

Fabiana Andrade Domingues

Caracterização do comportamento estrutural de
paredes de tabique



Fabiana Andrade Domingues

Caracterização do comportamento estrutural de
paredes de tabique

Tese de Mestrado

Mestrado em Engenharia de Construção e Reabilitação

Professor José Avelino Loureiro Moreira Padrão



Aos meus pais e irmão

RESUMO

As paredes em tabique são um dos sistemas de construção tradicionais mais usuais no nosso país, nomeadamente no centro histórico de Viseu. São estruturas bastante heterogéneas, pois apresentam na sua constituição uma variedade de materiais distintos. A manutenção e reabilitação deste tipo de construções antigas são um grande contributo para a valorização do património construído. Assim, a sua investigação torna-se cada vez mais importante.

Desenvolveu-se um estudo relativo a este tipo de construção tradicional, no centro histórico de Viseu, onde se procedeu à realização de ensaios não destrutivos em paredes de tabique dos casos de estudo, *in situ*, com o intuito de avaliar/determinar a sua resposta estrutural. Tendo por base os resultados obtidos nos ensaios realizados, propõe-se o desenvolvimento de um modelo numérico que seja capaz de simular o seu comportamento estrutural.

Concluiu-se a importância destas construções tradicionais no comportamento global das estruturas e propõe-se o contínuo desenvolvimento destas técnicas não destrutivas aplicadas a este tipo de construção.

ABSTRACT

“Tabique” walls are one of the most common traditional construction systems in our country, in particular in the historical centre of Viseu. These are structures rather heterogeneous, since they present a variety of different materials in their composition. The maintenance and rehabilitation of these kinds of ancient constructions represent a major contribution to valuing the built heritage. Thus, its research becomes increasingly important.

A study regarding this type of traditional construction was carried out in the historical centre of Viseu, where were performed non-destructive tests in “tabique” walls of the case studies, *in situ*, with the aim of evaluating/determining their structural response. Based on the results obtained in the tests performed, it is suggested the development of a numerical model capable of simulating their structural behaviour.

It was concluded the importance of these traditional constructions in the structure global behavior and it is proposed the continuous development of these non-destructive techniques applied to this type of construction.

PALAVRAS CHAVE

Alvenarias
Construção em tabique
Ensaio dinâmico
Georadar
Modelagem numérica

KEY WORDS

Masonry
Construction of “tabique”
Dynamic tests
Georadar
Numerical modeling

AGRADECIMENTOS

Gostaria de manifestar os meus sinceros agradecimentos a todos os que, direta ou indiretamente contribuíram para a elaboração desta dissertação. É um trabalho individual mas que sem o apoio incondicional do orientador, da família, do namorado, e amigos não se tornaria possível.

Ao meu orientador, professor José Avelino Loureiro Moreira Padrão, da Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu (ESTGV), do Instituto Politécnico de Viseu (IPV), que esteve sempre presente quando precisei de ajuda o meu muito obrigado. Queria também agradecer o facto de incentivar, explicar, ajudar a concretizar este trabalho.

À empresa Morph Geomática e Geofísica, ao Eng.º Nuno Barraca e ao Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro, nomeadamente ao professor doutor Humberto Varum e ao professor Hugo Rodrigues pela realização dos ensaios e esclarecimentos prestados acerca dos mesmos os meus sinceros agradecimentos.

À Sociedade de Reabilitação Urbana de Viseu, pela cedência das peças desenhadas referentes aos edifícios em estudo, localizados no largo de São Teotónio e na Rua Direita.

Ao Eng.º Rafael Pinto por toda a ajuda e esclarecimentos prestados relativamente ao funcionamento do programa de cálculo automático, SAP2000.

Aos meus amigos e namorado, pela ajuda cedida sempre que foi precisa, em certas dúvidas encontradas ao longo deste trabalho.

Em último, mas com grande destaque, à minha família pelo apoio e paciência mostrados ao longo da realização deste trabalho.

ÍNDICE GERAL

ÍNDICE GERAL	xiii
ÍNDICE DE FIGURAS	xv
ÍNDICE DE TABELAS	xix
ÍNDICE DE GRÁFICOS	xxi
1. Introdução	1
1.1 Objetivos da dissertação.....	2
1.2 Metodologia da dissertação	3
2. Construção em tabique	7
2.1 Tabique.....	7
2.2 Esquema da construção em tabique	9
2.3 Tipos de construções em tabique	10
2.4 Estudo e caracterização dos materiais.....	12
2.4.1 Material de enchimento e de revestimento.....	13
2.4.2 Estrutura de madeira	16
2.4.3 Pregos.....	22
2.5 Conclusões	26
3. Caracterização do comportamento estrutural de paredes de tabique existentes no centro histórico de Viseu	29
3.1 Descrição dos edifícios escolhidos como caso de estudo	30
3.1.1 Edifício 1 (Ed.1)	30
3.1.2 Edifício 2 (Ed.2)	36
3.2 Aspetos construtivos	41
3.2.1 Paredes de tabique	41
3.2.2 Pavimento e teto	42
3.2.3 Coberturas	43
3.3 Conclusões	44
4. Ensaaios não destrutivos	45
4.1 Georadar	46

4.1.1	Objetivos da aplicação do Georadar	47
4.1.2	Equipamento e Acessórios	47
4.1.3	Modo de funcionamento	49
4.1.4	Análise e interpretação dos resultados	52
4.1.5	Conclusões	59
4.2	Ensaio dinâmico.....	60
4.2.1	Procedimento do ensaio	61
4.2.2	Paredes de tabique em estudo.....	63
4.2.3	Estudo analítico	64
4.2.4	Apresentação dos resultados obtidos	74
4.2.5	Conclusões	109
5.	Modelação numérica de paredes de tabique	113
5.1	Modelo proposto	114
5.2	Apresentação e análise dos resultados	120
5.2.1	Parede E1.1.....	120
5.2.2	Parede E4.1.....	123
5.3	Conclusões.....	127
6.	Conclusões e trabalhos futuros	129
6.1	Conclusões.....	129
6.2	Trabalhos futuros	131
	Referências	133
	ANEXO 1 – Peças desenhadas do caso de estudo Ed.1.....	137
	ANEXO 2 – Peças desenhadas do caso de estudo Ed.2.....	143
	APÊNDICE 1 – Dados utilizados para estudo analítico	149

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1: Construção em terra no Mundo (http://craterre.org/).....	7
Figura 2-2: Construção em tabique e construção em blocos de adobe	8
Figura 2-3: Distribuição geográfica das principais espécies florestais,	9
Figura 2-4: Elementos constituintes de uma parede de tabique	10
Figura 2-5: Teto em tabique	11
Figura 2-6: Paredes divisórias em tabique	11
Figura 2-7: Estrutura de claraboia em tabique	12
Figura 2-8: Estrutura de tabique (Minke G, 2006)	12
Figura 2-9: Amostras do material de enchimento/revestimento (Pinto, 2013)	14
Figura 2-10: Ensaio de peneiração e sedimentação (Pinto, 2013)	14
Figura 2-11: Determinação do limite de liquidez e plasticidade (Pinto, 2013).....	15
Figura 2-12: Secções transversais tipo das ripas	16
Figura 2-13: Secções transversais tipo das tábuas e dos prumos de madeira	17
Figura 2-14: Ensaio de flexão estática (Pinto, 2013).....	18
Figura 2-15: Ensaio de dureza (Pinto, 2013).....	19
Figura 2-16: Ensaio de compressão axial (Pinto, 2013)	20
Figura 2-17: Resistógrafo (Lourenço, 2005).....	21
Figura 2-18: Ed1e respetivo termograma obtido (Pinto, 2013).....	22
Figura 2-19: Tipologias dos pregos (Pinto, 2013)	23
Figura 2-20: Amostras de pregos (Pinto, 2013)	23
Figura 2-21: Máquina universal de tração (Pinto, 2013)	24
Figura 2-22: Microdurómetro (Pinto, 2013).....	25
Figura 2-23: Microscópio metalográfico de reflexão (Pinto, 2013).....	26
Figura 2-24: Imagens da microestrutura da superfície dos pregos	26
Figura 3-1: Fachada principal do edifício 1	31
Figura 3-2: Entrada do espaço comercial.....	31
Figura 3-3: Corte transversal A-A – Ed.1	32
Figura 3-4: Revestimento cerâmico	33
Figura 3-5: Estrutura do pavimento e teto existente	33
Figura 3-6: Pormenor do pavimento em estudo	33
Figura 3-7: Escadas interiores	34
Figura 3-8: Estrutura da cobertura.....	34
Figura 3-9: Crescimento de vegetação.....	35
Figura 3-10: Exterior do edifício	36
Figura 3-11: Fachada principal do edifício 2	37
Figura 3-12: Corte transversal C-D – Ed.2	37
Figura 3-13: Pavimento do piso 1.....	38

Figura 3-14: Escadas interiores e teto	39
Figura 3-15: Paredes exteriores do edifício	39
Figura 3-16: Paredes interiores.....	40
Figura 3-17: Janelas e porta interior do edifício	40
Figura 3-18: Parede de tabique com tabuado duplo (Pinto, 2013)	42
Figura 3-19: Ligação de canto entre duas paredes interiores (Pinto, 2013).....	42
Figura 3-20: Ligação de parede de tabique ao teto do andar (Cardoso, 2013).....	43
Figura 3-21: Ligação de parede de tabique ao pavimento do andar (Cardoso, 2013)	43
Figura 3-22: Ligação da estrutura da cobertura ao pavimento do sótão e às paredes exteriores de tabique (Cardoso, 2013).....	43
Figura 4-1: Sistema ProEx da MALA Geoscience de Georadar	49
Figura 4-2: Princípio de funcionamento do georadar. T representa a antena emissora e R a antena recetora (Fontul, 2004).....	50
Figura 4-3: Polígono de aquisição de dados.....	50
Figura 4-4: Passagens paralelas com 2 cm de espaçamento entre si	51
Figura 4-5: Localização do polígono 1	52
Figura 4-6: Times Slices correspondente a 5 cm de profundidade do polígono 1	53
Figura 4-7: Time Slice correspondente a 7 cm de profundidade.....	53
Figura 4-8: Localização do polígono 2	54
Figura 4-9: Time Slice correspondente a 5cm de profundidade.....	54
Figura 4-10: Localização do polígono 3	55
Figura 4-11: Time Slice correspondente a 4 cm de profundidade.....	55
Figura 4-12: Time Slice correspondente a 5 cm de profundidade.....	56
Figura 4-13: Localização do polígono 4	56
Figura 4-14: Time Slice correspondente a 5 cm de profundidade.....	57
Figura 4-15: Time Slice correspondente a 6 cm de profundidade.....	57
Figura 4-16: Localização do polígono 5	58
Figura 4-17: Time Slice correspondente a 6cm de profundidade.....	58
Figura 4-18: Time Slice correspondente a 6cm de profundidade.....	59
Figura 4-19: Frequência em estruturas geometricamente diferentes	61
Figura 4-20: Equipamento utilizado na realização do ensaio.....	62
Figura 4-21: Exemplo de saída de resultados.....	62
Figura 4-22: Exemplo de estrutura de madeira de uma parede de tabique com as dimensões consideradas representativas.....	63
Figura 4-23: Análise de vibração de viga simplesmente apoiada (Clough e Penzien, 1993) ..	66
Figura 4-24: Análise de vibração de vigas em consola (Clough e Penzien, 1993)	67
Figura 4-25: Localização da parede em estudo – Piso 0.....	75
Figura 4-26: Localização das paredes em estudo – Piso 1	75
Figura 4-27: Localização das paredes em estudo – Piso 2.....	76
Figura 4-28: Localização das paredes em estudo – Piso 3.....	76
Figura 4-29: Localização das paredes em estudo – Piso 1	80

Figura 4-30: Localização das paredes em estudo – Piso 2.....	80
Figura 4-31: Localização das paredes em estudo – Piso 3.....	81
Figura 4-32: Corte B-B com a designação utilizada dos pisos.....	86
Figura 4-33: Planta estrutural do Piso 0.....	88
Figura 4-34: Planta estrutural do Piso 1.....	88
Figura 4-35: Planta estrutural do Piso 2.....	89
Figura 4-36: Planta estrutural do Piso 3.....	89
Figura 4-37: Planta estrutural da Cobertura.....	90
Figura 4-38: Corte C-D com a designação utilizada dos pisos.....	92
Figura 4-39: Planta estrutural do Piso 1.....	94
Figura 4-40: Pormenor 1 e legenda das plantas estruturais.....	94
Figura 4-41: Planta estrutural do Piso 2.....	95
Figura 4-42: Planta estrutural do Piso 3.....	95
Figura 4-43: Esquemas E3.1 e E3.2 de paredes de tabique, Ed.1.....	101
Figura 4-44: Esquemas E3.5 e E2.2 de parede de tabique, Ed.1.....	101
Figura 4-45: Esquemas E4.1 e E4.5 de parede de tabique, Ed.1.....	102
Figura 4-46: Esquema E2.2 e E2.4 de paredes de tabique, Ed.2.....	103
Figura 4-47: Esquemas E3.1 e E3.2 de paredes de tabique, Ed.2.....	103
Figura 4-48: Esquemas E3.1 e E3.2 de paredes de tabique em estudo, Ed.1.....	104
Figura 4-49: Esquemas E4.1 e E4.5 de paredes em estudo, Ed.1.....	105
Figura 4-50: Esquemas E1.1 e E2.2.....	108
Figura 4-51: Esquemas E3.1 e E3.3.....	108
Figura 5-1: Janela de inspeção da parede E1.1.....	114
Figura 5-2: Janela de inspeção da parede E4.1.....	115
Figura 5-3: Modelo numérico adotado, E1.1.....	119
Figura 5-4: Modelos numéricos adotado, E4.1.....	119
Figura 5-5: Deformada correspondente ao 1º caso.....	121
Figura 5-6: Deformada correspondente ao 2º caso.....	121
Figura 5-7: Deformada correspondente ao 3º caso.....	121
Figura 5-8: Deformada correspondente ao 1º caso.....	122
Figura 5-9: Deformada correspondente ao 2º caso.....	122
Figura 5-10: Deformada correspondente ao 3º caso.....	123
Figura 5-11: Deformada correspondente ao 1º caso.....	124
Figura 5-12: Deformada correspondente ao 2º caso.....	124
Figura 5-13: Deformada correspondente ao 3º caso.....	124
Figura 5-14: Deformada correspondente ao 4º caso.....	125
Figura 5-15: Deformada correspondente ao 1º caso.....	125
Figura 5-16: Deformada correspondente ao 2º caso.....	126
Figura 5-17: Deformada correspondente ao 3º caso.....	126
Figura 5-18: Deformada correspondente ao 4º caso.....	126

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2-1: Valores de referência do ensaio da plasticidade	15
Tabela 2-2: Dimensões médias das ripas de madeira das paredes de tabique	17
Tabela 2-3: Dimensões médias das tábuas de madeira das paredes de tabique	17
Tabela 2-4: Valores obtidos no ensaio de flexão estática	18
Tabela 2-5: Valores estatísticos obtidos no ensaio de dureza para ambos os métodos	19
Tabela 2-6: Ensaio de compressão axial (Pinto, 2013).....	20
Tabela 2-7: Dimensões das amostras de pregos apresentadas	23
Tabela 2-8: Valores obtidos no ensaio de tração	24
Tabela 2-9: Número de dureza de Vickers	25
Tabela 4-1: Características típicas das antenas de Georadar (Fernandes e Lourenço, 2007) ..	48
Tabela 4-2: Dimensões globais das paredes de tabique presentes nos casos de estudo	64
Tabela 4-3: Determinação da primeira frequência natural de uma viga	67
Tabela 4-4: Dados/valores necessários para o cálculo da frequência natural	69
Tabela 4-5: Determinação analítica da frequência para o Piso 0, Ed.1	69
Tabela 4-6: Determinação analítica da frequência para o Piso 1 e 2, Ed.1	70
Tabela 4-7: Determinação analítica da frequência para o Piso 3, Ed.1	71
Tabela 4-8: Determinação analítica da frequência para o Piso 1, Ed.2	72
Tabela 4-9: Determinação analítica da frequência para o Piso 2, Ed.2	73
Tabela 4-10: Determinação analítica da frequência para o Piso 3, Ed.2	74
Tabela 4-11: Frequência obtida nas diferentes paredes	77
Tabela 4-12: Resumo geral dos valores de frequência obtidos em cada ponto de ensaio e características geométricas das paredes, Ed.1	79
Tabela 4-13: Valor da frequência obtida nas paredes em estudo	81
Tabela 4-14: Resumo geral dos valores de frequência obtidos em cada ponto de ensaio e características geométricas das paredes, Ed.2	83
Tabela 4-15: Ações a considerar na Cobertura, Ed.1.....	86
Tabela 4-16: Ações a considerar no 4º piso, Ed.1	87
Tabela 4-17: Ações a considerar nos restantes pisos, Ed.1	87
Tabela 4-18: Cálculo da ação total nas paredes, Ed.1.....	90
Tabela 4-19: Frequência vs Carga total nas paredes, Ed.1.....	91
Tabela 4-20: Ações a considerar na Cobertura, Ed.2.....	92
Tabela 4-21: Ações a considerar Piso 4, Ed.2	93
Tabela 4-22: Ações a considerar nos restantes pisos, Ed.2	93
Tabela 4-23: Cálculo da ação total nas paredes, Ed.2.....	96
Tabela 4-24: Frequências vs carga total nas paredes, Ed.2.....	96
Tabela 4-25: Cálculo do Rácio/Esbelteza das paredes em estudo – Ed.1	98
Tabela 4-26: Cálculo do rácio/esbelteza das paredes de tabique - Ed.2	99

Tabela 4-27: Identificação dos casos de paredes em análise com seguimento em altura	106
Tabela 4-28: Identificação dos casos de paredes com seguimentos em altura	107
Tabela 4-29: Síntese dos valores registados em cada ponto da parede.....	108
Tabela 4-30: Síntese dos valores registados em cada ponto da parede.....	109
Tabela 5-1: Dimensões médias das secções transversais das tábuas, ripas e pregos.....	115
Tabela 5-2: Propriedades mecânicas e físicas da madeira de pinho da classe C18.....	116
Tabela 5-3: Propriedades materiais do aço dos pregos	116
Tabela 5-4: Propriedades geométricas e mecânicas da secção transversal das tábuas	118
Tabela 5-5: Propriedades geométricas e mecânicas da secção transversal das ripas.....	118
Tabela 5-6: Propriedades geométricas e mecânicas da secção transversal dos pregos.....	118
Tabela 5-7: Propriedades geométricas e mecânicas da secção transversal das tábuas	118
Tabela 5-8: Propriedades geométricas e mecânicas da secção transversal das ripas.....	119
Tabela 5-9: Frequências obtidas no Sap2000 – E1.1	120
Tabela 5-10: Frequências obtidas no Sap2000 – E4.1	123

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 4-1: Ensaio dinâmico. Conjunto de respostas Frequência vs Carga total das paredes em estudo, Ed.1.....	91
Gráfico 4-2: Ensaio dinâmico. Conjunto de respostas Frequência vs Carga total das paredes em estudo, Ed.2.....	97
Gráfico 4-3: Ensaio dinâmico. Conjunto de respostas Frequência vs Rácio/esbelteza das paredes em estudo, Ed.1	99
Gráfico 4-4: Ensaio dinâmico. Conjunto de respostas Frequência vs Rácio/esbelteza das paredes em estudo, Ed.2.....	100

1. Introdução

A terra é um material natural, abundante e de fácil acesso, que, para o seu processo de preparação necessita de equipamentos e tecnologias simples. O uso da terra como material de construção apresenta diversas vantagens que justificam a sua existência. Para além de ser um material natural é reciclável, inesgotável, ecológico, sustentável e energeticamente eficiente (Figueiredo, 2006 e Filemio, 2009).

O uso de terra como material de construção deve-se ao facto de existir abundantemente na natureza e também pelo facto de adicionando água adquire excelentes qualidades de trabalhabilidade (Gomes, 2005).

Em Portugal as principais técnicas tradicionais de construção recorrem ao uso da terra. Destacam-se aqui as três principais: “taipa”, predominante no sul do país, “adobe” no litoral centro e o tabique distribuído nalgumas localidades do centro e norte do país (Martins e Varum, 2006).

O tabique enquadra-se no âmbito da “Arquitetura em Terra” sendo considerada como terra crua, diversa e de características universais. Efetivamente a terra crua como material de construção pode ser escavada, empilhada, modelada, prensada, recortada e extrudida. Pode também servir de enchimento como é o caso do tabique.

As paredes de alvenaria em tabique são um dos sistemas de construção mais usuais nesta região, nomeadamente no centro histórico de Viseu. No entanto, o seu estudo ainda está muito pouco aprofundado.

O tabique é portanto, um método construtivo comum nos centros urbanos em Portugal, como, por exemplo, no centro histórico do Porto e no centro histórico de Viseu. Esta técnica construtiva encontra-se distribuída por diversos locais do mundo e consiste numa estrutura de madeira interligada por trama de madeira, formando um recipiente que é preenchido por terra argilosa e podendo ou não conter fibras vegetais (Cardoso, 2013).

1.1 Objetivos da dissertação

As construções antigas presentes nos centros históricos de Portugal, tal como no centro histórico de Viseu, atravessam uma realidade marcada pela degradação e abandono. Esta realidade está relacionada com o facto de não existirem processos de manutenção sistemáticos.

A manutenção e reabilitação deste tipo de construções são um grande contributo para a valorização do património construído. A reabilitação de estruturas e, particularmente, as estruturas antigas de madeira, é uma mais-valia quando se fala sobre sustentabilidade, pois o facto de não ser necessário substituir os elementos por outros novos, permite minorar o impacto ambiental (Bragança, 2010).

Este trabalho de investigação tem como principal objetivo contribuir para aprofundar o conhecimento da técnica construtiva de tabique e do seu comportamento estrutural, de forma isolada e de forma integrada no sistema estrutural global do edifício, utilizando para isso, métodos de ensaio não destrutivos.

O ainda reduzido conhecimento sobre as técnicas e os materiais aplicados na construção de tabique, dificultam a realização das tarefas inerentes a este trabalho de investigação. Para o efeito, a necessidade de se desenvolverem ensaios e ferramentas de cálculo automático expeditas será uma possibilidade para contornar estes condicionalismos.

Tirando partido do protocolo existente entre o DEC e a Viseu Novo SRU – Sociedade de Reabilitação Urbana, foram escolhidos dois edifícios do centro histórico de Viseu dos quais se recolheu o máximo de informação possível, especialmente a nível do levantamento geométrico, do seu estado de conservação e das ligações existentes entre os diversos panos de parede, etc.

Com base no conhecimento sobre estes elementos, desenvolveram-se ensaios não destrutivos, *in situ*, para determinar a sua resposta estrutural, nomeadamente o seu comportamento dinâmico. Os ensaios que serão abordados para a realização da presente dissertação são: o ensaio dinâmico que permite avaliar a resposta estrutural das paredes de tabique e o georadar que serve para definir a estrutura da parede existente. Este último ensaio é um ensaio complementar. No entanto, faz-se referência a outros ensaios já realizados em edifícios do centro histórico de Viseu, para avaliar este tipo de paredes e apresentam-se alguns resultados obtidos, que podem ser importantes em termos de comparação com os resultados que serão obtidos nestes ensaios.

1.2 Metodologia da dissertação

A presente dissertação de mestrado desenvolve-se em 6 capítulos, incluindo este capítulo introdutório, dois anexos e um apêndice. De seguida descreve-se o conteúdo de cada um dos capítulos desenvolvidos.

Neste capítulo, capítulo 1 é feito um enquadramento histórico da construção em tabique. Apresentam-se os principais objetivos da dissertação que passam principalmente por contribuir para um aprofundamento do conhecimento da técnica construtiva de tabique, através da realização de ensaios *in situ* para determinar a sua resposta estrutural.

No capítulo 2 é apresentada uma breve descrição da construção em tabique. Aborda-se a técnica em tabique, tipos de construções e procede-se ao estudo e caracterização dos materiais das paredes de tabique, nomeadamente, a estrutura de madeira, a terra como material de enchimento e revestimento e os conetores metálicos. Faz-se uma pequena descrição de cada material e apresentam-se alguns ensaios e respetivas conclusões, realizados por Pinto (2013),

visto ser um trabalho realizado no mesmo local da presente dissertação, e que serviram, quando necessário, como valores de referência.

O capítulo 3 destina-se a efetuar a caracterização e descrição dos edifícios escolhidos como casos de estudo, onde se descreve o estado de conservação de cada edifício. Faz-se referência a alguns aspetos construtivos encontrados relativamente às paredes de tabique, aos pavimentos e à cobertura.

É no capítulo 4 que se procede à descrição dos dois ensaios não destrutivos escolhidos para a realização desta dissertação. Divide-se em dois subcapítulos, um destinado ao ensaio do georadar e outro ao ensaio dinâmico. Em cada um, começa-se por fazer uma apresentação de cada ensaio e, descrevem-se os procedimentos realizados, a localização das paredes em estudo e analisa-se os resultados obtidos. No subcapítulo do ensaio dinâmico é apresentado um breve estudo analítico, para calcular a primeira frequência natural de paredes de tabique, com o intuito de se poder interpretar eficazmente os resultados obtidos no ensaio. É um capítulo que pretende demonstrar algumas das vantagens que estes ensaios possuem quando aplicados a estruturas deste tipo, uma vez que elas apresentam um grande contraste de materiais, que poderiam comprometer a aplicabilidade destas técnicas, principalmente o ensaio do Georadar que é um método utilizado em meios menos heterogéneos.

No capítulo 5 é apresentado um modelo de cálculo automático realizado em duas paredes do Ed.1, cuja validação se baseia nos resultados obtidos tanto no ensaio dinâmico como no estudo analítico, descritos no capítulo anterior.

Por último, no capítulo 6 apresentam-se as principais conclusões obtidas no decorrer do trabalho desenvolvido, assim como os principais trabalhos futuros que podem vir a ser desenvolvidos.

No Anexo 1 podem ser consultadas as peças desenhadas referentes ao edifício em estudo, Ed.1 e os esquemas exemplificativos das paredes em estudo.

No Anexo 2 podem ser consultadas as peças desenhadas referentes ao edifício em estudo, Ed.2 e os esquemas exemplificativos das paredes em estudo.

No Apêndice 1, podem ser consultados todos os dados necessários para a realização do estudo analítico, feito no capítulo 4.

2. Construção em tabique

2.1 Tabique

A construção em terra é um património da Humanidade que está patente em quase todos os continentes o que é elucidativo da diversidade cultural dos povos e demonstrativo da sua versatilidade em termos de aplicação (Correia, 2006). Ou seja, é considerada uma técnica construtiva muito antiga e bastante utilizada pelo Homem em todo o mundo porque a terra é um material bastante abundante na natureza e quando misturado com água torna-se fácil de trabalhar.

Através da Figura 2-1 é possível observar que a construção em terra existe um pouco por todos os continentes.



Figura 2-1: Construção em terra no Mundo (<http://craterre.org/>)

A designação mais comum desta técnica, em Portugal, é o tabique, no entanto encontra-se também outras designações dependendo do local ou região. O tabique é, assim, uma das técnicas construtivas tradicionais com recurso à terra como material de construção.

O tabique consiste em preencher com terra uma estrutura de madeira ou de cana previamente concebida. Esta estrutura simples de madeira, formada por elementos verticais ligados por outros horizontais de menor dimensão transversal, sendo preenchidos e revestidos de ambos os lados por terra simples ou por uma argamassa à base de terra. Deste modo, forma-se uma estrutura mista em que a estrutura de madeira confere uma capacidade resistente e a terra funciona como um material de enchimento e de revestimento (Cardoso, 2013).

O tabique diferencia-se do adobe e da taipa por recorrer a uma estrutura resistente de madeira, enquanto estas utilizam principalmente a terra como material de construção. A terra desempenha um papel importante pois serve de material de acabamento e ao mesmo tempo serve de proteção da estrutura de madeira (Carvalho, 2009).

Esta técnica é usada há imenso tempo pelo ser Humano pelo simples facto de utilizar dois materiais abundantes na natureza e de acesso facilitado. O tabique é uma técnica económica e de simples execução, razão pela qual se encontra bem presente no território nacional, em diversas zonas de Portugal (Cardoso, 2013).

Segundo Carvalho (2009), atualmente o tabique tem sido menos utilizada relativamente a outras técnicas construtivas com recurso à terra tais como: adobe e à taipa.



Figura 2-2: Construção em tabique e construção em blocos de adobe
(<http://arquiteturasdeterra.blogspot.com>.)

2.2 Esquema da construção em tabique

A construção em tabique é uma técnica que concilia a utilização de dois materiais, a madeira e a terra com funções bastante diferentes. A estes materiais juntam-se os conectores metálicos (pregos) essenciais para a construção da estrutura simples de madeira pois possibilitam a ligação entre os diversos elementos de madeira e entres estes e a estrutura resistente de alvenaria de pedra, em alguns casos.

Esta técnica consiste em encher a estrutura simples previamente concebida de madeira ou cana com uma mistura de terra podendo conter, ou não, fibras vegetais. A estrutura de madeira ou de cana torna-se uma estrutura base resistente. A mistura de terra, água e outros compósitos têm a função tanto de enchimento como de revestimento (Cardoso, 2013). Assim, o tabique começa a ser conhecido como um sistema de construção mista.

Sendo a madeira o material que confere a resistência nas paredes de tabique torna-se importante perceber se existe uma relação entre a madeira aplicada na construção em tabique e a espécie mais comum presente em cada local. Deste modo apresenta-se a Figura 2-3 que ilustra a distribuição geográfica das principais espécies florestais no continente.

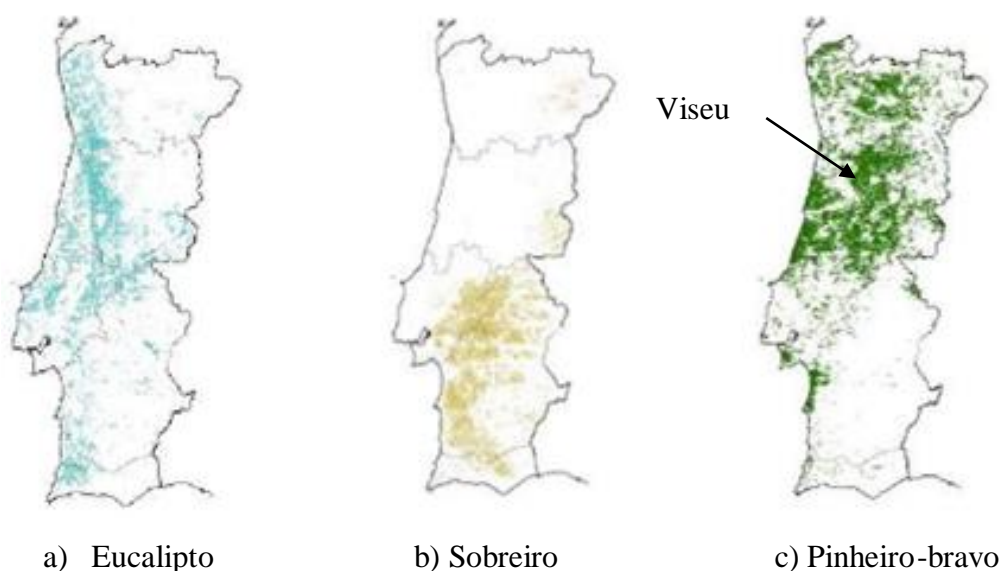
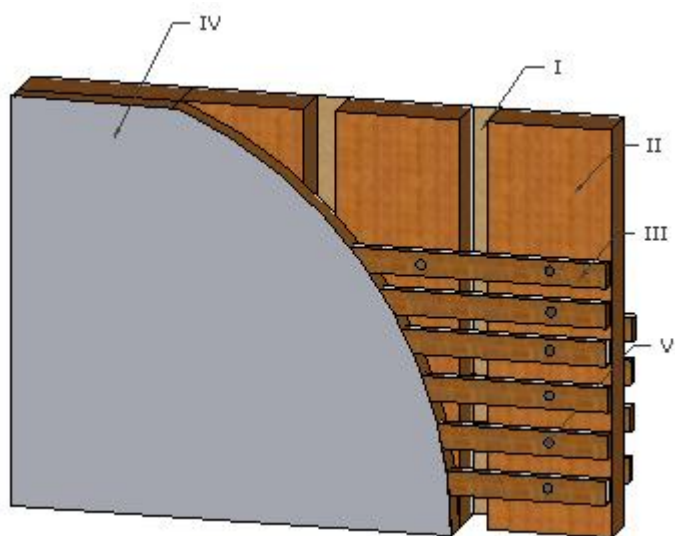


Figura 2-3: Distribuição geográfica das principais espécies florestais, Cortesia do ICFN (2013)

Segundo os trabalhos elaborados por Martinho (2009) e Gonçalves (2010), é possível afirmar que em Portugal a espécie de madeira mais comum é o pinheiro bravo. Como é possível observar na Figura 2-3-c), em Viseu a espécie florestal abundante é o pinheiro-bravo.

Para uma boa caracterização das construções de tabique é necessário conhecê-la, isto é, identificar os seus materiais constituintes, as suas principais propriedades e a forma como são construídos. A Figura 2-4 representa esquematicamente um elemento construtivo de tabique e identifica os seus elementos constituintes e as dimensões consideradas mais importantes.



Legenda- I: Enchimento; II: Tábuas verticais; III: Fasquio; IV: Revestimento; V: Pregos

Figura 2-4: Elementos constituintes de uma parede de tabique

2.3 Tipos de construções em tabique

O processo de execução de uma construção de tabique não segue princípios específicos e prova disso são as construções que perduram até os dias de hoje. São construções de grande variabilidade tanto no tipo de matéria-prima utilizada como na disposição construtiva e na diversidade de material de enchimento e revestimento existente. De um modo geral, esta diversidade explica-se tendo em conta a disponibilidade dos materiais, os recursos financeiros e as condições climáticas da região (Cardoso, 2013). Pode afirmar-se que é uma técnica económica e sustentável porque não necessita de mão-de-obra especializada para a sua construção.

Segundo Cepeda (2009), uma parede em tabique consiste na pregagem de um fasquiado de ripas finas de madeira, dispostas usualmente em ambos os lados na horizontal em tábuas maiores na vertical. Posteriormente, esta estrutura é preenchida com uma mistura de terra argilosa ou siltosa juntamente com palha ou outras fibras vegetais. A pregagem dos diversos elementos de madeira é feita com pregos zincados, impedindo que a ferrugem passe para o exterior (Carvalho, 2009).

A construção em tabique é uma técnica vantajosa pelo facto de ser bastante versátil, atendendo que é adequada para construir vários tipos de elementos, tais como: paredes exteriores, paredes divisórias, escadas interiores, alpendres, chaminés e tetos.

Nas figuras seguintes poder-se-á ver alguns tipos de elementos de tabique encontrados em edifícios do centro histórico de Viseu.



Figura 2-5: Teto em tabique



Figura 2-6: Paredes divisórias em tabique



Figura 2-7: Estrutura de claraboia em tabique

2.4 Estudo e caracterização dos materiais

Tendo em conta toda a informação recolhida ao longo deste capítulo, relativa à técnica de construção em tabique, é possível concluir que, de um modo geral, esta técnica é utilizada principalmente na construção de paredes. As paredes são formadas por elementos de madeira colocados na vertical, horizontal ou inclinada, sendo os espaços vazios entre elas preenchidos com terra ou outro material, como ilustrado na Figura 2-8.



Figura 2-8: Estrutura de tabique (Minke G, 2006)

Ao longo deste subcapítulo será feita uma análise dos materiais constituintes das paredes de tabique e serão identificados, de uma forma sucinta, quais os ensaios mais realizados na identificação e caracterização destes elementos. Serão também apresentados alguns valores de referência dos ensaios apresentados por Pinto (2013), visto que se trata da análise de materiais do mesmo local de análise da presente dissertação.

2.4.1 Material de enchimento e de revestimento

A terra é o principal material identificado no enchimento e no revestimento de paredes de tabique.

Desde que o Homem constrói cidades, há mais de dez mil anos, a terra crua tem sido um dos principais materiais de construção utilizados. As técnicas de construção em terra têm vindo a ser conservadas no meio rural, sendo estas o resultado de um conhecimento empírico passado de geração em geração (Gomes, 2008).

O uso de terra como material de construção deve-se principalmente ao facto de existir abundantemente na natureza e de adquirir boas qualidades de trabalhabilidade quando misturada com água. Atualmente, a terra é considerada um potencial material de construção visto ser um material natural, reciclável, ecológico e sustentável (Correia, 2006).

Segundo Correia (2006), a construção em terra é um património da Humanidade que está visível em quase todos os continentes e que é elucidativo da diversidade cultural dos povos e demonstrativo da sua versatilidade em termos de aplicação.

2.4.1.1 Ensaios de caracterização

No caso do material de enchimento/revestimento os ensaios mais comuns, utilizados para caracterizar este material são, entre outros, os de análise granulométrica, peneiração, sedimentação e também o da plasticidade.

2.4.1.1.1 Análise granulométrica

O ensaio de granulometria é o processo utilizado para a determinação da percentagem em peso que cada banda especificada de tamanho de partículas representada na massa total ensaiada. A determinação da composição granulométrica da terra, pode ser obtida com recurso aos ensaios de peneiração e de sedimentação.

A análise granulométrica das amostras apresentadas por Pinto (2013) foi executada por peneiração húmida e de acordo com a norma do LNEC E 239 [1970]. Na Figura 2-9 apresentam-se algumas das amostras recolhidas no trabalho de campo feito por Pinto (2013).



Figura 2-9: Amostras do material de enchimento/revestimento (Pinto, 2013)

2.4.1.1.1 Peneiração e sedimentação

O método mais divulgado para efetuar a análise granulométrica de sedimentos grosseiros é a peneiração. O peneiro para este tipo de análise sedimentológica consiste num suporte metálico cilíndrico que serve de apoio a uma rede de malha calibrada. Estes são concebidos para poderem ser encaixados uns nos outros de modo a formarem uma coluna de peneiração.

Para caracterizar as partículas mais finas recorre-se ao ensaio de sedimentação. Estes ensaios encontram-se descritos na norma do LNEC E 239 [1970] e LNEC E 196 [1966], respetivamente.



a) Peneiração por vibração b) Agitador elétrico

Figura 2-10: Ensaio de peneiração e sedimentação (Pinto, 2013)

Tendo por base os resultados apresentados, é possível afirmar que a constituição média das amostras ensaiadas por Pinto (2013) aponta para 25% de fração fina (silte e argila) e 75% de fração média (areia e seixo).

2.4.1.1.2 Plasticidade

A plasticidade é a maior ou menor capacidade dos solos de serem moldados, sob certas condições de humidade, sem variação do volume. A composição química e mineralógica, a granulometria, a forma das partículas e o teor de humidade são propriedades importantes no comportamento plástico da terra. O ensaio da plasticidade é executado segundo a norma portuguesa NP 143 [1969].

Segundo Pinto (2013), a determinação do limite de liquidez consistiu na colocação de subamostras da amostra principal na concha Casagrande (Figura 2-11- a)), com um teor de água desconhecido e determinou-se o número de pancadas. Relativamente à determinação do limite de plasticidade consiste em obter três subamostras da amostra principal (Figura 2-11- b)) modeladas sobre uma placa de vidro, sendo posteriormente pesadas, antes e depois de irem à estufa.



a) Concha Casagrande b) Subamostra

Figura 2-11: Determinação do limite de liquidez e plasticidade (Pinto, 2013)

Na Tabela 2-1 apresenta-se uma síntese dos resultados obtidos para os limites de Atterberg da amostra analisada por Pinto (2013). O índice de plasticidade é bastante pequeno o que demonstra que a amostra apresenta uma plasticidade pouco vincada.

Tabela 2-1: Valores de referência do ensaio da plasticidade

Limites de Atterberg (%)	Amostra
L.L	33,48
L.P	32,28
IP	1,2

* L.L - Limite de Liquidez

* L.P - Limite de Plasticidade

* IP - Índice de Plasticidade

2.4.2 Estrutura de madeira

“A madeira é um material perfeito, flexível e bastante resistente em termos mecânicos se comparada ao seu peso” (Mascarenhas, 2010).

A madeira, sendo um material natural e abundante na terra, tem grande aplicação na construção, ainda que apresente algumas limitações. No entanto, nos dias de hoje existem madeiras melhoradas com bastante resistência, que permite ser utilizada para proveito da Humanidade.

A resistência da madeira a forças exteriores depende da força aplicada e da forma como esta é aplicada. Segundo Tsoumis (1991), existem três tipos de básicos de forças: a tração e compressão e corte.

