

UNIVERSIDADE DE TRÁS-OS-MONTES E ALTO DOURO



DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL

**ESTUDO DO POTENCIAL DE REUTILIZAÇÃO DE ELEMENTOS
ESTRUTURAIIS DE MADEIRA ANTIGA**

MARCOS DANIEL ESTEVES TEIXEIRA

Vila Real, 2012

UNIVERSIDADE DE TRÁS-OS-MONTES E ALTO DOURO

**ESCOLA DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA (ECT), DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIAS**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL

**ESTUDO DO POTENCIAL DE REUTILIZAÇÃO DE ELEMENTOS
ESTRUTURAIS DE MADEIRA ANTIGA**

MARCOS DANIEL ESTEVES TEIXEIRA

Orientadores

Professor Doutor Jorge Tiago Queirós da Silva Pinto

(Professor Auxiliar da UTAD)

Professor Doutor Vítor Manuel do Couto Fernandes da Cunha

(Professor Auxiliar da UTAD)

(Dissertação redigida ao abrigo do novo acordo ortográfico)

Vila Real, 2012

Dissertação submetida à Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, realizada sob orientação científica do Professor Doutor Jorge Tiago Queirós da Silva Pinto e do Professor Doutor Vítor Manuel do Couto Fernandes da Cunha, Professores do Departamento de Engenharias da Escola de Ciências e Tecnologia da Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro

AGRADECIMENTOS

Aos meus orientadores, Professor Doutor Jorge Tiago Pinto e Professor Doutor Vítor Cunha pela orientação, motivação, disponibilidade e transmissão de conhecimentos prestados no decorrer deste trabalho de investigação.

À Professora Doutora Anabela Paiva, agradeço a autorização de utilização das instalações do Laboratório de Materiais e Solos da UTAD e gentil cedência de utilização da câmara termográfica.

Ao Professor Barbosa Vieira por ter disponibilizado o meio de transporte necessário ao transporte das amostras de madeira de Amarante para as instalações da UTAD.

Ao Professor Doutor José Louzada, do Departamento de Engenharia Florestal, da UTAD, por ter efetuado os ensaios necessários para a identificação da espécie de madeira.

À Professora Doutora Sandra Cunha pelos ensinamentos transmitidos no manuseamento da câmara termográfica.

Ao Professor António Arede, ao Professor João Paulo Miranda Guedes e à Engenheira Catarina, do Departamento de Engenharia Civil, Secção de Estruturas da Faculdade de Engenharia, da Universidade do Porto (FEUP), pela gentil disponibilidade de cedência de utilização do resistógrafo.

À Universidade de Aveiro, Departamento de Engenharia Civil e ao Professor Doutor Humberto Varum, pela gentil cedência de uma caixa de LVDT.

Aos meus pais e ao meu irmão, por terem sempre apoiado todas as minhas decisões tomadas nestes anos de estudo, mesmo nos momentos de maior pressão e irritabilidade, o que me ajudou a chegar a esta etapa da minha vida.

À Helena, à Joana, ao Montezinho e ao Tiago, por terem sido os verdadeiros amigos que tive desde o primeiro dia que entrei nesta Universidade e que sempre me deram o seu apoio e sempre tiveram uma palavra amiga nos momentos mais difíceis.

Ao Pepe, pois sem a ajuda dele nunca teria conseguido preparar atempadamente a viga para todos os ensaios que foram realizados.

À Rita pelo apoio mútuo que demos um ao outro nestes meses de preparação e de escrita da dissertação de mestrado.

A todos, o meu maior e sincero obrigado!

Nesta fase de restrições económicas que vive o setor da construção civil, principalmente no nosso país, é necessário redirecionar a atenção e os esforços para a reabilitação em detrimento da construção nova. Sendo que os elementos estruturais que constituem o interior de um edifício antigo são principalmente de madeira, é neste tipo de elementos que este trabalho de investigação está centrado.

O objetivo principal deste trabalho de investigação consiste em apresentar e em descrever um edifício de habitação unifamiliar tradicional do Norte do país, e tentar perceber se os elementos estruturais de madeira que o constituem apresentam ainda uma capacidade resistente de interesse para serem reabilitados ou para serem reutilizados noutra edificação.

Para o efeito, foram realizadas algumas visitas ao edifício adotado como caso de estudo, em que foi recolhida toda a informação técnica necessária e possível à descrição e à caracterização arquitetónica e estrutural. Foram recolhidas algumas amostras de elementos construtivos de madeira que foram ensaiadas posteriormente. Os ensaios realizados nestas amostras foram o ensaio de identificação da espécie de madeira, o ensaio do resistógrafo, o ensaio da termografia e o ensaio de flexão em três pontos.

Com os resultados experimentais obtidos foi possível constatar que o elemento estrutural ensaiado não apresentava um estado patológico gravoso e o seu comportamento mecânico era bastante positivo, permitindo afirmar, apenas para este elemento, que existe uma interessante viabilidade de reutilização deste elemento construtivo de madeira. No entanto, continua a ser necessário desenvolver-se estudos mais exaustivos, que prevejam uma amostragem mais representativa de modo a ser possível obter resultados mais conclusivos, bem como a realização de outro tipo de estudos, tais como, de sustentabilidade e de viabilidade económica.

Palavras-Chave: construção antiga de madeira, reabilitação, reutilização, patologias, capacidade estrutural, sustentabilidade, vulnerabilidade

STUDY OF THE POTENCIAL OF REUSING AGED TIMBER STRUCTURAL ELEMENTS

The building sector is facing an economical crisis, in particular, in Portugal. Therefore, focusing our attention to the rehabilitation rather than to the new construction seems wise. Since the structural elements of an old building are basically timber elements, this research work is essentially focused on this subject.

The main objective of this research work is to present and to describe a traditional dwelling characteristic of the North part of Portugal and to understand if the timber structural elements still have an adequate structural capacity in order to be able to be preserved or, on the other hand, to be reused on other application.

In order to reach this objective, some visits of the building used as the case of study were done. All the technical information (architectural and structural) was collected. Some samples of timber elements were collected and experimentally tested. These tests were the species identification, the resistograph, the thermography and the three point bending test.

After the experimental work, it was possible to figure out that the structural element tested did not present a critical pathological state, and its mechanical behavior was very positive. These results demonstrate that this timber structural element can be reused.

However, further research is required to perform in this subject in order to include a more representative sample. Furthermore, sustainability and economical viability are two important aspects that should be researched.

Key-words: timber structures, rehabilitation, reutilization, pathologies, structural capacity, sustainability, vulnerability

ÍNDICE

Agradecimentos	v
Resumo	vii
Abstract	ix
Índice de Figuras	xv
Índice de Tabelas.....	xix
1. Introdução	1
1.1. Enquadramento	3
1.2. Objetivos.....	4
1.3. Metodologia.....	5
1.4. Organização do Trabalho	6
2. Descrição do Caso de Estudo.....	9
2.1. Objetivos.....	11
2.2. Introdução.....	11
2.3. Localização.....	12
2.4. Descrição	12
2.4.1. Arquitetura	12
2.4.2. Solução estrutural	16
Paredes resistentes	16
Cobertura.....	17
Pavimento das águas-furtadas.....	22
Pavimento do rés-do-chão.....	24
Paredes interiores.....	28
2.5. Espécies de madeira.....	30
2.6. Considerações finais	34
3. Avaliação do Estado Patológico da Estrutura de Madeira	37
3.1. Objetivos.....	39
3.2. Introdução.....	39
3.3. Patologias identificadas visualmente	40
3.4. Identificação experimental de patologias de elementos de madeira	47
3.4.1. Ensaio do resistógrafo	49

3.4.2.	Ensaio da termografia	56
3.4.3.	Tentativa de correlação dos resultados obtidos pelos ensaios do resistógrafo e da termografia	65
3.5.	Considerações finais	67
4.	Avaliação da Capacidade Resistente da Viga V7	69
4.1.	Objetivos.....	71
4.2.	Introdução.....	71
4.3.	Descrição da viga a ensaiar e análise numérica	72
4.4.	Ensaio à flexão em três pontos.....	76
4.4.1.	Preparação e realização do ensaio	76
4.4.2.	Apresentação e análise dos resultados	82
4.5.	Comparação entre a viga V7 simples e reforçada.....	89
4.6.	Considerações finais	91
5.	Avaliação da Capacidade Resistente da Estrutura de Madeira	93
5.1.	Objetivos.....	95
5.2.	Introdução.....	95
5.3.	Elementos estruturais isolados	96
5.4.	Elementos estruturais compostos	100
5.5.	Efeito conjugado de pavimentos	104
5.6.	Efeito conjugado de toda a estrutura de madeira	110
5.7.	Análise de resultados	115
5.8.	Mapa de pontos críticos	116
5.9.	Considerações finais	118
6.	Proposta de Mitigação	121
6.1.	Objetivos.....	123
6.2.	Introdução.....	123
6.3.	Proposta de mapa de vulnerabilidade	124
6.4.	Mapas de vulnerabilidade do caso de estudo	127
6.5.	Propostas de procedimentos técnicos conducentes à mitigação	132
6.6.	Manual de Mitigação	138
6.7.	Considerações finais	139
7.	Conclusões e Trabalhos Futuros.....	141

7.1. Conclusões.....	143
7.2. Trabalhos Futuros	146
Bibliografia.....	149
Anexos	153

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Localização do edifício usado como caso de estudo [8]	12
Figura 2.2 – Vista exterior do edifício usado como caso de estudo (Setembro de 2011).....	13
Figura 2.3 – Planta da semicave (m)	14
Figura 2.4 – Planta do rés-do-chão (m)	14
Figura 2.5 – Planta das águas-furtadas (m)	15
Figura 2.6 – Cortes do edifício (adaptado de [9]) (m)	15
Figura 2.7 – Alçados do edifício (adaptado de [9]) (m)	16
Figura 2.8 – Parede resistente de alvenaria de granito da região (Setembro de 2011)...	17
Figura 2.9 – Planta estrutural da Zona A da cobertura (m)	17
Figura 2.10 – Planta da Zona B da cobertura (adaptado de [9])	18
Figura 2.11 – Apoio adicional da viga V2 (Setembro de 2011).....	19
Figura 2.12 – Asna de madeira tipo Palladio [10]	19
Figura 2.13 – Asna existente na Zona B da cobertura (Setembro de 2011).....	20
Figura 2.14 – Ligação adotada dos pendurais (Setembro de 2011).....	20
Figura 2.15 – Apoio da viga V6 (Setembro de 2011).....	21
Figura 2.16 – Planta estrutural do pavimento das águas-furtadas (m).....	22
Figura 2.17 – Apoios dos barrotes do pavimento das águas-furtadas.....	23
Figura 2.18 – Revestimentos do pavimento e do teto ao nível do rés-do-chão (Setembro de 2011)	24
Figura 2.19 – Planta da solução estrutural do pavimento do rés-do-chão	25
Figura 2.20 – Contraventamento longitudinal e elementos de reforço da viga V7 (Setembro de 2011).....	26
Figura 2.21 – Ancoragem metálica, ligação entre o varão e a viga V7 (Setembro de 2011)	27
Figura 2.22 – Vigas V7 com reforço metálico	27
Figura 2.23 – Interior da parede de tabique ao nível das águas-furtadas (Setembro de 2011)	29
Figura 2.24 – Topo da parede divisória de tabique ao nível do pavimento das águas-furtadas (Setembro de 2011).....	30
Figura 2.25 – Amostras de madeira usadas no ensaio de identificação da espécie (Dezembro de 2011).....	31
Figura 2.26 – Mapa de espécies de madeira, na zona A da cobertura	33

Figura 2.27 – Mapa de espécies de madeira ao nível do pavimento das águas-furtadas	33
Figura 2.28 – Mapa de espécies de madeira ao nível do pavimento do rés-do-chão	34
Figura 3.1 – Ataque de fungos (Setembro de 2011)	42
Figura 3.2 – Ataque de insetos (Setembro de 2011)	43
Figura 3.3 – Patologia devido à existência de ninho (Setembro de 2011)	44
Figura 3.4 – Amostras de peças de madeira serradas (Junho de 2012)	45
Figura 3.5 – Zona atacada por fungos na amostra de barrote da cobertura (Junho de 2012)	45
Figura 3.6 – Mapa de patologias da cobertura	46
Figura 3.7 – Mapa de patologias do pavimento das águas-furtadas	47
Figura 3.8 – Mapa de patologias do pavimento do rés-do-chão	47
Figura 3.9 – Amostra de viga V7 a ensaiar (Maio de 2012)	48
Figura 3.10 – Higrómetro [14]	49
Figura 3.11 – Malha de pontos de perfuração adotada nas extremidades da viga V7 (Julho de 2012)	50
Figura 3.12 – Disposição dos pontos de perfuração intermédios do ensaio do resistógrafo	51
Figura 3.13 – Componentes do resistógrafo (Julho de 2012)	52
Figura 3.14 – Resistógrafo (Julho de 2012)	53
Figura 3.15 – Utilização do resistógrafo (Julho de 2012)	53
Figura 3.16 – Gráfico resultante da realização do ensaio do resistógrafo no ponto de perfuração P7	54
Figura 3.17 – Resultados do ensaio do resistógrafo	55
Figura 3.18 – Câmara termográfica utilizada (Julho de 2012)	57
Figura 3.19 – Imagem termográfica da viga sem pré-aquecimento	59
Figura 3.20 – Termogramas dos pormenores da viga sem pré-aquecimento	59
Figura 3.21 – Pré-aquecimento da amostra de viga V7 a ensaiar (Julho de 2012)	60
Figura 3.22 – Temperatura máxima registada (Julho de 2012)	60
Figura 3.23 – Imagem termográfica da viga (1º ensaio após o pré-aquecimento)	61
Figura 3.24 – Imagem termográfica da viga (2º ensaio após o pré-aquecimento)	61
Figura 3.25 – Imagens termográficas dos pormenores I a VI (1º ensaio)	62
Figura 3.26 – Imagem termográfica do pormenor VII (1º ensaio)	63
Figura 3.27 – Imagens ilustrativas das zonas que apresentaram diferentes colorações no termograma (Setembro de 2012)	64

Figura 3.28 – Diagrama de sobreposição de resultados obtidos pelo resistógrafo e pela termografia.....	66
Figura 4.1 – Detalhes construtivos do reforço metálico	73
Figura 4.2 – Modelo de cálculo da viga V7 reforçada (m).....	73
Figura 4.3 – Diagrama de esforços axiais do modelo numérico da viga V7 (kN)	74
Figura 4.4 – Diagrama de esforços transversos do modelo numérico da viga V7 (kN) .	74
Figura 4.5 – Diagrama de momentos fletores do modelo numérico da viga V7 (kNm) 75	
Figura 4.6 – Deformada da viga V7 (mm)	75
Figura 4.7 – Esquema de ensaio final (Julho de 2012).....	77
Figura 4.8 – Posição adotada para os LVDTs	77
Figura 4.9 – Micrómetro de calibração (Julho de 2012).....	79
Figura 4.10 - LVDT utilizados 1 (Julho de 2012).....	79
Figura 4.11 – LVDT utilizados 2 (Julho de 2012).....	80
Figura 4.12 – Caixa de ligação dos LVDTs (Julho de 2012)	80
Figura 4.13 – Apoios da viga (Julho de 2012)	81
Figura 4.14 – Sequência do ensaio (Julho de 2012)	82
Figura 4.15 – Processo de fissuração ocorrido (Julho de 2012).....	83
Figura 4.16 – Zona de rotura por flexão da viga V7 (Julho de 2012).....	84
Figura 4.17 – Comportamento do sistema de reforço no decorrer do ensaio à flexão (Julho de 2012).....	84
Figura 4.18 – Gráfico Força-Deslocamento (LVDT 3)	85
Figura 4.19 – Gráfico Força-Deslocamento (LVDT 7)	86
Figura 4.20 – Gráfico Deslocamento-Posição do LVDT	86
Figura 4.21 – Gráfico Deslocamento LVDT 3-Deslocamento LVDT 1	87
Figura 4.22 – Modelo numérico da viga V7 simples.....	89
Figura 4.23 – Deformada da viga V7 simples (mm).....	90
Figura 4.24 – Diagrama de momentos fletores da viga V7 simples (kNm)	90
Figura 4.25 – Modelo numérico da viga V7 reforçada	90
Figura 4.26 – Deformada da viga V7 reforçada (mm).....	90
Figura 4.27 – Diagrama de momentos fletores da viga V7 reforçada (kNm)	90
Figura 5.1 – Secções transversais consideradas nas vigas V6 e V7 (cm).....	101
Figura 5.2 – Malha de elementos finitos do Modelo Estrutural 1	105
Figura 5.3 – Diagrama de momentos fletores para a carga regulamentar do Modelo Estrutural 1 (kNm)	105

Figura 5.4 – Deformada para a carga regulamentar do Modelo Estrutural 1 (mm)	106
Figura 5.5 – Malha de elementos finitos do Modelo Estrutural 2	108
Figura 5.6 – Apoio das vigas V7 no cachorro (Setembro de 2011)	108
Figura 5.7 – Diagrama de momentos fletores para a carga regulamentar do Modelo Estrutural 2 (kNm)	109
Figura 5.8 – Deformada para a carga regulamentar do Modelo Estrutural 2 (mm)	110
Figura 5.9 – Malha de elementos finitos do Modelo Estrutural 3	111
Figura 5.10 – Distribuição das cargas atuantes (kN/m ²)	112
Figura 5.11 – Diagrama de momentos fletores para a carga regulamentar do Modelo Estrutural 3 (kNm)	112
Figura 5.12 – Deformada da estrutura para a carga regulamentar referente ao Modelo Estrutural 3 (mm)	113
Figura 5.13 – Diagrama da tensão de von Mises instalado nas superfícies constituintes do edifício (kPa)	113
Figura 5.14 – Pontos críticos dos elementos estruturais de madeira da cobertura	116
Figura 5.15 – Pontos críticos dos elementos estruturais de madeira do pavimento das águas-furtadas	117
Figura 5.16 – Pontos críticos dos elementos estruturais de madeira do pavimento do rés-do-chão	117
Figura 6.1 – Exemplo de mapa de vulnerabilidade de um pavimento de madeira	127
Figura 6.2 – Mapa de incidências da estrutura da cobertura	128
Figura 6.3 – Mapa de incidências do pavimento do piso das águas-furtadas	129
Figura 6.4 – Mapa de incidências do pavimento do piso do rés-do-chão	130
Figura 6.5 – Mapa de vulnerabilidade da estrutura da cobertura do edifício	130
Figura 6.6 – Mapa de vulnerabilidade do pavimento do piso das águas-furtadas	131
Figura 6.7 – Mapa de vulnerabilidade do pavimento de madeira do rés-do-chão	131
Figura 6.8 – Um possível processo de transmissão de ataque xilófago do tipo insetos	135
Figura 6.9 – Proposta de mecanismo de corte de transmissão	136
Figura 6.10 – FS para os vários cenários de espécie de madeira considerados	138
Figura 6.11 – Manual de Mitigação	139

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 – Dimensões dos elementos estruturais da cobertura ([cm] × [cm])	18
Tabela 2.2 – Dimensões e vãos aproximados dos elementos estruturais principais da cobertura	22
Tabela 2.3 – Resultados obtidos no ensaio de identificação das espécies de madeira ...	32
Tabela 4.1 – Campo de leitura dos LVDTs	78
Tabela 4.2 – Resultados obtidos para os vários cenários de reforço considerados	91
Tabela 5.1 – Fator de segurança dos elementos estruturais principais de madeira isolados	99
Tabela 5.2 – Flecha máxima dos elementos estruturais isolados para $p_{máx}$ (mm).....	100
Tabela 5.3 – Fatores de segurança dos elementos estruturais principais de madeira compostos	102
Tabela 5.4 – Flecha máxima dos elementos estruturais compostos para $p_{máx}$ (mm).....	103
Tabela 5.5 – FS dos elementos estruturais de madeira e dos modelos estruturais	115
Tabela 6.1 – Grau de gravidade de ataque.....	125
Tabela 6.2 – Grau de vulnerabilidade	126
Tabela 6.3 – Módulo de elasticidade (E) e densidade das espécies consideradas [32]	137
Tabela 6.4 – Resultados dos cenários considerados	137

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento

“A madeira é um material perfeito, flexível e bastante resistente em termos mecânicos se comparada ao seu peso. Com grande aplicação na construção, ainda que a utilização da madeira maciça conheça maiores limitações, existem hoje madeiras melhoradas e produtos de madeira, com grande resistência, grandes dimensões e com ótima aparência, o que permite um aproveitamento rentabilizado de toda a matéria-prima” [1]. É com este mote que se desenvolverá este trabalho de investigação.

Tendo em conta a situação económica global é de prever que nos próximos tempos o setor da construção sofra um abrandamento significativo, ainda mais visível em obras novas, pelo que a reabilitação e a reconstrução de edifícios antigos poderá tornar-se um escape viável para este setor, pois trata-se de uma forma de construção sustentável. Este aspeto tem sido objeto de estudo em diversos trabalhos de investigação, sendo que alguns dos exemplos são [2, 3]. É neste contexto que este trabalho de investigação foi desenvolvido com o intuito de perceber se existem vantagens na reutilização de madeira antiga existente em edifícios, quer na reconstrução do próprio edifício quer noutras obras e após ser adequadamente tratada.

A madeira, se for obtida de florestas bem geridas, pode ser considerada um material extremamente sustentável e que, se de boa qualidade, apresenta uma relação peso-resistência muito boa. A madeira na construção tem variadas utilidades, desde logo como elemento estrutural, quer seja em vigas, em pilares ou em treliças, mas também como material auxiliar de construção, ou seja, como cofragem de elementos de betão armado [4]. Os cerca de 90% de edifícios de habitação de madeira em países desenvolvidos como a Noruega, a Suécia, o Canadá ou a Austrália mostram que a madeira tem muitas vantagens em relação aos outros materiais de construção estruturais, tais como o betão e o aço. A grande vantagem a destacar é o facto da madeira ser reciclável, renovável e biodegradável [5].

Até meados do século XX, a construção de madeira assumia um papel importante no panorama Português, apesar de nunca ter sido utilizado de forma recorrente a madeira como solução construtiva integral. A madeira foi quase sempre utilizada em processos de construção mistos, ou seja, que envolviam outros materiais de construção [6]. No entanto, com o aparecimento de técnicas construtivas mais económicas e de mais rápida

Capítulo 1 – Introdução

execução, a utilização da madeira como elemento estrutural foi decrescendo, passando a ser essencialmente utilizada como elemento construtivo ou ornamental, tal como, em obras de carpintaria (portas, soalhos, forros).

Os edifícios antigos geralmente apresentam paredes exteriores de alvenaria de pedra natural (essencialmente granito ou xisto) e, no seu interior, os elementos estruturais horizontais são de madeira, tal como, os pavimentos e estrutura da cobertura. Mesmo as paredes interiores podem ser de madeira tal como é o caso das paredes de tabique cuja estrutura principal é um sistema estrutural de madeira.

A manutenção e a reabilitação deste tipo de edifícios são um grande contributo para a valorização do património construído. Este tipo de construções pode ser encontrado por todo o país, o que as torna um marco na nossa cultura e, por isso, não pode ser descurada a sua preservação.

Outro ponto favorável à reabilitação de estruturas e, particularmente, às estruturas antigas de madeira, é a vantagem de sustentabilidade [3, 7]. Ao se reabilitar, está-se a manter grande parte dos elementos constituintes do edifício, não sendo necessário substituí-los por novos, o que permite minorar o impacte ambiental. Neste aspeto, a madeira também tem um papel importante visto que ela própria é um material natural e os processos de preparação e desmatação não parecem causar impactes ambientais muito significativos.

1.2. Objetivos

Este trabalho de investigação tem como principal objetivo auscultar o interesse da viabilidade estrutural da reutilização de elementos estruturais de madeira antigos, em outras obras ou, em os preservar em obra e reabilitá-los. Também se pretende apresentar informação técnica suplementar sobre os edifícios de habitação unifamiliar tradicionais através de uma descrição da arquitetura e da solução estrutural de um caso de estudo.

Outro objetivo é descrever as patologias identificadas apenas nos elementos estruturais de madeira do edifício escolhido como caso de estudo e conseqüentemente apresentar mapas de patologias para todas as plantas estruturais do edifício. De modo a complementar esta informação pretende-se realizar dois ensaios laboratoriais destinados à identificação de possíveis patologias localizadas no interior de um dos elementos

Capítulo 1 – Introdução

estruturais de madeira do edifício, mais concretamente o ensaio do resistógrafo e o ensaio da termografia, e comparar os resultados experimentais desses ensaios, averiguando a existência de possíveis correlações entre eles.

Vai-se proceder ao ensaio à flexão em três pontos de uma viga real do edifício escolhido como caso de estudo de modo a tentar perceber o comportamento estrutural de um elemento de madeira antiga.

Pretende-se ainda fazer um estudo analítico e numérico capaz de simular estruturalmente a estrutura de madeira do edifício de caso de estudo, considerando diferentes modelos numéricos de complexidade crescente e para cada um deles estimar o fator de segurança associado.

Por fim tem-se como objetivo averiguar se existe alguma correlação entre espécie de madeira, patologia e ponto crítico estrutural e propor mapas de incidência. Pretende-se, ainda propor uma escala de grau de gravidade de ataque, de grau de vulnerabilidade e o conceito de mapa de vulnerabilidade, aplicando estas definições propostas ao caso de estudo. Também se pretende propor algumas soluções técnicas construtivas preventivas de forma a minimizar a suscetibilidade de degradação precoce da integridade estrutural de peças de madeira antiga.

1.3. Metodologia

Na realização deste trabalho de investigação foi necessário efetuar três visitas ao edifício escolhido como caso de estudo de modo a ser possível obter o máximo de informação técnica possível e consistente no sentido de alcançar os objetivos propostos anteriormente.

Em obra, foi necessário selecionar algumas peças de madeira antiga de modo a ser possível desenvolver um trabalho experimental de identificação da espécie de madeira, de identificação de patologias, de avaliação do comportamento mecânico, entre outros aspetos técnicos relevantes. Um estudo exaustivo de avaliação da capacidade resistente da estrutura de madeira do edifício foi desenvolvido e que incluiu uma análise analítica e uma análise numérica. Alguns resultados experimentais foram comparados com os resultados numéricos, com a intenção de validar as soluções adotadas.

Capítulo 1 – Introdução

A correlação dos resultados permitiu desenvolver mapas de incidência e mapas de vulnerabilidade de elementos estruturais de madeira.

A reflexão proferida sobre os resultados obtidos também possibilitou apresentar sugestões de mitigação de aparecimento de patologias e que poderão aumentar a durabilidade do edifício.

1.4. Organização do Trabalho

Este trabalho de investigação está estruturado em sete capítulos, sendo que o Capítulo 1 se trata da Introdução.

No Capítulo 2, é feita a descrição do edifício adotado como caso de estudo. Neste capítulo é apresentada a arquitetura e a solução estrutural deste edifício. A solução prevê paredes exteriores de alvenaria de pedra de granito, paredes interiores de tabique, a estrutura de madeira da cobertura e os pavimentos de madeira.

Neste capítulo, também são indicadas as espécies de madeira dos elementos estruturais de madeira deste edifício.

No Capítulo 3, é feita a avaliação do estado patológico da estrutura de madeira do edifício, ou seja, é apresentado o resultado do levantamento de patologias dos elementos de madeira e que foi realizado em obra. Para complementar este levantamento, também são apresentados os resultados obtidos em dois ensaios não destrutivos que foram realizados num dos elementos estruturais principais de madeira. Neste caso, o ensaio de termografia e do resistógrafo foram os ensaios realizados. Também se tentou estabelecer uma correlação entre estes dois ensaios.

O Capítulo 4, está centrado no estudo do comportamento estrutural de um elemento principal de madeira. Neste contexto, a descrição e a apresentação dos resultados obtidos através do ensaio de flexão em três pontos do mesmo elemento estrutural principal ensaiado no capítulo anterior são processadas. Este ensaio também permitiu aferir a capacidade resistente deste elemento de madeira antiga.

No Capítulo 5, uma avaliação analítica e numérica da capacidade resistente da estrutura de madeira é detalhadamente desenvolvida. A capacidade resistente dos elementos estruturais de madeira isolados ou compostos, é aferida através da quantificação de

Capítulo 1 – Introdução

fatores de segurança. O benefício estrutural da consideração de elementos de madeira compostos é destacado.

No Capítulo 6, é apresentada uma proposta de mitigação de ataque de agentes xilófagos e que poderá ser um instrumento útil em processos regulares de manutenção e de utilização de edifícios tradicionais que contemplam elementos de madeira.

Finalmente, o Capítulo 7 é relativo às conclusões resultantes deste trabalho de investigação e à sugestão de alguns trabalhos futuros de interesse a desenvolver neste âmbito.

2. DESCRIÇÃO DO CASO DE ESTUDO

2.1. Objetivos

Neste capítulo, os objetivos são os seguintes:

- Descrever as opções arquitetónicas e estruturais adotadas no edifício de caso de estudo, apresentando para o efeito os desenhos de arquitetura (plantas, cortes e alçados) e as plantas estruturais de cada piso;
- Descrever pormenorizadamente alguns detalhes construtivos;
- Proceder à identificação das espécies de madeira utilizadas nos elementos estruturais existentes e traçar mapas de espécies de madeira de forma a ser possível verificar se existe alguma correlação entre espécie de madeira e sistema estrutural.

2.2. Introdução

Com vista à concretização dos objetivos apresentados, foram realizadas três visitas, em Setembro de 2011, ao edifício selecionado como caso de estudo. Devido ao facto deste edifício estar a ser parcialmente demolido com vista à sua reabilitação, foi possível recolher um conjunto de informação abrangente, e que noutras condições de utilização do edifício seria impossível.

Com as medições efetuadas, e também com o auxílio do projeto de arquitetura do processo de reabilitação, será possível apresentar os desenhos da arquitetura do edifício anteriormente ao processo de reabilitação.

Os detalhes construtivos serão descritos consoante a informação recolhida e complementados por suporte fotográfico, obtido durante as visitas efetuadas. Alguns detalhes construtivos serão apresentados em peças desenhadas para servirem como suporte que possa ser útil em trabalhos de investigação futuros a desenvolver neste contexto.

A identificação correta da espécie de madeira foi possível tendo em conta que foram recolhidas algumas amostras e que foram posteriormente trazidas para as instalações da Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro (UTAD). Estas amostras foram depois ensaiadas no laboratório do Departamento de Engenharia Florestal da UTAD. Os resultados experimentais obtidos complementaram a inspeção visual efetuada “*in loco*”

Capítulo 2 – Descrição do Caso de Estudo

à espécie de madeira dos elementos estruturais e/ou construtivos, possibilitando desta forma traçar, fidedignamente, mapas de utilização na habitação de espécies de madeira.

2.3. Localização

O caso de estudo deste trabalho de investigação é relativo a uma construção antiga de habitação unifamiliar localizada na rua da Costa Grande de Cima, na freguesia da Madalena, concelho de Amarante, distrito do Porto (Figura 2.1). As coordenadas GPS deste edifício são: latitude – 41°16'22.94"N e longitude – 8° 4'0.60"W. Este edifício localiza-se na periferia de uma zona urbana.



Figura 2.1 – Localização do edifício usado como caso de estudo [8]

2.4. Descrição

2.4.1. Arquitetura

Tal como foi referido, o caso de estudo é relativo a um edifício de habitação do tipo unifamiliar, datado dos finais do século XIX, inícios do século XX. Este edifício é constituído por três pisos (semicave, rés-do-chão e águas-furtadas) tal como se pode observar na Figura 2.2. Este edifício possui um pequeno logradouro e encontra-se à face da estrada municipal M-573 [8].



Figura 2.2 – Vista exterior do edifício usado como caso de estudo (Setembro de 2011)

Ao nível da semicave existia um espaço amplo destinado a arrumos e a garagem, com uma área total de $58,40 \text{ m}^2$. Neste espaço existia também um lagar. Ao nível do rés-do-chão existia uma cozinha ($18,61 \text{ m}^2$), uma sala de jantar ($11,00 \text{ m}^2$), uma sala de estar ($11,42 \text{ m}^2$), três quartos ($27,30 \text{ m}^2$), um WC ($3,00 \text{ m}^2$) e um compartimento de arrumos ($4,12 \text{ m}^2$). Por sua vez, ao nível das águas-furtadas existia um quarto ($15,43 \text{ m}^2$) e uma sala de costura ($9,83 \text{ m}^2$). Estas áreas, e a disposição dos compartimentos, podem ser observadas nas plantas apresentadas nas Figuras 2.3 a 2.5.

É, ainda, importante referir que a fachada principal do edifício é paralela à rua na qual se encontra localizado e, que depois, a planta se encontra enviesada, com um ligeiro desvio para a direita, podendo este facto ser comprovado nas plantas apresentadas nas figuras identificadas anteriormente.

