imagens de ligações de paredes de tabique dupla aos pavimentos, também aqui apenas encostadas, e de cortes transversais de paredes: tábuas verticais e diagonais com espessura de cerca de 2,5cm, ripas com espessura média de 1,3cm e argamassa com 2,5cm de espessura média.





Fig.2.7 – Paredes de tabique duplo (edifício na Foz)



Fig.2.8 – Ligação de uma parede de tabique dupla ao pavimento e vistas de cortes transversais de paredes de tabique duplas (edifício na rua da Foz)

Por vezes são encontradas ligações metálicas entre paredes de tabique e paredes de outro tipo, entre paredes de tabique e o pavimento e entre paredes de tabique e o pavimento do piso superior, como mostra a figura 2.9. A figura 2.10 mostra que as ripas ligam-se às tábuas através de pregos, um em cada tábu.

Ao longo da visita aos três edifícios foram feitos levantamentos das dimensões de todos os elementos das paredes de tabique encontradas, o que permitiu confirmar quais as principais características das paredes de tabique presentes nas casas burguesas do Porto, tal como se apresenta na secção 2.4.



Fig.2.9 – Ligações metálicas em paredes de tabique (edifício na rua da Foz)



Fig.2.10 – Ligações entre ripas e tábuas através de pregos (edifício na rua da Foz)



# 3

## CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DE PAREDES DE TABIQUE

### 3.1. OBJECTIVOS

Os objetivos deste capítulo são:

- Analisar a sensibilidade de estudantes de Engenharia Civil e de outras áreas, em relação às paredes de tabique.
- Rever bibliograficamente campanhas experimentais envolvendo paredes de tabique realizadas até à data.

### 3.2. INTRODUÇÃO

As paredes de tabique são elementos construtivos comuns em construções antigas, usualmente considerados como não estruturais, tendo apenas a função de divisão/compartimentação de espaços. Contudo, alguns estudos realizados e a sensibilidade dos projetistas do NCREP (empresa com larga experiência em reabilitação, em particular da casa burguesa do Porto) indicam que estas paredes possam ter uma capacidade resistente maior do que a expectável, tendo por isso uma função estrutural.

Nos primeiros anos de vida da estrutura, as paredes de tabique têm pouco ou nenhum contributo para a capacidade resistente vertical da estrutura. No entanto, com a utilização regular da estrutura e, conseqüentemente, com o aumento das deformações dos pavimentos, as paredes de tabique passam a contribuir para a capacidade resistente, recebendo carga dos pavimentos.

Assim, propõe-se analisar e estudar as características mecânicas e o comportamento estrutural destas paredes, realizando uma campanha experimental exploratória em paredes construídas à

escala 1:1, reproduzindo a mesma tipologia, nomeadamente os materiais e as dimensões dos elementos estruturais que as constituem.

Dado tratar-se da primeira campanha experimental de paredes de Tabique sujeitas a compressão no plano, neste capítulo é feita referência a diversos ensaios com tabique realizados até à data.

### 3.3. INQUÉRITO A ESTUDANTES

Neste ponto apresentam-se os resultados de um inquérito sumário realizado aos alunos de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto e também a estudantes de outras áreas da mesma Universidade e que pretendia, de uma forma simples, perceber qual a perceção que tinham sobre a importância/relevância das paredes de tabique. Considerando que os alunos de Engenharia Civil possuem, ou deveriam possuir pela sua formação, conhecimentos mais sólidos sobre o tema, o seu parecer não pode ser apreendido como senso comum e por isso o inquérito foi realizado de maneira a poder diferenciar esses pareceres.

Na figura 3.1 é apresentado o inquérito dirigido aos estudantes de Engenharia Civil, seguido da análise estatística das 133 respostas obtidas, figura 3.2. Na figura 3.3 e 3.4 temos exatamente a mesma informação, mas para estudantes de outras áreas. Este segundo questionário obteve 251 respostas.

## Capacidade Resistente de Paredes de Tabique

O meu nome é Andreia Rebelo, estudante de Mestrado Integrado em Engenharia Civil na Universidade do Porto e estou a preparar uma dissertação na área de Estruturas em que é feita a análise experimental do comportamento de paredes de tabique face a ações de compressão. Este estudo deve-se ao facto de existir pouca ou mesmo nenhuma informação relativa a este assunto, resultando, regra geral, na substituição integral destes elementos aquando da sua reabilitação. Paredes de tabique são paredes divisórias ou de compartimentação que dividem os espaços e são limitadas pelas paredes mestras.

Este inquérito tem como objetivo conhecer a opinião de estudantes de engenharia civil sobre este assunto.

#### Sabias o que é uma Parede de Tabique ?

- Sim
- Não

#### Achas que estas paredes têm capacidade resistente ? Ou têm apenas função de divisão/compartimentação ?

Ou seja, se suportam parte do carregamento transmitido verticalmente, por exemplo pelas lajes, paredes superiores, cobertura, etc.

- Sim, apresentam capacidade resistente.
- Não, apenas servem para compartimentação.
- Não tenho conhecimento suficiente na área para retirar alguma conclusão.

#### Comentários

Fig.3.1 – Inquérito dirigido a estudantes de Engenharia Civil

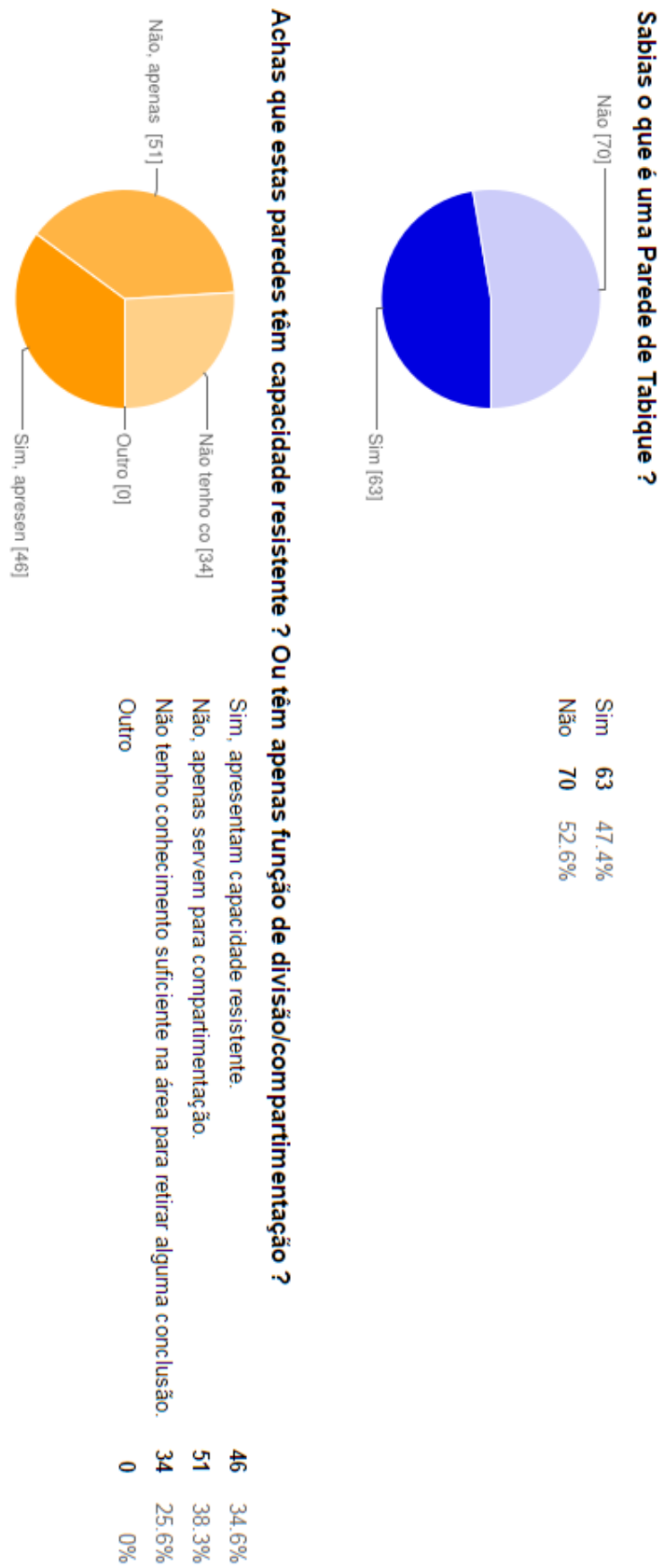


Fig.3.2 – Análise das respostas ao inquérito dirigido a estudantes de Engenharia Civil da UP



## Capacidade Resistente de Paredes de Tabique

O meu nome é Andreia Rebelo, estudante de Mestrado Integrado em Engenharia Civil na Universidade do Porto e estou a preparar uma dissertação na área de Estruturas em que é feita a análise experimental do comportamento de paredes de tabique face a ações de compressão. Este estudo deve-se ao facto de existir pouca ou mesmo nenhuma informação relativa a este assunto, resultando, regra geral, na substituição integral destes elementos aquando da sua reabilitação. Paredes de tabique são paredes divisórias ou de compartimentação que dividem os espaços e são limitadas pelas paredes mestras.

Este inquérito tem como objetivo conhecer a opinião de estudantes de engenharia civil, mas também estudantes de outras áreas, sobre este assunto, uma vez que são elementos presentes no nosso dia-a-dia, como, por exemplo, nas nossas próprias casas.

### Sabias o que é uma Parede de Tabique ?

- Sim
- Não

### Achas que estas paredes têm capacidade resistente ? Ou têm apenas função de divisão/compartimentação ?

Ou seja, se suportam parte do carregamento transmitido verticalmente, por exemplo pelas lajes, paredes superiores, cobertura, etc.

- Sim, apresentam capacidade resistente.
- Não, apenas servem para compartimentação.
- Não tenho conhecimento suficiente na área para retirar alguma conclusão.

### Comentários

Fig.3.3 – Inquérito dirigido a estudantes de outras áreas

## DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A análise das respostas aos inquéritos, permite concluir que a percentagem de estudantes que desconhecem o conceito de parede de tabique é superior a 50%, rondando os 53% para os estudantes de engenharia civil e 68% para os estudantes de outras áreas. Isto confirma a falta de conhecimento sobre este tipo de paredes, sendo referidas apenas como “paredes de madeira antigas”.

Relativamente à sua capacidade resistente, a opinião dos estudantes de engenharia civil dividiu-se bastante, enquanto os estudantes de outras áreas acham, maioritariamente, que as paredes de tabique servem apenas como compartimentação. É de referir que a maior parte dos estudantes de outras áreas e uma grande parte de estudantes de engenharia civil, não apresentam conhecimentos suficientes para expressarem a sua opinião, o que reforça mais uma vez a falta de informação sobre este assunto. Este inquérito realça, por isso, a importância do estudo presente neste trabalho e a necessidade de formação nesta área por parte dos engenheiros civis.

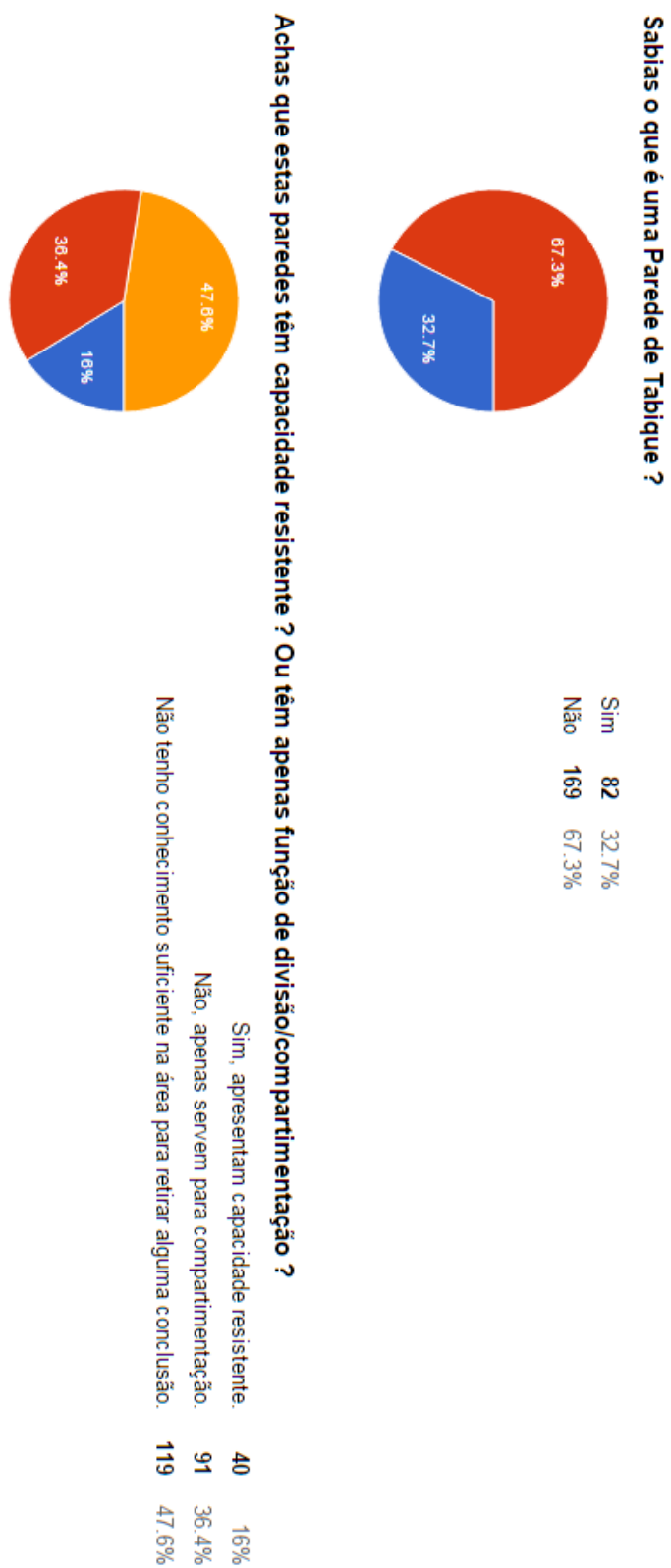


Fig.3.4 – Análise das respostas ao inquérito dirigido a estudantes da UP que não de Engenharia Civil

### 3.4. ENSAIOS COM TABIQUE

Procuraram-se elementos bibliográficos relacionados com o estudo do comportamento mecânico de construções em tabique, especialmente paredes de tabique, tendo-se verificado que existe pouca informação relativamente ao tema. Ainda menos informação foi encontrada sobre dados experimentais de construções em tabique.

Nas secções seguintes são apresentados vários trabalhos encontrados relacionados com este assunto.

#### 3.4.1. CONSTITUIÇÃO DE PAREDES DE TABIQUE EM PORTUGAL

Com o objetivo de identificar e aprofundar o conhecimento sobre a constituição e tipologia das construções de tabique em Portugal, efetuaram-se registos fotográficos e levantamentos destas construções na Região de Trás-os-Montes e Alto Douro, na Associação de Municípios do Alto Tâmega, na Associação de Municípios da Terra fria do Nordeste Transmontano e no Centro Histórico de Viseu. Este estudo foi feito nas teses de mestrado dos alunos Joana Maria Pereira Pinto de Carvalho [10], Armando José Branco Cepeda [11], José Manuel Gonçalves Martinho [12] e Rafael Nunes Pinto [13], respetivamente. Nestes trabalhos, para além da caracterização detalhada da tipologia das paredes de tabique encontradas, foram também recolhidas amostras de material para posterior estudo laboratorial e avaliação das características de todas as suas componentes.

#### 3.4.2. AVALIAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS DE PAREDES DE TABIQUE REFORÇADAS AO CORTE NO PLANO [14]

Em 2014, na Universidade do Minho, Inês Fonseca, Artur Feio e José Machado [14] realizaram uma campanha experimental que permitiu conhecer o comportamento mecânico das paredes de tabique sujeitas ao corte no plano, e qual o contributo que placas de derivados de madeira podem ter na melhoria desse mesmo comportamento. Para tal foram utilizados painéis representativos de uma tipologia de parede de tabique, que consistiam em tábuas costaneiras de pinho dispostas verticalmente, dispendo-se ortogonalmente a estas tábuas, nas duas faces, um fasquiado igualmente de pinho. A esta estrutura de madeira foi adicionada uma argamassa de enchimento e por fim um reboco.

Os painéis para ensaio foram construídos à escala real, mas considerando um volume parcial de parede (0,90m x 0,44m x 0,06m). Os painéis são constituídos por tábuas de secção retangular com 100mm x 30mm colocadas na vertical, dispendo-se ortogonalmente um fasquiado de secção trapezoidal com 18mm na face exterior, 10mm na face interior e 15mm de espessura. A ligação tábua-fasquia foi efetuada por meio de pregos de secção quadrada com 1,38mm e 30mm de comprimento.

Foram produzidos quarenta painéis, dos quais vinte com um afastamento entre tábuas costaneiras de 10mm e outros vinte com um afastamento de 20 mm. Na figura 3.5 pode observar-se a tipologia da parede estudada.

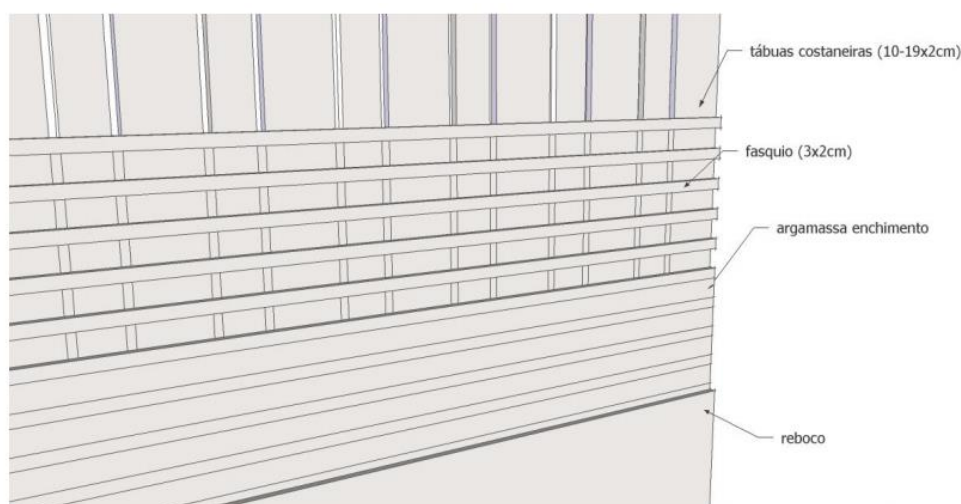


Fig. 3.5 - Tipologia de tabique estudada – desenho esquemático [26]

Antes dos ensaios foram reforçados dez painéis com placas de aglomerado de fibras de madeira de 8mm de espessura, e outros dez com placas de contraplacado leve de Okoumé de 10mm de espessura.

Os ensaios de corte foram conduzidos de acordo com o preconizado na norma europeia EN 789, sendo o ensaio conduzido até à imposição de uma deformação máxima de 25mm no ponto de leitura de deslocamento, 1A. O esquema deste ensaio está representado na figura 3.6.

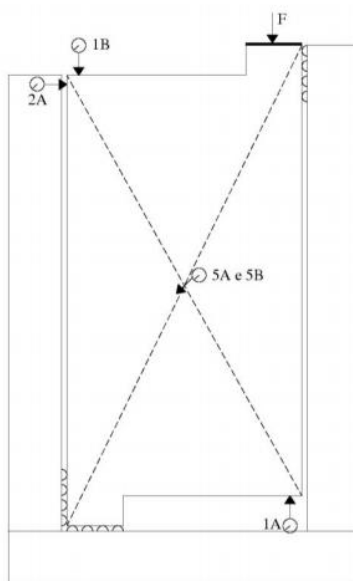


Fig.3.6 - Esquema do ensaio de corte no plano do painel [26]

A análise e discussão dos resultados permitiram concluir que o comportamento mecânico dos painéis de tabique ao corte no plano é determinado pelo comportamento das ligações pregadas fasquiado-tábuas costaneiras, sendo a contribuição da argamassa quase inexistente. Os dados experimentais permitiram inferir que as paredes de tabique 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  $67,87\text{N/mm}^2$ .

O reforço por meio de placas de derivados de madeira permite aumentar significativamente esse comportamento, apresentando os painéis reforçados em média um módulo médio de distorção no plano do painel de  $1377,29\text{N/mm}^2$ , correspondendo a um aumento de cerca de 20 vezes relativamente aos painéis de tabique não reforçados.

### 3.4.3. CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DE PAREDES DE TABIQUE DO CENTRO HISTÓRICO DE VISEU [13]

Com o intuito de conhecer as propriedades físicas e mecânicas da madeira, a estrutura resistente das construções em tabique, Rafael Nunes Pinto realizou alguns ensaios experimentais em amostras de tábuas recolhidas de paredes de tabique referentes a dois casos de estudo da sua tese: análise à flexão estática, à compressão axial e à dureza.

Para tal, foram preparados vários provetes, removendo previamente os elementos mecânicos de ligação de algumas tábuas e do fasquiado que lhe estava subjacente. Os provetes eram todos iguais, apenas variaram no seu comprimento final, em função do ensaio em questão.

Os resultados obtidos nos ensaios de flexão estática, apresentado no quadro da figura 3.7 e na figura 3.8, permitiram obter os valores da força máxima de rotura e dos deslocamentos ocorridos a meio vão; verificou-se que os modos de rotura obtidos não seguem um padrão, devido à anisotropia do material e à eventual presença de defeitos. Os valores médios obtidos revelaram-se inferiores, quando comparados com os de referência, como se pode verificar na figura.

	Valores obtidos (média)		Valores de referência	
	Ed.1	Ed.2	Leiria	Viana
<b>Densidade (H=12%) (<math>\text{kg/m}^3</math>)</b>	652	560	640	565
<b>Tensão Rotura (H=12%) (<math>\text{kg/cm}^2</math>)</b>	1285	935	1519	1350

Fig.3.7 - Comparação entre valores obtidos e os de referência (flexão estática) [13]



Fig.3.8 - Ensaio de flexão estática [13]

Com o ensaio à compressão axial, representado nas figuras 3.10, conseguiu-se extrair de forma direta o valor da força máxima de rotura e os respetivos deslocamentos medidos. Ao contrário do ensaio de flexão, a dispersão existente não é muito grande, uma vez que os defeitos e furos existentes na madeira não condicionam tanto o resultado final. Os valores médios obtidos encontraram-se dentro dos valores de referência, como se pode verificar no quadro da figura 3.9.

Em termos de dureza (figura 3.12), os valores médios obtidos no lote de amostras encontravam-se acima dos valores de referência.

	Valores obtidos (média)		Valores de referência	
	Ed.1	Ed.2	Leiria	Viana
Densidade (H=12%) (kg/m <sup>3</sup> )	665	572	640	565
Tensão Rotura (H=12%) (kg/cm <sup>2</sup> )	629	479	685	590

Fig.3.9 - Comparação entre valores obtidos e os de referência (compressão axial) [13]



Fig.3.10 - Ensaio de compressão axial, modo de rotura e ensaio de dureza [13]

Ao contrário do que era expectável, comprovou-se que a madeira, após tantos anos de serviço, conservava boa parte das suas propriedades físicas e mecânicas. Após a avaliação das características mecânicas dos elementos de madeira das paredes de tabique, foi feita uma avaliação da capacidade resistente destas paredes, através da realização de ensaios à flexão em três panos de parede de tabique à escala real, figuras 3.11, 3.12 e 3.13, nas instalações da Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro (UTAD).

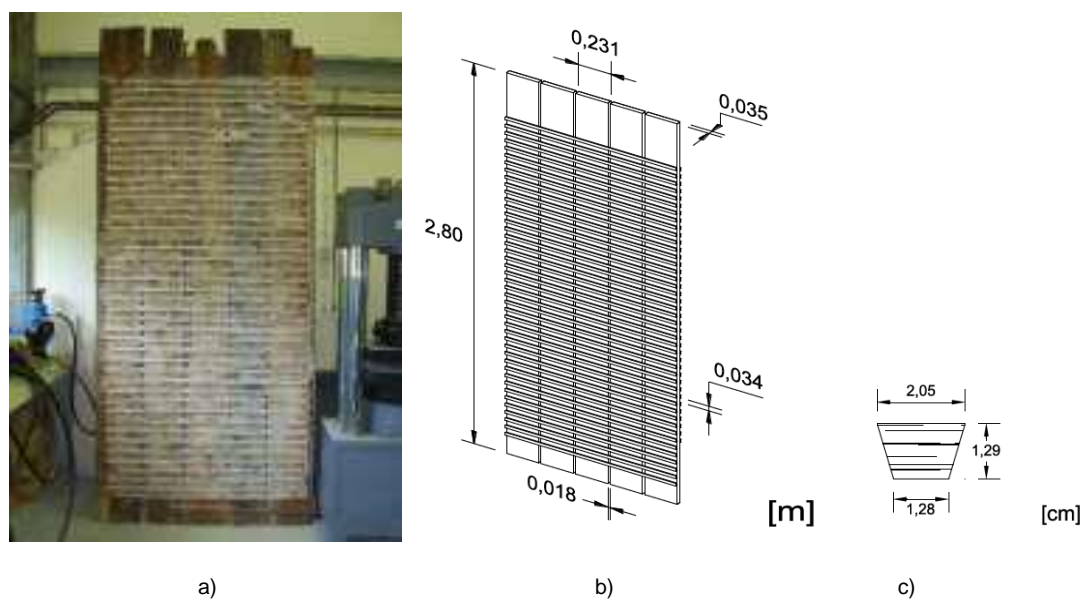


Fig.3.13 - a) 1ª Parede de tabique recolhida para o ensaio – Parede de tabique simples; b) Detalhe construtivo da parede de tabique; c) Detalhe construtivo das ripas com secção transversal trapezoidal [13]



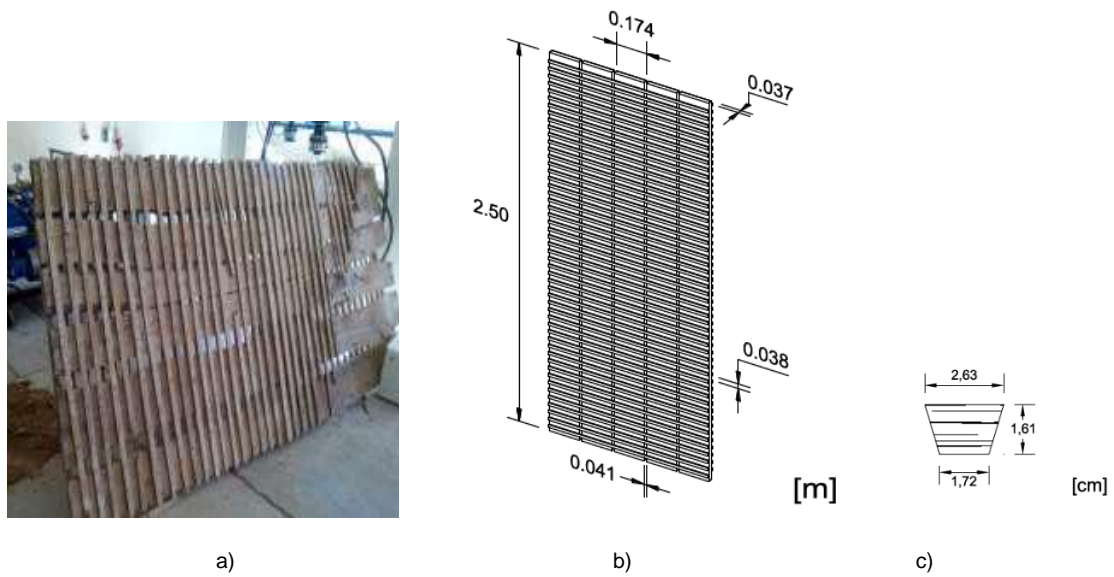


Fig.3.14 - a) 2ª Parede de tabique recolhida para o ensaio – Parede de tabique simples; b) Detalhe construtivo da parede de tabique; c) Detalhe construtivo das ripas com secção transversal trapezoidal [13]

Nos três ensaios observou-se que, com o aumento da deformada das paredes de tabique, pequenos pedaços dos materiais de enchimento desprenderam-se, o que revelou que a rotura de uma parede de tabique, devido a esforços de encurvadura, acontece de forma progressiva, antecedida da ocorrência de grandes deformações, aliadas a sinais sonoros provenientes do reajuste e desprendimento entre as ripas e as tábuas verticais. Apesar destas grandes deformações, o facto da estrutura resistente ser de madeira e bastante esbelta permitiu que as paredes não chegassem a atingir a rotura.