Como já foi referido, numa parede de tabique a resistência é conferida pela madeira. A estrutura de madeira é composta pelas ripas do fasquio e pelas tábuas ou prumos, que através das ligações entre si conferem resistência à estrutura.

2.4.2.1 Ripas do fasquio

As ripas do fasquio podem apresentar formas distintas de secção transversal: a secção transversal do tipo retangular com chanfro duplo, a secção transversal do tipo retangular e a secção transversal do tipo retangular com chanfro simples, como se ilustra na Figura 2-12, respetivamente.

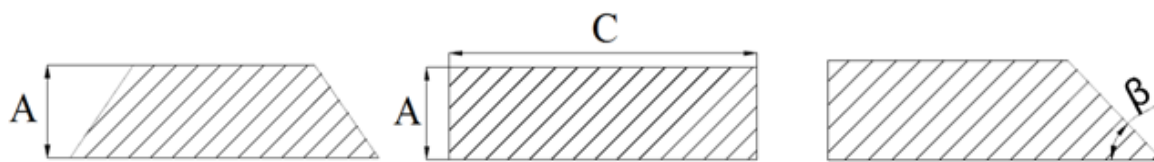


Figura 2-12: Secções transversais tipo das ripas

De modo a caracterizar a geometria das ripas do fasquio, na Tabela 2-2 são apresentadas as dimensões médias citadas por Pinto (2013). Para as dimensões registadas atribuíram-se as seguintes designações: o comprimento (C), a altura (A) e o ângulo (β).

Tabela 2-2: Dimensões médias das ripas de madeira das paredes de tabique

Amostras	Ripas		
	C (cm)	A (cm)	β (°)
Ed.1	3,3	1,4	63,36
Ed.2	3,0	1,4	63,22

2.4.2.2 Tábuas e prumos

À semelhança do descrito relativamente às ripas, as tábuas e os prumos de madeira também podem apresentar secções transversais diferentes: prumo quadrangular, prumo com bordo arredondado, prumo retangular, tábua retangular, tábua costaneira e tábua retangular irregular, respetivamente. Algumas secções transversais são ilustradas na Figura 2-13 que se segue.

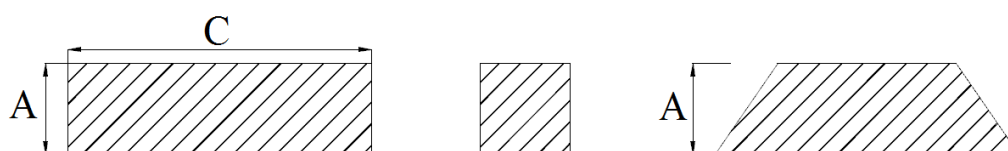


Figura 2-13: Secções transversais tipo das tábuas e dos prumos de madeira

Tal como foi mencionado para as ripas do fasquio, também para as tábuas são apresentadas as dimensões médias citadas por Pinto (2013). Para as dimensões registadas atribuíram-se as seguintes designações: o comprimento (C) e a altura (A), que se encontram descritas na Tabela 2-3.

Tabela 2-3: Dimensões médias das tábuas de madeira das paredes de tabique

Amostras	Tábuas	
	C (cm)	A (cm)
Ed.1	19,9	5,0
Ed.2	13,8	3,5

2.4.2.3 Ensaio de caracterização mecânica

Considerando que as propriedades físicas e mecânicas da madeira têm importância na avaliação do comportamento estrutural das paredes de tabique, são apresentados alguns dos ensaios realizados por Pinto (2013), bem como alguns dos resultados considerados relevantes

para este trabalho, como é o caso, do ensaio de caracterização mecânica dos vários elementos constituintes das paredes de tabique que são: flexão estática, dureza e compressão.

2.4.2.3.1 Flexão Estática

O ensaio da flexão estática encontra-se descrito na norma Portuguesa NP 619 [1973] e consiste na aplicação de uma carga a meio vão de uma peça simplesmente apoiada nas extremidades. A carga é introduzida a uma velocidade constante até que ocorra a rotura do provete.

De acordo com Carvalho (1996), para elementos de igual secção transversal, a deflexão de uma viga varia inversamente com o módulo de elasticidade (MOE), ou seja quanto menor o MOE maior é a deflexão.

O objetivo deste ensaio consiste em obter a força de rotura (força máxima aplicada) e a respetiva flecha.



Figura 2-14: Ensaio de flexão estática (Pinto, 2013)

Na Tabela 2-4 apresenta-se a média dos valores obtidos no ensaio de flexão estática (densidade, tensão de rotura e módulo de elasticidade), realizados por Pinto (2013).

Tabela 2-4: Valores obtidos no ensaio de flexão estática

Amostras	Valores obtidos (média)	
	Ed.1	Ed.2
Densidade (H=12%) (kg/m^3)	652	560
Tensão de rotura (H=12%) (kg/cm^2)	1285	935
Em,g (GPa)	10,87	8,66

2.4.2.3.2 Dureza

A dureza da madeira pode ser determinada através de vários métodos. O método de Chalais-Meudon e o método de Janka são dois dos que permitem a determinação da dureza da madeira. Estes ensaios encontram-se descritos respetivamente, na norma portuguesa NP 617 [1973] e na norma ISO 3350.

Segundo Tsoumis (1991), a dureza consiste na capacidade de um corpo resistir à deformação localizada. Esta propriedade está relacionada com a facilidade ou dificuldade de trabalhar uma madeira. Há madeiras classificadas quanto à sua dureza desde brandas (pinheiro, choupo) a duras (faia, oliveira, carvalho).



a) Método Chalais-Meudon



b) Método Janka

Figura 2-15: Ensaio de dureza (Pinto, 2013)

Na Tabela 2-5 apresenta-se a média dos valores obtidos no ensaio de dureza para ambos os métodos realizados por Pinto (2013).

Tabela 2-5: Valores estatísticos obtidos no ensaio de dureza para ambos os métodos

Método	Valores obtidos (média)			
	Chalais-Meudon		Janka	
Amostras	Ed.1	Ed.2	Ed.1	Ed.2
Profundidade (mm)	0,25	0,4	-	-
Dureza (kgf)	4,3	2,62	398	317

2.4.2.3.3 Compressão axial

A resistência da madeira à compressão varia consoante a direção em que a força é aplicada. Consiste em submeter os provetes a uma compressão paralela às fibras até atingir a rotura. Segundo Pinto (2013), a rotura surge devido ao rompimento das camadas intercelulares, ao fendimento e outros fatores secundários. Este ensaio encontra-se descrito na norma portuguesa NP 618 [1973].



Figura 2-16: Ensaio de compressão axial (Pinto, 2013)

Na Tabela 2-6 apresenta-se a média dos valores obtidos no ensaio de compressão axial para realizados por Pinto (2013).

Tabela 2-6: Ensaio de compressão axial (Pinto, 2013)

Amostras	Valores obtidos (média)	
	Ed.1	Ed.2
Densidade (H=12%) (kg/m^3)	665	572
Tensão de rotura (H=12%) (kg/cm^2)	629	479

2.4.2.4 Resistógrafo

O resistógrafo é um equipamento utilizado em processos de inspeção da integridade estrutural de material lenhoso, na análise da qualidade da madeira através da medição da resistência mecânica por intermédio de perfuração.

Na Figura 2-17 pode ver-se um resistógrafo. Trata-se de um aparelho com ação semelhante a um berbequim, com uma agulha de diâmetro de cerca de 3mm, que determina a resistência da madeira à rotação e à progressiva penetração da agulha.

A utilização deste aparelho é considerada não destrutiva, pois somente provoca furos de pequeno diâmetro, facilmente tapados sem reduzir a resistência dos elementos de madeira inspecionados.

De referir também que é necessário ter bastante cuidado no manuseamento do equipamento porque quando a agulha está a penetrar a peça de madeira, o resistógrafo não deve sofrer qualquer movimento violento para que a agulha não parta. Outra causa que pode levar ao dano da agulha é a existência de algum elemento de maior dureza no interior da peça.



Figura 2-17: Resistógrafo (Lourenço, 2005)

É um método de fácil interpretação gráfica, de fácil armazenamento de dados e de transporte do equipamento. No entanto, estudos revelam algumas limitações deste método, nomeadamente relacionadas com as dificuldades em realizar ensaios, pois o dispositivo deve posicionar-se na perpendicular do elemento.

2.4.2.5 Termografia

O ensaio de termografia é um outro tipo de ensaio não destrutivo (não necessita de contato com o objeto) muito utilizado no contexto da construção civil, não só na análise da madeira mas também, por exemplo em trabalhos de peritagem de avaliação do desempenho térmico de elementos construtivos aplicados em obra.

De forma muito resumida, este ensaio consiste na medição da temperatura superficial de um elemento através da recolha de imagens térmicas. A quantidade de calor irradiado é aferida através da utilização de uma câmara de termografia constituinte do aparelho utilizado no ensaio, denominado de câmara termográfica.

Na Figura 2-18 apresenta-se a fachada principal de um dos edifícios escolhidos como caso de estudo e o respetivo termograma. O estado de conservação deste edifício era bom e através do termograma é possível observar a presença de paredes exteriores de tabique.

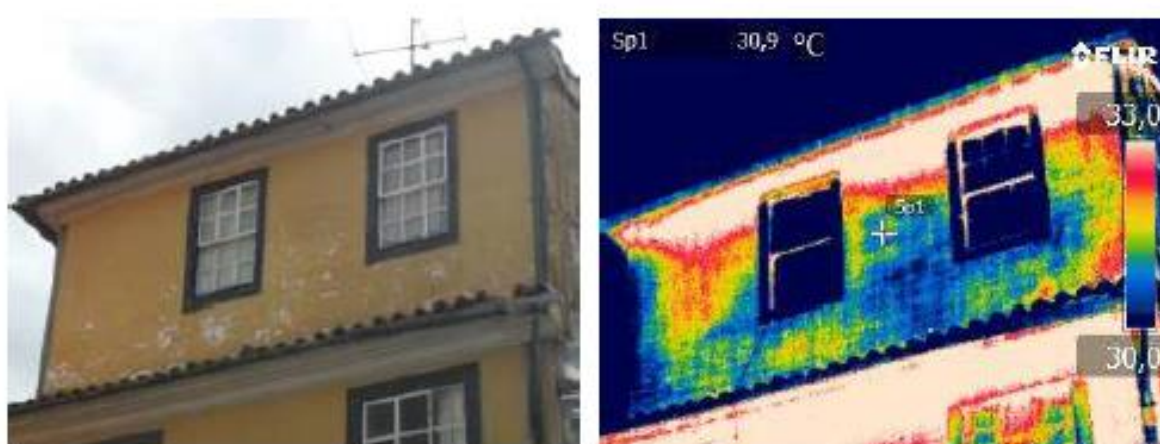


Figura 2-18: Ed1e respetivo termograma obtido (Pinto, 2013)

Segundo Pinto (2013), o uso da técnica de termografia em paredes de tabique traduz-se em resultados fiáveis, caso se pretenda obter um resultado rápido. No entanto, é um ensaio que depende de alguns fatores, como é o caso, do tipo e espessura do revestimento, da necessidade de pré-aquecimento e também da distância a que se realiza o ensaio.

2.4.3 Pregos

Na construção de tabique, os pregos são utilizados com o objetivo de funcionarem como conetores de ligação dos elementos de madeira (ripas, tábuas, prumos) e entre estes e estruturas principais de suporte como as alvenarias de pedra de granito. Segundo Castro (1991) e Whan (1986), através de análises metalográficas consegue-se uma caracterização da liga metálica constituinte dos pregos (Chandler, 2004).

De modo a caracterizar-se a geometria dos pregos esquematizaram-se duas tipologias de pregos. Uma com secção transversal constante e outra com secção transversal variável. Na Figura 2-19, indicam-se as principais dimensões reportadas para a caracterização geométrica tais como, o comprimento (L), a dimensão (C) que corresponde ao diâmetro da cabeça do prego, o diâmetro (D) relativo à secção transversal.

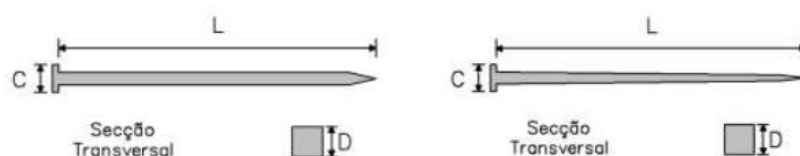


Figura 2-19: Tipologias dos pregos (Pinto, 2013)

Como se sabe, existe uma grande variedade de pregos e por isso apresentação alguns dos conectores recolhidos por Pinto (2013), durante o seu trabalho de campo.



Figura 2-20: Amostras de pregos (Pinto, 2013)

De modo a caracterizar a geometria dos pregos e perceber a sua importância no comportamento estrutural das paredes de tabique, na Tabela 2-7 são apresentadas as dimensões de alguns pregos encontradas nos casos de estudo apresentadas por Pinto (2013). Todos os pregos apresentados têm uma secção transversal quadrada constante.

Tabela 2-7: Dimensões das amostras de pregos apresentadas

Amostras	L (cm)	D (mm)	C (mm)
A	18	6	11
B	12,5	4,5	11
C	10,5	3,5	7
D	7,5	3	7
E	5	2,5	5
F	4,5	2	5

2.4.3.1 Ensaios de caracterização

Os ensaios que normalmente são realizados na caracterização dos pregos são: a caracterização da liga metálica, a determinação da composição química, ensaio de tração, ensaio de

microdureza *Vickers* e análise microestrutural. No trabalho de investigação feito por Pinto (2013), foram realizados os seguintes ensaios: ensaio de tração, ensaio de microdureza *Vickers* e análise microestrutural.

2.4.3.1.1 Ensaio de tração

Este ensaio consiste na aplicação de esforços crescentes, num dado material, segundo a sua direção axial até atingir a rotura (Figura 2-21). É um ensaio que permite obter uma curva que relaciona a tensão e a extensão do material ao longo do ensaio e determinar o módulo de elasticidade.



Figura 2-21: Máquina universal de tração (Pinto, 2013)

O ensaio de tração realizado por Pinto (2013), foi feito para quatro pregos, em que três são referentes aos denominados por “A” e outro corrente (novo). Através do diagrama tensão vs extensão conseguiu-se obter valores de módulo de elasticidade e tensão de rotura que são apresentados na seguinte tabela.

Tabela 2-8: Valores obtidos no ensaio de tração

Amostras		Módulo de elasticidade (GPa)	Tensão de rotura (MPa)
Pregos antigos	1	204	440,56
	2	227	610,98
	3	197	860,61
Prego novo		190	546,28

2.4.3.1.2 Ensaio de microdureza Vickers

De uma forma sucinta, o ensaio de microdureza consiste na determinação do número de dureza de Vickers (HV), através da média aritmética da leitura do comprimento das duas diagonais da impressão. Este ensaio encontra-se regulamentado na norma portuguesa NP 711-1 [1990].



Figura 2-22: Microdurómetro (Pinto, 2013)

Relativamente aos resultados obtidos por Pinto (2013), para o ensaio da microdureza de Vickers é apresentado, na seguinte tabela, o número de dureza Vickers para as seis amostras de pregos.

Tabela 2-9: Número de dureza de Vickers

Amostras	A	B	C	D	E	F
Número de dureza (HV)	134	164	138	113	133	150

2.4.3.1.3 Análise microestrutural

A análise microestrutural consiste na compreensão do comportamento mecânico das ligas metálicas através de microscopia ótica e eletrónica.



Figura 2-23: Microscópio metalográfico de reflexão (Pinto, 2013)

As imagens apresentadas na Figura 2-24 correspondem a uma análise microestrutural relativa à amostra de prego “A”.

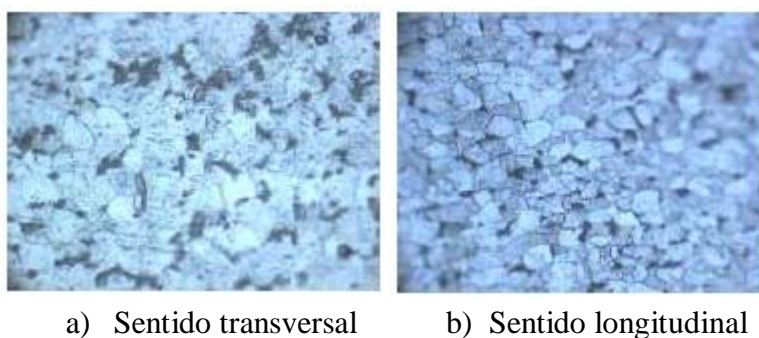


Figura 2-24: Imagens da microestrutura da superfície dos pregos

2.5 Conclusões

Neste capítulo apresenta-se um enquadramento histórico da construção em tabique. Apresenta-se de forma muito simplificada o esquema de construção em tabique, fazendo referencia às medidas consideradas mais relevantes, obtidas em estudos realizados em edifícios situados no centro histórico de Viseu. Evidencia-se também a aplicação desta técnica numa variedade de construções, tetos, paredes interiores e exteriores, escadas, chaminés, entre outras.

Tal como acontece com outros materiais, a madeira e a terra são materiais que apresentam vantagens e desvantagens. Por isso, neste capítulo, abordou-se os materiais constituintes deste tipo de construção, nomeadamente paredes de tabique.

A técnica de tabique é, geralmente, constituída por três tipos de materiais que são a madeira, a terra e os conectores metálicos (pregos). A madeira é considerada o elemento principal, pois confere a resistência à estrutura, sendo que os pregos metálicos possibilitam a ligação entre os diversos elementos de madeira.

Este capítulo subdividiu-se em subcapítulos, onde foi realizada uma análise dos materiais constituintes das paredes de tabique e identificado, de uma forma sucinta, quais os ensaios mais utilizados na identificação e caracterização destes elementos. Foram também apresentados alguns valores referência dos ensaios citados por Pinto (2013), visto que se trata da análise de materiais do mesmo local de análise da presente dissertação.

3. Caracterização do comportamento estrutural de paredes de tabique existentes no centro histórico de Viseu

As paredes de tabique são um dos sistemas de construção tradicionais mais usuais, nomeadamente no centro histórico de Viseu. No entanto, o seu estudo ainda está muito pouco aprofundado.

Ao longo deste capítulo proceder-se-á à análise e caracterização do comportamento estrutural de paredes de tabique, usando como casos de estudo edifícios antigos localizados no centro histórico da cidade de Viseu.

O conhecimento sobre as técnicas e os materiais aplicados na construção de tabique ainda é reduzido. Deste modo, apresentam-se as potencialidades da utilização de ensaios dinâmicos e Georadar, na aplicação *in situ* em paredes de tabique. O ensaio dinâmico permite avaliar a resposta estrutural das paredes de tabique e o georadar permite definir a estrutura da parede existente.

É de referir que o objetivo principal desta dissertação é avaliar o comportamento estrutural deste tipo de elemento estrutural vertical de forma integrada no sistema estrutural global do

edifício e não avaliar e caracterizar individualmente cada material constituinte deste tipo de parede.

3.1 Descrição dos edifícios escolhidos como caso de estudo

No centro histórico de Viseu existe um vasto património edificado de construções de tabique. Tirando partido do protocolo existente entre o Departamento de Engenharia Civil e a Viseu Novo SRU – Sociedade de Reabilitação Urbana, foram escolhidos dois edifícios, situados no largo de S. Teotónio/Travessa das Escadinhas da Sé, nº 24 e 25, e na rua Direita nº 275.

De modo a facilitar a designação de cada edifício, estes passam a ser designados por Ed.1 o edifício situado no largo de S. Teotónio/Travessa das Escadinhas da Sé e de Ed.2 o edifício situado na rua Direita.

Os edifícios são atualmente propriedade da Camara Municipal de Viseu e encontram-se em fase de reabilitação (concurso de construção) por parte da Sociedade de Reabilitação Urbana de Viseu. Este facto, facilitou a recolha de um conjunto de informação técnica, especialmente a nível do levantamento geométrico e do seu estado de conservação.

De seguida será feita a descrição pormenorizada de cada um dos edifícios em estudo, assim como, serão apresentadas algumas peças desenhadas de modo a que a sua perceção se torne mais fácil. As peças desenhadas, foram obtidas através das entidades promotoras de cada um dos projetos de reabilitação e cedidas pela Viseu Novo- Sociedade de Reabilitação Urbana de Viseu.

3.1.1 Edifício 1 (Ed.1)

O edifício 1 localiza-se no centro histórico de Viseu, mais concretamente no largo de S. Teotónio/Travessa das Escadinhas da Sé e é possível observar a sua fachada principal através da Figura 3-1.

Este edifício encontra-se adossado a duas construções contíguas. Não possui espaço de logradouro, logo a sua implantação refere-se ao limite edificado.



Figura 3-1: Fachada principal do edifício 1

Era um edifício de 3 pisos (R/C, 1º andar, 2º andar) contando ainda com uma cave consideravelmente mais pequena que os restantes pisos. Numa fase posterior, terá ocorrido uma expansão do edifício, alargando-se os dois alçados exteriores (Poente e Norte) e acrescentando-se um piso, assumindo assim o aspeto atual de 5 pisos (4 acima e um abaixo da cota de soleira). No piso -1 ainda existe um espaço aberto ao público destinado a comércio, apenas com acesso por vãos no alçado lateral esquerdo (Figura 3-2). Os restantes pisos destinam-se a habitação (estão devolutos), com acesso no piso 0 por um vão no alçado lateral esquerdo e por dois vãos no alçado principal. Os alçados Poente e Norte estão virados para a rua, sendo que os restantes dois estão adjacentes a edifícios vizinhos e podem ser verificados nas peças desenhadas apresentadas no Anexo 1.



Figura 3-2: Entrada do espaço comercial

O edifício foi construído no século XIX, pelo que apresenta características construtivas dessa época, ou seja é constituído por um sistema misto de alvenaria e madeira.

Na Figura 3-3 apresenta-se o corte transversal A-A assinalado do presente edifício. Este corte transversal do edifício tem como objetivo sinalizar as paredes de tabique e alvenaria de pedra exteriores e interiores, a estrutura da cobertura e do pavimento. As restantes plantas e alçados do edifício encontram-se no Anexo 1.

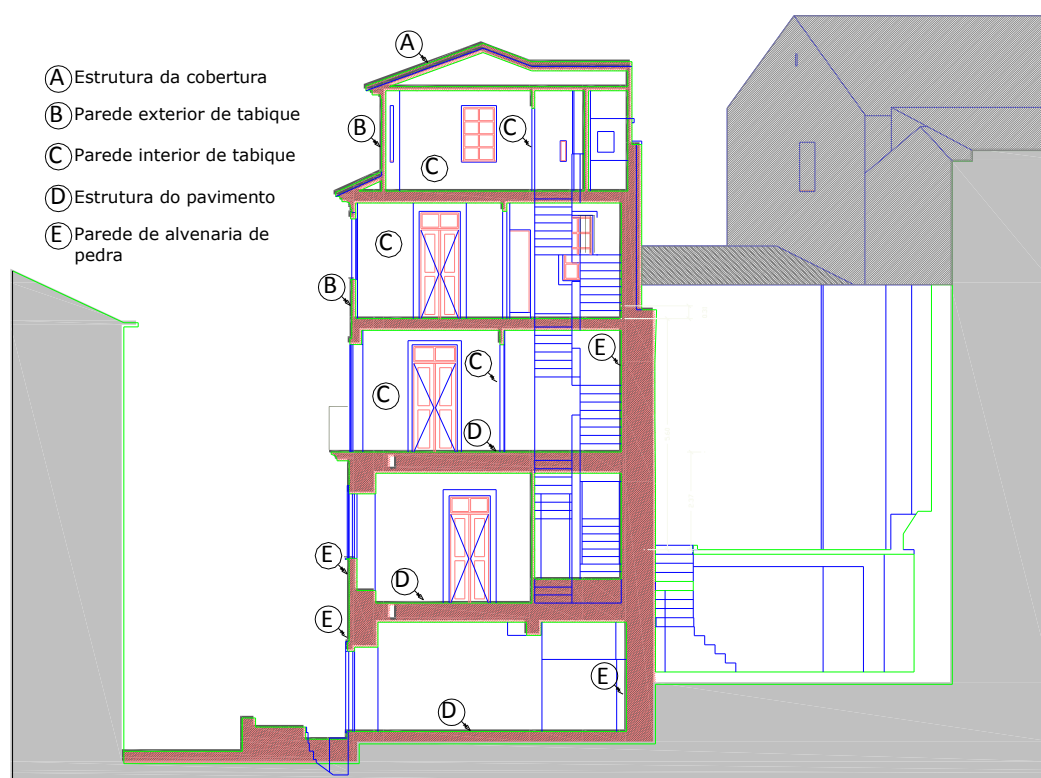


Figura 3-3: Corte transversal A-A – Ed.1

A nível estrutural, as paredes exteriores dos três primeiros pisos (pisos -1, 0 e 1) são constituídos por paredes resistentes de alvenaria de pedra de granito. As do quarto piso são de alvenaria de tabique, à exceção da parede meeira em alvenaria de pedra. O último piso é constituído apenas por paredes exteriores de alvenaria de tabique. Relativamente às paredes interiores do edifício, grande parte são constituídas em alvenaria de tabique (com madeira de pinho), que são utilizadas como paredes de compartimentação. Em algumas divisões, como é o caso da cozinha e instalações sanitárias, foi aplicado revestimento cerâmico (Figura 3-4).



Figura 3-4: Revestimento cerâmico

Relativamente à estrutura dos pavimentos esta é composta por vigamentos em troncos de madeira, paralelos entre si, onde é apoiado um tabuado na face superior (Figura 3-5). Também para os pavimentos o tipo de madeira utilizado é o pinho (*pinus pinaster*), quer nos vigamentos, quer nos soalhos. Os tetos são também constituídos por tábuas de soalho que assentam sobre o vigamento, que está oculto por a colocação de um fasquiado em madeira, onde é colocado posteriormente o estuque.



Figura 3-5: Estrutura do pavimento e teto existente

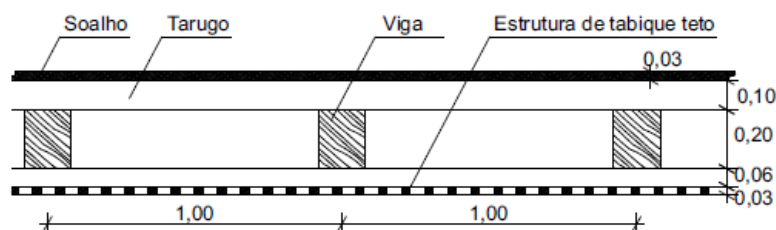


Figura 3-6: Pormenor do pavimento em estudo

As escadas interiores são o elemento que faz a ligação entre todos os pisos e a sua estrutura é constituída por três vigas principais (duas vigas laterais e uma ao centro), onde se apoiam os cobertores e os espelhos (estrutura dos degraus), em madeira de pinho. É uma estrutura

caracterizada pela sua forma elementar, de pequena dimensão e desprovidas de valor estético (Figura 3-7).



Figura 3-7: Escadas interiores

A cobertura é composta pelas asnas e os elementos de ligação das mesmas (madres), dispostas de forma um pouco anárquica e é revestida externamente por telha cerâmica, como se pode visualizar na Figura 3-8.



Figura 3-8: Estrutura da cobertura

O revestimento final das paredes interiores em tabique é em alguns casos à base de argamassa terrosa e noutros à base de argamassa terrosa bastarda (com cal). Foi detetado em algumas paredes, um reforço da argamassa de revestimento, com a aplicação de uma rede de arame de forma a garantir melhor a estabilidade e a trabalhabilidade da parede. A espessura desta mesma argamassa não é a mesma em todas as paredes pelo que será um aspeto a ter em conta na análise dos dados obtidos nos ensaios realizados.

As visitas de inspeção foram feitas antes de se iniciarem os trabalhos de reabilitação. Foi possível abrir pequenas áreas das paredes (janelas de inspeção), de modo a se poder ter uma

melhor percepção do processo construtivo deste tipo de paredes, bem como conseguir medir com maior precisão a espessura dos seus materiais constituintes.

3.1.1.1 Estado de conservação

Os edifícios antigos são afetados por diversos tipos de anomalias, relacionadas com elementos estruturais e não estruturais. As patologias devidas ao deficiente comportamento de fundações e estruturas são muito importantes porque podem corresponder a problemas graves de segurança, incluindo o risco de colapso dos edifícios. Deste modo, com o intuito de avaliar a conservação do edifício, através de uma análise visual ao edifício pode constatar-se que existem algumas patologias estruturais e não estruturais, principalmente no interior do edifício.

As paredes exteriores de alvenaria de pedra apresentam um estado de conservação bastante razoável. As patologias mais comuns deste tipo são estruturais (fendilhação, deformação, esmagamento) e não estruturais (desagregação, fissuração, manchas, crescimento de vegetação, entre outras).

De um modo geral, a maioria das patologias observadas correspondem a manchas, crescimento de vegetação parasitária, como se pode observar através das seguintes figuras.



a) Parede exterior

b) Tubo de queda

Figura 3-9: Crescimento de vegetação

As paredes exteriores de alvenaria de tabique, dos pisos 2 e 3 apresentam patologias bastante visíveis, sobretudo o destacamento da camada de pintura (Figura 3-10), patologia causada, muito provavelmente, pela ação da chuva, do vento e do sol. O revestimento não só apresenta

manchas de sujidade e humidade, como também se encontra a destacar. O revestimento da parede do alçado lateral direito é em telha cerâmica e, como era previsível, estas encontram-se destacadas e em mau estado, deixando o fasquiado visível e exposto à ação da chuva e do sol.



a) Revestimento em telha b) Destacamento do revestimento

Figura 3-10: Exterior do edifício

No que concerne às paredes interiores de alvenaria de tabique (constituídas por madeira de pinho), encontram-se num estado de conservação razoável. Nas paredes das cozinhas e instalações sanitárias foram aplicados revestimentos cerâmicos que em alguns casos já apresentavam alguma degradação e algumas fendas (fissuração), causadas possivelmente, pela falta de rigidez dos pavimentos.

Relativamente aos vãos exteriores (janelas e portas), no geral encontram-se em mau estado, ou seja apresentam deterioração, desgaste elevado nos caixilhos e aros, empenos, vidros partidos, desgaste das pinturas, elementos metálicos degradados, fechaduras e dobradiças com sinais de corrosão, entre outras.

3.1.2 Edifício 2 (Ed.2)

O edifício 2 localiza-se também no centro histórico de Viseu, mais concretamente na rua Direita nº 275. Na Figura 3-11 é possível observar a fachada principal.



Figura 3-11: Fachada principal do edifício 2

Tal como o Ed.1, este edifício é uma construção do século XIX, pelo que também apresenta um sistema construtivo misto (alvenaria de pedra/ estrutura de madeira). É um edifício de 4 pisos (R/C, 1º andar, 2º andar, 3º andar). No rés-do-chão ainda existe um espaço aberto ao público destinado a comércio, com acesso por um vão no alçado principal. Os restantes pisos destinam-se a habitação, com acesso apenas por um vão no alçado principal. Estão devolutos. É uma estrutura em banda, com alçado principal virado a Nascente e o posterior a Poente como podem ser verificados nas peças desenhadas apresentadas no Anexo 2.

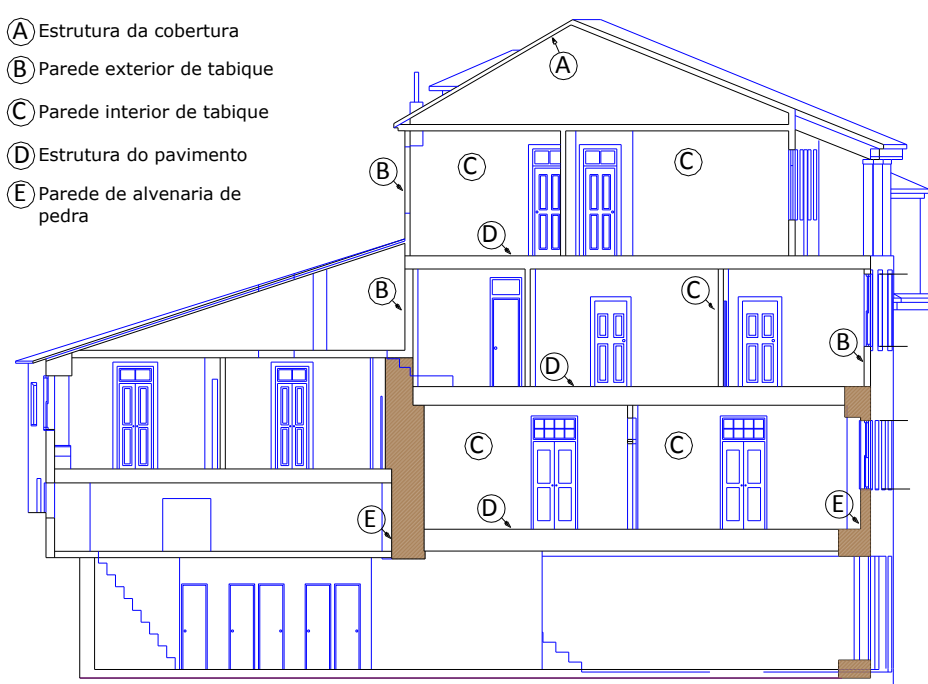


Figura 3-12: Corte transversal C-D – Ed.2

Na Figura 3-12 apresenta-se o corte transversal C-D assinalado do presente edifício. Este corte transversal do edifício têm como objetivo sinalizar as paredes existentes de tabique e alvenaria de pedra e a estrutura da cobertura e do pavimento.

A nível estrutural, as paredes exteriores do rés-do-chão são de alvenaria de granito (pedra aparelhada) revestidas com argamassa terrosa bastarda, sendo as paredes confinantes com os edifícios laterais meeiras. No piso 2 e 3, em relação às paredes exteriores do alçado principal, estas são em alvenaria de tijolo “burro”, revestidas com argamassa terrosa. Relativamente às paredes interiores do edifício, são todas em alvenaria de tabique (com madeira de pinho) e têm como objetivo a compartimentação dos espaços. O revestimento, na maioria das paredes interiores do edifício é essencialmente composto por argamassa terrosa e pintado com cal apagada.

Tal como acontece no edifício 1, neste edifício a estrutura dos pavimentos é em madeira. É constituído por vigas de madeira de secção irregular. Sobre as vigas é pregado um soalho de pinho como acabamento (Figura 3-13). As vigas são simplesmente apoiadas nas paredes.



Figura 3-13: Pavimento do piso 1

As escadas interiores que permitem o acesso entre pisos são em madeira de pinho apoiadas em vigas de madeira e estas apoiam nos elementos estruturais do edifício. Relativamente à estrutura da cobertura é também em madeira, constituídos por forro de pinho pregado às vigas. É revestida externamente por telha cerâmica.



Figura 3-14: Escadas interiores e teto

No que diz respeito aos elementos não estruturais (vãos, portas, janelas), o edifício encontra-se em grande estado de degradação. As portas exteriores e interiores são em madeira, almofadadas e pintadas com tinta. As janelas do alçado principal são em madeira e vidro simples, também elas pintadas com tinta.

3.1.2.1 Estado de conservação

O estado de conservação de um edifício é sempre um aspeto importante a considerar quando se está a avaliar o mesmo. Através de uma análise visual pode constatar-se que existem algumas patologias estruturais e não estruturais principalmente no interior do edifício.

Tal como no Ed.1, as paredes exteriores de alvenaria de pedra apresentam um estado de conservação bastante razoável. De um modo geral, a maioria das patologias observadas correspondem a manchas e a destaque do revestimento, como se pode observar através das figuras.



Figura 3-15: Paredes exteriores do edifício

As paredes de alvenaria de tabique apresentam patologias bastante visíveis, sobretudo ao nível do revestimento, que se encontra degradado. Esta patologia é causada, muito provavelmente, pela ação da chuva, do vento e do sol, no caso de se tratar de paredes exteriores.

Em algumas paredes interiores o revestimento não só se encontra a destacar como apresenta a existência de manchas de bolores e de sujidade. É também bastante visível em certos sítios das paredes (cantos superiores), a presença de humidade, causadas por condensações ou até mesmo falta de isolamento térmico (Figura 3-16). Tal como no Ed.1, neste, em algumas paredes interiores já é bastante visível a presença de fendas provocadas pela falta de rigidez dos pavimentos.



a) Manchas de bolores



b) Destacamento do revestimento

Figura 3-16: Paredes interiores

Relativamente aos vãos (janelas e portas), no geral encontram-se em mau estado, ou seja apresentam deterioração, desgaste elevado nos caixilhos e aros, empenos, vidros partidos, desgaste das pinturas, elementos metálicos degradados, entre outras. Como é visível nas imagens, algumas janelas não têm vidros.

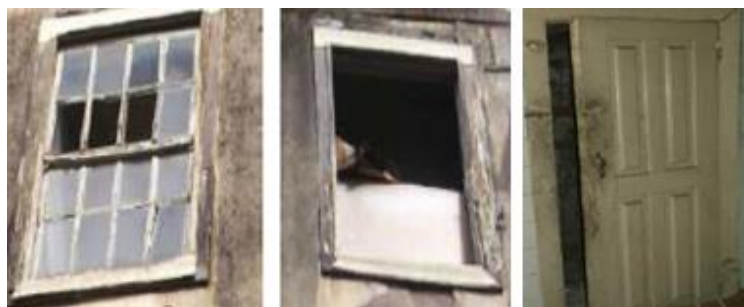


Figura 3-17: Janelas e porta interior do edifício

As varandas do alçado posterior do edifício encontram-se num estado de degradação e são praticamente inacessíveis, pois não oferecem segurança. O soalho está podre e parte dele já caiu. As telhas dos beirados estão degradadas e algumas partidas, e permitem a infiltração de água para essa zona, expondo-a a mais agentes de degradação.

3.2 Aspetos construtivos

Neste subcapítulo pretende-se apresentar alguns pormenores construtivos de construção de tabique, em função do que se constatou nos edifícios estudados e da pesquisa bibliográfica realizada.

Através das visitas realizadas aos edifícios foi possível observar alguns pormenores construtivos referentes às paredes de tabique, tanto na sua ligação aos elementos horizontais, como na ligação entre as diversas paredes, ligação da parede ao pavimento, parede e pavimento do sótão, ligação às paredes resistentes de alvenaria de pedra e pormenores relativos à cobertura.

É importante referir que alguns pormenores mostrados não são referentes a pormenores dos dois edifícios escolhidos como caso de estudo.

3.2.1 Paredes de tabique

A estrutura das paredes de tabique pode variar consoante o método construtivo adotado, ou seja, as paredes de tabique podem apresentar um tabuado duplo ou simples, disposto na diagonal ou na vertical (mais comum). Nos edifícios em estudo apenas foram encontradas paredes simples de tabique com tabuado na vertical. Em termos gerais, a presença deste tabuado duplo confere à parede uma espessura bastante considerável, permitindo-lhe ter um acréscimo de capacidade resistente dentro da estrutura. Deste modo na Figura 3-18 apresenta-se um esquema de uma parede com tabuado duplo.

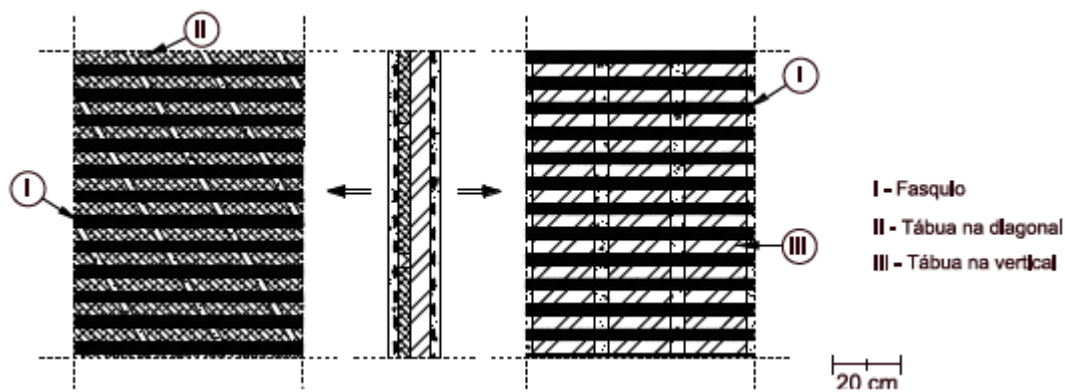


Figura 3-18: Paredes de tabique com tabuado duplo (Pinto, 2013)

Relativamente à ligação existente entre duas paredes interiores de tabique, existem duas situações distintas: ligação de canto entre duas paredes interiores não confluentes e ligação de canto entre duas paredes de tabique confluentes (Figura 3-19).