A caixilharia de todas as janelas e portas exteriores eram de madeira maciça. Algumas das janelas tinham dois panos em que ambos podiam ser abertos para o interior do compartimento. As janelas existentes nas fachadas laterais e nas águas-furtadas eram de guilhotina, Figura 2.7. No Quarto 1, Figura 2.4, existia uma pequena varanda.

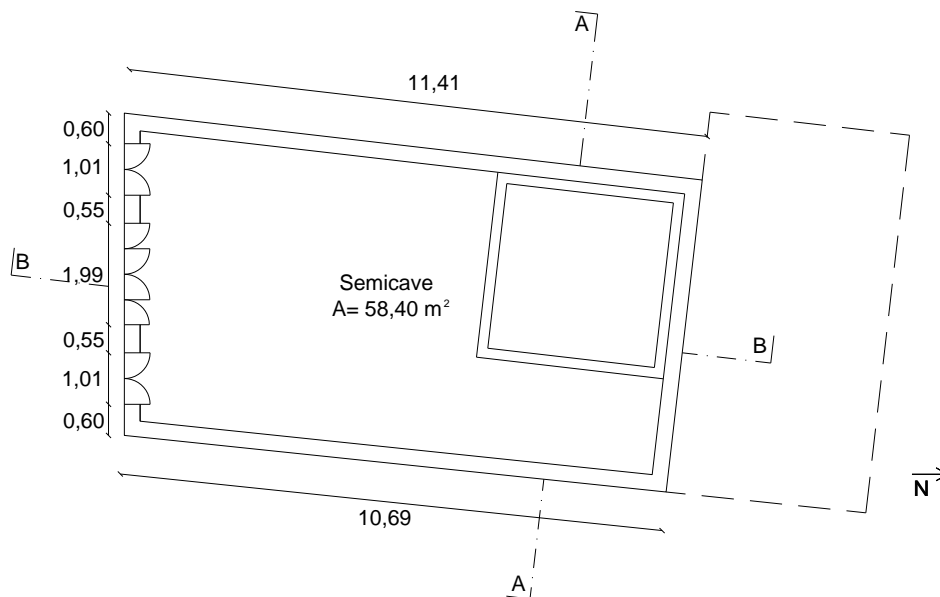


Figura 2.3 – Planta da semicave (m)

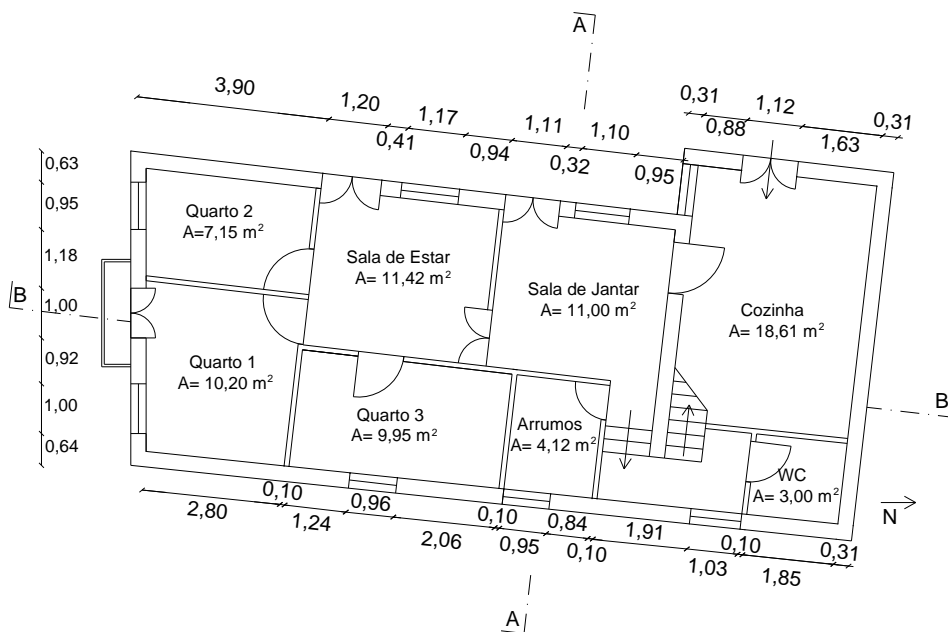


Figura 2.4 – Planta do rés-do-chão (m)

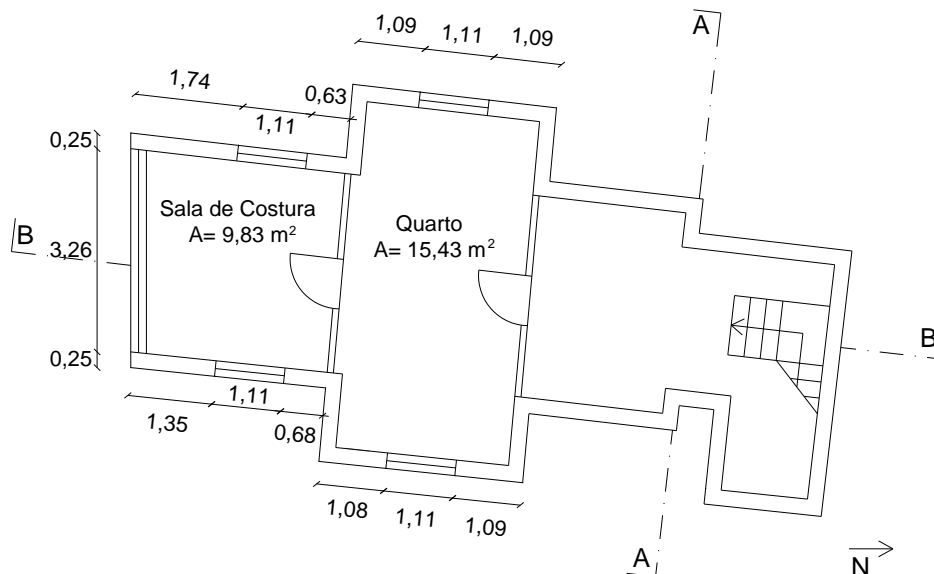


Figura 2.5 – Planta das águas-furtadas (m)

De referir ainda que não existia qualquer ligação interior entre a semicave e o rés-do-chão. Por sua vez, o rés-do-chão e as águas-furtadas ligavam-se através de umas escadas interiores de madeira, tal como se pode verificar nas plantas apresentadas nas figuras anteriores. Ao nível da semicave, o pé-direito era de 2,75 m. Por sua vez, ao nível do rés-do-chão este era de 2,70 m e ao nível das águas-furtadas o pé-direito era de apenas 2,40 m. Estes dados podem ser constatados nos cortes AA e BB apresentados na Figura 2.6.

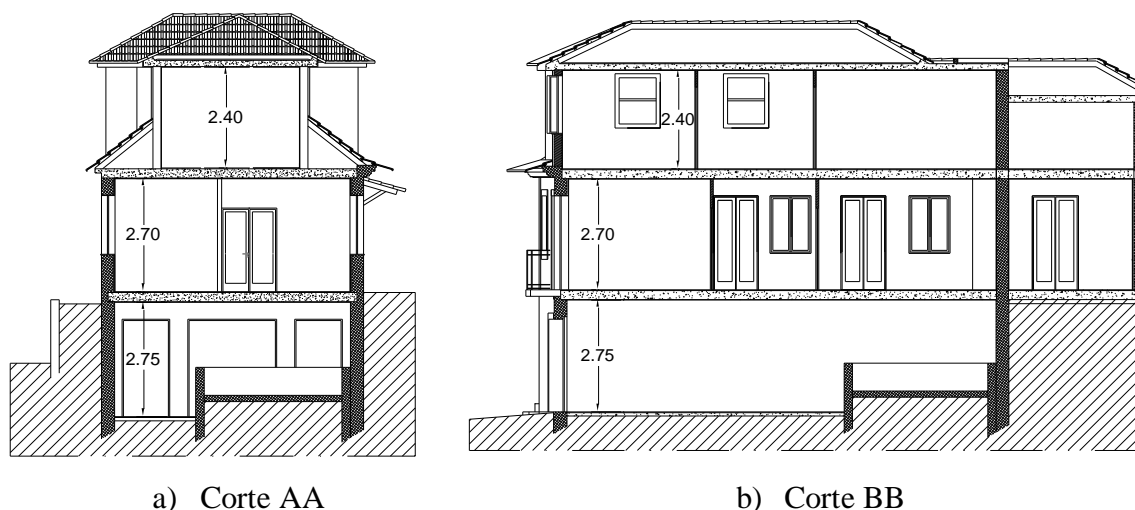


Figura 2.6 – Cortes do edifício (adaptado de [9]) (m)

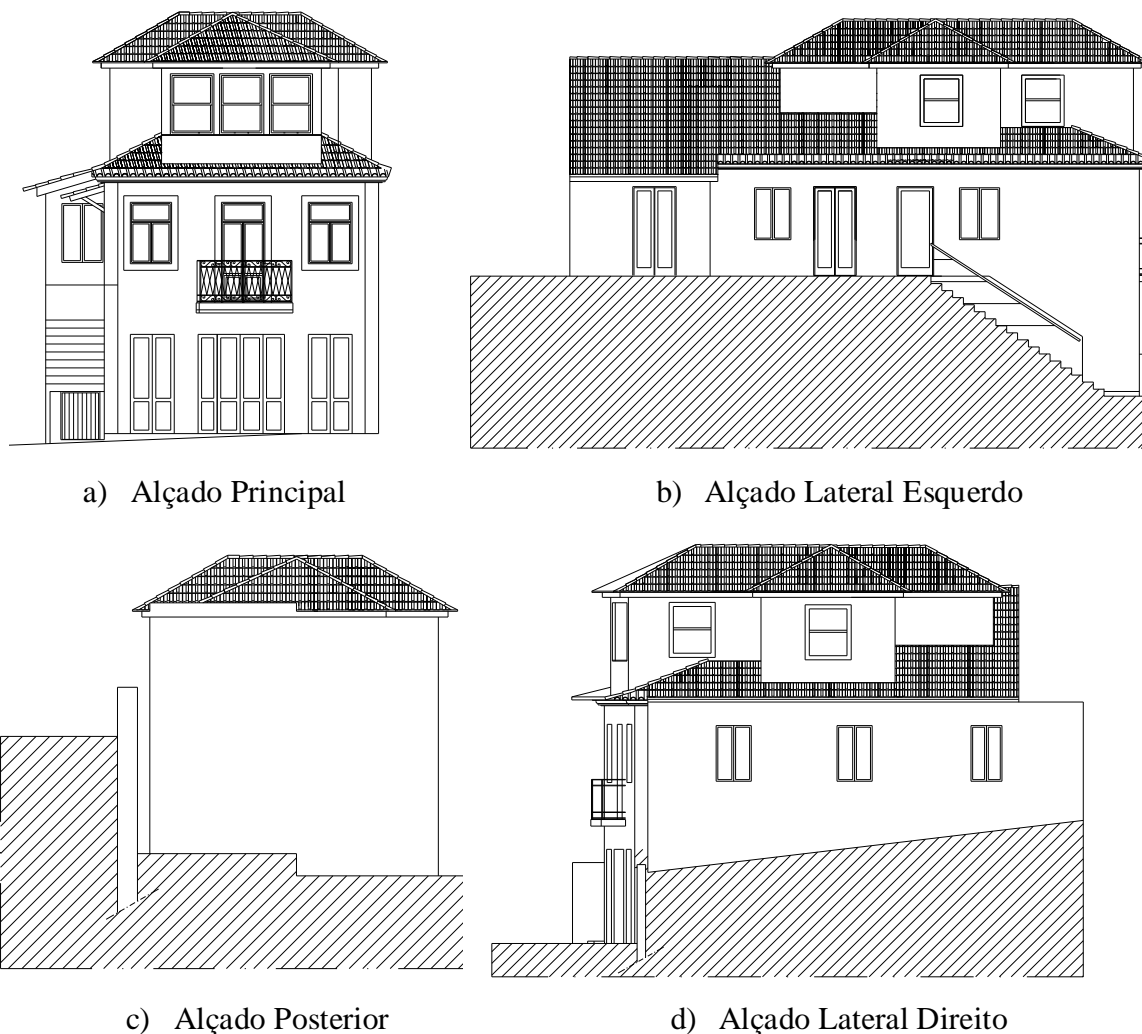


Figura 2.7 – Alçados do edifício (adaptado de [9]) (m)

2.4.2. Solução estrutural

Paredes resistentes

As paredes exteriores da semicave e do rés-do-chão são de alvenaria de pedra de granito e apresentam uma espessura de cerca de 31 cm (Figura 2.8). Este tipo de parede existe em toda a periferia do edifício e constitui os elementos estruturais verticais principais deste (i.e. paredes resistentes). As juntas das pedras de granito eram argamassadas. Esta solução estrutural é muito comum em edifícios desta época e localizados nesta região.

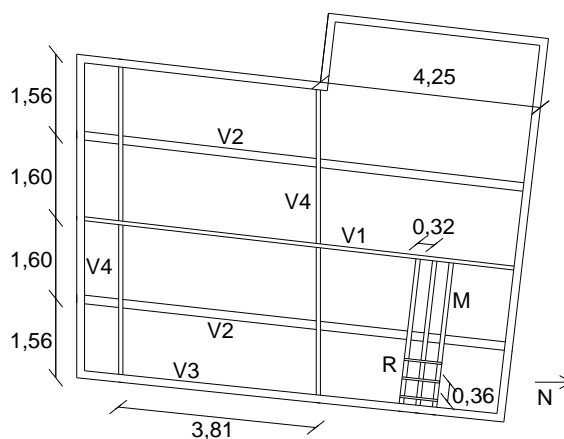


Figura 2.8 – Parede resistente de alvenaria de granito da região (Setembro de 2011)

Cobertura

A solução estrutural adotada na cobertura deste edifício é um sistema tradicional de madeira. De acordo com informação recolhida em obra, este edifício parece ter sido sujeito a uma intervenção de ampliação e de reabilitação ao nível das águas-furtadas, o que justifica que existam duas zonas bem diferenciadas em termos do tipo de solução estrutural existente aquando deste levantamento (Setembro de 2011). A Zona A, Figura 2.9, é considerada como sendo a parte da cobertura original do edifício, e a Zona B é correspondente à parte da cobertura mais recente e que permitiu a construção das águas-furtadas. A planta da cobertura da Zona B é apresentada na Figura 2.10.

Relativamente ao revestimento da cobertura este era em telha cerâmica do tipo Marselha. A cornija do edifício era em pedra de granito, tipo “papo de rola”, que também era uma solução construtiva muito aplicada em edifícios da época e associada a uma certa opulência.



Legenda: Vi – Vigas estruturais; M – Madres de cobertura; R – Ripas

Figura 2.9 – Planta estrutural da Zona A da cobertura (m)

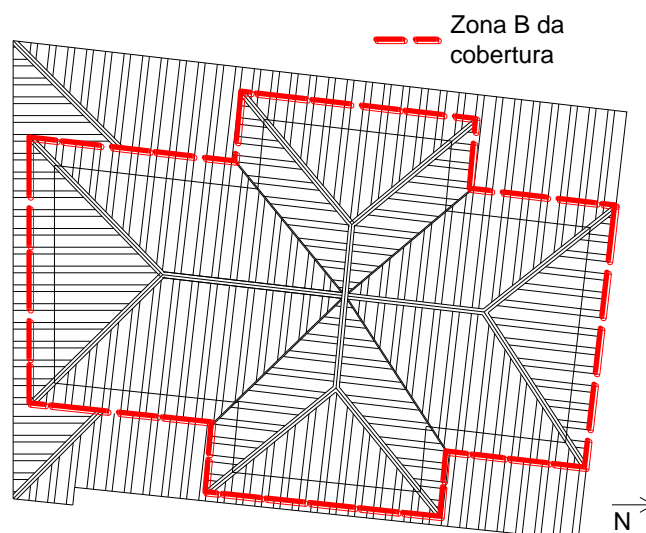


Figura 2.10 – Planta da Zona B da cobertura (adaptado de [9])

O tipo de solução estrutural da Zona A é correspondente a uma solução de vigamento enquanto que o tipo de solução estrutural da Zona B é referente a uma solução de asnas de madeira.

Na Zona A, a solução estrutural é bastante simples pois trata-se de uma solução praticamente simétrica. As vigas principais de madeira estão dispostas longitudinalmente e têm espaçamentos regulares entre elas, enquanto que na Zona B, a disposição dos elementos estruturais é mais complexa, como se pode constatar na planta da Figura 2.10, devido à opção tomada em relação às águas da cobertura. É importante referir que não foi possível obter fotografias desta parte da cobertura (Zona B), pois quando foi realizada a primeira visita à obra, a parte da cobertura referente à Zona B já se encontrava demolida.

Na Tabela 2.1 apresentam-se as dimensões das secções transversais de todos os elementos estruturais que compõem a solução estrutural da cobertura referentes à Zona A e à Zona B.

Tabela 2.1 – Dimensões dos elementos estruturais da cobertura ([cm] × [cm])

V1	V2	V3	V4	V5	V6	M	R
7,5×18,0	11,0×16,5	8,0×9,5	8,5×22,0	28,0×22,0	8,0×21,5	8,5×8,5	2,5×4,0

É de referir que na Zona A da cobertura as madres, M, não eram contínuas desde a viga V1 até à parede de granito. Eram constituídas por dois troços entre as vigas V1 e V2 e desta última até à parede resistente. Em termos de secção transversal as ripas tinham

Capítulo 2 – Descrição do Caso de Estudo

4,0×2,5 cm² e as madres 8,5×8,5 cm². Devido à irregularidade em planta da cobertura relativa à Zona B, a viga V1 não se prolongava até aos topos do edifício.

Como se pode observar na Figura 2.11, apesar das suas elevadas dimensões, a viga V5 para além de ser um elemento estrutural integrante do pavimento das águas-furtadas, de servir de contraventamento das paredes de alvenaria de pedra, também tinha a função particular de servir de apoio aos apoios adicionais da viga V2 e que estão devidamente identificados na Figura 2.11.



Figura 2.11 – Apoio adicional da viga V2 (Setembro de 2011)

Tal como foi referido anteriormente, a Zona B da cobertura era constituída por asnas de madeira. A solução tradicional de asna de madeira designada de Palladio [10] está ilustrada na Figura 2.12.

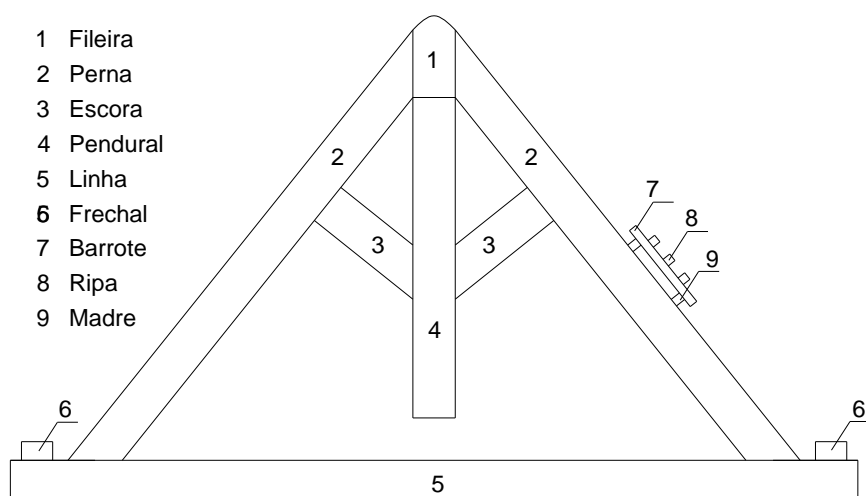


Figura 2.12 – Asna de madeira tipo Palladio [10]

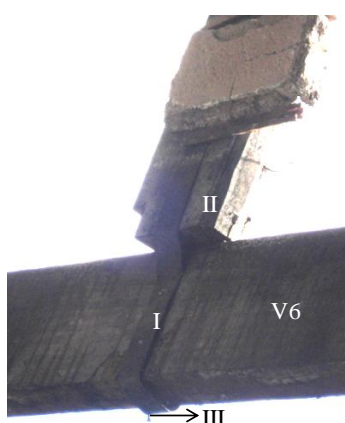
Capítulo 2 – Descrição do Caso de Estudo

Foi nesta solução tradicional de asna que a solução estrutural da cobertura relativa à Zona B foi concebida. Contudo, ainda foi possível detetar algumas divergências. O facto de existirem dois pendurais (elemento I da Figura 2.13) e de não existirem escoras é um testemunho que reforça esta constatação. Em relação ao esquema apresentado na Figura 2.9, a fileira das asnas correspondia à viga V1, as pernas correspondiam à viga V4 e a linha à viga V6. Em relação aos pendurais, estes apresentavam uma secção transversal com as dimensões de $16,0 \times 8,0 \text{ cm}^2$.



Figura 2.13 – Asna existente na Zona B da cobertura (Setembro de 2011)

Os elementos constituintes das asnas eram ligados entre si através de conectores do tipo pregos de aço, complementados estrategicamente e localmente, por reforço de chapa metálica também este ligado por pregagem aos elementos de madeira.



a) Fileira



b) Pernas

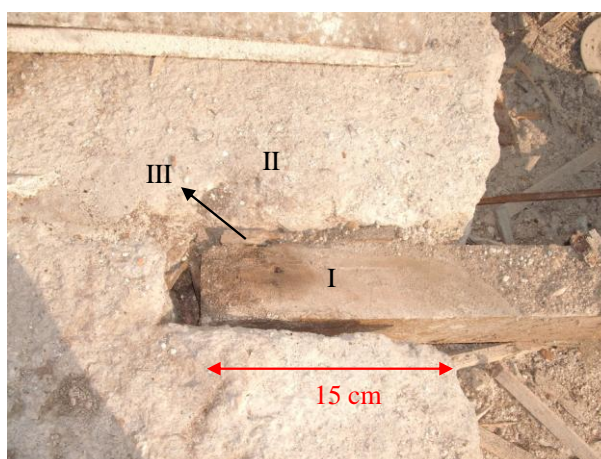
Legenda: I – Chapa metálica; II – Pendural; III – Prego metálico

Figura 2.14 – Ligação adotada dos pendurais (Setembro de 2011)

Capítulo 2 – Descrição do Caso de Estudo

A título ilustrativo, os pendurais para além de pregos metálicos, também possuíam uma ligação à fileira e às pernas por meio de chapas metálicas com aproximadamente 4 cm de largura, que eram por sua vez fixas a estes elementos com recurso a pregos metálicos (elemento III), tal como ilustra a Figura 2.14.

As vigas tipo V6 (elemento I da Figura 2.15) estavam apoiadas diretamente nas paredes de alvenaria de granito nas quais existiam uns roços constituídos especificamente para o efeito. Pode-se verificar na Figura 2.15 que a viga V6 assenta diretamente em praticamente metade da espessura da parede de granito (cerca de 15 cm). O roço foi entalhado na parede com uma profundidade igual à altura da viga de madeira. Adicionalmente existe uma pequena folga construtiva entre o roço e a viga nos contornos laterais e de forma a facilitar a colocação da viga e de modo a minimizar a possibilidade de apodrecimento. Este apoio da viga é do tipo simplesmente apoiado pois impede os deslocamentos verticais descendentes da mesma. É de salientar que eventuais deslocamentos ascendentes não se encontram restringidos. Também é possível observar na Figura 2.15 a existência de um calço de madeira (detalhe III, Figura 2.15). Este detalhe construtivo, existindo em ambas as faces laterais da viga poderá impedir os deslocamentos horizontais da viga nos apoios e, deste modo, o apoio poderá ser considerado duplo.



Legenda: I – Viga V6; II – Parede exterior; III – Calço de madeira

Figura 2.15 – Apoio da viga V6 (Setembro de 2011)

Finalmente, as vigas V3, Figura 2.9, tratavam-se de elementos estruturais de cintagem e que estavam presentes apenas no topo das paredes laterais. Esta viga tinha as dimensões de $8,0 \times 9,5 \text{ cm}^2$ em termos de secção transversal e servia de apoio às madres de

Capítulo 2 – Descrição do Caso de Estudo

cobertura e assegurava a transmissão distribuída das cargas convergentes da cobertura para a parede resistente de granito.

De forma a compilar a informação recolhida durante o levantamento da habitação, apresenta-se na Tabela 2.2 as dimensões dos elementos estruturais principais da cobertura tal como o vão aproximado desses elementos.

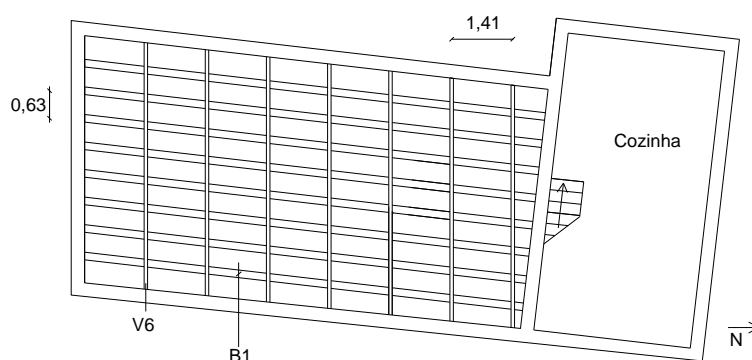
Tabela 2.2 – Dimensões e vãos aproximados dos elementos estruturais principais da cobertura

Elemento	V1	V2	V3	V4	V5	V6
Dimensões ([cm] × [cm])	7,5×18,0	11,0×16,5	8,0×9,5	8,5×22,0	28,0×22,0	8,0×21,5
Vão (m)	3,60	3,60	3,60	3,15	5,64	5,64

Pavimento das águas-furtadas

A solução estrutural do pavimento das águas-furtadas era constituída por vigas, barrotes e tábuas de soalho, dispostos aproximadamente ortogonalmente entre eles e formando um reticulado regular em planta, Figura 2.16.

De seguida é apresentada a planta estrutural deste piso (Figura 2.16), em que se pode verificar que na zona da cozinha, não existia este piso, pois era nesta zona que se localizava a chaminé não havendo um aproveitamento funcional deste espaço. As vigas de madeira principais deste piso, vigas V6, estavam igualmente espaçadas entre si de 1,41 m e tal como mostra a Figura 2.16.



Legenda: V6 – Viga tipo V6; B1 – Barrote tipo B1

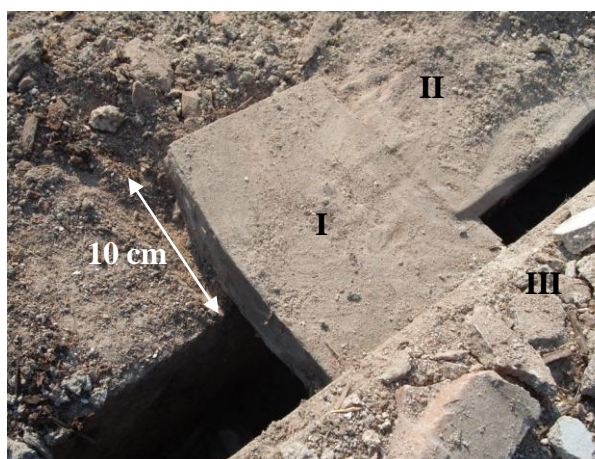
Figura 2.16 – Planta estrutural do pavimento das águas-furtadas (m)

O soalho do pavimento das águas-furtadas, elemento III da Figura 2.17.a, era constituído por tábuas de $15,0 \times 3,0 \text{ cm}^2$ de secção transversal, sendo que estas tinham

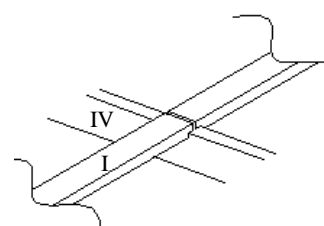
Capítulo 2 – Descrição do Caso de Estudo

um comprimento de 5,64 m. As tábuas do soalho estavam assentes continuamente nos barrotes B1 do pavimento (elemento I da Figura 2.17.a) e estes apresentavam as dimensões de $14,0 \times 6,5 \text{ cm}^2$ em termos de secção transversal, estando dispostos com um espaçamento constante entre si de 0,63 m. Na extremidade da cobertura, estes apoiavam diretamente na parede de alvenaria de granito (elemento II da Figura 2.17.a), enquanto que os barrotes intermédios estavam fixados às vigas V6 por meio de pregagem. O apoio dos barrotes na parede de granito era feito numa pequena reentrância efetuada na própria parede e, ao contrário da viga V6 (elemento IV – Figura 2.17.b), os barrotes apoiavam-se em menos de metade da espessura da parede (cerca de 10 cm).

Na situação em que os barrotes se apoiavam na viga, estes apresentavam um chanfro nos topos, como mostra a Figura 2.17.b, de modo a facilitar a colocação e a controlar as cotas de obra. Foi possível verificar *in situ* que os topos dos barrotes estavam afastados entre si, garantindo deste modo uma junta de “dilatação” que permitisse um livre deslocamento aquando das variações térmicas sazonais e aquando das variações volumétricas associadas aos possíveis fenómenos de retração passíveis de ocorrer ao longo do tempo e resultantes da variação da humidade relativa.



a) Parede exterior (Setembro de 2011)



b) Ligação Barrote-Viga

Legenda: I – Barrote; II – Parede exterior; III – Soalho; IV – Viga V6

Figura 2.17 – Apoios dos barrotes do pavimento das águas-furtadas

Quanto ao teto das águas-furtadas, na zona A da cobertura, e apenas na zona de acesso, este era revestido com argamassa, enquanto que na Zona B, o revestimento era o mesmo do rés-do-chão, forro de madeira. Nos locais onde o pé direito era demasiado baixo, existiam uns pequenos espaços reservados a arrumos mas que não possuíam qualquer

Capítulo 2 – Descrição do Caso de Estudo

forro ou revestimento. Deste modo, foi possível ver os elementos construtivos da cobertura e a própria telha. Este último aspeto poderá ser importante no sentido em que era possível haver ventilação natural da cobertura.

Pavimento do rés-do-chão

Ao nível do rés-do-chão, o pavimento de madeira era constituído por vigas e tábuas de soalho. As tábuas de soalho tinham as mesmas dimensões das verificadas nas águas-furtadas. No entanto, os seus comprimentos variavam pois estas tábuas tanto eram dispostas numa direção como na sua perpendicular. Na Figura 2.18 mostra-se uma imagem ilustrativa das tábuas de soalho do rés-do-chão existentes no pavimento e das tábuas do forro. Pode-se também observar que existia um rodapé e um roda-teto em todo o perímetro do compartimento.

De referir ainda que as escadas interiores de ligação entre o rés-do-chão e as águas-furtadas eram também revestidas com o mesmo tipo de tábuas de soalho.

O teto do rés-do-chão era forrado com tábuas de madeira de $12,5 \times 1,0 \text{ cm}^2$ de secção transversal, Figura 2.18.b. Estas tábuas não tinham um comprimento constante ou regular pelo que existiam várias emendas ao longo de cada alinhamento. A Figura 2.18.b mostra o forro que existia no Quarto 2 deste edifício.



a) Soalho



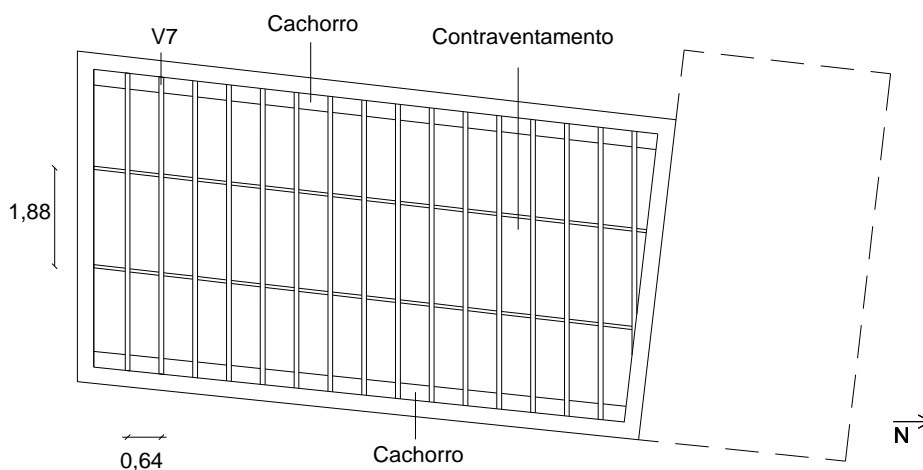
b) Forro

Figura 2.18 – Revestimentos do pavimento e do teto ao nível do rés-do-chão (Setembro de 2011)

Por sua vez, a planta da solução estrutural deste piso é apresentada na Figura 2.19. Como se pode observar as vigas tipo V7 ($9,0 \times 23,0 \text{ cm}^2$), que eram o elemento

Capítulo 2 – Descrição do Caso de Estudo

estrutural principal (V7), estavam igualmente espaçadas entre si de 0,64 m e dispostas paralelamente entre si. Estas vigas eram apoiadas, em ambas as extremidades, numa pequena saliência (tipo cachorro contínuo de pedra) existente interiormente na parede resistente de alvenaria ao nível da semicave e que está representada como o elemento III da Figura 2.20.