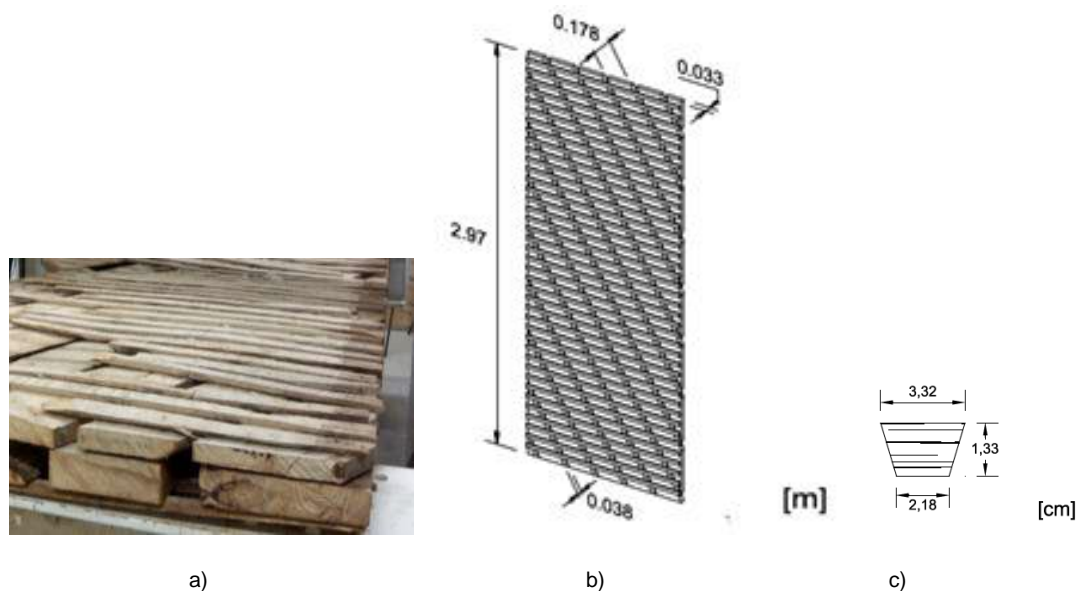


Fig.3.15 - a) 3ª Parede de tabique recolhida para o ensaio – Parede de Tabique Duplo; b) Detalhe construtivo da parede de tabique; c) Detalhe construtivo das ripas com secção transversal trapezoidal [13]

Outras características importantes da madeira são o seu comportamento elástico que permite que, desde que a estrutura não atinja o colapso, possa recuperar a sua posição inicial depois da remoção das cargas que sobre ela atuam.

### **3.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Como se referiu inicialmente, a informação existente acerca do comportamento mecânica das paredes de tabique acerca é muito escassa e não foi encontrada nenhuma campanha experimental para avaliar as características mecânicas de paredes de tabique à compressão no plano, apenas à flexão, o que reforça a pertinência do estudo presente neste trabalho.

Todos os ensaios e campanhas experimentais referenciadas neste capítulo levam-nos a acreditar que este tipo de estruturas, e muito contrariamente ao que frequentemente acontece, pode ser mantido, sempre que não se apresente degradada, constituindo uma mais-valia, quer do ponto de vista patrimonial, quer de sustentabilidade, quer ainda para o próprio comportamento da construção onde se integra.





# 4

## MODELAÇÃO NUMÉRICA

### 4.1. OBJETIVOS

Os objetivos deste capítulo são:

- Ajustar o modelo numérico anteriormente desenvolvido por André Chéu Pires [5], com capacidade para simular o comportamento estrutural de paredes de tabique simples e dupla, aos modelos a ensaiar e avaliar a carga vertical crítica (e a rigidez horizontal, embora os ensaios experimentais correspondentes não tenham sido realizados no âmbito desta tese), de forma a mais tarde comparar os resultados obtidos numericamente com os obtidos experimentalmente.
- Avaliar a contribuição do reboco na capacidade resistente das paredes de tabique face às ações analisadas neste capítulo.

### 4.2. INTRODUÇÃO

Neste capítulo é estudada, numericamente, a resposta à encurvadura e a ações horizontais dos dois tipos de parede de tabique já apresentados em capítulos anteriores, permitindo estimar a capacidade resistente limite destas paredes às ações verticais e a rigidez a ações horizontais, permitindo, neste último caso, estimar a capacidade das paredes para funcionarem como elementos de contraventamento no seu plano. Os modelos utilizados e apresentados neste capítulo foram baseados nos modelos descritos por André Chéu Pires [5], devidamente adaptados às dimensões dos provetes definidas neste trabalho.

Foram analisados quatro modelos S e D que representam paredes simples e duplas, respetivamente. A análise das repostas e todos os cálculos foram efetuados com recurso ao programa de cálculo SAP2000. No capítulo 6, os resultados dos ensaios experimentais são comparados com os resultados obtidos no presente capítulo, de forma a validar/calibrar o presente modelo.

### 4.3. APRESENTAÇÃO E DESCRIÇÃO DOS MODELOS ESTUDADOS

Os modelos de paredes de tabique que foram construídos pretendem ser representativos das tipologias mais comuns existentes nas construções antigas da zona do Porto.

Em seguida apresentam-se os esquemas, legendados e cotados, dos dois tipos de paredes em análise. Foram aproveitados os esquemas ilustrativos da dissertação do André Chéu Pires [5]

#### 4.3.1. TABIQUE SIMPLES (MODELO S)

Em média, as ripas estão ligadas às tábuas verticais através de um prego por ripa e por tábua, com cerca de 4,0cm de comprimento, no máximo. Na extremidade de cada ripa existe um prego, independentemente de já existir, ou não um outro prego a ligar a ripa à tábua onde se efetua a emenda.

As ripas mais largas, quando existem, têm 6cm de largura e aparecem a cerca de 1/3 e 2/3 da altura da parede; apresentam dois pregos posicionados ao eixo da ripa, por ripa e por tábua.

As tábuas são serradas diretamente dos troncos, aparecendo com a curvatura do tronco. Estas não são retificadas nos topos laterais, ou seja apresentam uma secção transversal "trapezoidal". A folga entre tábuas é de 2cm, tal como vimos no Capítulo 2.

Nas figuras 4.1 e 4.2 está representado o esquema dos dois tipos de parede simples.

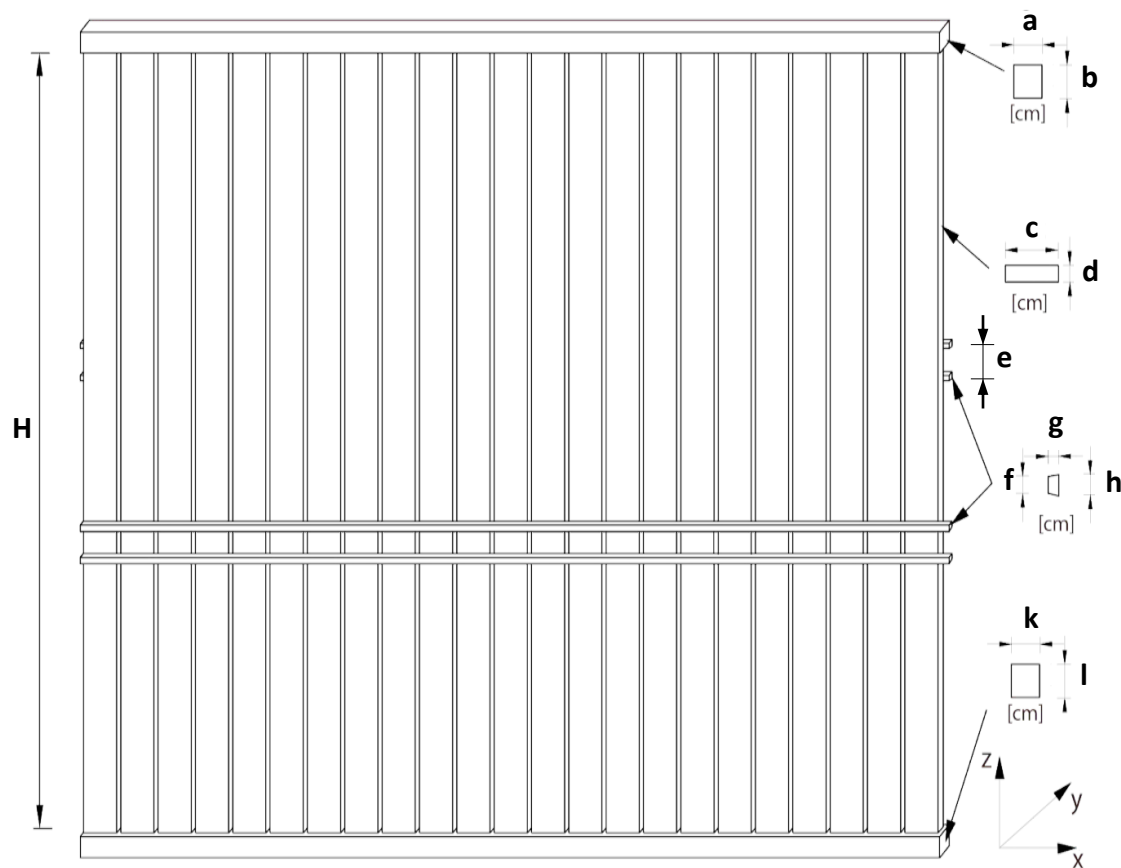


Fig.4.1 – Esquema da Parede de Tabique Simples

Tabela 4.1 – Dimensões dos elementos da Parede de Tabique Simples (unidades em cm)

	Frechais			Tábuas				Ripas		
H	a	b	k	l	c	d	e	f	g	h
300	8	8	8	8	26	2,5	7	2,5	1,3	2,5

Nota: largura da parede de tabique: 2,5m; “e” mede a distância entre eixos de ripas.

4.3.1. TABIQUE DUPLO (MODELO D)

Tal como no tabique simples, as tábuas são serradas e não retificadas nos topos. As tábuas diagonais orientam-se acerca de 60° em relação à horizontal.

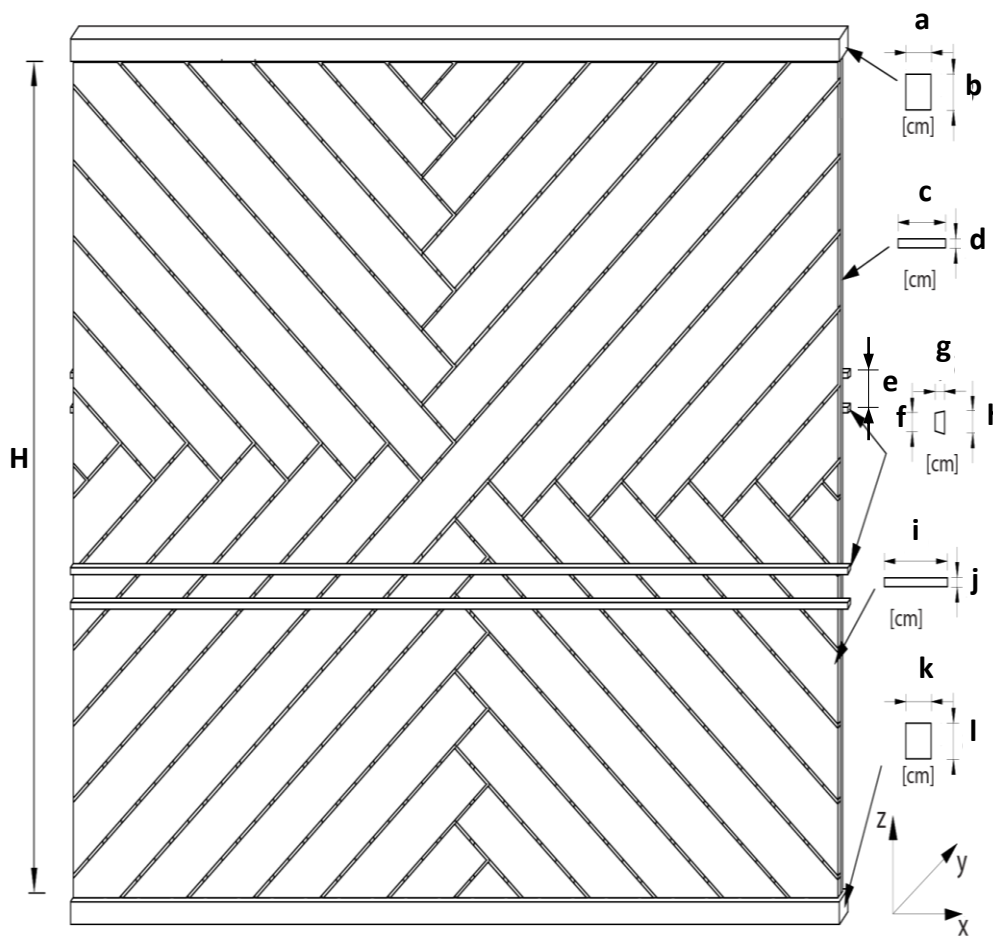


Fig.4.2 – Esquema da Parede de Tabique Duplo

Tabela 4.2 – Dimensões dos elementos da Parede de Tabique Duplo (unidades em cm)

H	Frechais				Tábuas				Ripas			
	a	b	k	l	c	d	i	j	e	f	g	h
300	8	8	8	8	26	2,5	26	2,5	7	2,5	1,3	2,5

Nota: largura da parede: 2,5m; “e” mede a distância entre eixos de ripas.

#### 4.4. PROGRAMA DE CÁLCULO AUTOMÁTICO UTILIZADO

O programa de cálculo automático utilizado na modelação das paredes de tabique, tanto para ações de compressão como para ações horizontais, foi o SAP2000. Trata-se de um programa de elementos finitos com interface gráfica 3D, preparado para realizar, de forma totalmente integrada, a modelação, análise e dimensionamento de um vasto conjunto de problemas de engenharia de estruturas [5]. Este programa foi o escolhido para realizar a modelação numérica deste trabalho, por permitir a análise do problema proposto.

#### 4.5. COMPORTAMENTO DAS PAREDES DE TABIQUE À ENCURVADURA

Nesta seção será avaliado o comportamento estrutural de paredes de tabique face a ações verticais, ou seja a sua capacidade resistente tendo em conta os fenómenos de encurvadura, avaliando também a contribuição estrutural do reboco. Estas ações são simuladas através de uma carga uniformemente distribuída vertical descendente, exercida no plano da parede, aplicada ao longo do frechal superior.

##### 4.5.1. CONCEITOS GERAIS

O fenómeno de encurvadura acontece quando uma peça esbelta, ou seja de secção transversal pequena quando comparada com o seu comprimento, é submetida a esforços de compressão e sofre flexão transversal, instabilizando elasticamente. Assim, a peça pode perder a sua capacidade portante sem que o material tenha atingido a sua capacidade resistente. A flexão transversal ocorre na direção perpendicular ao eixo de menor inércia da secção transversal [15 in 5].

Os primeiros estudos de instabilidade de peças lineares de comportamento isotrópico linear foram realizados em meados do século XVIII pelo matemático Leonhard Euler, que determinou analiticamente a expressão de cálculo da força crítica de compressão numa coluna bi-articulada, através da resolução da equação diferencial da *Viga de Bernoulli* (Vigas onde as secções transversais permanecem planas e ortogonais ao eixo da barra antes e após a sua deformação) [16 in 5].

Para modelar matematicamente o fenómeno de encurvadura, Euler descobriu que a relação entre uma propriedade da secção transversal da coluna e o seu comprimento condiciona a sua estabilidade quando submetida a esforços axiais de compressão [17 in 5]. A figura 4.3 apresenta a configuração indeformada e a configuração deformada de uma peça linear biarticulada [5].

Relativamente à configuração da deformada, vê-se que o valor do momento numa qualquer seção é

$$M = Py \quad (1)$$

Sendo  $y$  a coordenada que define a deformação lateral da peça. A equação diferencial da elástica é dada por:

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

Através da resolução das equações (1) e (2) obtemos a equação que define a carga de encurvadura,  $P$ ,

$$P = \frac{n^2\pi^2EI}{l^2} \quad (3)$$

$n$  – número inteiro variável, associado á ordem do modo de encurvadura

$E$  – módulo de elasticidade longitudinal

$I$  – momento de inércia da secção em relação ao eixo principal central de inércia que mobiliza a direção de menor inércia

$l$  – comprimento de encurvadura

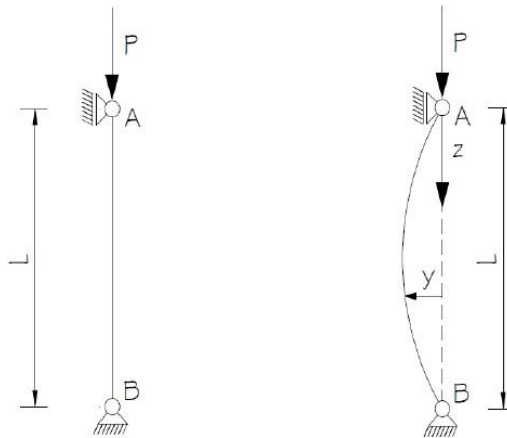


Fig.4.3 – O problema de Euler [4]

Analisando a equação (3), podemos concluir que a carga de encurvadura será tanto menor quanto maior for a esbelteza da peça, definida pela relação entre o comprimento de encurvadura e o raio de giração relativo ao plano de maior esbelteza.

Na figura 4.4 apresentam-se configurações diferentes de deformadas, correspondendo cada uma a um modo de encurvadura.

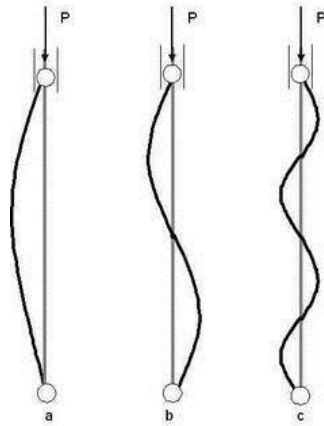


Fig.4.4 – Modos de encurvadura [5]: a)  $n=1$ , b)  $n=2$  e c)  $n=3$ .

Quando  $n$  assume o valor 1, correspondendo ao primeiro modo de encurvadura, a carga de encurvadura designa-se por  $P_{cr}$ . Esta carga é o resultado de cada análise feita nesta secção. O programa de cálculo SAP2000 calcula diretamente a carga  $P_{cr}$ .

#### 4.5.2. ESTUDO NUMERICO DE UMA TÁBUA DE MADEIRA

Com o objetivo de verificar a análise à encurvadura efetuada pelo programa de cálculo, foi criado um modelo simulando uma tábua vertical de uma parede de tabique de forma a avaliar a capacidade resistente de uma tábua isolada e, posteriormente, validar o modelo da parede de tabique. A tábua é constituída por madeira de pinho nacional da classe ‘E’ e as suas propriedades, apresentadas na tabela 4.3, estão de acordo com a norma NP 4305 [1995] [18], e correspondem à classe de resistência das madeiras resinosas C18 definidas na norma EN338 [2003] [19, 5]. A secção transversal da tábua isolada tem dimensões 26cm x 2,5cm e comprimento de 3m. As propriedades geométricas desta secção, apresentadas na tabela 4.4, foram introduzidas no programa de cálculo: área, momento de inércia e raio de giração em torno dos eixos principais de inércia.

Tabela 4.3 – Propriedades mecânicas e físicas da classe de resistência C18 da madeira de pinho nacional

$E_{mean}$	$E_{0,05}$	$G_{mean}$	$\rho_{mean}$	$f_{c,0,k}$	$f_{t,0,k}$	$f_{v,k}$	$f_{m,k}$
(GPa)	(GPa)	(GPa)	(kg/m <sup>3</sup> )	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
9	6	0,56	380	18	11	2	18

Tabela 4.4 – Propriedades geométricas da secção da tábua de madeira

Propriedades	Valores
Área (m <sup>2</sup> )	0,0065
Momento de inércia segundo xx ( m <sup>4</sup> )	3,39E-07
Momento de inércia segundo yy ( m <sup>4</sup> )	3,66E-05

Raio de giração segundo xx (m)	0,00722
Raio de giração segundo yy (m)	0,075

A modelação numérica da tábua foi feita através de um elemento linear discretizado em elementos do tipo viga tridimensional (“Frame” da biblioteca do SAP2000), ou seja com seis graus de liberdade por nó. Na extremidade superior da tábua restringiram-se apenas os deslocamentos nas direções x e y, ou seja as translações horizontais; na extremidade inferior restringiram-se os deslocamentos x, y e z e a rotação na direção z [5]. A figura 4.5 apresenta um esquema para o modelo de cálculo estrutural da tábua isolada.

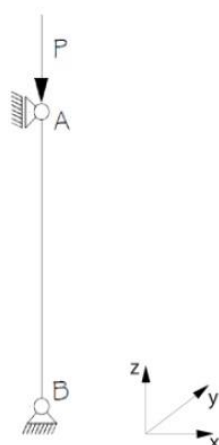


Fig.4.5 – Modelo de cálculo estrutural de uma tábua vertical isolada

Com base na dissertação do André Chéu Pires [5], pode-se concluir que na resolução de problemas de encurvadura, os elementos lineares sujeitos a esforços de compressão devem ser analisados com uma discretização de pelo menos 5 elementos; o valor da carga de encurvadura não sofre alterações significativas quando a discretização é feita com um maior número de elementos, garantindo-se então o rigor necessário.

Na figura 4.6 observa-se a configuração da deformada do primeiro modo de encurvadura e que corresponde a uma carga crítica de 3,365KN.

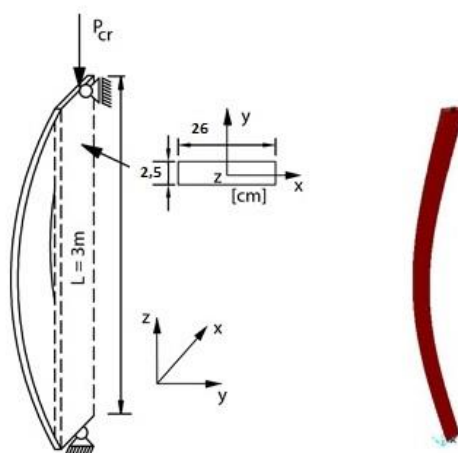


Fig.4.6 – 1º modo de encurvadura



Este valor pode ser validado através da equação analítica, referida anteriormente:

$$P = \frac{n^2 \pi^2 EI}{l^2}$$

Substituindo as variáveis pelos valores respetivos, obtemos uma carga crítica de:

$$P = \frac{1^2 \pi^2 9 \times 10^6 \times 3,385 \times 10^{-7}}{3^2} = 3,341 \text{KN}$$

Ao compararmos os dois resultados, numérico e analítico, conclui-se que os valores calculados pelo programa são idênticos.

#### 4.5.3. MODELAÇÃO NUMÉRICA DE UMA PAREDE DE TABIQUE

Após a análise numérica de uma tábua isolada, é feita a mesma análise para a parede de tabique, fazendo a validação dos resultados numéricos por comparação com os resultados obtidos para a tábua isolada.

Como referido anteriormente, será avaliada numericamente a capacidade resistente dos dois tipos de paredes: simples (S) e duplas (D).

##### 4.5.3.1. CONDIÇÕES FRONTEIRA

Relativamente às condições de fronteira, os dois tipos de parede estão ligadas ao exterior pelo frechal através de ligações triplas que impedem as três translações. No entanto, a situação real não corresponde exatamente ao que se referiu anteriormente, sendo esta intermédia entre uma ligação tripla e um encastramento (impedidas as três translações e a rotação para fora do plano da parede). Por este motivo, decidiu-se analisar os dois casos de forma a determinar o intervalo de valores passíveis de se encontrarem neste tipo de paredes. Assumiu-se que as tábuas estão ligadas ao frechal através de ligações rígidas, não sendo também esta situação real.

Assim, inferiormente a parede está impedida de se deslocar na direção do seu plano, x e z, e na direção perpendicular ao plano, y. No que diz respeito ao topo da parede, impediu-se a parede de deslocar nas direções horizontais x e y. Numa segunda análise, para além destas restrições, também se impediu a rotação em relação ao eixo x. Como as paredes de tabique vulgarmente não apresentam qualquer ligação entre elas, apenas “encostam”, não se introduziu nenhuma restrição no topo esquerdo e direito.

##### 4.5.3.2. MODELOS NUMÉRICOS

Nos dois modelos numéricos, os elementos que constituem as paredes são modelados de forma similar, adotando elementos tipo viga tridimensional (*Frame*). O elemento viga é utilizado para modelar peças lineares e tem seis graus de liberdade por nó: três translações e três rotações. O material utilizado apresenta as propriedades mecânicas correspondentes à madeira de pinho da classe C18. Os únicos elementos que não são de madeira são os pregos que são de aço [5].

As propriedades mecânicas do aço estão expostas na tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Propriedades do material aço dos pregos

E (GPa)	$\nu$	$\rho_{\text{mean}}$ (kN/m <sup>3</sup> )
199	0,3	76,9

O primeiro modelo a ser analisado é o modelo S, construído por 9 tábuas verticais, simuladas por 43 elementos de viga por tábua, 42 ripas em cada fase, sendo cada uma simulada por 10 elementos de viga, e por 2 frechais, superior e inferior, simulados por também 10 elementos de viga cada um. Foi criada uma grelha com 3 planos na direção y, onde no central existem as tábuas de madeira e nas laterais as ripas, ou seja posicionadas de forma excêntrica em relação às tábuas. Regra geral, as ripas têm um formato trapezoidal, mas para facilitar a execução dos modelos físicos da campanha experimental, foram talhados com uma secção retangular de 2,5cm por 1,3cm; as ripas foram posicionadas com um afastamento entre eixos de 7cm. A ligação entre as ripas e as tábuas é feita através de pregos (um por cada ligação ripa-tábua) de secção quadrada de 3mm, modelados através de um elemento de viga na direção y. Estes elementos foram modelados considerando uma rigidez axial e à flexão elevada e uma rigidez à torção baixa.

Na tabela 4.6 apresentam-se as propriedades geométricas e mecânicas das secções transversais de cada elemento da parede.

O outro modelo a ser analisado é o modelo D que difere do modelo S, pois para além de tábuas verticais, tem também tábuas diagonais com a mesma secção. Estes dois conjuntos de tábuas estão ligados rigidamente e por esta razão e por simplicidade foram modeladas no mesmo plano.

Este modelo contém 9 tábuas verticais e 35 tábuas diagonais. As ripas, o frechal e os pregos têm as mesmas características que no modelo S. As propriedades geométricas e mecânicas dos constituintes deste modelo são as mesmas que as do modelo S, tendo sido apresentadas na tabela 4.6.

Tabela 4.6 – Propriedades geométricas e mecânicas das secções transversais dos elementos da parede

Elementos	Área (m <sup>2</sup> )	I <sub>xx</sub> (m <sup>4</sup> )	I <sub>yy</sub> (m <sup>4</sup> )	R <sub>xx</sub> (m)	R <sub>yy</sub> (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.

Na figura 4.7 observa-se os modelos com 2,5m de largura e 3m de altura, vistos em 3D, retirados do programa de cálculo.

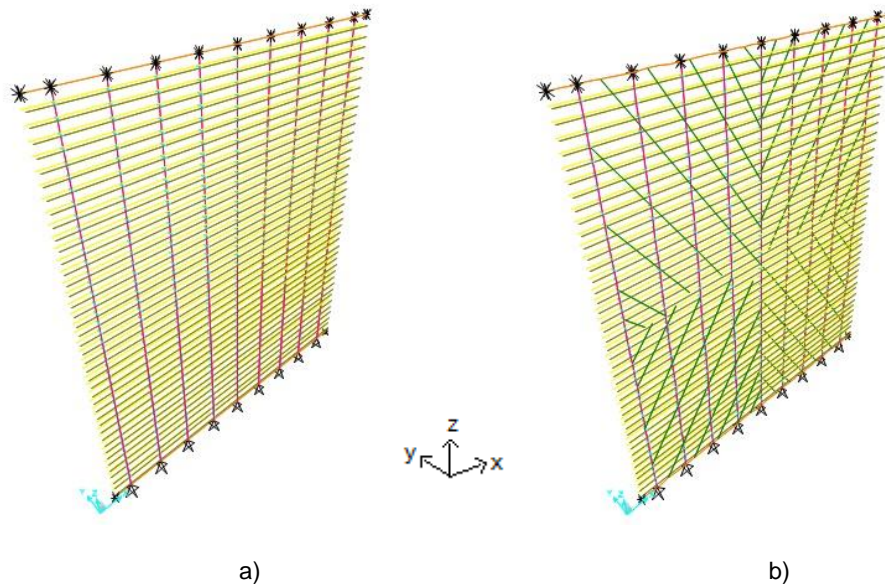


Fig.4.7 – Modelos numéricos: a) Modelo S b) Modelo D

#### 4.5.3.3. ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Feita a apresentação dos modelos em estudo, procede-se agora à análise à encurvadura, avaliando os valores da carga crítica e os respetivos modos de encurvadura.

O primeiro modelo a ser analisado é o modelo S. Na figura 4.8 observa-se a configuração da deformada da estrutura da parede correspondente ao primeiro modo de encurvadura. Foi considerada uma força distribuída exercida no frechal superior.