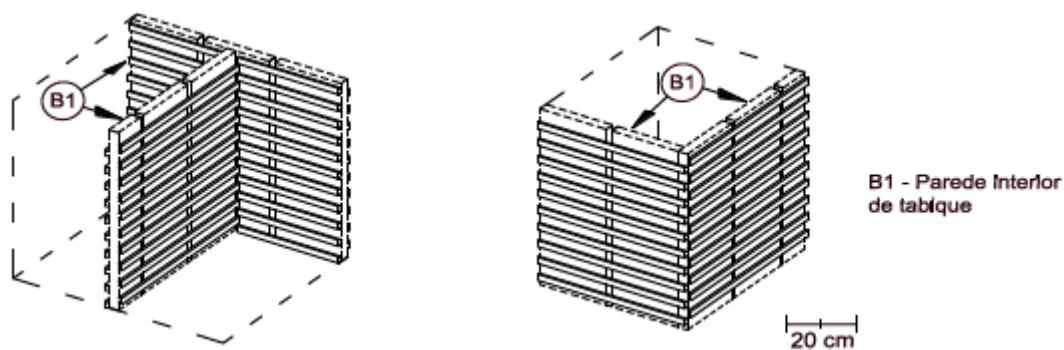


Figura 3-19: Ligação de canto entre duas paredes interiores (Pinto, 2013)

3.2.2 Pavimento e teto

Nas seguintes figuras apresentam-se alguns pormenores esquemáticos da ligação de uma parede interior de tabique ao teto do andar e a ligação de uma parede de tabique ao soalho do pavimento do andar (ligações superiores e inferiores).

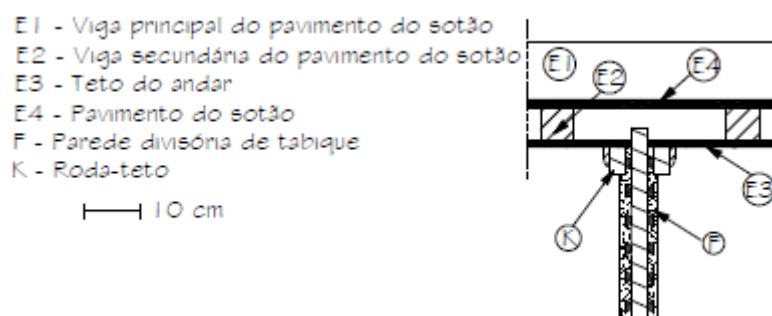


Figura 3-20: Ligação de parede de tabique ao teto do andar (Cardoso, 2013)

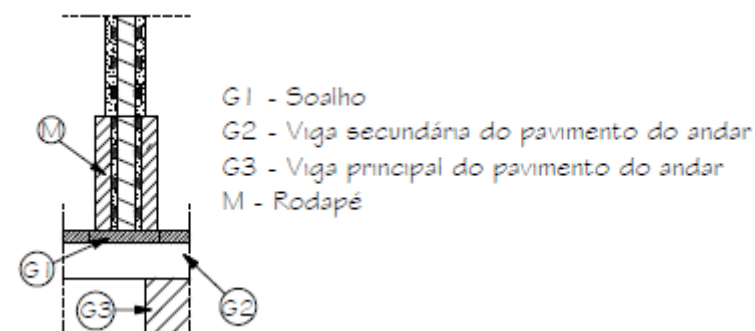


Figura 3-21: Ligação de parede de tabique ao pavimento do andar (Cardoso, 2013)

3.2.3 Coberturas

Na Figura 3-22 apresenta-se um pormenor construtivo correspondente à ligação da estrutura da cobertura ao pavimento do sótão e às paredes exteriores de tabique. Cada viga principal apoia-se diretamente num elemento estrutural, integrante da parede exterior de tabique.

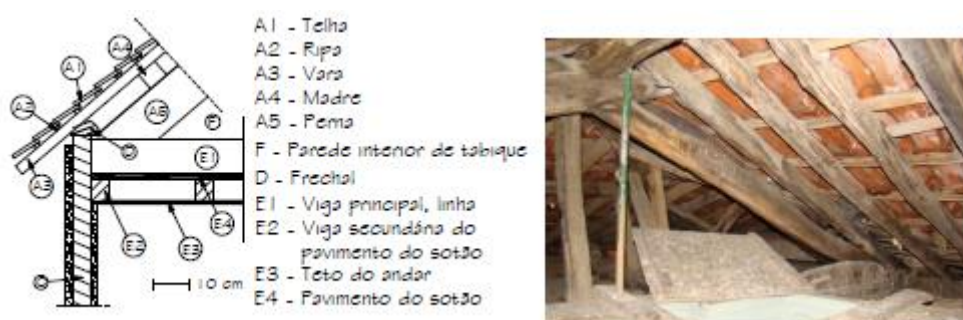


Figura 3-22: Ligação da estrutura da cobertura ao pavimento do sótão e às paredes exteriores de tabique (Cardoso, 2013)

3.3 Conclusões

Ao longo deste capítulo procedeu-se à identificação e descrição de dois edifícios do centro histórico de Viseu que serviram de casos de estudo. Estes edifícios foram utilizados para a realização dos ensaios não destrutivos (georadar e dinâmico) posteriormente descritos.

Para cada edifício foi feita uma avaliação a nível do seu estado de conservação e em ambos os edifícios foram encontradas algumas patologias estruturais e não estruturais. As mais comuns foram: destacamento do revestimento, manchas de sujidade e bolores, crescimento de vegetação parasitária, fissuras, falta de planeza, entre outros, que podem ter influência na realização dos ensaios pretendidos.

As paredes de tabique onde se realizaram os ensaios foram identificadas nas plantas de arquitetura de cada edifício, de modo a ter-se uma melhor perceção relativamente à sua localização. No entanto, também foi elaborado um esquema para cada uma delas referindo sempre as suas dimensões, que é utilizado ao longo do trabalho sempre que necessário.

4. Ensaios não destrutivos

Segundo Fernandes (2006), as técnicas não destrutivas desempenham um papel fundamental, pois podem ser utilizadas em materiais/estruturas acabados ou semiacabados, para investigar/verificar a existência ou não de descontinuidades ou defeitos, através de princípios definidos, sem alterar as suas características físicas, químicas ou mecânicas e sem interferir no seu uso posterior.

Com o intuito de perceber o comportamento estrutural das paredes de tabique, foi desenvolvido um programa de ensaios *in situ*. Assim, optou-se pela realização de ensaios dinâmicos, que irão permitir aferir algumas propriedades importantes deste tipo de construções, tais como o módulo de elasticidade. Ao planejar os trabalhos, surgiu a hipótese de realizar um ensaio baseado na transmissão de ondas. Neste caso o georadar. Apesar de ser um ensaio que não permite perceber o comportamento estrutural das paredes de tabique, o objetivo desta dissertação, julga-se que é uma técnica de ensaio muito interessante uma vez que, para além de ser não destrutiva, permite perceber a disposição da estrutura, a espessura da camada de revestimento e até a dimensão dos elementos construtivos.

De seguida apresentam-se as duas técnicas salientando os princípios do método e indicando os resultados obtidos.

Saliente-se ainda que em ambos os casos é a primeira vez que se utilizam em paredes de tabique.

4.1 Georadar

O georadar é uma técnica de inspeção não destrutiva baseada na emissão de ondas eletromagnéticas, através do solo e de materiais de construção, e na receção das reflexões originadas por objetos e camadas de materiais distintos.

Esta técnica possui uma vasta gama de aplicações e é utilizada tanto a nível da engenharia civil bem como, na aplicação ao nível do ambiente (Souza, 2005), prospeção arqueológica, entre outras. A sua aplicação tem particular importância em estudos de reabilitação, preservação e manutenção de edifícios antigos.

O georadar apresenta a vantagem de poder ser aplicado em situações que impedem a utilização de meios pesados de prospeção direta ou mesmo de outros métodos de prospeção geofísica, como é o caso do interior de edifícios ou construções com determinadas características arquitetónicas (Benta et al., 2008 e David et al., 2008).

Neste subcapítulo, pretende-se dar conta dos resultados da prospeção geofísica por Georadar (GPR) efetuada em diversas paredes de tabique de dois edifícios situados no centro histórico de Viseu.

Na notação em inglês, o georadar é normalmente designado por Ground Penetrating Radar (GPR), embora possam surgir outras designações, tais como Ground Probing Radar, Subsurface Radar ou Electromagnetic Reflection Method.

O georadar é um método eletromagnético de prospeção geofísica, de emissão e receção de impulsos eletromagnéticos a partir de antenas de superfície ou em furos de sondagem que permitem planificar trabalhos de Engenharia. É adequado para a deteção de vazios preenchidos por ar, no mapeamento da estratificação do subsolo e também de materiais com propriedades eletromagnéticas tais como, a condutividade elétrica, permitividade dielétrica e permeabilidade magnética.

4.1.1 Objetivos da aplicação do Georadar

O principal objetivo da aplicação do Georadar, em paredes de tabique dos edifícios em estudo, centra-se na identificação da sua estrutura interna e na determinação da geometria (dimensão) dos diversos elementos construtivos.

Tendo por base a informação recolhida ao longo do capítulo 2, relativa à técnica de construção de tabique, foi possível concluir que, de uma forma geral, este elemento construtivo é constituído por três tipos de materiais, a madeira, a terra e os pregos metálicos.

Este ensaio foi realizado pela empresa Morph Geomática e Geofísica e teve o apoio indireto do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro, nomeadamente do Professor Doutor Humberto Varum. Foi também esta empresa, através do técnico Eng.º Nuno Barraca, que procedeu ao tratamento dos dados obtidos. Segundo o técnico responsável pela realização do ensaio, este era um trabalho de grande desafio, pois as paredes desta tipologia apresentam um grande contraste de materiais de construção que poderiam comprometer a aplicabilidade desta técnica. Sendo, por isso, considerado também um objetivo averiguar se este método era aplicável em meios tão heterogéneos.

4.1.2 Equipamento e Acessórios

Um sistema moderno de georadar é constituído por quatro componentes principais: unidade de controlo, uma ou duas antenas, unidade de visualização e unidade de armazenamento de dados.

Segundo Aguiar (2005), a componente principal do sistema, unidade de controlo, permite controlar, gerar e configurar o sinal. Assim, possibilita orientar a emissão e a receção da energia eletromagnética e armazenar os dados adquiridos na sua memória, enquanto as antenas emitem a radiação eletromagnética, registam as reflexões e transformam-na em informação digital, que é armazenada para posterior processamento.

A unidade de configuração e visualização permite efetuar em campo algumas funções em tempo real, tais como, visualizar e processar dados e definir determinados parâmetros de

ensaio (Cruz et al., 2006). Sendo que a unidade de armazenamento de dados serve para recolher/guardar a informação.

Segundo Fernandes (2006), na aquisição de dados podem ser utilizadas uma ou mais antenas em simultâneo, com uma dada frequência consoante o objetivo da investigação. As antenas são provavelmente o elemento mais importante do sistema Georadar e são caracterizadas pela sua frequência central que se situa num intervalo de frequências de 10 a 2000 MHz.

Segundo Fernandes e Lourenço (2007), a seleção da frequência da antena utilizada depende do tipo de aplicação a que se destina, da espessura da estrutura e do ambiente em que se insere. Deste modo, para dar uma ideia das frequências e das suas possibilidades de utilização, na Tabela 4-1, ilustram-se as características típicas das antenas de Georadar.

Tabela 4-1: Características típicas das antenas de Georadar (Fernandes e Lourenço, 2007)

Frequência (MHz)	Penetração (m)	Resolução	Aplicações correntes
10 a 50	10 a 50	Baixa	Geologia, geotecnia mineira e ambiente
100	5 a 20		
200	2 a 7	Baixa a média	Geotecnia, ambiente e engenharia
500	1 a 4	Média a alta	Engenharia
1000	0.5 a 1.5	Alta	
>1500	0.4 a 0.5	Muito Alta	

Tirando partido da informação fornecida pelo técnico, o equipamento utilizado na realização deste ensaio foi um sistema ProEx da MALA Geoscience com uma antena blindada, com frequência central de 1,6 GHz, montada na MALA HF mini-cart como podemos observar na Figura 4-1.



Figura 4-1: Sistema ProEx da MALA Geoscience de Georadar

Relativamente à visualização e processamento dos dados GPR 2D e 3D, foi usado um software informático MALA 3DVision, versão 1.3.1.

4.1.3 Modo de funcionamento

O princípio físico do método consiste na emissão de ondas eletromagnéticas que são geradas através de um curto impulso de alta frequência que, por sua vez, são repetidamente radiadas para dentro da superfície por uma antena transmissora. A propagação do sinal e a profundidade de alcance das ondas eletromagnéticas (EM) dependem da frequência do sinal emitido e das propriedades elétricas dos materiais.

As ondas, ao propagarem-se pelo meio, sofrerão fenómenos de reflexão, refração e difração nos interfaces elétricos. Uma percentagem da onda refletida é captada pelo equipamento, o qual permite o armazenamento e a visualização dos dados sobre a forma de um perfil. A restante atravessa a interface, continuando a propagar-se pelo meio até encontrar uma nova camada, repetindo-se o processo (Pedrosa, 2009). Ou seja, as ondas EM após serem parcialmente refletidas no interior do meio são enviadas pela antena emissora e recebidas na antena recetora.

A Figura 4-2 mostra o princípio de funcionamento do georadar. À esquerda descreve-se o princípio de propagação das ondas nas camadas, ao centro apresenta-se o aspeto final de um ficheiro de resultados e à direita o aspeto da onda sinusoidal obtida.

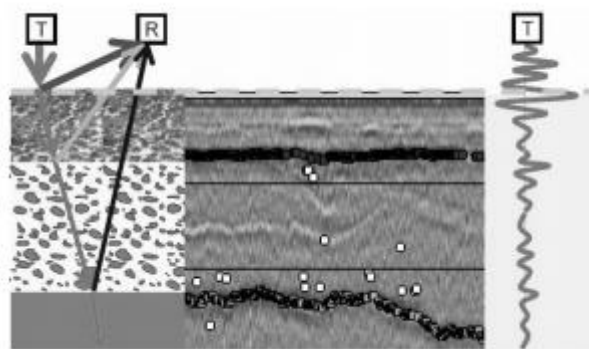


Figura 4-2: Princípio de funcionamento do georadar. T representa a antena emissora e R a antena recetora (Fontul, 2004)

A antena é ligada por um cabo à unidade de controlo onde são conferidos os parâmetros de aquisição e armazenamento dos dados. Posteriormente, os dados obtidos são armazenados na unidade central. Todo este procedimento é executado ao longo de perfis/linhas de aquisição de dados, e cujos sinais são transferidos para um computador, para poderem ser digitalizados e registados sob a forma de radargramas.

4.1.3.1 Método utilizado

Neste ensaio foram estudadas um conjunto de cinco paredes dos dois edifícios em análise. Em cada parede foi levantado um polígono de aquisição que apresentava dimensões globais de 58 cm de altura por 82 cm de largura, como podemos visualizar na Figura 4-3.

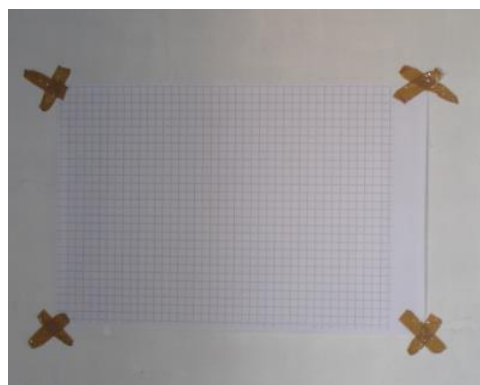


Figura 4-3: Polígono de aquisição de dados

Os polígonos de aquisição são adquiridos usando o sistema ProEx da MALA Geoscience. Esta aquisição é feita usando passagens paralelas espaçadas entre si de 2 cm, cruzadas

ortogonalmente, com aquisições em idêntico espaçamento, formando uma grelha desenhada na folha (Figura 4-4).



Figura 4-4: Passagens paralelas com 2 cm de espaçamento entre si

Segundo a informação fornecida pelo técnico Nuno Barraca sabe-se que a janela usada foi de 10 ns e o intervalo entre as medições em cada linha foi de 4 mm.

4.1.3.2 Metodologia de processamento de dados

A metodologia usada no processamento de dados neste ensaio de prospeção Geofísica foi realizada através do programa informático MALÅ 3DVision, com o intuito de melhorar os dados obtidos. Assim, segundo o técnico, o processamento escolhido foi:

- Filtro de passa-banda;
- Ajuste do tempo zero;
- Remoção do ruído de background;
- Função de ganho;
- Migração em 3D dos dados.

Após este procedimento, os dados são visualizados e analisados na forma de perfis verticais, radargramas, e através da interpretação de “fatias em planta” interpoladas entre todos os radargramas (Time Slices).

Neste caso, a interpretação dos dados incidiu apenas na interpretação dos Times Slices, pois o objetivo era apenas verificar/identificar as características geométricas do tabique nas paredes em estudo.

De seguida são apresentados os resultados obtidos no Georadar. Tendo por base a informação fornecida pelo técnico responsável por este ensaio, foi feita uma análise e interpretação dos respetivos dados.

4.1.4 Análise e interpretação dos resultados

A análise e a interpretação dos dados serão feitas para cada um dos polígonos utilizados. Para cada parede em estudo apresenta-se o Time Slice obtido de cada polígono e as conclusões a que se chegou.

A localização de cada polígono de aquisição foi identificada nas plantas de arquitetura apresentadas neste capítulo.

É importante referir que, para a interpretação das figuras que se seguem, a cor vermelha refere-se à estrutura de madeira (fasquio e/ou tábuas) e a cor azul representa o material de enchimento.

4.1.4.1 Polígono 1

O polígono 1 localiza-se no 3º piso do Ed.1, mais concretamente numa parede interior como podemos observar na Figura 4-5.

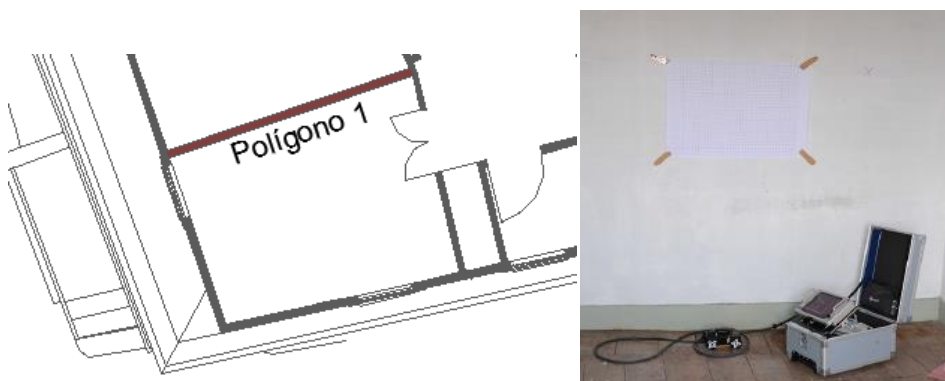


Figura 4-5: Localização do polígono 1

Neste polígono foram obtidos dois Times Slices, um correspondente a uma profundidade de 5 cm e outro a uma profundidade de 7 cm. Estes podem ser observados nas figuras que se seguem.

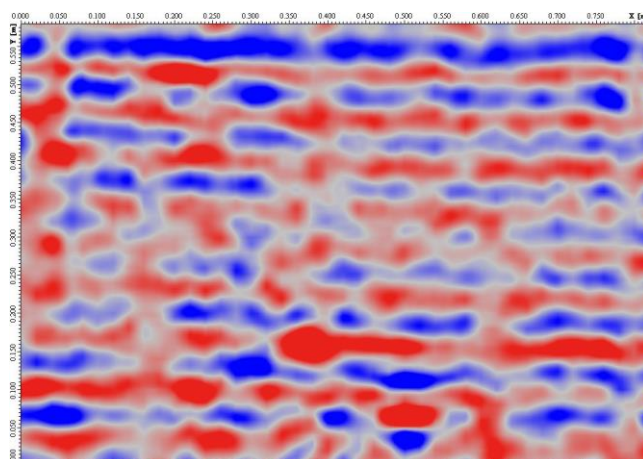


Figura 4-6: Times Slices correspondente a 5 cm de profundidade do polígono 1

Como se pode observar, é possível identificar a presença de bandas horizontais, em tons vermelhos. Estas bandas correspondem à presença de tabique, do fasquio que constitui a parede de tabique.

Através da visualização é possível constatar que é um fasquiado bastante regular e paralelo ao solo. A partir desta imagem verifica-se que este fasquio está espaçado entre si, em média, de 6 cm.

De uma forma menos clara, pode também observar-se a presença de tábuas verticais, que se ligam ao fasquio e que têm um espaçamento médio de 16 cm.

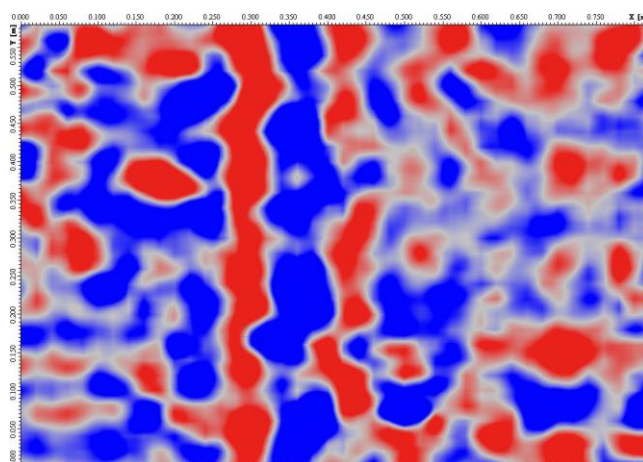


Figura 4-7: Time Slice correspondente a 7 cm de profundidade

A Figura 4-7 corresponde ao Time Slice, do polígono 1, a 7 cm de profundidade. Através de uma análise visual é possível identificar um alinhamento vertical bastante saliente.

4.1.4.2 Polígono 2

Tal como o polígono 1, o polígono 2 localiza-se no 3º piso do Ed.1, neste caso numa parede exterior, como podemos observar na Figura 4-8.

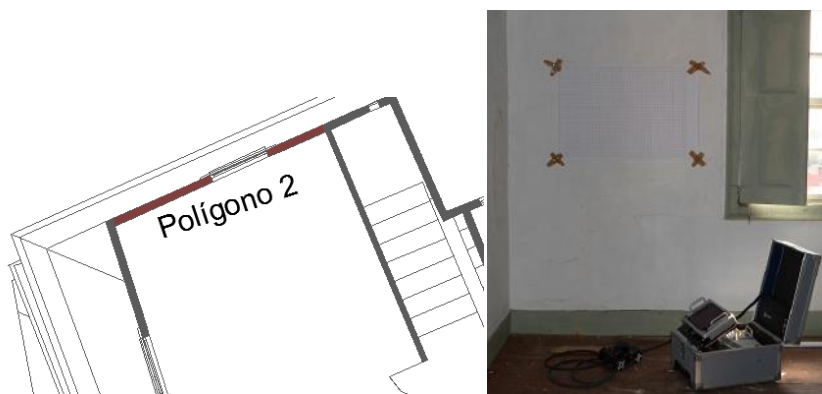


Figura 4-8: Localização do polígono 2

Para este polígono apresenta-se apenas um Time Slice, correspondente à profundidade de 5 cm. Este pode ser observado na Figura 4-9 que se segue.

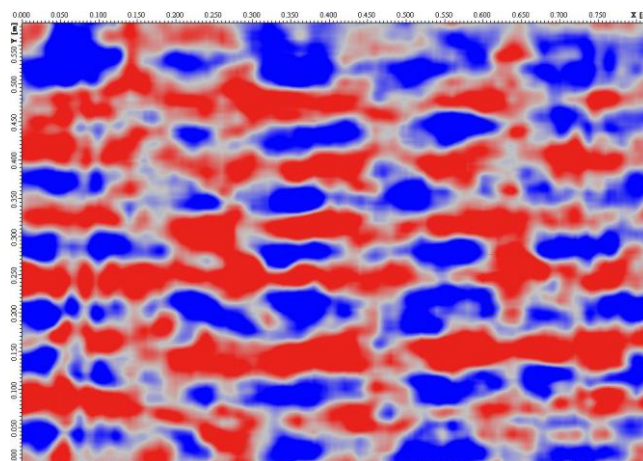


Figura 4-9: Time Slice correspondente a 5cm de profundidade

Podem-se identificar as bandas paralelas à base, que devem corresponder ao fasquio de uma parede de tabique. Estas bandas apresentam bastante regularidade e apresentam um espaçamento médio de 7,25 cm.

Para além das bandas paralelas à base, é também possível observar bandas verticais, que podem ser relativas às tábuas, elemento constituinte das paredes de tabique. Estas estão espaçadas de distâncias que variam entre 10 cm a 20 cm.

4.1.4.3 Polígono 3

A localização do polígono 3 é no rés-do-chão do Ed.1, em uma parede interior, como podemos observar na Figura 4-10.

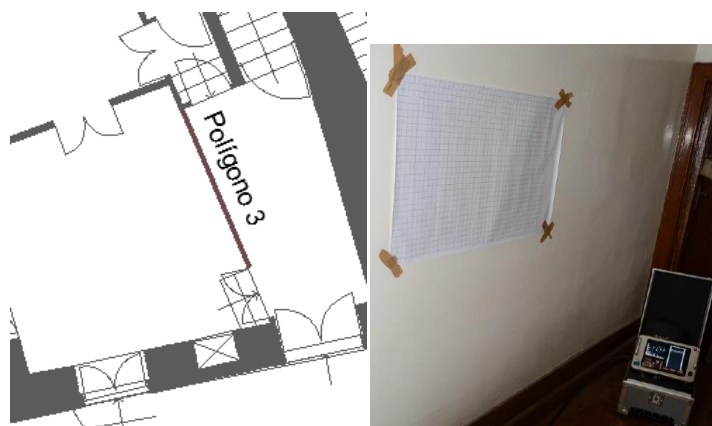


Figura 4-10: Localização do polígono 3

Tal como no polígono 1, neste polígono foram obtidos também dois Times Slices, um correspondente a uma profundidade de 4 cm e o outro a uma profundidade de 5 cm. Estes podem ser observados nas figuras que se seguem.

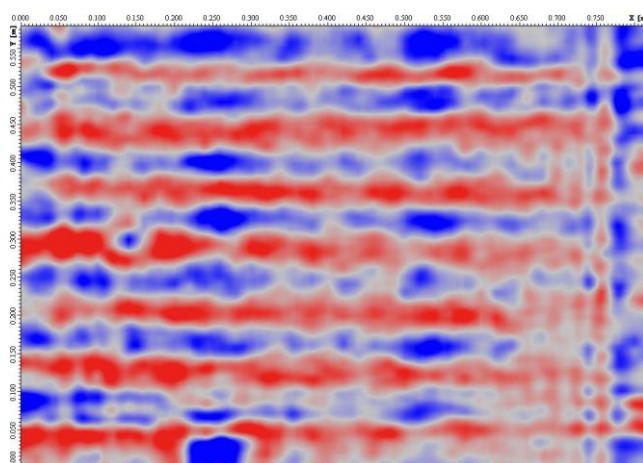


Figura 4-11: Time Slice correspondente a 4 cm de profundidade

Como se pode observar, é possível identificar a presença de bandas horizontais, em tons vermelhos. Estas bandas correspondem à presença de elementos de fasquio que constitui a parede de tabique. Este fasquio está espaçado entre si, em média, de 6,4 cm.

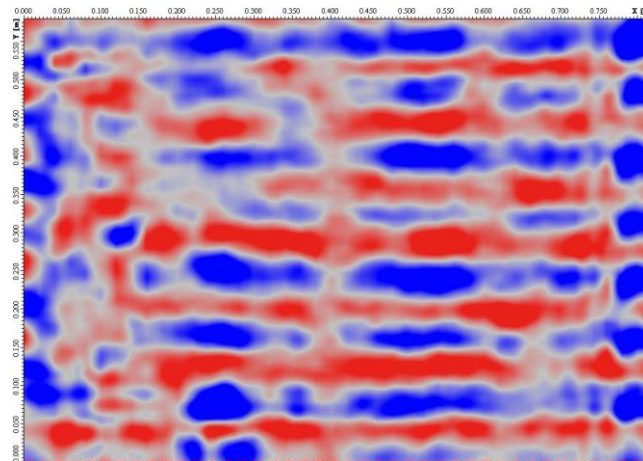


Figura 4-12: Time Slice correspondente a 5 cm de profundidade

Neste Time Slice, com apenas mais 1 cm de profundidade torna-se bastante mais perceptível a presença das bandas verticais correspondentes às tábuas da parede de tabique, não deixando de ser visível a presença de fasquio. As tábuas verticais apresentam um espaçamento mais heterogéneo de 30 cm, 20 cm e 15 cm.

4.1.4.4 Polígono 4

O polígono 4 já se localiza no Ed.2, numa parede interior do último piso. A sua localização pode ser observada na Figura 4-13.

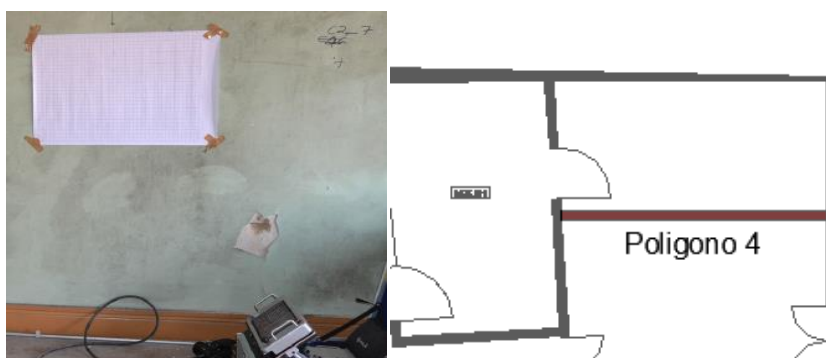


Figura 4-13: Localização do polígono 4

Relativamente a este polígono foram obtidos também dois Times Slices, um correspondente a uma profundidade de 5 cm e o outro a uma profundidade de 6 cm. Estes podem ser observados nas figuras que se seguem.

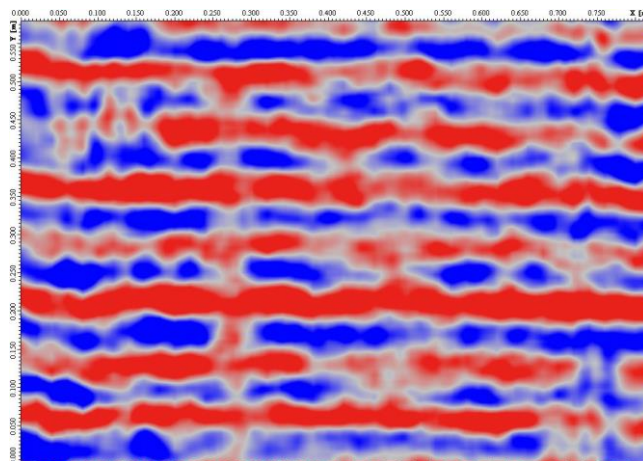


Figura 4-14: Time Slice correspondente a 5 cm de profundidade

Neste Time Slice, correspondente a 5 cm de profundidade, é bastante visível a presença de bandas horizontais bastante regulares, que correspondem ao fasquio de uma parede de tabique. Estes elementos encontram-se espaçados entre si de 6,4 cm.

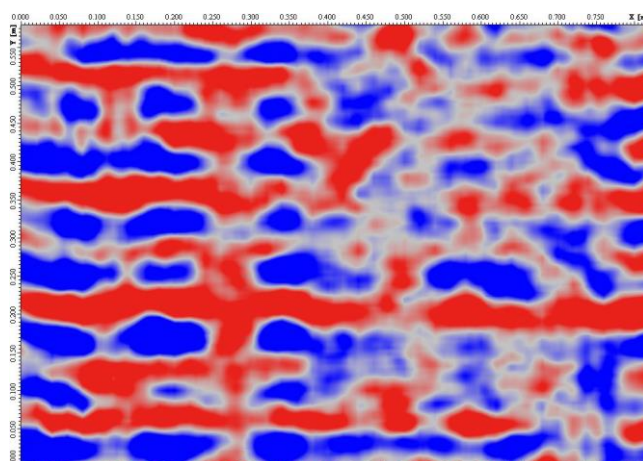


Figura 4-15: Time Slice correspondente a 6 cm de profundidade

Relativamente ao Time Slice correspondente a 6cm de profundidade é possível visualizar, à esquerda da imagem, bandas verticais, no entanto estas, ao contrário do que acontece nos outros polígonos, não apresentam muita regularidade. À direita não se observam alinhamentos verticais regulares, aparentando ser uma área constituída por um material heterogéneo.

4.1.4.5 Polígono 5

Por último o polígono 5 está localizado no Ed.2 numa parede interior, no primeiro piso. A sua localização pode ser visualizada através da Figura 4-16.

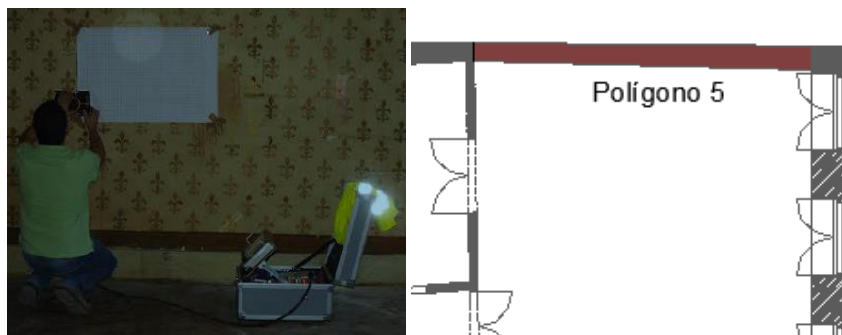


Figura 4-16: Localização do polígono 5

Neste polígono foram obtidos também dois Times Slices, ambos correspondentes a uma profundidade de 6 cm que podem ser observados nas figuras que se seguem.

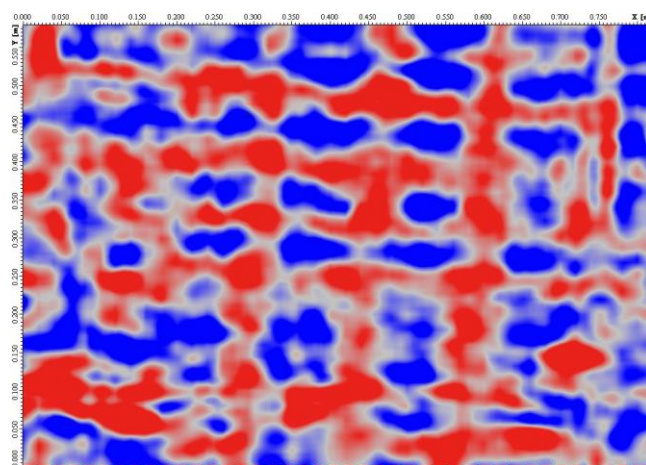


Figura 4-17: Time Slice correspondente a 6cm de profundidade

Tal como acontece nos outros polígonos, neste também é possível observar bandas horizontais que correspondem ao fasquio da parede de tabique. Ao contrário do que acontece nos outros polígonos este fasquio é bastante irregular, pelo que se tornou mais difícil calcular o seu espaçamento. Este espaçamento varia entre os 7 cm e 10 cm.

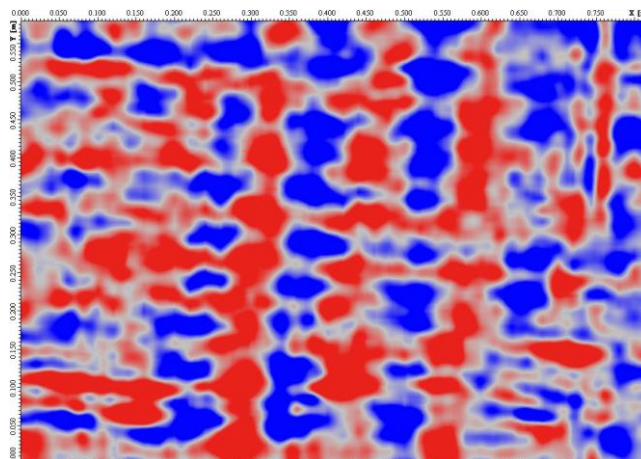


Figura 4-18: Time Slice correspondente a 6cm de profundidade

Um pouco mais abaixo, mas na mesma aos 6 cm de profundidade, é perfeitamente visível que as bandas verticais correspondentes às tábuas da parede de tabique, não são perpendiculares ao fasquio, pois, apresentam uma ligeira inclinação.

Neste Time Slice também se pode ver que, ao contrário do que acontece nos outros polígonos, apenas aparentam existir duas a três tábuas no centro do polígono, sendo estranho não se encontrarem mais ao longo do polígono.

4.1.5 Conclusões

A realização deste ensaio em paredes de tabique consistia em avaliar se o Georadar era aplicável em estruturas heterogéneas, como o tabique e que tipo de informação era possível obter. Para além desta condicionante, o facto de neste tipo de estrutura existirem vazios no seu interior, tornou a aplicação da técnica um grande desafio.

Constatou-se que, efetivamente, é uma técnica totalmente não destrutiva, que pode ser utilizada neste tipo de estruturas com eficácia. Conclui-se que é bastante eficiente na identificação da estrutura de uma parede de tabique, pois como foi possível verificar, conseguiu-se reconhecer, através dos distintos Times Slices obtidos em cada polígono, a existência de diferentes elementos constituintes deste tipo de paredes (fasquio e tábuas), isto é, as diferentes camadas. Outro aspeto a reter é que se pode verificar a ortogonalidade entre os diversos elementos de madeira, as tábuas e o fasquio.

Esta técnica também permite determinar as espessuras das paredes. Neste ensaio, tal não foi possível, uma vez que a amostragem foi de pequena dimensão. Tal facto fez com que não fosse possível chegar ao cálculo da velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas no meio.

Foi ainda possível determinar a dimensão dos elementos estruturais, com um grau de precisão interessante e o espaçamento entre os diversos elementos.

Finalmente pode-se referir que este método, em função dos elementos que podemos recolher e que atrás foram referidos, pode ser utilizado como ponto de partida de outros ensaios, como o ensaio dinâmico, uma vez que podemos relacionar os dados obtidos com, por exemplo, as frequências obtidas no segundo método, permitindo um melhor entendimento do comportamento dinâmico destas estruturas.

4.2 Ensaio dinâmico

A identificação dinâmica de estruturas é uma das técnicas mais utilizadas na caracterização mecânica *in situ* de estruturas. O ensaio dinâmico em estruturas pressupõe o conhecimento da excitação e da resposta dinâmica de uma estrutura.

Esta identificação dinâmica, realizada de forma totalmente não destrutiva, quando aliada a um modelo de simulação numérica permite estimar as características/propriedades mecânicas de uma estrutura, como por exemplo o módulo de elasticidade. Em processos de intervenção em património edificado, torna-se importante o conhecimento das suas características mecânicas e materiais, pois neste tipo de operações é fundamental a avaliação do seu desempenho face às condições de funcionamento atuais e futuras. Deste modo, existem diversos mecanismos de avaliação destas características, quer *in situ*, quer em laboratório, que permitem obter informação útil passível de ser utilizada com algum grau de confiança.

Este subcapítulo centra-se nos ensaios de identificação dinâmica de estruturas, com vista à caracterização material/mecânica global de estruturas (paredes de tabique), realçando as vantagens associadas ao seu uso, bem como a forma como estes ensaios e os resultados obtidos podem ajudar no conhecimento das estruturas existentes.

Assim, de forma a salientar as principais particularidades destes ensaios, são apresentados alguns casos de identificação dinâmica de estruturas de tabique, localizados no centro histórico de Viseu e atrás descritos. Este ensaio foi realizado pelo Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro, nomeadamente pelo Professor Doutor Hugo Rodrigues, e apoiado pelo Professor Doutor Humberto Varum.

Em ambos os edifícios foi realizado um ensaio dinâmico em diversas paredes com o intuito de se poder relacionar os resultados obtidos com diversos parâmetros que condicionam a frequência obtida. Esta frequência depende da massa, da geometria (altura, comprimento e espessura), das propriedades dos materiais, do nível do esforço axial e do tipo de ligação, entre outros. Estes parâmetros são comparados e tidos em conta na análise dos resultados, de forma a perceber qual a sua influência nos resultados obtidos.

De um modo geral pode dizer-se que a frequência própria das estruturas varia consoante a forma e dimensão da estrutura, ou seja, estruturas altas ou flexíveis, por norma, apresentam frequências mais baixas, enquanto estruturas baixas ou rígidas apresentam frequências mais elevadas (Figura 4-19).