Legenda: V7 – Viga tipo V7

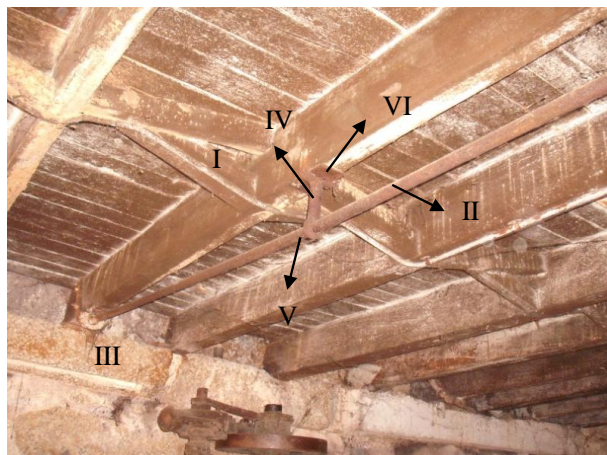
Figura 2.19 – Planta da solução estrutural do pavimento do rés-do-chão

Ao nível da semicave não existia qualquer forro de teto, pelo que as vigas V7 e as tábuas de soalho do rés-do-chão eram visíveis. Os alinhamentos retos que se encontravam dispostos transversalmente às vigas V7 eram uns contraventamentos longitudinais tipo cruz destinados a contraventar longitudinalmente as vigas V7 aos terços. Este contraventamento era materializado por barrotes de madeira com a secção transversal de dimensões $6,0 \times 8,0 \text{ cm}^2$. Estes contraventamentos correspondem ao elemento I identificado e ilustrado na Figura 2.20. Parece importante referir que, o pavimento das águas-furtadas não dispunha deste tipo de reforço estrutural e talvez porque as paredes interiores de tabique, existentes ao nível do rés-do-chão, funcionavam elas próprias como reforço ou contraventamento. Estes elementos de contraventamento estavam ligados às vigas tipo V7 por meio de pregos metálicos. Os dois barrotes que formavam a cruz não estavam ligados entre si.

Outro pormenor construtivo interessante de referir é relativo à existência de um sistema de pré-esforço exterior aplicado a algumas das vigas tipo V7 (Figura 2.20 – II). Este sistema de pré-esforço consistia na aplicação de um varão metálico fixo às vigas V7 nas suas extremidades por meio de uma espécie de ancoragem, sendo esta também metálica

Capítulo 2 – Descrição do Caso de Estudo

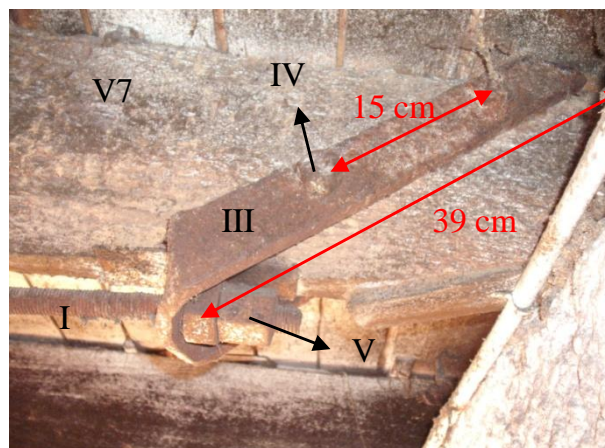
e estando fixa à viga através de parafusos. O varão metálico tinha um comprimento de cerca de 5 m e um diâmetro uniforme de 2 cm. Nas suas extremidades, este era roscado à ancoragem por intermédio de porcas metálicas (elemento V da Figura 2.21).



Legenda: I – Contraventamento; II – Varão metálico; III – Cachorro; IV – Apoio intermédio; V – Abertura circular; VI – Chapa metálica

Figura 2.20 – Contraventamento longitudinal e elementos de reforço da viga V7 (Setembro de 2011)

Para além dos apoios nas extremidades, existiam também dois apoios intermédios (elemento IV, Figura 2.20), colocados aproximadamente aos terços, ou seja, no alinhamento dos contraventamentos. Estes apoios intermédios eram também de aço e tinham uma abertura circular (elemento V, Figura 2.20) por onde passava o varão de aço e não se encontravam fixos à viga de madeira V7 por meio de parafusos ou pregos, estando apenas encostados à viga. No entanto, e talvez para facilitar a sua fixação, existia entre estes e a viga de madeira, uma pequena chapa de aço com uma espessura de 5 mm (elemento VI, Figura 2.20). Tal como foi referido anteriormente, nas extremidades, os varões de aço eram roscados de modo a poderem ser fixos à ancoragem metálica por meio de porcas metálicas com um diâmetro de 3 cm. Pensa-se que este reforço metálico exterior, de algumas das vigas V7, possa trabalhar como pré-esforço através do aperto destas porcas. A viga V7 e o seu reforço metálico formam no seu conjunto um elemento estrutural misto madeira/aço, conferindo-lhe um interesse particular no sentido que se trata de um elemento construtivo antigo.



Legenda: I – Varão metálico; II – Viga V7; III – Chapa metálica; IV – Parafuso metálico; V – Porca metálica

Figura 2.21 – Ancoragem metálica, ligação entre o varão e a viga V7 (Setembro de 2011)

Como foi referido anteriormente, este sistema de pré-esforço era aplicado em algumas das vigas tipo V7. As vigas que possuíam este reforço estrutural estão identificadas na Figura 2.22.

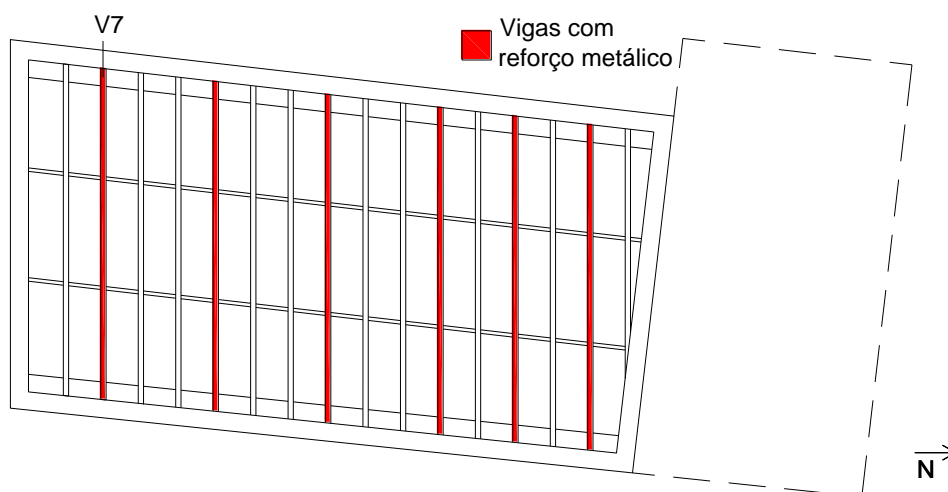


Figura 2.22 – Vigas V7 com reforço metálico

Na Figura 2.21 encontra-se a fotografia exemplificativa da ligação entre o varão e a viga de madeira V7 e que foi identificado aqui como ancoragem. Nesta figura é possível constatar as dimensões dos elementos que constituem este sistema de ligação. Pode-se verificar que a chapa metálica do apoio (elemento III) tinha um comprimento de 39 cm

Capítulo 2 – Descrição do Caso de Estudo

e uma espessura de 1,5 cm. Os dois parafusos metálicos (elemento IV) tinham 3 cm de diâmetro e estavam afastados entre si de 15 cm.

De forma a complementar a informação disponibilizada anteriormente também é importante referir que a ventilação na semicave era assegurada por umas pequenas janelas e por umas aberturas, sem qualquer proteção, nas paredes de alvenaria de granito, junto ao pavimento do rés-do-chão. Num capítulo posterior, ir-se-á averiguar a influência desta ventilação natural, em particular no fenómeno patológico ocorrido nos elementos estruturais de madeira localizados nas proximidades.

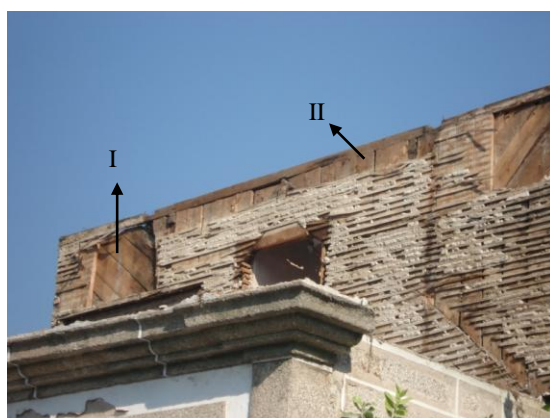
Paredes interiores

As paredes interiores que existiam tanto ao nível das águas-furtadas como ao nível do rés-do-chão eram de tabique. Geralmente e de forma aproximada, estas paredes tinham 10,0 cm de espessura. O ripado que constituía a estrutura de madeira das paredes tinha um espaçamento de 6,0 cm entre si e tinha as dimensões de $2,5 \times 2,0 \text{ cm}^2$ em termos de secção transversal. No interior das paredes, as tábuas tinham cerca de 3,5 cm de espessura, 22,0 cm de largura e um comprimento um pouco superior ao pé-direito. O enchimento destas paredes era possivelmente de uma argamassa tipo terrosa bastarda (saibro e cal aérea). Este facto pode ser justificado pelo motivo de o material de enchimento apresentar uma cor clara, com uma granulometria grosseira e se destacar facilmente do suporte embora em pedaços consistentes e duros. Esta informação para ser validada requeria da realização de um trabalho experimental à semelhança dos já realizados em trabalhos de investigação elaborados neste contexto [11, 12]. As tábuas horizontais da parede, denominadas de fasquio, eram pregadas às tábuas verticais através de pregos metálicos. Verificou-se que as emendas dos fasquios estavam desalinhas em altura. A Figura 2.23.a mostra uma das paredes de tabique existente ao nível das águas-furtadas e em que a asna de madeira foi incorporada nessa parede divisória. O espaçamento existente entre as tábuas verticais era apenas resultante das irregularidades das próprias tábuas, visto que estas se encontravam completamente encostadas entre si. O acabamento final das paredes interiores existentes no edifício era do tipo caiado tal como era característico nos edifícios desta época.

Como foi referido anteriormente, foi curioso notar que nas águas-furtadas a estrutura das asnas de madeira era aproveitada para fazer a divisão entre os compartimentos.

Capítulo 2 – Descrição do Caso de Estudo

Neste caso, outra curiosidade construtiva a destacar é relativa ao facto de existirem zonas em que no interior da parede de tabique as tábuas eram substituídas por uma rede metálica, tal como se pode observar na Figura 2.23.b. Esta solução construtiva fazia com que as paredes divisórias se tornassem menos espessas, podendo assim haver um aproveitamento mais eficaz de toda a área existente nas águas-furtadas. No entanto, existiam outras zonas nas asnas em que o interior das paredes era feito de tábuas de madeira dispostas na vertical (zona II na Figura 2.23.a) ou perpendicularmente às vigas V4 (zona I na Figura 2.23.a).



a) Tábuas



b) Recurso a rede

Legenda: I – Tábuas dispostas na diagonal; II – Tábuas dispostas na vertical

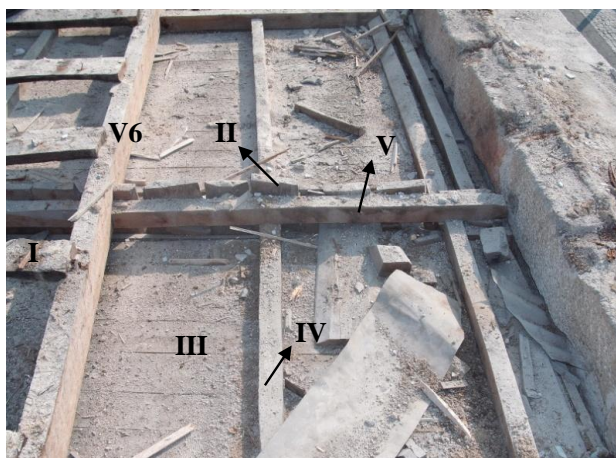
Figura 2.23 – Interior da parede de tabique ao nível das águas-furtadas (Setembro de 2011)

Também foi possível verificar *in situ* que a ligação entre a parede divisória de tabique e a parede exterior de alvenaria de pedra era concretizada de uma forma muito simples, pois estes dois elementos estruturais encontravam-se simplesmente encostados entre si, não existindo nenhuma ligação específica do tipo encaixe ou do tipo recurso a conectores.

Como já foi referido, as tábuas verticais existentes nas paredes de tabique (elemento II na Figura 2.24) têm um comprimento ligeiramente superior em relação ao pé-direito do rés-do-chão, ficando o seu topo oculto entre o forro do rés-do-chão e o soalho das águas-furtadas. Este pormenor construtivo permitia que as paredes divisórias não tivessem apenas a função de compartimentação mas também um importante contributo na estabilidade global da estrutura dos pavimentos e do edifício em geral, pois permitia

Capítulo 2 – Descrição do Caso de Estudo

que todos os elementos estruturais existentes no edifício pudessem trabalhar em conjunto e, formando deste modo, um sistema estrutural mais hiperestático.



Legenda: I – Barrote de soalho; II – Parede de tabique; III – Forro; IV – Barrote de forro; V – Elemento adicional

Figura 2.24 – Topo da parede divisória de tabique ao nível do pavimento das águas-furtadas (Setembro de 2011)

Foi ainda observado que a maioria das paredes divisórias do rés-do-chão acompanhava o alinhamento dos elementos estruturais, principalmente das vigas tipo V6. No caso das paredes de tabique dispostas perpendicularmente às vigas tipo V6, estas eram travadas transversalmente por uns elementos horizontais de secção aproximadamente quadrada e tipo barrote (elemento IV, Figura 2.24) que funcionavam simultaneamente como contraventamento transversal do topo das paredes e apoio das tábuas de forro (elemento III, Figura 2.24). Como se verifica na Figura 2.24 estes últimos elementos de travamento estavam apoiados diretamente na parede de granito, por meio de roços existentes na mesma, numa das extremidades, enquanto que na outra extremidade estavam pregados à viga V6 na sua face inferior por meio de pregos metálicos.

2.5. Espécies de madeira

Neste tipo de edifícios antigos é corrente serem utilizadas distintas espécies de madeira nos diversos elementos estruturais e construtivos que constituem o edifício. As espécies de madeira identificadas dependem, essencialmente, da região do país em que o edifício se localiza [11, 12].

Capítulo 2 – Descrição do Caso de Estudo

De modo a saber qual o tipo de espécie de madeira associada a cada elemento estrutural, recolheram-se amostras em obra e procedeu-se a ensaios laboratoriais. As amostras que foram possíveis recolher em obra e que foram ensaiadas provinham do contraventamento (elemento I da Figura 2.20), do forro do rés-do-chão, do soalho, da estrutura da cobertura, tábua vertical e fasquio de uma parede de tabique. Essas amostras encontram-se ilustradas na Figura 2.25. Esta tarefa de identificação da espécie de madeira não só teve o propósito de tentar descrever o edifício em estudo o mais detalhadamente possível, como também esta informação será muito útil num capítulo posterior relativo ao estudo analítico e numérico de avaliação da estabilidade dos elementos estruturais de madeira, que incluirá a verificação da segurança em relação aos estados limites últimos.



Figura 2.25 – Amostras de madeira usadas no ensaio de identificação da espécie
(Dezembro de 2011)

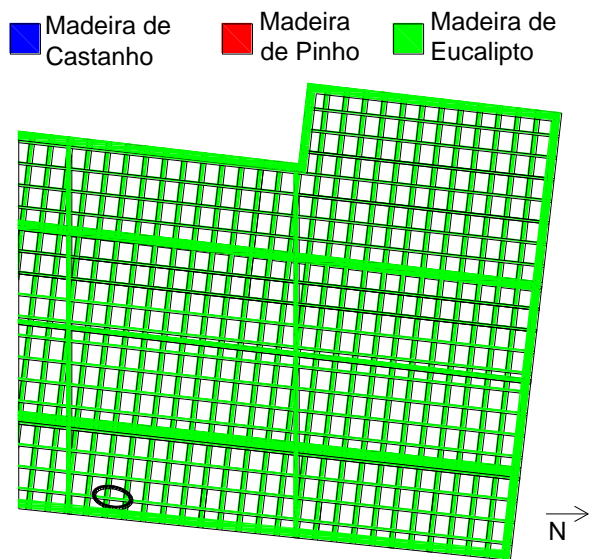
Capítulo 2 – Descrição do Caso de Estudo

Os ensaios de identificação da espécie de madeira foram realizados no laboratório do Departamento de Engenharia Florestal da Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, e destes ensaios obtiveram-se os resultados apresentados na Tabela 2.3. Os valores da densidade apresentados na Tabela 2.3 foram estimados para uma humidade relativa de 12%.

Tabela 2.3 – Resultados obtidos no ensaio de identificação das espécies de madeira

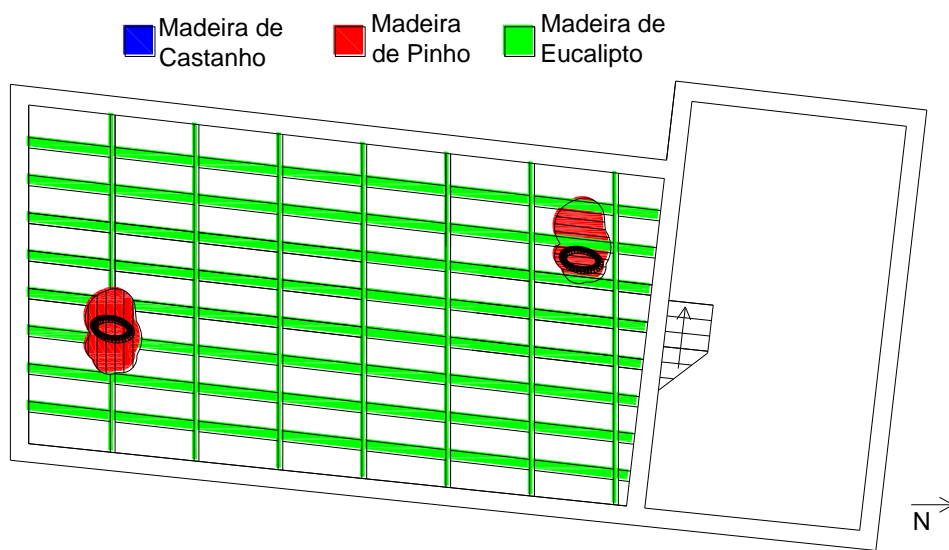
Amostra	Espécie de Madeira	Densidade (kg/m ³)
Barrote de Contraventamento	Castanho (<i>Castanea sativa</i>)	602
Tábua do Forro	Pinheiro Bravo (<i>Pinus pinaster</i>)	509
Tábua do Soalho	Pinheiro Bravo (<i>Pinus pinaster</i>)	617
Barrote da Cobertura	Eucalipto (<i>Eucalyptus globulus</i>)	719
Tábua Vertical	Pinheiro Bravo (<i>Pinus pinaster</i>)	518
Fasquio	Pinheiro Bravo (<i>Pinus pinaster</i>)	566

Estes resultados experimentais indicam que neste edifício foi utilizada uma variedade expressiva de espécies de madeira, porque das poucas amostras de madeira ensaiadas foram identificadas três tipos diferenciados de madeira, tais como: madeira de castanho (*Castanea sativa*), madeira de pinho bravo (*Pinus pinaster*) e madeira de eucalipto (*Eucalyptus globulus*). Estes tipos de madeira maciça são obtidos das árvores de castanheiro, pinheiro bravo e eucalipto, respetivamente. Estas árvores são abundantes na região norte do país. Mapas de espécie de madeira foram especificamente desenvolvidos e preparados aos níveis da cobertura, do pavimento das águas-furtadas e do pavimento do rés-do-chão, Figuras 2.26 a 2.28, respetivamente, no sentido de se tentar averiguar a ocorrência de algum padrão de aplicação de peças de madeira em função da espécie. Como não foi possível recolher amostras de todos os elementos construtivos de madeira, admitiram-se algumas espécies com recurso à comparação visual entre os vários elementos.



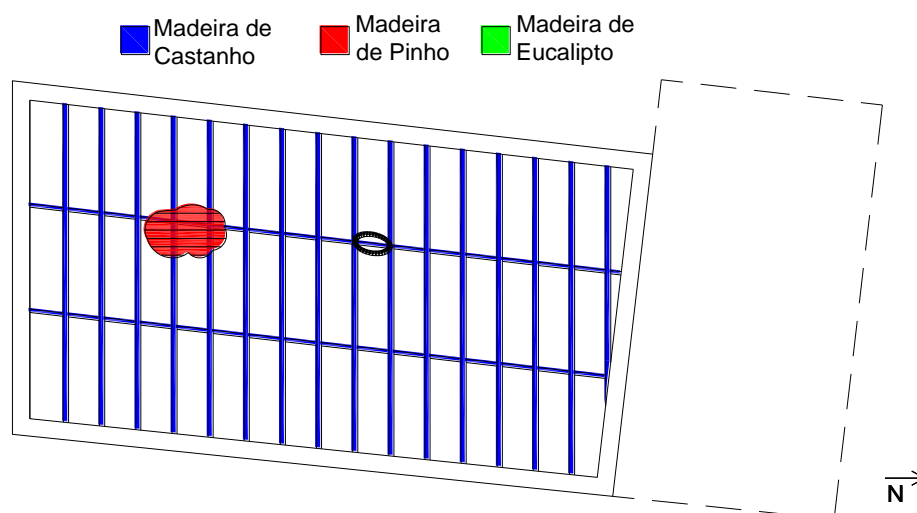
Legenda: ○ Amostra recolhida para identificação de espécie

Figura 2.26 – Mapa de espécies de madeira, na zona A da cobertura



Legenda: ○ Amostra recolhida para identificação de espécie

Figura 2.27 – Mapa de espécies de madeira ao nível do pavimento das águas-furtadas



Legenda: ○ Amostra recolhida para identificação de espécie

Figura 2.28 – Mapa de espécies de madeira ao nível do pavimento do rés-do-chão

Face aos mapas de espécie de madeira resultantes, verifica-se que em cada sistema estrutural horizontal estudado existia uma uniformidade em termos de espécie de madeira dos elementos estruturais de madeira que compunham esse sistema. No pavimento das águas-furtadas a generalidade dos elementos estruturais eram de madeira de eucalipto e apenas as tábuas do soalho e do forro eram de madeira de pinho, Figura 2.27, enquanto que no pavimento do rés-do-chão os elementos estruturais eram de madeira de castanho e as tábuas de soalho eram de madeira de pinho. As tábuas do soalho e do forro são tratadas aqui como sendo também elementos estruturais horizontais. Na generalidade, a madeira mais usada foi o eucalipto. A aplicação da madeira de castanho foi circunscrita ao pavimento do rés-do-chão e talvez por ser o sistema estrutural horizontal mais arrojado no sentido que tinha de vencer um vão livre expressivo (5,64 m). É importante frisar que estes mapas de espécie de madeira só podem ser vistos numa perspetiva simplista e meramente indicativa porque carecem de uma amostragem de peças de madeira mais representativa.

2.6. Considerações finais

Com este capítulo foi possível:

- Apresentar os desenhos de arquitetura (plantas, alçados e cortes) e as plantas estruturais (da cobertura, do pavimento as águas-furtadas e do pavimento do rés-

do-chão) necessários à percepção e à descrição pormenorizada do edifício utilizado como caso de estudo;

- Identificar e descrever os principais elementos estruturais de madeira, bem como apresentar alguns pormenores dos detalhes construtivos adotados, igualmente importantes para se perceber os diferentes sistemas estruturais horizontais aplicados em obra;
- Perceber que os elementos estruturais de madeira eram vigas, barrotes e tábuas;
- Constatar que os sistemas estruturais dos pavimentos de madeira eram complexos e formados por diversos elementos estruturais do tipo vigas e barrotes dispostos entre si ortogonalmente e igualmente espaçados, formando deste modo um reticulado estrutural regular;
- Saber que o modo de ligação entre os sistemas estruturais horizontais (pavimentos) e os sistemas estruturais verticais (paredes interiores de tabique) foi concretizado construtivamente de modo a haver uma ligação eficaz entre estes sistemas, capazes de permitir um efeito conjunto;
- Identificar as espécies de madeira da maioria dos elementos estruturais existentes no edifício e apresentar os mapas de espécie de madeira resultantes;
- Verificar que foram aplicadas em obra pelo menos três espécies distintas de madeira. Essas espécies foram a madeira de eucalipto (elementos estruturais do pavimento das águas-furtadas e na cobertura), a madeira de pinho bravo aplicada nas tábuas do soalho e forro existentes ao nível do sistema estrutural do pavimento das águas-furtadas e ao nível do pavimento do rés-do-chão e a madeira de castanho aplicada nos elementos estruturais que compunham o sistema estrutural do pavimento do rés-do-chão;
- Concluir que seria necessário usar uma amostragem de peças de madeira mais representativa para se chegar a resultados mais rigorosos. Esta limitação resulta da impossibilidade de recolher mais amostras em obra, dificuldades de transporte e de contenção económica.

3. AVALIAÇÃO DO ESTADO PATOLÓGICO DA ESTRUTURA DE MADEIRA

3.1. Objetivos

Neste capítulo, os objetivos são os seguintes:

- Descrever as patologias identificadas nos elementos estruturais de madeira do edifício escolhido como caso de estudo;
- Apresentar mapas de patologias para todas as plantas estruturais do edifício;
- Realizar ensaios laboratoriais destinados à identificação de possíveis patologias localizadas no interior de um dos elementos estruturais de madeira do edifício;
- Comparar os resultados experimentais desses ensaios e averiguar a existência de possíveis correlações entre eles.

3.2. Introdução

Com vista à concretização dos objetivos apresentados, durante as visitas realizadas à obra, foi feito um levantamento visual das patologias que eram mais perceptíveis nos elementos estruturais de madeira do edifício em estudo. Este processo de levantamento apresentou algumas dificuldades pois, à semelhança do referido no Capítulo 2, o processo de demolição do edifício decorreu em paralelo com este trabalho de levantamento de patologias o que gerou algumas condicionantes em termos de rigor e de detalhe.

Com este levantamento de patologias foi possível elaborar mapas de patologias, sendo que houve uma extrapolação dos resultados de modo a tentar perceber as zonas mais afetadas do edifício. Estes mapas tiveram como base as plantas estruturais apresentadas no Capítulo 2.

Depois de alguns meses de permanência da viga V7 nas instalações da UTAD, sujeita a condições termohigrométricas controladas, foi possível proceder à realização dos ensaios não destrutivos programados, ou seja, o ensaio com o resistógrafo e o ensaio termográfico.

Com os dados recolhidos aquando da realização destes ensaios foi possível conhecer melhor o estado patológico deste elemento estrutural e também fazer uma comparação entre os mesmos de forma a verificar se existe alguma possível correlação entre os ensaios no estudo experimental de identificação do estado patológico de elementos

estruturais de madeira antiga. Para além da possível existência de correlação entre ensaios ser um resultado valioso, também poderá corroborar a existência efetiva de patologias internas em determinada zona dessa viga V7.

3.3. Patologias identificadas visualmente

As principais patologias ocorridas em obras de peças de madeira derivam implicitamente da natureza do material e, nomeadamente, das suas próprias características. A qualidade construtiva dos edifícios, a deficiente ou inexistente manutenção, a ocorrência de ações gravosas ou acidentais tais como um sismo, um incêndio ou uma inundação poderão ser causas que propiciam o aparecimento de patologias em elementos construtivos de madeira.

Paralelamente, existem intervenções realizadas em edifícios antigos que podem causar o aparecimento de anomalias ou patologias. Ampliações em altura (que podem provocar o aumento dos esforços a suportar pelos elementos estruturais) e alterações funcionais em pisos inferiores (que por vezes levam à remoção de paredes resistentes), são dois exemplos de intervenções, que quando realizadas de forma incorreta poderão resultar no aparecimento de efeitos secundários desfavoráveis nos elementos estruturais de madeira. Para além dos elementos de madeira não estrutural poderem ser afetados, também os elementos estruturais poderão ser afetados em termos de integridade material, colocando em risco a estabilidade do edifício e, implicitamente, a segurança das pessoas.

Existem dois tipos de degradação que podem surgir na madeira, a degradação físico-química e a degradação biológica. A degradação físico-química, normalmente, é devida aos agentes abióticos, à formação e ao crescimento da árvore, aos agentes químicos e à ação do fogo. Quando exposta à ação da chuva, a madeira é sujeita a variações de humidade entre a face exterior e a face interior, provocando tensões que poderão conduzir ao aparecimento de fendas e, logo, a uma deterioração das propriedades da madeira.

No entanto, dentro dos agentes abióticos, não é só a chuva que pode provocar danos na madeira. A exposição da madeira à radiação solar também poderá ser prejudicial. O efeito da incidência direta dos raios ultravioleta na madeira poderá implicar a mudança

Capítulo 3 – Avaliação do Estado Patológico da Estrutura de Madeira

da cor superficial para um tom acinzentado e uma separação da membrana exterior da madeira, ou seja, uma deterioração superficial da peça.

Quanto à má formação da árvore, o seu crescimento irregular provoca usualmente o desvio das fibras o que pode influenciar a sua capacidade resistente. Por sua vez, a existência de nós numa peça de madeira poderá reduzir a sua secção útil transversal e distorcer o alinhamento das fibras resultando por isso numa diminuição da sua capacidade resistente [13].

Os principais agentes biológicos de ataque da madeira são os organismos xilófagos. Estes organismos podem ser divididos em fungos, insetos de ciclo larvar, insetos sociais ou térmitas e xilófagos marinhos [1].

Aquando da visita à obra foi possível identificar algumas patologias, sendo que a maioria aparentava estar relacionada com a presença de água.

Na Figura 3.1.a é bem notória a presença de fungos na zona do apoio de elementos de madeira na parede exterior de alvenaria de pedra. Neste caso, as vigas de madeira, os barrotes e as tábuas de forro estavam afetadas por este tipo de patologia. A presença de fungos pode estar associada a uma ventilação natural inadequada do espaço e à existência de um elevado teor de água relativa. Neste caso, a parede exterior não tinha qualquer tipo de tratamento de impermeabilização e o compartimento da semicave apresentava um sistema de ventilação natural deficitário. Os fungos são micro-organismos que têm a capacidade de decompor as substâncias da madeira, alimentando-se delas. Os fungos destroem a madeira levando-a à redução da sua capacidade resistente e à alteração das suas propriedades físicas. A deteção precoce deste tipo de ataque é muito difícil de ser executada porque só é possível identificar a espécie de fungo presente na peça de madeira quando esta já se encontra deteriorada. Os principais aspetos que permitem indicar a presença de fungos são o cheiro a mofo, o descascamento da tinta, os empenos nas peças de madeira e o amolecimento das próprias peças.

Na Figura 3.1.b também é perceptível a presença de fungos na viga V7 pelo facto da cor, na zona afetada (zona do meio vão e junto aos apoios), ser mais clara do que a coloração do resto da viga. Este facto é consequência das aberturas existentes na semicave, que

Capítulo 3 – Avaliação do Estado Patológico da Estrutura de Madeira

foram referidas anteriormente, aquando da descrição da solução estrutural da semicave, e que são, também, visíveis na Figura 3.1.b. Estas aberturas eram um local ideal para o aparecimento de humidade por estarem em contacto direto com o solo e por não serem vedadas. Tendo em conta que os apoios das vigas V7 se encontravam junto a estas aberturas existentes na parede de granito, tornava-se então fácil e propício o ataque destas peças nestas zonas de apoio. É então possível referir que as zonas mais afetadas das vigas V7 eram precisamente os pontos de apoio destas nas paredes resistentes de alvenaria de granito enterradas e as partes do meio vão. A secção transversal e as propriedades do material do elemento estrutural são possivelmente afetadas devido a esta patologia e, em caso extremo, a estabilidade estrutural destas vigas poderá estar em risco.



a) Forro



b) Viga V7

Figura 3.1 – Ataque de fungos (Setembro de 2011)

Outro tipo de patologia frequente de ocorrer em peças de madeira de edifícios antigos é o ataque de insetos. O edifício usado como caso de estudo neste trabalho de investigação também apresentava sinais de existência deste tipo de patologia. Por exemplo, na Figura 3.2 é possível observar a ocorrência de ataque de insetos em diferentes peças de madeira deste edifício. Este ataque, no caso da Figura 3.2.a, é, provavelmente, provocado por térmitas. As térmitas são insetos que causam danos graves nas peças de madeira destruindo-as por completo e a uma escala muito superior em relação a qualquer outro tipo de inseto suscetível de atacar as peças de madeira. O seu ataque consiste na destruição total de uma peça de madeira, apesar de deixar intacta a sua parte superficial e visível, transmitindo desta forma uma ideia de integridade da peça de madeira. No entanto, a parte que estes insetos deixam intacta tem uma espessura tão pequena que ocorre uma degradação após um ligeiro toque. Foi precisamente o que

Capítulo 3 – Avaliação do Estado Patológico da Estrutura de Madeira

ocorreu neste caso, que após um pequeno toque, a madeira do aro da porta se desfez (Figura 3.2.a).