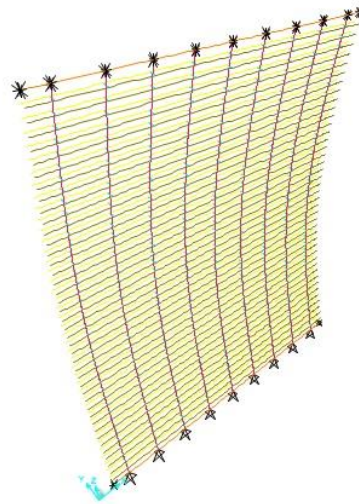


Fig.4.8 – Deformada do primeiro modo de encurvadura do modelo S

Relativamente à configuração da deformada, podemos observar que a estrutura da parede encurva em torno do eixo de menor inércia da parede e das tábuas, eixo x, encurvando todas as tábuas no mesmo sentido e da mesma forma para uma carga distribuída crítica de 12,16KN/m.

O valor da carga crítica pode ser verificado de forma simplificada dividindo o valor da carga crítica de uma tábua isolada pelo comprimento de influência de cada tábua ( $L=0,28m$ ):

$$\frac{3,341}{0,28} = 11,93\text{KN/m} \cong 12,16\text{KN/m}$$

Foram analisadas duas condições de fronteira para cada modelo: rotulado na base (3 translações impedidas) e no topo, e encastrado (3 translações e uma rotação impedidas) na base e rotulado no topo. No que toca à segunda condição de fronteira, a estrutura da parede encurva também em torno do eixo xx, mas não fazendo uma barriga perfeita, ou seja simétrica em relação ao eixo médio da parede, como acontece para a primeira condição. O valor da carga crítica que resultou desta situação foi 25,04KN/m, ou seja 2,06 vezes mais que o anterior. Este valor pode ser explicado através da equação da carga crítica, sendo que todos os parâmetros se mantêm, com exceção da altura efetiva que neste caso é 0,7 l, logo o quociente entre o segundo e o primeiro é  $1/(0,7^2) = 2,04$ , como se queria demonstrar.

Analisa-se de seguida a configuração da deformada do primeiro modo de encurvadura do modelo D, representada na figura 4.9. Tal como se verificou na deformada do modelo S, as tábuas verticais encurvam em relação ao eixo de menor inércia, da mesma forma, arrastando as tábuas diagonais. A carga crítica correspondente é de 17,26KN/m. Se compararmos este valor com o valor obtido no modelo S podemos concluir que o incremento de resistência provocado pelas tábuas diagonais é de 5,104KN/m, ou seja 41,9%. Verifica-se, então, que o contributo das tábuas diagonais para a resistência à encurvadura da parede é bastante inferior ao das tábuas verticais.

Tal como foi feito para o modelo S, também se analisou a resposta deste modelo para a condição de apoio encastramento na base e rotula no topo. A deformada apresenta uma forma idêntica à do modelo S com as mesmas condições de fronteira, obtendo-se um valor para a carga crítica de 35,87KN/m, ou seja 2,07 vezes mais que na primeira condição de fronteira, tal como era espectável.

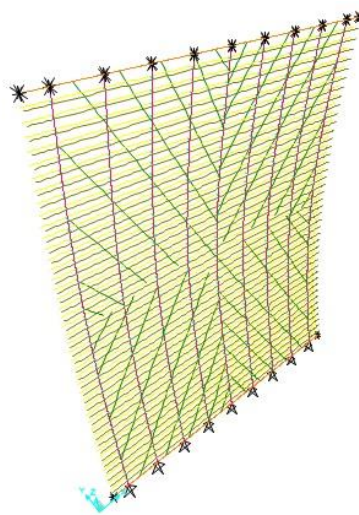


Fig.4.9 – Deformada do primeiro modo de encurvadura do modelo D

#### 4.5.5. CONTRIBUIÇÃO DO RECOBRIMENTO PARA A RESISTÊNCIA À ENCURVADURA

As análises efetuadas anteriormente apenas consideraram o contributo do esqueleto das paredes de madeira, não simulando o reboco. No entanto, é de grande interesse saber qual a sua contribuição para a resistência da parede à compressão, pois trata-se de uma camada de recobrimento com uma espessura relevante, cerca de 2cm.

Foi então simulada uma camada de reboco com módulo de elasticidade de 1GPa e 2cm de espessura alinhada no eixo das ripas. Para tal, foi desenhada uma malha em AutoCAD, que posteriormente se importou como casca com as características mecânicas do reboco para o programa de cálculo SAP2000. Como o reboco é um material que resiste apenas à compressão, a casca foi aplicada apenas num dos eixos das ripas, visto que um deles sofre esforços de tração quando a parede encurva.

A figura 4.10 apresenta o modelo da parede simples e dupla com a presença do reboco: modelos SA e DA, respetivamente, e a figura 4.11 as respetivas configurações de deformadas para o primeiro modo de encurvadura. Nesta análise os modelos apresentam as primeiras condições de fronteira utilizadas nos modelos base, ou seja apoios rotulados na base e no topo da parede.

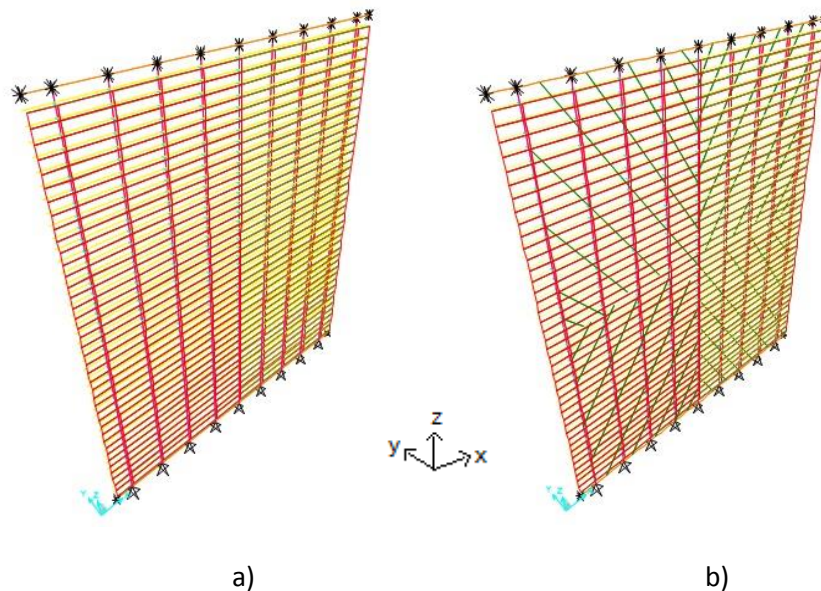


Fig.4.10 – Modelos numéricos: a) Modelo SA; b) Modelo DA

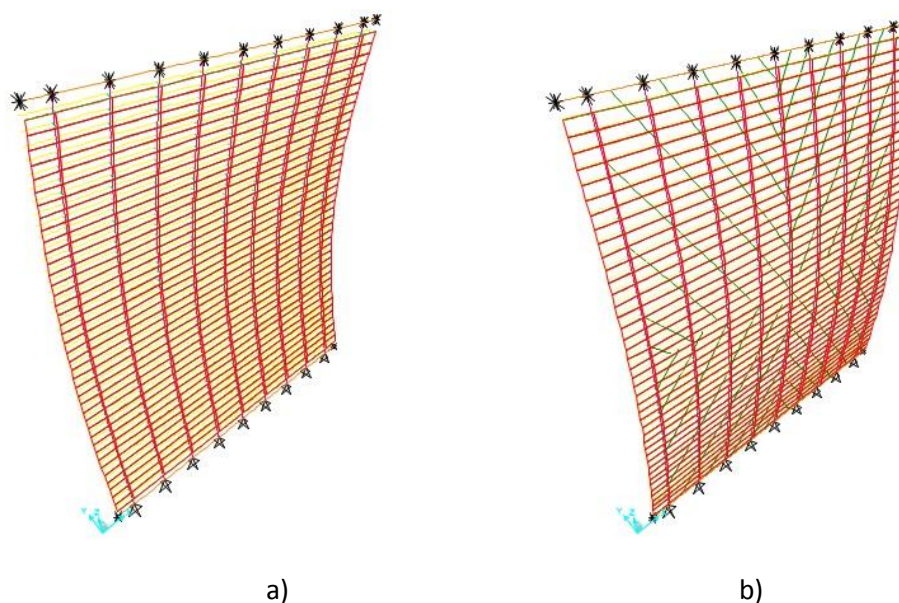


Fig.4.11 – a) Deformada do primeiro modo de encurvadura do modelo SA; b) Deformada do primeiro modo de encurvadura do modelo DA

A configuração da deformada do modelo SA apresenta as mesmas características que a do modelo S. No entanto, a sua carga crítica é de 21,3 KN/m que corresponde a um incremento de resistência de 9,14KN/m, ou seja 75,2% do valor resistência da parede sem o reboco. Este valor pode ser verificado teoricamente considerando a nova rigidez à flexão no eixo das tábuas:

$$EI = 9 \times 10^6 \times \frac{0,26 \times 0,025^3}{12} + 1 \times 10^6 \times \left( \frac{0,28 \times 0,02^3}{12} + 0,28 \times 0,02 \times 0,019^2 \right) = 5,26 \text{ KNm}^2$$

$$P_{cr} = \frac{1^2 \pi^2 \times 5,26}{3^2} = 5,77 \text{ KN}$$

donde resulta uma carga crítica por unidade de comprimento de 20,6KN/m.

Para o modelo DA, a configuração da deformada é idêntica à do modelo D. A carga crítica aumenta de 17,26KN/m para 25,53KN/m o que corresponde a um incremento da resistência à encurvadura de 47,9%.

Podemos então concluir que o recobrimento, neste caso a argamassa, tem um papel importante no que toca à resistência das paredes de tabique à compressão no plano, podendo tirar-se proveito deste facto na reabilitação destas paredes, como por exemplo utilizando argamassa com fibras de vidro, para que além de funcionar à compressão, funcione também à tração, aumentando consideravelmente a resistência global da parede.

#### 4.6. COMPORTAMENTO DAS PAREDES DE TABIQUE A AÇÕES HORIZONTAIS

Depois da avaliação da capacidade resistente das paredes de tabique à compressão, nesta secção é avaliada numericamente, em comportamento elástico, a rigidez das mesmas paredes quando sujeitas a ações horizontais de forma a averiguar a sua capacidade como elementos de contraventamento horizontal. É analisada a influência da distribuição das tábuas, ou seja, parede simples e dupla, bem como o contributo do recobrimento de argamassa para a rigidez da parede.



Estas ações são representadas por uma carga uniformemente distribuída aplicada no frechal superior da parede, com a direção do eixo xx e sentido da esquerda para a direita, no plano da parede.

#### 4.6.1. CONDIÇÕES DE FRONTEIRA

Nesta secção, são estudados os dois modelos analisados anteriormente, parede de tabique simples, S, e duplo, D. Em ambos os modelos temos o frechal superior impedido de se deslocar apenas nas direções y e z. No que toca ao frechal inferior, está também impedido de se deslocar na direção x.

#### 4.6.2. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Definidos os modelos, determinou-se a rigidez horizontal para cada um deles. Esta rigidez,  $k$ , é calculada considerando a média dos deslocamentos dos dois nós extremos do frechal superior,  $md$ , a partir da equação:

$$k(KN/m) = F (KN) \times \frac{1}{md (m)}$$

onde  $F$  representa a força horizontal total exercida no frechal, que nesta análise é assumida igual a 1KN. Na figura 4.12, observa-se a deformada dos modelos S e D, respetivamente. Os valores da rigidez para o modelo S e D são 456,62KN/m e 6095,703KN/m, respetivamente.

Como podemos constatar, o valor da rigidez da parede dupla é muito superior ao da parede simples, devendo-se ao facto da parede dupla apresentar tábuas diagonais que quando solicitadas por cargas horizontais trabalham na direção axial, contribuindo para um aumento da rigidez em relação à parede S de 92,5%. Daqui se conclui que a rigidez de distorção destas paredes é quase integralmente conferida pelas tábuas diagonais.

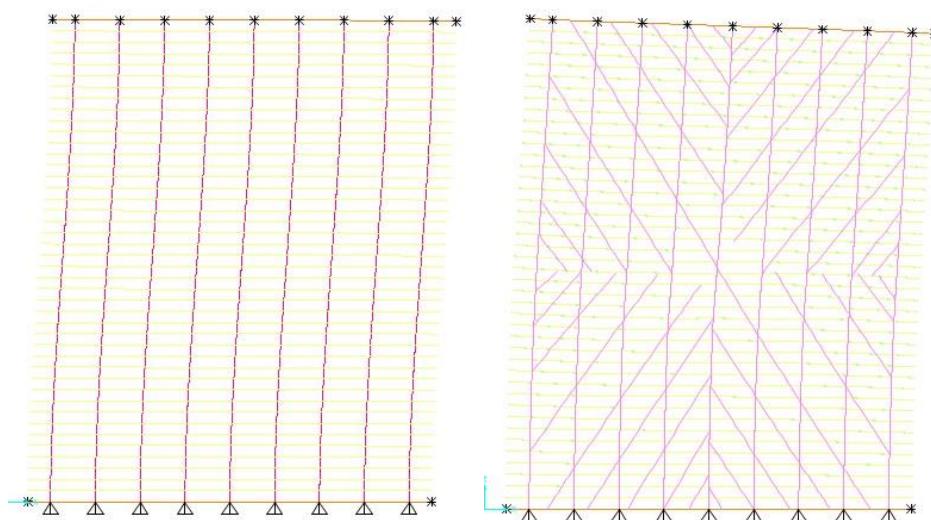


Fig.4.12 – Deformada por ação da carga horizontal: a) Modelo S; b) Modelo D

Sendo assim, podemos concluir que as paredes duplas, embora tendo uma menor capacidade resistente à compressão relativamente às paredes simples, apresentam uma muito maior rigidez horizontal no seu plano, o que as torna uma melhor opção para contraventamento horizontal.

#### 4.6.3. CONTRIBUIÇÃO DO RECOBRIMENTO PARA A RIGIDEZ HORIZONTAL

Tal como para as ações verticais, é agora avaliada a contribuição do reboco na capacidade resistente das paredes de tabique face a ações horizontais no plano.

Os modelos sujeitos a esta análise são os modelos SA e DA, criados anteriormente para análise da resistência à encurvadura. Estes modelos também apresentam reboco apenas numa das faces da parede. Apesar desta situação não ser realista, considera-se que, porque o reboco não funciona à tração, a sua contribuição acaba por ser inferior, tendo esta simulação.

Na figura 4.13 estão representadas as respetivas deformadas. Os valores da rigidez horizontal obtidos são 2805,76KN/m, para o modelo SA, e 7465,47KN/m, para o modelo DA. Comparativamente com os modelos sem recobrimento, há um incremento de rigidez de cerca de 83,73% na parede simples e 18,35% na parede dupla. Isto comprova que a grande contribuição para rigidez horizontal deste tipo de paredes são as tábuas inclinadas, pois como se pode notar, o facto de existir uma camada de argamassa pouco influência a parede dupla, enquanto numa parede simples apresenta uma contribuição bastante elevada.

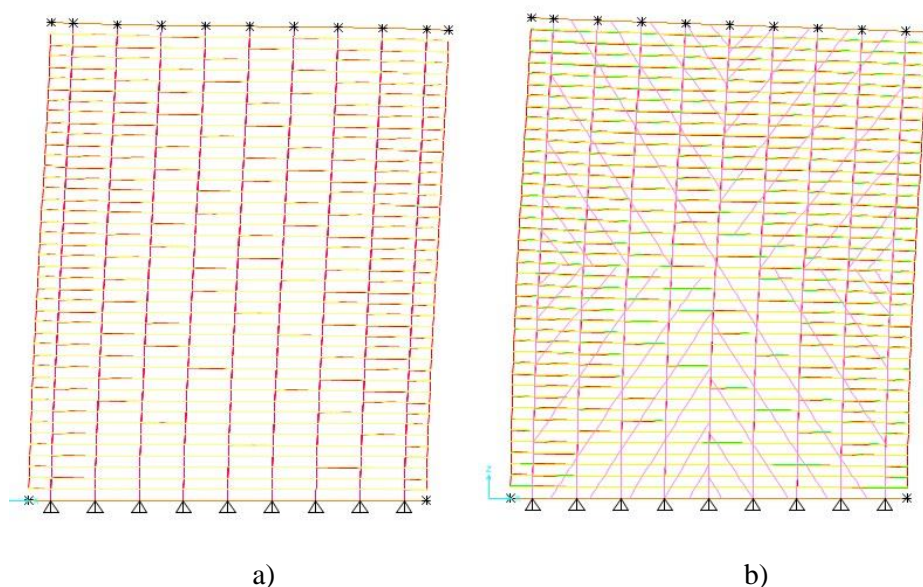


Fig.4.13 – Deformada por ação da carga horizontal: a) Modelo SA; b) Modelo DA

#### 4.7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

De forma sintetizada, estão expostos na tabela 4.7 os resultados obtidos neste capítulo. Relativamente à análise da capacidade resistente de paredes de tabique à compressão, pode-se então concluir que:

- A instabilidade das paredes acontece sempre no plano perpendicular ao plano da parede por corresponder à direção de menor inércia da secção transversal das tábuas;
- As paredes de tabique duplo são menos estáveis que paredes de tabique simples com a mesma espessura, ou seja, se tivermos duas paredes de tabique com a mesma espessura total, sendo uma parede simples e outra dupla, a parede simples é mais estável e mais resistente à encurvadura que a parede de tabique dupla;



- O reboco aumenta significativamente a capacidade resistente destas paredes, sendo um fator a considerar na sua reabilitação.

No que toca ao comportamento das paredes de tabique a ações horizontais:

- As paredes de tabique duplo são muito mais rígidas que as paredes de tabique simples, sendo que a rigidez destas paredes é maioritariamente conferida pelas tábuas diagonais;
- O reboco nestas paredes contribui de forma muito mais significativa para a rigidez horizontal, nas paredes de tabique simples.

Tabela 4.7 – Resultados obtidos da análise numérica

Modelo	Ações verticais	Ações horizontais
	Valor de Pcr (KN/m)	Rigidez horizontal (KN/m)
S	12,16	456,62
SA	21,30	2805,76
D	17,26	6095,70
DA	25,53	7465,47

# 5

## SETUP DOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS

### 5.1. OBJETIVOS

Os objetivos deste capítulo são:

- Apresentar os modelos das paredes ensaiadas.
- Caracterizar a metodologia e equipamento de ensaio.
- Definir as condições de carregamento.

### 5.2. INTRODUÇÃO

Este capítulo inicia-se com a descrição dos materiais e processo de construção das paredes que serviram de modelo físico para os ensaios experimentais. A construção foi feita pela Portilame, uma empresa com largos anos de experiência em reabilitação e construção de estruturas de madeira.

Em seguida define-se o *setup* do ensaio de compressão no plano. Relativamente ao ensaio ao corte, não foi possível efetuar-se devido à falta de tempo disponível.

### 5.3. CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL UTILIZADO

Os materiais utilizados na construção das 8 paredes de tabique e respetivas dimensões, estão apresentados na tabela 5.1, para paredes simples e tabela 5.2, para paredes duplas. Nas paredes duplas não se sabe ao certo a quantidade de pregos grandes por parede; na ligação de duas tábuas pode-se ter pregado três ou apenas dois pregos, por exemplo. Nas figuras 5.1 a 5.7 apresentam-se imagens dos materiais referidos anteriormente.

Tabela 5.1 – Dimensões e quantidades dos materiais das paredes de tabique simples, por parede

Materiais	Dimensões	Quantidade
Tábuas de madeira	26 x 2,5 $cm^2$	9
Ripas	2,5 x 1,3 $cm^2$	78
Ripas aos terços	6 x 1,3 $cm^2$	4
Frechais	8 x 8 $cm^2$	2
Pregos grandes	7,5 $cm$	18
Pregos pequenos	4,0 $cm$	9 x 78 + 9 x 4 = 738

Tabela 5.2 – Dimensões e quantidades dos materiais das paredes de tabique duplo, por parede

Materiais	Dimensões	Quantidade
Tábuas de madeira	26 x 2,5 $cm^2$	43
Ripas	2,5 x 1,3 $cm^2$	78
Ripas aos terços	6 x 1,3 $cm^2$	4
Frechais	8 x 8 $cm^2$	2
Pregos grandes	7,5 $cm$	18 + Variável
Pregos pequenos	4,0 $cm$	738



Fig.5.1 - Pregos grandes e pequenos



Fig.5.2 - Tábuas de madeira



Fig.5.3 - Tábuas de madeira



Fig.5.4 - Ripas e frechais



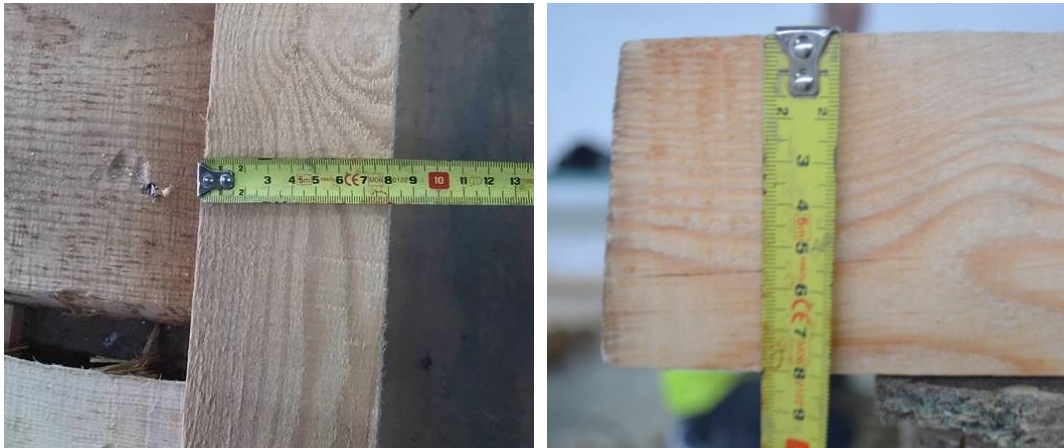


Fig.5.5 - Frechal (largura e espessura)



Fig.5.6 – Ripas (largura e espessura)



Fig.5.7 - Ripas colocadas aos terços da altura da parede

## 5.4. PROCESSO DE CONSTRUÇÃO DAS PAREDES

Nesta seção descreve-se o processo de construção dos dois tipos de parede em estudo nesta campanha experimental.

### 5.4.1. PAREDE DE TABIQUE SIMPLES

As paredes de tabique simples apresentam 3m de altura por 2,5m de largura. Inicialmente foram colocados os frechais na mesa de construção, a 2,92m de distância entre os seus eixos de forma a se pregarem as tábuas, uma a uma, com o auxílio dos pregos grandes. Para que as tábuas ficassem centradas no eixo dos prumos, foram colocadas duas tábuas paralelas aos frechais com 2,75cm de espessura, onde as tábuas da parede simples se apoiaram.

Em seguida aplicou-se o ripado de ambos os lados da parede, espaçado de 7cm entre alinhamentos, e aos terços da altura da parede colocaram-se as ripas mais largas. Na pregagem foram usados os pregos pequenos.

Foram construídas quatro paredes de tabique simples, duas para ensaiar à compressão no plano e duas a forças horizontais no plano para carga vertical constante, tendo, no âmbito desta tese, sido possível realizar apenas os ensaios à compressão.

Nas figuras 5.8 a 5.11 são apresentadas as várias fases do processo construtivo.



Fig.5.8 – Colocação dos frechais na mesa de construção





Fig.5.9 – Parede de Tabique Simples sem ripado

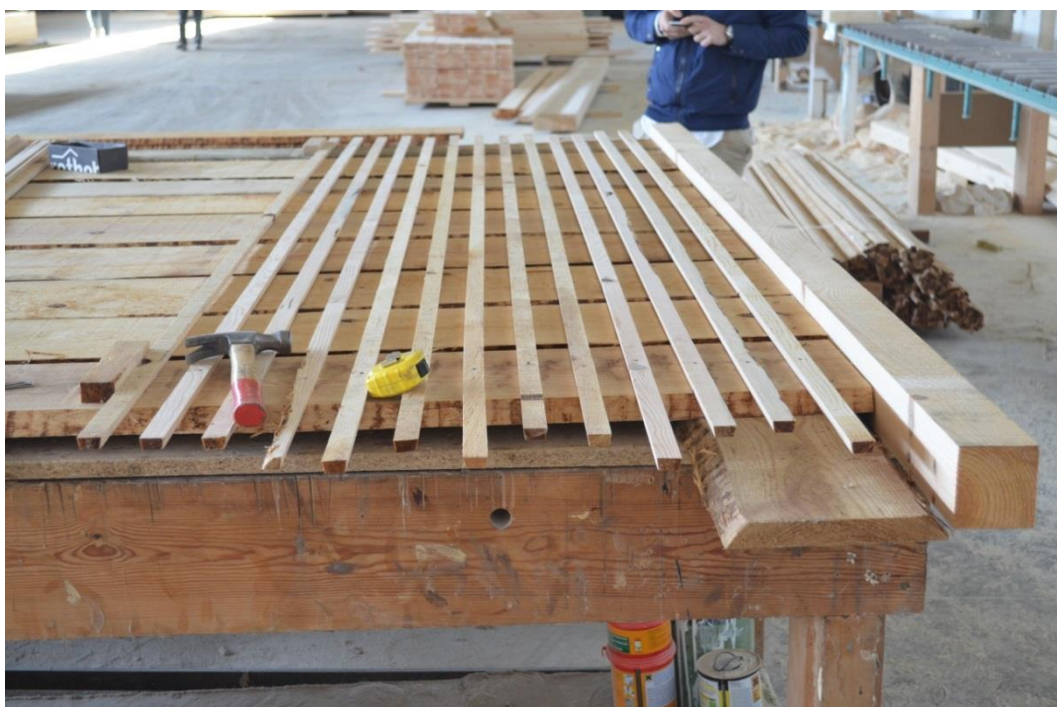


Fig.5.10 – Parede de Tabique Simples com ripado



Fig.5.11 – Parede de Tabique Simples concluída

#### 5.4.2. PAREDE DE TABIQUE DUPLA

As paredes de tabique duplas apresentam 3m de altura e 2,5m de largura. Tal como nas paredes simples, a construção iniciou-se com a disposição dos frechais a 2,92m de distância e de duas tábuas paralelas a estes com 1,5cm de espessura com o objetivo de centrar as tábuas verticais e diagonais da parede dupla no eixo dos frechais.

Primeiro pregaram-se as tábuas verticais aos frechais, seguido das diagonais que foram pregadas tanto às tabuas verticais como aos prumos, com os pregos grandes. O ripado foi aplicado exatamente da mesma forma que nas paredes simples. Tal como no caso das paredes de tabique simples, foram construídas também quatro paredes de tabique duplo, duas para ensaiar à compressão no plano e duas a forças horizontais no plano para carga vertical constante, tendo, no âmbito desta tese, sido possível realizar apenas os ensaios à compressão.

Nas figuras 5.12 a 5.15 apresentam-se algumas fases e características do processo construtivo destas paredes.



Fig.5.12 – Espessura das tábuas de madeira (tábua vertical e diagonal)





Fig.5.13 – Construção da Parede de Tabique Dupla



Fig.5.14 – Parede de Tabique Dupla sem ripado



Fig.5.15 – Parede de Tabique Dupla com ripado

## 5.5. SETUP DO ENSAIO EXPERIMENTAL

Após a execução das oito paredes foi discutido e montado o *setup* para o primeiro ensaio a realizar: ensaio das paredes de tabique à compressão no plano. Por causa do escasso tempo disponível, a discussão e realização do ensaio das paredes de tabique face a ações horizontais, não foi possível realizar-se, sendo recomendado para trabalhos futuros.

Todos os ensaios foram realizados no LESE, Laboratório de Engenharia Sísmica e Estruturas da FEUP.

### 5.5.1. SETUP DO ENSAIO À COMPRESSÃO NO PLANO

A montagem do *setup* foi feita de forma a representar o cenário real das paredes de tabique nas casas burguesas do Porto. Para isso foi necessário conceber uma base de madeira para representar o efeito dos pavimentos de madeira presentes nestas casas. Desenhou-se uma viga com uma abertura longitudinal com a secção de  $8 \times 8 \text{ cm}^2$  e 2,5m de comprimento, de forma a encaixar o frechal das paredes ao suporte de madeira. Esta base foi fixa ao pavimento do laboratório com o auxílio de quatro perfis. No topo foi também introduzida uma viga de madeira com a mesma abertura longitudinal, onde se encaixou o frechal do topo da parede. Todos estes elementos de madeira foram fabricados pela Portilame.