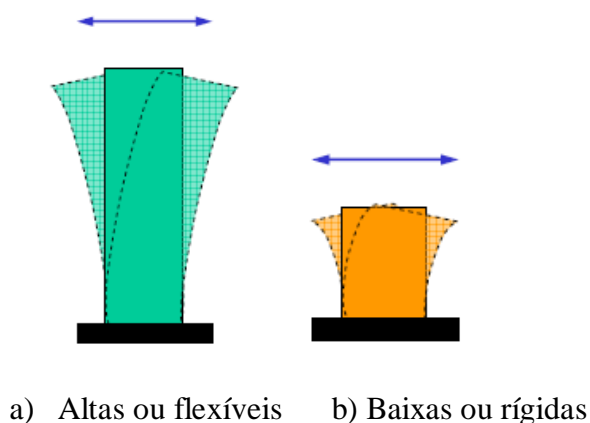


Figura 4-19: Frequência em estruturas geometricamente diferentes

4.2.1 Procedimento do ensaio

De forma sucinta descreve-se aqui o ensaio realizado. Em geral foram aplicados três acelerómetros, dispostos à mesma cota altimétrica, em cada parede ensaiada, sendo que em alguns casos apenas foi possível a colocação de um acelerómetro (devido sobretudo, à sua dimensão). Os acelerómetros foram aparafusados, individualmente, à parede, ligados a cabos

e, posteriormente, ao computador. As frequências registadas tiveram duas origens: a vibração natural (vibração livre) e a vibração forçada, esta medida através da aplicação de um impacto (neste caso uma pancada com a mão), na própria estrutura.

Na Figura 4-20 pode visualizar-se o equipamento utilizado pelos técnicos para a realização de todos os ensaios, tanto no Ed.1 como no Ed.2.



Figura 4-20: Equipamento utilizado na realização do ensaio



Figura 4-21: Exemplo de saída de resultados

Como já foi referido, o ensaio dinâmico realizado consistiu essencialmente na determinação da frequência própria de cada parede.

A vibração livre consiste em calcular a frequência sem nenhuma ação sobre a parede e a vibração forçada consiste em determinar a frequência dando uma pequena pancada (ou equivalente) sobre a parede, provocando a sua vibração.

A apresentação do ensaio realizado nas diversas paredes de cada edifício em estudo é feita no ponto 4.2.4 deste capítulo, bem como os dados obtidos. Posteriormente é feita a análise e discussão desses mesmos dados.

4.2.2 Paredes de tabique em estudo

Com vista a estudar e caracterizar as paredes de tabique, foram recolhidas ao longo do desenvolvimento do trabalho de campo um conjunto de medições importantes para a realização deste trabalho. Estas medições são apresentadas nos subcapítulos que se seguem.

Na Figura 4-22 apresenta-se um esquema exemplificativo da estrutura típica de uma parede de tabique, onde se procura representar as dimensões consideradas mais representativas. Para as tábuas verticais são atribuídas as seguintes designações: a largura (A), a espessura (B) e o espaçamento horizontal entre si (C). Por sua vez, as ripas de madeira estão assinaladas com: a largura (D), a espessura (E) e o espaçamento vertical entre si (F).

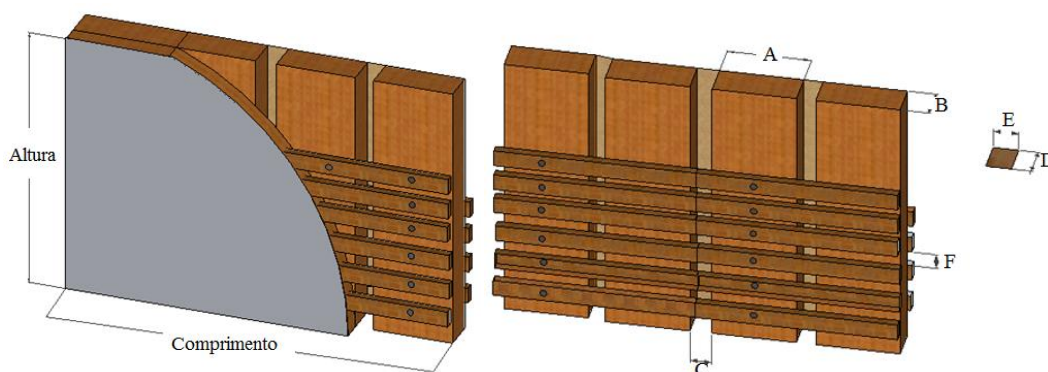


Figura 4-22: Exemplo de estrutura de madeira de uma parede de tabique com as dimensões consideradas representativas

4.2.2.1 Dimensões globais das paredes em estudo

Durante a realização do trabalho de campo houve o cuidado de se proceder ao registo das várias dimensões das diversas paredes, de modo a perceber-se de que forma este parâmetro pode influenciar a frequência obtida nos ensaios.

As dimensões (comprimento e altura) de todas as paredes foram apresentadas no capítulo 3. No entanto, na Tabela 4-2 identificam-se as paredes de tabique, a sua localização (interior ou exterior) e o intervalo de valores encontrado para o seu comprimento, altura e espessura.

Tabela 4-2: Dimensões globais das paredes de tabique presentes nos casos de estudo

Id.	Tipo	Comprimento (m)	Altura (m)	Espessura (m)
Ed.1	Interior	2,9 - 5,0	2,4 - 2,9	0,11 - 0,14
	Exterior	2,5 - 5,0	2,4 - 2,9	0,09 - 0,13
Ed.2	Interior	3,5 - 4,25	2,75 - 2,92	0,12 - 0,13
	Exterior	5,0	2,92	-

Através de uma análise ao conjunto de dados registados, é possível conferir que as paredes possuíam um intervalo de valores considerados normais para o tipo de edifícios em análise, isto é: comprimento com dimensões compreendidas entre 2,9 m e 5,0 m, altura entre 2,4 m e 3,0 m e espessura entre 0,09 m e 0,14 m. Isto é confirmado em trabalhos anteriores realizados por Cardoso (1996) e Pinto (2013).

Segundo Cardoso (2013), a construção de panos de parede em madeira é vantajosa na medida em que permite atingir comprimentos muito maiores do que na construção tradicional em alvenaria de tijolo cerâmico.

4.2.3 Estudo analítico

Após a consulta bibliográfica realizada, pode-se afirmar que esta foi a primeira vez que se realizou este ensaio em paredes de tabique. Como forma de se poder interpretar eficazmente os resultados obtidos no ensaio, foi realizado um breve estudo analítico, com o objetivo principal de calcular a primeira frequência natural de paredes de tabique.

De acordo com as recomendações técnicas de Projeto Hivoss (2007), o comportamento dinâmico de uma estrutura pode ser descrito através de um conjunto de modos de vibração que traduzem uma determinada configuração deformada da estrutura e é caracterizado pela duração de tempo $T(s)$, o período de oscilação. A frequência natural representa o inverso do período e representa a oscilação livre de um sistema que não é continuamente atuado por uma fonte de excitação. A primeira frequência natural está associada ao mais baixo nível de energia ativada durante a oscilação.

Tendo por base o estudo realizado por Clough e Penzien (1993), relativamente à análise de sistemas de vibração livre sem amortecimento, foi calculada a vibração livre de paredes de tabique.

O modelo adotado consiste em utilizar a formulação para vigas, adaptando-as às características das paredes de tabique que são conhecidas. Na ausência de outro modelo mais aproximado, foi aquele que se julga possuir/traduzir um comportamento similar.

A dedução das expressões utilizadas para o cálculo das referidas frequências tem por base a seguinte expressão:

$$EI \frac{\partial^4 v(x, t)}{\partial x^4} + \bar{m} \frac{\partial^2 v(x, t)}{\partial t^2} = 0 \quad (4-1)$$

Em que,

E, é o módulo de Young (N/m²)

I, é o momento de inércia da secção transversal (m⁴)

\bar{m} , é a massa distribuída (kg/m)

v, é a função deslocamento

L, é o comprimento (altura) da parede (m)

ω , é a frequência angular (rad)

Tomando EI e \bar{m} constantes e sabendo que ω é a frequência angular obtêm-se as expressões para diversos tipo de ligações externas, como por exemplo as apresentadas por Clough e Penzien (1993):

- para vigas simplesmente apoiadas vem:

$$\omega_1 = \pi^2 \sqrt{\frac{EI}{\bar{m}L^4}} \quad (4-2)$$

- para consolas,

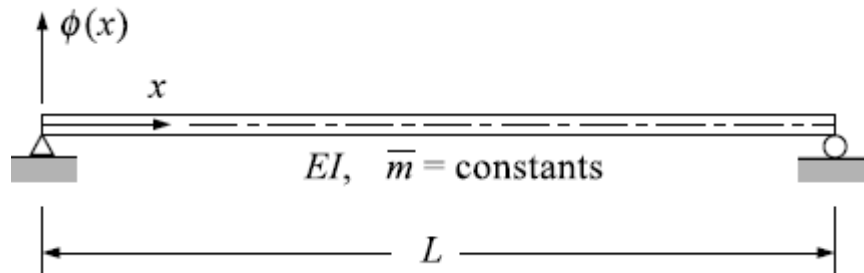
$$\omega_1 = (1,875)^2 \sqrt{\frac{EI}{\bar{m}L^4}} \quad (4-3)$$

Sabendo que:

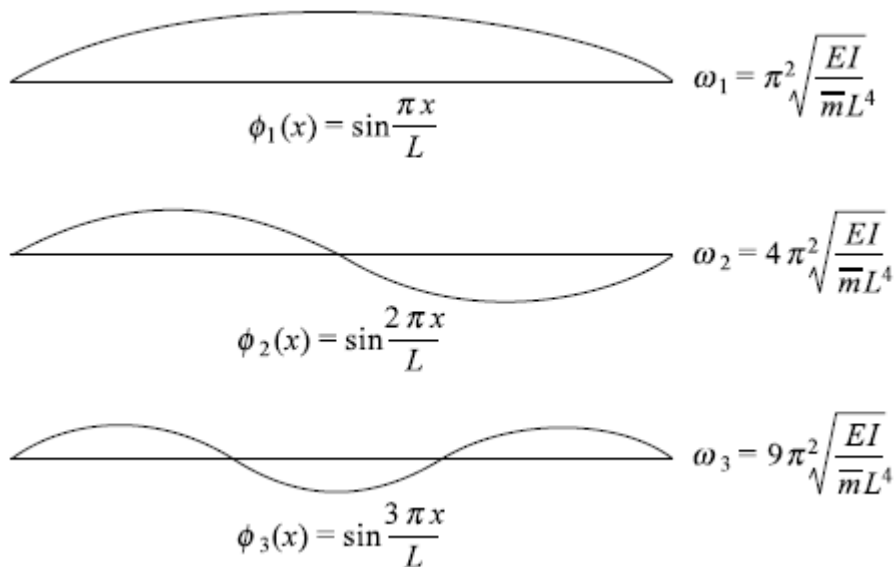
$$\omega = 2\pi f \quad (4-4)$$

calculam-se as respectivas frequências naturais.

As figuras seguintes ilustram o comportamento de vigas simplesmente apoiadas e em consola, em relação aos três primeiros modos de vibração.



a) Propriedades básicas de viga simplesmente apoiada



b) Três primeiros modos de vibração

Figura 4-23: Análise de vibração de viga simplesmente apoiada (Clough e Penzien, 1993)

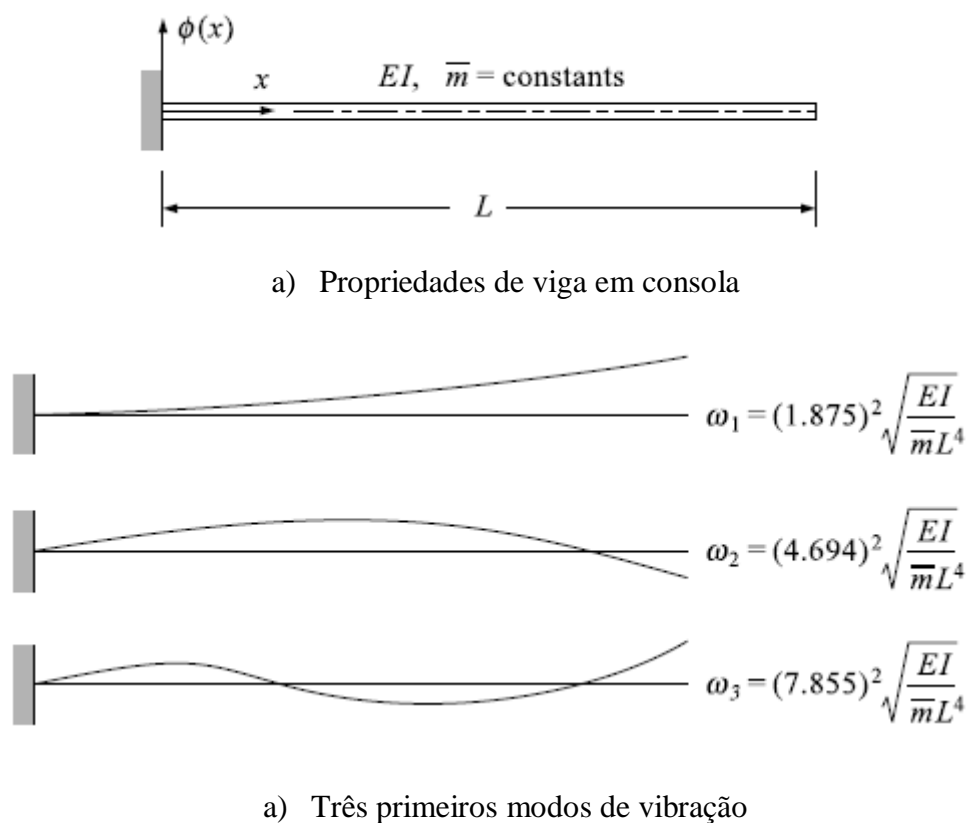
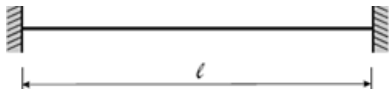
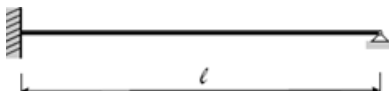
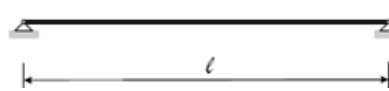
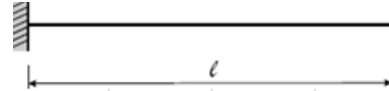


Figura 4-24: Análise de vibração de vigas em consola (Clough e Penzien, 1993)

O documento de Hivoss (2007) apresenta as expressões para as diversas ligações externas de uma viga. Estas expressões apresentam-se na tabela que se segue.

Tabela 4-3: Determinação da primeira frequência natural de uma viga

Condições de apoio	Frequência natural	Massa modal
	$f = \frac{4}{\pi} \sqrt{\frac{3EI}{0,37\mu l^4}}$	$M_{mod} = 0,41 \mu l$
	$f = \frac{2}{\pi} \sqrt{\frac{3EI}{0,2\mu l^4}}$	$M_{mod} = 0,45 \mu l$
	$f = \frac{2}{\pi} \sqrt{\frac{3EI}{0,49\mu l^4}}$	$M_{mod} = 0,5 \mu l$
	$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{3EI}{0,24\mu l^4}}$	$M_{mod} = 0,64 \mu l$

Neste trabalho, a obtenção das referidas frequências pressupõe a adoção de determinados valores que melhor se ajustem ao caso concreto em análise.

O valor utilizado para o módulo de Young foi de 6 GPa. É o valor do módulo de elasticidade para madeiras de pinho e foi obtido por Pinto (2013) aquando seu estudo de caracterização dos materiais de paredes de tabique do centro urbano de Viseu.

O peso próprio das paredes de tabique foi obtido através de um breve estudo realizado (apresentado em anexo), tendo por base uma série de dimensões de paredes de tabique, características do tipo de construção existente na cidade (Pinto, 2013) e confirmadas em algumas inspeções realizadas aos casos de estudo aqui apresentados. Refira-se que para o peso específico da madeira de pinho se tomou 6 kN/m^3 e para o peso específico da argamassa de terra 16 kN/m^3 , tendo como referência os valores apresentados em Tabelas Técnicas (2012).

Em relação às inércias foram estudados 3 casos tipo: o primeiro considerando uma tábua resistente com uma largura de 1 metro e uma espessura de 0,05 m (que serviu sobretudo como referência), o segundo considerando o valor médio, por metro linear, de um conjunto de tábuas considerado característico do tipo de construção (o mesmo utilizado no peso próprio) e por fim, no terceiro caso, considerando a espessura total da parede, por faixa de um metro. Neste último caso a espessura é a média, por piso (s), das espessuras medidas *in situ*.

O comprimento da parede utilizado é o medido *in situ* e confirmado no projeto de arquitetura.

Aproveitando o valor das frequências medidas no ensaio dinâmico foram determinados, para os diversos exemplos, os respetivos módulos de elasticidade.

A análise de todos os resultados obtidos será realizada num item próprio.

De seguida apresentam-se os valores obtidos para os dois edifícios que serviram de caso de estudo. Para isso, na Tabela 4-4 apresenta-se os dados/valores necessários para o cálculo analítico da frequência natural.

Tabela 4-4: Dados/valores necessários para o cálculo da frequência natural

E	Módulo de Young [N/m ²]
I	Momento de inércia da seção transversal [m ⁴]
μ ou m	Massa distribuída [kg/m]
l	Comprimento da viga [m]
f	Frequência natural [Hz]
Inércia:	
Caso 1: Apenas entra tábua de madeira vertical (b=1m; e=0,05m)	
Caso 2: Média de valores obtidos com tábuas individuais (ver tabela)	
Caso 3: Entra a seção total (b=1m e e=espessura da parede)	
E =	6,0E+09 N/m ²
μ =	152,905 kg/m

- **Edifício da Travessa das Escadinhas**

Tabela 4-5: Determinação analítica da frequência para o Piso 0, Ed.1

Localização da parede:			Piso 0		
Características geométricas:			Inércias (m ⁴)		
Altura (m)	Espessura (m)		Caso 1	Caso 2	Caso 3
3,20	0,14		1,04E-05	5,89E-06	2,29E-04
Determinação analítica da primeira frequência natural, f1 (Hz):					
a) Segundo recomendações técnicas do HIVOSS				b) Segundo Clough e Penzien	
Simplemente apoiada	Duplamente encastrada	Situação intermédia	Consola	Simplemente apoiada	Consola
CASO 1:					
3,11	7,16	4,87	n.a.	3,10	n.a.
CASO 2:					
2,34	5,38	3,66	n.a.	2,33	n.a.
CASO 3:					
14,57	33,54	22,81	n.a.	14,53	n.a.
Determinação do Módulo de Young, E (GPa):					
Segundo Clough e Penzien:					
	Simplemente apoiada	Consola			
CASO 1:	76,86	n.a.			
CASO 2:	135,86	n.a.			
CASO 3:	3,50	n.a.			

Tabela 4-6: Determinação analítica da frequência para o Piso 1 e 2, Ed.1

Localização da parede:		Piso 1 e Piso 2			
Características geométricas:			Inércias (m ⁴)		
Altura (m)	Espessura (m)		Caso 1	Caso 2	Caso 3
2,90	0,13		1,04E-05	5,89E-06	1,66E-04
Determinação analítica da primeira frequência natural, f1 (Hz):					
a) Segundo recomendações técnicas do HIVOSS				b) Segundo Clough e Penzien	
Simplemente apoiada	Duplamente encastrada	Situação intermédia	Consola	Simplemente apoiada	Consola
CASO 1:					
3,79	8,72	5,93	n.a.	3,78	n.a.
CASO 2:					
2,85	6,56	4,46	n.a.	2,84	n.a.
CASO 3:					
15,10	34,75	23,63	n.a.	15,05	n.a.
Determinação do Módulo de Young, E (GPa):					
Segundo Clough e Penzien:					
	Simplemente apoiada	Consola			
CASO 1:	65,75	n.a.			
CASO 2:	116,21	n.a.			
CASO 3:	4,14	n.a.			

Tabela 4-7: Determinação analítica da frequência para o Piso 3, Ed.1

Localização da parede:		Piso 3			
Características geométricas:			Inércias (m ⁴)		
Altura (m)	Espessura (m)		Caso 1	Caso 2	Caso 3
2,40	0,12		1,04E-05	5,89E-06	1,27E-04
Determinação analítica da primeira frequência natural, f1 (Hz):					
a) Segundo recomendações técnicas do HIVOSS				b) Segundo Clough e Penzien	
Simplemente apoiada	Duplamente encastrada	Situação intermédia	Consola	Simplemente apoiada	Consola
CASO 1:					
5,53	12,73	8,65	1,98	5,51	1,96
CASO 2:					
4,16	9,57	6,51	1,49	4,15	1,48
CASO 3:					
19,29	44,39	30,19	6,89	19,23	6,85
Determinação do Módulo de Young, E (GPa):					
Segundo Clough e Penzien:					
	Simplemente apoiada	Consola			
CASO 1:	4,36	34,36			
CASO 2:	7,71	60,74			
CASO 3:	0,36	2,82			

- **Edifício da Rua Direita (Ed.2)**

Tabela 4-8: Determinação analítica da frequência para o Piso 1, Ed.2

Localização da parede:			Piso 1		
Características geométricas:			Inércias (m ⁴)		
Altura (m)	Espessura (m)		Caso 1	Caso 2	Caso 3
2,95	0,14		1,04E-05	5,89E-06	2,29E-04
Determinação analítica da primeira frequência natural, f1 (Hz):					
a) Segundo recomendações técnicas do HIVOSS				b) Segundo Clough e Penzien	
Simplesmente apoiada	Duplamente encastrada	Situação intermédia	Consola	Simplesmente apoiada	Consola
CASO 1:					
3,66	8,42	5,73	n.a.	3,65	n.a.
CASO 2:					
2,75	6,34	4,31	n.a.	2,74	n.a.
CASO 3:					
17,15	39,46	26,84	n.a.	17,10	n.a.
Determinação do Módulo de Young, E (GPa):					
Segundo Clough e Penzien:					
	Simplesmente apoiada	Consola			
CASO 1:	111,53	n.a.			
CASO 2:	197,14	n.a.			
CASO 3:	5,08	n.a.			

Tabela 4-9: Determinação analítica da frequência para o Piso 2, Ed.2

Localização da parede:			Piso 2		
Características geométricas:			Inércias (m ⁴)		
Altura (m)	Espessura (m)		Caso 1	Caso 2	Caso 3
2,70	0,12		1,04E-05	5,89E-06	1,44E-04
Determinação analítica da primeira frequência natural, f1 (Hz):					
a) Segundo recomendações técnicas do HIVOSS				b) Segundo Clough e Penzien	
Simplesmente apoiada	Duplamente encastrada	Situação intermédia	Consola	Simplesmente apoiada	Consola
CASO 1:					
4,37	10,05	6,84	n.a.	4,36	n.a.
CASO 2:					
3,29	7,56	5,14	n.a.	3,28	n.a.
CASO 3:					
16,24	37,38	25,42	n.a.	16,20	n.a.
Determinação do Módulo de Young, E (GPa):					
Segundo Clough e Penzien:					
	Simplesmente apoiada	Consola			
CASO 1:	55,93	n.a.			
CASO 2:	98,86	n.a.			
CASO 3:	4,05	n.a.			

Tabela 4-10: Determinação analítica da frequência para o Piso 3, Ed.2

Localização da parede:			Piso 3		
Características geométricas:			Inércias (m ⁴)		
Altura (m)	Espessura (m)		Caso 1	Caso 2	Caso 3
3,00	0,12		1,04E-05	5,89E-06	1,44E-04
Determinação analítica da primeira frequência natural, f1 (Hz):					
a) Segundo recomendações técnicas do HIVOSS				b) Segundo Clough e Penzien	
Simplesmente apoiada	Duplamente encastrada	Situação intermédia	Consola	Simplesmente apoiada	Consola
CASO 1:					
3,54	8,14	5,54	1,26	3,53	1,26
CASO 2:					
2,66	6,13	4,17	0,95	2,65	0,95
CASO 3:					
13,16	30,28	20,59	4,70	13,12	4,67
Determinação do Módulo de Young, E (GPa):					
Segundo Clough e Penzien:					
	Simplesmente apoiada	Consola			
CASO 1:	19,94	157,18			
CASO 2:	35,25	277,84			
CASO 3:	1,44	11,37			

4.2.4 Apresentação dos resultados obtidos

Como atrás foi já descrito, foram realizados ensaios em dois edifícios situados no centro histórico da cidade de Viseu.

Os procedimentos de ensaio foram idênticos nos dois edifícios. Procurou-se analisar o comportamento de paredes de tabique de vários pisos, em paredes interiores e exteriores, em zonas centrais ou próximo de aberturas ou cantos nos vários esquemas realizados.

4.2.4.1 Descrição e apresentação de resultados do ensaio realizado no Ed.1

Os ensaios foram realizados em diversas paredes do edifício. Por isso, de forma a facilitar a sua localização, nas figuras seguintes estão identificados todos os esquemas de ensaio efetuados nas paredes, com indicação dos vários pontos de ensaio, com a mesma numeração que consta nas tabelas de apresentação de resultados.

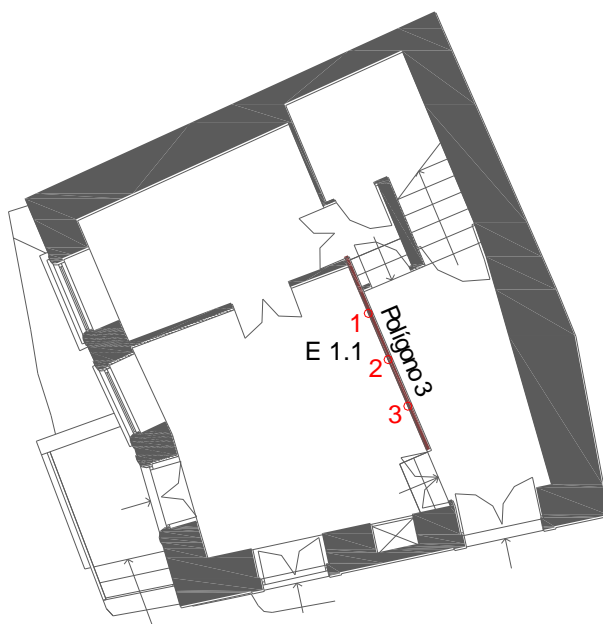


Figura 4-25: Localização da parede em estudo – Piso 0

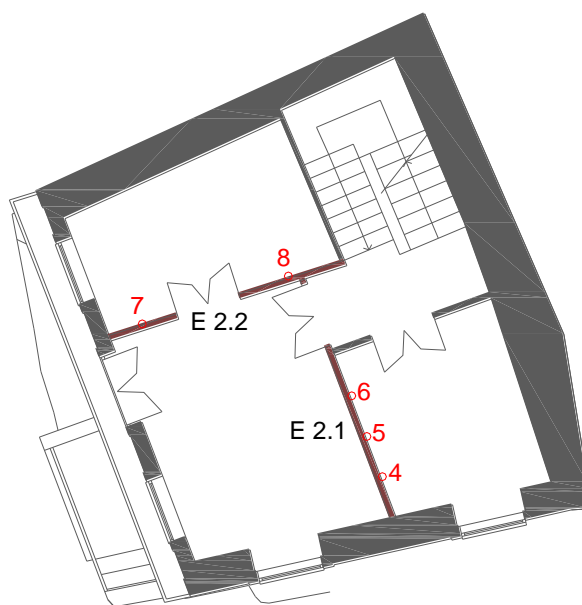


Figura 4-26: Localização das paredes em estudo – Piso 1

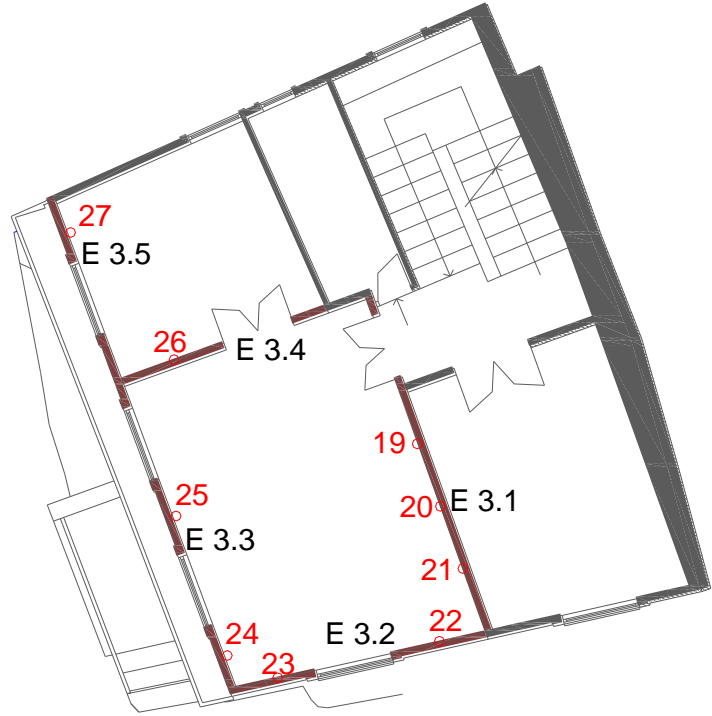


Figura 4-27: Localização das paredes em estudo – Piso 2

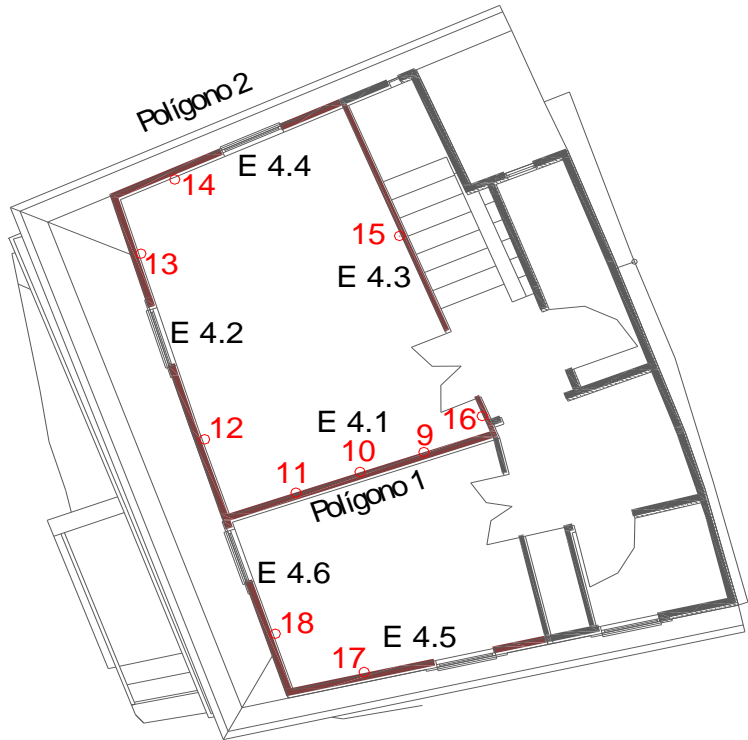


Figura 4-28: Localização das paredes em estudo – Piso 3

Todas as paredes em estudo são em alvenaria de tabique e como já foi referido anteriormente, apresentam dimensões globais distintas. Por isso, uma vez que se vão analisar alguns parâmetros que podem ter tido influência na frequência obtida, na tabela que se segue apresentam-se as dimensões e as frequências obtidas nos ensaios para cada parede. Neste edifício o ensaio dinâmico foi realizado em 14 paredes (7 interiores e 7 exteriores).

A frequência decorrente do ensaio, aqui analisada, é a primeira frequência natural (vibração livre).

Tabela 4-11: Frequência obtida nas diferentes paredes

Esquema	Dimensões (m)			Frequência (Hz)
	Comprimento	Altura	Espessura	
1.1	4,3	3,2	0,14	11,1
2.1	2,9	2,9	0,12	14,2
2.2	4,2	2,9	0,13	16,1
3.1	3,5	2,9	0,12	12,5
3.2	3,5	2,9	0,13	13,4
3.3	5,0	2,9	0,13	11,2
3.4	3,0	2,9	0,12	13,9
3.5	2,5	2,9	0,13	11,2
4.1	3,5	2,4	0,11	10,2
4.2	4,7	2,4	0,12	9,5
4.3	5,0	2,4	0,13	4,7
4.4	3,2	2,4	0,09	9,6
4.5	3,4	2,4	0,12	5,1
4.6	2,5	2,4	0,12	4,7

Os esquemas feitos para cada parede podem visualizar-se no Anexo 1 e 2, mas para permitir uma melhor perceção serão integrados no texto, quando for necessário.

Fazendo uma análise geral simplificada aos resultados obtidos, podem-se retirar algumas ilações interessantes. Em geral, as paredes de tabique dos pisos inferiores têm uma espessura um pouco maior que as paredes dos pisos superiores. Da mesma forma, as frequências nos pisos inferiores também são mais elevadas que nos pisos superiores. Entre pontos da mesma parede existe uniformidade de valores (ver Tabela 4-12).

Analisando com maior pormenor os valores obtidos, existem alguns pontos de ensaio cujos valores são nitidamente diferentes de outros, quer na mesma parede quer em paredes vizinhas. Olhando em pormenor para o ponto de ensaio n.º 8 (piso1), verifica-se que o valor da

frequência é de 17,90 Hz, bastante superior à das frequências obtidas na mesma parede e até no mesmo piso. Analisando o local onde foi realizado o ensaio, verifica-se que na face oposta existe uma parede ortogonal, o que condiciona o resultado pois impede a sua livre oscilação. Por outro lado, o ponto n.º 26 (piso2), também possui uma frequência (13,9 Hz) bastante superior a outras de pontos situados no mesmo piso. Porém ao analisar a planta estrutural do piso superior, constata-se que existe uma viga principal do pavimento que apoia na parede ensaiada, nessa direção, o que pode ter condicionado o valor encontrado.

Assim, fazendo uma análise geral dos resultados e no sentido de eliminar alguns valores que estão nitidamente fora da média dos valores na mesma situação e local, e que podem condicionar a análise que mais adiante se fará, os pontos de ensaio n.º 8, 12, 14, 22 e 26 serão retirados da análise. Não obstante, serão referidos quando se tornar necessário colocar hipóteses de funcionamento deste tipo de paredes.

De seguida apresenta-se uma tabela geral dos ensaios realizados, onde para além dos valores obtidos em todos os pontos de ensaio, se apresentam as características geométricas das paredes ensaiadas.

Tabela 4-12: Resumo geral dos valores de frequência obtidos em cada ponto de ensaio e características geométricas das paredes, Ed.1

Esquema/ Parede	Ensaio	Ponto	Canal	Piso	Observações	Comentário	Tipo parede	Frequência Própria (Hz)		Dimensão da parede		
								Valor obtido	Média	Comprimento (m)	Altura (m)	Espessura (m)
1.1	1	1	0	0	Junto a parede interior de tabique (perpendicular)	Argamassa terrosa	Parede interior	11,1	11,10	4,30	3,20	0,14
		2	1		A meio da parede			11,1				
		3	2		Junto a abertura (porta)			11,1				
2.1	2	4	0	1	Junto a parede exterior de alvenaria de granito (perpendicular)	Argamassa terrosa	Parede interior	14,2	14,20	2,90	2,90	0,12
		5	1		A meio da parede			14,2				
		6	2		Junto a parede interior de tabique (perpendicular)			14,2				
2.2	3	7	0	1	Junto a parede exterior de alvenaria de granito (perpendicular)	Parede com reforço de argamassa com rede de galinheiro.	Parede interior	14,3	16,10	4,20	2,90	0,13
		8	1		Na direção de parede interior de tabique (perpendicular)	Parede com reforço de argamassa com rede de galinheiro. No ponto de ensaio existe uma parede de tabique na direção perpendicular.		17,9				
		19	0		Junto a parede interior de tabique (perpendicular)	Parede com reforço de argamassa com rede de galinheiro.		13,3	12,50	3,50	2,90	0,12
3.1	7	20	1	2	A meio da parede	Argamassa terrosa	Parede exterior	12,1				
		21	2		Junto a parede exterior de tabique (perpendicular)			12,1				
		22	3		Em parede exterior entre janela e parede interior (perpendicular)			15,1	13,35	3,50	2,90	0,13
3.2	7 e 8	23	3	2	No vértice de uma parede exterior de tabique	Argamassa terrosa	Parede exterior	11,6				
		24	2		No vértice de uma parede exterior de tabique			11,2				
		25	1		A meio da parede (junto janela)			11,2	11,20	5,00	2,90	0,13
3.3	8	26	0	2	Em parede interior entre porta e parede exterior de tabique	Argamassa terrosa	Parede interior	13,90				
3.4	9	27	1	2	No vértice de uma parede exterior de tabique	Argamassa terrosa	Parede exterior	11,20				
3.5	9	9	0	2	Junto a parede interior de tabique (perpendicular)	Argamassa terrosa	Parede interior	10,2	10,20	3,50	2,40	0,11
4.1	4	10	1	3	A meio da parede	Argamassa terrosa	Parede exterior	10,2				
		11	2		Junto a parede exterior de tabique (perpendicular)			10,2				
		12	3		A meio da parede			14,3	9,45	4,65	2,40	0,12
4.2	4 e 5	13	0	3	No vértice de uma parede exterior de tabique	Argamassa terrosa	Parede exterior	4,6				
		15	2		A meio da parede			4,7				
		16	3		Junto a parede interior de tabique (perpendicular)			4,7	4,70	5,00	2,40	0,13
4.3	5	14	1	3	No vértice de uma parede exterior de tabique	Argamassa terrosa	Parede exterior	9,6				
4.4	5	14	1	3	No vértice de uma parede exterior de tabique	Argamassa terrosa	Parede exterior	9,6				
4.5	6	17	0	3	No vértice de uma parede exterior de tabique	Argamassa terrosa	Parede exterior	5,1	5,10	3,40	2,40	0,12
4.6	6	18	1	3	No vértice de uma parede exterior de tabique	Argamassa terrosa	Parede exterior	4,7				
		18	1		No vértice de uma parede exterior de tabique			4,7				

4.2.4.2 Descrição e apresentação de resultados do ensaio realizado no Ed.2

Tal como foi feito para o Ed.1, neste edifício os ensaios foram realizados em diversas paredes. Por isso e de forma a facilitar a sua localização, nas figuras seguintes estão identificados todos os esquemas de ensaio efetuados nas paredes.

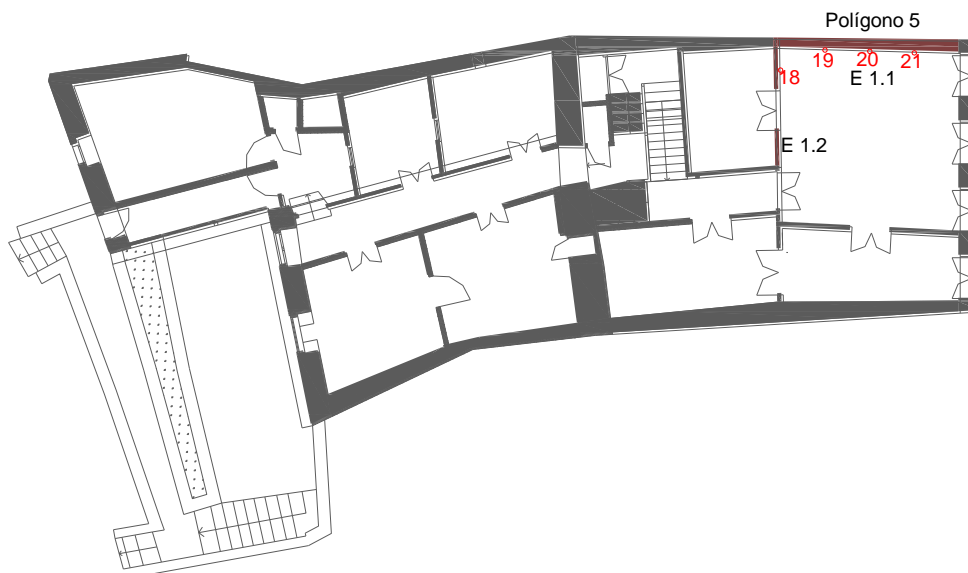


Figura 4-29: Localização das paredes em estudo – Piso 1



Figura 4-30: Localização das paredes em estudo – Piso 2

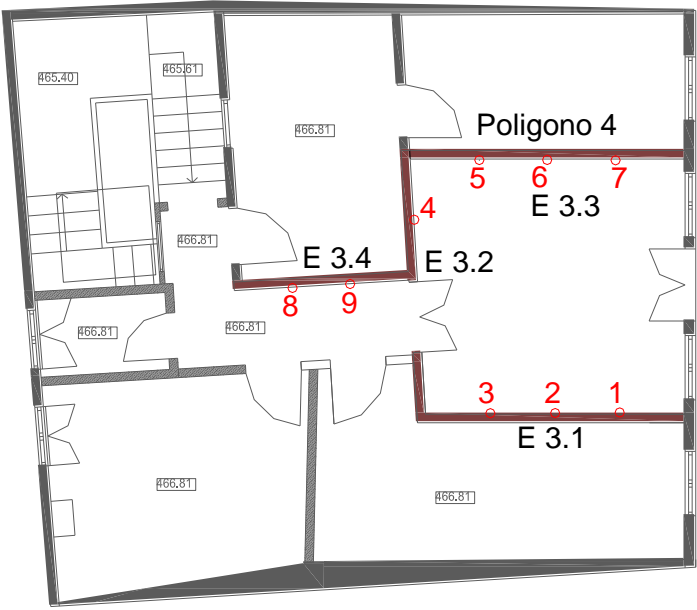


Figura 4-31: Localização das paredes em estudo – Piso 3

Todas as paredes em estudo são em alvenaria de tabique (restam algumas dúvidas no esquema E1.1) e, como já foi referido anteriormente, apresentam dimensões globais distintas. Por isso, uma vez que se vão analisar alguns parâmetros que podem ter tido influência na frequência obtida, na tabela que se segue apresentam-se as dimensões e as frequências obtidas nos ensaios para cada parede. Neste edifício o ensaio dinâmico foi realizado em 10 paredes, todas interiores, à exceção da parede E1.1.