Paralelamente, na Figura 3.2.b também é possível observar o ataque de insetos num elemento estrutural deste edifício. Neste caso, pelas características (tamanho e forma) dos orifícios e pelo tipo de “túneis” visíveis à vista desarmada nesta peça de madeira é provável que o ataque possa ter sido causado por caruncho ou por larvas. Estes pequenos insetos são conhecidos pela sua capacidade de efetuarem pequenos “túneis” e que são bem perceptíveis nesta peça de madeira.



a) Aro da porta



b) Elemento estrutural

Figura 3.2 – Ataque de insetos (Setembro de 2011)

Ao nível da cobertura deste edifício foi também possível observar a existência de um ninho de pássaro na parede de granito e muito próximo dos apoios das vigas V6. Sabendo que estes são feitos de matéria vegetal, e que esta pode possuir pequenos insetos, esses ninhos poderiam por isso também ser propícios à infestação das peças de madeira. Neste caso específico, nota-se que o apoio da viga V6 na parede de alvenaria de granito (Figura 3.3.b), para além de apresentar nessa zona uma tonalidade mais escura do que no resto da viga, o que deixa antever a presença de humidade nesta zona, também continha alguns “túneis”, que podem ter sido transmitidos pelos insetos presentes no ninho mencionado ou a existência desse ninho poderá ter criado condições adequadas à proliferação de insetos. Outra possível justificação para o aparecimento desta patologia na zona do apoio da viga V6 poderá ser o facto desta viga ter estado ligada a uma viga cinta de madeira precisamente nesta zona. Caso a viga cinta estivesse atacada por insetos, poderia também tê-los transmitidos à viga V6.



a) Ninho de pássaro



b) Apoio da viga V6

Figura 3.3 – Patologia devido à existência de ninho (Setembro de 2011)

As amostras de peças de madeira recolhidas em obra e que serviram para a realização do ensaio de identificação da espécie de madeira, Figura 2.25, tiveram que ser serradas previamente. O corte produzido nestas peças permitiu a visualização do interior da peça de madeira, a identificação de patologias existentes no interior e que não eram visíveis pelo exterior, e a avaliação da profundidade afetada. Na Figura 3.4 apresentam-se as fotografias dessas amostras após corte.

Verifica-se que a amostra de barrote de contraventamento, Figura 3.4.a, apenas mostrava sinais de ataque de insetos (orifícios) na camada (ou anel) mais externa, não apresentando qualquer tipo de patologia visível à vista desarmada em profundidade, ou seja, não eram visíveis “túneis” ou orifícios provocados por insetos nem a existência de qualquer fenda (a pequena fenda que se observa não é de origem patológica mas sim devido à existência de um prego naquela zona) nos anéis internos. Por sua vez, a amostra de tábuas de forro, Figura 3.4.b, não apresentava sinais de qualquer tipo de patologia à vista desarmada.

No que diz respeito à amostra de tábuas de soalho, Figura 3.4.c, esta apresentava alguns sinais de ataque de insetos do tipo caruncho também de forma localizada e à superfície. A zona atacada correspondia à zona de ligação do tipo “macho/fêmea” entre tábuas.

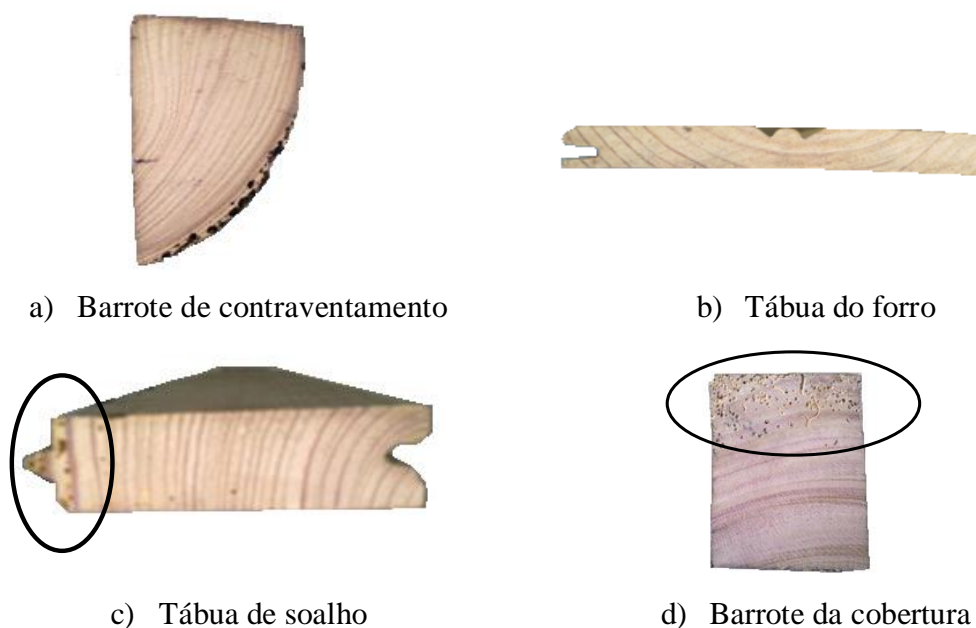


Figura 3.4 – Amostras de peças de madeira serradas (Junho de 2012)

Quanto à amostra de barrote da cobertura, Figura 3.4.d, também foi possível verificar a existência de uma grande quantidade de orifícios e de “túneis” provocados por insetos do tipo caruncho. Este ataque apenas se localizava na zona da face superior da peça. Nesta amostra também foi possível observar a existência de ataque de fungos (Figura 3.5). Esta patologia poderá ser justificada pelo facto da peça ter pertencido à estrutura da cobertura, e, por isso, ter estado muito mais suscetível às intempéries, ou seja, ter sofrido mais frequentemente e ao longo do seu período de vida uma variação acentuada e periódica do seu teor em água.



Figura 3.5 – Zona atacada por fungos na amostra de barrote da cobertura (Junho de 2012)

Após a identificação e tentativa de descrição das patologias ocorridas nos elementos de madeira do edifício em estudo foi possível elaborar mapas de patologias nos quais se

Capítulo 3 – Avaliação do Estado Patológico da Estrutura de Madeira

tentou mapear o tipo de patologia ocorrido em cada um dos elementos estruturais. Para o efeito, socorreu-se das plantas estruturais de cada piso apresentadas no Capítulo 2.

É importante ressaltar novamente que face ao exposto anteriormente, o levantamento de patologias em obra dos elementos de madeira foi condicionado pelo processo de demolição que se encontrava em curso e também foi condicionado pelo número de amostras de peças de madeira que foi possível levar para o laboratório. Neste último caso, problemas de autorização do Dono de Obra e problemas logísticos de transporte foram os fatores principais que limitaram o número de peças de madeira a ensaiar laboratorialmente. Como tal, os mapas de patologias das peças de madeira apresentados seguidamente estão fortemente afetados por estes condicionalismos.

Neste caso, como se pode observar nas Figuras 3.6 a 3.8 as patologias identificadas nos elementos de madeira tendem a aparecer mais frequentemente nos pontos críticos. Esses pontos são correspondentes aos pontos mais solicitados do elemento onde os esforços (quer transversos, quer momentos fletores) apresentam os seus valores mais elevados. Neste caso, estes pontos são os apoios e o meio vão. Este facto pode corresponder ao cenário mais indesejável porque a capacidade resistente da madeira tende a diminuir com a presença deste tipo de patologias. A redução da área útil da secção transversal e a degradação do material são os principais fenómenos resultantes deste estado patológico e que contribuem certamente para uma perda de capacidade resistente.

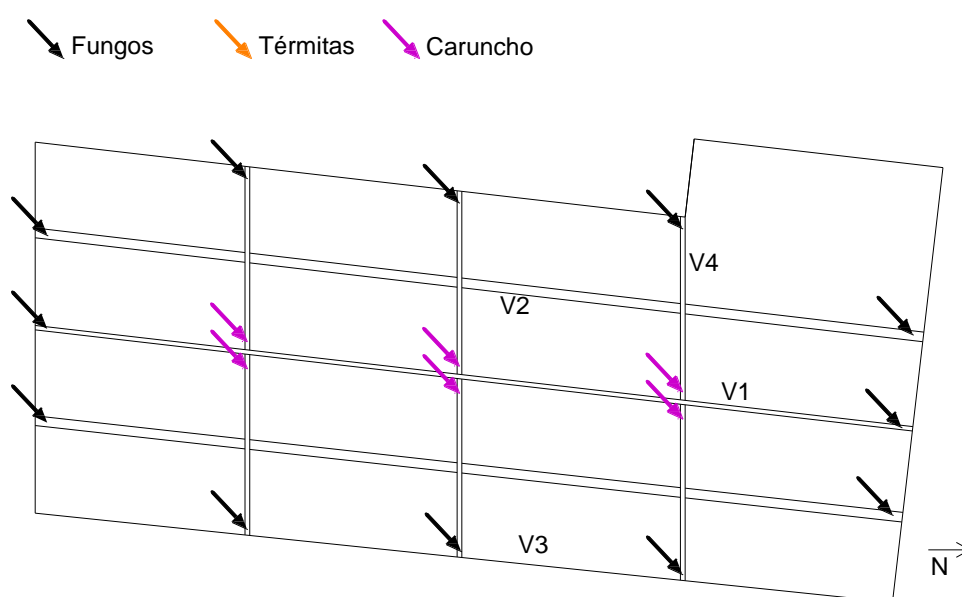


Figura 3.6 – Mapa de patologias da cobertura

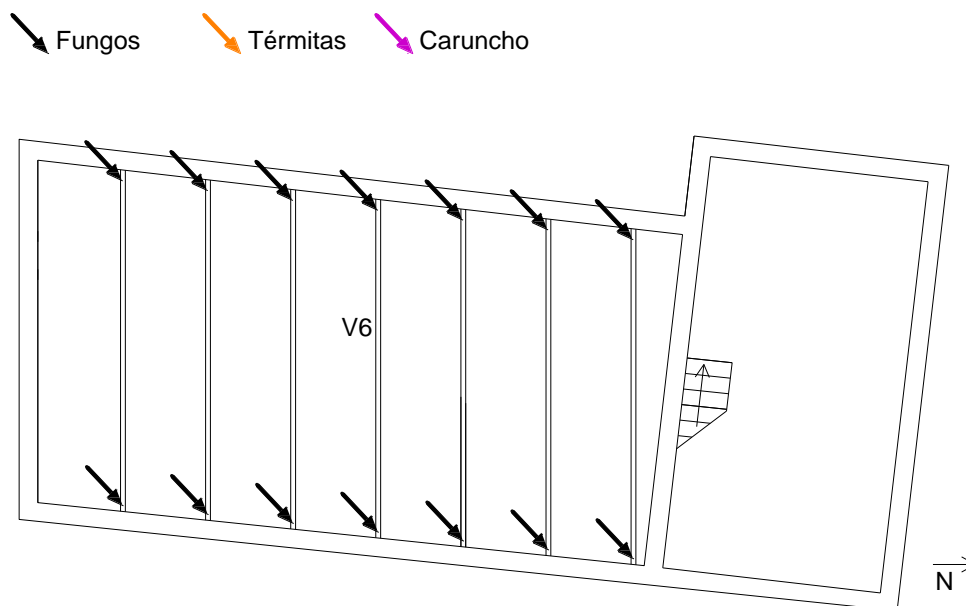


Figura 3.7 – Mapa de patologias do pavimento das águas-furtadas

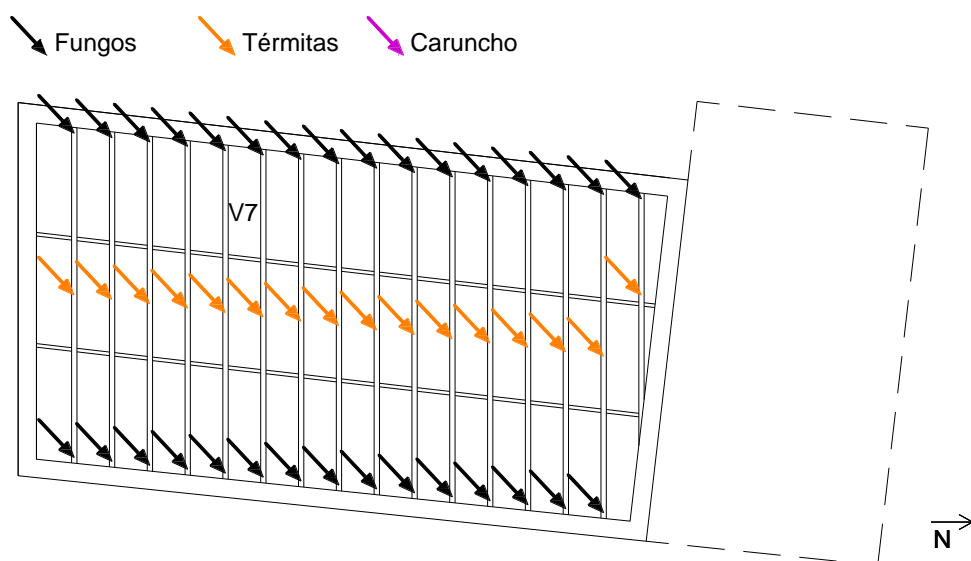


Figura 3.8 – Mapa de patologias do pavimento do rés-do-chão

3.4. Identificação experimental de patologias de elementos de madeira

No sentido de dar continuidade à tarefa de identificação do estado patológico dos elementos de madeira do edifício também foram realizados dois ensaios não destrutivos a uma peça de madeira recolhida em obra, mais concretamente, a uma amostra de viga V7, Figura 3.9. Nesta análise recorreu-se ao resistógrafo e à termografia. De referir que se optou por ensaiar esta amostra de viga em detrimento de uma peça de madeira mais

Capítulo 3 – Avaliação do Estado Patológico da Estrutura de Madeira

pequena, um barrote por exemplo, pelo facto deste elemento estrutural ter estado apoiado nas paredes de alvenaria de pedra de granito enterradas, e cujos topos se encontravam localizados numa zona muito próxima do terreno exterior. Logo, pensa-se que será mais suscetível de apresentar patologias do que os barrotes que estavam aplicados em zonas da estrutura de madeira mais protegidas ou menos vulneráveis à degradação. Outro motivo que justificou esta decisão foi o facto desta viga também vir a ser utilizada noutro ensaio, que será abordado posteriormente neste trabalho, e porque apresentava a particularidade de ser um elemento estrutural misto, ou seja, tratava-se de uma viga de madeira reforçada com um elemento estrutural metálico.

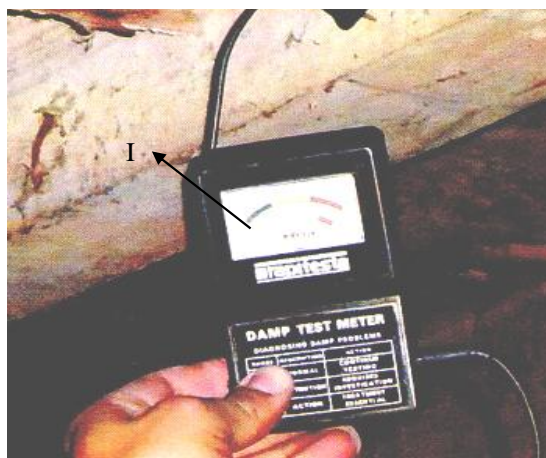


Figura 3.9 – Amostra de viga V7 a ensaiar (Maio de 2012)

Existem outros ensaios não destrutivos que permitem aferir a existência de imperfeições em peças de madeira. Um desses ensaios permite avaliar o teor de humidade de uma peça de madeira através da utilização de um higrómetro [14]. Este aparelho é propositadamente utilizado para a medição do teor de humidade da madeira. É um ensaio que pode ser facilmente realizado *in situ* porque o aparelho utilizado baseia-se na utilização de duas agulhas que se cravam na peça a ensaiar e que está acoplado a um ecrã com uma escala de humidade. Na Figura 3.10 é possível observar a execução deste tipo de ensaio e o aparelho utilizado onde se destaca a escala de humidade (pormenor I). Este ensaio é frequentemente utilizado em processos de reabilitação porque é de fácil utilização e porque permite de uma forma expedita aferir o estado de conservação de elementos de madeira aplicados em obra.

Neste trabalho de investigação, este ensaio não destrutivo não foi realizado pelo facto de não se dispor deste equipamento. Paralelamente, atendendo a que a viga V7 permaneceu

no laboratório durante oito meses, sob condições termohigrométricas controladas e constantes, teve a oportunidade de permanecer seca.



Legenda: I – Escala de humidade

Figura 3.10 – Higrómetro [14]

3.4.1. Ensaio do resistógrafo

O resistógrafo é um equipamento utilizado em processos de inspeção da integridade estrutural de material lenhoso, na deteção de apodrecimento, na análise da qualidade da madeira e no estudo do crescimento anual lenhoso através da medição da resistência mecânica por intermédio de perfuração [15, 16].

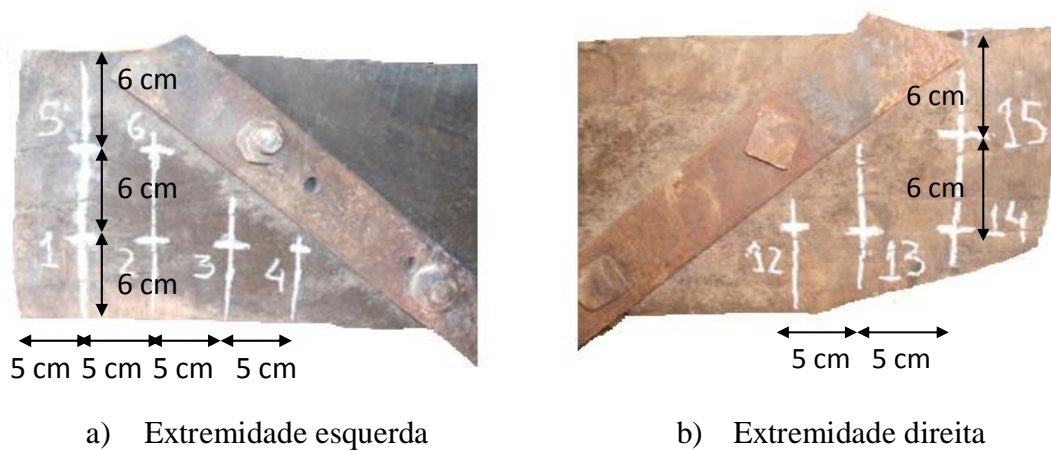
Neste trabalho de investigação, este ensaio foi realizado à amostra de viga V7, no dia 9 de Julho de 2012, no Laboratório de Estruturas da UTAD.

A localização dos pontos de perfuração na amostra da viga não foi definida de forma aleatória. Tal como foi possível observar em obra, e tal como foi referido anteriormente, as zonas da viga V7 que apresentavam sinais mais acentuados de patologia eram as zonas referentes aos apoios. Então, a malha de pontos de perfuração definida contemplou uma trama de pontos mais densa nas extremidades da viga e uma trama de pontos mais esparsa ao longo do desenvolvimento da viga, sendo que esses pontos foram localizados a meia altura da viga. Observou-se que a secção transversal da viga não era constante ao longo do seu eixo longitudinal e que esta apresentava uma secção transversal aproximadamente retangular. É importante referir, que em outros edifícios antigos similares ao estudado neste trabalho de investigação, as vigas principais dos pavimentos são frequentemente troncos de árvores e, por isso, com uma secção

Capítulo 3 – Avaliação do Estado Patológico da Estrutura de Madeira

transversal circular. Neste caso, nas extremidades, a altura da secção transversal era de 18 cm e a meio vão esta grandeza era de 19 cm. Estas dimensões não coincidem com as dimensões referidas no Capítulo 2 porque a viga medida em obra não foi a mesma que foi trazida para o laboratório. É um facto que as dimensões das vigas não eram as mesmas entre elas.

Face ao exposto, a malha de pontos de perfuração adotada junto aos apoios corresponde à apresentada na Figura 3.11.



a) Extremidade esquerda
b) Extremidade direita

Figura 3.11 – Malha de pontos de perfuração adotada nas extremidades da viga V7
(Julho de 2012)

Tal como se pode observar através da Figura 3.11, a malha de pontos de perfuração adotada para a extremidade esquerda contempla seis pontos (de 1 a 6), e é mais densa do que a malha adotada na extremidade direita, que apenas é constituída por quatro pontos (de 12 a 15). Este facto explica-se pela visível irregularidade existente nestes topos da viga. Também se teve em consideração a peça metálica da ancoragem existente em ambas as faces da viga e em ambas as extremidades desta, assim como, a existência de alguns conetores metálicos existentes nas proximidades destas peças metálicas e de forma a minimizar o risco de dano do aparelho do resistógrafo. Deste modo, apenas se considerou um ponto de perfuração próximo destas peças.

Em relação aos pontos 7, 8, 9, 10 e 11, estes foram localizados ao longo do desenvolvimento da viga e foram posicionados de forma a garantir 1 m de espaçamento entre si. A localização destes últimos pontos pode ser observada no esquema apresentado na Figura 3.12.

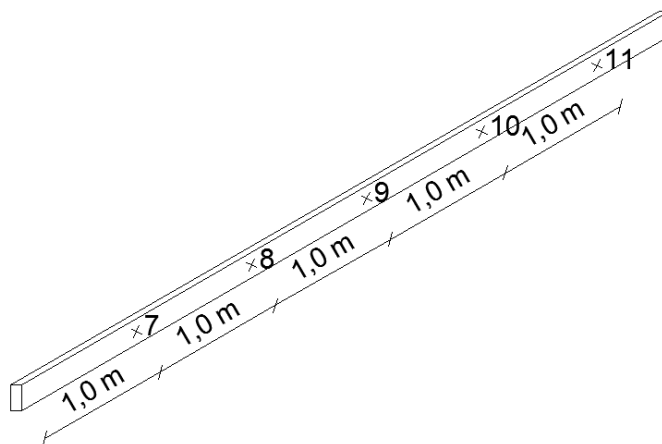


Figura 3.12 – Disposição dos pontos de perfuração intermédios do ensaio do resistógrafo

Depois de definida a malha de pontos de perfuração a adotar procedeu-se à montagem do equipamento. Os componentes do equipamento do resistógrafo estão apresentados na Figura 3.13 assim como a respetiva designação. Tal como se pode observar, para além do resistógrafo, também existe o cabo de alimentação, que permite fornecer energia elétrica ao resistógrafo assim como permitir que os dados obtidos sejam transmitidos para a bateria. A bateria também funciona como um recetor de dados e permite a impressão de talões com os valores resultantes do ensaio. O cabo de alimentação tem um comprimento de 10 m, o que permite de forma simples a utilização deste equipamento em zonas de edifícios menos acessíveis, como por exemplo, as asnas de madeira da estrutura da cobertura de um edifício antigo. Também é possível ligar a bateria diretamente à rede elétrica através do cabo de alimentação da rede. Existem sempre agulhas suplentes para o caso de alguma delas se partir no decorrer da realização de um ensaio e que são guardadas num porta-agulhas. Todos estes componentes são devidamente guardados e acondicionados numa mala de transporte.

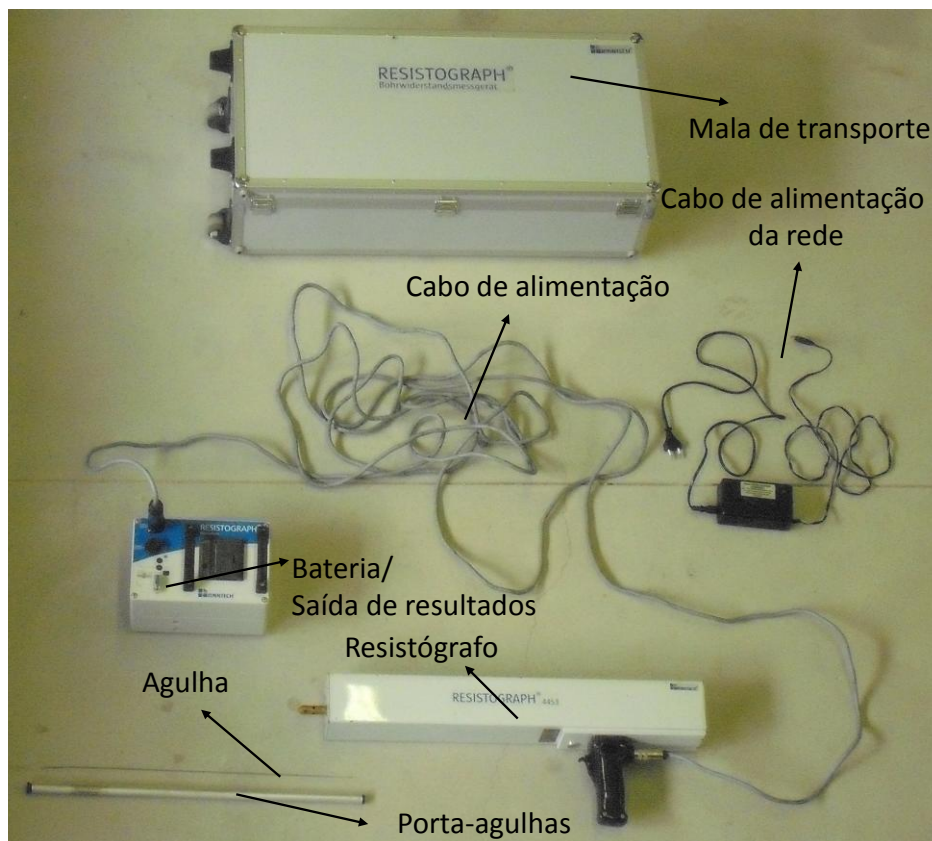
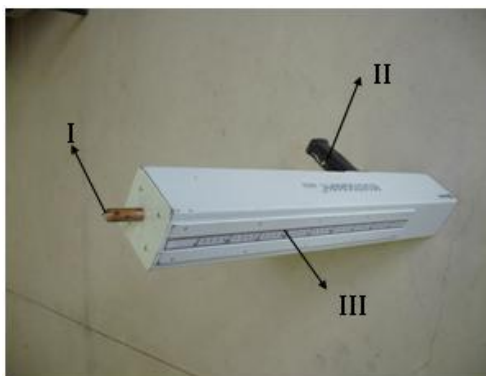


Figura 3.13 – Componentes do resistógrafo (Julho de 2012)

Relativamente ao resistógrafo, existem três componentes que são importantes referir especificamente e que estão identificadas na Figura 3.14. O componente I é o local por onde a agulha sai e que tem de estar posicionado no ponto de perfuração e em contacto direto com a peça de madeira a ensaiar. Em relação ao componente II, este corresponde ao gatilho que permite controlar a evolução do processo de penetração da agulha na peça de madeira. Para que esta penetre a madeira, o gatilho tem que estar sempre premido. Só se deixa de premir o gatilho quando a agulha ultrapassa a face posterior da peça. Ao se libertar o gatilho numa fase intermédia do ensaio, então serão obtidos dois resultados diferenciados e correspondentes às duas etapas do ensaio, o que pode originar algumas entropias de ensaio. Quanto ao componente III, este trata-se de uma escala centimétrica que corresponde ao alcance máximo da agulha. Quando o ensaio se está a desenrolar, acende-se uma luz na referida escala que permite perceber quantos centímetros a agulha já penetrou na peça de madeira e, sabendo a largura da peça a ensaiar, perceber quando é necessário terminar o ensaio.



Legenda: I – Saída da agulha; II – Gatilho; III – Escala

Figura 3.14 – Resistógrafo (Julho de 2012)

De referir também que é necessário ter bastante cuidado no manuseamento deste equipamento porque quando a agulha está a penetrar a peça de madeira, o resistógrafo não deve sofrer qualquer movimento brusco sob pena da agulha partir. Outra causa que pode levar ao dano da agulha é a existência de algum elemento de maior dureza no interior da peça, como por exemplo, um prego de aço, um parafuso de aço ou algum nó da própria madeira. A Figura 3.15 exemplifica o modo de utilização do aparelho.



Figura 3.15 – Utilização do resistógrafo (Julho de 2012)

O ensaio do resistógrafo foi então realizado em cada um dos quinze pontos de penetração constituintes da malha anteriormente descrita. Em cada ensaio e após o tratamento dos dados registados, resultou um gráfico indicador da resistência da peça de madeira ao longo da linha de penetração da agulha.

O gráfico apresentado na Figura 3.16 é relativo ao ensaio do resistógrafo realizado no ponto de perfuração P7 e é apresentado a título de exemplo. Os gráficos obtidos nos

outros pontos de perfuração são análogos ao exposto na Figura 3.16 e estão apresentados no Anexo 1.

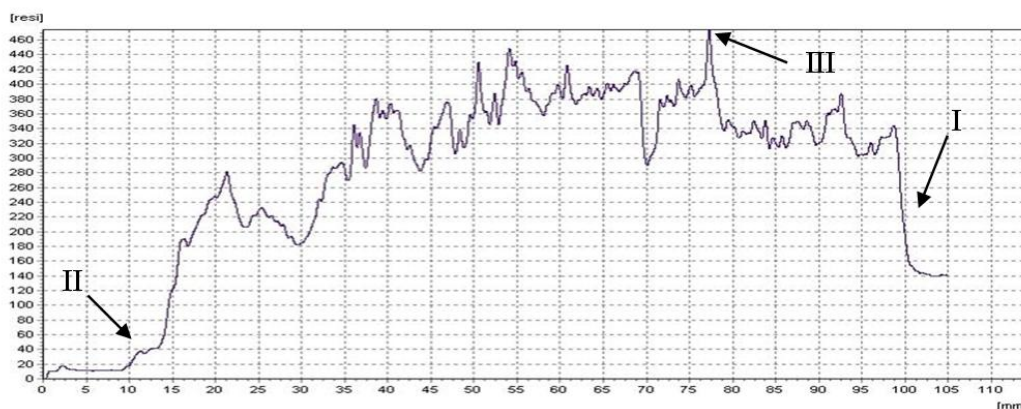


Figura 3.16 – Gráfico resultante da realização do ensaio do resistógrafo no ponto de perfuração P7

Neste tipo de gráfico, o eixo das abcissas é relativo ao comprimento de penetração da agulha do resistógrafo, ou seja, ao valor assinalado na escala do aparelho e identificada na Figura 3.14. No caso deste ensaio, este valor corresponde sensivelmente à largura da viga e que é igual a aproximadamente 10,5 cm. Apenas não corresponde exatamente à largura da viga porque a agulha tende a sair sempre um pouco da viga. Este facto pode ser comprovado no diagrama pois quando a agulha perfura a totalidade da viga, o valor da resistência apresenta uma queda brusca no seu valor (pormenor I, Figura 3.16). O facto do valor da resistência não corresponder a zero no final do ensaio, pode indicar que o furo foi executado de uma forma enviesada.

Por sua vez, o eixo das ordenadas é relativo ao valor da resistência que a agulha encontra ao penetrar a madeira. Este valor não tem qualquer relação com outro tipo de resistência, pelo que é adimensional. Este facto justifica que apenas se pode fazer uma análise comparativa com outro tipo de ensaio. A título de exemplo, a Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), Departamento de Engenharia Civil, Secção de Estruturas, considera que, em termos práticos, para valores de resistência inferiores a 100, a madeira ou é de baixa dureza ou apresenta uma degradação material notória. Como se verifica na Figura 3.16, o valor máximo atingido no ponto P7 foi bastante superior a 100, o que deixa antever que a madeira em estudo apresenta uma elevada dureza e um bom estado de conservação nesta zona. Aliás, tal como se poderá

Capítulo 3 – Avaliação do Estado Patológico da Estrutura de Madeira

comprovar posteriormente, os resultados de resistência obtidos com este ensaio excedem claramente o valor de 100, para todos os pontos.

Adicionalmente, a fase inicial do diagrama da Figura 3.16 (pormenor II) também espelha que existe uma fase inicial de adaptação da penetração da agulha na peça de madeira. Nos primeiros milímetros de penetração da agulha, regista-se uma resistência da madeira muito reduzida (inferior a 20), que quando é comparada com a resistência registada ao longo da parte restante de realização do ensaio, é deveras inferior. Por isso, pensa-se que não deverá ser considerada na interpretação dos resultados finais do estado de conservação da madeira.

Paralelamente, no ensaio do resistógrafo ao ponto P7 registou-se o valor máximo de resistência de 460 e para uma profundidade de penetração de 77 mm, pormenor III da Figura 3.16.