As figuras 5.16 e 5.17 mostram o esquema e as dimensões da base de madeira.

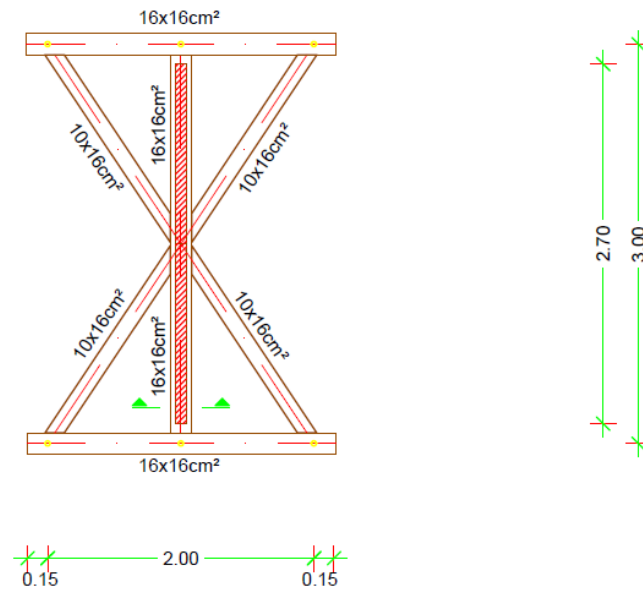


Fig.5.16 – Dimensões da base de madeira



Fig.5.17 – Base de madeira

A carga vertical foi aplicada nas paredes de forma a simular o mais próximo possível uma carga distribuída. Para isso foram utilizadas 3 vigas, duas de 1m e uma de 2m, como representado na figura 5.18. A viga de 2m distribuiu a carga em 2 pontos, que por sua vez se distribuem em 4 pontos, dois apoios em cada viga de 1m, ficando assim a carga distribuída em 4 pontos.

Esta solução foi determinada com a ajuda do programa de cálculo SAP2000; simularam-se vários tipos de carregamento: uma força aplicada em 2, 3 e 4 pontos, tendo-se concluído que este último seria o *setup* mais adequado, distribuindo quase uniformemente o efeito da carga vertical por toda a parede. A figura 5.19 apresenta a distribuição de esforço axial pelas diferentes tábuas.



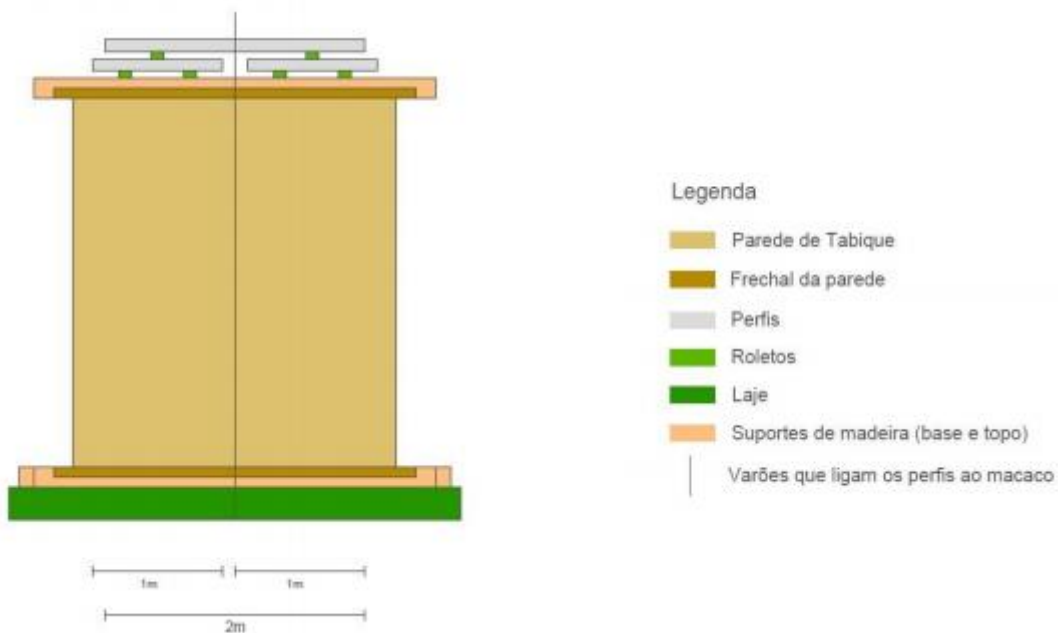


Fig.5.18 – Alçado do *setup* dos ensaios

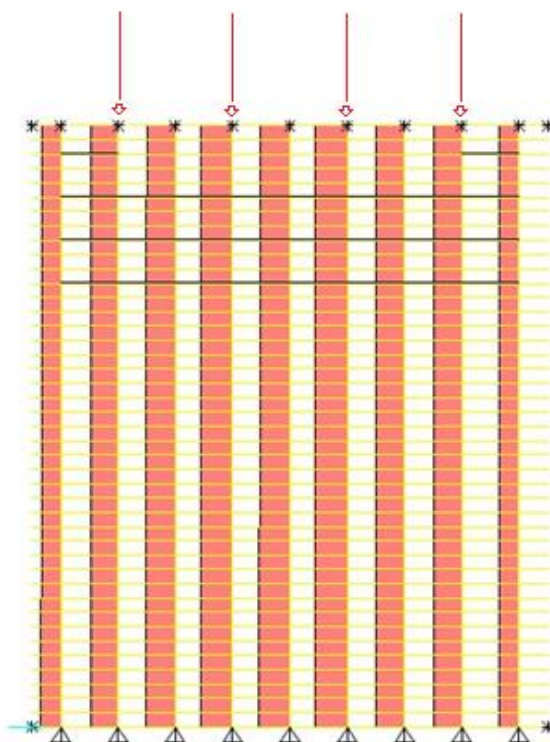


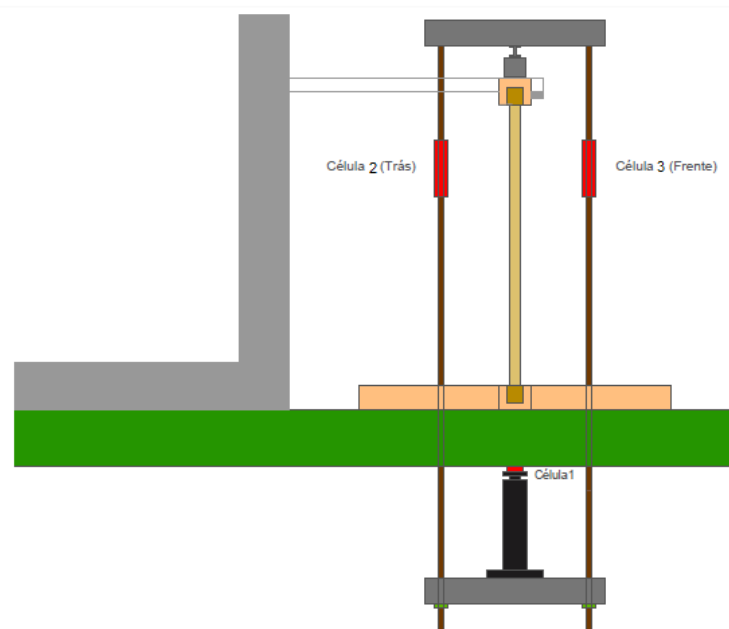
Fig.5.19 – Distribuição de esforço axial nas tábuas, para carga vertical em 4 pontos

A força vai ser imposta através de um macaco, situado no piso inferior do LESE, utilizando a laje do piso como estrutura de reação. O macaco hidráulico está ligado por dois varões a um cabeço apoiado na viga de 2m e vai exercer força no sentido descendente, até a parede instabilizar sem, contudo, deixar atingir o colapso, uma vez que se pretendia reutilizar as

paredes em ensaios futuros. A carga exercida pelo macaco é medida pela pressão interna do próprio macaco e através de uma célula de carga colocada na extremidade do êmbolo. Existem mais duas células de carga, uma em cada varão que faz a ligação da parede ao macaco, como se pode observar na figura 5.20.

Um dos problemas previstos seria o deslocamento do topo da parede na direção perpendicular à parede. Este problema foi resolvido com a construção de um pórtico, com três “braços” no topo, que bloqueou o deslocamento do topo da parede nesta direção, como se pode observar na figura 5.20.

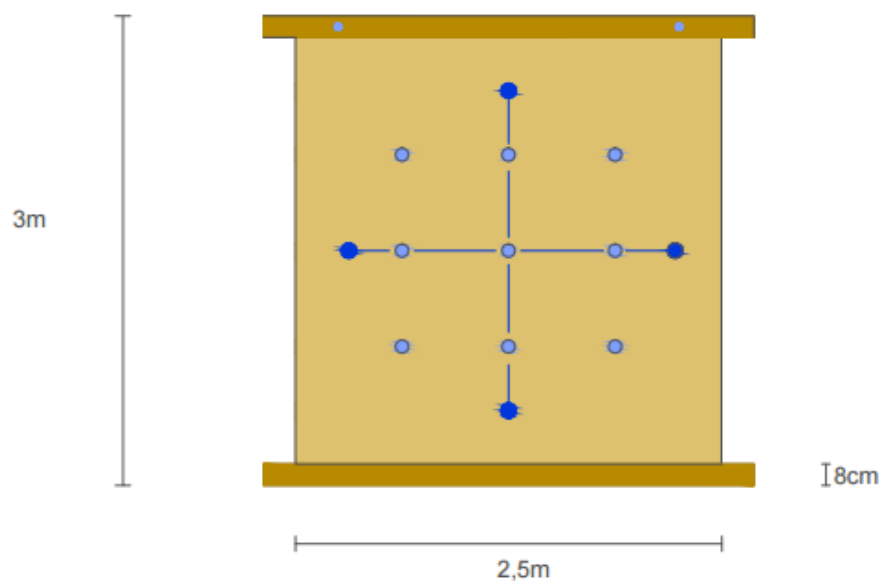
Os resultados destes ensaios são 3 deslocamentos, um por cada célula de carga que se relacionam diretamente com a carga exercida na parede, 11 deslocamentos na direção perpendicular ao plano da parede, 2 deslocamentos relativos no plano e a inclinação do cabeço medida com um clinómetro. Os 13 últimos deslocamentos são medidos através de LVDT's, cuja disposição se pode observar na figura 5.21.



#### Legenda

- Laje
- Varões que ligam o cabeço da parede ao macaco
- Parede de Tabique
- Frechal da parede
- Suportes de madeira (base e topo)
- Perfis
- Macaco
- Células de carga
- Suporte metálico

Fig. 5.20 – Corte do *setup* dos ensaios



Legenda:





-  Parede de Tabique
-  Frechal
-  Pontos em análise - deslocamento perpendicular ao plano da parede
-  Pontos em análise - Deslocamento relativo no plano da parede

Fig.5.21 – Esquema do posicionamento dos aparelhos de medida

Para se medir os deslocamentos fora do plano, foi necessário montar um pequeno pórtico de forma a ter-se um sistema de referência fixo em relação ao qual se poderá medir o deslocamento desses 11 pontos relativamente à posição inicial. Este pórtico conteve os LVDT que se ligavam às paredes através de fios (transdutores de deslocamento de fio).

Os ensaios foram efetuados com o auxílio do *software* PECA, desenvolvido pelo Laboratório de Engenharia Sísmica e Estrutural (LESE), que controla a pressão nos macacos e/ou o deslocamento imposto na estrutura e adquire a informação dos aparelhos de medida, exportando-os automaticamente para folhas de Excel. Para se poder interpretar com clareza os resultados, foram dados números a cada LVDT e a cada célula de carga, como indicado nas figuras 5.22 e 5.23.

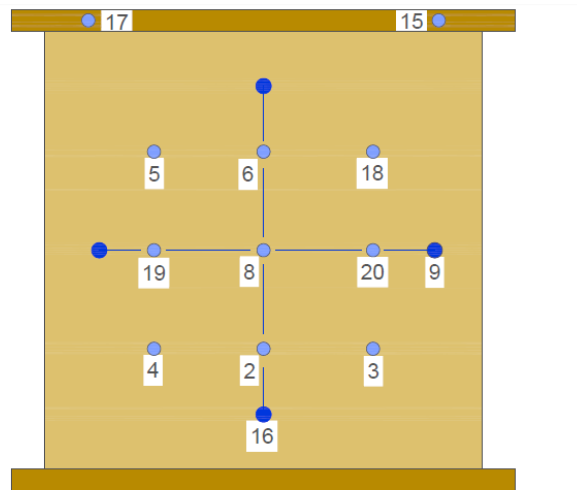


Fig.5.22 – Numeração dos LVDT

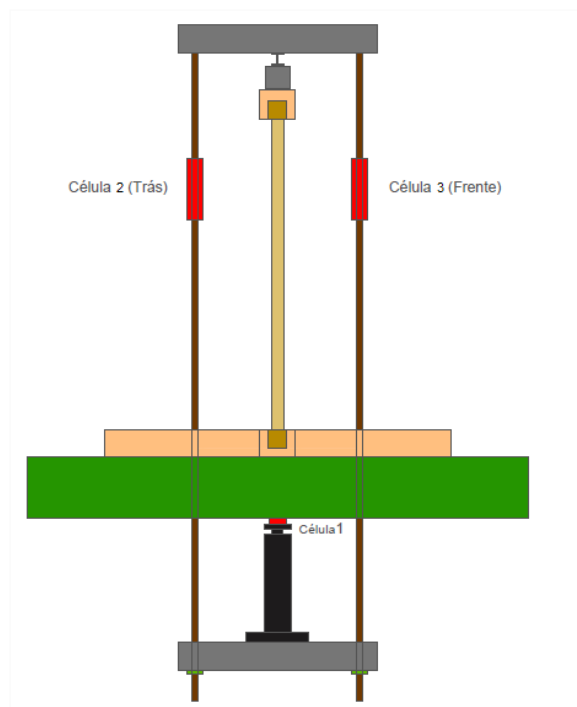


Fig.5.23 – Numeração das células de carga

O primeiro ensaio mostrou ser necessário montar umas guias, formadas por quatro colunas, no piso inferior, com o objetivo de evitar a rotação do macaco para fora do plano da parede. No segundo ensaio o macaco rodou no plano, obrigando a executar um sistema que travasse essa rotação.

As figuras 5.24 a 5.28 mostram fotografias de todos os elementos referidos anteriormente.

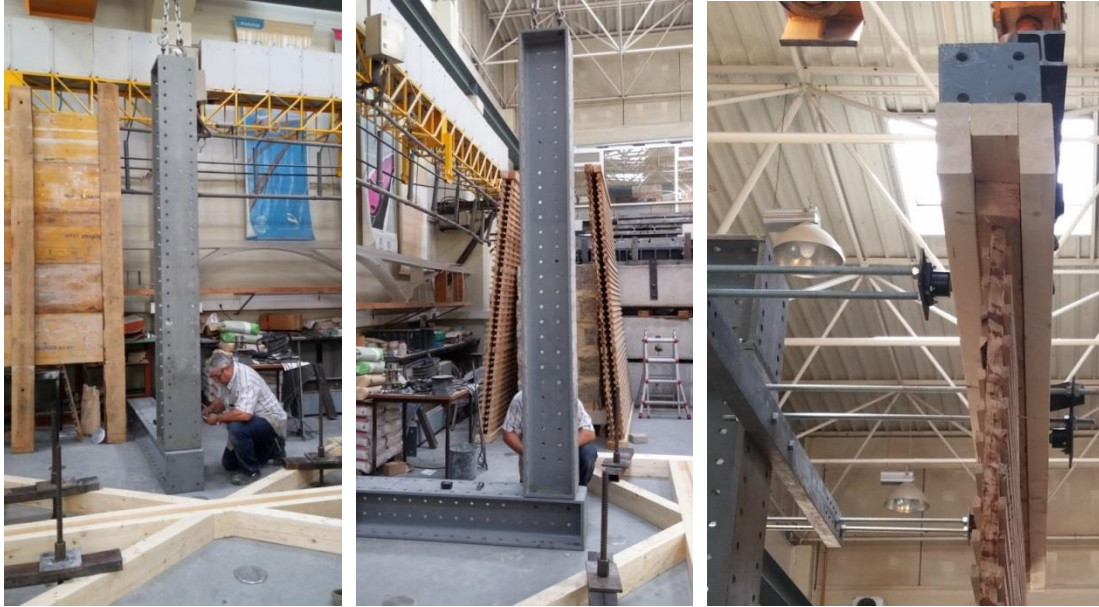


Fig.5.24 – Pórtico metálico que contém o braço que impede o deslocamento do cabeço da parede para fora do plano da parede

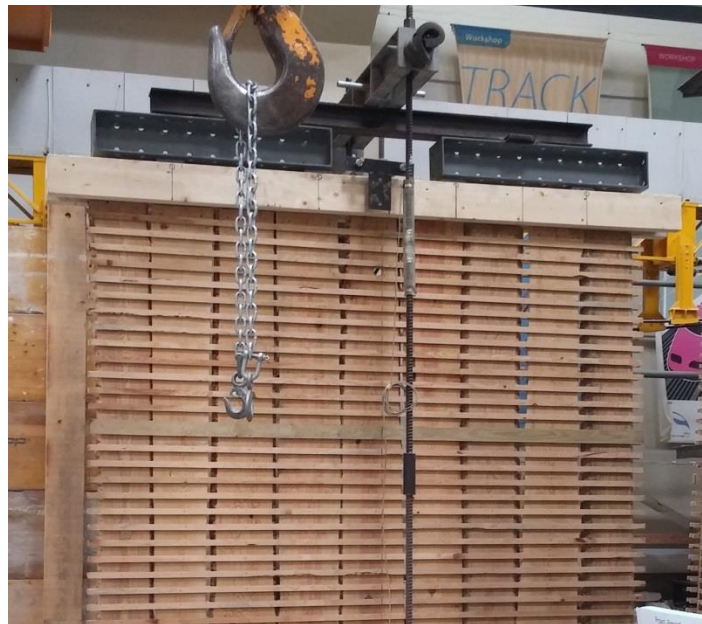


Fig.5.25 – Vigas de distribuição de carga



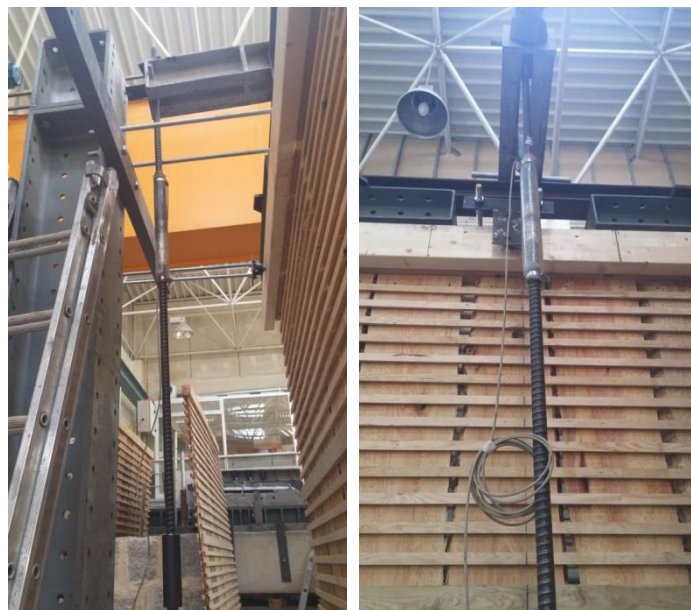


Fig.5.26 – Varões e respectivas células de carga



a)

b)

c)

Fig.5.27 – a) guias; b) perfis; c) macaco e célula de carga (no topo do macaco)

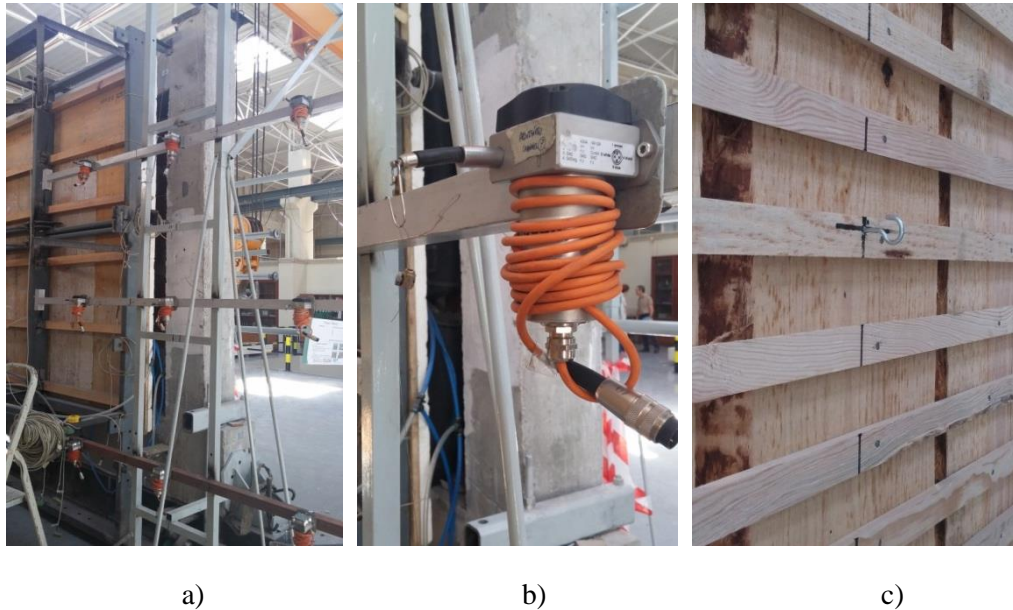


Fig.5.28 – a) Pórtico fixo com respetivos LVDT's; b) LVDT de fio; c) ligação do fio do LVDT à parede

#### 5.5.2. CONDIÇÕES DE CARREGAMENTO

Foram realizados quatro ensaios de compressão no plano: 2 ensaios monotónicos, um para cada tipo de parede, simples e dupla, até atingir-se a sua instabilidade, sem contudo nunca chegar à rotura; 2 ensaios cíclicos, também um para cada tipo de parede, com o intuito de determinar a energia dissipada pela madeira em cada ciclo, o deslocamento residual nas descargas e a eventual perda de rigidez e capacidade resistente por carregamento cíclico.

Os ensaios têm como nomenclatura PTS – CM, para o ensaio monotónico numa parede de tabique simples, PTS – CC, para o ensaio cíclico numa parede de tabique simples, PTD – CM, para o ensaio monotónico numa parede de tabique dupla e PTD – CC, para o ensaio cíclico numa parede de tabique dupla. Foram realizados em primeiro lugar os ensaios monotónicos, de forma a ter-se uma ideia da carga atingida pelo macaco em cada tipo de parede, e só depois os cíclicos, tendo os ensaios sido realizados com controlo de deslocamentos. Assim, os ensaios foram numerados de 1 a 4, começando pelo PTS – CM e terminando no PTD – CC.



# 6

## ENSAIOS EXPERIMENTAIS

### 6.1. OBJETIVOS

Os objetivos deste capítulo são:

- Apresentar e analisar os resultados.
- Comparar os resultados obtidos experimentalmente com os resultados obtidos numericamente, no capítulo 4.

### 6.2. INTRODUÇÃO

Após a definição do *setup* do ensaio de compressão no plano é descrito, neste capítulo, a realização e interpretação dos resultados.

Feita a análise numérica e experimental das paredes em estudo é então feita a comparação dos resultados das duas abordagens. O alvo desta análise é a carga crítica de encurvadura de cada tipo de parede de tabique.

### 6.3. ENSAIO PTS - CM

O primeiro ensaio, PTS - CM, é um ensaio monotónico numa parede de tabique simples. O ensaio deu-se como terminado quando o declive da curva força vs deslocamento tendeu para zero; nesse momento os deslocamentos medidos pelos LVDT's aumentaram exponencialmente, parando-se o ensaio de modo a evitar a rotura da parede. Note-se que o objetivo do ensaio era atingir o patamar de instabilidade, já que se pretendia saber a sua capacidade resistente e, por outro lado reutilizar estas paredes no futuro para ensaios de soluções de reforço. O carregamento foi realizado a uma velocidade de 0,01mm/s e a descarga a uma velocidade de 0,05mm/s.

Pode-se observar na figura 6.1 o *setup* deste ensaio montado.



Fig.6.1 – Setup do ensaio PTS – CM

### 6.3.1. ANÁLISE DA CURVA DE RESPOSTA GLOBAL FORÇA VS DESLOCAMENTO

As figuras 6.2 e 6.3 ilustram as curvas de comportamento global, força aplicada no topo da parede *versus* o deslocamento imposto medido com o LVDT interno.

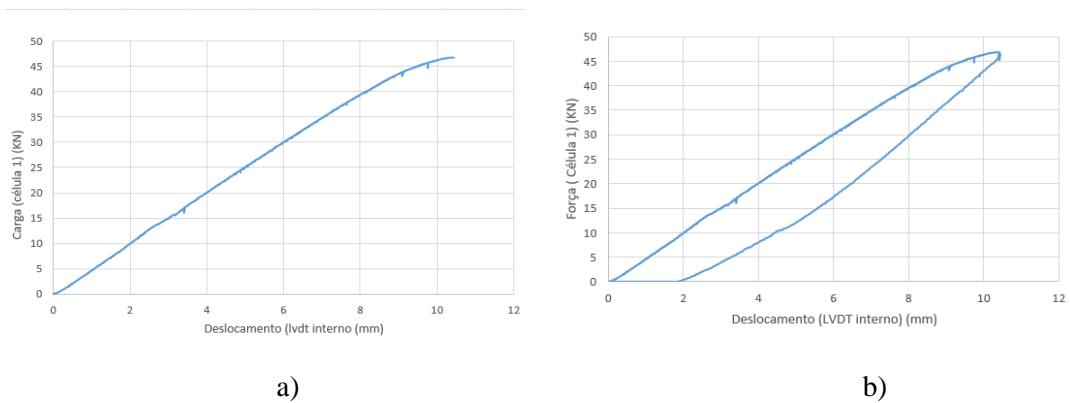


Fig.6.2 – Força vertical (Célula 1) vs Deslocamento (LVDT interno) do PTS – CM: a) sem descarga; b) com descarga

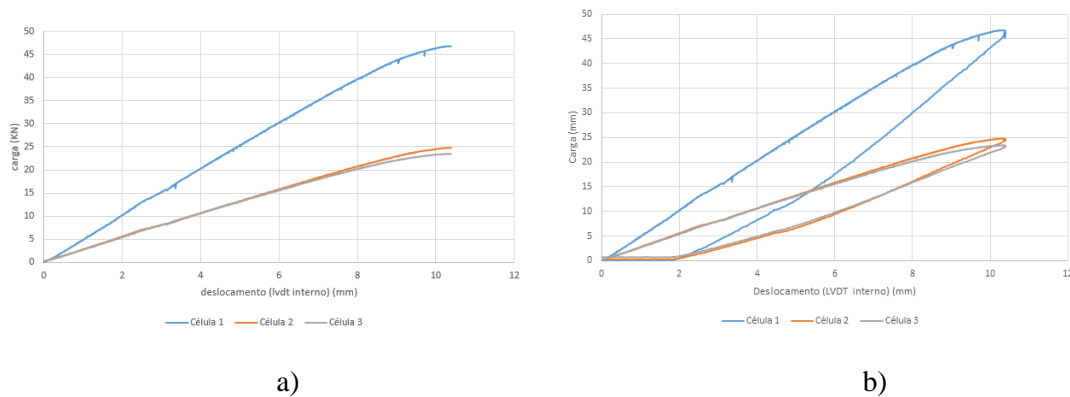


Fig.6.3 – Força vertical (Célula 1, 3 e 4) vs Deslocamento (LVDT interno) do PTS – CM: a) sem descarga; b) com descarga

Estas curvas permitiram retirar as seguintes conclusões:

- Esta parede apresenta um força crítica de aproximadamente 46,8kN ou seja um  $P_{cr}$  de  $18,7\text{KN/m}$  ( $\frac{46,8}{2,5} = 18,7\text{KN/m}$ ).
- A força medida pela célula 1 é aproximadamente igual à soma das forças medidas pelas células 2 e 3, sendo estas semelhantes, como seria desejável.
- O deslocamento vertical máximo é de cerca de 10,7mm, não sendo significativo quando comparado com uma altura de parede de 3m (0,36%).
- A inclinação das trajetórias de carga e descarga são semelhantes e o deslocamento residual apresenta um valor de 1,95mm. Isto indica que para os níveis de deslocamento imposto, o comportamento da parede é pouco plástico.
- A energia dissipada neste ensaio é dada pela área da curva do gráfico b) da figura 6.2 e tem um valor de 0,86J.

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

De forma a analisar a rotação ocorrida no frechal superior da parede ao longo do ensaio, representa-se no gráfico da figura 6.4 a rotação em relação ao eixo x e y, eixo do plano da parede e eixo perpendicular ao plano da parede, respetivamente.