Tabela 4-13: Valor da frequência obtida nas paredes em estudo

Esquema	Dimensões (m)			Frequência (Hz)
	Comprimento	Altura	Espessura	
1.1	5,00	2,90	-	15,7
1.2	3,50	2,90	0,13	12,8
2.1	3,60	2,75	0,12	10,6
2.2	4,25	2,75	0,12	13,3
2.3	3,50	2,75	0,12	14,2
2.4	3,70	2,75	0,13	14,3
3.1	3,70	2,92	0,12	6,4
3.2	3,60	2,92	0,12	12,5
3.3	3,80	2,92	0,12	5,4
3.4	2,40	2,92	0,13	5,2

De igual forma, os esquemas de ensaio para cada parede podem visualizar-se em anexo, mas para permitir uma melhor percepção serão integrados no texto, quando for necessário.

Fazendo uma análise geral simplificada aos resultados obtidos, podem-se retirar as mesmas ilações do edifício 1, isto é, frequências tendencialmente maiores nos pisos inferiores. Há neste edifício uma maior uniformização de espessuras das paredes.

Analisando pontualmente os valores obtidos, existem alguns pontos de ensaio cujos valores são nitidamente diferentes de outros, quer na mesma parede ou em paredes vizinhas. Olhando em pormenor para o ponto de ensaio n.º 16 (piso2), verifica-se que o valor da frequência é de 17,60 Hz, bastante superior à das frequências obtidas na mesma parede e no mesmo piso. Analisando o local onde foi realizado o ensaio, verifica-se que foi a meio da parede, em que numa extremidade existe uma parede de tabique ortogonal e na outra extremidade uma parede de alvenaria em granito também ortogonal.

Por outro lado, nos pontos n.º 19,20 e 21 (piso1), também possui uma frequência média (15,7 Hz) bastante superior a outras de pontos situados no mesmo piso. Porém esta é uma parede de meação com um edifício adjacente. Também o ponto n.º 4 (E3.2) apresenta um valor de frequência muito superior aos pontos medidos no mesmo piso. A presença na proximidade de duas paredes ortogonais (uma em cada sentido) ajuda a explicar o sucedido.

Assim, fazendo uma análise geral dos resultados e no sentido de eliminar alguns valores que estão nitidamente fora da média dos valores na mesma situação e local, e que podem condicionar a análise que mais adiante se fará, os pontos de ensaio n.º 4 e 16 serão retirados da análise. Não obstante, serão referidos quando se tornar necessário colocar hipóteses de funcionamento deste tipo de paredes.

De seguida apresenta-se um quadro geral dos ensaios realizados, onde para além dos valores obtidos em todos os pontos de ensaio, se apresentam as características geométricas das paredes ensaiadas.

Tabela 4-14: Resumo geral dos valores de frequência obtidos em cada ponto de ensaio e características geométricas das paredes, Ed.2

Esquema/ Parede	Ensaio	Ponto	Canal	Piso	Observações	Comentário	Tipo parede	Frequência Própria (Hz)		Dimensão da parede		
								Valor obtido	Média	Comprimento (m)	Altura (m)	Espessura (m)
E1.1	6	19	1	1	Junto a parede interior de tabique (perpendicular)	Argamassa terrosa	Parede exterior	15,7	15,7	5,00	2,90	0,15
		20	2		A meio da parede	Parede adjacente a		15,9				
		21	3		Junto a parede exterior de alvenaria de granito (perpendicular)	parede de outro edifício		15,6				
E1.2	6	18	0	1	Entre parede exterior e abertura (porta)	Argamassa terrosa	Parede interior	12,8	12,8	3,50	2,90	0,13
E2.1	4	10	1	2	Junto a parede interior de tabique (perpendicular)	Argamassa terrosa	Parede interior	10,6	10,6	3,60	2,75	0,12
	4	11	0		A meio da parede			10,6				
	5	14	0		Ao lado de abertura (porta)			10,5				
E2.2	4	12	2	2	Entre parede interior de tabique (perpendicular) e abertura (porta)	Argamassa terrosa	Parede interior	13,3	13,3	4,25	2,75	0,12
E2.3	4	13	3	2	Entre parede exterior de alvenaria de granito e abertura (porta)	Argamassa terrosa	Parede interior	14,2	14,2	3,50	2,75	0,12
E2.4	5	15	x	2	Junto a parede interior de tabique (perpendicular)	Argamassa terrosa	Parede interior	x	14,3	3,70	2,75	0,13
		16	2		A meio da parede			17,6				
		17	3		Junto a parede exterior de alvenaria de granito (perpendicular)			11				
E3.1	1	1	0	3	Junto a parede exterior de alvenaria de granito (perpendicular)	Argamassa terrosa	Parede interior	6,4	6,4	3,70	2,92	0,12
		2	1		A meio da parede			6,5				
		3	2		Junto a parede interior de tabique (perpendicular)			6,4				
E3.2	2	4	0	3	Entre parede interior de tabique (perpendicular) e abertura (porta)	Argamassa terrosa	Parede interior	12,5	12,5	3,60	2,92	0,12
E3.3	2	5	1	3	Junto a parede interior de tabique (perpendicular)	Argamassa terrosa	Parede interior	5,3	5,4	3,80	2,92	0,12
		6	2		A meio da parede			5,6				
		7	3		Junto a parede exterior de alvenaria de granito (perpendicular)			5,2				
E3.4	3	8	0	3	Junto a parede interior de tabique (perpendicular)	Argamassa terrosa	Parede interior	5,2	5,2	2,40	2,92	0,13
		9	1		Junto a parede interior de tabique (perpendicular)			5,2				

4.2.4.3 Influência da carga axial nas paredes

Previamente à análise que aqui vai ser exposta, refira-se que os resultados devem ser avaliados com prudência, uma vez que a frequência aqui estudada (primeira frequência natural) não depende diretamente das ações axiais e, por consequência, das tensões normais instaladas na parede. No entanto, julga-se oportuno avaliar esta questão, pois em trabalhos futuros, este é um ponto a ser explorado com maior profundidade.

De forma a se compreender a relação existente entre a carga axial em cada parede e o resultado da frequência obtida no ensaio, procedeu-se à quantificação das ações atuantes no edifício.

A análise estrutural deve considerar a influência de todas as ações que atuam ou possam vir atuar no edifício/parede em estudo. Ações que possam alterar os estados de tensão dos materiais e consequentemente os esforços nos elementos resistentes, designadas ações diretas ou que gerem deformações significativas na estrutura, ações indiretas.

As ações podem ser classificadas segundo a sua permanência e probabilidade de ocorrência:

- Ações Permanentes (G_k): ações de valor constante que atuam na estrutura durante toda a sua vida útil;
- Ações Variáveis (Q_k): ações cujos valores sofrem uma variação significativa em torno do seu valor médio ao longo do tempo;
- Ações Acidentais: ações de duração muito curta e com muito baixa probabilidade de ocorrência durante a vida útil do edifício, sendo que estas não vão ser consideradas para os casos de estudo.

Para o cálculo das ações apresentadas os valores foram retirados das Tabelas Técnicas (2012) e do Eurocódigo 1 (EC1: NP EN 1991-1-1-2009). A combinação de ações considerada para os dois edifícios em estudo foi realizada de acordo com a seguinte expressão (EC0: NP EN 1990:2009):

$$E_d = \sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} \quad (4-5)$$

Após o cálculo da combinação de ações para cada piso procedeu-se ao cálculo do valor da ação total para cada parede em estudo.

Na quantificação de ações teve-se em consideração as plantas estruturais. Estas foram obtidas através de uma inspeção visual ao edifício realizadas por alunos do curso de Mestrado em Engenharia da Construção e da Reabilitação, no âmbito da unidade curricular de Durabilidade e Reabilitação de Estruturas de Alvenaria e Madeira, no ano letivo de 2013/2014. Por este fato, e porque não existiam plantas estruturais na posse do dono de obra (Viseu Novo - SRU), as hipóteses de distribuição dos diversos elementos estruturais do pavimento aqui ilustradas, devem ser tomadas com prudência.

Na análise efetuada aplicaram-se as seguintes hipóteses: a) o peso próprio das paredes de tabique foi o mesmo que se descreveu no ponto 4.2.3. desta dissertação; b) se a distribuição dos pisos superiores não possui nenhum elemento a apoiar na parede analisada não foi atribuída nenhuma ação axial; c) se a distribuição dos pisos superiores possui elementos principais resistentes a apoiar na parede analisada mas não existe um alinhamento de paredes foi atribuída uma percentagem relativa para a transmissão da ação axial vinda dos pisos superiores; d) se a distribuição dos pisos superiores possui elementos principais resistentes a apoiar na parede analisada mas existe um alinhamento de paredes foi atribuída a totalidade da transmissão da ação axial vinda dos pisos superiores.

4.2.4.3.1 Análise do Ed.1

De modo a se perceber melhor as designações utilizadas nas tabelas, apresenta-se na figura seguinte o Corte B-B do Ed.1 com as designações dos pisos para as quais se calcularam as ações.

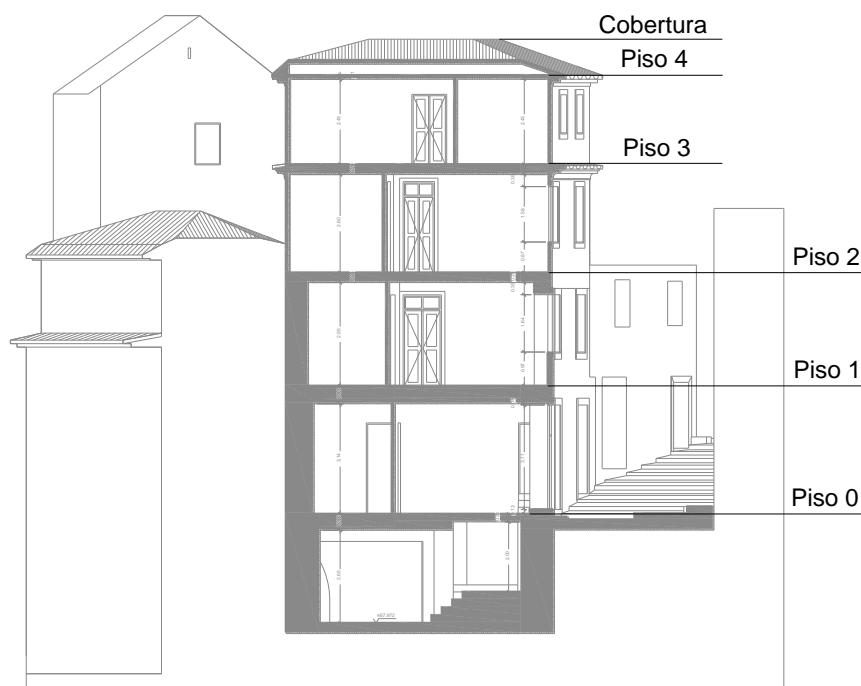


Figura 4-32: Corte B-B com a designação utilizada dos pisos

Nas tabelas que se seguem, são apresentadas as ações a considerar para cada piso do Ed.1. Foram quantificadas para cada piso.

Tabela 4-15: Ações a considerar na Cobertura, Ed.1

Ações na Cobertura	
Ações Permanentes (por m² de vertente), G	Peso (kN/m²)
Ripas e varas	0,20
Madres e elementos de contraventamento	0,15
Asnas até 10m de vão	0,15
Telha lusa	0,50
Total	1,00
Ações Variáveis (por m² de vertente), Q	
Sobrecarga (Cobertura não acessível)	0,40
Combinação de ações - Ed	1,95
Inclinação da cobertura (valor médio), em graus	22
Inclinação da cobertura (valor médio), em radianos	0,38
Combinação de ações, em projeção horizontal - Ed	2,10

Tabela 4-16: Ações a considerar no 4º piso, Ed.1

Ações no Piso 4			
Ações Permanentes, G	γ (kN/m³)	e (m)	Peso (kN/m²)
Pavimento de madeira	6,00		0,40
Revestimento teto (tabuado de madeira)	6,00	0,02	0,12
Total			0,52
Ações Variáveis, Q			
Sobrecarga (Espaço não acessível)			0,40
Combinação de ações – Ed			1,30

Tabela 4-17: Ações a considerar nos restantes pisos, Ed.1

Ações no Piso 0,1,2 e 3			
Ações Permanentes, G	γ (kN/m³)	e (m)	Peso (kN/m²)
Pavimento de madeira	6,00		0,40
Revestimento superior (soalho)	6,00	0,02	0,12
Revestimento inferior (estruque sobre fasquiado)			0,40
Total			0,92
Ações Variáveis, Q			
Paredes divisórias (Tabique)			(*)
Sobrecarga (Habitação)			2,00
Total			2,00
Combinação de ações - Ed			4,24

(*) – este valor está considerado diretamente nos cálculos (ver tabela 4-18)

Nas figuras seguintes apresentam-se as plantas estruturais obtidas através de uma inspeção visual ao edifício, como mencionado anteriormente, com a sobreposição dos pontos de ensaio. A legenda que aparece na primeira figura é a mesma para todas as plantas estruturais deste edifício.

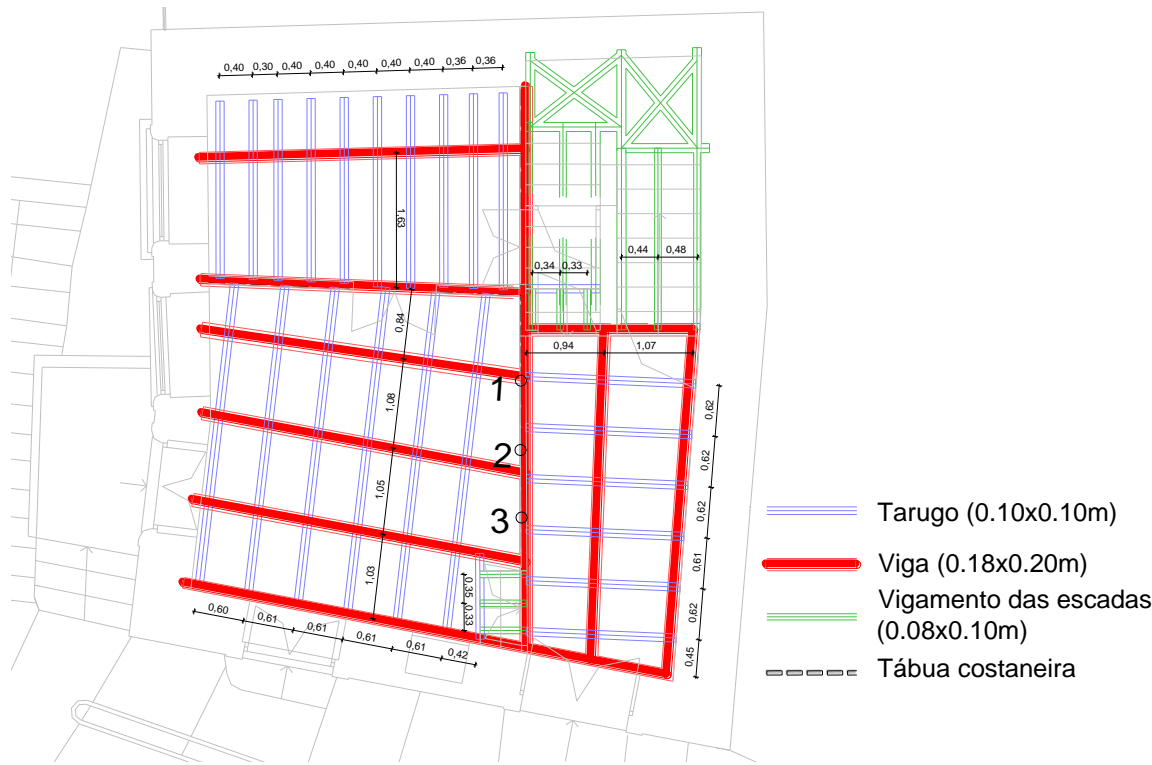


Figura 4-33: Planta estrutural do Piso 0



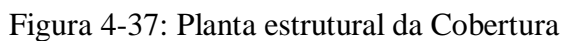
Figura 4-34: Planta estrutural do Piso 1



Figura 4-35: Planta estrutural do Piso 2



Figura 4-36: Planta estrutural do Piso 3

90

De seguida apresenta-se uma tabela síntese, de modo a se poder avaliar a relação existente entre a carga axial a que a parede está submetida e o valor da frequência registado no ensaio.

Tabela 4-19: Frequência vs Carga total nas paredes, Ed.1

Esquema	Frequência (Hz)	Carga (kN/m)
1.1	11,1	21,90
2.1	14,2	11,42
2.2	16,1	19,18
3.1	12,5	6,72
3.2	13,4	7,99
3.3	11,2	8,53
3.4	13,9	7,86
3.5	11,2	14,84
4.1	10,2	4,36
4.2	9,5	8,76
4.3	4,7	3,71
4.4	9,6	4,64
4.5	5,1	5,43
4.6	4,7	7,01

Através de uma pequena análise, o que se pode observar na tabela anterior, é que os valores de frequência mais baixos correspondem a paredes que estão submetidas a valores de carga axial também mais baixos. Praticamente, as paredes que estão submetidas a maiores cargas (rés-do-chão e piso 1), são aquelas onde se verificou frequências relativamente mais elevadas.

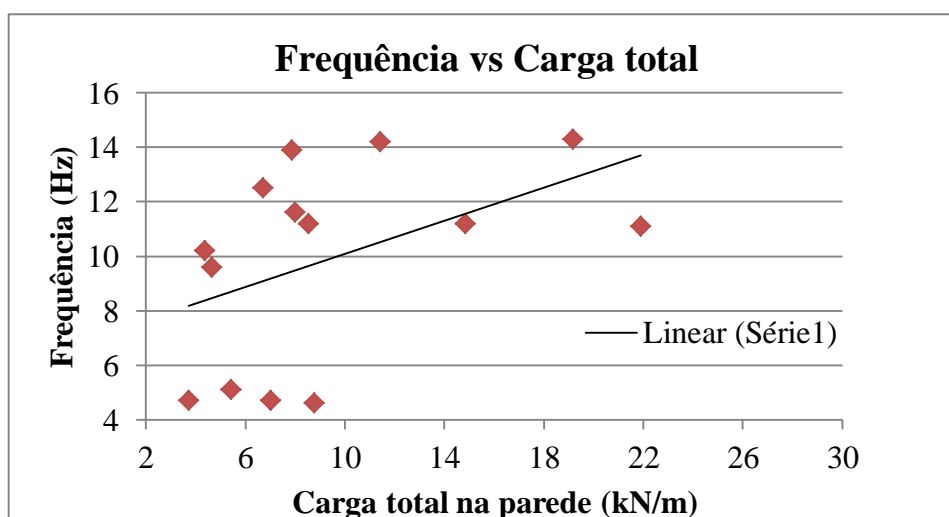


Gráfico 4-1: Ensaio dinâmico. Conjunto de respostas Frequência vs Carga total das paredes em estudo, Ed.1

4.2.4.3.2 Análise do Ed.2

De modo a se perceber melhor as designações utilizadas nas tabelas, apresenta-se na figura seguinte o Corte C-D do Ed.2 com as designações dos pisos para as quais se calculou as ações.

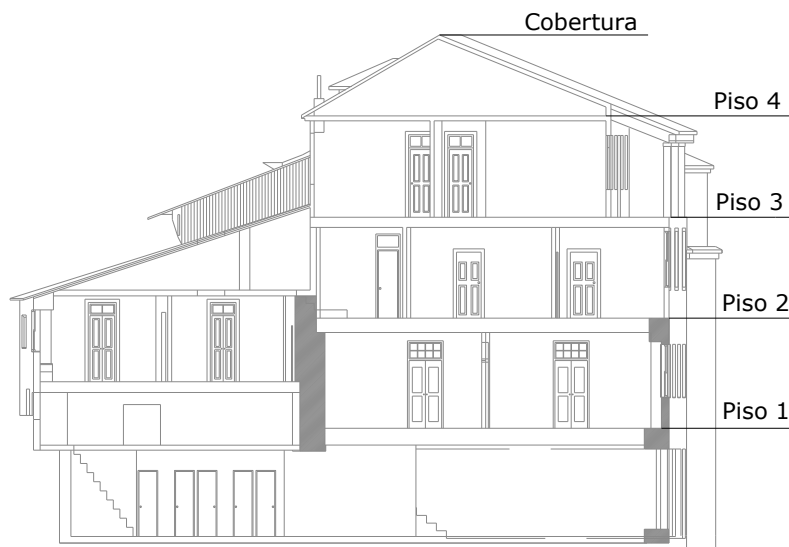


Figura 4-38: Corte C-D com a designação utilizada dos pisos

Nas tabelas que se seguem, são apresentadas as ações que se consideram para cada piso do Ed.2. Foram quantificadas para cada piso.

Tabela 4-20: Ações a considerar na Cobertura, Ed.2

Ações na Cobertura	
Ações Permanentes (por m² de vertente), G	(kN/m²)
Ripas e varas	0,20
Madres e elementos de contraventamento	0,15
Asnas até 10m de vão	0,15
Telha lusa	0,50
Total	1,00
Ações Variáveis (por m² de vertente), Q	
Sobrecarga (Cobertura não acessível)	0,40
Combinação de ações - Ed	1,95
Inclinação da cobertura (valor médio), em graus	24
Inclinação da cobertura (valor médio), em radianos	0,42
Combinação de ações, em projeção horizontal - Ed	2,13

Tabela 4-21: Ações a considerar Piso 4, Ed.2

Ações no Piso 4			
Ações Permanentes, G	Y (kN/m³)	e(m)	Peso (kN/m²)
Pavimento de madeira	6,00		0,40
Revestimento teto (estuque sobre fasquiado)			0,40
Total			0,80
Ações Variáveis, Q			
Sobrecarga (Espaço não acessível)			0,40
Combinação de ações – Ed			1,68

Tabela 4-22: Ações a considerar nos restantes pisos, Ed.2

Ações no Piso 1,2 e 3			
Ações Permanentes, G	Y (kN/m³)	e (m)	Peso (kN/m²)
Pavimento de madeira	6,00		0,40
Revestimento superior (soalho)	6,00	0,02	0,12
Revestimento inferior (estuque sobre fasquiado)			0,40
Total			0,92
Ações Variáveis, Q			
Paredes divisórias (Tabique)			(*)
Sobrecarga (Habitação)			2,00
Total			2,00
Combinação de ações - Ed			4,24

(*) – este valor está considerado diretamente nos cálculos (ver tabela 4-18)

Tal como foi feito para o Ed.1, após o cálculo da combinação de ações para cada piso procedeu-se à quantificação da carga axial exercida em cada parede em estudo. Nas figuras seguintes apresentam-se as plantas estruturais obtidas através de uma inspeção visual ao edifício, como mencionado anteriormente. A legenda que aparece na primeira figura aplica-se a todas as plantas estruturais deste edifício.

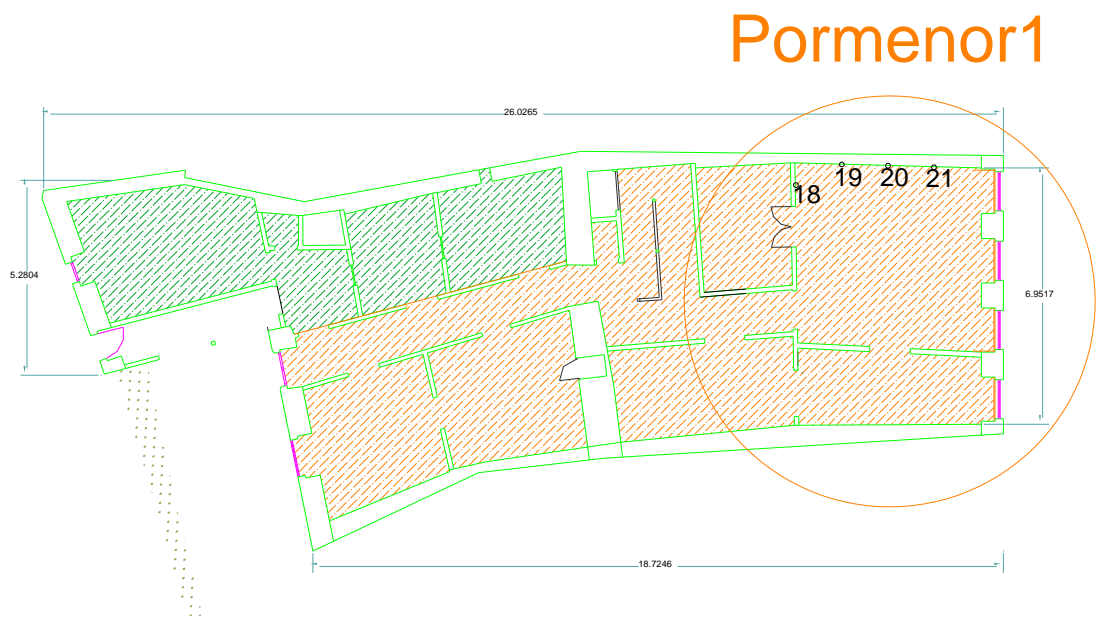


Figura 4-39: Planta estrutural do Piso 1

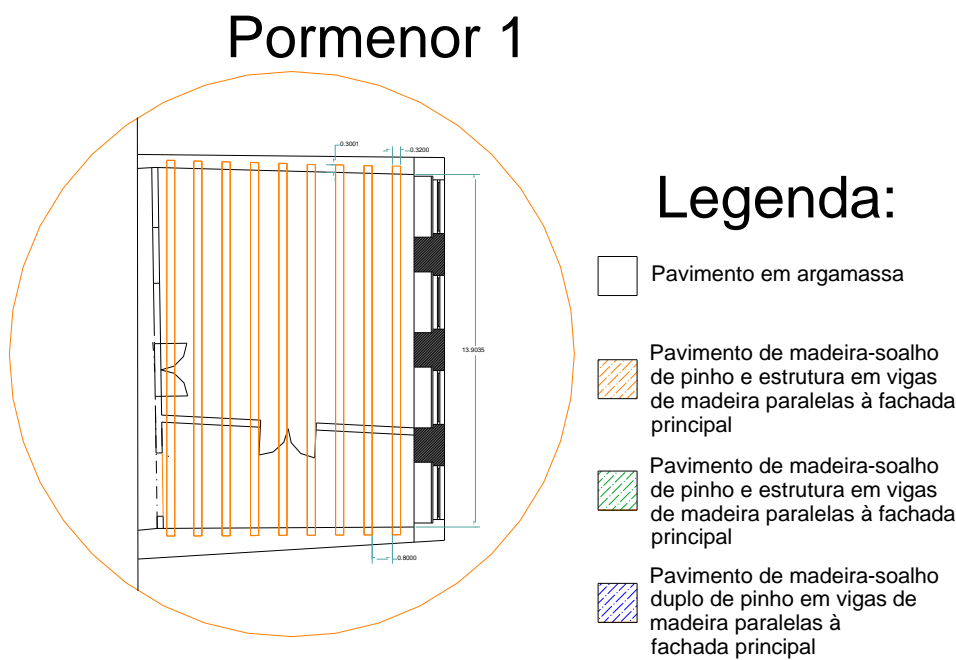


Figura 4-40: Pormenor 1 e legenda das plantas estruturais

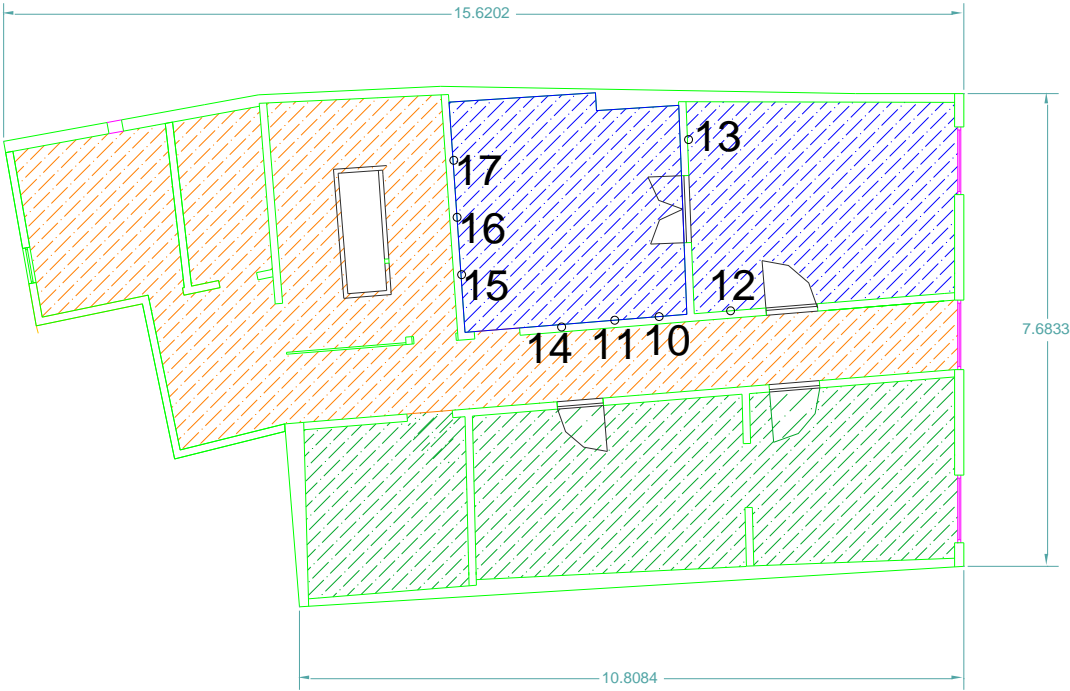


Figura 4-41: Planta estrutural do Piso 2

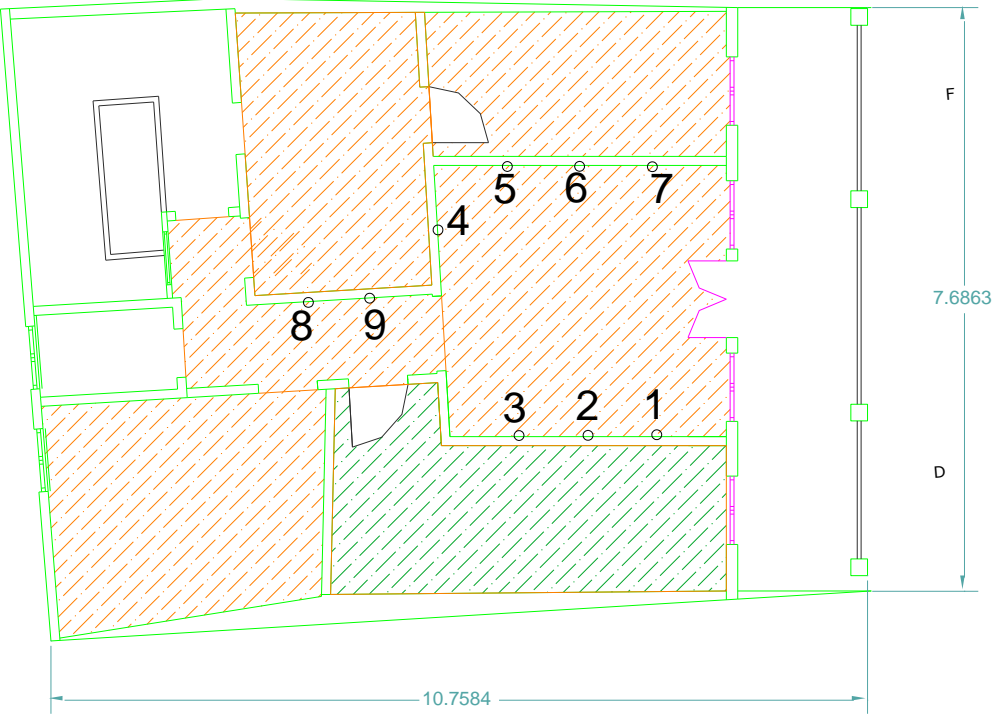


Figura 4-42: Planta estrutural do Piso 3

Tabela 4-23: Cálculo da ação total nas paredes, Ed.2

Piso	Parede /Ensaio	Peso Próprio (KN/m)	Ação Piso 4			Ação Cobertura			Ação total na Parede (KN/m)
			Ed (KN/m ²)	l (m)	%	Ed (KN/m ²)	l (m)	%	
3	E3.1	1,50	1,68	2,90	100%	2,13	0,00	100%	6,37
	E3.2	1,50	1,68	2,55	100%	2,13	0,00	100%	5,78
	E3.3	1,50	1,68	2,33	100%	2,13	0,00	100%	5,41
	E3.4	1,50	1,68	3,60	100%	2,13	0,00	100%	7,55
Piso	Parede /Ensaio	Peso Próprio (KN/m)	Ação Piso 3			Ação Pisos Superiores		Ação total na Parede (KN/m)	
			Ed (KN/m ²)	l (m)	%	Acção (KN/m)	%		
2	E2.1	1,50	4,24	2,18	100%	7,55	100%	18,30	
	E2.2	1,50	4,24	0,98	100%	0,00	0%	5,66	
	E2.3	1,50	4,24	3,00	100%	5,78	100%	20,01	
	E2.4	1,50	4,24	2,85	100%	0,00	0%	13,59	
Piso	Parede /Ensaio	Peso Próprio (KN/m)	Ação Piso 2			Ação Pisos Superiores		Ação total na Parede (KN/m)	
			Ed (KN/m ²)	l (m)	%	Acção (KN/m)	%		
1	E1.1	1,50	4,24	1,00	100%	0,00	100%	5,74	
	E1.2	1,50	4,24	1,70	100%	20,01	100%	28,72	

De seguida apresenta-se uma tabela síntese, de modo a se poder avaliar a relação existente entre a carga axial a que a parede está submetida e o valor da frequência registado no ensaio.

Tabela 4-24: Frequências vs carga total nas paredes, Ed.2

Esquema	Frequência (Hz)	Carga (kN/m)
1.2	12,8	28,72
2.1	10,6	18,30
2.2	13,3	5,66
2.3	14,2	20,01
2.4	11,0	13,59
3.1	6,4	6,37
3.3	5,4	5,41
3.4	5,2	7,55

Através de uma breve análise, o que se pode observar na tabela anterior é que, por norma, os valores de frequência mais baixos correspondem a paredes que estão submetidas a valores de carga axial também mais baixos.

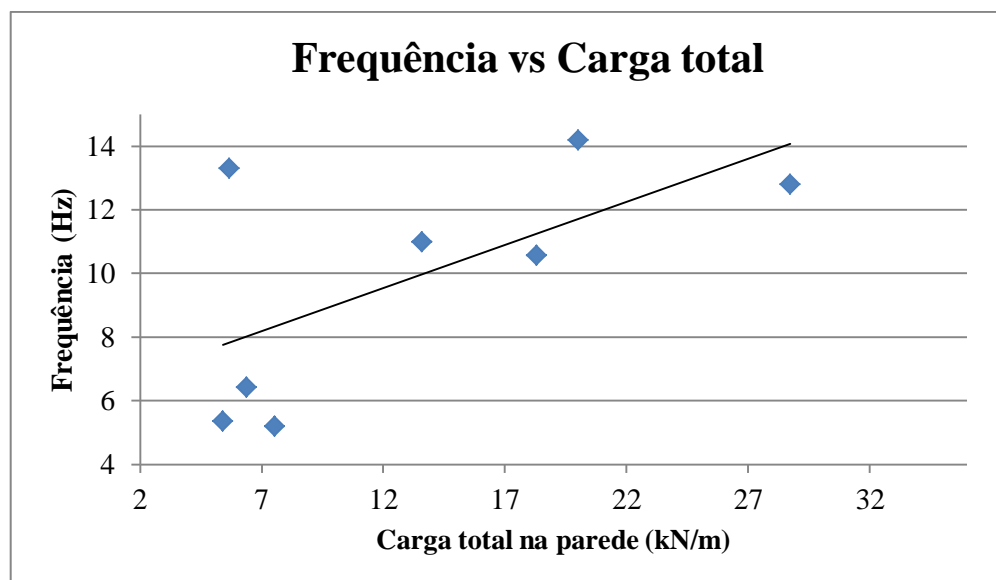


Gráfico 4-2: Ensaio dinâmico. Conjunto de respostas Frequência vs Carga total das paredes em estudo, Ed.2

4.2.4.3.3 Considerações finais

O que se pode observar nos itens anteriores, é que os valores de frequência mais baixos correspondem a paredes que estão submetidas a valores de carga axial mais baixos.

Estes valores devem ser analisados com a devida ponderação, quer pela incerteza da transmissão das forças (caminhos de carga) quer pela análise mais detalhada. Assim, deve ser realizado um estudo mais aprofundado para perceber a sua influência (ação axial) no comportamento dinâmico das paredes.

4.2.4.4 Influência do rácio/esbelteza das paredes de tabique

A esbelteza de uma estrutura (relação entre a altura e a espessura) pode estar diretamente ligada com o resultado obtido da frequência no ensaio dinâmico. Isto porque, de um modo geral as estruturas mais altas e delgadas (menor espessura) tornam-se mais flexíveis (menor rigidez), levando a estrutura a registar valores de frequências mais baixos. Por outro lado, as estruturas menos esbeltas, ou seja, mais baixas e mais espessas, tornam-se mais rígidas, registando (por norma) valores de frequências mais elevados.

4.2.4.4.1 Análise do Ed.1

Na Tabela 4-25 apresentam-se os valores do rácio/ esbelteza de cada parede em estudo do presente edifício. Este rácio resulta do quociente entre a altura e a espessura das paredes.

Tabela 4-25: Cálculo do Rácio/Esbelteza das paredes em estudo – Ed.1

Parede/Ensaio	Altura (m)	Espessura (m)	Rácio/Esbelteza	Frequência (Hz)
E1.1	3,20	0,14	22,86	11,1
E2.1	2,90	0,12	24,17	14,2
E2.2	2,90	0,13	22,31	14,3
E3.1	2,90	0,12	24,17	12,5
E3.2	2,90	0,13	22,31	11,6
E3.3	2,90	0,13	22,31	11,2
E3.5	2,90	0,13	22,31	11,2
E4.1	2,40	0,11	21,82	10,2
E4.2	2,40	0,12	20,00	4,6
E4.3	2,40	0,13	18,46	4,7
E4.5	2,40	0,12	20,00	5,1
E4.6	2,40	0,12	20,00	4,7

Como se pode observar, a espessura das paredes não difere muito. De um modo geral quanto maior é a altura da parede maior é a sua esbelteza. Da mesma forma é possível dizer que a frequência obtida nas paredes, tendencialmente, também aumenta com o aumento do rácio/esbelteza.

No Gráfico 4-3 pode observar-se a relação entre o rácio/esbelteza de uma parede com o valor da frequência obtido na mesma.