Atendendo a que não é possível tratar numericamente os dados registados ao longo da realização dos ensaios, foi desenvolvido um diagrama (Figura 3.17) referente ao pico de resistência (resistência máxima) aferido em cada ponto de perfuração ensaiado. Como nas extremidades da viga os pontos que compõem a malha estão alinhados verticalmente, existe uma sobreposição dos valores de resistência máxima dos pontos de perfuração existentes nessas zonas.

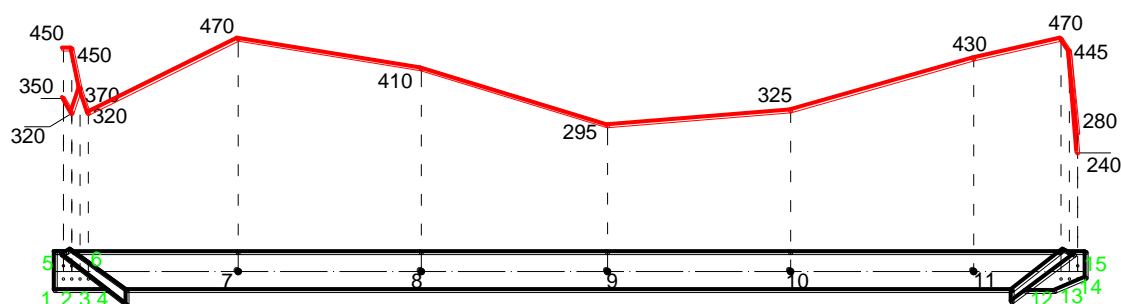


Figura 3.17 – Resultados do ensaio do resistógrafo

Tal como se pode observar no diagrama da Figura 3.17, os valores de resistência foram mais baixos na metade direita da viga. A maior discrepância de valores de resistência foi notada na zona dos apoios. Os valores de resistência medidos no lado esquerdo da viga foram superiores em relação aos verificados no apoio direito. Este facto também se nota nos pontos ensaiados na zona central da viga (de P7 a P11). Neste caso, os pontos

P10 e P11 apresentaram valores de resistência inferiores em relação aos pontos P7 e P8, sendo que o valor mais baixo de resistência ocorrido nesta zona foi no ponto mais próximo do meio vão, P9. Em relação à globalidade da viga, constata-se que os pontos que apresentaram maior resistência foram os pontos P7 e P12, com uma resistência de 470. Em contrapartida, os pontos que apresentaram um menor valor de resistência foram os pontos P14 e P15, com 240 e 280, respetivamente.

Tomando como base o referido anteriormente e tendo em conta estes resultados experimentais, é possível afirmar que aparentemente a madeira da amostra de viga V7 ensaiada apresenta um bom estado de conservação e não parece haver zonas localizadas danificadas no interior do elemento estrutural. De facto, em cada ponto de perfuração da malha obtém-se sempre um valor de resistência superior a 100. Contudo estes resultados devem ser encarados com alguma cautela, visto este ensaio não destrutivo conferir resultados de natureza qualitativa.

Apesar do referido anteriormente e de forma genérica, observa-se a ocorrência de uma simetria de resistência do elemento estrutural. A zona central da viga parece ser a zona crítica em termos de valor da resistência. Apesar de na zona das extremidades da viga ter-se registado alguns valores reduzidos de resistência, também se registou os valores máximos ou próximos dos máximos e, como tal, esta informação não parece permitir afirmar que estas zonas da viga tenham apresentado um estado patológico mais gravoso ou acentuado do que a parte restante da viga.

Parece oportuno referir que associado a este ensaio poderá haver muitos fatores que podem influenciar os resultados finais. Uma peça de madeira maciça tende a ser heterogénea em termos materiais porque a madeira é naturalmente um material com essas características. O facto da viga ensaiada ser uma peça de madeira que foi cortada de um tronco de uma árvore também poderá influenciar os resultados porque a dificuldade de penetração da agulha poderá ser dependente do alinhamento das fibras da madeira e da orientação dos anéis após o processo de corte da peça.

3.4.2. Ensaio da termografia

O ensaio de termografia é um outro tipo de ensaio não destrutivo amplamente utilizado no contexto da construção civil, não só na análise da madeira mas também noutros

Capítulo 3 – Avaliação do Estado Patológico da Estrutura de Madeira

contextos tais como os trabalhos de peritagem de avaliação do desempenho térmico de elementos construtivos aplicados em obra. Em [17] e em [18] também se utilizou este ensaio com sucesso no estudo do desempenho térmico de materiais de construção alternativos sustentáveis tais como placas de granulado de caroço de espiga de milho e betão leve à base de caroço de espiga de milho.

De forma muito resumida, este ensaio consiste na medição da temperatura superficial de um elemento através da recolha de imagens térmicas [19]. A quantidade de calor irradiado é aferida através da utilização de uma câmara de termografia constituente do aparelho utilizado no ensaio, denominado de câmara termográfica (Figura 3.18). A imagem térmica obtida traduz a distribuição da temperatura superficial ocorrida na superfície do elemento ensaiado.



Figura 3.18 – Câmara termográfica utilizada (Julho de 2012)

A amostra de viga V7 foi ensaiada termograficamente no dia 16 de Julho de 2012 e seguiu os passos que a seguir se identificam. Antes de mais, foi realizado o ensaio da viga à temperatura ambiente de laboratório, onde a viga se encontrava guardada há oito meses. As imagens térmicas resultantes deste ensaio estão apresentadas na Figura 3.19. De referir que é necessário introduzir previamente alguns valores de parâmetros

Capítulo 3 – Avaliação do Estado Patológico da Estrutura de Madeira

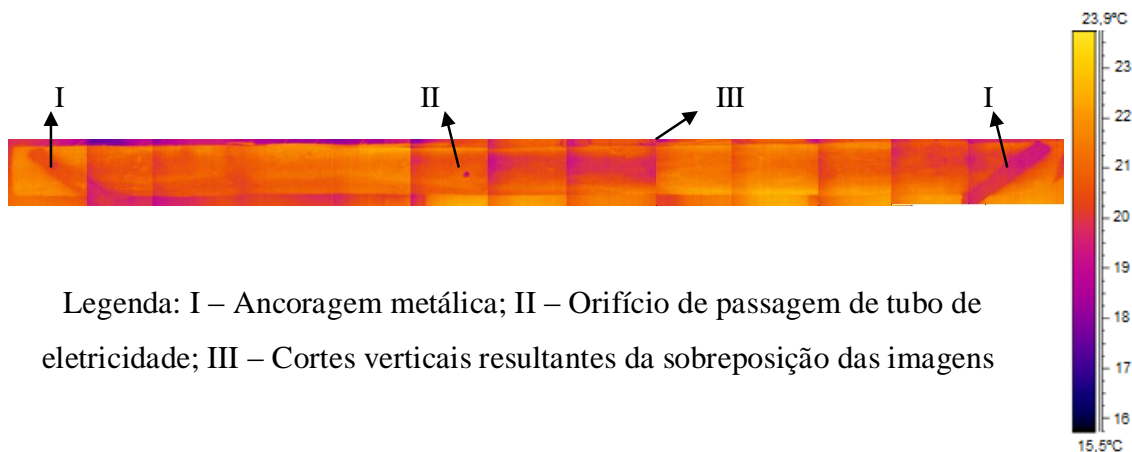
térmicos na câmara termográfica antes de se dar início ao ensaio. Estes valores são a temperatura ambiente, a humidade relativa, a temperatura de referência e a emissividade. Neste caso, a temperatura ambiente de laboratório foi de 19,5°C e a humidade relativa foi de 45%. Quanto à emissividade e à temperatura de referência, os respetivos valores são fornecidos no livro técnico de apoio que acompanha a câmara termográfica. Tratando-se de madeira de castanho, o valor da emissividade considerado foi de 0,90 e a temperatura de referência foi de 20°C.

Como a viga a ensaiar era de grandes dimensões (5,64 m de comprimento) foi necessário captar as imagens termográficas faseadamente. Deste modo, a captação decorreu em vários troços de modo a ser mais perceptível a identificação de qualquer anomalia existente ao longo da viga. De modo a facilitar o posterior tratamento de dados recolhidos, ou seja, a sobreposição das várias imagens térmicas obtidas, foram usadas umas peças de metal auxiliares colocadas no pavimento do laboratório junto à face superior da viga, e que como tinham uma temperatura inferior à da viga, eram facilmente identificáveis posteriormente nas imagens termográficas, funcionando, deste modo como bitola. Este detalhe é visível na imagem termográfica apresentado na Figura 3.19. A imagem termográfica da Figura 3.19 corresponde à sobreposição das várias imagens termográficas obtidas para cada troço da viga. De forma a complementar a informação do termograma da Figura 3.19 também se apresenta em anexo (Anexo 2), a uma escala maior, cada imagem termográfica isolada obtida para cada troço da viga.

Através dos termogramas obtidos, Figura 3.19, verifica-se que existe uma coloração quase uniforme ao longo da viga e entre a viga e o pavimento do laboratório, o que representa que estes dois elementos apresentavam uma temperatura superficial muito próxima, em que a quantidade de calor irradiado, e que é medida pela câmara termográfica, era muito semelhante. Deste modo, não parece ser possível perceber se existem patologias no interior da peça de madeira e que sejam impercetíveis pelo exterior. Contudo é possível distinguir-se as ancoragens metálicas (I, Figura 3.19) assim como identificar a existência de um pequeno orifício a cerca de um terço do comprimento da viga (II, Figura 3.19), orifício este que foi feito em obra para a passagem de um tubo de eletricidade. De acordo com a escala de temperatura, uma zona que apresente uma cor mais escura significa que está a uma temperatura inferior. É importante também referir que os traços verticais (III, Figura 3.19) que se identificam

Capítulo 3 – Avaliação do Estado Patológico da Estrutura de Madeira

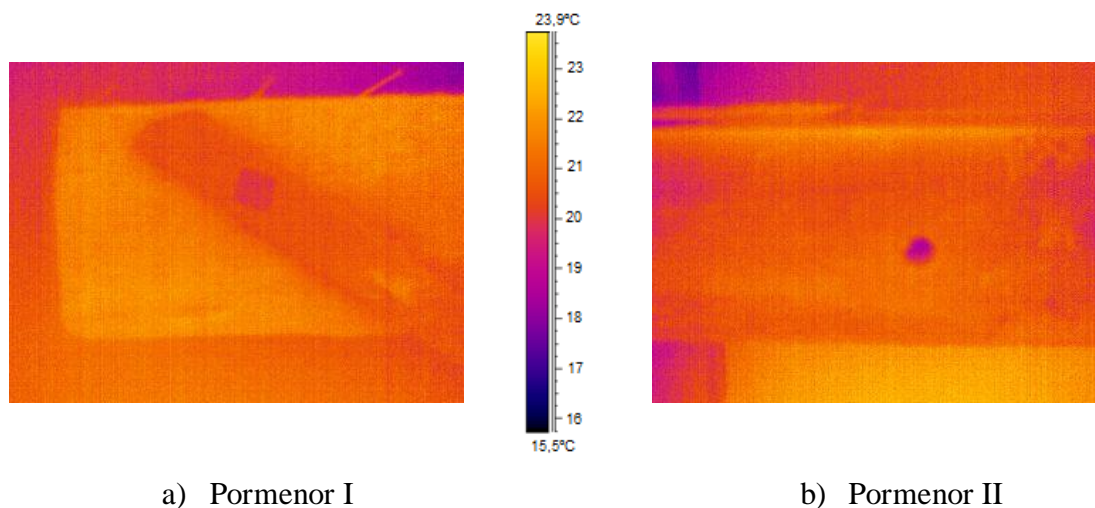
tanto na Figura 3.19 como mais à frente nas Figuras 3.23 e 3.24 não se tratam de qualquer anomalia na madeira mas sim, derivam do processo de sobreposição das várias imagens termográficas adotado.



Legenda: I – Ancoragem metálica; II – Orifício de passagem de tubo de eletricidade; III – Cortes verticais resultantes da sobreposição das imagens

Figura 3.19 – Imagem termográfica da viga sem pré-aquecimento

Apesar dos termogramas isolados estarem no Anexo 2, na Figura 3.20 são apresentados os mesmos termogramas para os pormenores I e II apresentados na Figura 3.19.



a) Pormenor I

b) Pormenor II

Figura 3.20 – Termogramas dos pormenores da viga sem pré-aquecimento

De acordo com [19], conclui-se que efetuando um pré-aquecimento prévio do elemento a ensaiar poder-se-á mais facilmente identificar patologias em elementos de madeira através do ensaio da termografia. Neste mesmo artigo, também é referido que o ensaio que foi realizado consistiu na colocação prévia de amostras de madeira a ensaiar numa estufa. Como neste caso, a amostra de viga V7 é de grandes dimensões, não era viável

Capítulo 3 – Avaliação do Estado Patológico da Estrutura de Madeira

esta solução de procedimento experimental de colocação da amostra em estufa. Optou-se por isso em se expor a viga diretamente ao sol, durante o período do dia mais quente, aumentando-se desta forma a temperatura da mesma. O período do dia escolhido foi entre as 11 horas e as 15 horas. Um termómetro foi colocado na viga de forma a ser possível registar a temperatura máxima e a temperatura mínima ocorridas durante esse período de tempo de exposição ao sol e que permitiu ter uma noção do gradiente térmico a que a viga esteve sujeita. Tal como se pode observar na Figura 3.21, a face da viga que ficou exposta diretamente ao sol foi aquela à qual se encostou o resistógrafo aquando da realização deste ensaio e que foi abordado na Secção 3.4.1.



Figura 3.21 – Pré-aquecimento da amostra de viga V7 a ensaiar (Julho de 2012)

Durante o período de exposição ao sol, a temperatura máxima registada foi de 45°C, e tal como comprova a Figura 3.22, ou seja, esta foi a temperatura superficial máxima atingida na viga durante este processo de pré-aquecimento.

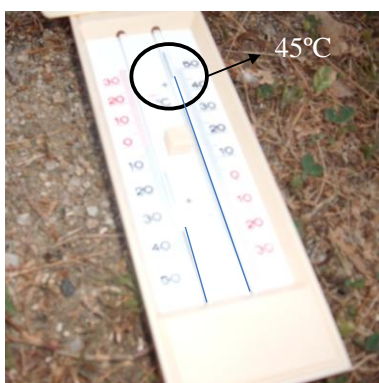
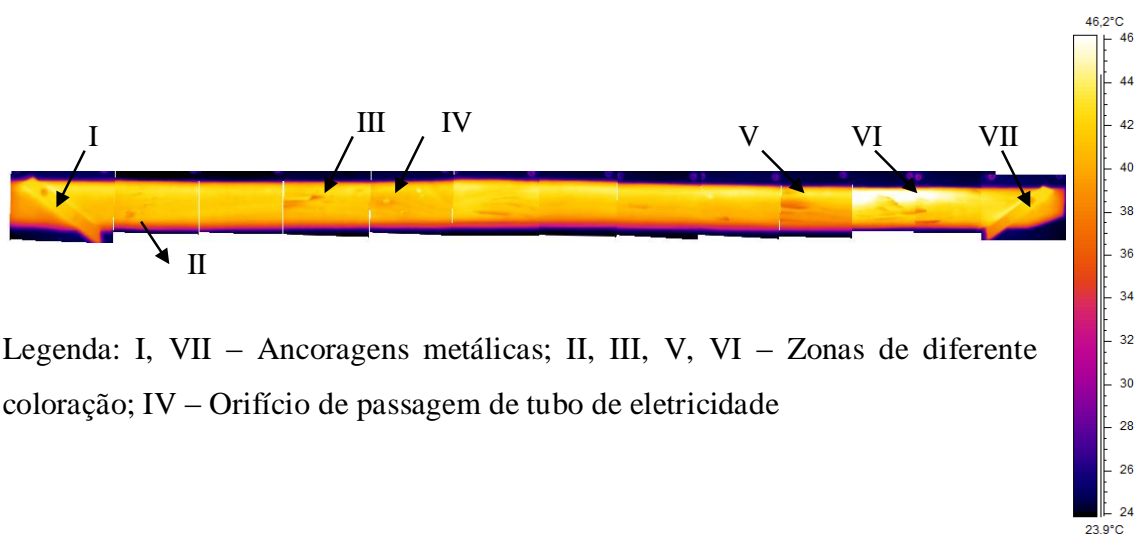


Figura 3.22 – Temperatura máxima registada (Julho de 2012)

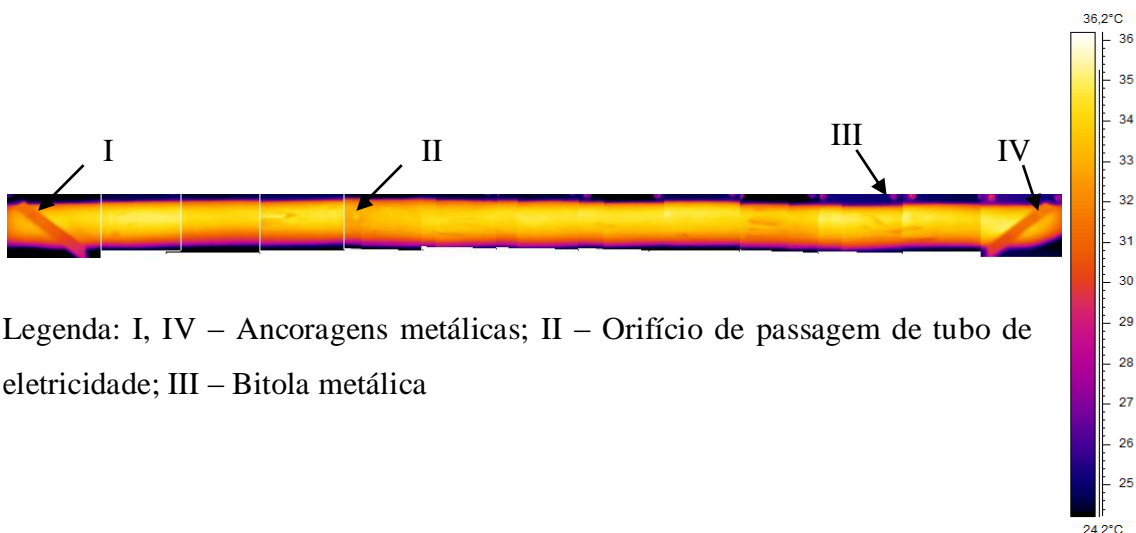
De seguida, a viga foi colocada no interior do laboratório onde decorreu o ensaio de termografia. Antes de se proceder à captação das imagens termográficas optou-se por se

Capítulo 3 – Avaliação do Estado Patológico da Estrutura de Madeira

esperar previamente cerca de 15 minutos de modo a que a viga pudesse começar a irradiar o calor absorvido e de modo a ser possível obter imagens termográficas mais conclusivas (1º ensaio, Figura 3.23). De modo a se perceber se o calor irradiado da viga era mais notório passado mais tempo de arrefecimento, este ensaio também foi realizado após 2 horas de arrefecimento da viga (2º ensaio, Figura 3.24). No 1º ensaio, a temperatura ambiente de laboratório era de 26,6°C e a humidade relativa era de 37%, enquanto que no 2º ensaio, esses valores eram 27°C e 35%, respetivamente.



Legenda: I, VII – Ancoragens metálicas; II, III, V, VI – Zonas de diferente coloração; IV – Orifício de passagem de tubo de eletricidade



Legenda: I, IV – Ancoragens metálicas; II – Orifício de passagem de tubo de eletricidade; III – Bitola metálica

Tal como no ensaio de termografia realizado na viga sem pré-aquecimento também nestes se vai apresentar as imagens termográficas isoladas para cada um dos pormenores

Capítulo 3 – Avaliação do Estado Patológico da Estrutura de Madeira

apresentados, Figuras 3.25 e 3.26. Todas estas imagens termográficas, para o 1º e o 2º ensaio, estão presentes no Anexo 2.

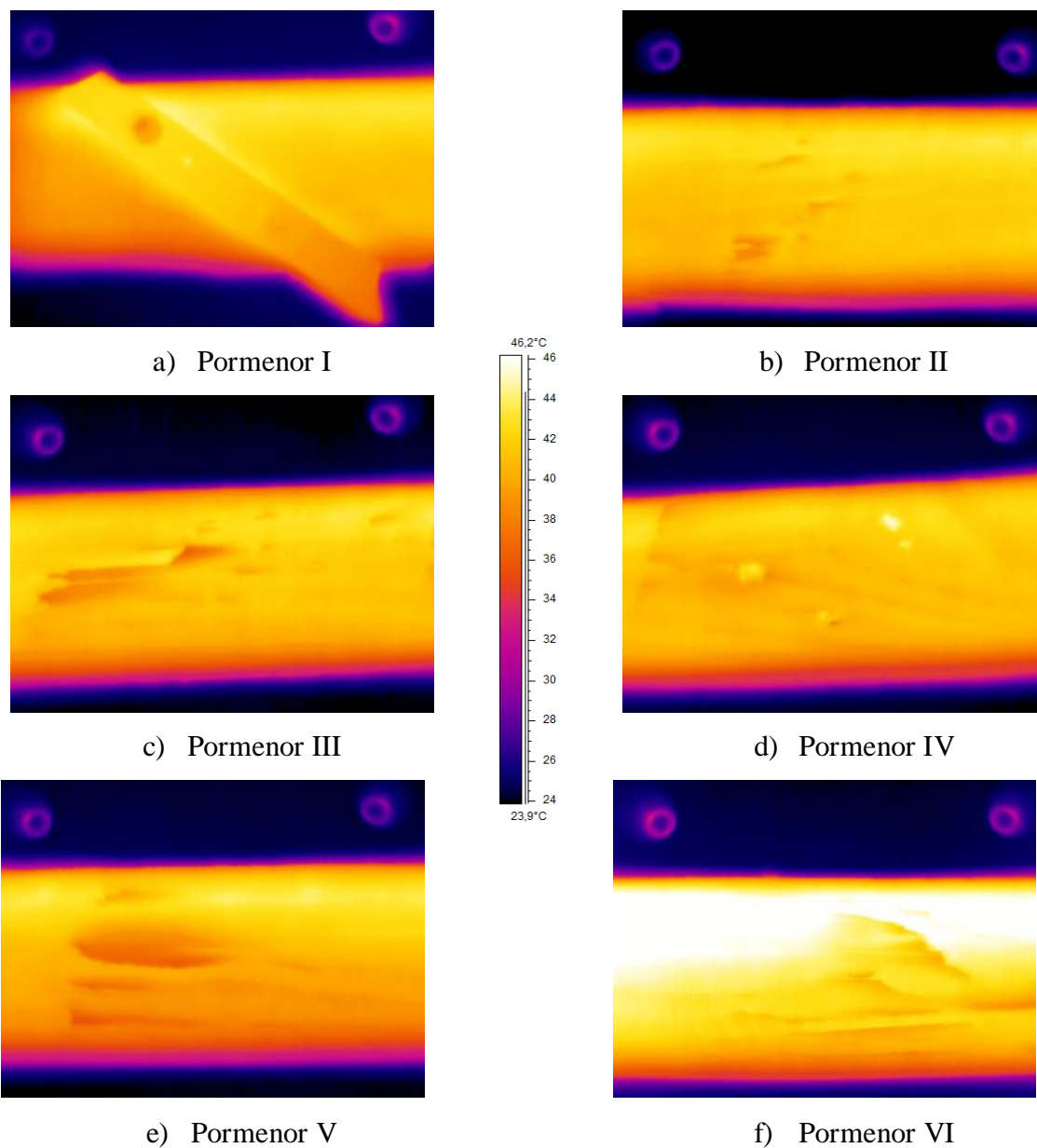
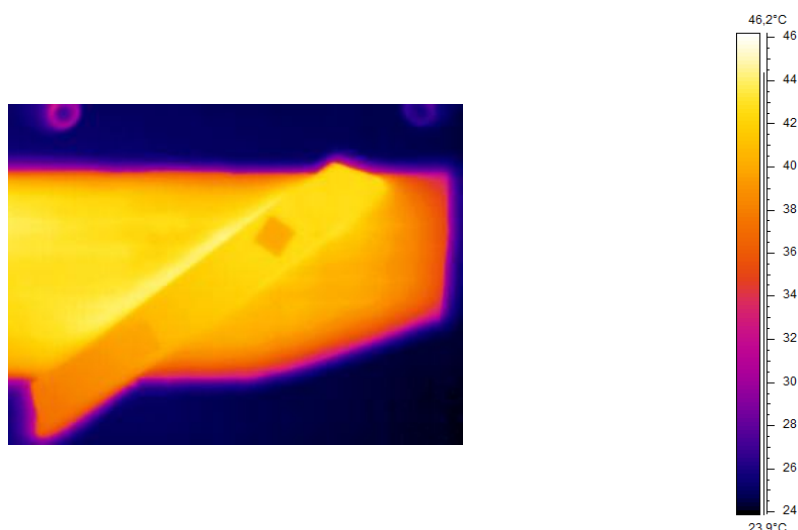


Figura 3.25 – Imagens termográficas dos pormenores I a VI (1º ensaio)



a) Pormenor VII

Figura 3.26 – Imagem termográfica do pormenor VII (1º ensaio)

Para as condições do 1º ensaio verifica-se através do termograma da Figura 3.23 que a temperatura superficial, relacionada com a irradiação de calor do corpo da viga, era bastante uniforme ao longo de todo o elemento. Neste caso, esta grandeza até era praticamente similar entre a madeira e o aço da ancoragem. Observa-se também que existe um maior contraste entre a temperatura superficial da viga e a do pavimento e porque a viga foi pré-aquecida naturalmente. Também se identificam algumas zonas muito localizadas ou circunscritas da viga que denotam uma coloração ligeiramente distinta à coloração observada na maior parte da viga. Essas zonas são referentes aos pormenores de I a VII da Figura 3.23. É sabido que os pormenores I e VII são relativos à cabeça do parafuso metálico de ligação e que o pormenor IV é relativo a um furo que atravessa a totalidade da espessura da viga. Correspondem então a zonas da viga cuja capacidade de irradiação de calor é maior ou, por outras palavras, a capacidade de arrefecimento é maior.

Tendo em conta que as zonas da viga relativas aos pormenores II, III e V apresentam uma coloração análoga à identificada nos pormenores I e VII então pensa-se que correspondam a saliências circunscritas existentes na face da viga que foi ensaiada e que correspondiam a zonas que tenderam a arrefecer mais rapidamente. Em relação ao pormenor II, e depois de uma análise visual da viga, não corresponde a qualquer saliência, furo ou conetor metálico. Quanto ao pormenor III, este corresponde a uma pequena saliência existente na face da viga e que se pode comprovar pela Figura 3.27.a.

Capítulo 3 – Avaliação do Estado Patológico da Estrutura de Madeira

Na Figura 3.27.b também se pode observar que na zona do pormenor V existiam uns pequenos orifícios resultantes da pregagem de elementos metálicos que serviam de suporte aos contraventamentos em cruz existentes nesta zona, o que pode ser a causa da diferente coloração ocorrida nesta zona e que foi detetada no termograma.



a) Pormenor II



b) Pormenor V

Figura 3.27 – Imagens ilustrativas das zonas que apresentaram diferentes colorações no termograma (Setembro de 2012)

Em contraste, e de acordo com o termograma obtido, existe uma coloração mais clara e distinta da coloração geral da viga na zona do pormenor VI. Neste caso, esta informação poderá indicar que eventualmente a viga seja menos densa nesta zona. O facto de poder ser menos densa poderá ser resultante de uma heterogeneidade natural do material ou poderá ser resultante da existência de um maior número de vazios devido ao ataque dos agentes xilófagos. Esta possibilidade não é visível pelo exterior e, como tal, poderá existir no interior da peça. Neste caso, o ar que preenche esses vazios e que se encontra retido poderá retardar o processo de arrefecimento da viga nesta zona, traduzindo-se no termograma pelo aparecimento de uma mancha de cor mais clara. Também é visível neste termograma os pontos referentes à bitola usada como auxílio do processo de sobreposição de imagens termográficas.

No 2º ensaio de termografia realizado após a viga de madeira ter sido pré-aquecida e deixada arrefecer, em laboratório, durante duas horas, verificou-se através do termograma obtido e apresentado na Figura 3.24 que, genericamente, a coloração obtida ao longo do elemento estrutural tende a aproximar-se da coloração relativa ao termograma da Figura 3.19. Os elementos metálicos (ancoragem e peças de bitola) tendem a avivar-se em termos de coloração e destacam-se do material de madeira da

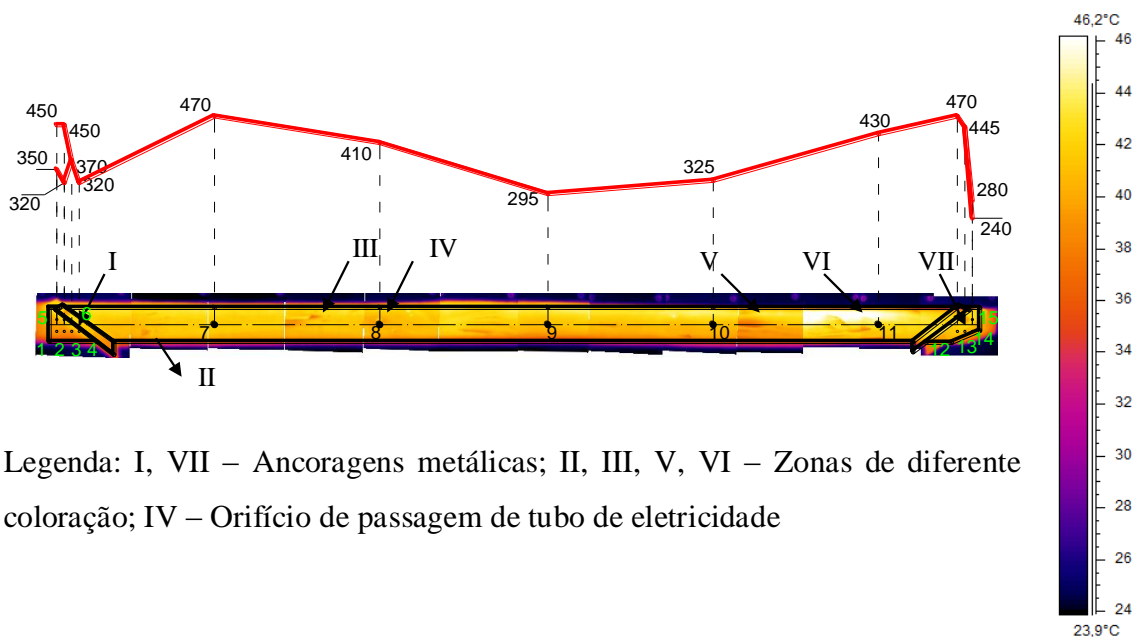
viga, o que mostra que são materiais bem distintos e, que por isso, a capacidade de irradiação de calor é bem diferenciada. Simultaneamente, os pormenores identificados no termograma da Figura 3.23 tendem a dissipar-se ou a esbater-se para estas condições, Figura 3.24.

Estes resultados corroboram a conclusão expressa em [19] de que há vantagem em pré-aquecer previamente um elemento de madeira a ensaiar termograficamente. Os resultados obtidos também permitem concluir que a técnica de pré-aquecimento proposta neste trabalho de investigação relativa à exposição direta aos raios solares, para além de ser expedita e económica também funciona.

Também se conclui que a viga V7 ensaiada termograficamente não parece apresentar um estado patológico acentuado porque não foram identificadas zonas muito distintas em termos de irradiação de calor. Outra conclusão importante a ressaltar prende-se com o facto de ser conveniente processar o ensaio em poucos minutos após a fase de pré-aquecimento e porque parece corresponder às condições ideais para a identificação de heterogeneidade material de peças de madeira.

3.4.3. Tentativa de correlação dos resultados obtidos pelos ensaios do resistógrafo e da termografia

Neste subcapítulo pretende-se fazer uma correlação entre os resultados obtidos pelo ensaio do resistógrafo (Secção 3.4.1) e pela termografia (Secção 3.4.2), e de modo a tentar perceber se existe alguma possível correlação entre estes ensaios, e tendo em conta que ambos foram realizados com o mesmo intuito, que são expeditos e que são não destrutivos. Tal como foi explicado anteriormente, o 1º ensaio de termografia realizado após o pré-aquecimento, foi aquele que permitiu obter uma ideia mais clara em relação à existência de possíveis patologias na viga, pelo que se optou pelo respetivo termograma (Figura 3.23) na comparação e na correlação com os resultados obtidos pelo ensaio do resistógrafo (Figura 3.17). Deste modo, sobrepondo os referidos resultados é possível obter o diagrama apresentado na Figura 3.28.