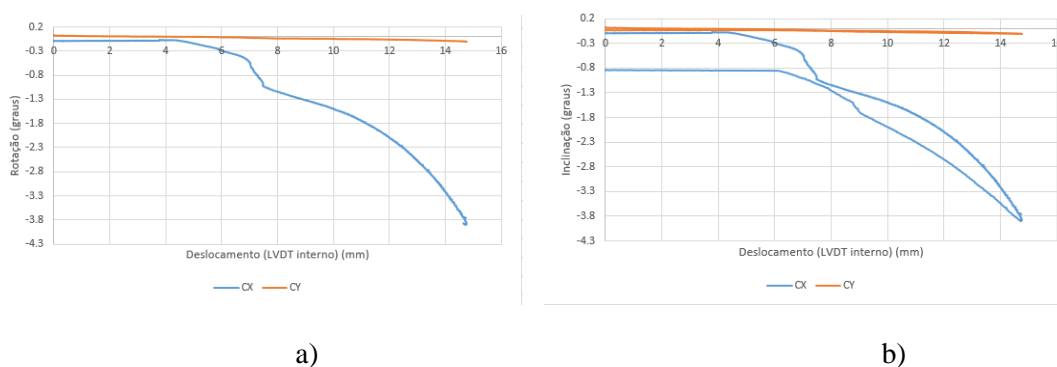


Fig.6.4 – Rotação do frechal da parede vs deslocamento do PTS – CM: a) sem descarga; b) com descarga



No que diz respeito aos objetivos propostos para este ensaio, era desejável que não ocorresse qualquer tipo de rotação do frechal da parede em relação ao eixo yy, o que acontece. Em relação ao eixo xx, desde o início do ensaio que o frechal roda. Inicialmente o frechal apresentava uma rotação positiva em relação ao eixo xx, isto é o frechal estava rodado para “trás”, contrariamente ao que se observa no momento de deslocamento máximo, em que o frechal roda para a “frente” da parede, como se pode observar na figura 6.4. Até um deslocamento de cerca de 5mm, a rotação do frechal em relação ao eixo xx não é significativa, enquanto a partir dos 6mm o frechal começa a apresentar valores significativos de rotação. Estes resultados indiciam que a parede funciona como rotulada no topo (figura 6.5).

Após a descarga, o frechal não retoma a sua inclinação inicial, apresentando uma inclinação negativa de  $0,8^\circ$ .

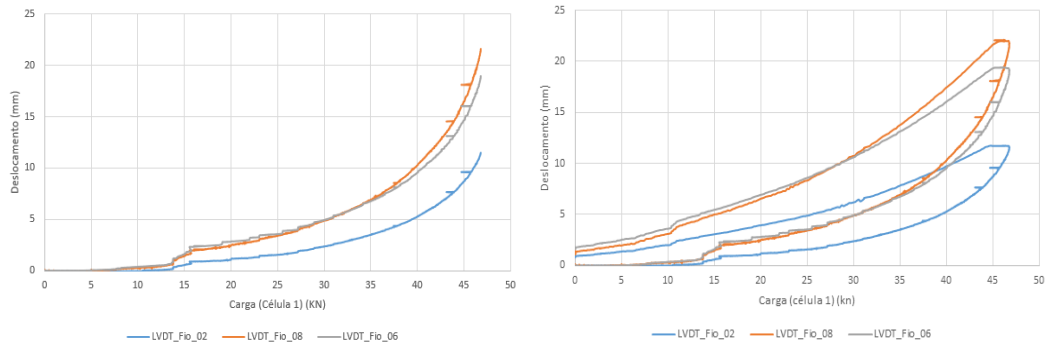


Fig.6.5 – Vista transversal da deformação da parede – PTS – CM

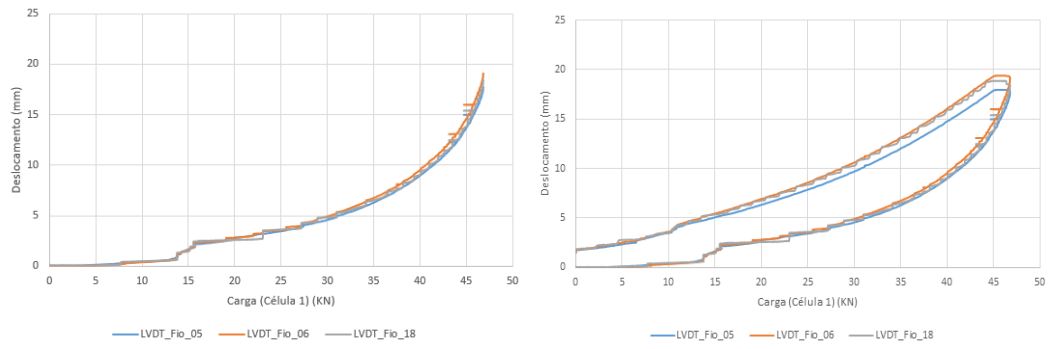
### 6.3.3. ANÁLISE DO DESLOCAMENTO DA PAREDE NA DIREÇÃO PERPENDICULAR AO SEU PLANO

A figura 6.6 apresenta o deslocamento dos pontos mais relevantes da parede, esquematizados anteriormente, na figura 5.26. Com esta informação é possível analisar passo a passo todo o comportamento da parede.

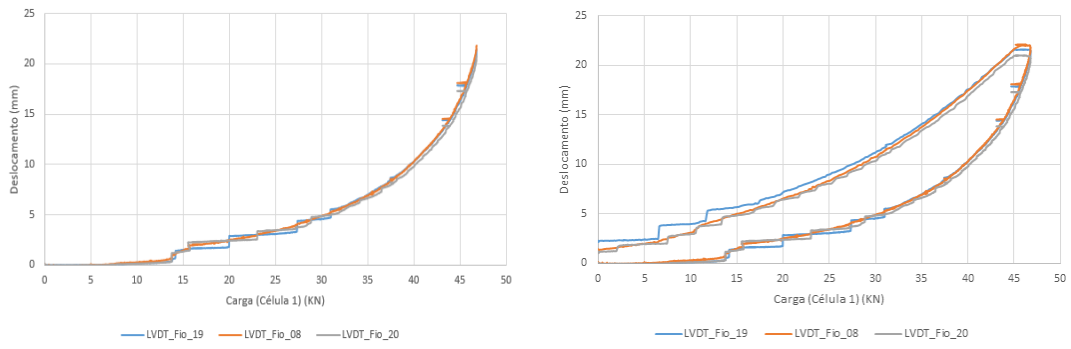
## Avaliação das características mecânicas de paredes de tabique à compressão no plano



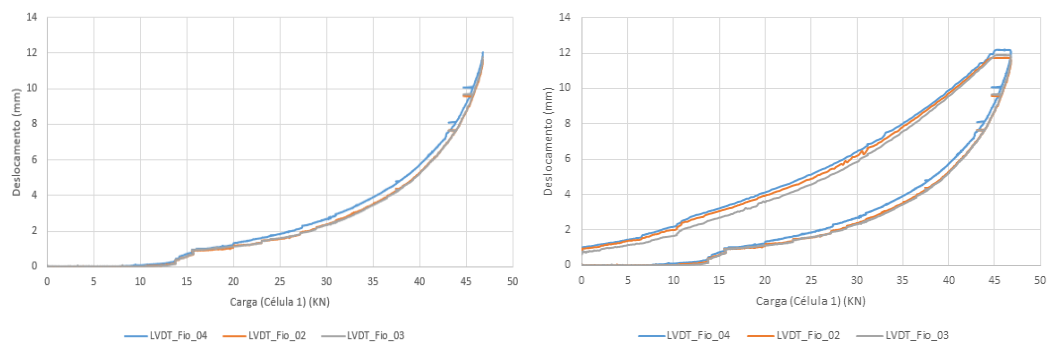
a)



b)



c)



d)



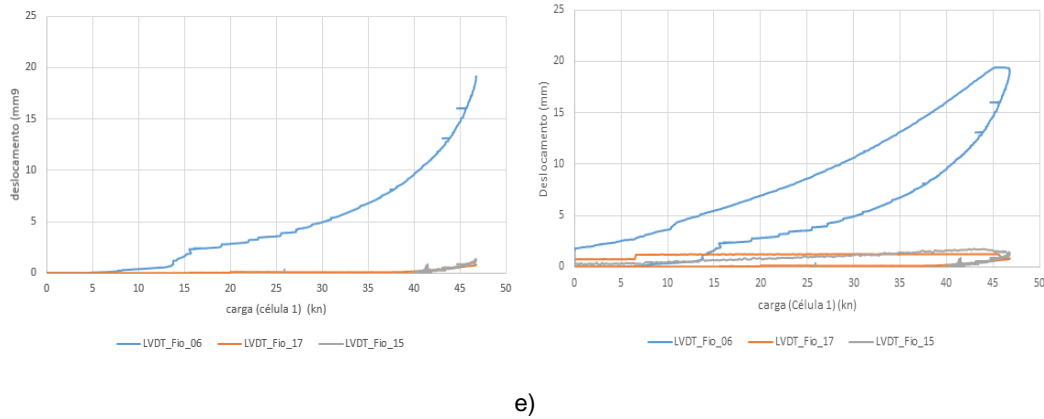


Fig.6.6 – Deslocamentos medidos vs Carga medida pela Célula 1 em PTS – CM nos pontos: a) 2, 6 e 8; b) 5, 6 e 18; c) 19, 8 e 20; d) 4, 2 e 3; e) 6, 15 e 17

Analisando as figuras anteriores, nomeadamente a figura 6.6 - b) e c) e d), podemos concluir que na direção horizontal os deslocamentos são iguais, por isso podemos analisar o comportamento da parede ao longo da sua altura apenas pelo gráfico a), por exemplo. Através da análise deste gráfico verifica-se que a parede faz uma barriga não-simétrica para trás da parede; a zona situada a metade da altura da parede (ponto 8) apresenta o maior deslocamento perpendicularmente ao plano da parede, e as zonas superior (ponto 6) e inferior (pontos 2) apresentam deslocamentos inferiores, mas diferentes entre si, sendo que a zona inferior apresenta deslocamentos mais pequenos que a zona superior. Este facto pode ser explicado pelas condições de fronteira do frechal superior e inferior, sendo que o frechal inferior se encontra mais encastrado do que o frechal superior que se apresenta mais livre para rodar. O deslocamento é positivo, ou seja a parede afasta-se do pórtico fixo que serve de referência. O deslocamento máximo imposto na parede é de aproximadamente 22mm, medido pelo LVDT 8.

De forma a obter uma melhor perceção do comportamento da parede ao longo do ensaio, foram realizados vários perfis da parede, com base no deslocamento dos pontos 2, 8, 6 e 17, situados a 0,75, 1,5, 2,25 e 3m de altura, respetivamente. Foi desenhado um perfil para cada 10KN, ou seja para 0, 10, 20, 30, 40 e para a carga final de 46,8KN, assim como para o final da descarga, como se pode observar na figura 6.7 e 6.8.

Através da figura 6.6 – e) podemos concluir que, tal como era esperado, o frechal superior (pontos 15 e 17) não sofreu deslocamentos significativos para fora do plano da parede de tabique, nem a parede apresentou torção, isto é o deslocamento dos pontos 15 e 17 são iguais.

Todos os pontos analisados retomaram aproximadamente a sua posição inicial após o descarregamento, o que indica que não ocorreu perda significativa de rigidez da parede.

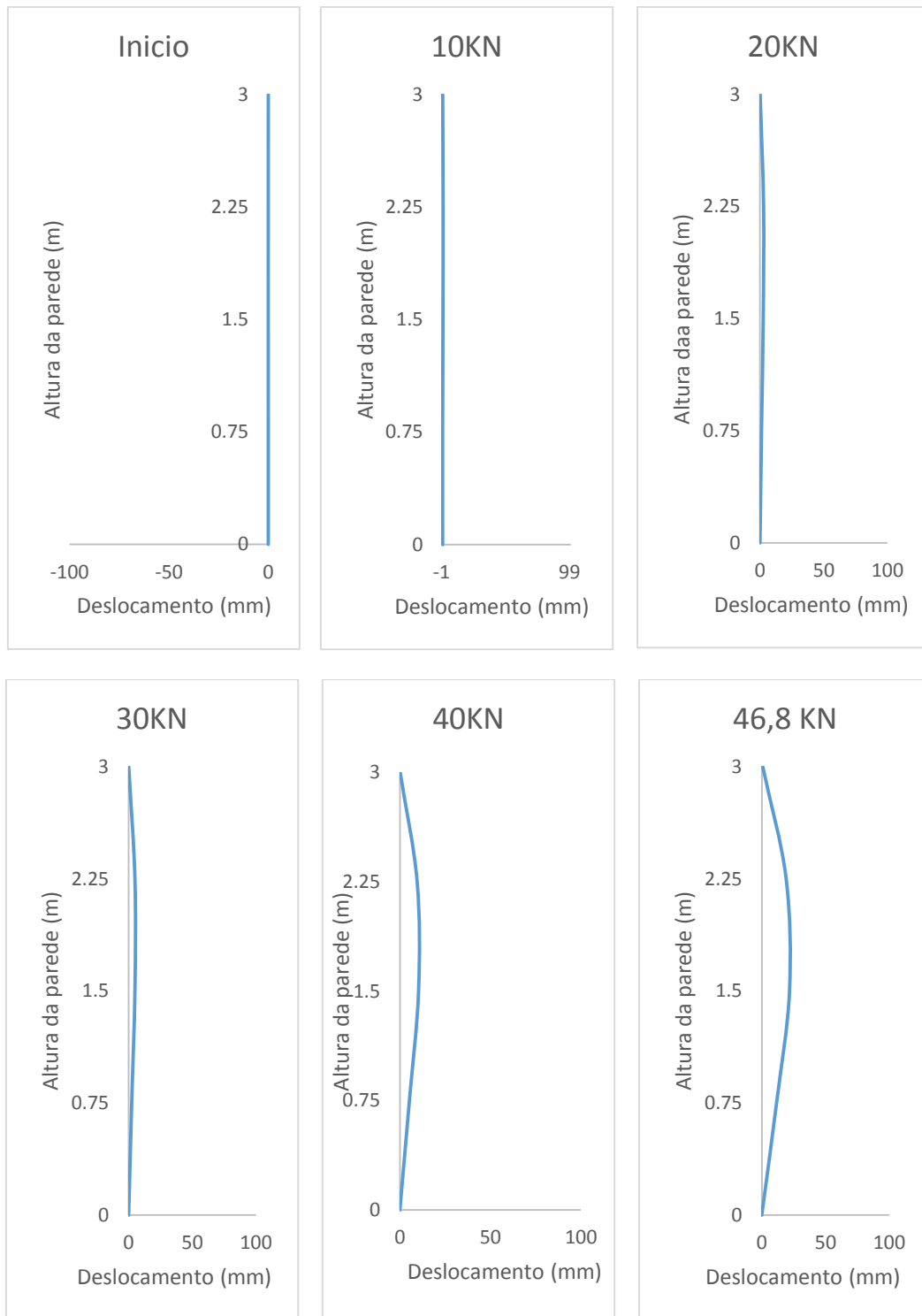


Fig.6.7 – Perfil transversal da parede PTS – CM para diferentes fases do carregamento

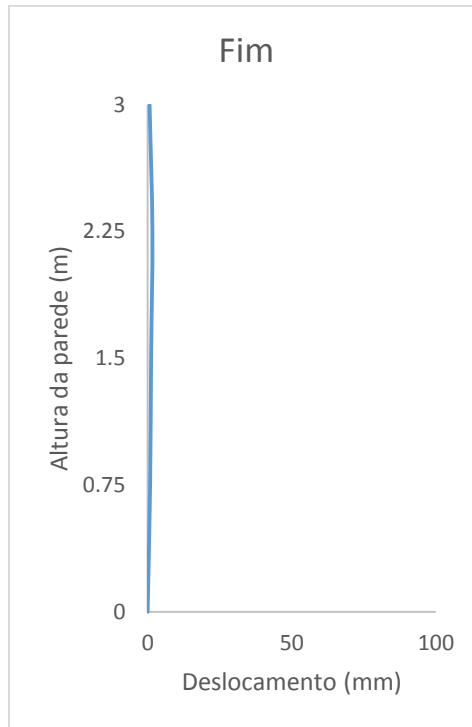


Fig.6.8 – Perfil transversal da parede PTS – CM após a descarga

Com base nos perfis desenhados fica-se a conhecer a “história” desta parede ao longo de todo o ensaio, verificando-se que na primeira fase do carregamento, sensivelmente aos 30KN, o maior deslocamento ocorre na parte superior da parede. Quando a parede começa a atingir a instabilidade é formada a barriga não-simétrica com o máximo deslocamento a cerca de meio da altura da parede.

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

De forma analisar o que acontece no plano da parede, foi feito o controlo de dois deslocamentos relativos no plano, representados pelos números 9 e 16, na horizontal e vertical, respetivamente. Os resultados estão ilustrados na figura 6.9.

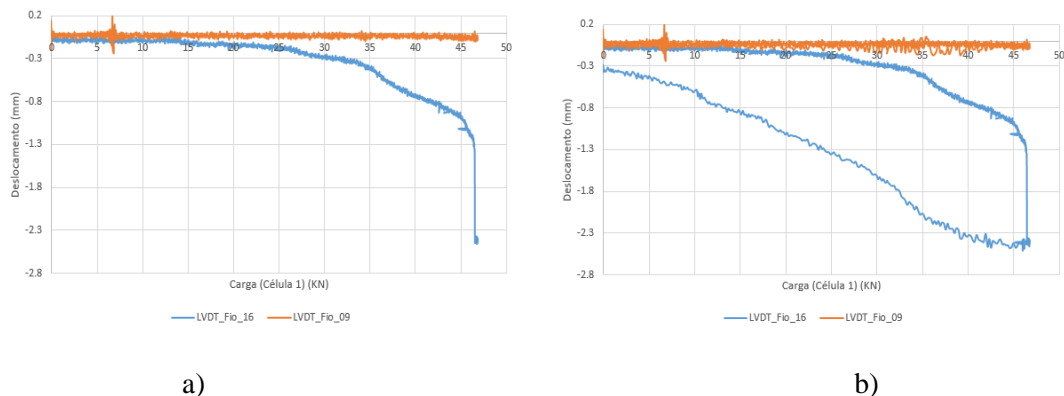


Fig.6.9 – Deslocamentos relativos no plano da parede de PTS – CM: a) sem descarga; b) com descarga

Analisando os gráficos anteriores, pode-se concluir que o deslocamento relativo horizontal, medido pelo LVDT 9 é nulo, como seria expectável pois não existem esforços nessa direção.

Na direção vertical, o deslocamento relativo é praticamente nulo nos primeiros 35KN, aumentando ligeiramente após esse valor de carga, e por fim exponencialmente até os 2,4mm, quando a parede instabiliza. Isto deve-se à formação da barriga, que faz descer o ponto superior, aproximando-o do ponto inferior.

#### 6.4. ENSAIO PTS - CC

O segundo ensaio é um ensaio cíclico noutra parede de tabique simples, em que o objetivo foi carregar a parede até aos 10KN, descarregar até zero e fazer o mesmo para os 20, 30 e 40KN, sendo que depois deste último, deixar-se-ia carregar até atingir a instabilidade da parede. Como o ensaio é controlado por deslocamento, tentou-se estimar (com base no ensaio monotónico) o deslocamento necessário para atingir os intervalos de 10KN, tendo-se obtido um deslocamento 3mm. No entanto, na prática, para 3mm obteve-se um intervalo de força de 15KN, sendo apenas possível realizar 3 ciclos completos, sendo que no quarto ciclo a parede instabilizou.

O carregamento foi realizado a uma velocidade de 0,01mm/s e a descarga a uma velocidade de 0,05mm/s, tal como no ensaio monotónico. Pode-se observar na figura 6.10 o *setup* deste ensaio.



Fig.6.10 – *Setup* do ensaio PTS – CC

##### 6.4.1. ANÁLISE DA CURVA DE RESPOSTA GLOBAL FORÇA VS DESLOCAMENTO

A figura 6.11 ilustra as curvas de comportamento global, força aplicada no topo da parede *versus* o deslocamento imposto medido com o LVDT interno.

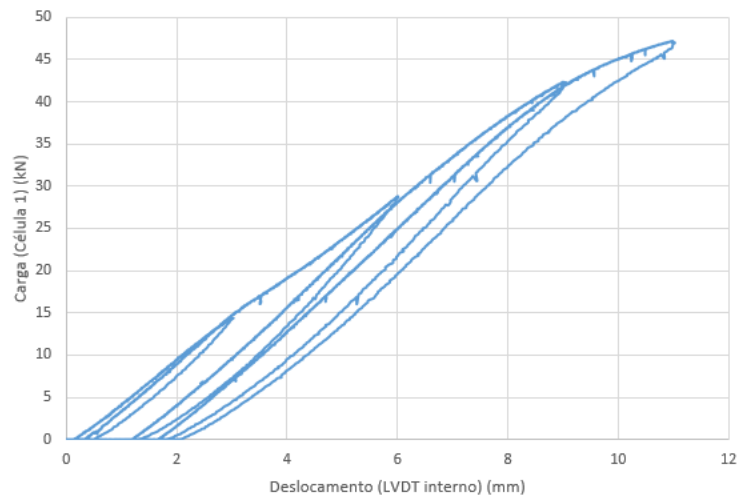


Fig.6.11 – Força vertical (Célula 1) vs Deslocamento (LVDT interno) – PTS – CC

Este gráfico permitiu retirar as seguintes conclusões:

- A parede instabilizou no quarto ciclo, ao atingir os 47kN de carga. Este resultado foi muito próximo do ensaio monotónico, indicando que o carregamento cíclico não foi causa de dano (criação de folgas nas ligações, ou roturas, por exemplo) que pudessem fazer diminuir a capacidade resistente das paredes. Por outro lado, a madeira não é um material muito dissipativo.
- O primeiro ciclo atinge aproximadamente os 15kN; na recarga, a curva inicia com um declive idêntico ao da descarga, mas superior ao da carga na envolvente, e quando se aproxima dos 15kN a curva tende para o declive da curva do ciclo anterior, prosseguindo até à carga máxima do segundo ciclo, 28kN. O mesmo acontece no terceiro e quarto ciclo. Isto quer dizer que se considerarmos apenas a curva do primeiro ciclo, a curva do segundo ciclo dos 15 aos 28kN, a curva do terceiro ciclo dos 28 aos 42kN e a curva do quarto ciclo dos 42 aos 47kN, ou seja, a envolvente do gráfico, obtemos sensivelmente a curva resultante de um ensaio monotónico nesta parede.
- O deslocamento máximo vertical da parede é cerca de 11mm, ligeiramente superior que no ensaio monotónico.
- Após este ensaio existe um deslocamento residual de cerca de 2mm.

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

Representa-se no gráfico da figura 6.12 a rotação em relação aos eixos xx e yy.

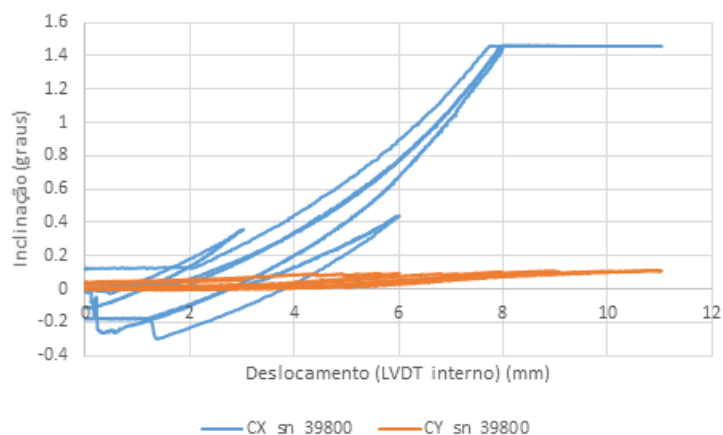


Fig.6.12 – Rotação do frechal da parede vs deslocamento – PTS – CC

Tal como no ensaio monotónico, a rotação do frechal em relação ao eixo perpendicular ao plano da parede, y, é quase nula ao longo de todo o ensaio. O mesmo não acontece com a rotação do frechal em relação ao eixo x, que apresenta várias oscilações. Contrariamente ao frechal da parede do ensaio monotónico, este apresenta uma inclinação inicial negativa (inclinado para a “frente” da parede) e uma inclinação positiva (inclinado para “trás” da parede) nos momentos de deslocamento máximo da parede. Nos dois últimos ciclos observa-se que o frechal estabiliza, adquirindo uma rotação de 1,4° em torno do eixo x, a partir dos 8mm de deslocamento. Esta inclinação final pode ser observada na figura 6.13.



Fig.6.13 – Vista transversal da rotação do frechal – PTS – CC

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

Tal como no ensaio PTS – CM, foi feita a análise dos pontos avaliados. Esta análise é feita com base nos gráficos apresentados na figura 6.14.

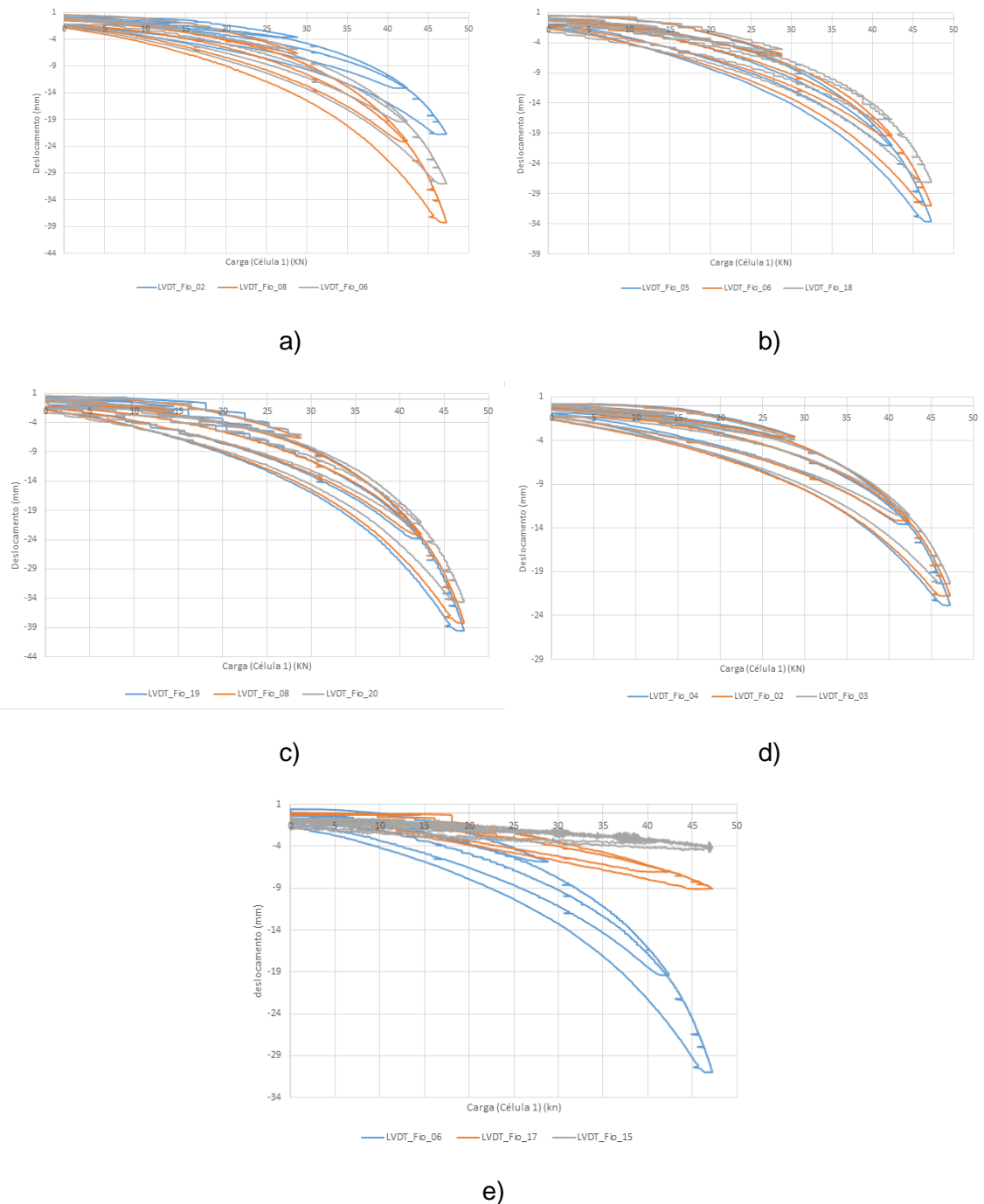


Fig.6.14 – Deslocamentos medidos vs Carga medida pela Célula 1 em PTS – CC nos pontos: a) 2, 6 e 8; b) 5, 6 e 18; c) 19, 8 e 20; d) 4, 2 e 3; e) 6, 15 e 17

Relativamente ao deslocamento dos seis pontos centrais da parede ensaiada, a conclusão é a mesma do ensaio PTS – CM, à exceção de que neste caso os deslocamentos são negativos, ou seja, a barriga não-simétrica formou-se para a “frente” da parede, aproximando-se do pórtico fixo. O deslocamento máximo medido na parede foi cerca de 38mm, atingido pelo LVDT 8.