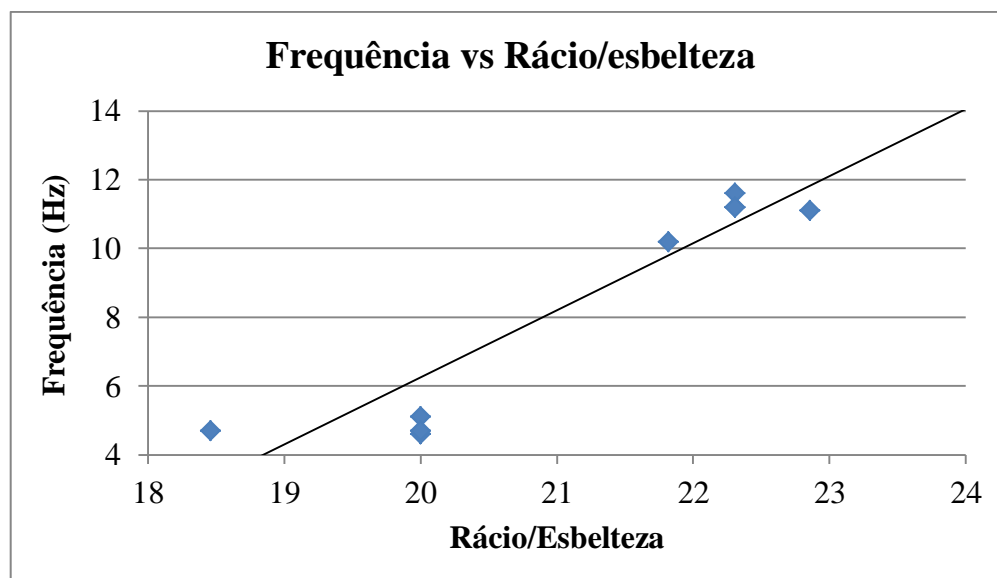


Gráfico 4-3: Ensaio dinâmico. Conjunto de respostas Frequência vs Rácio/esbelteza das paredes em estudo, Ed.1

4.2.4.4.2 Análise do Ed.2

Na Tabela 4-26 que se segue apresenta-se o cálculo do rácio/esbelteza de cada parede em estudo que resulta da razão entre a altura e espessura da parede e o respetivo valor da frequência obtido em cada parede.

Tabela 4-26: Cálculo do rácio/esbelteza das paredes de tabique - Ed.2

Parede/Ensaio	Altura (m)	Espessura (m)	Rácio/Esbelteza	Frequência (Hz)
E1.1	2,90	0,15	19,33	15,70
E1.2	2,90	0,13	22,31	12,80
E2.1	2,75	0,12	22,92	10,57
E2.2	2,75	0,12	22,92	13,30
E2.3	2,75	0,12	22,92	14,20
E2.4	2,75	0,13	21,15	11,00
E3.1	2,92	0,12	24,33	6,43
E3.3	2,92	0,12	24,33	5,37
E3.4	2,92	0,13	22,46	5,20

Tal como acontece no Ed.1, é possível visualizar, tirando os casos dos pisos superiores, que a frequência obtida nas paredes aumenta significativamente com o aumento da esbelteza. Neste edifício o pé-direito do piso 3 é mais elevado que nos pisos inferiores, o que condiciona esta análise.

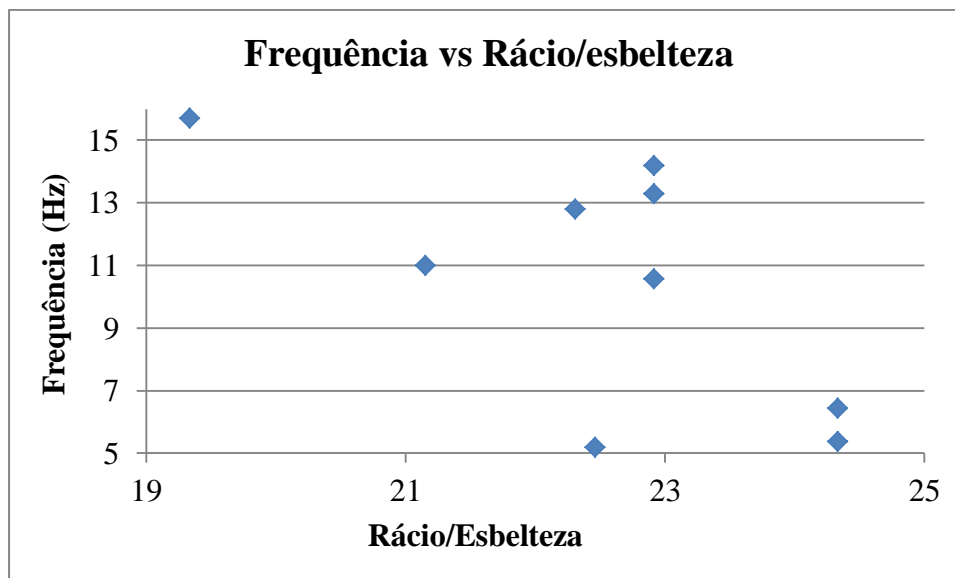


Gráfico 4-4: Ensaio dinâmico. Conjunto de respostas Frequência vs Rácio/esbelteza das paredes em estudo, Ed.2

4.2.4.4.3 Considerações finais

Conclui-se que a esbelteza de uma parede tem influência no cálculo da sua frequência própria. Com efeito, as paredes com maior rácio, foram aquelas onde se verificaram valores de frequência própria mais elevados. Isto é, existe uma proporcionalidade entre estes valores.

4.2.4.5 Influência da presença de aberturas nas paredes de tabique

A presença de aberturas (portas e janelas) nas paredes de tabique é também um dos fatores que pode contribuir para a variação da frequência obtida nas paredes estudadas, pois nestes casos, as estruturas, eventualmente, como não existe uma ligação na horizontal, tornam-se mais flexíveis. O que se espera é que as estruturas sendo menos rígidas apresentarão, por norma, frequências menores.

4.2.4.5.1 Análise do Ed.1

Na Figura 4-43 podem-se observar dois esquemas de paredes de tabique ensaiadas, ambas localizadas no 2º piso. Como se pode verificar nas plantas apresentadas anteriormente o E 3.1 corresponde a uma parede interior e o E 3.2 a uma parede exterior. Ambas as paredes apresentam iguais dimensões globais de 3,5 m e 2,9 m de comprimento e altura, respetivamente. No entanto, uma das paredes tem uma abertura, neste caso, uma janela.

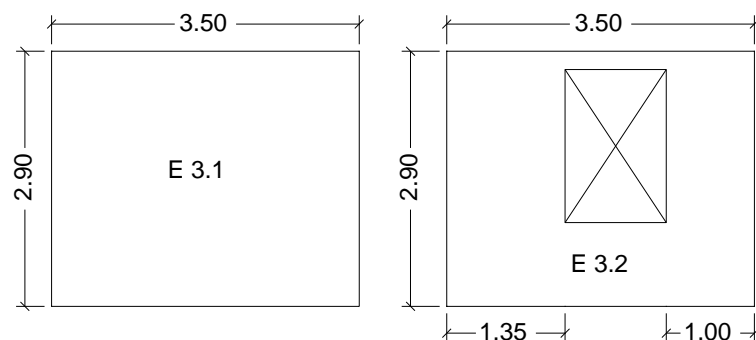


Figura 4-43: Esquemas E3.1 e E3.2 de paredes de tabique, Ed.1

A frequência média obtida no E 3.1 foi de 12,5 Hz e no E 3.2 de 13,4 Hz. Embora ambas as paredes apresentem dimensões iguais não se verificou um valor de frequência igual. Isto porque a existência de aberturas nas paredes influenciou de facto a frequência obtida.

No entanto, seria de esperar um valor de frequência menor na parede com a abertura pois esta torna-a menos rígida. Tal não se verificou pois, como já se mencionou, a frequência é influenciada por vários fatores. Neste caso a esbelteza das paredes e a carga a que está submetida poderão ser fatores primordiais.

De modo a se poder tirar conclusões mais fundamentadas analisam-se, de seguida, outras paredes de tabique, com e sem aberturas, no edifício em estudo, como é o caso das paredes apresentadas na Figura 4-44. A parede com abertura, esquema E3.5, possui uma janela com 1,1 m de largura por 1,7 m de altura e está localizada no 2º piso. É uma parede exterior. O esquema E2.1 pertence a uma parede localizada no 1º piso. Não tem nenhuma abertura e é uma parede interior.

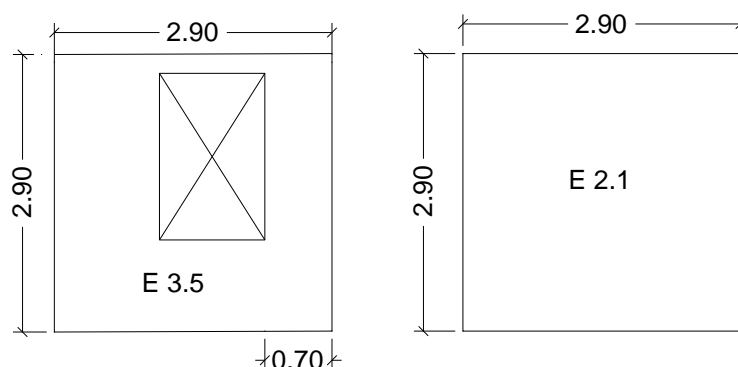


Figura 4-44: Esquemas E3.5 e E2.2 de parede de tabique, Ed.1

Estas paredes possuem dimensões globais (comprimento e altura) iguais. No entanto a frequência obtida na parede com abertura foi de 13,9 Hz, enquanto na outra parede foi de 14,2 Hz. Neste caso, a diferença de frequência não é muito significativa, pois difere apenas de 0,3 Hz. A espessura de ambas as paredes é de 13 cm (mesma esbelteza), pelo que neste caso a diferença encontrada no valor da frequência não foi influenciada por este fator. Relativamente ao valor da carga a que estas paredes estão submetidas é de 14,84 kN/m para E3.5 e 11,42 kN/m para o E2.1. Tal como no caso anterior, a carga a que a parede está submetida pode ser um fator importante a considerar na avaliação dos resultados. Na parede com carga maior carga registou-se um valor de frequência maior.

No caso que se segue, Figura 4-45, as paredes apresentam dimensões globais idênticas. Ambas estão localizadas do 3º piso, têm uma altura de 2,40 m e espessuras de 0,11 m e 0,12m para os esquemas E4.1 e E4.5, respetivamente. A primeira é uma parede interior e a segunda exterior.

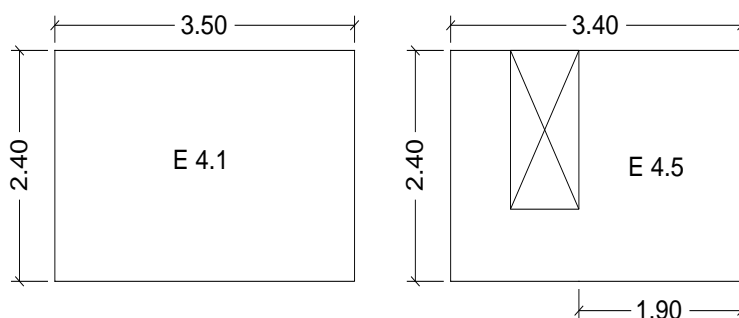


Figura 4-45: Esquemas E4.1 e E4.5 de parede de tabique, Ed.1

Neste caso, a frequência obtida na parede sem abertura é o dobro da frequência obtida na parede com abertura. O resultado obtido não era o mais esperado, pois as paredes para além de apresentarem dimensões idênticas e espessura praticamente a mesma (11 cm e 12 cm para E4.1 e E4.5, respetivamente), também estão sujeitas a cargas axiais relativamente parecidas (4,36 kN/m para E4.1 e 5,43 kN/m para E4.5). Neste caso, a diferença existente pode estar diretamente relacionado com o facto de apresentar uma janela, tornando-a menos rígida.

4.2.4.5.2 Análise do Ed.2

Na Figura 4-46 pode-se observar dois esquemas de paredes de tabique, localizadas no 2º piso deste edifício, utilizadas no ensaio. Ambas as paredes apresentam dimensões globais

idênticas, em comprimento e em altura. O esquema E2.2 da esquerda tem uma porta e o esquema da direita não apresenta qualquer abertura.

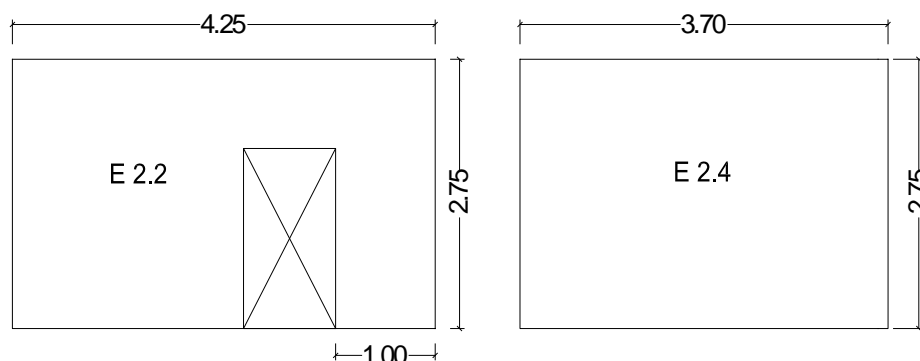


Figura 4-46: Esquema E2.2 e E2.4 de paredes de tabique, Ed.2

A frequência média obtida nas duas paredes foi muito próxima, 14,2 Hz para a parede com porta e 14,3 Hz para a parede sem abertura. Assume-se a parede E2.2 está submetida a uma carga axial bastante inferior. Analisando estes resultados, o facto de as paredes terem cargas diferentes e uma delas apresentar uma porta, seria de esperar uma diferença de frequência maior. No entanto outros fatores influenciam os dados obtidos. A esbelteza é relativamente próxima e o tipo de apoio também será igual.

De modo a se poder tirar conclusões mais fundamentadas, analisa-se de seguida outras paredes de tabique, com e sem aberturas, encontrados no edifício em estudo, como é o caso das paredes apresentadas na Figura 4-47.

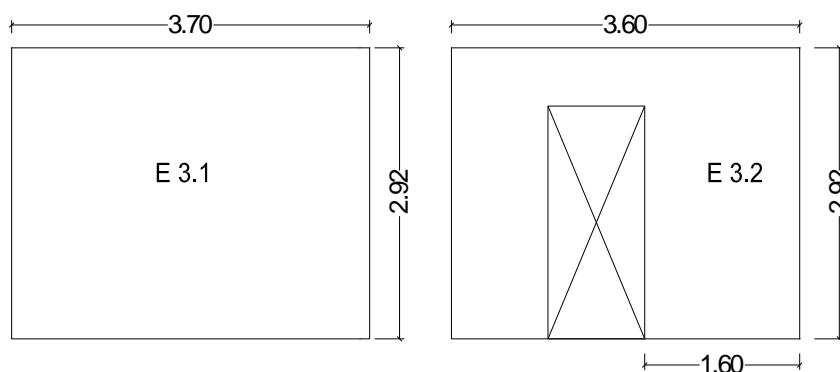


Figura 4-47: Esquemas E3.1 e E3.2 de paredes de tabique, Ed.2

Ambas as paredes estão localizadas no 3º piso do edifício. Tal como no caso anterior, os esquemas têm dimensões globais idênticas e o esquema E3.2 apresenta uma porta, com 1,0 m de largura por 2,40 m de altura.

Neste caso, a frequência obtida nos ensaios, já apresenta alguma diferença significativa. Na parede sem abertura a frequência foi de 6,4 Hz e na parede com uma abertura a frequência obtida foi de 12,5 Hz.

4.2.4.5.3 Considerações finais

Após a apresentação de alguns casos tipo pode concluir-se que a presença ou não de aberturas não parece ser um dos fatores que condicionam o comportamento dinâmico de paredes de tabique.

4.2.4.6 Influência das paredes interiores vs paredes exteriores

Analisa-se aqui se a localização das paredes (interiores ou exteriores) é também um fator que pode influenciar a sua frequência própria.

4.2.4.6.1 Análise do Ed.1

Os esquemas apresentados na Figura 4-48 referem-se a paredes de tabique com as mesmas dimensões, a primeiro sem abertura e a segunda com uma janela. Relativamente à localização da parede, o E3.1 é refere-se a uma parede interior e o E3.2 a uma parede exterior

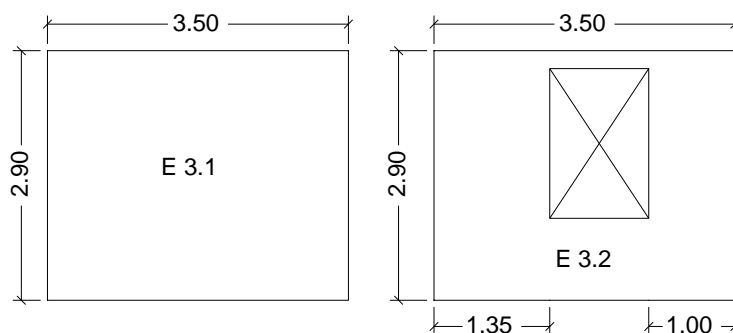


Figura 4-48: Esquemas E3.1 e E3.2 de paredes de tabique em estudo, Ed.1

A espessura e carga axial correspondente aos esquemas apresentados são de 0,12 m e 6,72 kN/m para o E3.1 e 0,13 m e 7,99 kN/m para o E3.2. Através dos dados obtidos no ensaio, verifica-se que a frequência determinada na parede interior foi de 12,5 Hz e na parede exterior de 13,4 Hz. As paredes apresentadas são idênticas, no que diz respeito, às dimensões globais, pelo que a frequência obtida também não foi muito diferente. Aqui o valor da esbelteza da parede interior é ligeiramente superior á da parede exterior.

Nos esquemas seguintes, Figura 4-49, teve-se o cuidado de escolher paredes com dimensões similares em comprimento e em altura, com espessuras de 0,11 m e 0,12m para o E4.1 e E4.5, respetivamente. A parede E4.1 é interior e a parede E4.5 é exterior.

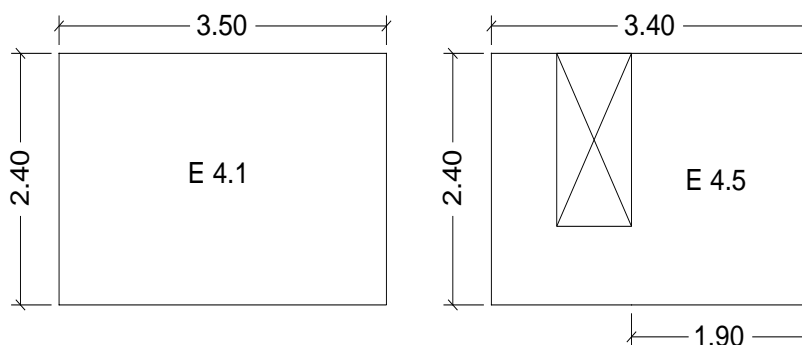


Figura 4-49: Esquemas E4.1 e E4.5 de paredes em estudo, Ed.1

O valor da frequência obtido na parede interior foi de 10,2 Hz enquanto na parede exterior, o valor da frequência obtido foi de 5,1 Hz. Neste caso, o valor da frequência obtido na parede exterior foi bastante menor.

4.2.4.6.2 Análise do Ed.2

Não será realizada nenhuma análise neste edifício, pelo fato de não se terem realizados ensaios em paredes exteriores.

4.2.4.6.3 Considerações finais

Tendo em consideração que as paredes apresentadas neste ponto tinham dimensões globais semelhantes, pode dizer-se que no Ed.1 a maior parte das paredes exteriores apresentou valores de frequência maiores que os valores obtidos nas paredes interiores. Isto pode ser explicado pelo facto de que as paredes exteriores apresentarem maior espessura (na maioria) e por apresentarem quase sempre aberturas.

Um aspeto que pode ser interessante analisar é o tipo de ligação entre as paredes e os pavimentos confinantes, que pode condicionar os resultados, como por exemplo na análise dos esquemas E4.1 e E4.5.

4.2.4.7 Influência na evolução da frequência em altura

O valor da frequência registado numa parede, em princípio, pode variar consideravelmente, consoante a sua localização. Ou seja, um ensaio dinâmico numa parede localizada no rés-do-chão não vai registar a mesma frequência que uma parede do 1º, 2º ou 3º piso. Por isso, de modo a compreender como se dá esta evolução da frequência em altura, teve-se o cuidado de escolher paredes que têm continuidade.

4.2.4.7.1 Análise do Ed.1

Na Tabela 4-27, que se segue estão identificados os esquemas, os pisos e as frequências registadas de algumas paredes.

Tabela 4-27: Identificação dos casos de paredes em análise com seguimento em altura

Caso	Esquema	Piso	Frequência (Hz)
1	E1.1	Rés-do-chão	11,1
	E2.1	1º	14,2
2	E2.2	1º	16,1
	E3.4	2º	13,9
3	E3.5	2º	11,2
	E4.2	3º	9,5
4	E3.2	2º	13,4
	E4.5	3º	5,1
5	E3.3	2º	11,2
	E4.6	3º	4,7

Como se pode observar, apenas no primeiro caso, o valor de frequência registado no piso inferior foi menor. Nos restantes casos, o valor da frequência registado nas paredes localizadas em pisos inferiores é relativamente maior que nas paredes localizadas nos pisos superiores.

4.2.4.7.2 Análise do Ed.2

Na Tabela 4-28, que se segue estão identificados os esquemas, os pisos e as frequências registadas de algumas paredes.

Tabela 4-28: Identificação dos casos de paredes com seguimentos em altura

Caso	Esquema	Piso	Frequência (Hz)
1	E2.1	2º	10,6
	E3.4	3º	5,2
2	E2.2	2º	13,3
	E3.2	3º	12,5

Como se pode observar em ambos os casos, a parede localizada no piso superior apresenta um valor de frequência menor, mesmo que não seja uma diferença significativa. Deste modo, tal como aconteceu no outro edifício, pode concluir-se que à medida que a parede sobe em altura, o valor da frequência diminui significativamente.

4.2.4.7.3 Considerações finais

Através desta análise, pode concluir-se que à medida que a parede sobe em altura, o valor da frequência diminui significativamente. Esta análise não deve ser interpretada de forma isolada, isto é, independente de outros fatores, mas indicia que existe uma proporcionalidade inversa entre a evolução dos pisos em altura e a frequência.

4.2.4.8 Análise aos resultados obtidos numa mesma parede

O ensaio dinâmico realizado nas paredes em estudo, como já foi mencionado anteriormente, foi feito com a ajuda de três, dois ou um acelerómetro. Ou seja, em cada parede foi registado o valor da frequência em diferentes pontos da parede, um mais à esquerda, outro ao centro e outro mais à direita.

Para as análises anteriormente realizadas o valor da frequência utilizado corresponde à média desses pontos. No entanto, é pertinente verificar se na mesma parede há diferenças significativas nos valores de frequência obtidos entre os pontos de ensaio, pelo facto de estas estarem mais perto de outras paredes (ligação com paredes ortogonais), ou ao meio, ou junto a um bordo (fim da parede, porta, etc.).

4.2.4.8.1 Análise do Ed.1

Nas figuras seguintes, apresenta-se o esquema referente a alguns esquemas de paredes que foram analisados, com a respetiva localização dos pontos.

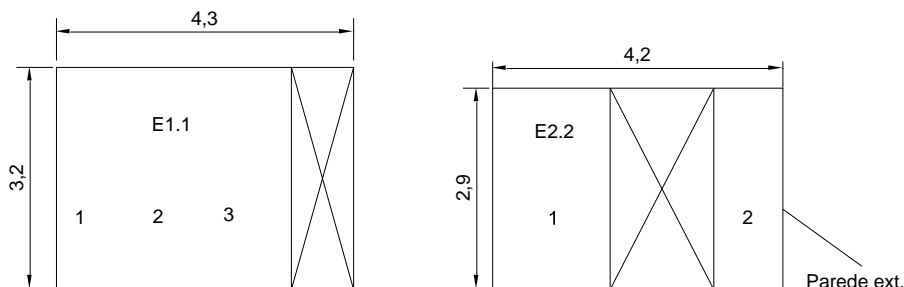


Figura 4-50: Esquemas E1.1 e E2.2

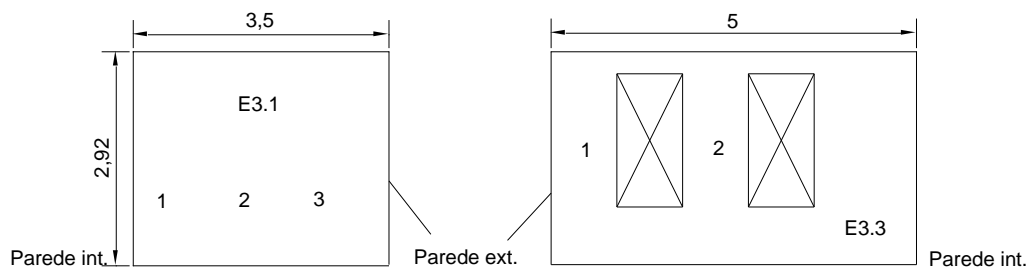


Figura 4-51: Esquemas E3.1 e E3.3

De seguida, apresenta-se uma tabela síntese, onde se pode visualizar o valor correspondente a cada ponto, onde o ensaio foi realizado.

Tabela 4-29: Síntese dos valores registados em cada ponto da parede

Esquema	Ponto	Frequência (Hz)
E1.1	1	11,1
	2	11,1
	3	11,1
E2.2	1	17,9
	2	14,3
E3.1	1	13,3
	2	12,1
	3	12,1
E3.3	1	11,2
	2	11,2

Como é possível visualizar o valor da frequência obtido nos três pontos não varia significativamente. O facto de o ponto estar mais próximo de uma parede ortogonal, ou estar a meio da parede, pode influenciar pontualmente o valor da frequência.

4.2.4.8.2 Análise do Ed.2

Na Tabela 4-30, pode visualizar-se o valor correspondente a cada ponto, onde o ensaio foi realizado bem como o valor correspondente da frequência.

Tabela 4-30: Síntese dos valores registados em cada ponto da parede

Esquema	Ponto	Frequência (Hz)
E1.1	1	15,7
	2	15,9
	3	15,6
E2.1	1	10,6
	2	10,6
	3	10,5
E3.1	1	6,4
	2	6,5
	3	6,4
E3.3	1	5,3
	2	5,6
	3	5,2

Como é possível observar o valor da frequência obtido não varia muito relativamente à sua localização.

4.2.4.8.3 Considerações finais

Através da análise, o que se pode concluir é que a frequência registada nos diferentes pontos da mesma parede apresenta valores muito similares, isto é, apresentam características idênticas, quer em termos de ligações aos pavimentos quer em termos construtivos. Só pontualmente, devido a razões já aqui apresentadas, existe uma variação no valor da frequência própria.

4.2.5 Conclusões

Convém, desde já, salientar que esta é a primeira vez que se realizou este tipo de ensaio em estruturas de tabique. Por isso, em alguns casos, mais do que apresentar conclusões, serão levantadas hipóteses. Com efeito, a complexidade do próprio sistema construtivo e a, ainda,

falta de conhecimento intrínseco do mesmo (aspetos construtivos, por exemplo) e do seu comportamento estrutural condiciona a análise realizada.

O campo de amostragem utilizado é vasto. Mesmo assim detetaram-se algumas lacunas que serão alvo de análise em trabalhos futuros.

Foram escolhidas paredes representativas de diversas situações: em pisos distintos, em paredes exteriores e interiores, com ou sem aberturas, de maior ou de menor dimensão, por exemplo.

A obtenção de valores relativos à primeira frequência natural *in situ*, permitiu, após o estudo analítico, alertar para algumas hipóteses sobre o comportamento das paredes de tabique. Os valores obtidos no estudo analítico não foram os esperados, isto é, não se aproximaram, em grande parte dos casos, dos valores medidos *in situ*. Isto quer dizer que analiticamente há dificuldade em traduzir o real comportamento da estrutura. No entanto a aproximação dos valores analíticos (através de uma série de hipóteses válidas) aos reais permite tirar algumas ilações importantes.

A ligação das paredes de tabique aos pisos adjacentes (superiores e inferiores) é de grande relevância. Nesses sentido, nos pisos inferiores foram estudadas três hipóteses de ligação externa: parede simplesmente apoiada, duplamente encastrada e uma situação intermédia, isto é, uma articulação e um encastramento. No piso mais elevado, e uma vez que se verificou que a frequência nestes pisos era menor, foi também estudada a hipótese (extrema) de uma parede com um funcionamento em consola. Esta questão é pertinente pois, como é sabido, o pavimento do desvão (não acessível) normalmente tem menor rigidez que os pavimentos intermédios. E em alguns casos esta hipótese revelou-se assertiva pois os valores analíticos obtidos foram os que mais se aproximaram dos reais.

Como já foi referido, a introdução de três casos distintos de valores para o momento de inércia revelou conclusões importantes. Com efeito, o caso 3, em que na determinação do momento de inércia se entrou com a espessura total da parede, foi o que mais se aproximou do valor obtido nos ensaios.

Para aclarar esta questão foi determinado, analiticamente, o valor do módulo de Young (E), utilizando para este cálculo a frequência obtida *in situ*. Também aqui, apenas no terceiro caso se obtiveram valores que se consideram realistas. Com efeito, ao entrar com a espessura total, está-se a considerar o papel da argamassa. Como se sabe, o valor do módulo de Young das argamassas é significativamente menor do que o da madeira de pinho. Ao obter-se valores analíticos inferiores a 6 GPa, conclui-se que para o nível de vibração introduzido na parede há uma contribuição importante das argamassas. Por outras palavras, conclui-se que na mobilização da energia inicial durante a vibração (em termos da rigidez inicial elástica), o papel da argamassa é relevante, isto é, também contribui para o comportamento estrutural da parede.

O fato de, ainda assim, os valores serem algo díspares realça o papel das ligações aos pavimentos e da necessidade de incrementar o conhecimento sobre os sistemas construtivos aplicados à época da construção.

A forma como é feita a redistribuição das rotações é a “chave” para se fazer a “ponte” entre o estudo analítico e o comportamento real.

A influência da carga axial na resposta estrutural não é fácil de quantificar. Como já se referiu, a tensão axial instalada na estrutura não está diretamente relacionada com a primeira frequência natural. No entanto, influi com a resposta estrutural do sistema. Não restam dúvidas que neste tipo de construção, os elementos estruturais principais, como as paredes de alvenaria e os pavimentos de madeira, trabalham em conjunto com os elementos estruturais secundários, como se podem considerar as paredes de tabique.

Na análise dos resultados obtidos, evidencia-se que a ação axial influencia o valor da frequência, uma vez que pode impedir, ou não, a rotação nos apoios.

Em relação aos restantes itens analisados, aquele que parece ter uma relação direta com o valor da frequência é o da esbelteza. Apesar de nos dois edifícios não se conseguir obter uma proporcionalidade direta, não há dúvida sobre a influência do rácio altura vs. espessura da parede.

Outro aspeto interessante, mas complementar ao que aqui foi dito, é que a posição (a meio ou no extremo da parede, junto a aberturas ou a outras paredes na ortogonal) e o papel da parede (exterior ou interior) não têm grande influência no comportamento dinâmico. Isto é, os valores, muito semelhantes em pontos da mesma parede, independentemente da sua localização, indiciam que o que verdadeiramente condiciona a frequência são as ligações ao exterior.

5. Modelação numérica de paredes de tabique

No contexto atual, a modelação numérica representa uma enorme vantagem pois possibilita obter de forma rápida uma simulação aproximada do comportamento de qualquer estrutura. Deste modo, surge o presente capítulo, que tem como objetivo principal a validação de um modelo numérico que seja capaz de simular o comportamento estrutural de paredes de tabique, de acordo com os ensaios anteriormente descritos.

A realização desta proposta de modelação tem como principal base de trabalho os valores obtidos no ensaio dinâmico descrito nesta dissertação e a caracterização dos materiais das paredes de tabique que se encontram descritos e realizados na dissertação de Pinto (2013).

Deste modo, com vista a alcançar os objetivos pretendidos, será descrito o modelo numérico adotado, a sua geometria e a sua disposição espacial. Posteriormente, serão comparados os resultados obtidos no modelo numérico com os resultados do ensaio dinâmico.

Com base na informação apresentada nos capítulos 3 e 4, neste capítulo são estudadas duas paredes de tabique do Ed.1 da Travessa das Escadinhas. Optou-se por se escolher uma parede no rés-do-chão e outra no último piso.

Para se efetuar este estudo recorreu-se ao programa de cálculo automático SAP2000. Trata-se de um programa de elementos finitos e é uma ferramenta de cálculo muito utilizada no estudo da modelação e do comportamento de elementos estruturais.

5.1 Modelo proposto

Como foi referido anteriormente, e de modo a validar o modelo numérico adotado, será utilizada a geometria e dimensões reais dos vários elementos constituintes das paredes ensaiadas, assim como as condições de apoio. As características geométricas das referidas paredes são as referidas no capítulo 4.

Por opção, os modelos que são efetuados neste trabalho consideram apenas a contribuição do esqueleto de madeira das paredes (isto é, a sua estrutura resistente), não simulando o material de enchimento nos modelos numéricos.

É conveniente referir que foi necessário realizar uma janela de inspeção *in situ* das paredes que foram posteriormente modeladas, de onde se recolheu o máximo de informação necessária acerca dos materiais constituintes das paredes (tábuas, ripas, tipo de secção, espaçamento entre estas), visto as paredes em estudo se encontrarem ainda com o material de enchimento/revestimento.

Nas figuras que se seguem pode visualizar-se as janelas de inspeção para cada uma das paredes que se pretende modelar.



Figura 5-1: Janela de inspeção da parede E1.1



Figura 5-2: Janela de inspeção da parede E4.1

Após a realização das janelas de inspeção, procedeu-se à medição das dimensões das secções (largura (A), espessura (B) e espaçamento horizontal (C)) de todas as tábuas e ripas que eram visíveis, bem como o espaçamento entre elas. Posteriormente fez-se uma média desses valores que foi utilizada para a modelação das paredes. A síntese dos resultados das medições realizadas encontra-se apresentada na Tabela 5-1.

Tabela 5-1: Dimensões médias das secções transversais das tábuas, ripas e pregos

Parede	Dimensões	Secções transversais		
		Tábuas	Ripas	Pregos
E1.1	A (cm)	24,5	3,7	0,3
	B (cm)	4,0	1,0	0,3
	C (cm)	4,0	3,7	-
E4.1	A (cm)	15,0	3,0	0,3
	B (cm)	4,0	1,2	0,3
	C (cm)	2,0	3,0	-

O modelo adotado para validar a simulação do comportamento estrutural das referidas paredes de tabique, foi aquele que se pensa ser o mais realista e que está de acordo com a bibliografia consultada, como é o caso da dissertação de Pinto (2013), de Pires (2013) e Teixeira (2013). A cada um dos modelos estudados foi atribuída a mesma designação que já tinha sido dada a cada uma das paredes ensaiadas, ou seja para a parede localizada no rés-do-chão a designação E1.1 e para a parede localizada no 3º Piso a designação E4.1, respetivamente.

Nos modelos, todos os elementos representados, tábuas, ripas e pregos, foram modelados como sendo elementos do tipo “frame” (biblioteca do SAP2000), pois permite modelar peças lineares e tem 6 graus de liberdade por nó. As propriedades mecânicas consideradas nos elementos estruturais de madeira foram correspondentes à madeira de pinho da classe de resistência C18, que é a espécie que se destaca na construção das paredes deste tipo. As propriedades materiais adotadas para a madeira de pinho nacional da classe de qualidade ‘E’ estão de acordo com a norma NP 4305 [1995], [19] e correspondem à classe de resistência das madeiras resinosas C18 definidas na norma EN338 [2003] [20] e foram comprovadas por Pinto (2013).

Tabela 5-2: Propriedades mecânicas e físicas da madeira de pinho da classe C18

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

Para além da madeira, o material aço é também utilizado na modelação das paredes de tabique, já que representa o material constituinte dos pregos, apresentando-se na tabela que se segue as suas propriedades materiais.

Tabela 5-3: Propriedades materiais do aço dos pregos

E (GPa)	ν	ρ_{mean} (kN/m ³)
199	0,3	76,97

O primeiro modelo de parede a ser modelada e analisado é o E1.1. Este modelo é constituído por 16 tábuas verticais (sendo que 4 tábuas não possuem o comprimento total da parede, porque se encontram acima da porta), com 28,5 cm de espaçamento entre eixos, 84 ripas de madeira espaçadas entre eixos de 7,4 cm, das quais 43 na face superior e 41 na face inferior. As ripas de madeira são definidas da forma mais semelhante à realidade, ou seja, colocadas de forma excêntrica em cada uma das faces da parede. Ao longo das tábuas verticais, e em ambas as faces, são modelados pregos através de elementos de viga (cada prego é constituído por um elemento de viga) dispostos ao longo do eixo y, ou seja, perpendicular ao plano da parede, na ligação das ripas às tábuas. Neste modelo a secção transversal das tábuas é retangular de dimensões $24,5 \times 4,0$ cm², a secção das ripas é também retangular e de dimensões $3,7 \times 1,0$

cm² e relativamente a secção a secção transversal dos pregos foi consideradas quadrada de dimensões $3,0 \times 3,0 \text{ mm}^2$.

O modelo de parede E4.1 é constituído por 19 tábuas verticais espaçadas entre si por 2 cm, correspondendo a um afastamento entre eixos de 17 cm, 80 ripas de madeira espaçadas entre si de 3,0 cm, das quais 41 na face superior e 39 na face inferior. A secção transversal das tábuas é retangular com dimensões $15,0 \times 4,0 \text{ cm}^2$ e a das ripas de dimensões $3,0 \times 1,2 \text{ cm}^2$. Relativamente à secção transversal dos pregos é a mesma que foi utilizada no modelo anterior de dimensões $3,0 \times 3,0 \text{ mm}^2$.

Tendo por base os trabalhos realizados por Pires (2013) e Teixeira (2013), sabe-se que os resultados da análise de elementos finitos dependem do número de elementos em que a peça linear é dividida. Em ambos os trabalhos foi realizado um refinamento da malha de elementos de viga com o intuito de determinar o número mínimo de elementos que devem ser adotados na discretização da peça linear para que os resultados numéricos se aproximem o mais possível da realidade. Com recurso à Teoria de Euler chegaram ao valor exato da carga de encurvadura e analisando os resultados concluíram que os elementos lineares devem ser analisados com uma discretização de pelo menos 5 elementos.

Deste modo, para a realização dos modelos adotados optou-se por discretizar os elementos (tábuas e ripas) em 10 elementos, de forma a garantir o rigor necessário.

No seguimento da análise analítica apresentada, também foi feita uma análise com dois valores distintos para o módulo de Young (E). Primeiro modelou-se a parede utilizando-se o valor correspondente à estrutura de madeira. A seguir, realizou-se o mesmo cálculo utilizando-se o valor obtido analiticamente, entrando em consideração com os restantes materiais que constituem a parede.

Nas tabelas que se seguem apresentam-se as propriedades geométricas e mecânicas relativas à seção transversal das tábuas de madeira verticais, as propriedades geométricas das ripas e dos pregos do modelo em análise para cada parede, nomeadamente a área, os momentos de inércia e os raios de giração, em torno de cada um dos eixos principais de inércia. As propriedades geométricas e mecânicas dos pregos são as mesmas para ambos os modelos.

- **Parede E1.1**

Tabela 5-4: Propriedades geométricas e mecânicas da secção transversal das tábuas

Propriedade	Valores
Área	0,0098 m ²
Momento de inércia segundo xx	$1,307 \times 10^{-6}$ m ⁴
Momento de inércia segundo yy	$4,902 \times 10^{-5}$ m ⁴
Raio de giração segundo xx	0,0115 m
Raio de giração segundo yy	0,0707 m

Tabela 5-5: Propriedades geométricas e mecânicas da secção transversal das ripas

Propriedade	Valores
Área	0,00037 m ²
Momento de inércia segundo xx	$3,083 \times 10^{-9}$ m ⁴
Momento de inércia segundo yy	$4,221 \times 10^{-8}$ m ⁴
Raio de giração segundo xx	0,002887 m
Raio de giração segundo yy	0,0107 m

Tabela 5-6: Propriedades geométricas e mecânicas da secção transversal dos pregos

Propriedade	Valores
Área	0,000009 m ²
Momento de inércia segundo xx	$6,75 \times 10^{-12}$ m ⁴
Momento de inércia segundo yy	$6,75 \times 10^{-12}$ m ⁴
Raio de giração segundo xx	0,000866 m
Raio de giração segundo yy	0,000866 m

- **Parede E4.1**

Tabela 5-7: Propriedades geométricas e mecânicas da secção transversal das tábuas

Propriedade	Valores
Área	0,006 m ²
Momento de inércia segundo xx	$8,0 \times 10^{-7}$ m ⁴
Momento de inércia segundo yy	$1,125 \times 10^{-5}$ m ⁴
Raio de giração segundo xx	0,0115 m
Raio de giração segundo yy	0,0433 m

Tabela 5-8: Propriedades geométricas e mecânicas da secção transversal das ripas

Propriedade	Valores
Área	0,00036 m ²
Momento de inércia segundo xx	$4,32 \times 10^{-9}$ m ⁴
Momento de inércia segundo yy	$2,7 \times 10^{-8}$ m ⁴
Raio de giração segundo xx	0,003464 m
Raio de giração segundo yy	0,00866 m

Nas figuras que se seguem é apresentado a vista 3D e vista xy de cada um dos modelos numéricos estudados, retiradas do programa de cálculo automático.