Legenda: I, VII – Ancoragens metálicas; II, III, V, VI – Zonas de diferente coloração; IV – Orifício de passagem de tubo de eletricidade

Figura 3.28 – Diagrama de sobreposição de resultados obtidos pelo resistógrafo e pela termografia

Tendo em conta a descrição dos resultados obtidos em cada um destes ensaios e referida anteriormente, o diagrama de sobreposição de resultados da Figura 3.28 reforça a ideia da existência de uma vincada uniformidade material ao longo de toda a viga V7. De facto, ambos os resultados corroboram este facto e, por isso, é possível afirmar que existia uma correlação aceitável entre estes dois tipos de ensaios não destrutivos.

É claro que a heterogeneidade material detetada termograficamente nos pormenores de II a VI da Figura 3.23 não é facilmente identificável através do ensaio do resistógrafo e porque não se procedeu a nenhuma perfuração exatamente nesses pontos. Contudo, a resistência aferida no ponto de perfuração P9 apresenta um valor significativamente inferior em relação à generalidade dos valores da resistência medidos nos restantes pontos e o resultado obtido pela termografia não detetou nenhuma heterogeneidade material nessa zona da viga. Este facto poderá traduzir que a possível existência de uma correlação entre estes dois tipos de ensaios será sempre limitada. É importante lembrar que o facto de se ter estado a ensaiar uma peça de madeira também dificulta a análise de resultados e que o facto de ser uma viga de madeira antiga ainda dificulta mais este processo. Um maior número de amostras de peças de madeira deveria ter sido

considerado neste estudo de forma a aumentar a representatividade e a validar as conclusões proferidas.

3.5. Considerações finais

Com este capítulo foi possível alcançar os seguintes objetivos:

- Fazer um levantamento *in situ* das patologias mais evidentes dos elementos estruturais de madeira constituintes do edifício escolhido como caso de estudo;
- Elaborar mapas de patologias tendo como base o levantamento efetuado em obra e que permitiram ter uma noção mais clara do estado geral de conservação dos elementos estruturais de madeira do edifício;
- Perceber, com base nestes mapas, que as patologias existentes nos elementos construtivos de madeira são, principalmente, relacionadas com o ataque de fungos, de térmicas e de caruncho;
- Realizar dois ensaios não destrutivos, o ensaio do resistógrafo e o ensaio da termografia, a uma viga de madeira real do edifício. Neste caso, uma das vigas V7. Através destes ensaios concluiu-se que a viga de madeira não apresentava um acentuado estado patológico;
- Notar que o ensaio de termografia deve ser realizado depois de se efetuar um pré-aquecimento da amostra, e que deve ser processado após alguns minutos do término desse pré-aquecimento;
- Saber que o ensaio do resistógrafo é dependente de muitos fatores, e que os resultados obtidos são afetados por esses fatores, tais como, a direção das fibras relativamente à penetração da agulha e a forma da secção transversal da amostra, entre outros;
- Concluir que estes dois ensaios apresentam uma correlação com algumas limitações. O facto do ensaio do resistógrafo ter sido realizado antes do ensaio da termografia impossibilitou a identificação prévia dos pontos a perfurar nos locais de descontinuidade identificados através do ensaio da termografia;
- Perceber que seria preferível realizar o ensaio do resistógrafo posteriormente à realização do ensaio da termografia.

4. AVALIAÇÃO DA CAPACIDADE RESISTENTE DA VIGA V7

4.1. Objetivos

Com este capítulo pretende-se:

- Descrever de forma detalhada a amostra correspondente à viga a ensaiar;
- Proceder ao ensaio à flexão em três pontos de uma viga à escala real do edifício escolhido como caso de estudo, sendo que a viga em questão é uma viga do tipo V7;
- Tentar perceber o comportamento estrutural de um elemento de madeira antiga, com reforço metálico exterior.

4.2. Introdução

De modo a concretizar os objetivos propostos, foram reforçadas algumas das ideias apresentadas anteriormente e de modo a ser possível descrever detalhadamente a viga V7 a ensaiar.

Todo o trabalho relativo ao ensaio experimental a realizar teve que ser cuidadosamente preparado. Este trabalho incluiu a calibração dos equipamentos a utilizar, a escolha e a aquisição de acessórios de fixação, a definição de estratégias de ensaio, entre outras tarefas. Todo este investimento poderá ser muito útil em trabalhos experimentais futuros a realizar neste contexto.

Antes de se realizar o ensaio à flexão em três pontos da viga V7 reforçada, esta foi previamente estudada numericamente no sentido de se perceber melhor o comportamento estrutural deste elemento misto. A informação obtida através desta análise numérica auxiliou na escolha de estratégias de monitorização da viga a adotar durante o ensaio. Deste modo, a informação obtida facilitou a escolha do equipamento a utilizar e a decisão dos pontos da viga a serem monitorizados em termos de deslocamentos.

Outros desafios associados ao processo de montagem da viga, dos equipamentos e dos acessórios surgiram e que tiveram de ser superados mesmo passando por adotar soluções improvisadas. A solução experimental de apoio da viga foi um desses desafios, a qual requereu a criação de um sistema de fixação pensado especificamente para este ensaio. Outro desafio que surgiu foi relativo ao travamento lateral da viga e de forma a

criar as condições ideais de ensaio. Este desafio não foi superado por razões de limitações de meios disponíveis. Na prática, é sabido que as vigas V7 são contraventadas aos terços e também no topo superior (face superior) pelas tábuas de soalho. Estas condições de serviço não foram possíveis simular experimentalmente neste ensaio. Se tal facto fosse possível concretizar, talvez a capacidade resistente da viga V7 ensaiada tivesse sido superior ao resultado obtido.

A comparação dos resultados numéricos com os resultados experimentais permitiu de alguma forma validar os respetivos modelos adotados e perceber melhor o comportamento estrutural deste tipo de elemento misto (madeira + aço) antigo.

Os resultados obtidos com a realização do ensaio foram posteriormente tratados para que se pudesse fazer uma análise mais correta dos mesmos.

4.3. Descrição da viga a ensaiar e análise numérica

Nesta secção vai-se descrever pormenorizadamente a solução estrutural de uma das vigas V7 reforçadas adotada em obra e que será ensaiada em laboratório. No Capítulo 2 já se descreveu um pouco este tipo de viga mas de uma forma ligeira. Tal como já foi referido, este elemento estrutural corresponde a uma solução tradicional de viga de madeira reforçada com um varão metálico e que tinha a função principal de contrariar a flecha provocada pelas ações atuantes, e funcionando com pré-esforço exterior. Este pré-esforço pode ser aplicado através do aperto de porcas metálicas existentes nos topos do varão metálico.

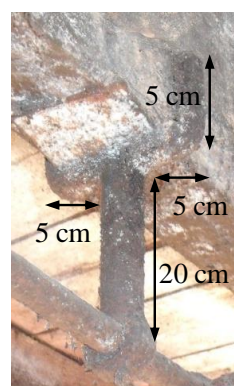
Antes de mais, talvez seja importante voltar a referir algumas das características geométricas desta viga mista. A secção transversal média desta viga apresenta 9,0 cm de largura e 19,0 cm de altura, enquanto que o seu vão é de 5,64 m. A viga não apresenta uma secção transversal constante ao longo de todo o seu desenvolvimento e a face inferior, onde era fixo o varão metálico, era bastante irregular, o que dificultou posteriormente a análise dos resultados. Em relação ao varão metálico, este apresenta uma secção circular com um diâmetro de 20 mm e está ligado à viga de madeira por duas ancoragens metálicas devidamente ilustradas e pormenorizadas na Figura 2.21. De modo a que o varão ficasse devidamente fixo à ancoragem e para ser possível proceder ao pré-esforço, em ambas as extremidades, este era roscado (Figura 4.1.a). Para além

Capítulo 4 – Avaliação da Capacidade Resistente da Viga V7

destas ancoragens, também existem dois apoios intermédios que são atravessados pelo varão e que se encostam à viga de madeira. Estes apoios não estão em contacto permanente com a viga. Apenas existe contacto entre elementos quando a viga atinge uma deformada capaz de anular o espaçamento existente entre estes dois elementos. Um pormenor deste elemento de apoio está ilustrado na Figura 4.1.b.



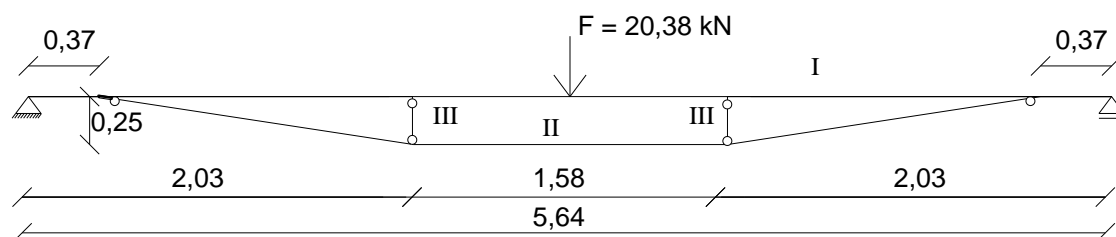
a) Zona roscada do varão



b) Apoio intermédio

Figura 4.1 – Detalhes construtivos do reforço metálico

Apesar deste assunto ser abordado novamente no Capítulo 5, optou-se por, antes da realização do ensaio, determinar-se a capacidade resistente da viga de modo a perceber o seu comportamento estrutural e poder ter uma noção do valor da carga última que poderia ser atingido durante o ensaio. Isto foi também efetuado com o intuito de se seleccionar corretamente a célula de carga para a medição dos valores da força. O modelo estrutural considerado nesta análise numérica está ilustrado na Figura 4.2.



Legenda: I – V7; II; III – Varão com diâmetro de 2,0 cm

Figura 4.2 – Modelo de cálculo da viga V7 reforçada (m)

Trata-se então de uma viga simplesmente apoiada. Os apoios intermédios do sistema de reforço (III, Figura 4.2) encontram-se sensivelmente localizados aos terços da viga. Eles estão ligados ao elemento principal do sistema de reforço (II, Figura 4.2) e à viga de madeira (I, Figura 4.2) através de rótulas. Por sua vez, o elemento principal do sistema

Capítulo 4 – Avaliação da Capacidade Resistente da Viga V7

de reforço está ligado à viga de madeira através de uma rótula e que simula numericamente e de forma simplificada a ancoragem. A localização desta rótula não coincide com o ponto de apoio. Este modelo de cálculo é geometricamente simétrico.

Neste modelo de cálculo foi considerada a aplicação de uma força vertical descendente a meio vão. É importante referir que o varão de aço considerado neste modelo de cálculo não é exatamente igual ao existente na realidade. De facto, os apoios intermédios deste varão apresentam uma folga de 2 cm em relação à viga de madeira, o que faz com que o varão apenas entre em serviço quando a viga apresente uma deformada de valor igual a essa folga. Neste caso e neste modelo de cálculo, o varão entra em serviço logo após a aplicação de qualquer força. A modelação numérica desta folga seria complexa e sai do âmbito deste trabalho de investigação.

Da Figura 4.3 à Figura 4.5 são apresentados os diagramas de esforços obtidos através do programa de cálculo automático SAP2000 [20] e para as condições do modelo de cálculo da Figura 4.2. É importante referir que a classe de resistência da madeira considerada foi a classe D35 [21] e que o aço adotado foi o da classe S275. Esta simplificação resulta do facto de não ter sido possível aferir experimentalmente as propriedades mecânicas efetivas destes dois tipos de materiais. Existirão por isso algumas reservas relativamente a estas considerações e porque se tratam de materiais antigos e que foram sujeitos a fenómenos de deterioração. Esta simplificação influencia certamente os resultados numéricos e dificulta o processo de validação entre modelo numérico e experimental.

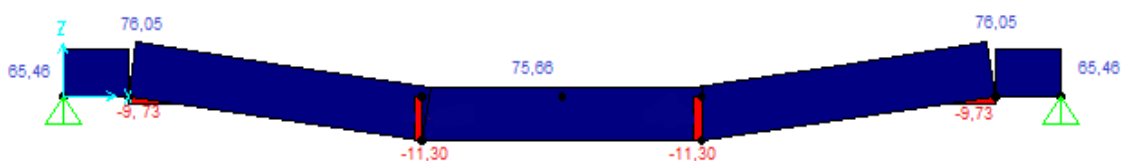


Figura 4.3 – Diagrama de esforços axiais do modelo numérico da viga V7 (kN)

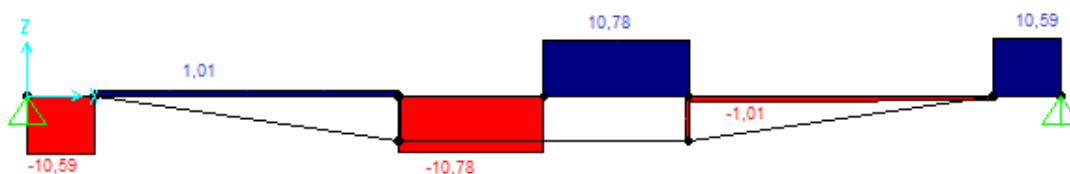


Figura 4.4 – Diagrama de esforços transversos do modelo numérico da viga V7 (kN)

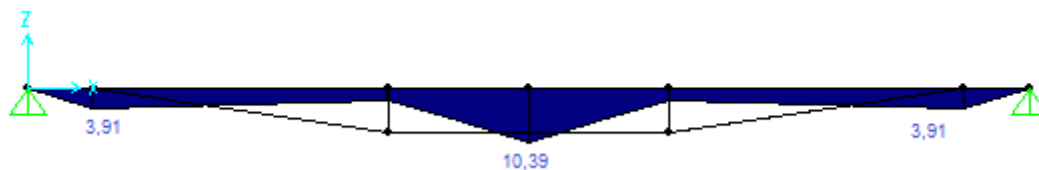


Figura 4.5 – Diagrama de momentos fletores do modelo numérico da viga V7 (kNm)

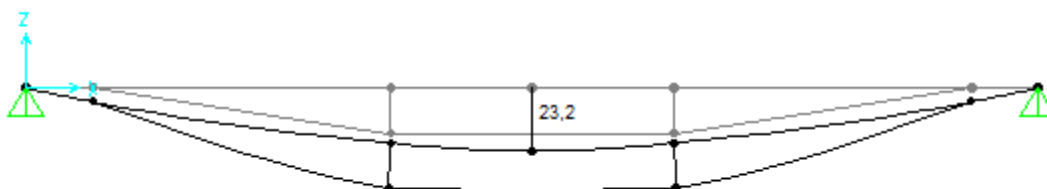


Figura 4.6 – Deformada da viga V7 (mm)

Tal como se pode observar na Figura 4.3, o varão metálico do sistema de reforço trabalha essencialmente à tração. Os esforços axiais instalados neste varão são bastante elevados e geram uma tensão normal que apresenta um valor de 242 MPa e que é próximo do valor da tensão de rotura do aço S275 considerado neste modelo. No entanto, e como já foi referido, este facto não se deve verificar na realidade porque as barras que simulam os dois apoios intermédios também estão a trabalhar essencialmente à compressão tal como os diagramas de esforços apresentados comprovam. Quanto ao diagrama de momentos fletores, Figura 4.5, é possível verificar que o momento fletor máximo ocorre a meio vão e apresenta o valor de 10,39 kNm. Como se irá verificar no Capítulo 5, este valor é inferior em relação ao momento fletor resistente. Verifica-se também a ocorrência de momentos fletores nas barras que simulam o varão e os apoios do sistema de reforço exterior. Os valores destes momentos são reduzidos e resultam do facto do programa de cálculo automático considerar automaticamente o peso próprio das barras. A deformada máxima da viga foi de 23,2 mm, e que é relativa à combinação de ações quase permanentes (Expressão 4.1) [22]. Este valor de flecha é ligeiramente superior em relação ao valor limite máximo recomendado regulamentarmente ($L/300$) [21] e que neste caso vale 18,8 mm.

$$1,0G + \psi_2 Q \quad (4.1)$$

Em que: G – ação permanente; Q – ação variável; ψ_2 – coeficiente para a determinação do valor quase-permanente de uma ação variável ($\psi_2 = 0,3$) [22]

4.4. Ensaio à flexão em três pontos

4.4.1. Preparação e realização do ensaio

A viga V7 com reforço metálico exterior foi ensaiada à flexão no dia 23 de Julho de 2012. Como se pode observar na Figura 3.9, o reforço metálico da viga não estava colocado na sua posição. Aquando da demolição do edifício em estudo, o varão do sistema de reforço da viga V7 foi serrado junto dos apoios pela parte interior deste, resultando no facto deste varão não apresentar comprimento suficiente (para ir de apoio a apoio) aquando da realização deste ensaio. De modo a colmatar esta situação, foi necessário providenciar um segmento de varão do mesmo diâmetro ao do existente e proceder-se a uma soldadura. Como o varão era roscado nas extremidades, impossibilitou que a soldadura da emenda ocorresse nestas zonas, pelo que se optou por fazer um corte a meio vão do varão de reforço e procedeu-se à soldadura da emenda nessa zona. Também pareceu ser uma opção adequada atendendo a que o esforço axial nesta zona é ligeiramente inferior ao esforço axial instalado no varão nas zonas inclinadas tal como é possível constatar no diagrama de esforços axiais exposto na Figura 4.3. Após esta fase, foi possível recolocar o sistema de reforço na viga V7 e que terminou com a fixação deste às ancoragens através de porca e anilha. O aperto das porcas foi processado com o cuidado necessário para conferir o pré-esforço desejado e para garantir que no decorrer do ensaio não houvesse o risco de ocorrência do desaperto destas.

Antes da realização do ensaio também foi necessário idealizar um esquema de ensaio que incluiu decidir sobre o posicionamento dos LVDT (linear variable differential transformer), escolher um tipo de fixação destes à viga e equacionar o sistema de apoio da viga de forma a simular experimentalmente as condições de apoio existentes no edifício.

Neste ensaio, optou-se por se utilizar um atuador de 100 kN de capacidade de carga (elemento I – Figura 4.7) e que teve de ser calibrado previamente. Para tal, socorreu-se de um anel de calibração (de 100 kN de capacidade). Optou-se, ainda, que a velocidade de aplicação de carga do atuador seria de 0,05 mm/s. Depois de calibrado o atuador, foi necessário colocar os cubos de aço que serviriam de apoio à viga, a uma distância que garantisse que o atuador ficasse posicionado exatamente a meio vão da viga. Foi ainda

Capítulo 4 – Avaliação da Capacidade Resistente da Viga V7

necessário garantir o nivelamento destes mesmos cubos para evitar interferências nos resultados a obter posteriormente e para simular as condições de obra. Depois de posicionados e de devidamente nivelados, os três cubos que constituem os apoios foram aparafusados entre si de modo a impedir a ocorrência de qualquer movimento de translação indesejado entre eles.



Legenda: I – Atuador de 100 kN; II – Tripé; III – Calha; IV – Viga V7; V – Varão do sistema de reforço

Figura 4.7 – Esquema de ensaio final (Julho de 2012)

De seguida, e depois de várias hipóteses de esquemas de ensaio, foi decidido utilizar oito LVDTs, dispostos de acordo com o esquema de ensaio ilustrado na Figura 4.8, onde também é possível observar a designação adotada para os oito LVDTs. O número máximo de LVDTs que podem ser utilizados em simultâneo estava limitado, precisamente, a oito.

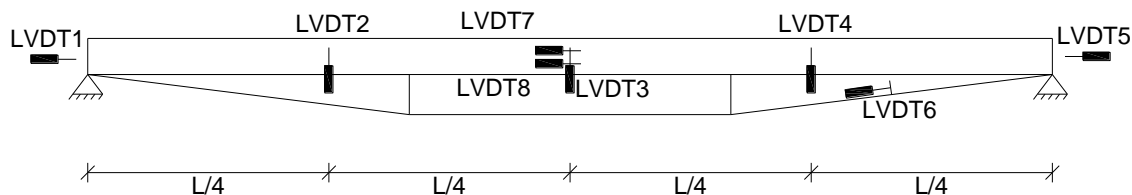


Figura 4.8 – Posição adotada para os LVDTs

Os LVDTs são sensores para a medição do deslocamento linear, pelo que têm que estar fixos num referencial exterior à peça na qual se pretende medir os deslocamentos. Para isso, foram idealizados uns tripés (elemento II na Figura 4.7), nos quais eram apertados varões roscados de 16 mm de diâmetro que serviam de apoio a uma calha (elemento III na Figura 4.7) onde eram fixas as abraçadeiras que serviam de suporte aos LVDT 2,

Capítulo 4 – Avaliação da Capacidade Resistente da Viga V7

LVDT 3 e LVDT 4. Os tripés consistiam em três varões de 16 mm de diâmetro lisos que foram soldados a uma chapa metálica de 10 mm de espessura e, que no seu centro, possuía uma abertura roscada de modo a permitir a colocação do varão roscado referido anteriormente.

O LVDT 6 foi fixo no varão metálico através de uma abraçadeira dupla (elemento III, Figura 4.7), em que uma parte prendia no varão e a outra suportava o LVDT. Esta peça de suporte consistia em duas abraçadeiras iguais, e em vez do parafuso que as suportaria estar na madeira, foi colocado um parafuso e uma porca que as uniu. Por sua vez, os LVDTs 7 e 8 foram fixos por meio de duas abraçadeiras aparafusadas diretamente à viga. Os LVDTs dos apoios, 1 e 5, foram fixos diretamente aos varões roscados que faziam parte do sistema de apoio da viga e através de uma abraçadeira metálica que foi soldada a uma porca (elemento I, Figura 4.10). Os deslocamentos medidos durante o ensaio eram resultantes do deslocamento relativo entre os LVDTs e umas peças metálicas feitas propositadamente para o efeito. À exceção dos LVDTs localizados nos apoios, que se tratavam de uma espécie de U (elemento II, Figura 4.10), as peças metálicas referidas eram uns L (elemento IV, Figura 4.10) com as dimensões adequadas para que quando a viga se deformasse, esses L não saíssem do campo de atuação dos LVDTs. Na Tabela 4.1 são apresentados os campos de leitura dos LDVTs utilizados.

Tabela 4.1 – Campo de leitura dos LVDTs

LVDT	1	2	3	4	5	6	7	8
Campo de medida (mm)	± 10	± 25	± 50	± 50	± 10	± 5	$\pm 2,5$	± 5

Estes campos de medida foram escolhidos tendo em conta a previsível deformada da viga aquando da aplicação da carga a meio vão. De referir que inicialmente o LVDT 4 escolhido tinha um curso de ± 25 mm. No entanto, este LVDT não estava disponível no dia do ensaio, pelo que se optou pela utilização de ± 50 mm. Também é importante mencionar que os cursos dos LVDTs 7 e 8 não eram iguais porque o LVDT 7 pretende medir o deslocamento das fibras comprimidas durante o ensaio e, que teoricamente, será inferior ao deslocamento das fibras tracionadas e que será medido pelo LVDT 8.

Antes da fixação dos LVDTs também foi necessário previamente proceder à respetiva calibração. Para tal, utilizou-se o micrómetro mostrado na Figura 4.9. O modo de calibração consistiu em colocar cada LVDT a calibrar no micrómetro todo recolhido (ou

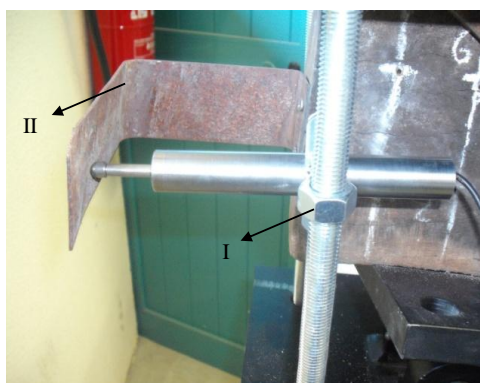
Capítulo 4 – Avaliação da Capacidade Resistente da Viga V7

todo liberto). Gerando pequenos deslocamentos ao LVDT (5 mm, por exemplo) e fazendo corresponder esses deslocamentos a uma determinada leitura de voltagem é possível estabelecer uma relação linear entre deslocamento do LVDT e a voltagem.



Figura 4.9 – Micrómetro de calibração (Julho de 2012)

Nas Figuras 4.10 e 4.11, apresentam-se todos os LVDTs utilizados, as suas respectivas posições e soluções de fixação. É de referir, que o LVDT da Figura 4.10.a é o LVDT 1, e que o LVDT 5 é exatamente igual mas rodado de 180°.



a) LVDT 1 e 5



b) LVDT 2

Legenda: I – Abraçadeira soldada à porca metálica; II – Chapa em U;

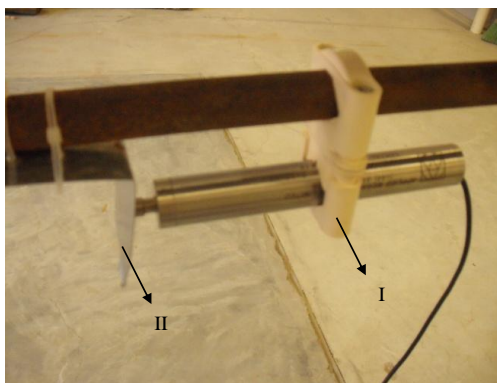
Figura 4.10 - LVDT utilizados 1 (Julho de 2012)



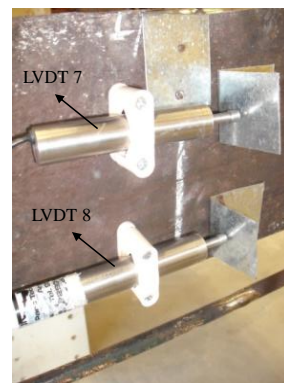
a) LVDT 3



b) LVDT 4



c) LVDT 6

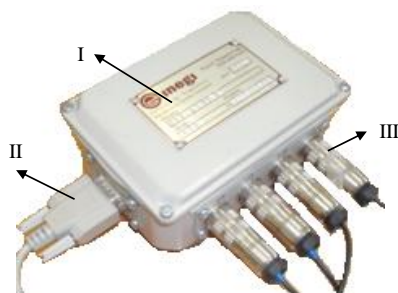


d) LVDT 7 e 8

Legenda: I – Abraçadeira dupla; II – Chapa em L

Figura 4.11 – LVDT utilizados 2 (Julho de 2012)

Estes LVDTs foram ligados a duas caixas destinadas a este fim, que por sua vez, eram ligadas ao computador do sistema de aquisição de valores. Uma das caixas utilizadas está ilustrada na Figura 4.12. Como cada uma das caixas utilizadas apenas permitia a entrada de quatro LVDTs, e como já foi mencionado, se iriam utilizar oito, foi necessário recorrer a uma outra caixa (em tudo idêntica à da Figura 4.12).



Legenda: I – Caixa de aquisição; II – Saída para o computador; III – Entrada dos cabos dos LVDTs

Figura 4.12 – Caixa de ligação dos LVDTs (Julho de 2012)

Capítulo 4 – Avaliação da Capacidade Resistente da Viga V7

A viga foi apoiada nas suas extremidades em apoios que permitiam uma rotação parcial de modo a simular o melhor possível as condições de apoio verificadas em obra (Figura 4.13). Para tal, a viga foi colocada num apoio rotulado e sobre ela foi colocado outro apoio (apenas para servir como elemento de fixação, Figura 4.13). Estes dois apoios foram fixados entre si através de quatro varões roscados com um diâmetro de 16 mm (iguais aos colocados nos tripés), e respetivas porcas e anilhas.



Figura 4.13 – Apoios da viga (Julho de 2012)

Após a realização de todas estas tarefas de montagem e preparação do ensaio, a viga V7 encontrava-se em condições de ser ensaiada. O esquema de ensaio pode ser visualizado na Figura 4.7.

Paralelamente na Figura 4.14 apresentam-se algumas imagens alusivas a fases do decorrer do ensaio e onde é possível observar a evolução da deformada da viga à medida que a carga atuante ia aumentando.

A Figura 4.14.a corresponde à fase inicial do ensaio na qual a viga ainda se encontra na posição inicial, não apresentando por isso qualquer deslocamento. Por sua vez, nas Figuras 4.14.b e 4.14.c é possível ter perceção da evolução crescente da deformada da viga verificada no decurso do ensaio à flexão em três pontos. A Figura 4.14.d corresponde à fase final do ensaio, na qual a viga já tinha atingido a rotura e tal como se pode verificar a rotura ocorreu na extremidade direita da viga.

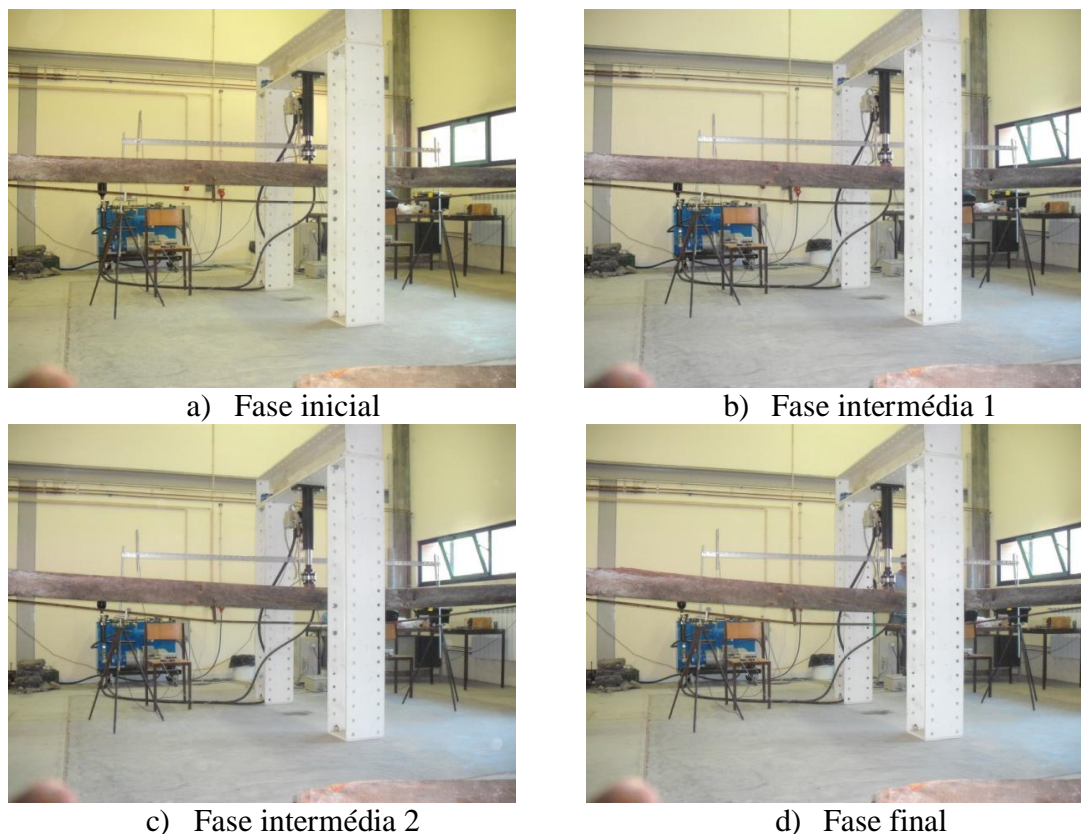


Figura 4.14 – Sequência do ensaio (Julho de 2012)

4.4.2. Apresentação e análise dos resultados

A viga atingiu a rotura à carga de aproximadamente 70 kN. A zona de rotura da viga por flexão ocorreu precisamente na zona em que os resultados da termografia e do resistógrafo eram mais desfavoráveis, ou seja, junto à extremidade direita da viga. No entanto, durante o desenrolar do ensaio foi possível constatar a ocorrência progressiva de fissuras à medida que a carga ia aumentando. Estas fissuras começaram-se a formar na zona do meio vão da viga e depois disseminaram-se para as extremidades, tendo ocorrido uma maior incidência de propagação de fissuras para a extremidade direita. Essas fissuras estão apresentadas na Figura 4.15 onde também é possível perceber que foi usado giz para as realçar. Aquando da ocorrência do fenómeno de propagação de fissuras era audível o som da madeira a “rachar”. Estes factos permitem concluir que o fenómeno de rotura por flexão de vigas de madeira antiga decorre de forma progressiva e que pode ser caracterizado por ocorrência de uma grande flecha, por um processo progressivo de fissuração associado a sinais sonoros. Estas características poderão ser importantes num contexto de obra porque poderá haver tempo para serem tomadas medidas de reforço da estrutura e, deste modo, evitar o colapso do elemento estrutural,

Capítulo 4 – Avaliação da Capacidade Resistente da Viga V7

reduzindo o risco de acidente ou de perda de vidas humanas e minimizando eventuais prejuízos materiais. Baseado apenas na experiência adquirida durante a realização do ensaio de flexão à viga V7, conclui-se também que uma viga de madeira antiga pode ter uma rotura tipo dúctil em vez de ter uma rotura tipo frágil, aliás como seria de esperar.



a) Imagem 1



b) Imagem 2



c) Imagem 3



d) Imagem 4

Figura 4.15 – Processo de fissuração ocorrido (Julho de 2012)

A zona da viga onde ocorreu a rotura por flexão está identificada na Figura 4.16 e onde se pode observar que a abertura das fissuras é significativamente maior do que a abertura das fissuras apresentadas anteriormente, Figura 4.15. A fenda que conduziu à rotura da viga ocorreu próximo ao topo superior desta. É expetável assumir que nesta zona as tensões existentes correspondam a tensões de compressão. Adicionalmente, constatou-se que a fenda é praticamente paralela às fibras. O modo de rotura identificado foi por compressão causado pelo aparecimento de uma grande fissura de separação das fibras. Esta causa de rotura por compressão também é identificada na norma ASTM D143 [23].



a) Imagem 1



b) Imagem 2

Figura 4.16 – Zona de rotura por flexão da viga V7 (Julho de 2012)

Tal como foi referido anteriormente, Capítulo 3, os resultados obtidos através da termografia e do resistógrafo eram conducentes à existência de uma certa vulnerabilidade material na extremidade direita da viga V7 ensaiada. Aquando do ensaio de flexão, verificou-se que a rotura ocorreu nessa zona.



a) Efeito de torção



b) Encurvadura localizada do varão

Figura 4.17 – Comportamento do sistema de reforço no decorrer do ensaio à flexão (Julho de 2012)

Outra particularidade observada no decorrer do ensaio à flexão prendeu-se com o facto do varão do sistema de reforço metálico não se ter comportado estruturalmente propriamente como se previa na análise numérica. Quando a viga atingiu uma certa flecha que permitiu ficar em contacto com os apoios intermédios do sistema de reforço, o reforço metálico tendeu a sofrer um deslocamento que o posicionou fora do plano da viga tal como se pode observar na Figura 4.17.a. Este fenómeno talvez possa ser justificado pelo facto da face inferior da viga ser algo irregular. Outro aspeto a ressaltar

Capítulo 4 – Avaliação da Capacidade Resistente da Viga V7

está relacionado com o ocorrido na zona de fixação do varão à ancoragem. Nessa zona, o varão metálico sofreu uma encurvadura localizada, Figura 4.17.b e talvez por nessa zona de fixação se ter formado um ponto de maior rigidez.