O frechal superior sofreu uma ligeira torção, que se pode verificar com base na figura 6.14 – e) em que o deslocamento do ponto 17 é superior ao deslocamento do ponto 15.

A envolvente de todas as curvas “deslocamento *versus* carga” corresponde às curvas que se obteriam num ensaio monotónico na mesma parede, tal como foi referido na secção anterior, o que confirma que de ciclo para ciclo a parede não perdeu rigidez significativa.

Para este ensaio, também foram desenhados vários perfis da parede, com base no deslocamento dos pontos 2, 8, 6 e 17, situados a 0,75, 1,5, 2,25, e 3m de altura, respetivamente. Foi desenhado um perfil para cada 15kN de cada ciclo, ou seja para o primeiro ciclo: 0,10, 15kN; para o segundo ciclo: 0, 10, 20, 28kN; para o terceiro ciclo: 0, 10, 20, 30, 42kN; para o quarto ciclo: 0,10, 20, 30, 40, 47kN e para o final da descarga. Estes perfis são apresentados nas figuras de 6.15 a 6.19.

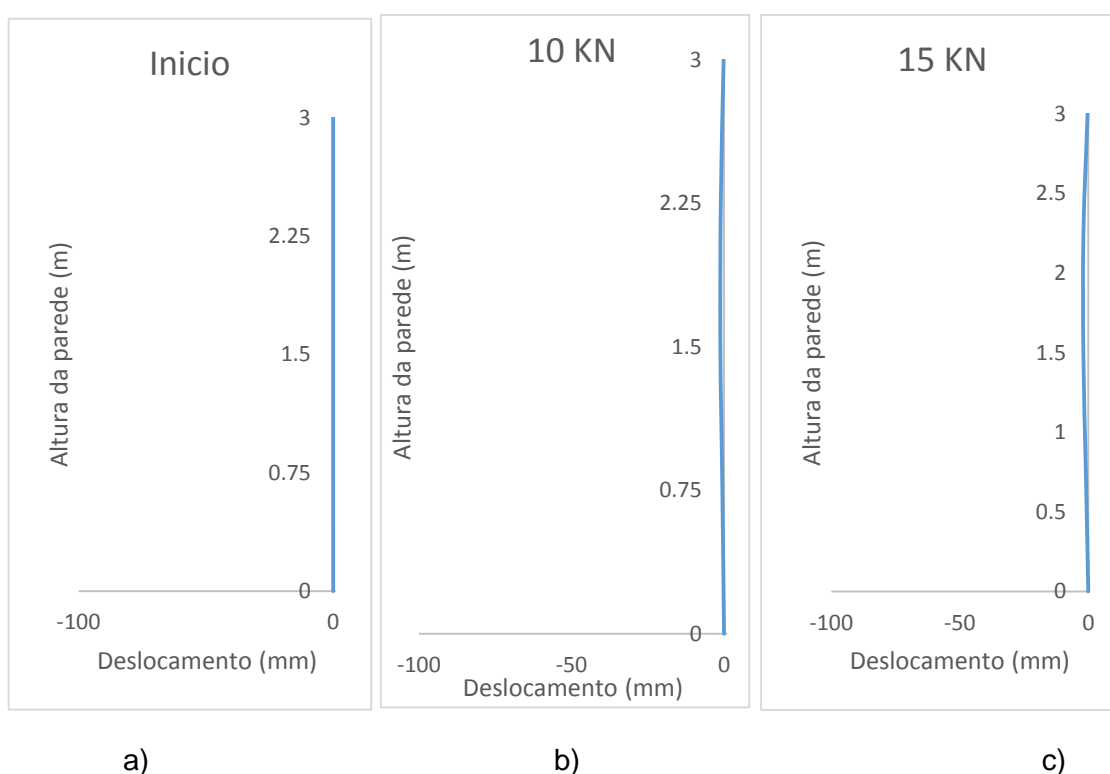


Fig.6.15 – Perfil transversal da parede PTS – CC para diferentes fases do carregamento do primeiro ciclo: a) 0kN; b) 10kN; c) 15kN



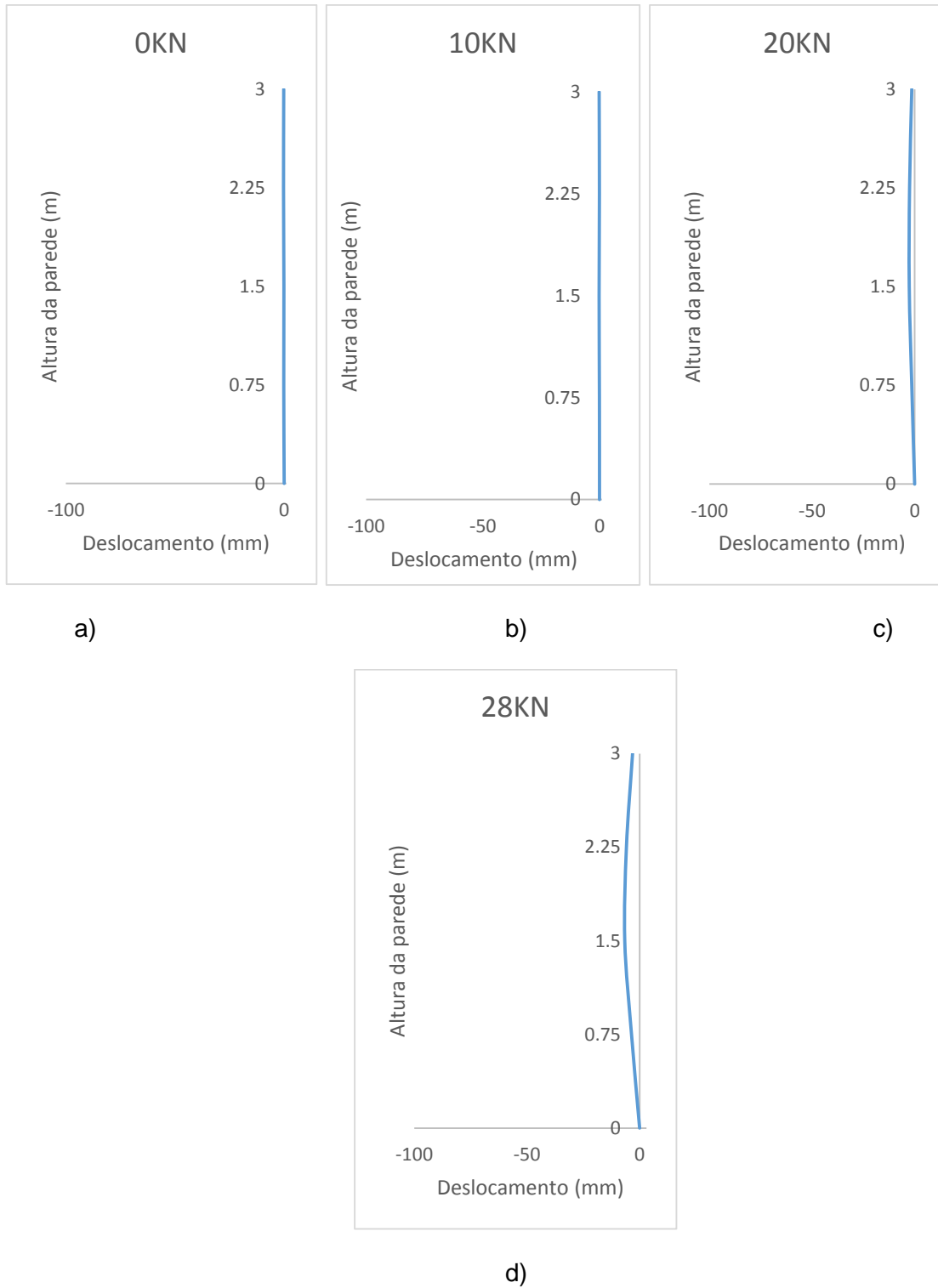


Fig.6.16 – Perfil transversal da parede PTS – CC para diferentes fases do carregamento para o segundo ciclo: a) 0KN; b) 10KN; c) 20KN; d) 28KN

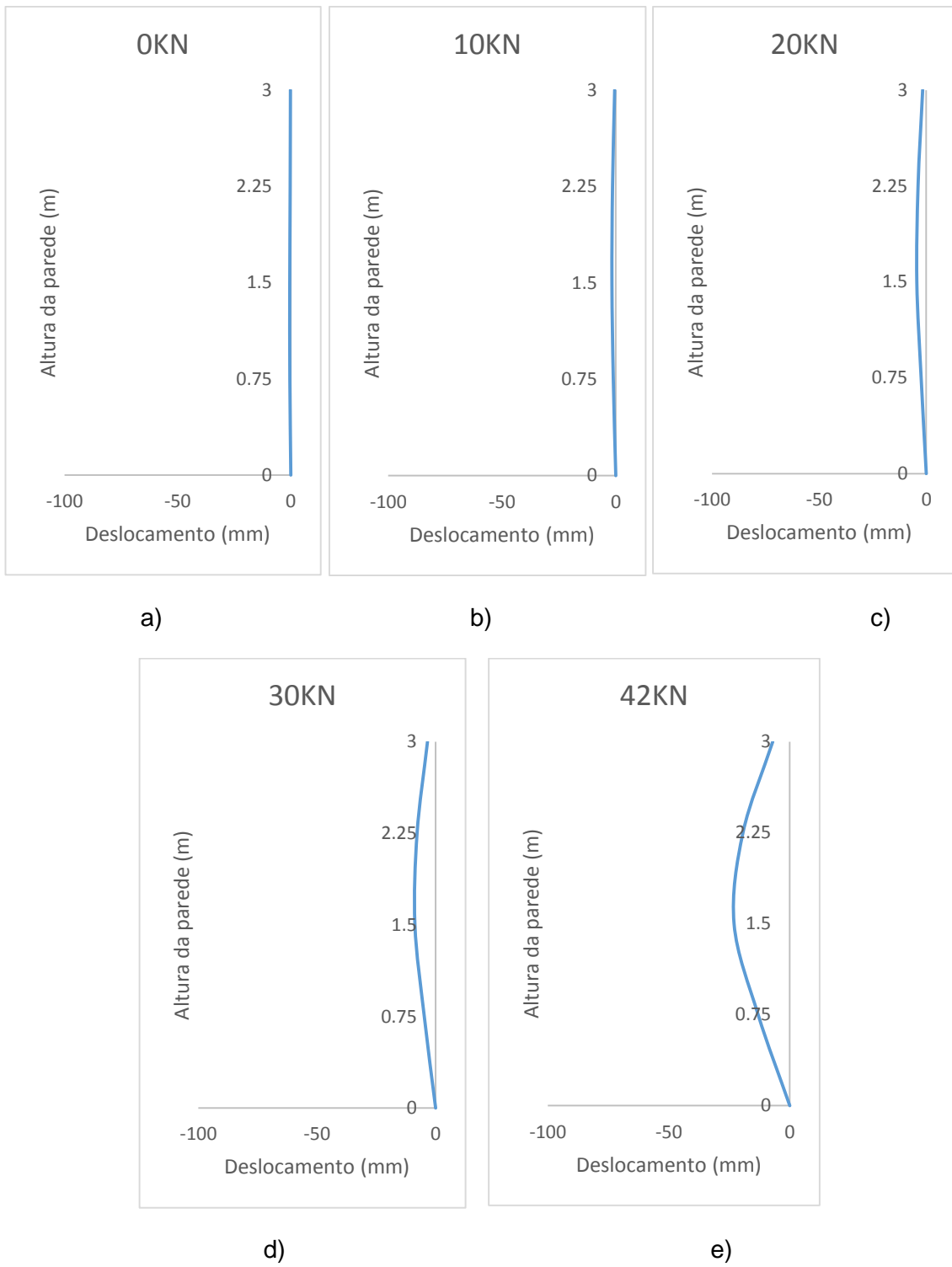


Fig.6.17 – Perfil transversal da parede PTS – CC para diferentes fases do carregamento para o terceiro ciclo: a) 0KN; b) 10KN; c) 20KN; d) 30KN; e) 42KN

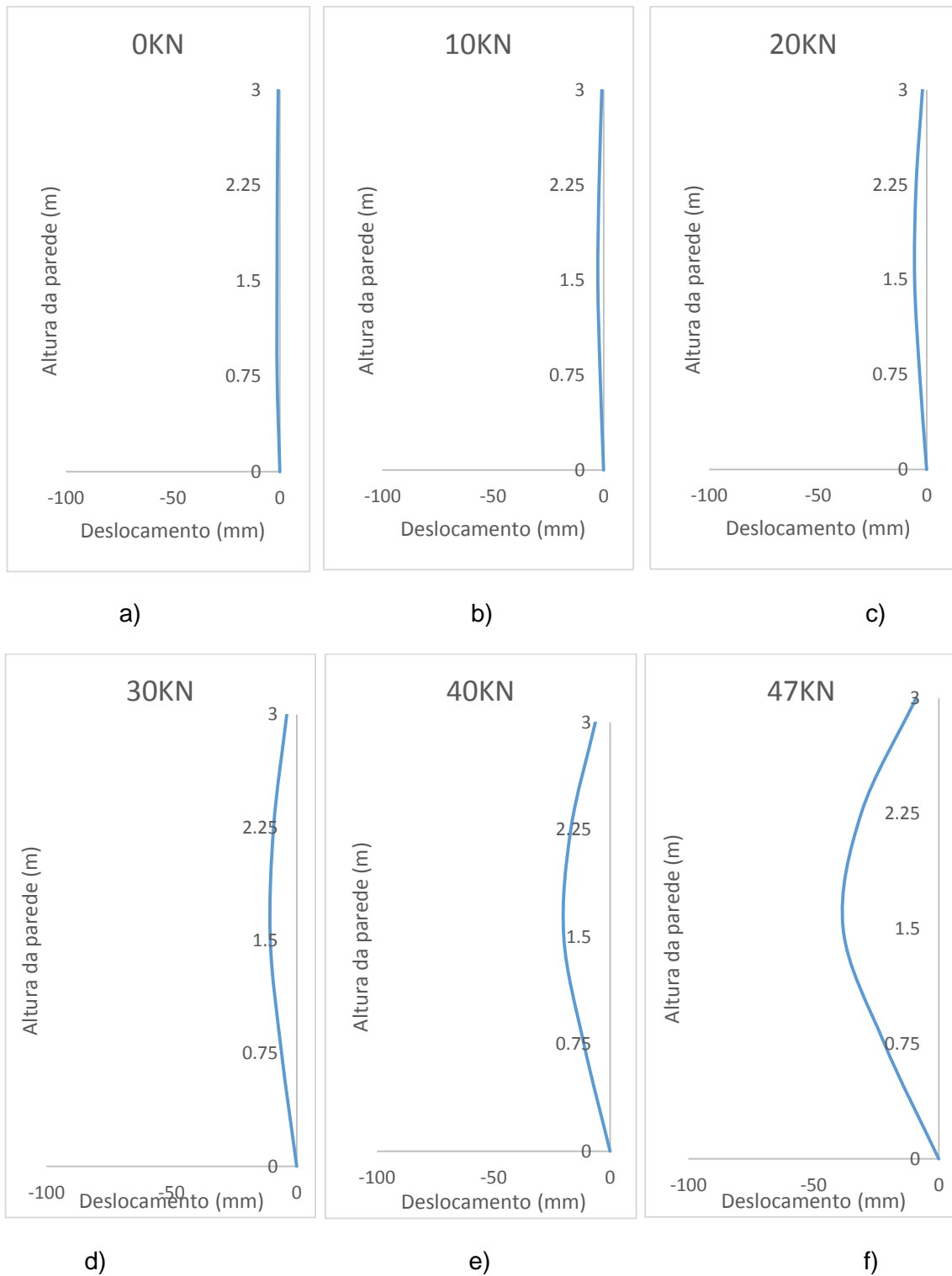


Fig.6.18 – Perfil transversal da parede PTS – CC para diferentes fases do carregamento para o quarto ciclo: a) 0kN; b) 10kN; c) 20kN; d) 30kN; e) 40kN; f) 47kN

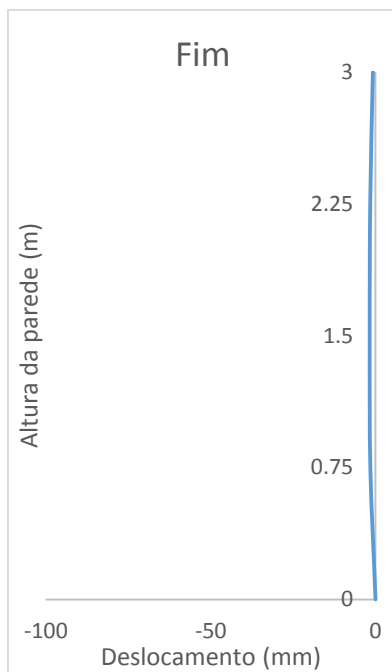


Fig.6.19 – Perfil transversal da parede PTS – CC após a descarga

6.4.4. ANÁLISE DOS DESLOCAMENTOS NO PLANO DA PAREDE

A figura 6.20 ilustra as curvas do deslocamento relativo horizontal e vertical da parede PTS – CC, medidos pelos LVDT 9 e 16, respetivamente.

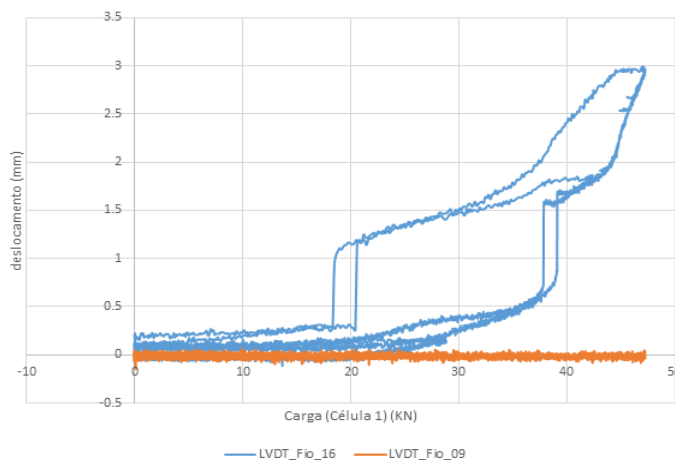


Fig.6.20 – Deslocamentos relativos no plano da parede – PTS – CC

Analisando as curvas do gráfico da figura anterior, pode-se concluir que o deslocamento relativo horizontal é nulo em todos os ciclos, como era previsto. Relativamente ao deslocamento relativo vertical, não foi possível retirar nenhuma conclusão pois o fio do LVDT encostou na parede, logo a curva obtida não retrata o deslocamento real.

Na figura 6.21 pode observar-se a deformação máxima da parede.



Fig.6.21 – Vista transversal da deformação da parede – PTS – CC

### 6.5. ENSAIO PTD - CM

O ensaio monotónico foi repetido numa parede de tabique dupla. Pode observa-se o *setup* do ensaio na figura 6.22.

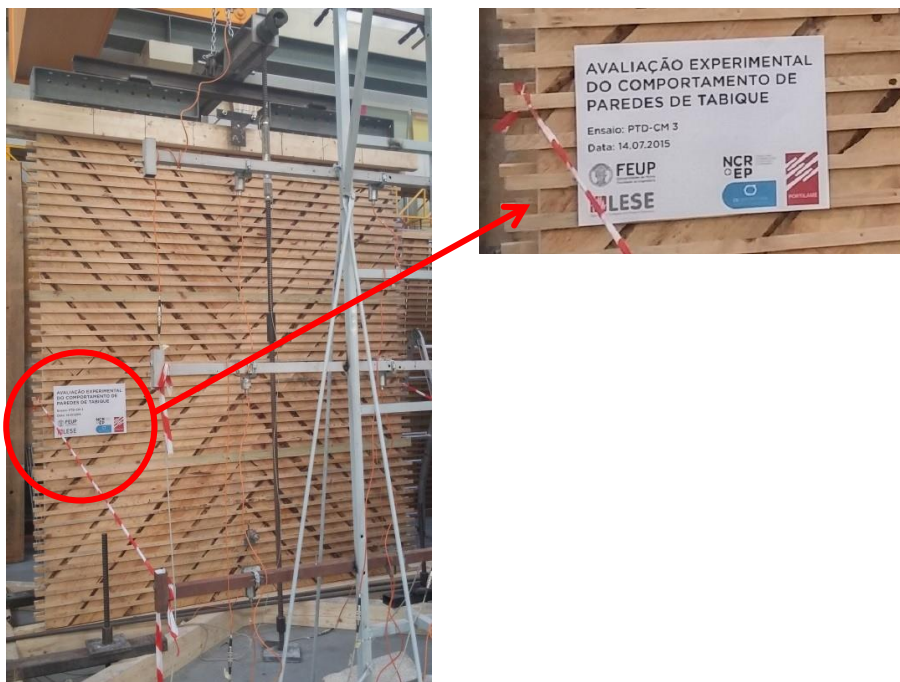


Fig.6.22 – Setup do ensaio PTD – CM

6.5.1. ANÁLISE DA CURVA DE RESPOSTA GLOBAL FORÇA VS DESLOCAMENTO

Na figura 6.23 estão representadas as curvas de comportamento global, força aplicada no topo da parede *versus* o deslocamento imposto medido com o LVDT interno.

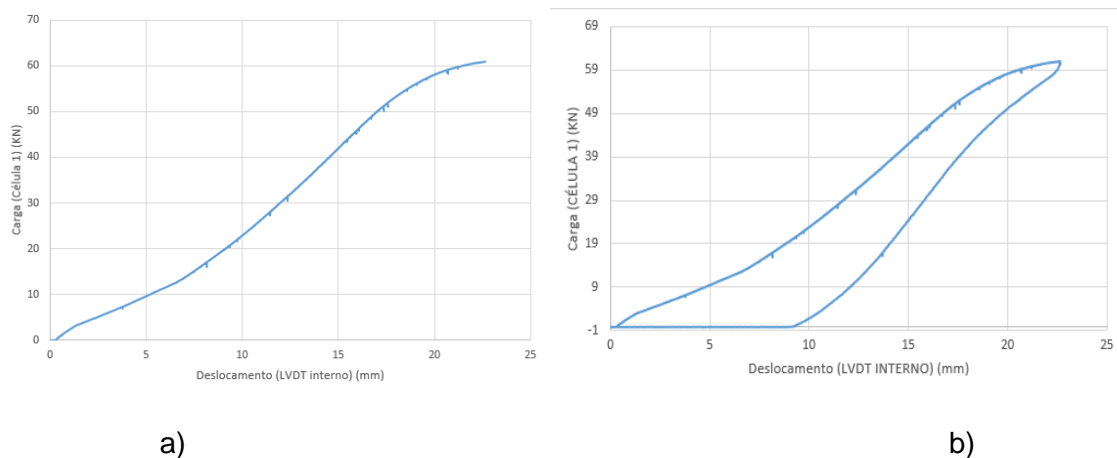


Fig.6.23 – Força vertical (Célula 1) vs Deslocamento (LVDT interno) – PTD – CM – a) sem descarga; b) com descarga

Estas curvas permitiram retirar as seguintes conclusões:

- Esta parede apresenta um força crítica de aproximadamente 60,3kN ou seja um Pcr de 24,12kN/m ( $\frac{60,3}{2,5} = 24,12\text{kN/m}$ ).
- O deslocamento vertical máximo é cerca de 22,7 mm.
- A parede ganha rigidez a partir dos 6,5mm, onde se verifica o aumento do declive da curva força versus deslocamento.
- A inclinação das trajetórias de carga e descarga são um pouco diferentes, o que revela uma maior dissipação de energia do que no caso da parede de tabique simples.
- O deslocamento residual obtido neste ensaio foi de cerca de 9mm.
- A energia dissipada neste ensaio é dada pela área da curva b) que apresenta o valor de 0,93J.

6.5.2. ANÁLISE DA ROTAÇÃO DO FRECHAL SUPERIOR DA PAREDE

Representa-se no gráfico da figura 6.24 a rotação em relação ao eixo x e y.

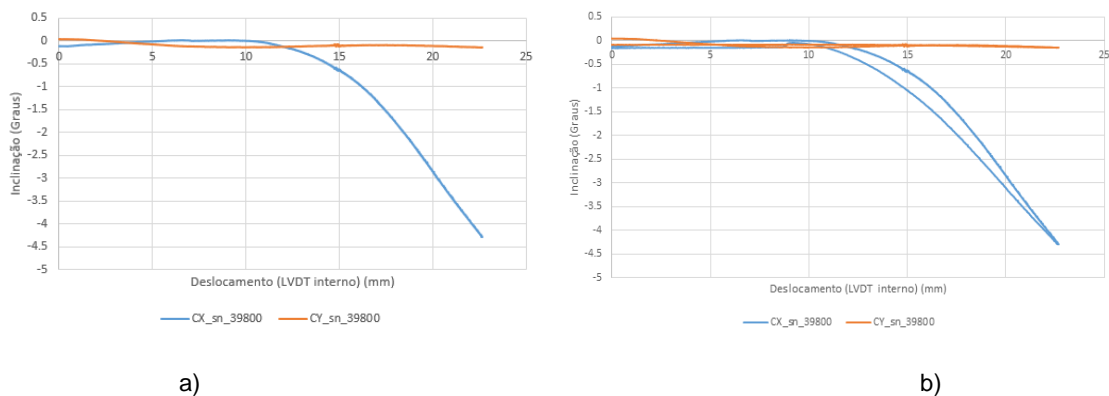
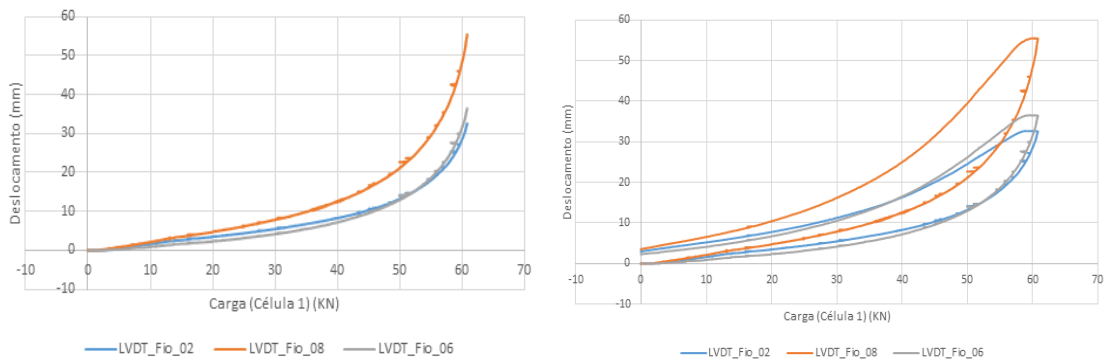


Fig.6.24 – Rotação do frechal da parede vs deslocamento – PTD – CM – a) sem descarga; b) com descarga

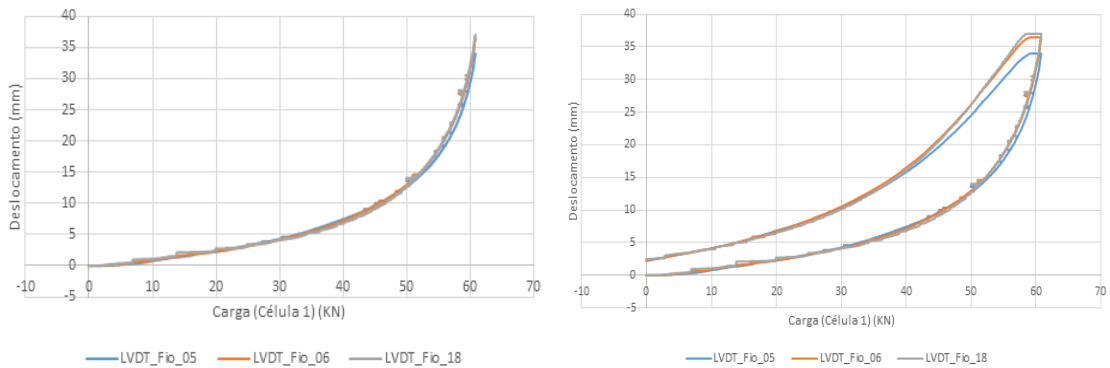
Analisando os gráficos da figura anterior, pode-se concluir que o frechal sofre uma ligeira rotação, embora pequena, em relação ao eixo yy. Inicialmente o frechal não apresentava qualquer rotação em relação ao eixo xx, mas ao longo do carregamento este sofre uma rotação negativa, atingindo o máximo de  $4,4^\circ$  aos 22,7mm. No entanto até um deslocamento de cerca de 12mm, a rotação do frechal em relação ao eixo x não é significativa e tem o valor positivo, ou seja o frechal estava inclinado para “trás”. Após a descarga, o frechal não apresenta qualquer rotação em relação a qualquer um dos eixos.