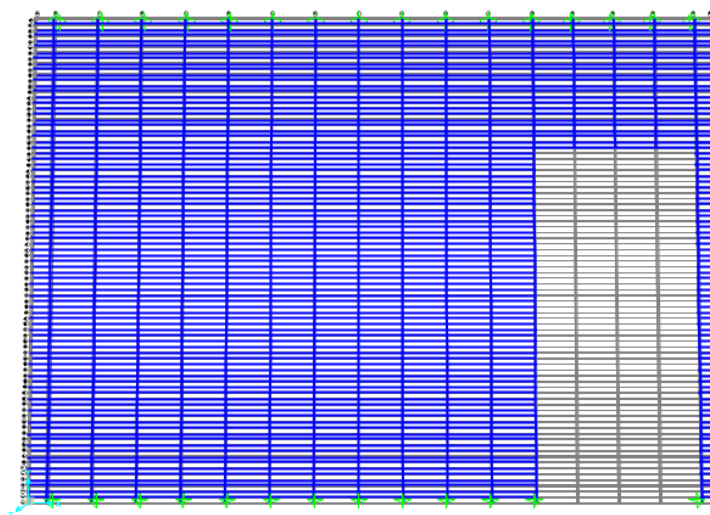


Figura 5-3: Modelo numérico adotado, E1.1

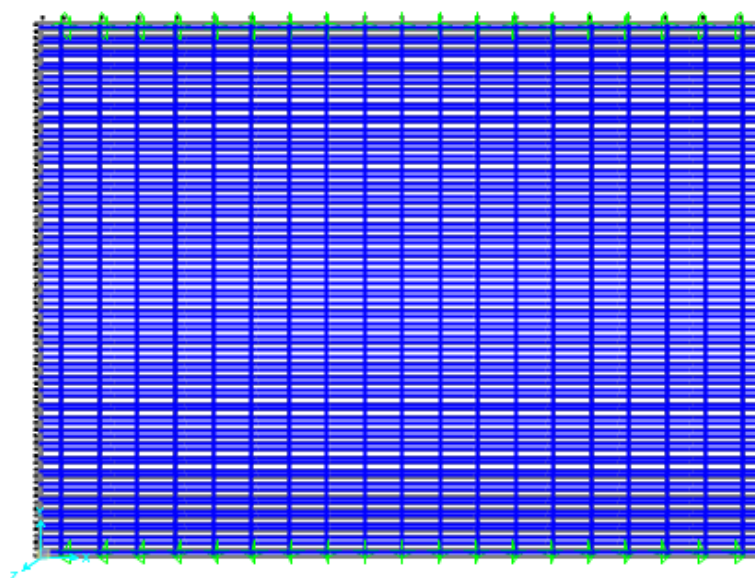


Figura 5-4: Modelos numéricos adotado, E4.1

5.2 Apresentação e análise dos resultados

Para cada um dos modelos apresentados foi calculado o primeiro modo de vibração. Para isso contabilizou-se apenas o peso próprio da estrutura.

Relativamente aos apoios utilizados em cada modelo, procedeu-se da mesma forma que para o cálculo da frequência analítica. Ou seja, realizaram-se três casos distintos: no primeiro analisou-se a estrutura simplesmente apoiada, no segundo a estrutura duplamente encastrada e por último uma estrutura intermédia, isto é, com um apoio articulado e outro encastrado, de modo a obter resultados que permitissem ser comparados com os obtidos tanto analiticamente como no ensaio dinâmico.

5.2.1 Parede E1.1

Os resultados obtidos na modelação numérica realizada para a parede E1.1 encontram-se apresentados na tabela que se segue.

Tabela 5-9: Frequências obtidas no Sap2000 – E1.1

Casos	Frequência (Hz)					
	Ensaio dinâmico	Estudo analítico	Parede com dimensões reais		Parede com faixa de 1m	
			Sap2000 (E=6GPa)	Sap2000 (E=3,5GPa)	Sap2000 (E=6GPa)	Sap2000 (E=3,5GPa)
1º Simplesmente apoiada	11,1	3,11	6,25	4,79	6,35	4,85
2º Duplamente encastrada		7,16	14,39	11,00	14,38	10,98
3º Intermédia		4,87	9,33	7,20	9,92	7,57

Analisando os resultados obtidos, verifica-se uma discrepância entre as 3 situações expostas, fruto da dificuldade em traduzir, quer analiticamente quer através da modelação numérica o comportamento real das paredes de tabique. No entanto, saliente-se o resultado obtido através do modelo numérico para o 2.º caso, utilizando como módulo de elasticidade o valor de 3,5 GPa. Valor obtido analiticamente, de acordo com Clough e Penzien (1993), para uma secção total, isto é, para a espessura total da parede.

De seguida apresentam-se as deformadas obtidas no programa de cálculo automático Sap2000, correspondentes aos três casos para o 1º modo de vibração, para cada módulo de Young.

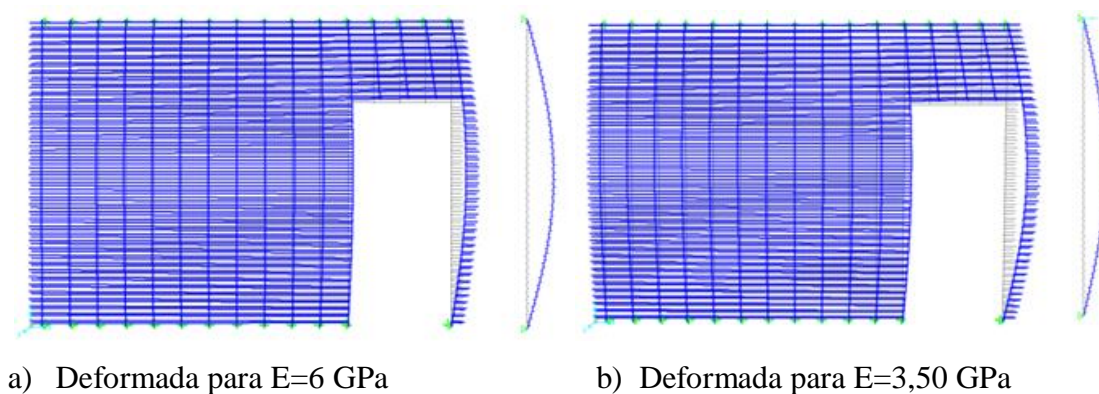


Figura 5-5: Deformada correspondente ao 1º caso

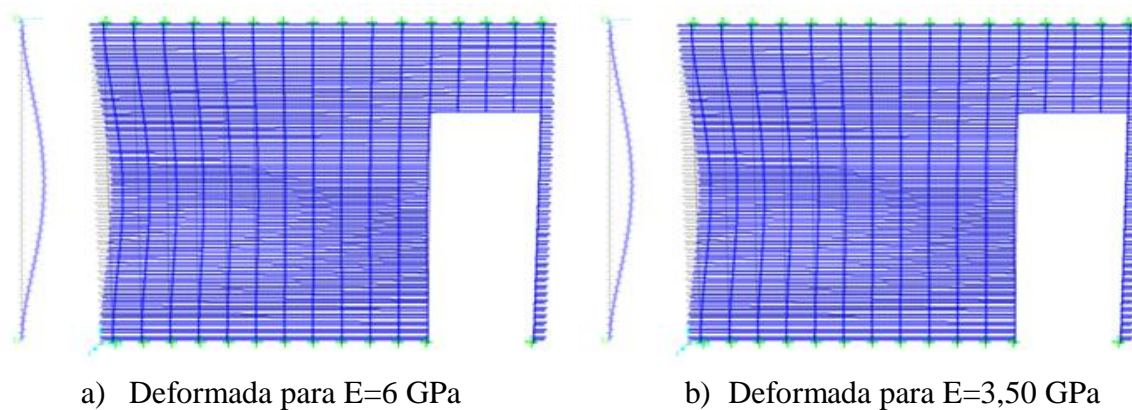


Figura 5-6: Deformada correspondente ao 2º caso

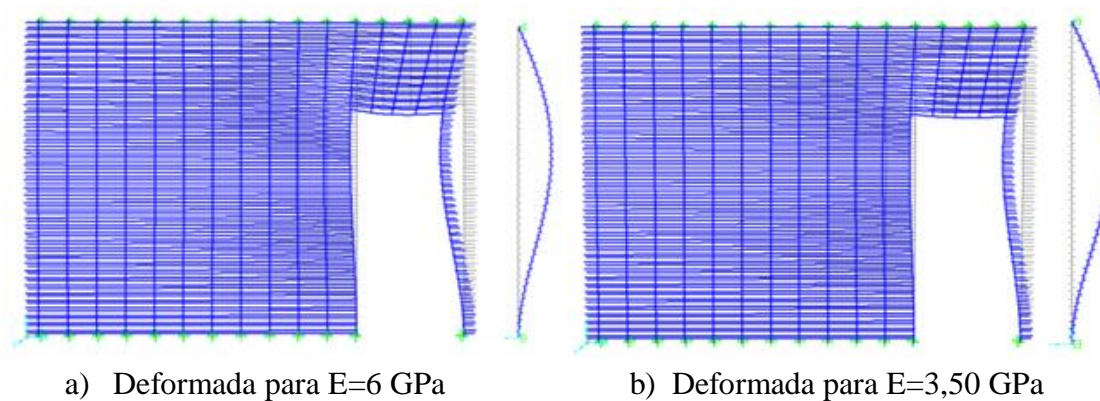


Figura 5-7: Deformada correspondente ao 3º caso

5.2.1.1 Parede E1.1 com faixa de 1m

De seguida apresentam-se as deformadas obtidas para a parede E1.1 com faixa de 1m, correspondentes aos três casos para o 1º modo de vibração, para cada módulo de Young.

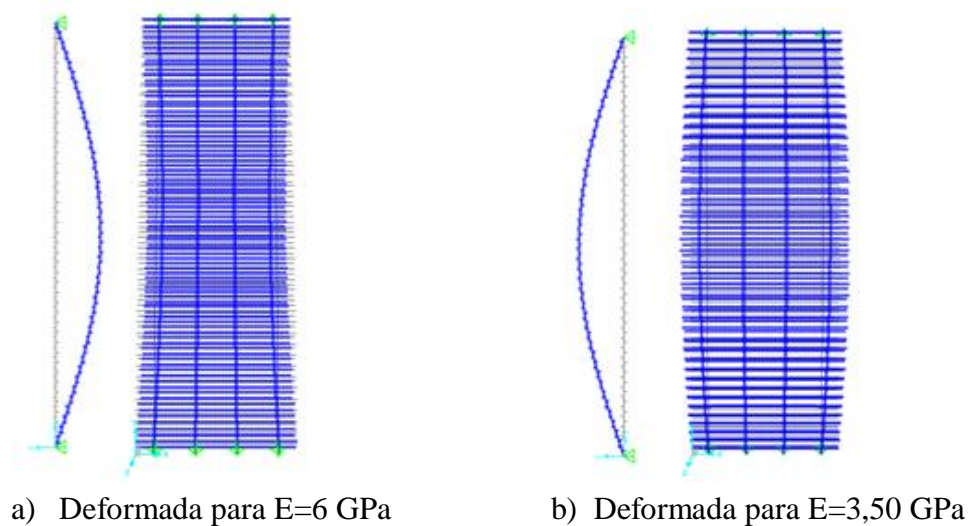


Figura 5-8: Deformada correspondente ao 1º caso

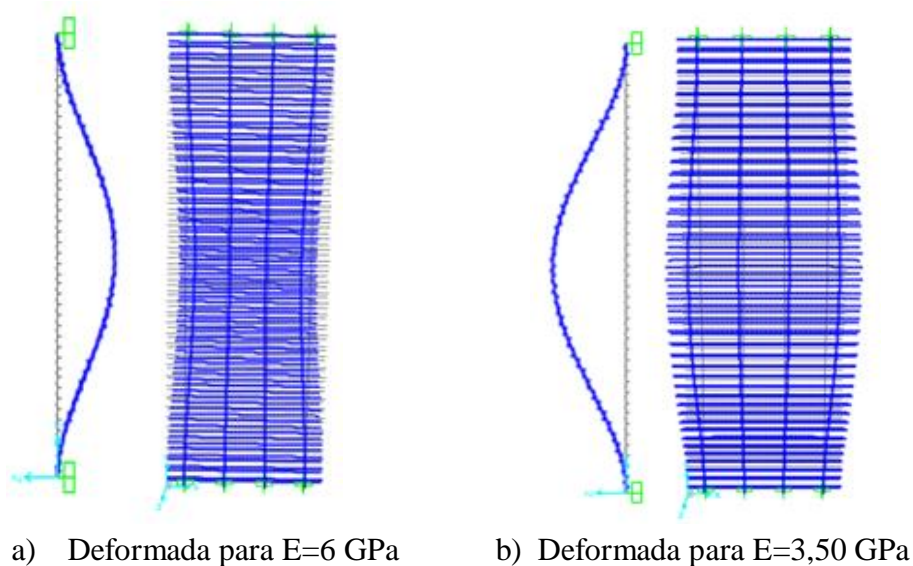


Figura 5-9: Deformada correspondente ao 2º caso

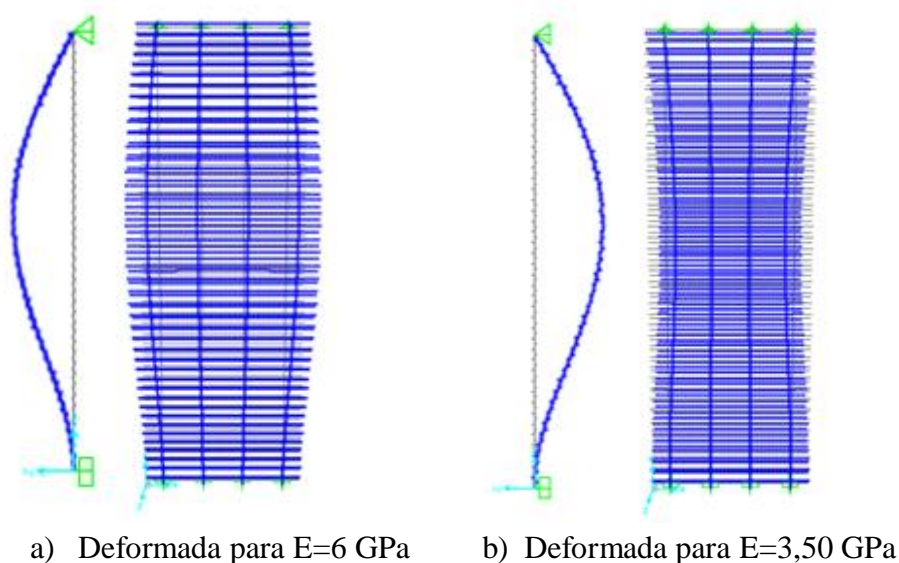


Figura 5-10: Deformada correspondente ao 3º caso

5.2.2 Parede E4.1

Para a parede E4.1 procedeu-se da mesma forma e analisou-se a estrutura para os três casos atrás referidos, acrescentam-se uma quarta hipótese: funcionamento em consola. Na tabela que se segue apresentam-se os resultados obtidos no Sap2000.

Tabela 5-10: Frequências obtidas no Sap2000 – E4.1

Casos	Frequência (Hz)					
	Ensaio dinâmico	Estudo analítico	Parede com dimensões reais		Parede com faixa de 1m	
			Sap2000 (E=6GPa)	Sap2000 (E=4,36GPa)	Sap2000 (E=6GPa)	Sap2000 (E=4,36GPa)
1º Simplesmente apoiada	10,2	5,53	10,61	9,05	10,67	9,10
2º Duplamente encastrada		12,73	24,02	20,48	24,15	20,59
3º Intermédia		8,65	16,57	14,12	16,66	14,20
4º Consola		1,98	3,79	2,62 * ver tabela 4-7(E=2,82GPa)	3,82	2,62 * ver tabela 4-7(E=2,82GPa)

Analisando os resultados obtidos, verifica-se, tal como na parede E1.1, uma discrepância entre as 3 situações expostas, fruto da dificuldade em traduzir, quer analiticamente quer através da modelação numérica o comportamento real das paredes de tabique. No entanto, saliente-se, neste caso, o resultado obtido através do modelo numérico para o 1.º caso,

utilizando como módulo de elasticidade o valor de 6,0 GPa. Neste caso este valor corresponde ao módulo de elasticidade da madeira.

De seguida são apresentadas as deformadas obtidas no Sap2000, correspondentes aos quatro casos para o 1º modo de vibração, para cada módulo de Young.

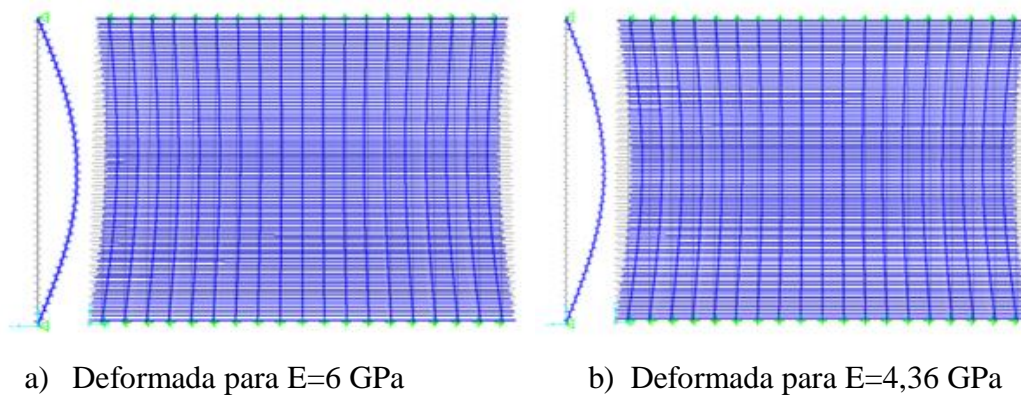


Figura 5-11: Deformada correspondente ao 1º caso

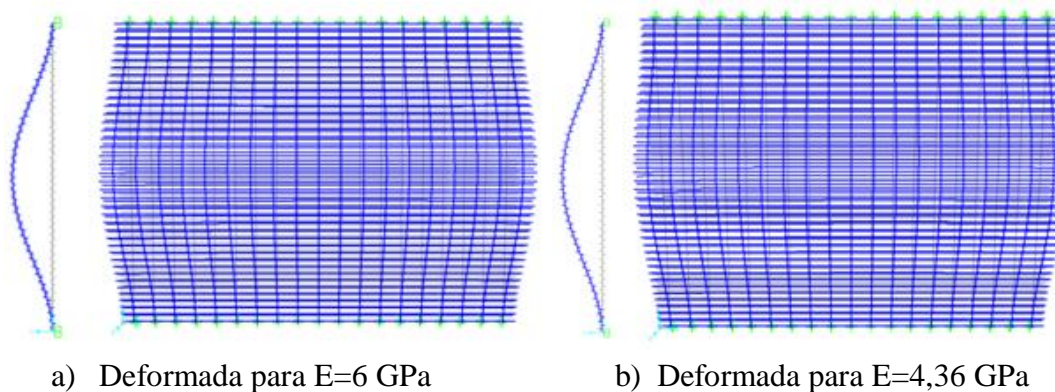


Figura 5-12: Deformada correspondente ao 2º caso

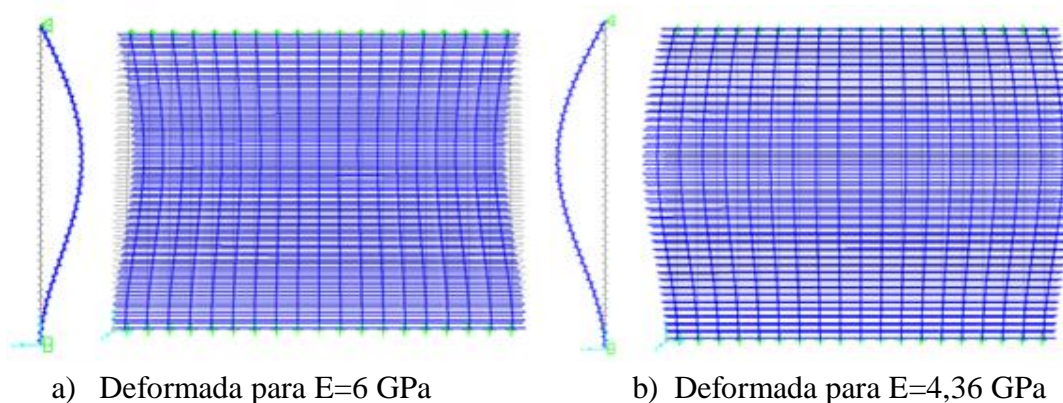


Figura 5-13: Deformada correspondente ao 3º caso

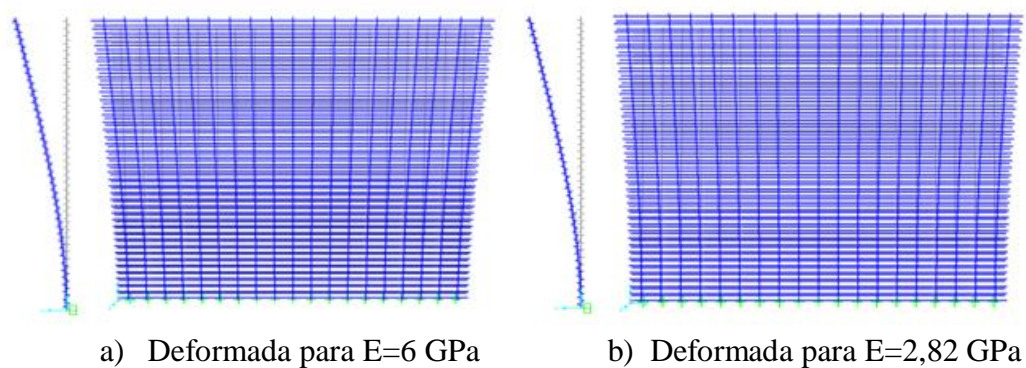


Figura 5-14: Deformada correspondente ao 4º caso

5.2.2.1 Parede E4.1 com faixa de 1m

De seguida apresentam-se as deformadas obtidas para a parede E4.1 com faixa de 1m, correspondentes aos três casos para o 1º modo de vibração, para cada módulo de Young.

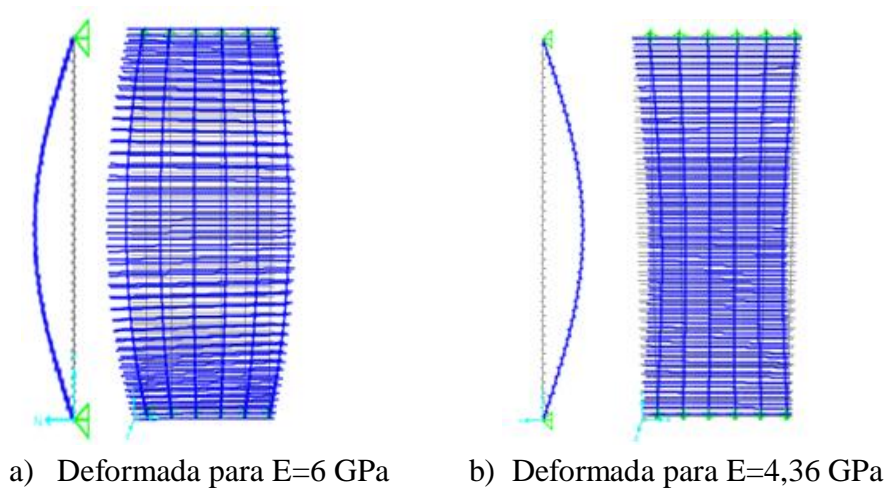


Figura 5-15: Deformada correspondente ao 1º caso

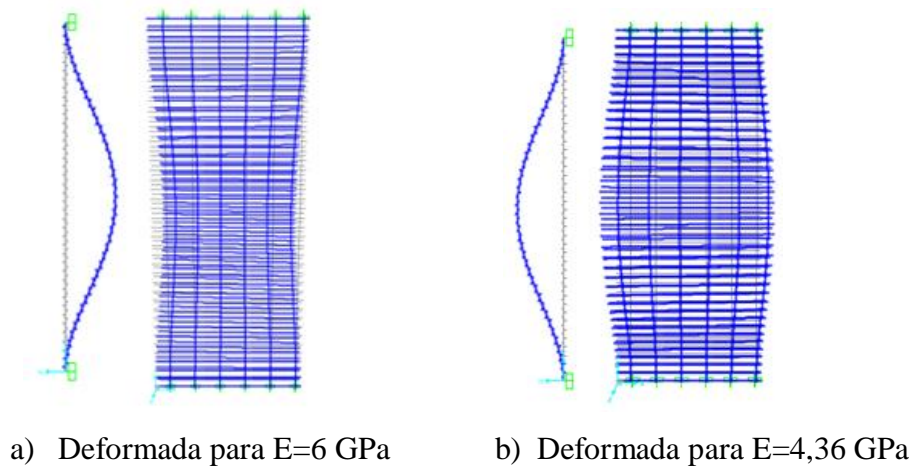


Figura 5-16: Deformada correspondente ao 2º caso

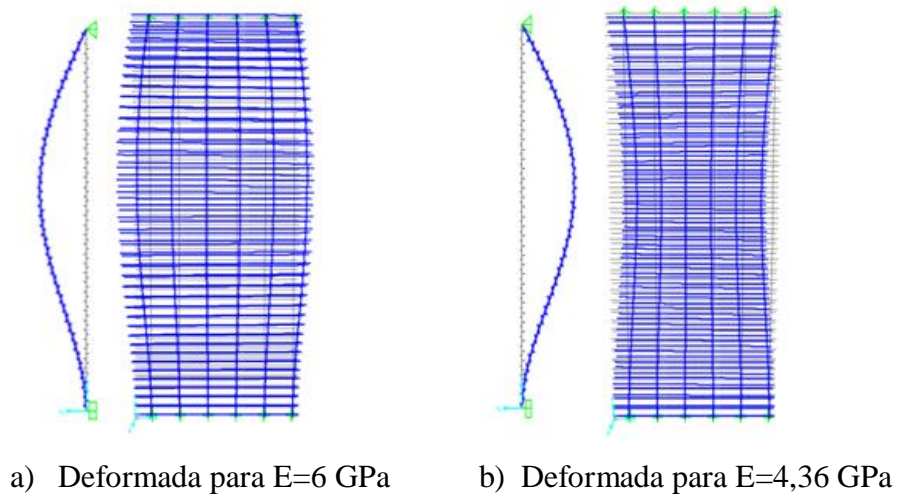


Figura 5-17: Deformada correspondente ao 3º caso

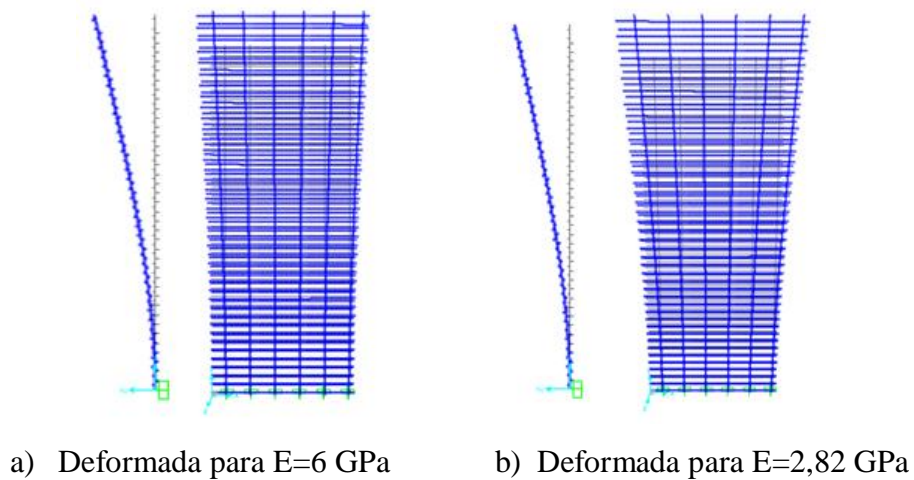


Figura 5-18: Deformada correspondente ao 4º caso

5.3 Conclusões

O objetivo deste capítulo era modelar numericamente as paredes de tabique com o intuito de traduzir com bastante aproximação com o que acontece na realidade. Com efeito, uma vez que se obteve a primeira frequência natural *in situ*, este fato constitui uma boa base de trabalho no sentido de se aproximar os resultados numéricos obtidos dos reais. As diferenças encontradas são facilmente explicadas se tivermos em conta o fato de nos modelos adotados não se ter tido em conta: o material de enchimento, o estado de degradação da madeira, o facto de as secções transversais das barras serem distintas, de não ser possível simular as condições de apoio como elas são na realidade, da ligação entre os pregos e a madeira ser muito complexa de modelar numericamente, entre outros fatores que possam ter influenciado os resultados obtidos.

Como era esperado, o modelo simplificado da parede, com um comprimento de um metro, apresenta resultados idênticos aos obtidos com o modelo da parede inteira.

O modelo apresentado para estas paredes pode ser a base de trabalho para outros estudos mais aprofundados nesta área, que permitam chegar a uma simulação com mais eficácia das paredes em tabique existentes. Um estudo mais aprofundado sobre as paredes de tabique e os elementos constituintes permitirá refinar o modelo proposto.

6. Conclusões e trabalhos futuros

6.1 Conclusões

A realização deste trabalho incidiu na caracterização do comportamento estrutural de paredes de tabique de edifícios antigos situados no centro histórico de Viseu. Tal como em outros locais do nosso país, verificou-se a existência de uma grande quantidade de edifícios com este tipo de sistema construtivo.

Através da revisão bibliográfica efetuada constatou-se que em Portugal, apesar de existir um vasto património construído com elementos de tabique, esta é uma técnica que apresenta um reduzido conhecimento técnico, nomeadamente sobre o seu comportamento estrutural.

Tendo por base o estudo efetuado aos edifícios em análise, comprovou-se que o sistema estrutural característico destes edifícios é composto por paredes resistentes de alvenaria de pedra, com pavimentos e cobertura em madeira de pinho. Em algumas construções, nomeadamente em edifícios que foram ampliados em altura, observou-se a utilização de paredes exteriores em tabique, com um papel de elemento resistente. Nos pisos inferiores constatou-se a frequente utilização de parede de tabique, com função de compartimentação. Nos edifícios em estudo, a tipologia de paredes encontrada foi a de tabique simples, isto é, uma única fiada de tábuas verticais.

Os ensaios não destrutivos realizados nas paredes de tabique permitiram determinar a resposta estrutural deste tipo de estruturas, tendo-se chegado a resultados relevantes tanto no ensaio dinâmico como no ensaio do georadar.

Em relação ao georadar, conclui-se que esta técnica é muito útil, uma vez que permite adquirir uma série de dados que possibilitam caracterizar geometricamente as paredes ensaiadas. Entre esses dados citem-se: a espessura da camada de revestimento, a localização dos elementos de madeira (tábuas e ripas), a sua dimensão e espaçamento. Realce-se que esta é uma técnica totalmente não destrutiva. Por isso, a sua utilidade é muito válida, nomeadamente nas paredes interiores. Há, no entanto, dois fatores negativos: o custo do equipamento e a necessidade do ensaio ser realizado, bem como os dados serem interpretados, por técnicos credenciados.

Apesar de, com esta dissertação, se estar a iniciar o estudo do comportamento dinâmico de paredes em alvenaria de tabique, desde já se pode concluir que os dados adquiridos permitiram levantar uma série de informação que será a base de trabalhos futuros a desenvolver. Em primeiro lugar referir que este tipo de ensaios se revelou bastante útil. Também é um ensaio não destrutivo (apenas necessita de uma ligação simples, furo por exemplo, à estrutura). A obtenção da primeira frequência natural, em conjunto com informação sobre as características geométricas e mecânicas do material existente nas paredes de tabique, permite, por exemplo, determinar o módulo de elasticidade destas, como uma estrutura única, informação fundamental, por exemplo, para melhorar/refinar a modelação numérica deste tipo de estruturas. Em complemento, os dados obtidos permitiram concluir que o tipo de ligação entre as paredes de tabique, os pavimentos adjacentes e as paredes resistentes de alvenaria de pedra desempenha um papel primordial que condiciona o seu comportamento dinâmico.

Para além de outros aspetos mais específicos já apresentados na conclusão do capítulo 5 um dos aspetos mais significativos que se obteve da análise e aqui efetuada é a participação da argamassa no comportamento dinâmico da parede.

A modelação numérica aqui desenvolvida permitiu obter respostas dinâmicas similares às obtidas *in situ*, permitindo a sua validação. No entanto, ainda são modelos complexos e algo difíceis de controlar.

Este estudo constitui uma relevante base de trabalho para projetos futuros. A dificuldade de traduzir analiticamente e até numericamente os resultados obtidos *in situ* é uma realidade.

As conclusões expostas neste trabalho são, para a comunidade acadêmica, para o setor da reabilitação e até para as entidades promotoras deste tipo de obras, uma mais-valia importante pois fornecem dados de relevância sobre a interação entre as paredes de tabique e a restante estrutura. Assim, em futuras obras de reabilitação esses aspetos devem ser alvo de detalhe e de regras específicas de construção.

6.2 Trabalhos futuros

Tendo em conta todo o trabalho desenvolvido ao longo desta Dissertação de Mestrado, torna-se importante desenvolver trabalhos de investigação adicionais nesta área de modo a ser possível efetuar:

- A continuação de um estudo detalhado de todos os elementos constituintes das construções em tabique, principalmente a madeira, a terra e os pregos, através de várias campanhas de ensaios (quer em número, quer em diversos elementos construtivos distintos), de forma a conseguir-se melhorar e aprofundar o conhecimento dos mesmos, quando aplicados nesta técnica construtiva e alargar este estudo a vários tipos de edifícios onde esta técnica construtiva é aplicada;
- Uma caracterização mais aprofundada sobre a técnica construtiva de tabique, no que diz respeito à interação entre os diversos elementos e sobretudo entre estes e os elementos estruturais principais (paredes resistentes de alvenaria e pavimentos de madeira adjacentes);
- Ficou provada a importância da interação das paredes de tabique com os pavimentos adjacentes. Assim, é necessário um conhecimento mais aprofundado destes pavimentos, nomeadamente sobre as características mecânicas, a sua rigidez, sobre o seu estado de conservação, etc.;

- Desenvolver uma campanha de ensaios dinâmicos, complementar aos aqui apresentados. É necessário conhecer melhor a resposta dinâmica das paredes de tabique. Para além da primeira frequência natural é necessário determinar os restantes modos de vibração. Em complemento, seria interessante alargar este estudo a paredes de tabique com diversas valências: exteriores e interiores, de tabuado simples e duplo, de diversas esbeltezas, com áreas distintas (comprimento e altura), etc.;
- Neste ensaio dinâmico, os pontos de ensaio foram todos colocados de forma linear, isto é, à mesma altura. Seria interessante escolher algumas paredes modelo e colocar uma série de acelerómetros que abrangessem toda a área da parede, isto é, junto aos apoios (superiores e inferiores) e a meio vão, junto a aberturas (portas e janelas), na ligação entre as paredes (tabique/tabique e tabique/alvenaria de pedra), por exemplo;
- Desenvolver um modelo numérico de cálculo automático que inclua o material de enchimento e de revestimento, de forma a compreender qual a influência em diferentes casos de carga. A modelação pode e deve ser alargada a outro tipo de elementos finitos, como os elementos planos tipo “shell”.

REFERÊNCIAS

- Azevedo, H. (2010). *Reforço de estruturas de alvenaria de Pedra, Taipa e Adobe como elementos de madeira maciça* (Dissertação de Mestrado). Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal.
- Cachim, P. (2007). *Construções em Madeira: a madeira como material de construção*. Porto: Publindústria.
- Cardoso, R. (2013). *Construção de tabique: Construção sustentável* (Tese de Doutoramento). Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real, Portugal.
- Carvalho, A. (1996) *Madeiras Portuguesas - Estrutura anatómica. Propriedades. Utilizações* (Volume 1 e 2). Lisboa: Instituto Florestal.
- Carvalho, J. (2009). *Construções em tabique na região de Trás-os-Montes e Alto Douro* (Dissertação de Mestrado). Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real, Portugal.
- Cepeda, A. (2009). *Construções de tabique existentes na Associação de Municípios do Alto Tâmega* (Dissertação de Mestrado). Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real, Portugal.
- Clough, R e Penzien, J (1993). *Dynamics of Structures*. 2ª Edição. University of California, Berkeley.
- Fernandes, M. (2006). Técnicas de construção em terra. In *10ª mesa redonda de Primavera* (20-25). Porto: FLUP.
- Fernandes, M. (2007). Os Adobes e alvenaria de Adobe em Portugal. In *V Seminário Arquitetura de Terra em Portugal*. Aveiro.

Fernandes, F. (2007). *Aplicações do georadar na reabilitação e deteção de anomalias*. Universidade do Minho. Guimarães.

Franco, D. (2010). *Avaliação das potencialidades do georadar em Engenharia Civil*. Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal.

Gonçalves, C. (2010). *Construção de Tabique da Associação de Municípios da Terra Quente Transmontana (AMTQT)* (Dissertação de Mestrado). Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real, Portugal.

Google Maps. Disponível: <https://maps.google.pt/>

Hivoss (2007). Vibrações em pavimentos. Recomendações Técnicas de Projeto. <http://www.stb.rwth-aachen.de/projekte/2007/HIVOSS/HIVOSS.ht>

Martinho, J. (2010). *Construção de Tabique na Associação de Municípios da Terra Fria do Nordeste Transmontano (AMTFNT)* (Dissertação de Mestrado). Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real, Portugal.

Minke, G. (2006). *Building with Earth, Design and Technology of a Sustainable Architecture*. Birkhäuser: Publishers of Architecture, Basel-Berlin-Boston.

NP 4305 (1995). *Madeira serrada de pinheiro bravo para estruturas. Classificação visual*. Lisboa: Instituto Português da Qualidade.

NP EN 1990:2009 – Eurocódigo – Bases para o projeto de estruturas.

NP EN 1991-1-1:2009 – Eurocódigo 1 – Ações em estruturas.

NP EN 1995-1-1:2008 – Eurocódigo 5 – Projeto de estruturas de madeira.

Pinto, J.; Varum, H.; Cruz, D.; Sousa, D.; Morais, P.; Tavares... & Vieira, J.(2010,Fevereiro). Characterization of Traditional Tabique Constructions in Douro North Valley Region -

REFERÊNCIAS

Journal WSEAS Transactions on Environment and Development, 2 (6), 105-114.

Pinto, R. (2013). *Caracterização das paredes de tabique do centro histórico de Viseu; estudo numérico* (Dissertação de Mestrado). Escola Superior de Tecnologia de e Gestão de Viseu, Viseu, Portugal.

Pires, A. (2013). *Análise de paredes de tabique e de medidas de reforço estrutural; estudo numérico* (Dissertação de Mestrado). Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal.

Reis, A.; Farinha, M. & Farinha, J. (2012). Tabelas Técnicas: Item 4.2.1 e Item 4.2.3: Estruturas de Madeira.

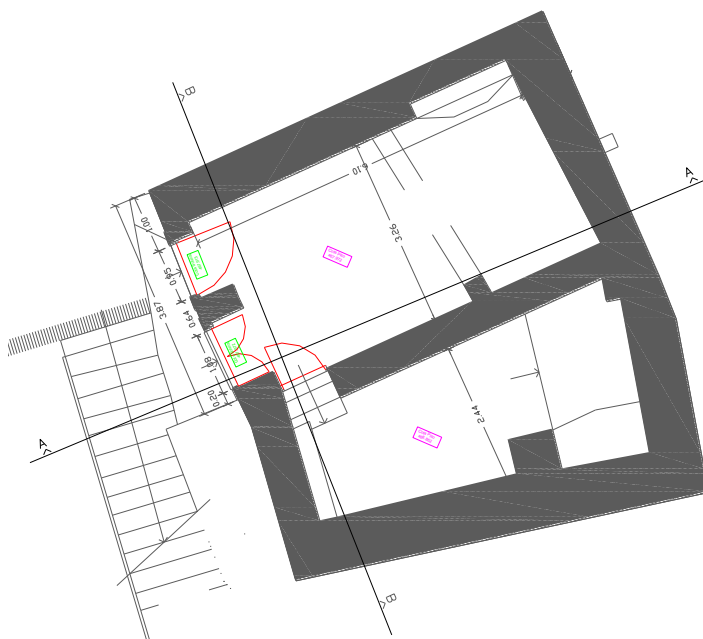
SAP2000. Versão 15.