A zona de emenda do varão manteve-se estável durante a realização do ensaio à flexão.

A aquisição dos dados foi processada através de um software específico e que também permitia monitorizar o atuador. Os dados registados relativos ao atuador e aos oito LVDTs permitiram elaborar vários gráficos que traduzem o comportamento mecânico da estrutura mista ensaiada. Esses gráficos foram força-deslocamento para o LVDT 3 (Figura 4.18), força-deslocamento para o LVDT 7 (Figura 4.19), deslocamento-posição do LVDT para os LVDT 2, 3 e 4 e para três níveis de carga diferentes (Figura 4.20), e flecha do LVDT 3-deslocamento dos apoios (Figura 4.21).

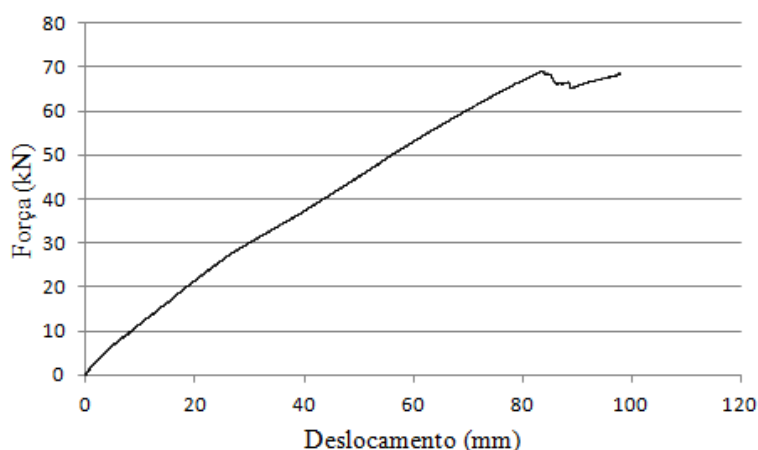


Figura 4.18 – Gráfico Força-Deslocamento (LVDT 3)

O gráfico Força-Deslocamento exposto na Figura 4.18 permite concluir que a viga mista antiga ensaiada (viga de madeira e reforço metálico) apresenta um comportamento praticamente linear e possivelmente elástico até próximo do momento de ensaio que antecede a rotura (Força = 70 kN e Deslocamento = 82 mm). Após esse momento de ensaio, o comportamento da viga mista altera-se e deixa de ter um comportamento linear e possivelmente passa a ter um comportamento plástico.

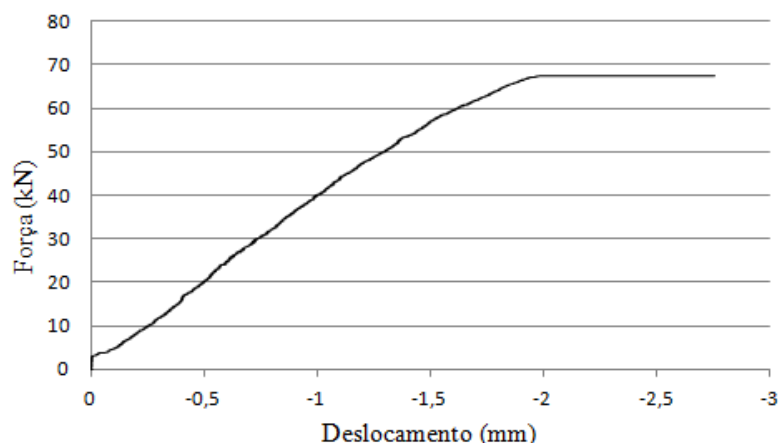


Figura 4.19 – Gráfico Força-Deslocamento (LVDT 7)

Paralelamente, o gráfico apresentado na Figura 4.19 e que é relativo ao LVDT 7 (Figura 4.11) permite constatar que as fibras superiores começam a plastificar para um deslocamento relativo do LVDT 7 de aproximadamente 2 mm, ou seja, para uma extensão de compressão de 0,02%. Aquando da rotura, a contração ocorrida na face superior da viga foi de aproximadamente 2,5 mm. A esta deformação corresponde uma extensão de compressão última de 0,03%.

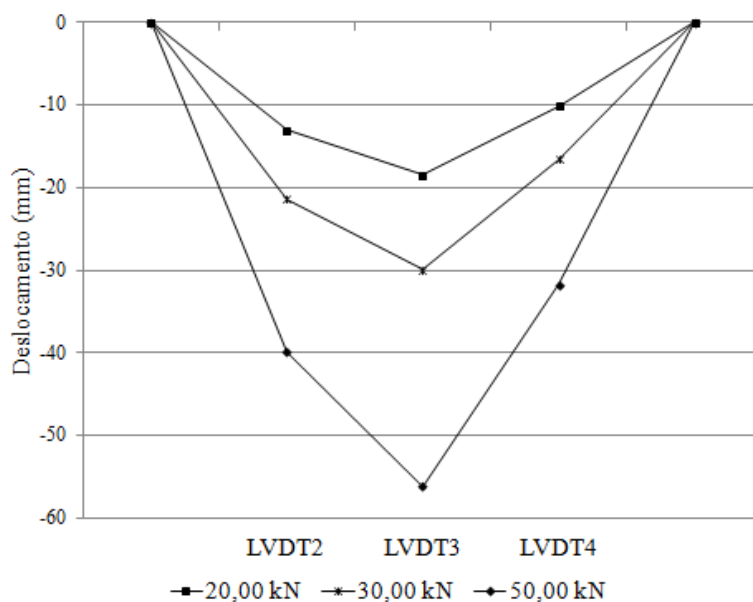


Figura 4.20 – Gráfico Deslocamento-Posição do LVDT

Por sua vez, o gráfico exposto na Figura 4.20 pretende traduzir a evolução da deformada (flecha) da viga mista durante o decorrer do ensaio de flexão em três pontos. Para o efeito, os dados medidos pelos LVDT 2, LVDT 3 e LVDT 4 foram cruciais. De acordo com o ilustrado esquematicamente nas Figuras 4.10 e 4.11 é fácil perceber que estes

LVDTs foram posicionados estrategicamente para este efeito na vertical e aos quartos da viga. Os deslocamentos verticais medidos através deles permitem então traçar as curvas de deslocamento relativas ao gráfico da Figura 4.20. No sentido de se perceber melhor como é que essa deformada ocorria decidiu-se apresentar as curvas ocorridas nos pontos dos quartos da viga para três momentos distintos de ensaio e que foram correspondentes aos momentos em que a célula de carga do atuar registava as forças de 20,00 kN, 30,00 kN e 50,00 kN. Através da leitura deste gráfico percebe-se que à medida que o ensaio decorreu a deformada da viga mista foi crescendo de forma progressiva. A flecha foi sempre superior a meio vão e tendeu para zero no sentido dos apoios localizados nas extremidades da viga. Verificou-se que à medida que se incrementava a carga o respetivo incremento de flecha era significativamente maior do que o verificado na fase inicial do ensaio.

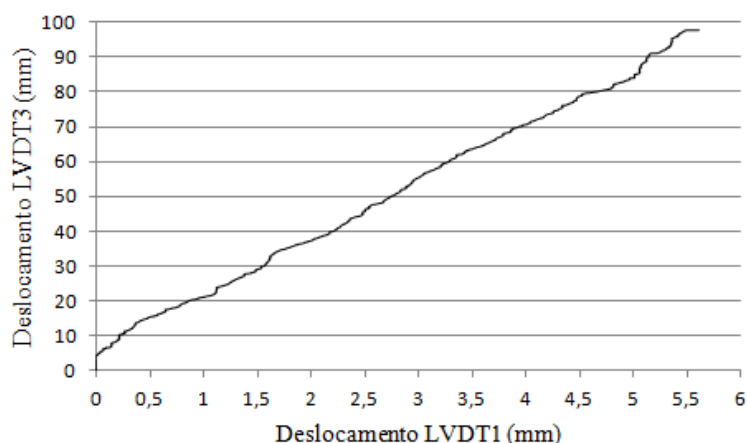


Figura 4.21 – Gráfico Deslocamento LVDT 3-Deslocamento LVDT 1

De forma a complementar esta análise experimental do comportamento estrutural à flexão da viga mista antiga também se optou por traçar um gráfico (Figura 4.21) que pretende relacionar a evolução dos deslocamentos ocorridos a meio vão e no apoio da extremidade esquerda da viga. Para o efeito, foram usados os deslocamentos verticais medidos pelo LVDT 3 (Figura 4.10) posicionado na vertical a meio vão da viga e os deslocamentos horizontais medidos pelo LVDT 1 (Figura 4.10) posicionado horizontalmente no apoio da extremidade esquerda da viga. Deste modo, o gráfico obtido e que está traçado na Figura 4.21 permite concluir que existe uma proporcionalidade entre estes deslocamentos. Observa-se também, que na fase inicial do ensaio, o deslocamento horizontal do topo esquerdo da viga somente se iniciou para

Capítulo 4 – Avaliação da Capacidade Resistente da Viga V7

uma flecha a meio vão de aproximadamente 5 mm. O deslocamento horizontal máximo registado pelo LVDT 1 foi de 5,7 mm.

No decorrer da fase de tratamento de dados verificou-se que infelizmente os dados referentes ao LVDT 6 (colocado no varão, Figura 4.11) e ao LVDT 8 (posicionado a meio vão e na zona das fibras tracionadas, Figura 4.11) apresentaram problemas técnicos e por isso não foi possível considerar esta informação nesta análise da viga. Este problema técnico acabou por condicionar um dos objetivos, que passava pela obtenção das leis de comportamento da madeira à tração e compressão que iriam ser obtidas por análise inversa.

Com os dados recolhidos foi desenvolvido um procedimento com vista a tentar descobrir qual o módulo de elasticidade da viga de madeira.

Para tal foi utilizado o mesmo modelo construtivo da Figura 4.2 e introduzido no programa de cálculo automático [20]. No entanto, e como a viga apresentava bastantes irregularidades na sua secção transversal, optou-se por se dividir a viga, ao longo do seu desenvolvimento, em dez partes e medir o perímetro da viga nessas partes de modo a poder simular várias secções transversais, com diferentes larguras e alturas. Depois de se ter esta partição definida no programa de cálculo, foram aplicados vários níveis de carga (10 kN, 20 kN e 50 kN) e foi-se alterando o módulo de elasticidade do material da viga de madeira até que os deslocamentos verificados coincidissem com aqueles que foram obtidos experimentalmente, nos LVDT 2, 3 e 4.

Verificou-se que para estas cargas, e para que os deslocamentos se assemelhassem aos medidos experimentalmente, o módulo de elasticidade da madeira tinha que ser de 28,0GPa. Fazendo uma comparação entre este valor e os valores do módulo de elasticidade fornecidos pelo Eurocódigo 5 [21], conclui-se que este é significativamente superior aos tabelados. Esta discrepância entre o módulo de elasticidade obtido numericamente e valores sugeridos por [21] poder-se-á dever à solução adotada para a medição dos deslocamentos verticais. Com a disposição dos LVDTs independentes da viga poder-se-á estar a obter uma resposta mais rígida, isto é, uma menor deformação para um determinado nível de carga, devido à não contabilização do eventual deslocamento no sentido ascendente da viga na zona dos apoios. Este fenómeno acentua-se para grandes deformações. Estes deslocamentos parasitas poderiam ter sido

evitados com a utilização de uma barra fixa a meio altura na zona dos apoios da viga. Outra possível justificação pode prender-se com a possível contribuição do envelhecimento da madeira na melhoria das propriedades mecânicas da madeira [16]. No entanto, esta última hipótese e dado os valores do módulo de elasticidade obtidos é bastante mais improvável.

4.5. Comparação entre a viga V7 simples e reforçada

Nesta secção pretende-se perceber o comportamento da viga V7 simples e da mesma viga com o sistema de reforço metálico. Esta análise apenas incidirá nos momentos fletores máximos verificados nas duas soluções e nas flechas máximas obtidas, considerando a aplicação da carga de rotura obtida no ensaio de flexão em três pontos. Esta análise numérica foi realizada com o auxílio do programa de cálculo automático SAP2000 [20].

Como se pode verificar pelas Figuras 4.22 a 4.27, existe uma contribuição bastante significativa do sistema de reforço metálico na viga de madeira. A deformada máxima, para a carga de 70 kN, na viga simples é de 427,7 mm, o que é sensivelmente quatro vezes mais que a deformada verificada na viga reforçada. Também o valor do momento fletor na viga reforçada, 35,41 kNm, é bastante inferior ao mesmo valor para a viga simples, 99,17 kNm. Pode-se, então, concluir que esta solução estrutural mista é bastante favorável e apresenta um melhor comportamento estrutural.

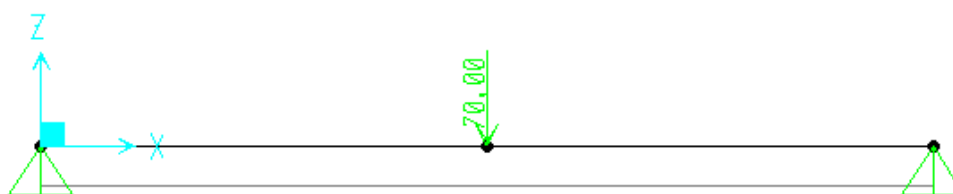


Figura 4.22 – Modelo numérico da viga V7 simples

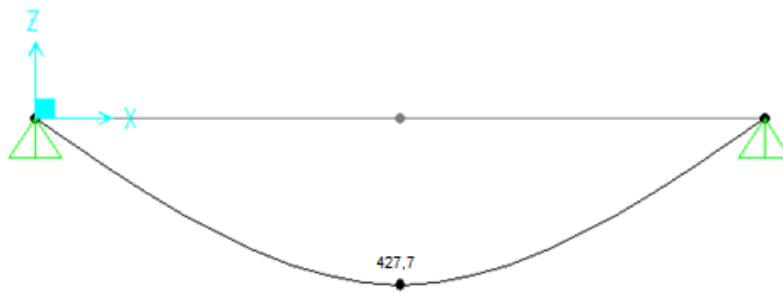


Figura 4.23 – Deformada da viga V7 simples (mm)

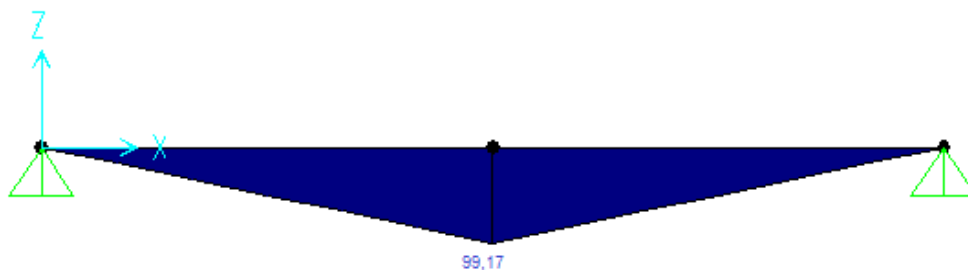


Figura 4.24 – Diagrama de momentos fletores da viga V7 simples (kNm)



Figura 4.25 – Modelo numérico da viga V7 reforçada

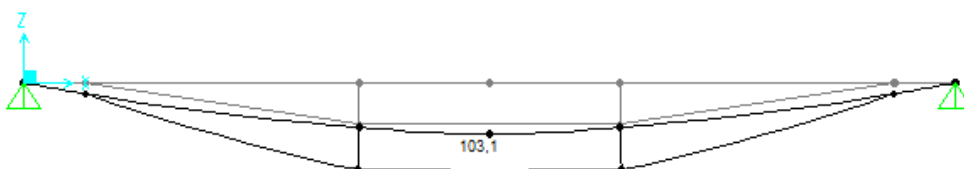


Figura 4.26 – Deformada da viga V7 reforçada (mm)

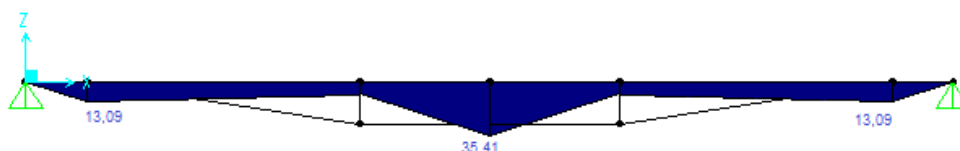


Figura 4.27 – Diagrama de momentos fletores da viga V7 reforçada (kNm)

Para complementar esta informação vão-se, de seguida, considerar três diferentes cenários de disposição das vigas V7 no desenvolvimento do pavimento do rés-do-chão. O primeiro cenário consiste em considerar que todas as vigas V7 existentes neste

Capítulo 4 – Avaliação da Capacidade Resistente da Viga V7

pavimento eram vigas simples. O segundo cenário corresponde a considerar todas elas como vigas reforçadas. E por fim, o terceiro cenário é o que existe na realidade, ou seja, uma solução que contempla vigas simples e vigas reforçadas, e que está ilustrado na Figura 2.22. Na Tabela 4.2 estão presentes os resultados obtidos para cada um dos modelos que simulam os cenários atrás descritos, e cujos resultados foram obtidos pelo programa de cálculo automático [20].

Tabela 4.2 – Resultados obtidos para os vários cenários de reforço considerados

Cenário	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
Momento fletor máximo (kNm)	14,68	4,22	8,61
Deformada máxima (mm)	78,00	19,50	31,20

Como se pode verificar pelos resultados apresentados, e como seria de esperar, o pavimento do rés-do-chão que contempla todas as vigas V7 reforçadas apresenta menores valores de momento fletor máximo e deformada máxima. Ao contrário, quando todas as vigas V7 são simples a deformada é muito elevada e o momento máximo verificado nestes elementos também é o mais elevado nestes cenários. O caso real existente no edifício de caso de estudo apresenta valores, de momento fletor e deformada, entre estes dois extremos.

4.6. Considerações finais

Com este capítulo foi possível:

- Apresentar uma descrição detalhada dos pormenores construtivos tradicionais relativos à viga V7 que foi ensaiada;
- Perceber que o sistema de reforço metálico estava fixado à viga de madeira (V7) através de duas ancoragens metálicas aplicadas nas extremidades da viga e que também possuía dois apoios intermédios localizados sensivelmente aos terços da viga;
- Constatar que foi necessário providenciar algumas peças de apoio ao ensaio, entre elas, dois tripés metálicos, uma calha metálica e algumas peças metálicas em L e em U;
- Descrever todos os procedimentos experimentais necessários à realização do ensaio de flexão em três pontos;

Capítulo 4 – Avaliação da Capacidade Resistente da Viga V7

- Perceber que apesar de todos os esforços na preparação do ensaio, existem sempre fatores inesperados que podem influenciar negativamente o desenrolar do ensaio, tal como foi o caso sucedido em relação à recolha de dados pelos LVDT 6 e LVDT 8;
- Verificar que a viga V7 reforçada atingiu a rotura para uma força máxima de aproximadamente 70 kN e que esta rotura ocorreu numa das suas extremidades, e ao contrário do que era expectável, visto que o momento fletor máximo em vigas simplesmente apoiadas ocorre a meio vão;
- Perceber que as vigas de madeira antiga, do tipo à da viga V7, podem apresentar uma rotura do tipo dúctil;
- Concluir que no decorrer do ensaio de flexão em três pontos formou-se uma rótula plástica a meio vão, passando deste modo o comportamento da viga de elástico para plástico;
- Saber que existe um grande contributo mecânico ao se considerar todas as vigas V7 constituintes do pavimento do rés-do-chão reforçadas, em detrimento de as considerar todas simples ou com a solução estrutural existente em obra.

5. AVALIAÇÃO DA CAPACIDADE RESISTENTE DA ESTRUTURA DE MADEIRA

5.1. Objetivos

Neste capítulo, os objetivos a alcançar são os seguintes:

- Desenvolver um modelo numérico capaz de simular estruturalmente a estrutura de madeira do edifício de caso de estudo;
- Considerar diferentes modelos numéricos de complexidade crescente;
- Tentar estimar o fator de segurança associado à estrutura de madeira.

5.2. Introdução

Com vista a alcançar os objetivos propostos anteriormente muita da informação apresentada no Capítulo 2 foi necessariamente utilizada. Em particular, as dimensões da secção transversal dos elementos estruturais, os seus vãos aproximados, a área de influência de cada um deles e a espécie de madeira. Diferentes modelos numéricos são estudados e propostos. O fator de segurança associado à estabilidade da estrutura de madeira foi sendo estimado para cada modelo numérico desenvolvido, assumindo sempre, um comportamento material linear elástico.

Inicialmente, apenas uma viga principal isolada do pavimento de madeira foi contemplada como elemento estrutural. Depois, as tábuas de soalho e de forro também foram consideradas a trabalhar em conjunto com as vigas principais passando deste modo a dispor-se de uma secção transversal do tipo T e do tipo I, respetivamente.

Seguidamente, desenvolveu-se um modelo numérico que contempla a existência de todos os elementos constituintes de um pavimento de madeira a trabalharem em conjunto considerando por isso as vigas, os barrotes, as tábuas de soalho e as tábuas de forro. Finalmente, o último modelo numérico proposto e o mais complexo, considera todos os elementos estruturais de madeira existentes no edifício, tentando-se modelar um elemento de secção transversal do tipo caixão, em que as almas desta secção são as paredes interiores de tabique do edifício.

Na modelação numérica da estrutura do pavimento das águas-furtadas, foi considerada a contribuição mecânica das tábuas de soalho e de forro na viga V6. Isto é, a secção transversal desta viga passou de um retângulo para uma secção em I, em que o banzo inferior corresponde às tábuas de forro e o banzo superior corresponde às tábuas de

soalho existente no comprimento de influência dessa viga. Em relação ao pavimento do rés-do-chão, sendo que este não apresenta forro, a secção transversal da viga V7 passou de retangular para uma secção em T.

5.3. Elementos estruturais isolados

Nesta parte deste estudo os principais elementos estruturais dos pavimentos do edifício foram dimensionados. Estes já foram devidamente descritos no Capítulo 2. Para tal foi adotada uma metodologia de cálculo expedita que consistiu em quantificar as cargas atuantes a que a estrutura pode estar sujeita à luz da regulamentação atual e compará-las com as cargas máximas admissíveis para cada um desses elementos estruturais principais, considerando para o efeito as dimensões das secções transversais e dos vãos assim como a respetiva espécie de madeira. Por simplificação, não foi tido em conta o estado de degradação da madeira desses elementos estruturais principais dos pavimentos de madeira do edifício do caso de estudo.

Como, neste edifício, os elementos estruturais de madeira eram essencialmente elementos horizontais, a ação do vento foi desprezada neste estudo. Os elementos estruturais de madeira verticais considerados neste estudo são as paredes divisórias de tabique cuja estrutura é formada por uma trama de tábuas verticais ligadas entre si por um fasquio [11], sendo estes elementos construtivos interiores apenas afetados indiretamente pela ação do vento. Portanto, para além dos pesos próprios dos elementos construtivos também foi considerada a sobrecarga de utilização e a ação da neve.

Os valores da sobrecarga e da ação da neve foram retirados do Eurocódigo 1, respetivamente, Parte 1-1 [24] e Parte 1-3 [25]. O valor da sobrecarga nos pisos foi de $2,0 \text{ kN/m}^2$, correspondendo à categoria A – Atividades Domésticas e Residenciais [24], e o valor da sobrecarga atuante na cobertura foi de $0,4 \text{ kN/m}^2$ pois trata-se de uma cobertura não acessível (Categoria H, [24]). Para se obter o valor da pressão exercida pela neve na cobertura do edifício foi necessário calcular alguns parâmetros que dependiam da zona de implantação do edifício (Distrito do Porto – Zona Z2, [25]), da altitude (105 m), do número de vertentes da cobertura (duas) e da topografia do local (Normal). Com esta informação foi possível estimar o valor da ação da neve em $0,168 \text{ kN/m}^2$.

Capítulo 5 – Avaliação da Capacidade Resistente da Estrutura de Madeira

De seguida, foi possível determinar a carga atuante em cada madre de cobertura, porque este é o elemento estrutural da cobertura a ser solicitado. De referir, que nestes cálculos foi tido necessariamente em conta o peso próprio dos elementos estruturais. Na madre de cobertura foi ainda considerado o peso próprio das telhas cerâmicas, $0,45 \text{ kN/m}^3$ [26].

Por sua vez, ao nível do pavimento das águas-furtadas foi considerado o peso próprio dos elementos, incluindo o peso próprio do soalho e do forro, e também o valor de sobrecarga de $2,0 \text{ kN/m}^2$ referido anteriormente. Ao nível do pavimento do rés-do-chão, para além dos pesos próprios de cada elemento (incluindo o soalho) e da sobrecarga, também foi considerado o peso próprio das paredes divisórias de tabique, que já foram descritas no Capítulo 2, e cujo valor adotado para o peso próprio foi de $1,35 \text{ kN/m}^3$ [26].

Os valores das cargas atuantes (p) calculados para cada elemento estrutural a analisar não foram majorados por nenhum coeficiente de segurança parcial previsto na regulamentação em vigor [22]. Não se optou por essa metodologia de quantificação das combinações de ações porque se pretende estimar um fator de segurança global, ou seja, uma relação entre a carga atuante e a carga máxima, para cada elemento estrutural.

Uma madre de cobertura (M), as vigas principais da estrutura da cobertura (V1, V2 e V4), as vigas principais do pavimento das águas-furtadas (V6), um barrote do pavimento das águas-furtadas (B1) e as vigas do pavimento do rés-do-chão (V7) foram os elementos estruturais de madeira contemplados neste estudo. É possível observar a localização destes elementos nas plantas estruturais apresentadas nas Figuras 2.9, 2.16 e 2.19.

Tal como foi referido anteriormente, nesta fase deste estudo, cada um destes elementos foi considerado isolado. Todos eles apresentavam uma secção transversal retangular e cujas respetivas dimensões estão fornecidas na Tabela 2.1.

A tensão de rotura à flexão da madeira é função da sua classe de resistência prevista no Eurocódigo 5 [21]. Foi considerada a classe de resistência C18 da espécie resinosa (Pinheiro Bravo) e a classe de resistência D35 para as espécies folhosas (Castanheiro e Eucalipto). A classe de resistência da espécie de madeira é função do valor

Capítulo 5 – Avaliação da Capacidade Resistente da Estrutura de Madeira

característico da tensão de rotura à flexão (σ), ou seja, para a classe C18, $\sigma = 18$ MPa, e para a classe D35 o respetivo valor é de 35 MPa.

Para cada elemento estrutural, foi possível determinar a respetiva carga admissível ($p_{\text{máx}}$) tendo em conta que todos eles correspondiam ao modelo de cálculo da viga simplesmente apoiada, e cujo momento fletor máximo ($M_{\text{máx}}$) pode ser determinado através da Expressão 5.1.

$$M_{\text{máx}} = \frac{p_{\text{máx}} l^2}{8} \quad (5.1)$$

Em que: $p_{\text{máx}}$ é a carga máxima admissível; l é o vão.

Em paralelo, sabendo-se qual é o valor da tensão de rotura à flexão (σ) e para este modelo de cálculo, é possível estimar o valor da carga máxima admissível ($p_{\text{máx}}$) verificando-se a estabilidade estrutural através da inequação referente à Expressão 5.2.

$$\sigma = \frac{M}{W} \rightarrow \sigma \geq \frac{p_{\text{máx}} l^2}{8W} \rightarrow p_{\text{máx}} < \frac{8W\sigma}{l^2} \quad (5.2)$$

Em que: W é o módulo de flexão da secção transversal retangular.

É importante referir que neste contexto não foi tido em consideração a possível ocorrência de fenómenos de instabilidades tal como encurvadura lateral (bambeamento) e outros aspetos técnicos considerados no Eurocódigo 5. Também não se verificou a segurança em relação ao estado limite último de utilização.

O fator de segurança (FS) pode então ser estimado aplicando-se a Expressão 5.3.

$$FS = \frac{p_{\text{máx}}}{p} \quad (5.3)$$

Face ao exposto, foi então possível obter o FS associado a cada elemento estrutural de madeira em estudo. Os valores do FS estão apresentados na Tabela 5.1.

Não foi estimado o valor do FS da viga V3 porque esta se encontrava apoiada diretamente, ao longo de todo o seu desenvolvimento, na parede exterior de alvenaria de pedra de granito, sendo, por isso, uma viga cinta.

Capítulo 5 – Avaliação da Capacidade Resistente da Estrutura de Madeira

Tabela 5.1 – Fator de segurança dos elementos estruturais principais de madeira isolados

Elemento estrutural	W (cm ³)	M _{máx} (kNm)	p _{máx} (kN/m)	p (kN/m)	FS
M	102,35	3,58	4,70	0,42	11,19
V1	405,00	14,18	1,38	0,42	3,29
V2	499,13	17,47	1,70	0,42	4,05
V4	685,67	24,00	2,83	0,42	6,74
B1	22,5	0,79	3,17	1,47	2,16
V6	616,33	21,57	4,61	1,47	2,12
V7	588,00	20,58	5,00	3,85	1,30

Os valores de FS estimados para os diferentes elementos estruturais expressos na Tabela 5.1 mostram que estes verificam a segurança em relação ao estado limite último de flexão com uma margem folgada. De todos os elementos estruturais analisados, a viga V7 é o elemento estrutural que apresenta o FS inferior, isto é, igual a 1,30, com uma margem de segurança de 30%. Por sua vez, as madres de cobertura são os elementos que se encontram mais sobredimensionados em termos de verificação de segurança em relação ao estado limite último de flexão.

Também se apresentam os valores da deformação máxima de cada elemento estrutural, considerando que a carga atuante corresponde ao p_{máx}. Esses valores estão apresentados na Tabela 5.2. De referir que este valor, para as madres, o barrote B1, a viga V6 e a viga V7, foi calculado pela Expressão 5.4.

$$y_{\text{máx}} = \frac{5p_{\text{máx}}l^4}{384EI} \quad (5.4)$$

Em que: E – Módulo de elasticidade do elemento; I – Momento de Inércia do elemento

De referir que para a classe de resistência considerada para a madeira, D35, o valor do módulo de elasticidade é 10 GPa.

As deformadas das vigas V1, V2 e V4, foram calculadas pelo programa de cálculo [20], pois as cargas aplicadas nestes elementos não eram distribuídas, mas sim resultavam das reações de apoio das madres da cobertura.

Tabela 5.2 – Flecha máxima dos elementos estruturais isolados para $p_{máx}$ (mm)

Elemento Estrutural	M	V1	V2	V4	B1	V6	V7
Deformada Máxima	52,93	21,80	23,20	29,82	48,34	91,67	72,19

Como se pode verificar os valores das deformadas máximas são bastantes elevados tendo em conta o limite aceitável de $L/300$, sugerido pela regulamentação [21]. No entanto, este estudo apenas se foca nos valores últimos de carga e não tem como preocupação o estado limite de utilização.

Estes resultados são interessantes porque revelam que uma estrutura de madeira antiga poderá eventualmente cumprir as normativas recomendadas pela regulamentação em vigor.