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

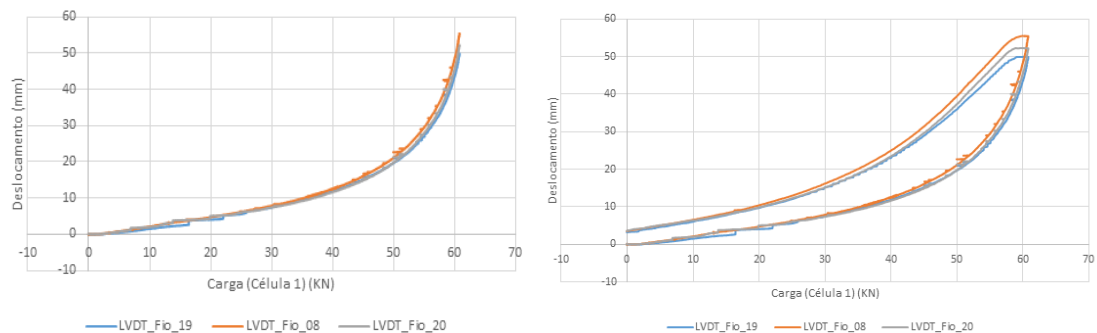
A figura 6.25 apresenta o deslocamento dos pontos mais relevantes da parede, esquematizados anteriormente, na figura 5.26.



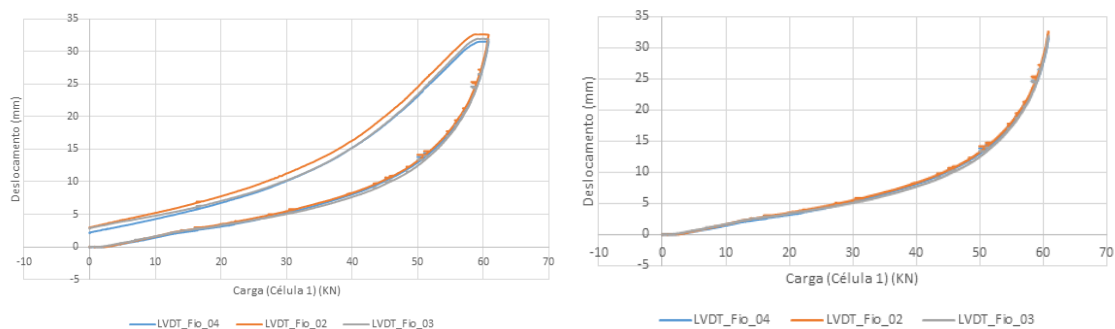
a)



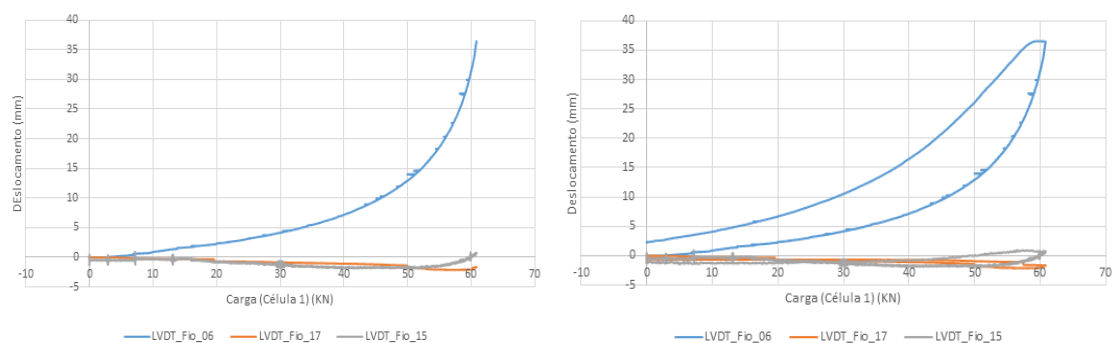
b)



c)



d)



e)

Fig.6.25 – Deslocamentos medidos vs Carga medida pela Célula 1 em PTD – CM nos pontos: a) 2, 6 e 8; b) 5, 6 e 18; c) 19, 8 e 20; d) 4, 2 e 3; e) 6, 15 e 17

Analisando a figura 6.25 - b), c) e d), conclui-se que no mesmo alinhamento horizontal os deslocamentos são aproximadamente iguais; por isso, podemos analisar o seu comportamento apenas pelo gráfico a), por exemplo. Através da sua análise verifica-se que a parede faz uma barriga não-simétrica para trás da parede, como se pode ver na figura 6.26; a zona situada a metade da altura da parede (ponto 8) apresenta o maior deslocamento perpendicularmente ao plano da parede, enquanto as zonas superior (ponto 6) e inferior (pontos 2) apresentam deslocamentos inferiores e diferentes entre si, sendo que a zona inferior apresenta deslocamentos inferiores aos da zona superior. Este facto pode ser explicado pelas condições de fronteira do frechal superior e inferior, tal como foi referido em relação ao ensaio PTS - CM. O deslocamento é positivo, pois a parede afasta-se do pórtico fixo que serviu como referência. O deslocamento máximo imposto na parede é de aproximadamente 55mm, medido pelo LVDT 8.

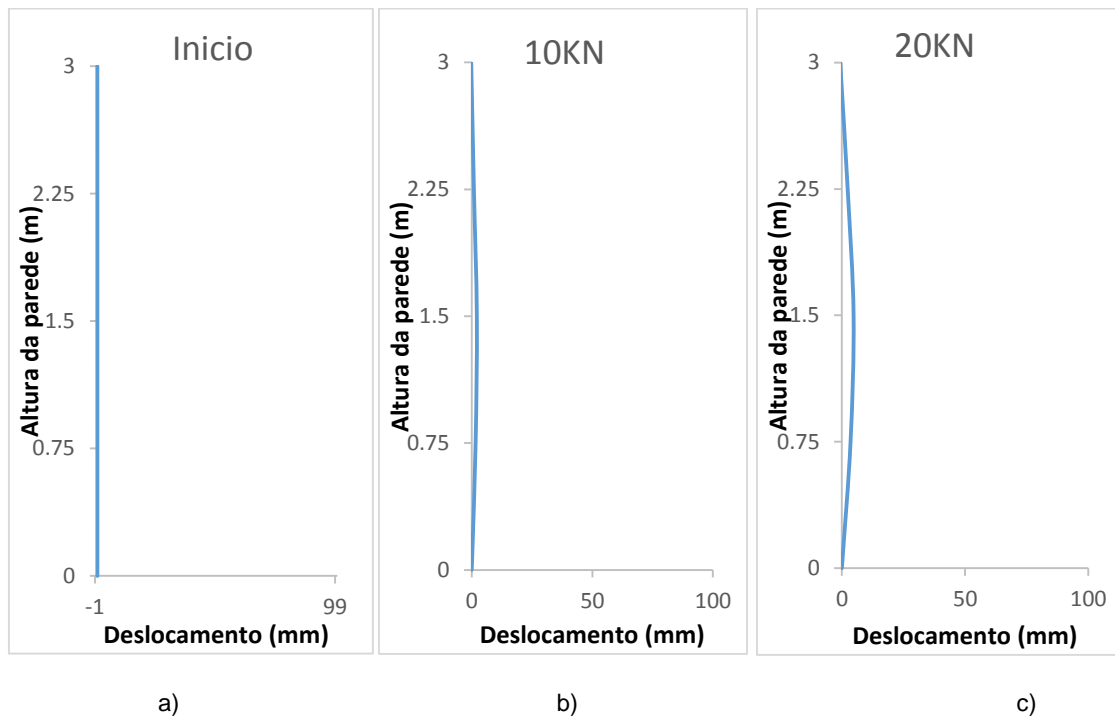
Através da figura 6.25 – e) podemos concluir que, tal como era esperado, o frechal superior (pontos 15 e 17) não sofreu deslocamentos significativos relativamente à parede de tabique, nem sofreu torção, isto é o deslocamento dos pontos 15 e 17 é semelhante. Todos os pontos analisados retomaram, aproximadamente, a sua posição inicial após o descarregamento, o que indica que não ocorreu deformação plástica significativa da parede.

Tal como em todos os ensaios descritos até agora, foram realizados vários perfis da parede, com base no deslocamento dos pontos 2, 8, 6 e 17, situados a 0,75, 1,5, 2,25, e 3m de altura, respetivamente. Foi desenhado um perfil para cada 10kN, ou seja para 0,10, 20, 30, 40, 50, 60,7kN e para o final da descarga, como se pode observar na figura 6.27 e 6.28.





Fig.6.26 – Vista transversal da deformação da parede – PTD – CM



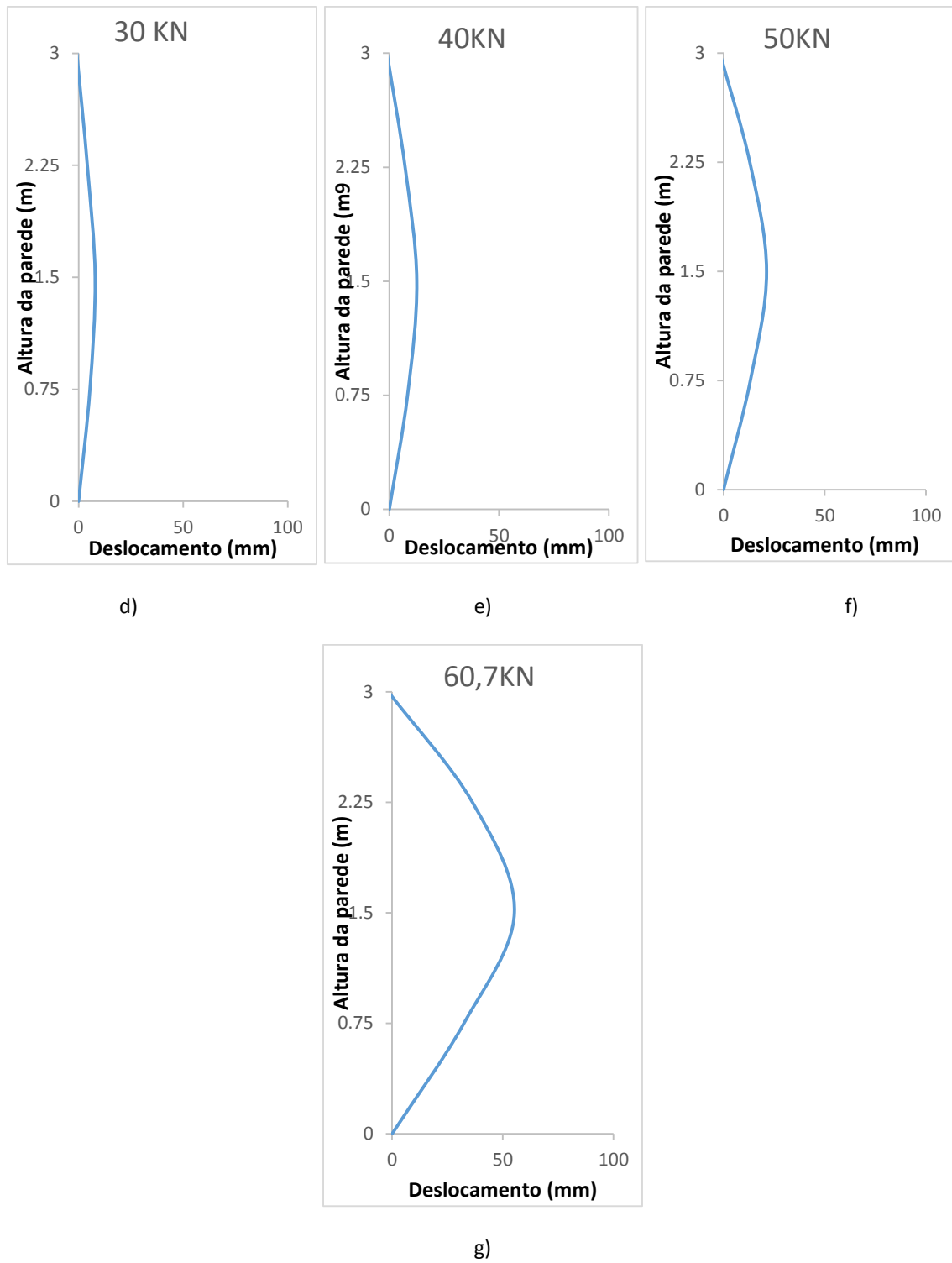


Fig.6.27 – Perfil transversal da parede PTD – CM para diferentes fases do carregamento: a) 0kN; b) 10kN; c) 20kN; d) 30kN; e) 40kN; f) 50kN; g) 60,8kN

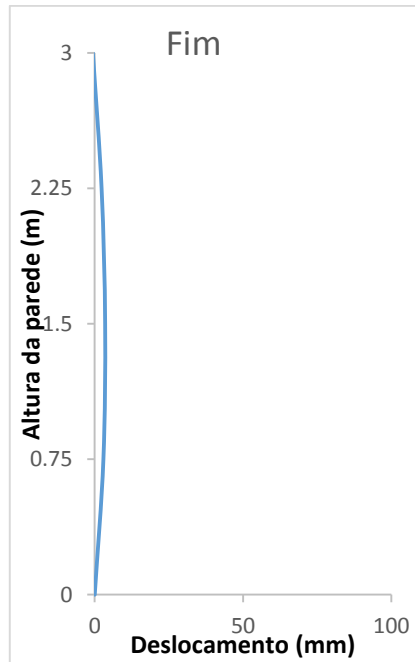


Fig.6.28 – Perfil transversal da parede PTD – CM após a descarga

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

Na figura 6.29 estão representadas as curvas de deslocamento relativo horizontal e vertical da parede dupla ensaiada, medidos pelos LVDT 9 e 16, respetivamente.

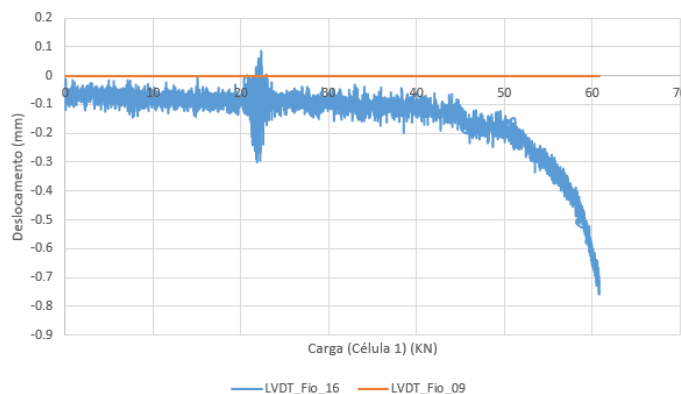


Fig.6.29 – Deslocamentos relativos no plano da parede – PTD – CM

Analisando o gráfico pode-se concluir que o deslocamento relativo horizontal, medido pelo LVDT 9, é nulo.

Na direção vertical, o deslocamento relativo não é significativo ao longo de todo o ensaio, exceto nos últimos 10KN, quando a parede começa a instabilizar. Este deslocamento é negativo porque a distância entre os pontos diminui.

#### 6.6. ENSAIO PTD - CC

O quarto e último ensaio é um ensaio cíclico numa segunda parede de tabique dupla. Através do ensaio PTD – CM foi possível estimar a carga crítica de uma parede de tabique dupla, podendo

assim definir o número de ciclos do ensaio cíclico. Posto isto, foram definidos três ciclos completos, com deslocamento máximo de 6mm, 12mm e 18mm. O terceiro ciclo decorre até a parede instabilizar.

Tal como os restantes ensaios, o carregamento é realizado a uma velocidade de 0,01mm/s e a descarga a uma velocidade de 0,05mm/s. Na figura 6.30 está representado o *setup* do ensaio.



Fig.6.30 – Setup do ensaio PT-D – CC

#### 6.6.1. ANÁLISE DA CURVA DE RESPOSTA GLOBAL FORÇA VS DESLOCAMENTO

Na figura 6.31 está representada a curvas de comportamento global, força aplicada no topo da parede *versus* o deslocamento imposto medido com o LVDT interno.

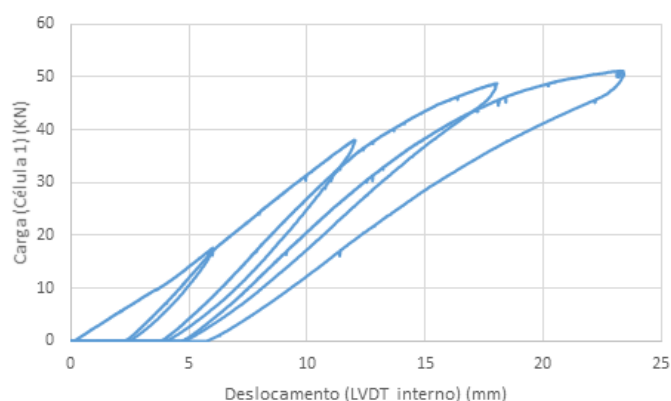


Fig.6.31 – Força vertical (Célula 1) vs Deslocamento (LVDT interno) – PT-D – CC

Este gráfico permitiu retirar as seguintes conclusões:

- A parede instabilizou no quarto ciclo, ao atingir os 51KN de carga. Este resultado foi bastante inferior quando comparado como o do ensaio monotónico, apresentado na secção anterior.
- O primeiro ciclo atinge aproximadamente os 17,6KN, descarrega até zero e dá início ao segundo ciclo que começa com um certo declive e quando se aproxima dos 17,6KN, aproxima-se do declive da curva do ciclo anterior, prosseguindo até aos 38KN. O mesmo não acontece no terceiro e quarto ciclo, o que pode dever-se à interação do tabuado vertical com o tabuado duplo que durante o carregamento cíclico cria folgas/danos entre as ligações e por ser uma parede diferente da parede de tabique dupla ensaiada no ensaio monotónico, logo não se sabe como seria a curva carga *versus* deslocamento no ensaio monotónico realizado nesta parede.
- O deslocamento máximo vertical da parede é cerca de 23mm, valor muito próximo do obtido no ensaio monotónico.
- Após este ensaio existe um deslocamento residual de cerca de 6mm.

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

Representa-se no gráfico da figura 6.32 a rotação em relação ao eixo xx e yy.

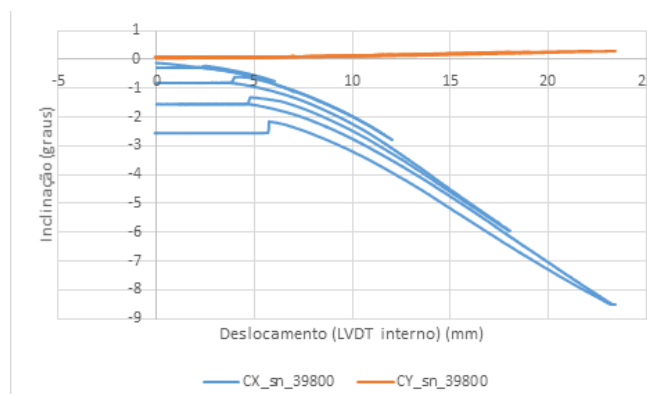


Fig.6.32 – Rotação do frechal da parede vs deslocamento – PTD – CC

Mais uma vez, a rotação do frechal em relação ao eixo perpendicular ao plano da parede, y, é quase nula ao longo de todo o ensaio. O mesmo não acontece com a rotação do frechal em relação ao eixo x, que apresenta uma inclinação negativa (inclinado para a “frente” da parede) durante todo o ensaio. A envolvente do gráfico corresponde à curva que se obteria num ensaio monotónico na mesma parede.

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

Foi feita a análise dos pontos esquematizados na figura 5.26 do presente capítulo, donde resultam os gráficos da figura 6.33.

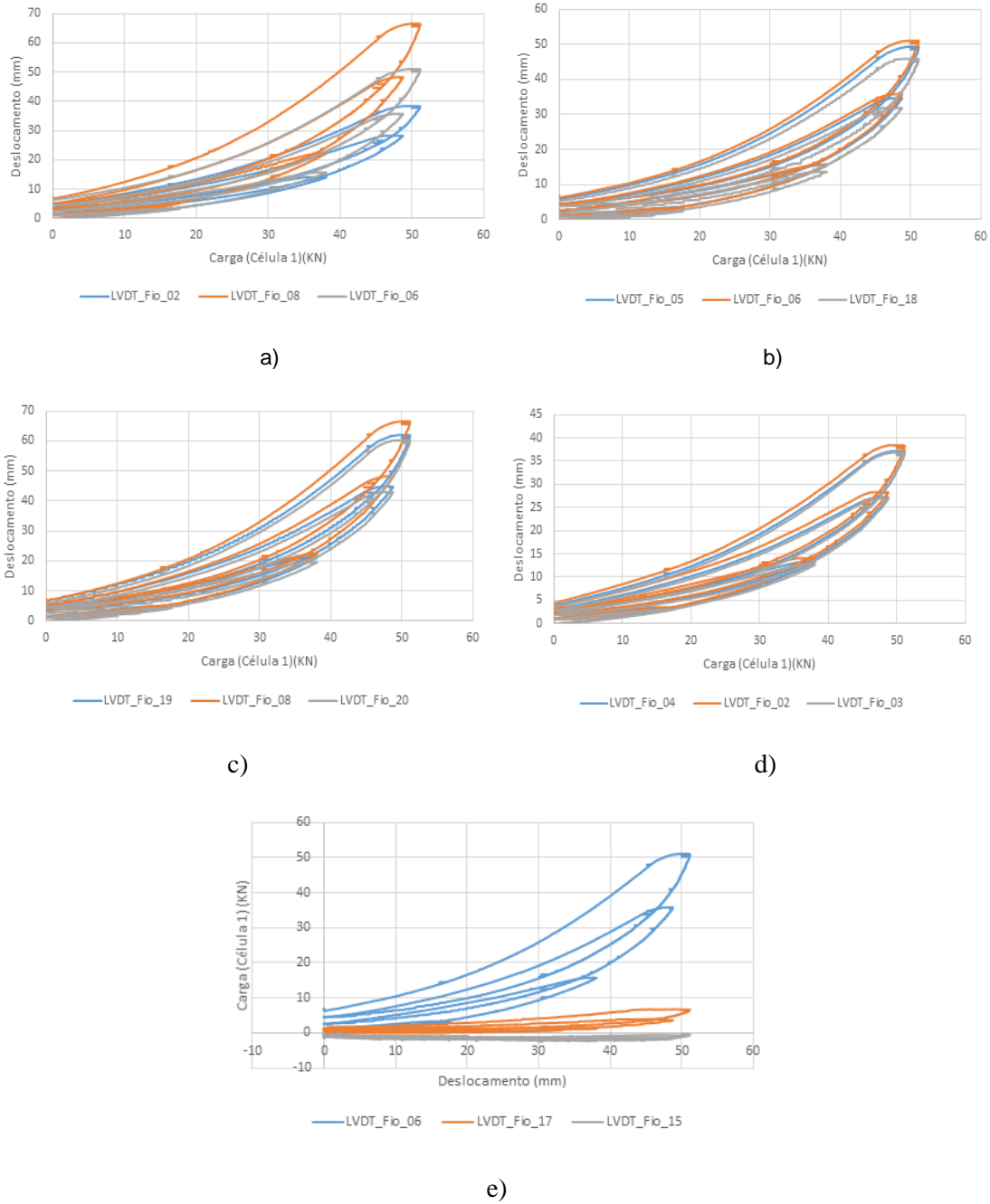


Fig.6.33 – Deslocamentos medidos vs Carga medida pela Célula 1 em PTD – CC nos pontos: a) 2, 6 e 8; b) 5, 6 e 18; c) 19, 8 e 20; d) 4, 2 e 3; e) 6, 15 e 17

Relativamente ao deslocamento dos seis pontos centrais da parede ensaiada, a conclusão é a mesma que no ensaio PTD – CM, na medida em que os deslocamentos na direção horizontal são aproximadamente iguais ao longo de todo o ensaio, pela análise dos gráficos b, c e d. O deslocamento máximo medido na parede foi cerca de 64mm, atingido pelo LVDT 8. Este valor é superior ao atingido no ensaio monotónico, eventualmente como consequência da perda de rigidez/dano causado na parede pelos vários ciclos de carga, nomeadamente nos pontos de ligação entre tábuas. Também por esse motivo, embora neste caso se tratem de paredes diferentes (facto que não deve ser menosprezado), a envolvente dos gráficos não corresponde às curvas que se obtiveram no ensaio monotónico PTD – CM.

A parede sofreu uma ligeira torção, que se pode verificar com base figura 6.33 - e), sendo que o deslocamento do ponto 17 é superior ao deslocamento do ponto 15.

Para este ensaio, também foram desenhados vários perfis da parede, com base no deslocamento dos pontos 2, 8, 6 e 17, situados a 0,75, 1,5, 2,25, e 3m de altura, respetivamente. Foi desenhado um perfil para cada 10KN de cada ciclo aproximadamente, ou seja no primeiro ciclo: 0, 10 e 17,6KN; no segundo ciclo: 0, 10, 20, 30 e 38KN; no terceiro ciclo: 0, 10, 20, 30, 40 e 48,8KN; no quarto ciclo: 0,10, 20, 30, 40 e 51KN e para o final da descarga. Os perfis e a deformada final da parede estão apresentados nas figuras 6.34 a 6.38 e 6.39, respetivamente.