Teixeira, M. (2013). *Estudo do potencial de reutilização de elementos estruturais de madeira antiga* (Dissertação de Mestrado). Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real, Portugal.

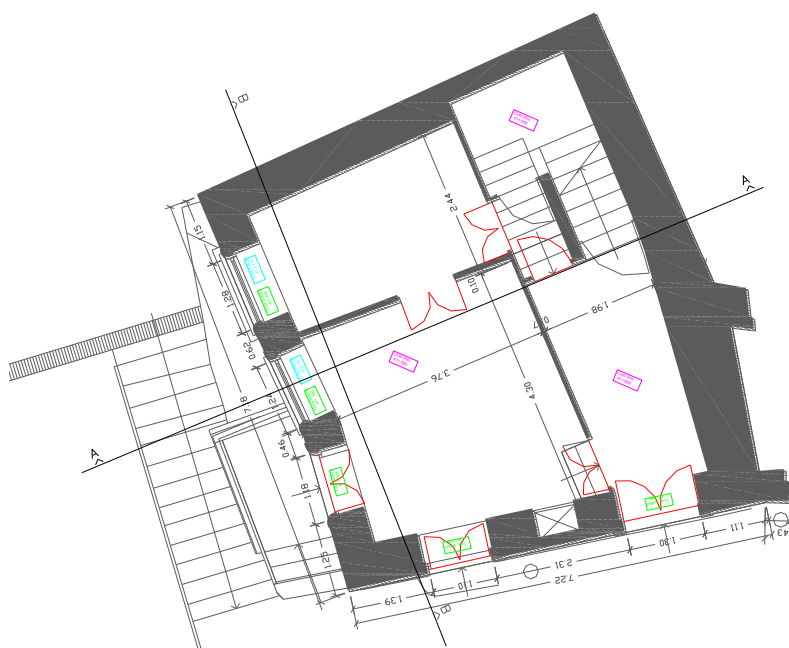
Wikipédia. Disponível: <http://pt.wikipedia.org/>

ANEXO 1 – Peças desenhadas do caso de estudo Ed.1

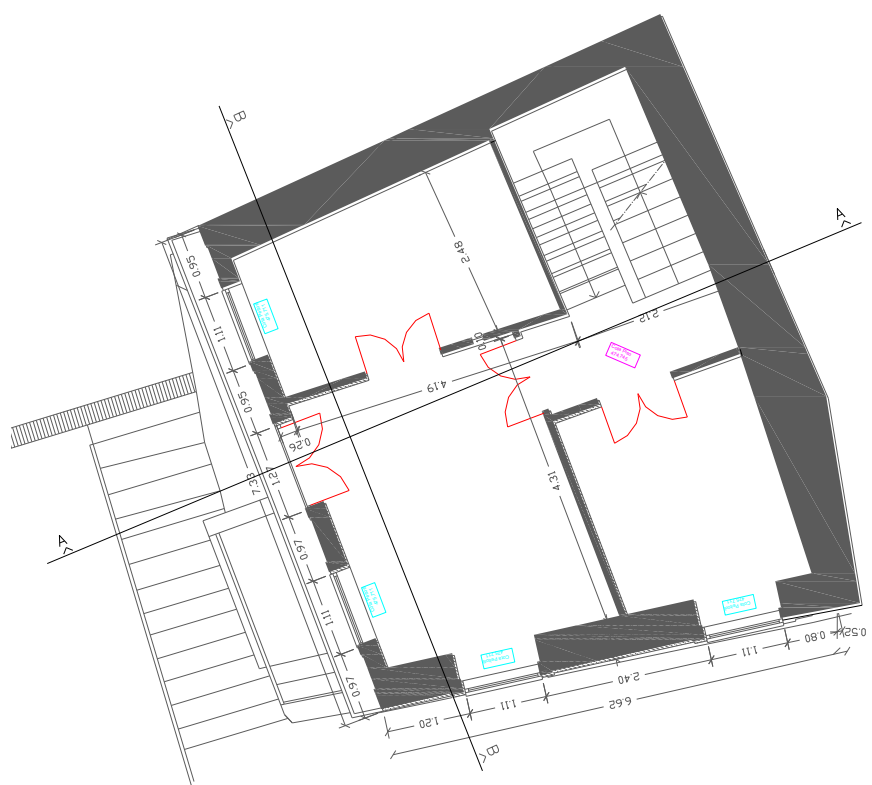
No presente Anexo apresentam-se as peças desenhadas que se referem ao edifício da Travessa das Escadinhas.



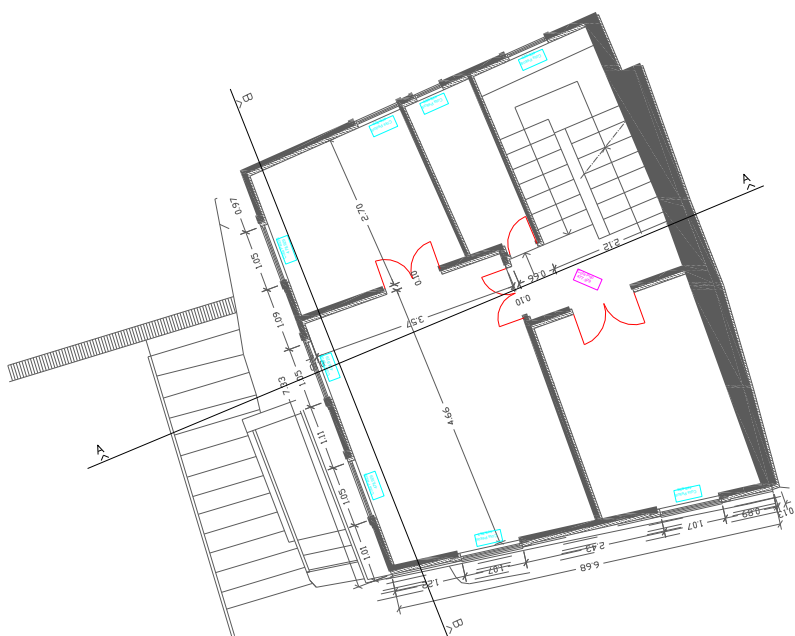
Planta da cave



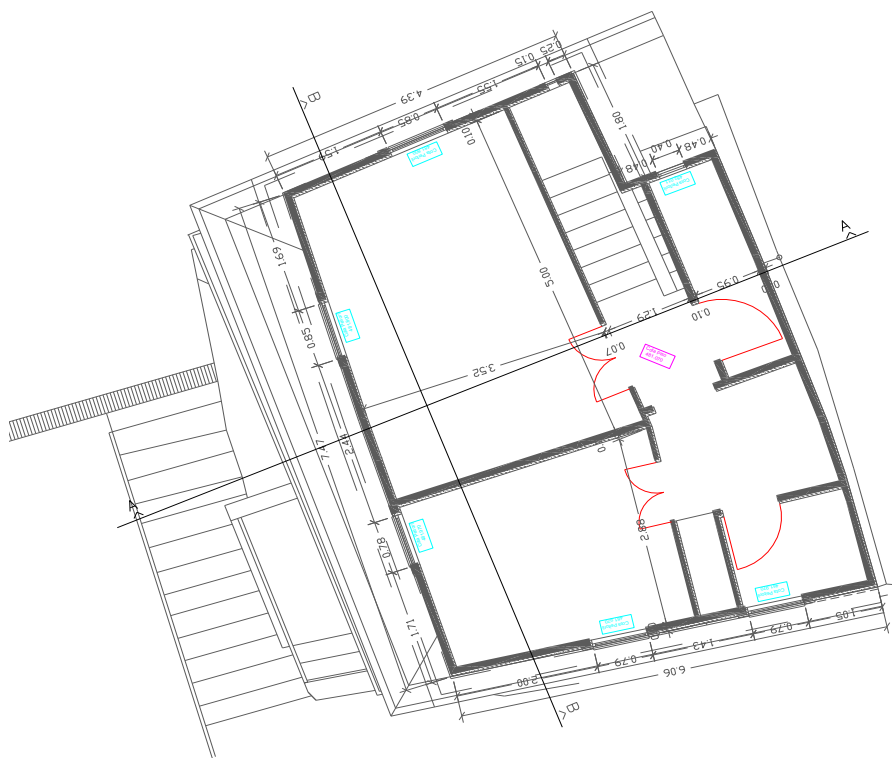
Planta do rés-do-chão



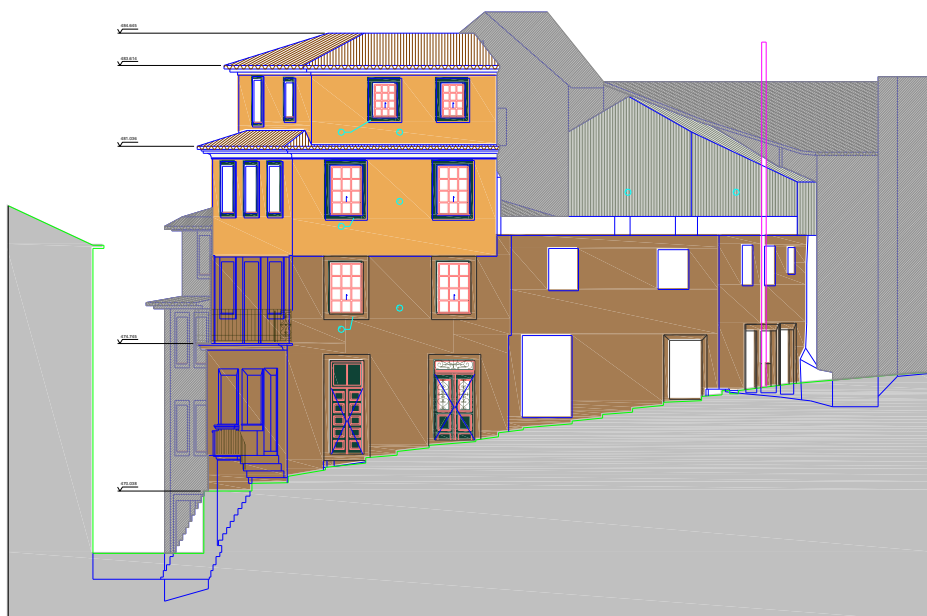
Planta do 1º piso



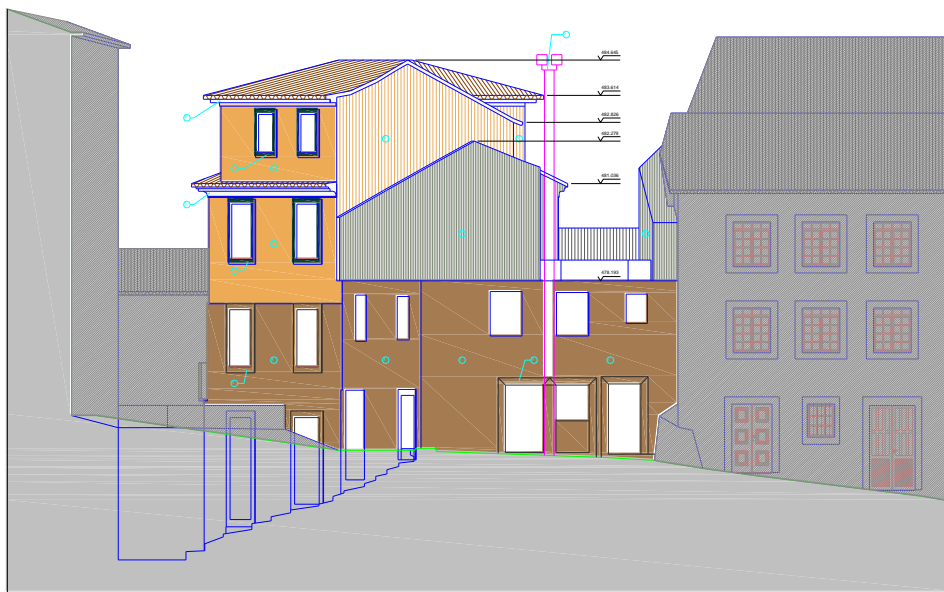
Planta do 2º piso



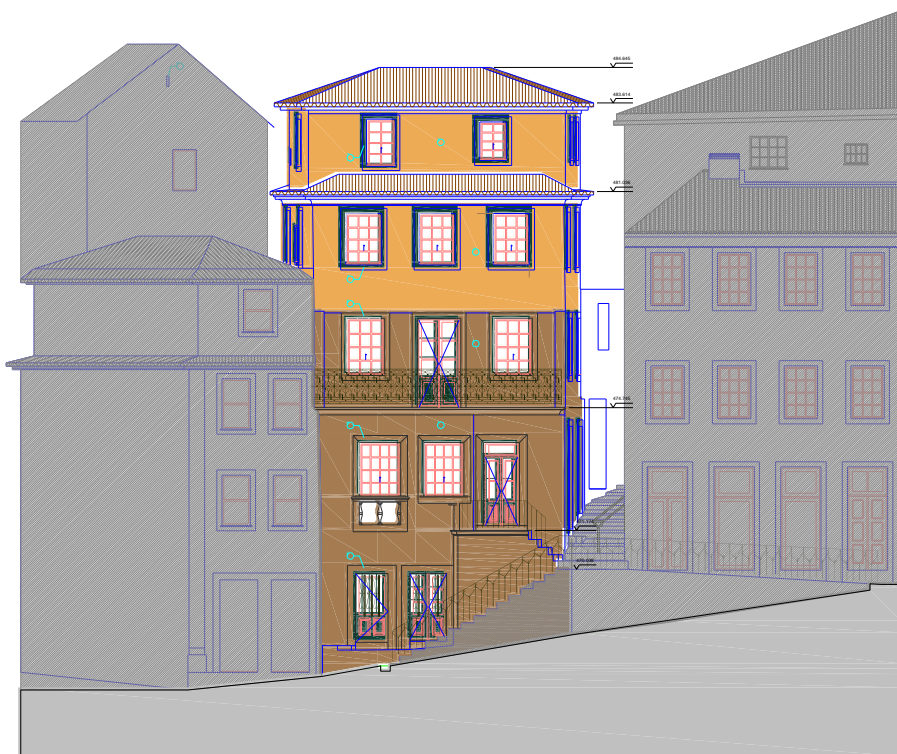
Planta do 3º piso



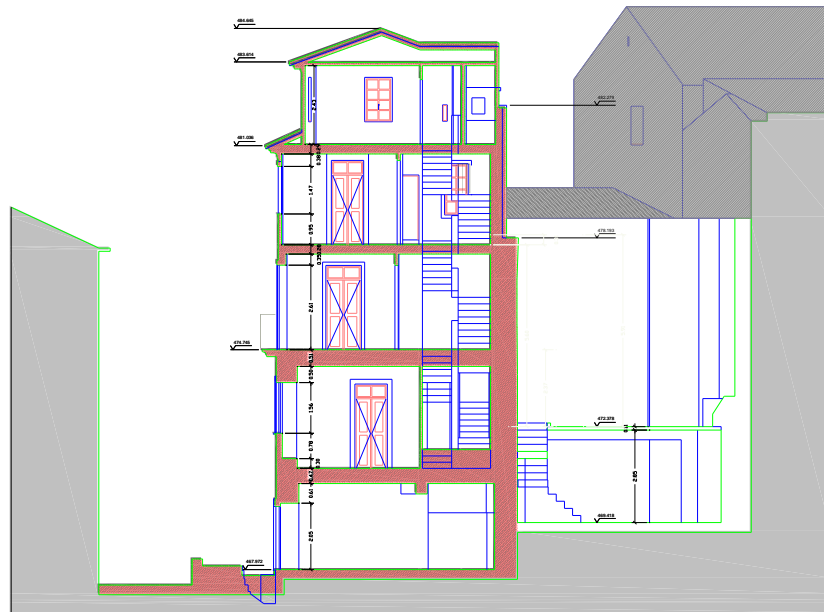
Planta do Alçado Principal



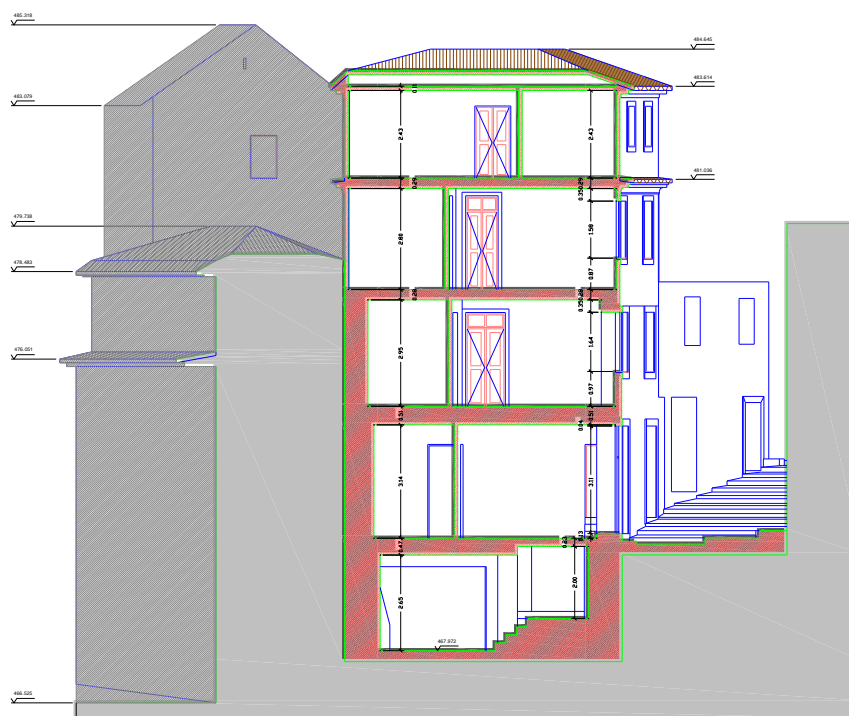
Planta do Alçado Lateral Direito



Planta do Alçado Lateral Esquerdo

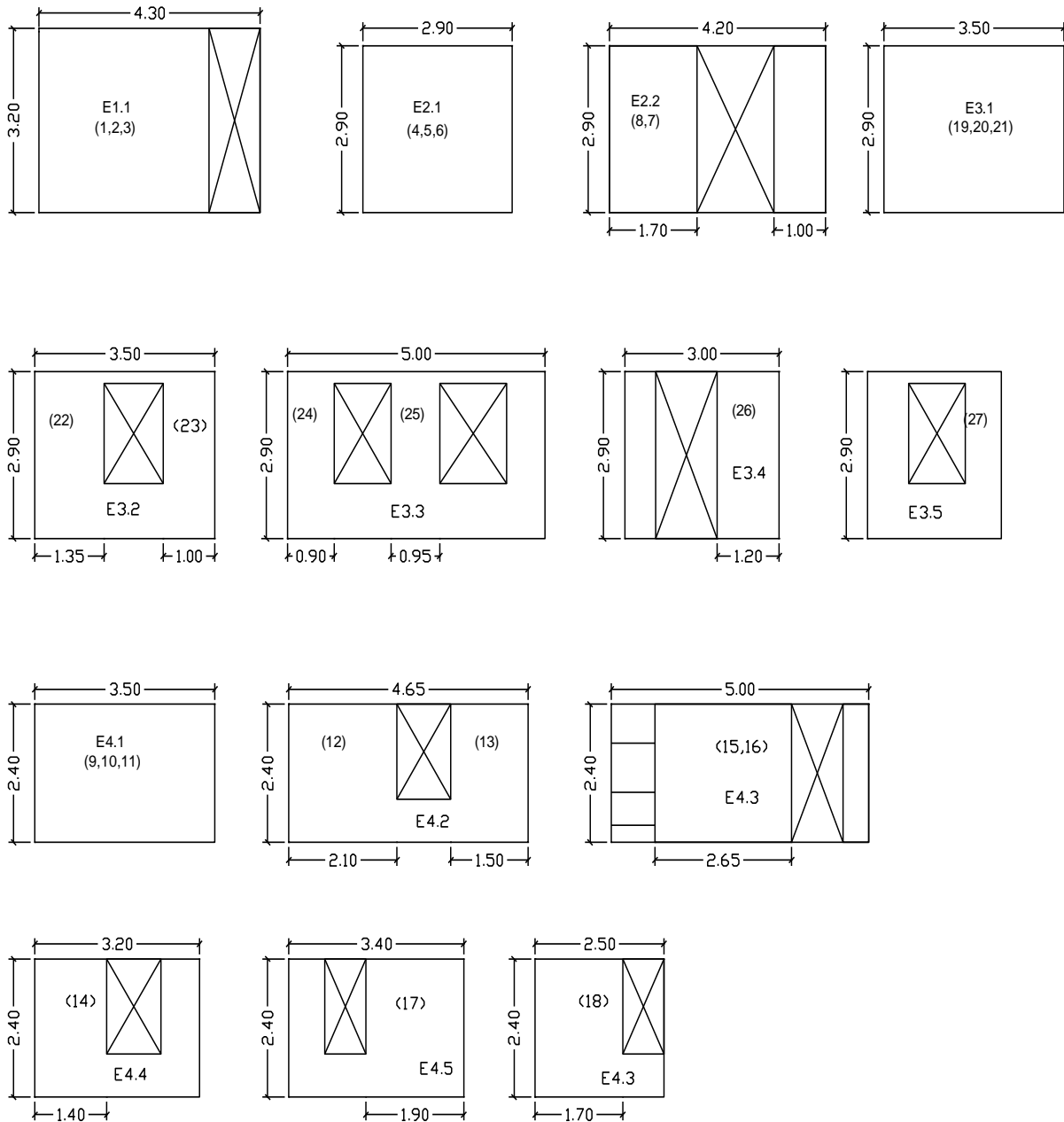


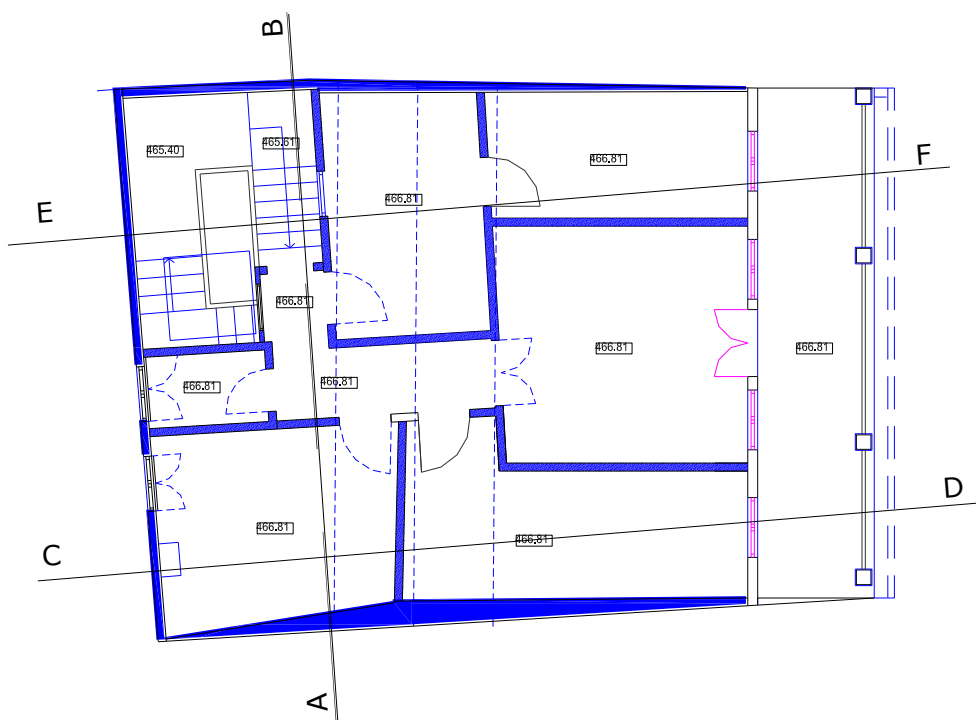
Corte AA



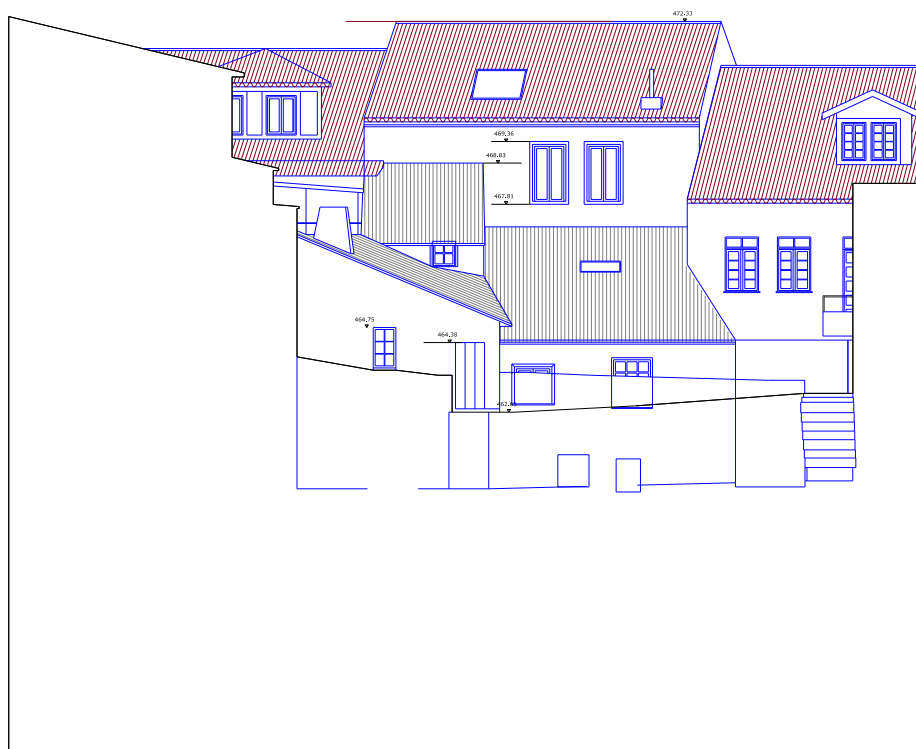
Corte BB

Esquemas exemplificativos das paredes em estudo





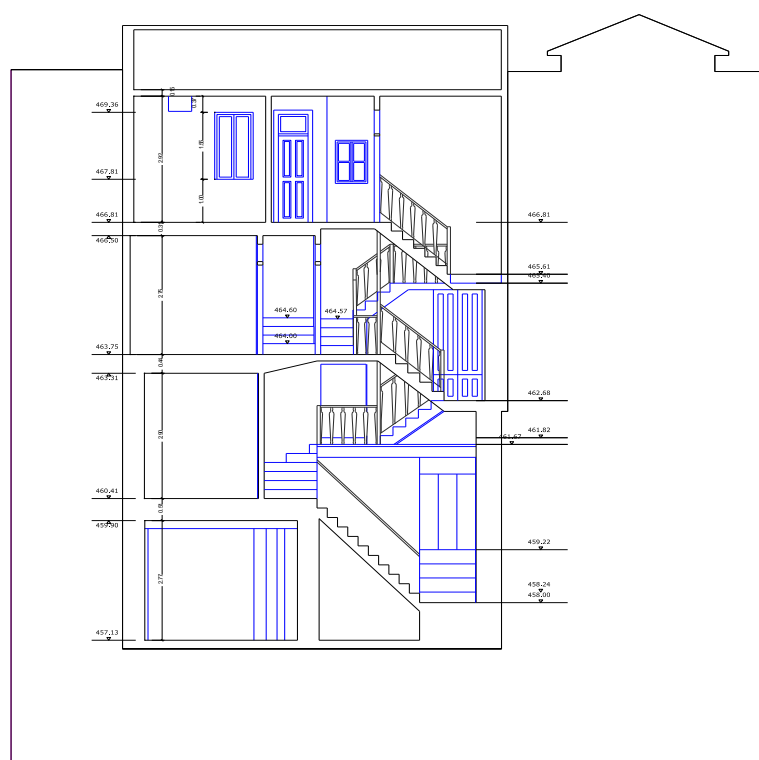
Planta do 3º Piso

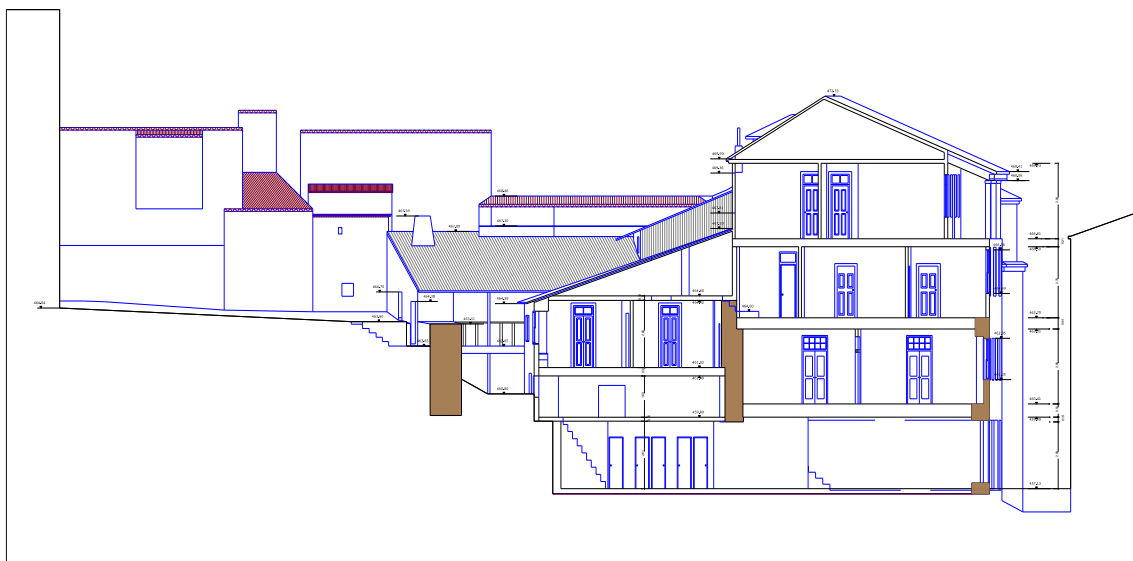


Planta do Alçado Posterior

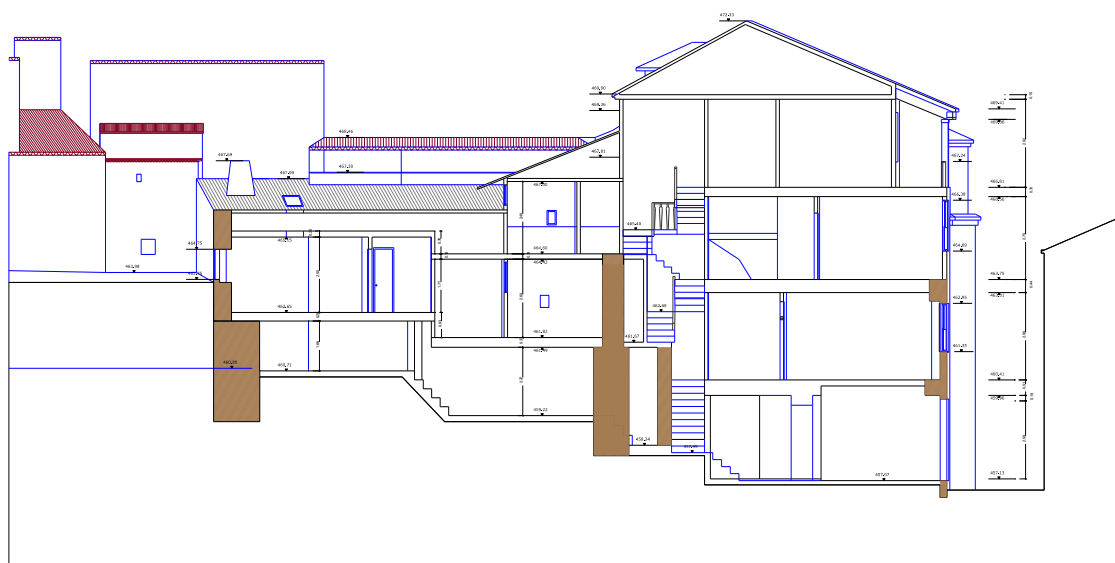


Planta - Rua Direita

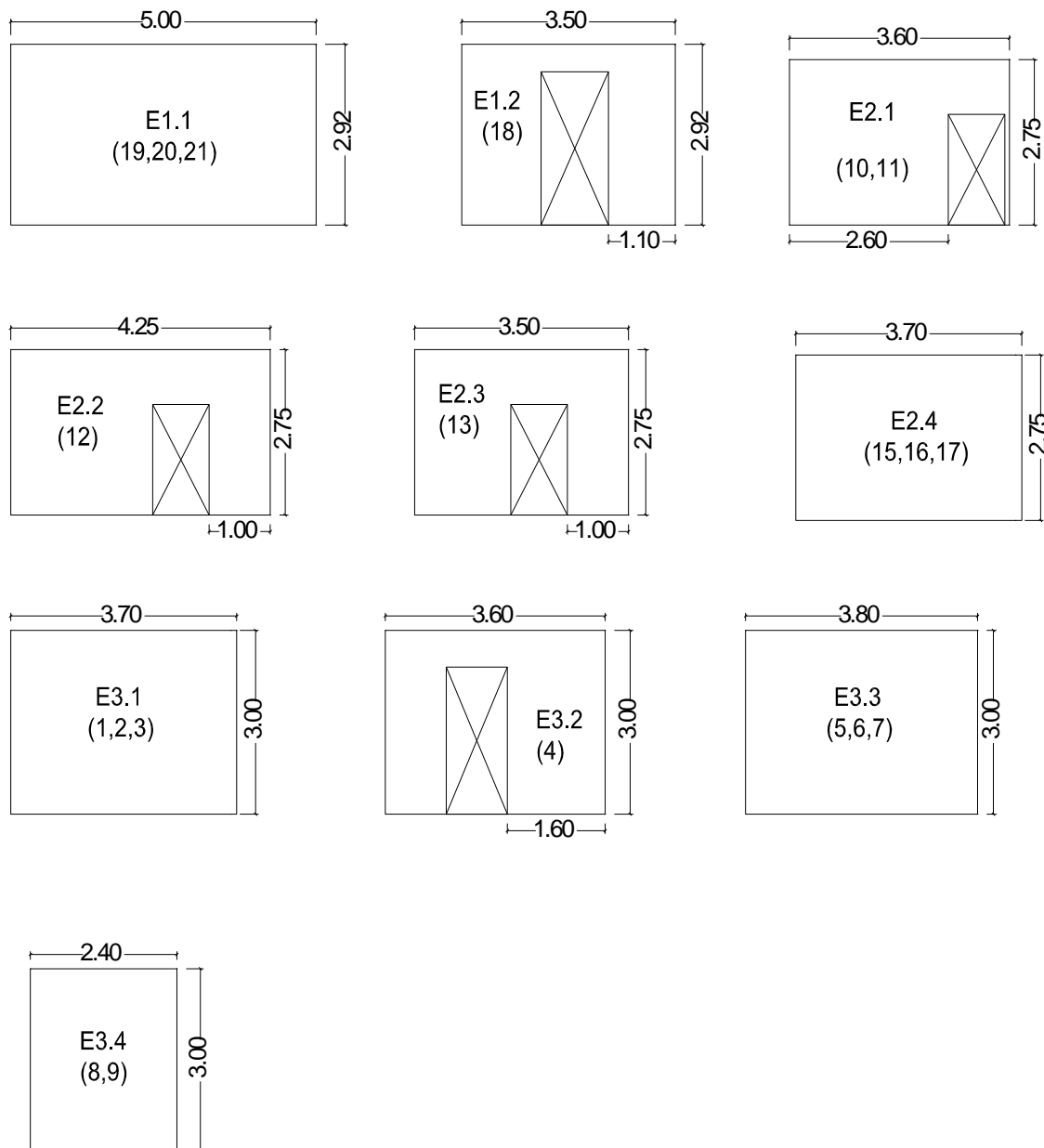
**Corte AB**



Corte CD



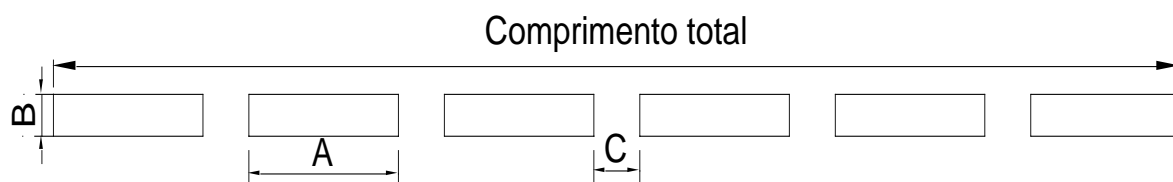
Corte EF

Esquemas exemplificativos das paredes em estudo

APÊNDICE 1 – Dados utilizados para estudo analítico

A figura que se segue apresenta um esquema exemplificativo do que foi feito para o cálculo das inércias e pesos próprios usados no estudo analítico realizado no subcapítulo 4.2.3. Este procura mostrar as diferentes dimensões utilizadas.

Às dimensões foram atribuídas as seguintes designações: para a largura da tábua (A), para a espessura (B) e para o espaçamento horizontal entre tábuas (C).



Esquema exemplificativo

Na tabela que se segue apresenta-se o cálculo realizado para as inércias e pesos próprios utilizados no subcapítulo 4.2.3. É importante referir que não se entrou com o peso próprio das ripas e por isso optou-se por arredondar o valor obtido na tabela para: $1,50 \text{ kN/m}^2$.

Tabela de inércias e peso próprio

Dimensões (m)				Momentos de inércia (m ⁴)		Momentos de inércia (m ⁴)		Seção de madeira (m ²)	Seção de madeira por faixa de 1 metro de largura (m ²)	Seção de argamassa, para espessura média de 0,12 m (m ²)	Seção de argamassa, para espessura média de 0,12 m por faixa de 1 metro de largura (m ²)	Peso próprio da parede de tabique (kN/m ²)
Espessura (B)	Largura (A)	Espaçamento (C)	Comprimento total	xx	yy	xx	yy					
0,025	0,12	0,03	1,02	0,00000109	0,001915	1,0686E-06	0,001877	0,0210	0,0206	0,1014	0,0994	1,7141
	0,15		1,05	0,00000120	0,021680	1,1429E-06	0,020648	0,0225	0,0214	0,1035	0,0986	1,7057
0,03	0,12	0,04	1,08	0,00000189	0,002611	0,00000175	0,002418	0,0252	0,0233	0,1044	0,0967	1,6867
	0,15		1,10	0,00000202	0,002894	1,8364E-06	0,002631	0,0270	0,0245	0,1050	0,0955	1,6745
0,035	0,12	0,03	1,02	0,00000300	0,002681	2,9412E-06	0,002628	0,0294	0,0288	0,0930	0,0912	1,6318
	0,15		1,05	0,00000322	0,003036	3,0667E-06	0,002891	0,0315	0,0300	0,0945	0,0900	1,6200
0,04	0,12	0,04	1,08	0,00000448	0,003481	4,1481E-06	0,003223	0,0336	0,0311	0,0960	0,0889	1,6089
	0,15		1,10	0,00000480	0,003858	4,3636E-06	0,003507	0,0360	0,0327	0,0960	0,0873	1,5927
0,045	0,12	0,02	1,10	0,00000729	0,004497	6,6273E-06	0,004088	0,0432	0,0393	0,0888	0,0807	1,5273
	0,15		1,00	0,00000683	0,003490	0,00000683	0,003490	0,0405	0,0405	0,0795	0,0795	1,5150
0,045	0,12	0,03	1,02	0,00000638	0,003447	6,2549E-06	0,003379	0,0378	0,0371	0,0846	0,0829	1,5494
	0,15		1,05	0,00000683	0,003903	6,5048E-06	0,003717	0,0405	0,0386	0,0855	0,0814	1,5343
0,05	0,12	0,03	1,02	0,00000875	0,003830	8,5784E-06	0,003755	0,0420	0,0412	0,0804	0,0788	1,5082
	0,15		1,05	0,00000937	0,004337	8,9238E-06	0,004130	0,0450	0,0429	0,0810	0,0771	1,4914
0,06	0,12	0,03	1,02	0,00001512	0,004596	1,4824E-05	0,004506	0,0504	0,0494	0,0720	0,0706	1,4259
	0,15		1,05	0,00001620	0,005204	1,5429E-05	0,004956	0,0540	0,0514	0,0720	0,0686	1,4057
Média				5,893E-06				0,004490	1,5745			