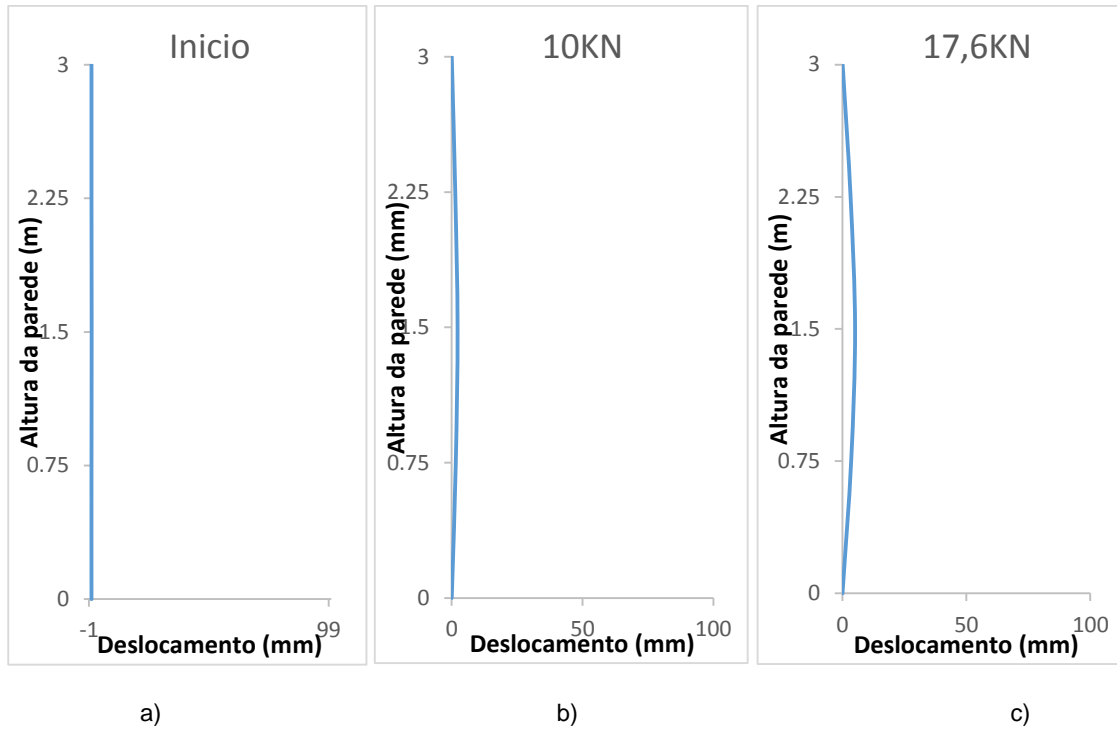


Fig.6.34 – Perfil transversal da parede PTD – CC para diferentes fases do carregamento do primeiro ciclo: a) 0KN; b) 10KN; c) 17,6KN

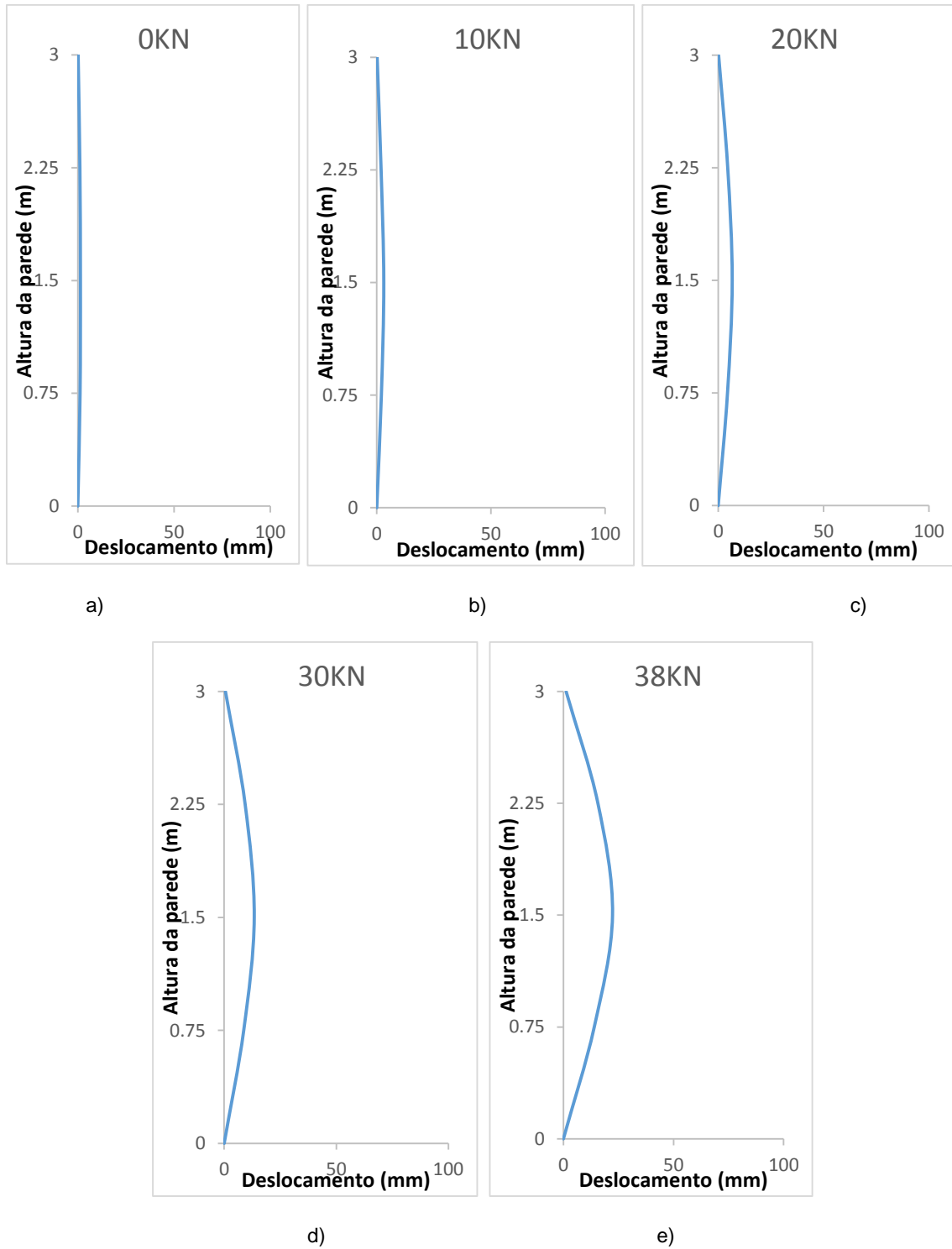


Fig.6.35 – Perfil transversal da parede PTD – CC para diferentes fases do carregamento para o segundo ciclo: a) 0KN; b) 10KN; c) 20KN; d) 30KN; e) 38KN



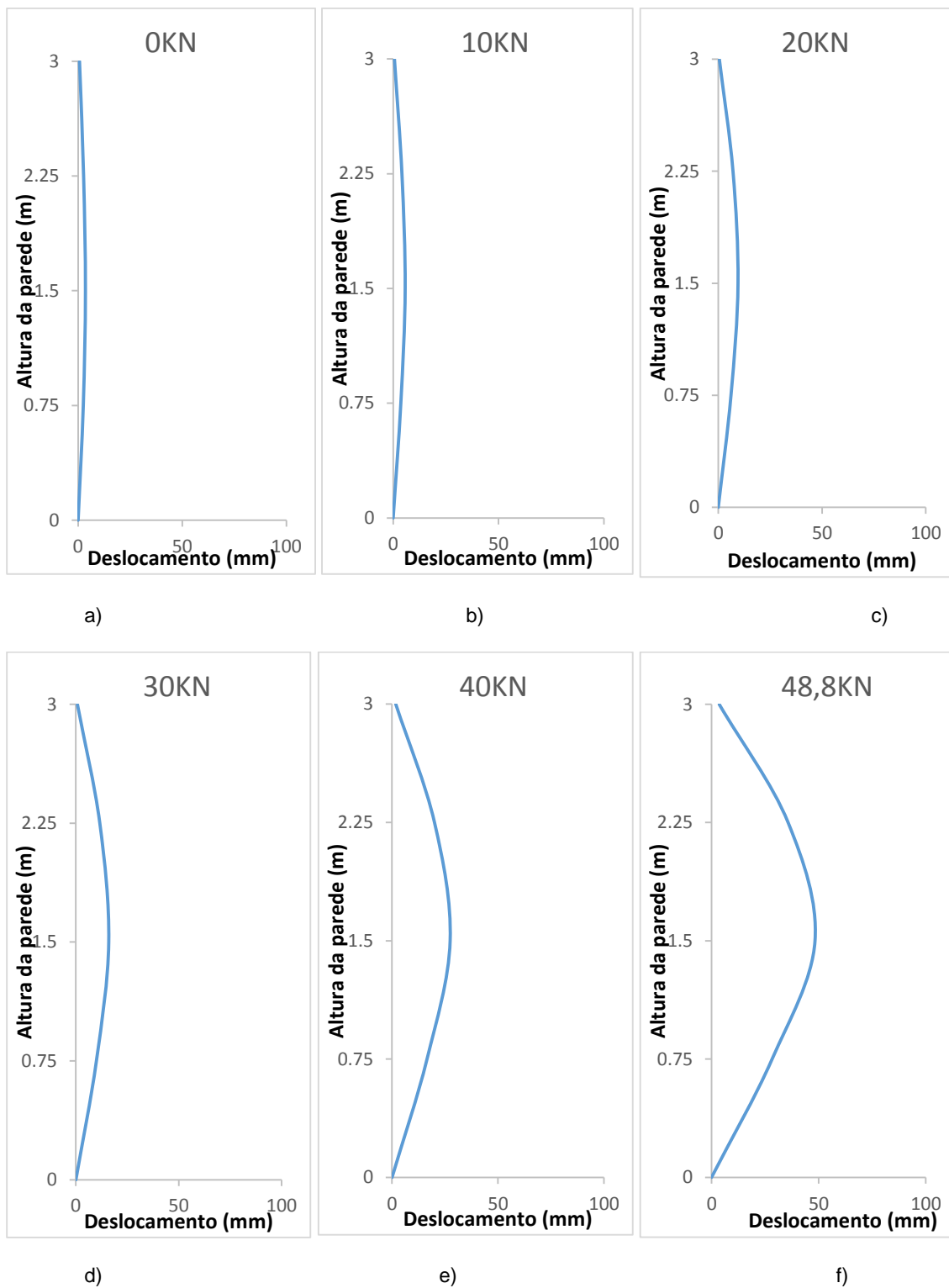


Fig.6.36 – Perfil transversal da parede PTD – CC para diferentes fases do carregamento para o terceiro ciclo: a) 0kN; b) 10kN; c) 20kN; d) 30kN; e) 40kN; f) 48,8kN

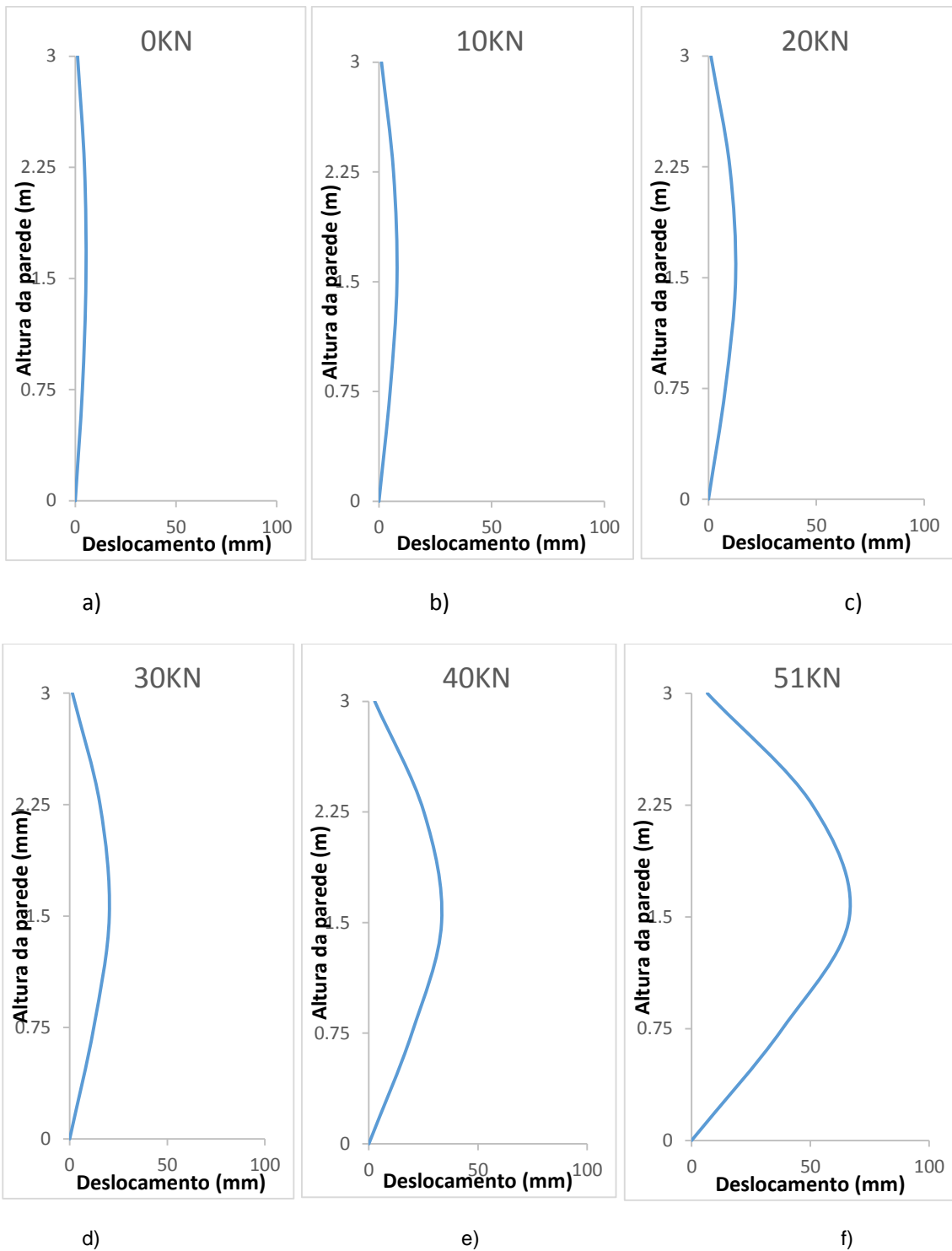


Fig.6.37 – Perfil transversal da parede PTD – CC para diferentes fases do carregamento para o quarto ciclo: a) 0kN; b) 10kN; c) 20kN; d) 30kN; e) 40kN; f) 51kN

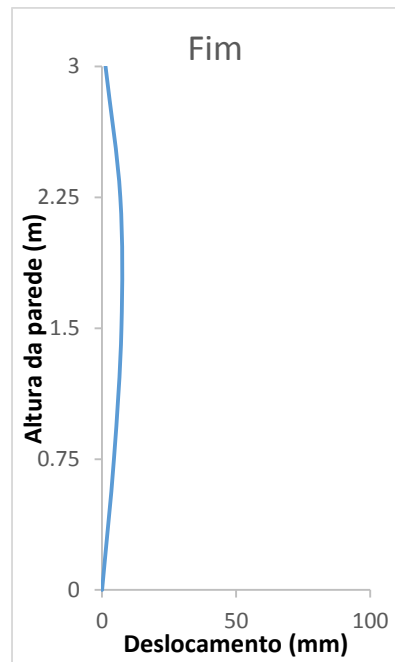


Fig.5.38 – Perfil transversal da parede PTD – CC após a descarga

Através dos perfis anteriores, podemos concluir que na descarga de cada ciclo, o deslocamento residual é cada vez maior, obtendo os seus valores máximos na descarga do último ciclo.



Fig.6.39 – Vista transversal da deformação da parede – PTD – CC

6.6.4. ANÁLISE DOS DESLOCAMENTOS NO PLANO DA PAREDE

A figura 6.40 ilustra as curvas do deslocamento relativo horizontal e vertical da parede PTD – CC, medidos pelos LVDT 9 e 16, respetivamente.

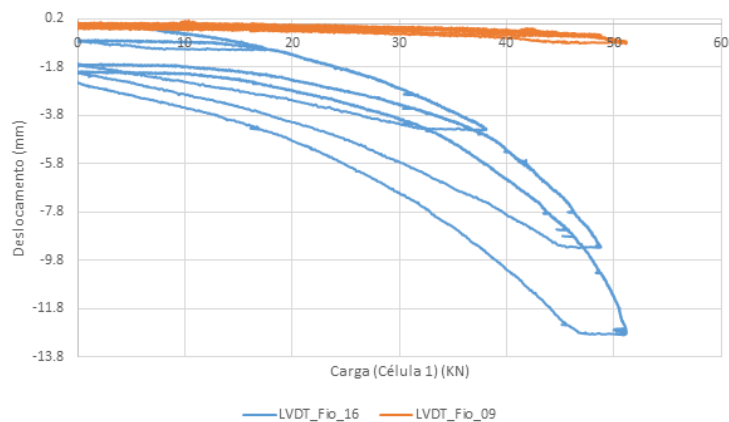
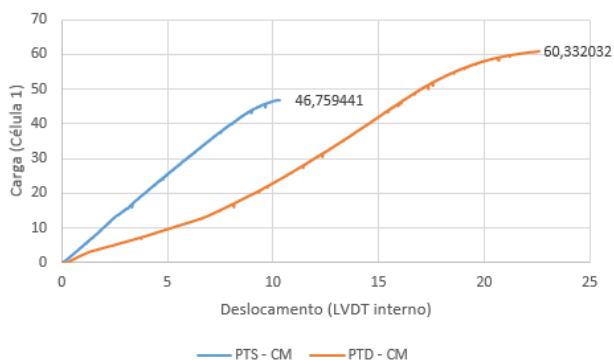


Fig.6.40 – Deslocamentos relativos no plano da parede – PTD – CC

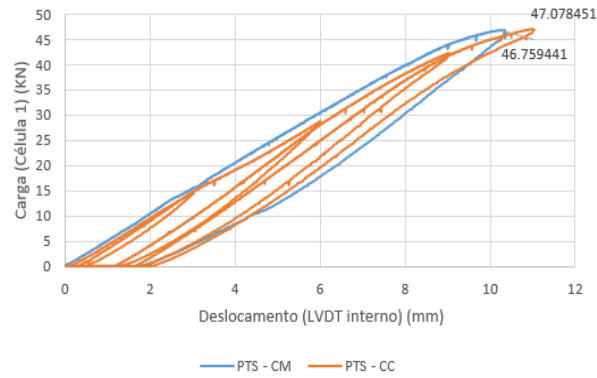
Analisando as curvas do gráfico da figura anterior, pode-se concluir que o deslocamento relativo horizontal é praticamente nulo em todos os ciclos, o que corresponde ao esperado. O deslocamento relativo vertical vai aumentando gradualmente de ciclo para ciclo, atingindo o máximo de 12,7mm quando a parede instabiliza. O deslocamento relativo tem valor negativo denotando uma aproximação entre pontos em análise. No final do ensaio este deslocamento não retorna a zero, ficando com um valor residual de 2,5mm.

6.7. ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS

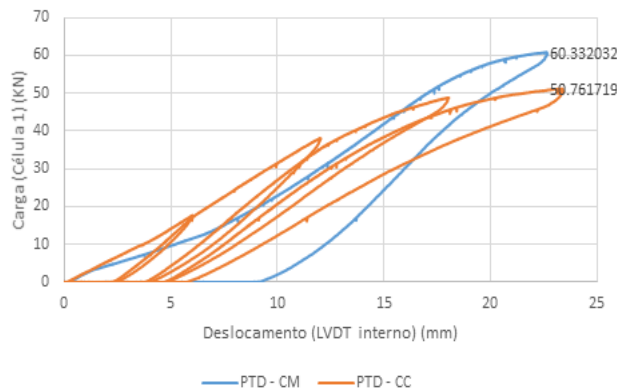
Nesta secção pretende-se fazer o resumo dos resultados dos quatro ensaios analisados neste capítulo. Para tal é feita a comparação das curvas força *versus* deslocamento entre: o ensaio PTS – CM e o ensaio PTD - CM; o ensaio PTS – CM e o ensaio PTS – CC e entre o ensaio PTD – CM e PTD – CC (figuras 6.41).



a)



b)



c)

Fig.6.41 – Comparação carga versus deslocamento entre: a) ensaio PTS – CM e PTD – CM; b) PTS – CM e PTS – CC; c) PTD – CM e PTD – CC

Os gráficos da figura 6.41 permitiram retirar as seguintes conclusões:

- A parede de tabique dupla é mais resistente que a parede de tabique simples, obtendo-se um incremento de carga crítica de 29%.
- Enquanto o declive da curva carga vs deslocamento no ensaio PTS - CM é constante, no ensaio PTD – CM no trecho inicial é variável, podendo a justificação resultar do facto de no primeiro terem sido realizados vários ensaios para verificação e correção do *setup* antes do ensaio final, enquanto no segundo o ensaio final foi o primeiro e único ensaio realizado nessa parede, podendo o declive variável estar, pelo menos parcialmente, associado ao ajuste inicial da parede. No entanto, em ambos o declive tende para zero quando a parede começa a instabilizar.
- A parede de tabique simples, ensaio PTS – CC, parece ser menos dissipativa do que a parede de tabique duplo, ensaio PTD - CC. Por outro lado, a envolvente do segundo ensaio (PTD – CC) é bastante diferente da curva do ensaio monotónico noutra parede de tabique dupla (PTD – CM), e o valor da carga crítica é cerca de 20% inferior ao da carga crítica deste último. Esta diferença pode ser explicada pela quantidade de energia dissipada devido a folgas/danos entre as ligações entre tábuas verticais e duplas, por um lado, e por serem utilizadas paredes de tabique duplo diferentes, por outro.

## 6.8. RESULTADOS NUMÉRICOS VS EXPERIMENTAIS

De forma a simplificar esta análise, foi elaborada a tabela 6.1 com os valores mais pertinentes, obtidos ao longo de todo trabalho.

Tabela 6.1 – Valores das cargas críticas obtidas na análise numérica e experimental

Parede	Análise Numérica		Análise Experimental
	Rotulada no topo e base	Rotulada no topo e Encastrada na base	
	Pcr (KN/m)	Pcr (KN/m)	Pcr (KN/m)
Simples	12,16	25,04	18,70
Dupla	17,26	35,87	24,12

Conforme foi explicado no capítulo 4, as condições de fronteira a que paredes, integradas nas casas burguesas do Porto, estão sujeitas não são totalmente conhecidas, sendo um meio-termo entre os dois casos apresentados na tabela 6.1: frechal superior e inferior rotulados, ou seja livres de rodar; frechal superior rotulado e frechal inferior encastrado.

Na campanha experimental, as paredes de tabique e o *setup* foram montados o mais próximo possível do cenário real. Os valores obtidos neste caso encontram-se situados entre os valores obtidos para as duas condições de fronteira consideradas.

Através dos resultados da tabela 6.1, nomeadamente a carga crítica para a análise experimental, foi possível estimar o que cada tipo de parede de tabique seria capaz de suportar. Para isso foi considerado um vão de 5m com paredes de alvenaria nas extremidades e uma parede de tabique a meio vão com 1m de comprimento, ou seja a 2,5m de cada parede de alvenaria e de largura de influência. Para o cálculo da carga última (pult), ou seja já majorada, foi assumido um fator de segurança de 2,5.

$$\text{Parede de tabique simples: } p_{ult} = \frac{(18,70/2,5)}{2,5} = 3\text{KN/m}^2$$

$$\text{Parede de tabique dupla: } p_{ult} = \frac{(24,12/2,5)}{2,5} = 3,9\text{KN/m}^2$$

A parede de tabique simples suporta, por exemplo, uma laje de  $3\text{KN/m}^2$  e a dupla uma de  $3,9\text{KN/m}^2$ .

# 7

## CONCLUSÕES E TRABALHOS

### FUTUROS

Apesar de em Portugal existir muito património construído com elementos de tabique, a revisão bibliográfica mostrou que a informação acerca de paredes de tabique, em particular sobre o seu comportamento mecânico, é escassa resultante da falta de estudo e investigação sobre este tema. Na escolha da tipologia das paredes de tabique sobre as quais incidiu o presente trabalho, optou-se pelas paredes existentes nas construções do centro histórico da cidade do Porto pela proximidade e por existir nesta cidade uma grande diversidade e quantidade deste tipo de elementos.

Com base no estudo efetuado, conclui-se que existem principalmente duas tipologias diferentes de paredes de tabique: as paredes de tábuas simples e as paredes de tábuas duplas. Foram feitas visitas a casas típicas do Porto, cuja recolha de dados foi um contributo determinante para o levantamento e caracterização geométrica e construtiva das paredes em estudo.

Foi realizada a modelação numérica das duas tipologias de paredes de tabique, tendo como objetivo a simulação do seu comportamento estrutural, onde foi usado um programa de cálculo automático comercial. Os casos de carga previstos durante a modelação numérica contemplam ações atuantes no plano da estrutura e aplicadas no topo das paredes, a primeira correspondente a uma carga uniformemente distribuída vertical e a segunda a uma ação horizontal, também distribuída. Assim, determinou-se a capacidade resistente à compressão através do cálculo da carga crítica à encurvadura e a rigidez das paredes quando submetidas a ações horizontais. Esta análise foi feita em paredes de tabique com e sem reboco. Para isso foram criados quatro modelos: Modelo S, Modelo D, Modelo SA e Modelo DA. Os modelos S e SA representam paredes de tabique simples sem e com reboco, respetivamente, e os modelos D e DA correspondem a paredes de tabique dupla sem e com reboco, respetivamente.

Relativamente à análise da capacidade resistente à compressão, constatou-se que para os quatro modelos, todas as tábuas encurvam em torno do seu eixo de menor inércia, no mesmo sentido e ao mesmo tempo. As respetivas cargas críticas foram 12,16KN/m e 21,6KN/m para os modelos S e SA, e 17,26KN/m e 25,53KN/m para os modelos D e DA, supondo rotulados em ambas as extremidades. Os modelos S e D foram depois alterados de forma a serem consideradas novas condições de apoio, encastrados numa das extremidades e rotulada na extremidade oposta, dado o cenário real se encontrar entre estas duas situações analisadas. As cargas críticas correspondentes à última situação avaliada foram 25,04KN/m para o modelo S e 35,87KN/m para o modelo D. Estes valores permitem concluir que as paredes duplas são mais instáveis que

as paredes simples para a mesma espessura total da parede; as tábuas diagonais têm uma menor contribuição para a resistência à encurvadura do que as tábuas verticais, e o reboco aumenta significativamente a capacidade resistente destas paredes.

Após a modelação numérica dos elementos alvo deste estudo, foi realizada uma campanha cujo objetivo era avaliar experimentalmente a capacidade resistente à compressão dos dois tipos de paredes de tabique existentes. Para tal foram construídas quatro paredes de tabique: duas simples e duas duplas. Em duas paredes, uma simples e uma dupla, foi realizado um ensaio monotónico e nas restantes um ensaio cíclico. Os ensaios monotónicos ocorreram antes dos cíclicos de forma a fazer uma previsão da carga máxima atingida e do número de ciclos a considerar no ensaio cíclico. Os resultados desta campanha experimental foram: deslocamento medido na célula de carga; deslocamento perpendicular ao plano da parede de 11 pontos, medidos por LVDT's; dois deslocamentos relativos no plano da parede, medidos também por LVDT's; rotação do frechal superior da parede, medido por um clinómetro. Feita a análise dos resultados, concluiu-se que as paredes de tabique duplas são mais dissipativas que as paredes de tabique simples. As respetivas cargas críticas foram: 18,70KN/m para a parede de tabique simples e 24,12KN/m para a parede de tabique dupla. Estes valores apresentam-se entre os valores obtidos numericamente para cada condição de fronteira, o que era desejável.

Finalmente, propõe-se que se desenvolva futuramente trabalho de investigação com o objetivo de:

- Repetir os ensaios experimentais realizados neste trabalho em mais paredes de tabique de forma a obter-se uma média de valores mais representativa;
- Realizar ensaios experimentais com vista a avaliar a rigidez horizontal no plano das paredes;
- Repetir os ensaios realizados neste trabalho e os sugeridos no ponto anterior considerando a participação do reboco e/ou a aplicação de técnicas de reforço estrutural.



## BIBLIOGRAFIA

- [1] Martinho, J.M.G. *Construção de tabique na Associação de Municípios da Terra Fria do Nordeste Transmontano*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, UTAD, 2010.
- [2] Pinto, J., Gülay, G., Vieira, J., Meltem, V., Varum, H., Bal, İ.E., Costa, A. *Save the Tabique Construction. Structural Rehabilitation of Old Buildings. Building Pathology and Rehabilitation. Volume 2*. Editors: Aníbal Costa, João Miranda Guedes, Humberto Varum. Springer Berlin Heidelberg. ISBN: 978-3-642-39685-4 (Print) 9783-642-39686-1 (Online). 157-185.
- [3] TEIXEIRA, J.J.Lopes. *Descrição do Sistema Construtivo da Casa Burguesa do Porto entre os séculos XVII e XIX*, Porto, 2004.
- [4] Cardoso, R. *Construção de tabique – construção sustentável*. Dissertação de Doutoramento, UTAD, 2013.
- [5] Pires, A. *Análise de paredes de tabique e de medidas de reforço estrutural; estudo numérico*. Dissertação de Mestrado em Engenharia, FEUP, 2013.
- [6] Wood Handbook. *Wood as an engineering material*. General Technical Report 113, Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison, 1999.
- [7] Alvarez, R. A., Martitegui, F. A., Calleja, J. J. M. *Estructuras de Madera. Diseño e Cálculo*, AITIM, Madrid, 2000.
- [8] Arriaga, F. *Intervencion en estructuras de madera*, AITIM, Madrid, 2002.
- [9] Ramos, A. *Avaliação do Comportamento Mecânico de Madeira Antiga*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, FEUP, 2010.
- [10] Carvalho, J. *Construções em Tabique na Região de Trás-os-Montes e Alto Douro*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, UTAD, 2009.
- [11] Cepeda, A.J.B. *Construções de tabique existentes na Associação de municípios do Alto Tâmega*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, UTAD, 2009.
- [12] Martinho, J.M.G. *Construção de tabique na Associação de Municípios da Terra Fria do Nordeste Transmontano*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, UTAD, 2010.
- [13] Pinto R. *Caracterização das paredes de tabique do centro histórico de Viseu*. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Construção e Reabilitação, ESTGV, 2013.
- [14] Fonseca, I., Feio, A., Machado, J. *Utilização de derivados de madeira no reforço de paredes de tabique*. 1º Congresso Luso-Brasileiro de Materiais de Construção Sustentáveis (CLB – MCS 2014), 5-7 March, Uminho, 2014.
- [15] <http://pt.wikipedia.org/wiki/Flambagem>. 17-06-2013.
- [16] Persch, C, Trevisol, D., Christoforo, A.. *Aplicação dos Métodos de Newton no Cálculo da Carga Crítica de Euler em Colunas do Tipo Engastada-Articulada*. [http://www.sbmac.org.br/eventos/cnmac/xxxii\\_cnmac/pdf/592.pdf](http://www.sbmac.org.br/eventos/cnmac/xxxii_cnmac/pdf/592.pdf). 01-05-2013.

[17][http://www.csiportugal.com/index.php?option=com\\_content&view=article&id=164&Itemid=212&lang=pt](http://www.csiportugal.com/index.php?option=com_content&view=article&id=164&Itemid=212&lang=pt) 01-05-2013.

[18] NP 4305 (1995) Madeira serrada de pinheiro bravo para estruturas. Classificação visual. Instituto Português da Qualidade. Portugal.

[19] EN 338 (2003) –structural timber – strength classes. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.