Estes resultados também permitem explicar porque é que um elemento estrutural de madeira antiga pode sofrer degradação material até um certo nível sem colocar em risco a sua estabilidade. É importante relembrar que nesta análise a madeira foi considerada como sendo nova e não foi encontrado na bibliografia consultada durante este trabalho de investigação informação adicional sobre propriedades materiais ou metodologias de cálculo objetivas relacionadas com madeira antiga em elementos estruturais.

5.4. Elementos estruturais compostos

Dando continuidade ao estudo de avaliação da capacidade resistente da estrutura de madeira estimou-se, nesta fase, outros FS para as vigas V6 e V7 considerando para o efeito o contributo estrutural das tábuas de soalho do pavimento e as tábuas de forro. Neste caso a viga V7 passa a apresentar uma secção transversal em T, cujo banzo tem uma largura correspondente ao comprimento de influência de cada viga V7. Depois, e apenas para a viga V6 também, foi considerado o forro na secção transversal, que a transforma numa secção em I, em que o banzo superior é o mesmo da secção em T e o banzo inferior tem uma largura correspondente ao comprimento de influência da viga V6 e uma espessura igual à das tábuas de forro. Em relação à viga V7, a secção retangular, (referida anteriormente), a secção em T e a viga com o reforço metálico foram os cenários de cálculo considerados. Nas secções em I e em T, a alma da secção transversal é referente à secção transversal da viga isolada correspondente. Na Figura 5.1 estão representadas esquematicamente as diferentes secções transversais que foram

Capítulo 5 – Avaliação da Capacidade Resistente da Estrutura de Madeira

consideradas para as vigas V6 e V7 em cada etapa de cálculo, incluindo a secção transversal retangular da viga isolada e abordada no subcapítulo anterior.

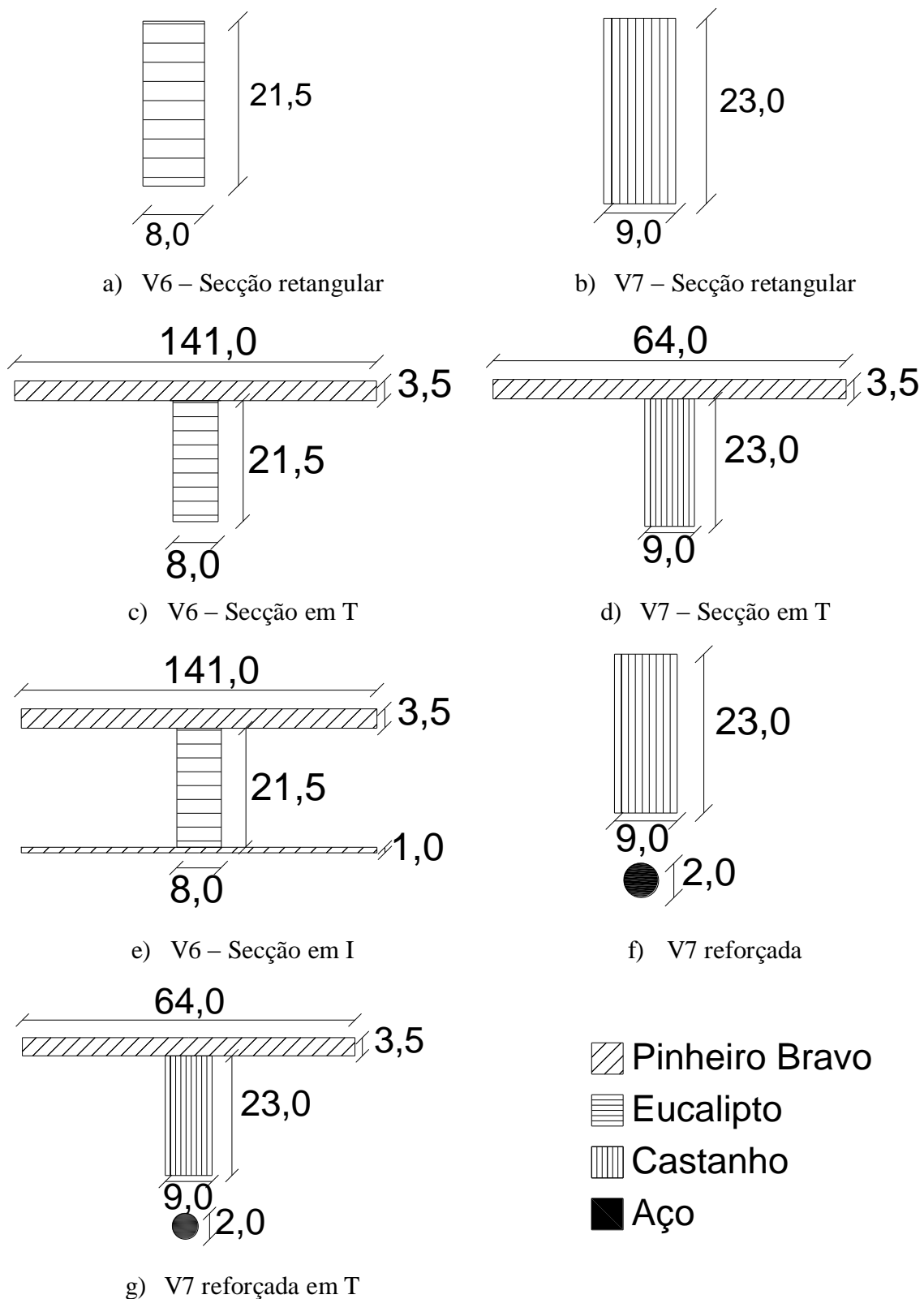


Figura 5.1 – Secções transversais consideradas nas vigas V6 e V7 (cm)

Capítulo 5 – Avaliação da Capacidade Resistente da Estrutura de Madeira

Na Figura 5.1 também estão indicados os materiais considerados. Tendo em conta que a secção transversal de um elemento estrutural pode incluir diferentes materiais, foi necessário nesses casos proceder a homogeneização prévia antes de se estimar o respetivo FS.

É importante referir que no caso da viga V7 não foi considerada a secção do tipo I porque não existe forro no pavimento referente ao pavimento do rés-do-chão. E que o modelo estrutural considerado na estimativa é o mesmo que está apresentado na Figura 4.2.

Procedeu-se então ao cálculo dos FS para as condições descritas anteriormente e de acordo com os procedimentos descritos na secção anterior. Os valores dos FS estimados estão apresentados na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Fatores de segurança dos elementos estruturais principais de madeira compostos

Elemento estrutural	W (cm ³)	M _{máx} (kNm)	P _{máx} (kN/m)	p (kN/m)	FS
V6 (T)	1377,72	48,22	10,71	1,47	4,94
V6 (I)	4284,97	149,97	32,62	1,47	15,03
V7 (T)	1529,86	53,55	12,47	3,85	3,24
V7R	-	-	16,05	3,85	4,17
V7R (T)	-	-	22,60	3,85	5,87

Como se pode verificar na Tabela 5.3, os valores dos FS dos elementos estruturais, considerando secções transversais compostas, aumentaram significativamente em relação aos respetivos fatores para secção transversal retangular (Tabela 5.1). Este facto justifica-se pelo considerável aumento do módulo de flexão (W) quando se consideram secções transversais compostas.

Tal como foi efetuado na secção anterior, de seguida apresentam-se os valores das deformadas máximas para os elementos com estas secções transversais compostas, e que são apresentados na Tabela 5.4. Para a viga V6 com secções tipo T e I e para a viga V7 com secção tipo T, utilizou-se a Expressão 5.4. Para a viga V7 reforçada recorreu-se ao programa de cálculo [20] para a obtenção do valor da deformada.

Capítulo 5 – Avaliação da Capacidade Resistente da Estrutura de Madeira

Tabela 5.4 – Flecha máxima dos elementos estruturais compostos para $p_{m\acute{a}x}$ (mm)

Elemento Estrutural	V6 (T)	V6 (I)	V7(T)	V7R	V7R (T)
Deformada Máxima	52,15	56,51	58,18	72,90	43,70

Tal como foi observado para os elementos estruturais isolados, as deformadas máximas verificadas nestes elementos estruturais compostos é significativa, mas, voltando a reforçar a ideia, este trabalho foca-se no estado limite último e não no estado limite de utilização. Adicionalmente, as flechas para estados limites de serviço devem ser calculadas para combinações de cargas quase permanentes.

Esta informação indica que considerando a contribuição estrutural das tábuas de soalho e das tábuas de forro pode haver um aumento da estabilidade global da estrutura de um pavimento de madeira antigo. As tábuas de soalho e as tábuas de forro são geralmente elementos construtivos considerados como elementos de acabamento e não como elementos estruturais. Este aumento da capacidade resistente do pavimento devido ao facto de se considerar secções transversais compostas em vez de isoladas poderá também explicar que este tipo de estruturas antigas, mesmo depois de sofrerem degradação, continue a manter-se estável.

Aspetos técnicos associados à pregagem das tábuas de soalho e de forro às vigas e o processo de emenda destas tábuas poderá afetar o sucesso deste cenário construtivo de secção transversal composta. Investigação adicional será necessária desenvolver de forma a ter em conta estas particularidades técnicas.

É importante referir que no caso da viga V6, as secções tipo T e tipo I não existem propriamente nestes moldes neste edifício, porque e tal como foi referido no Capítulo 2, as tábuas de soalho não se apoiavam diretamente na viga V6 mas sim no barroto B1 e este por sua vez, é que se apoiava na viga. No entanto, em outros casos de obra as tábuas de soalho de um pavimento podem apoiar-se diretamente nas vigas.

No caso da viga V7 com o reforço metálico, como se tratava de uma solução estrutural mista, o respetivo cálculo foi efetuado usando o programa de cálculo automático SAP2000 [20]. Na fase de introdução de dados houve o cuidado de atribuir as propriedades físicas e mecânicas das respetivas diferentes espécies de madeira existentes e identificadas na Secção 2.5. A massa volúmica foi determinada

experimentalmente e é fornecida na Tabela 2.3, os valores do módulo de elasticidade e do coeficiente de dilatação térmica foram retirados de [27].

5.5. Efeito conjugado de pavimentos

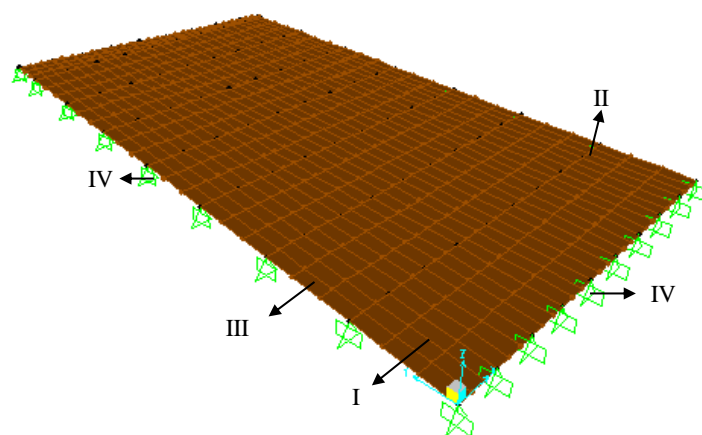
Nesta fase da avaliação da capacidade resistente da estrutura de madeira do edifício considerou-se o contributo estrutural de todos os elementos constituintes existentes ao nível dos pavimentos. Deste modo, no pavimento das águas-furtadas foram consideradas todas as vigas V6, todos os barrotes B1, as tábuas de soalho e de forro. No pavimento do rés-do-chão, os elementos considerados foram todas as vigas V7, as tábuas de soalho e os reforços metálicos. Neste último caso, e para ser possível fazer uma comparação com os valores do FS apresentados anteriormente, optou-se por ir incrementando de forma gradual a carga atuante no pavimento até que um dos elementos estruturais atingisse o valor máximo da sua capacidade resistente (em flexão ou tração). Optou-se por designar Modelo Estrutural 1 ao modelo numérico desenvolvido para a estrutura do pavimento das águas-furtadas e Modelo Estrutural 2 ao modelo estrutural desenvolvido para a estrutura do pavimento do rés-do-chão.

De forma a simular numericamente o pavimento das águas-furtadas foi então necessário contemplar a existência das 7 vigas V6, a existência de 64 barrotes (B1), as tábuas de soalho e as tábuas de forro. As dimensões destes elementos construtivos, a respetiva espécie de madeira e as propriedades físicas e mecânicas implícitas, e as disposições entre elementos construtivos (Figura 2.24), foram aspetos técnicos que foram cuidadosamente previstos no modelo numérico desenvolvido para simular estruturalmente este pavimento (Modelo Estrutural 1). Deste modo, a malha de elementos finitos gerada automaticamente pelo programa de cálculo automático adotado e que simula a estrutura do pavimento das águas-furtadas é composta por 73 elementos lineares, por 72 elementos de superfície linear com 4 nós, resultando num total de 90 nós. Esta malha de elementos finitos está ilustrada na Figura 5.2.

As tábuas de soalho e as tábuas de forro (III, Figura 5.2) são elementos de superfície que se apoiam continuamente sobre os barrotes. Os barrotes (I, Figura 5.2) foram simulados em elementos lineares e cuja ligação às vigas é rotulada. As vigas V6 (II, Figura 5.2) foram também simuladas em elementos lineares. Estas vigas apoiavam-se nas paredes exteriores de alvenaria de granito onde é permitido todas as rotações e

Capítulo 5 – Avaliação da Capacidade Resistente da Estrutura de Madeira

nenhuma translação ao longo do desenvolvimento do pavimento, de forma a simular numericamente as condições de apoio destas vigas em obra e que estão ilustradas na Figura 3.3.b. Os barrote existentes nos topos do pavimento também se apoiam, numa das suas extremidades, na parede de forma análoga. Estas são por isso as condições de fronteira (IV, Figura 5.2) do modelo numérico da estrutura do pavimento.



Legenda: I – Barrote; II – Viga V6; III – Soalho e Forro; IV – Parede de granito

Figura 5.2 – Malha de elementos finitos do Modelo Estrutural 1

Após a análise numérica inicial para uma situação de sobrecarga atuante de $p = 2\text{kN/m}^2$, obteve-se o diagrama de momentos fletores apresentado na Figura 5.3 e a deformada da estrutura do pavimento ilustrada na Figura 5.4. De referir que nesta análise também foi considerado o peso próprio de todos os elementos.

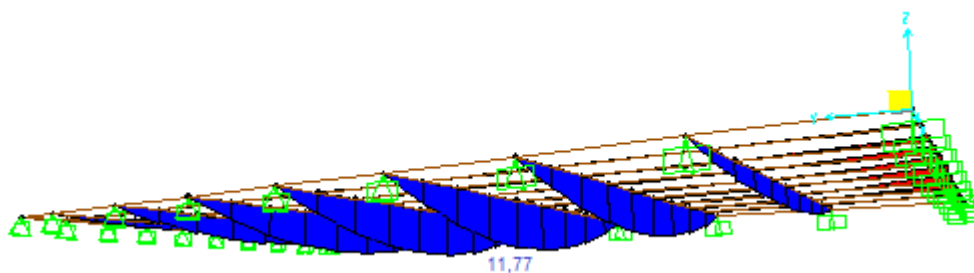


Figura 5.3 – Diagrama de momentos fletores para a carga regulamentar do Modelo Estrutural 1 (kNm)

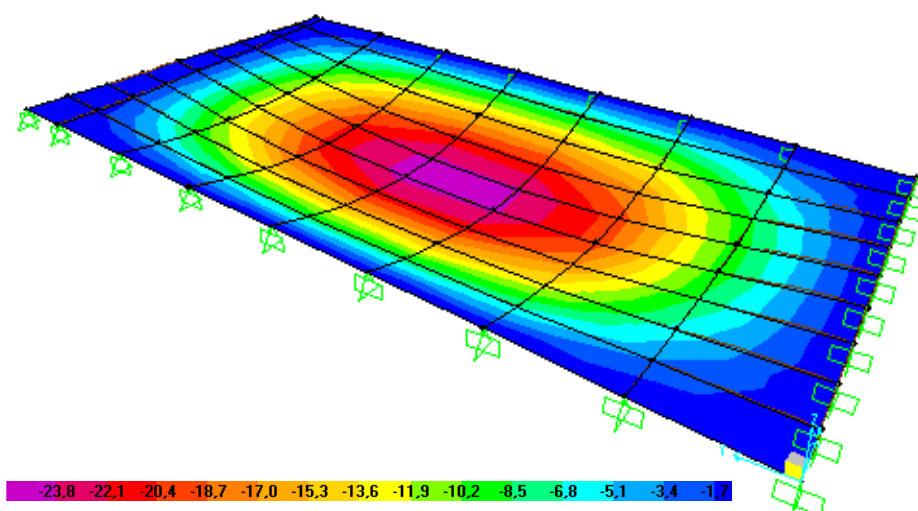


Figura 5.4 – Deformada para a carga regulamentar do Modelo Estrutural 1 (mm)

Nestas condições, a viga V6 mais esforçada apresenta um momento fletor máximo de valor igual 11,17 kNm enquanto que o seu momento fletor resistente é de 21,57 kNm. Quanto à deformada, e assumindo que a deformação máxima admissível corresponde a $L/300$ (18,8 mm), em que L é o vão da viga V6, esta se encontra ligeiramente acima deste limite máximo porque o respetivo valor é de 23,8 mm.

Procedendo-se então a um incremento gradual da carga atuante no pavimento até um dos elementos estruturais principais atingisse a rotura, foi possível verificar que aumentando a carga atuante em 2 vezes, o valor do momento fletor máximo ocorrido na viga V6 era de 21,49 kNm, o que é próximo do valor do momento fletor resistente desta viga. No entanto, a deformada para este incremento de carga foi de 105 mm o que é superior ao valor máximo recomendado. Contudo, a análise em curso está focada na garantia da estabilidade da estrutura do pavimento e, por isso, um valor excessivo da flecha não parece ser prioritário. Face ao exposto e aos resultados numéricos obtidos é possível afirmar que a contribuição estrutural de todos os elementos construtivos existentes no pavimento das águas-furtadas e modeladas de acordo com o Modelo Estrutural 1, que permite o efeito conjugado, indica que a estrutura de madeira deste pavimento aparenta ter um FS de 2,0. De referir que estes valores máximos são verificados numa das vigas V6 localizadas no centro do edifício.

Mais uma vez se obteve informação conducente a afirmar que a estrutura de um pavimento de madeira antiga pode estar sobredimensionada à luz da regulamentação em

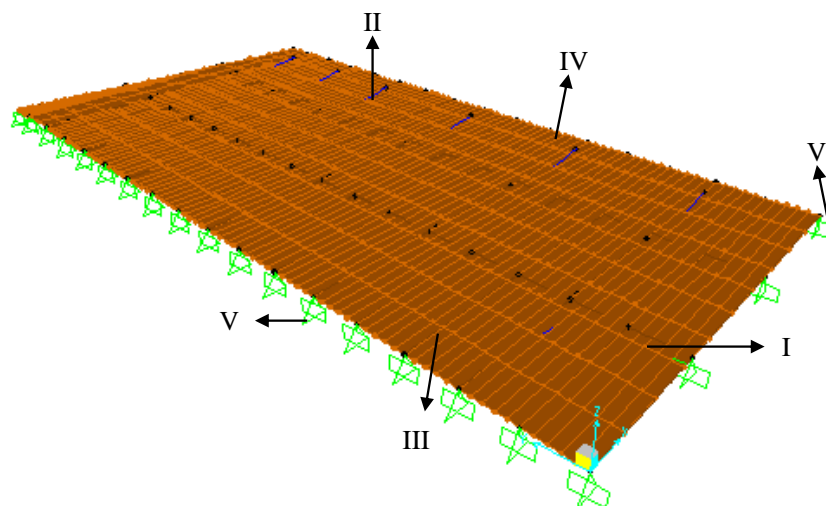
vigor e, que por isso, pode ter uma significativa margem de capacidade resistente que permite a ocorrência de um certo nível de patologias sem condicionar a estabilidade.

Contudo, também se verifica que este modelo numérico conduz a um FS da capacidade resistente do pavimento das águas-furtadas significativamente inferior em relação ao FS estimado para o contexto de viga isolada composta e apresentado anteriormente na Tabela 5.3. O facto das tábuas de soalho estarem apoiadas nos barrotes em vez de estarem apoiadas diretamente nas vigas poderá explicar esta redução do FS.

É também importante referir que a verificação da segurança das ligações pregadas entre os diversos elementos estruturais constituintes deste pavimento à luz do Eurocódigo 5 [21] não foi processada neste trabalho de investigação e por razões de simplificação.

No que se refere ao Modelo Estrutural 2, correspondente ao pavimento do rés-do-chão, teve que se fazer uma simplificação nos apoios do varão metálico. Teve que se considerar que não eram transmitidos quaisquer esforços por estes apoios pois se esta consideração não fosse tida em conta os esforços seriam imediatamente transferidos para o varão através destes apoios, o que na realidade não acontece pois os apoios apresentam uma pequena folga em relação à viga de madeira, o que faz que o varão só entre em tensão quando a viga atinge um determinado valor de deslocamento.

De forma a simular numericamente o pavimento do rés-do-chão foi então necessário contemplar a existência de 16 vigas V7, sendo que 6 destas se encontram reforçadas com o varão metálico enquanto que as restantes 10 apenas correspondem à viga de madeira, contemplou-se também a existência de 32 contraventamentos e as tábuas de soalho. As dimensões destes elementos construtivos, a respetiva espécie de madeira e as propriedades físicas e mecânicas implícitas e a disposição entre os elementos (Figura 2.20) foram aspetos construtivos que foram tidos em conta no desenvolvimento do modelo numérico que simula este pavimento (Modelo Estrutural 2). Deste modo, a malha de elementos finitos gerada automaticamente pelo programa de cálculo automático adotado e que simula a estrutura do pavimento do rés-do-chão é composta por 116 elementos lineares, 17 elementos de superfície linear com 4 nós, resultando num total de 108 nós. Esta malha de elementos finitos está ilustrada na Figura 5.5.



Legenda: I – Contraventamento considerado; II – Reforço metálico; III – Viga V7; IV – Soalho; V – Parede de granito

Figura 5.5 – Malha de elementos finitos do Modelo Estrutural 2

Tal como no Modelo Estrutural 1, também neste modelo as tábuas de soalho (IV, Figura 5.5) são elementos de superfície que se apoiam diretamente sobre as vigas V7 (III, Figura 5.5). Os contraventamentos (I, Figura 5.5) foram simulados em elementos lineares e eram apoiados nas vigas V7. Quando às vigas V7, estas também foram simuladas em elementos lineares. Estas vigas apoiavam-se nos cachorros existentes nas paredes exteriores de alvenaria de granito onde são permitidas todas as rotações e a translação ao longo do desenvolvimento do pavimento (direção y, Figura 5.5) e de forma a simular numericamente as condições de apoio destas vigas em obra e que estão ilustradas na Figura 5.6.



Figura 5.6 – Apoio das vigas V7 no cachorro (Setembro de 2011)

Capítulo 5 – Avaliação da Capacidade Resistente da Estrutura de Madeira

Neste caso a superfície que simula o soalho (elemento IV, Figura 5.5) está apoiada nas extremidades do edifício em apoios duplos, pois em relação ao soalho existente no pavimento das águas-furtadas, este apoia no sentido contrário, ou seja, tem que ter um apoio na parede de alvenaria (elemento V, Figura 5.5). Outra opção tomada e que convém referir foi a forma definida de ligação entre a viga de madeira V7 (elemento III, Figura 5.5) e o reforço metálico (elemento II, Figura 5.5). Considerou-se a existência de rótulas nas extremidades do varão metálico de modo a que este não sofresse fenómenos de flexão, apenas absorvendo esforços axiais.

Após a análise numérica inicial para uma situação de carga atuante de $p = 5,645 \text{ kN/m}^2$, (considerando também o peso próprio de todos os elementos) obteve-se o diagrama de momentos fletores apresentado na Figura 5.7 e a deformada da estrutura do pavimento ilustrada na Figura 5.8.

Nestas condições, a viga V7 mais esforçada apresenta um momento fletor máximo de valor igual a 8,61 kNm enquanto que o seu momento fletor resistente é de 20,58 kNm. Quanto à deformada máxima ocorrida na viga V7, esta vale 31,2 mm.

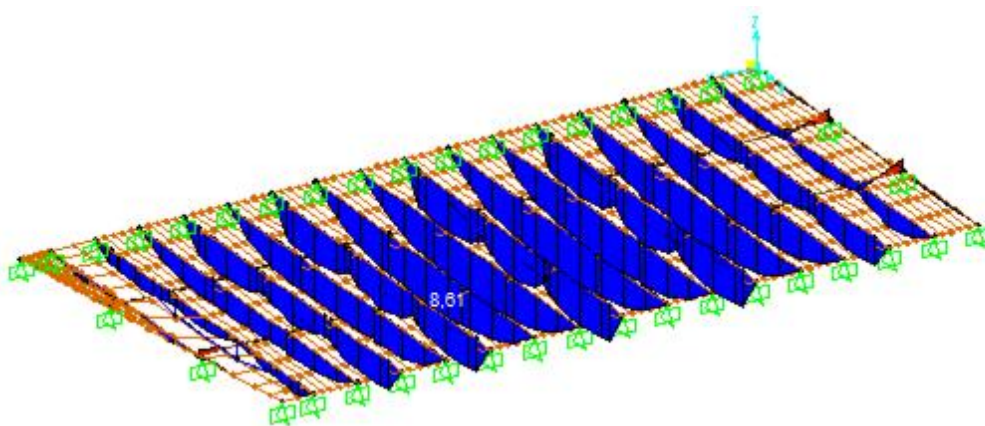


Figura 5.7 – Diagrama de momentos fletores para a carga regulamentar do Modelo Estrutural 2 (kNm)

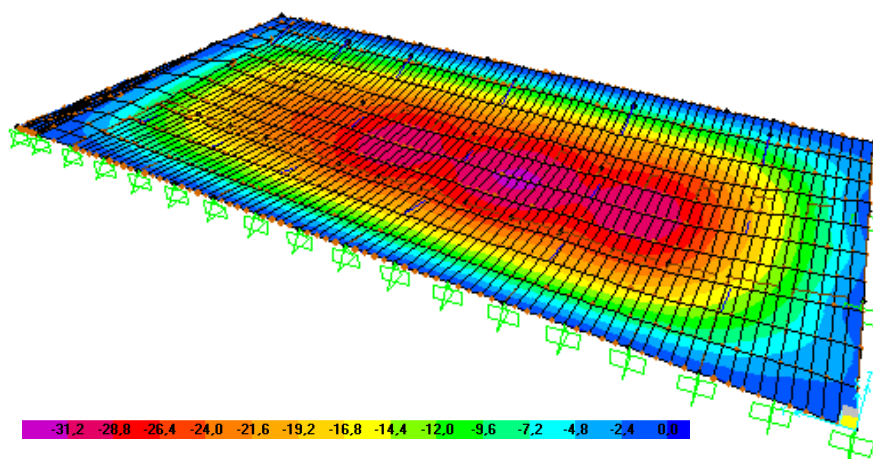


Figura 5.8 – Deformada para a carga regulamentar do Modelo Estrutural 2 (mm)

Procedendo-se novamente ao incremento gradual da carga atuante no pavimento observa-se que quando se aumenta 3,01 vezes o valor destas cargas, o momento fletor máximo instalado na viga V7 passa a ser de 20,6 kNm, pelo que o FS obtido para o Modelo Estrutural 2 é considerado igual a 3,01. Neste caso, a deformada máxima verificada é de 117 mm. De referir, que tal como sucede no pavimento das águas-furtadas, estes valores máximos ocorrem numa das vigas localizada no centro do pavimento.

5.6. Efeito conjugado de toda a estrutura de madeira

Finalmente, na fase final do estudo da avaliação da capacidade resistente da estrutura de madeira do edifício foi considerada a contribuição conjugada de toda a estrutura de madeira estando, por isso, contempladas em simultâneo a contribuição do pavimento do rés-do-chão, da estrutura de madeira das paredes de tabique divisórias e o pavimento das águas-furtadas. Em termos simplificados, estes elementos estruturais, quando ligados entre si, permitem formar uma superestrutura do tipo viga em caixão cujo banzo superior é correspondente ao pavimento das águas-furtadas e que inclui os elementos estruturais integrantes identificados e previstos no Modelo Estrutural 1, cujo banzo inferior é referente ao pavimento do rés-do-chão caracterizado de forma análoga ao previsto no Modelo Estrutural 2 e cujas almas são relativas à estrutura de madeira das paredes de tabique divisórias. O modelo numérico resultante (Modelo Estrutural 3), e capaz de simular estruturalmente esta solução integrante de todos os elementos

Capítulo 5 – Avaliação da Capacidade Resistente da Estrutura de Madeira

estruturais, é bastante mais complexo do que os modelos numéricos abordados anteriormente (Modelo Estrutural 1 e Modelo Estrutural 2) tal como era previsível.

As paredes de tabique divisórias foram posicionadas no modelo numérico de forma análoga à prevista na planta arquitetónica apresentada na Figura 2.4, do Capítulo 2. Por simplificação, estas paredes foram simuladas numericamente como elementos de superfície em vez de se considerar elementos lineares a simularem cada tábua vertical da estrutura de madeira destas paredes. Estas paredes apresentavam uma espessura de 10 cm. Tal como se pode observar na Figura 2.24, nos topos das paredes de tabique divisórias do edifício existiam uns elementos estruturais horizontais de reforço/apoio da ligação destas paredes aos pavimentos. Este pormenor construtivo também foi contemplado neste modelo numérico.

A malha de elementos finitos referente ao Modelo Estrutural 3 está exposta na Figura 5.9. Esta malha prevê 532 elementos lineares (referentes às vigas V6 e V7, barrotes e reforço metálico), 1561 elementos de superfície (referentes às paredes de tabique divisórias, às tábuas de soalho e de forro) com 4 nós, resultando num total de 1624 nós. As condições de apoio são análogas às previstas nos Modelos Estruturais 1 e 2, mas desta vez, a ocorrerem em simultâneo. As ações previstas atuar nos pavimentos também foram consideradas em simultâneo, assim como o peso próprio de todos os elementos estruturais de madeira.

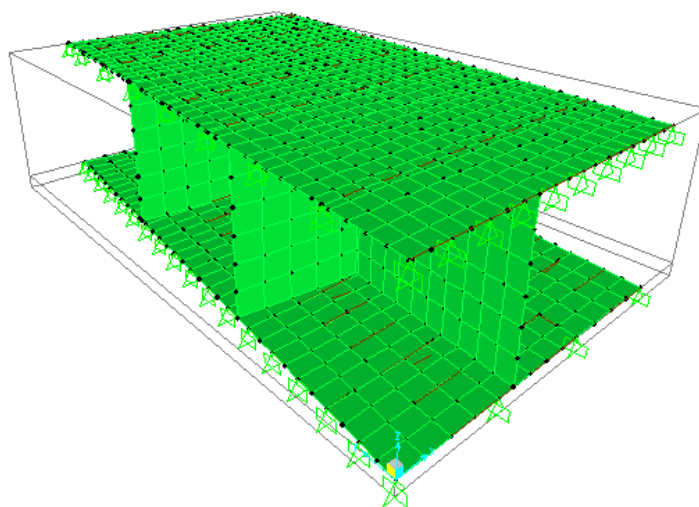


Figura 5.9 – Malha de elementos finitos do Modelo Estrutural 3

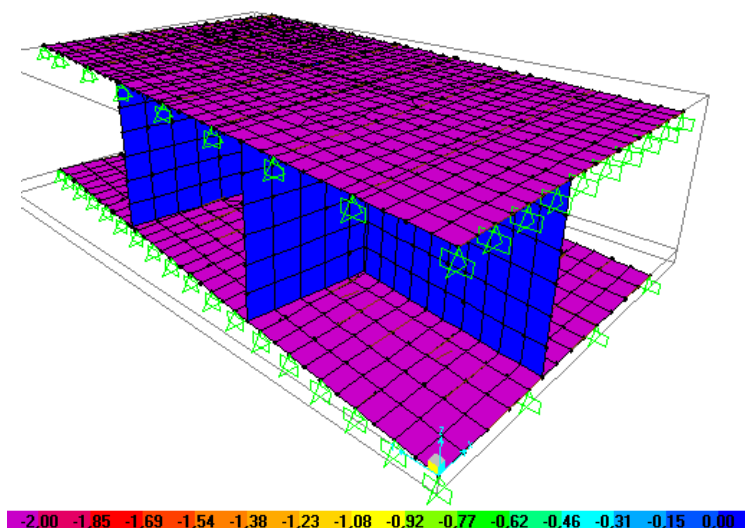


Figura 5.10 – Distribuição das cargas atuantes (kN/m²)

Nestas condições, é possível verificar, para a carga regulamentar e pela análise dos diagramas apresentados na Figura 5.11 e na Figura 5.12 que o momento máximo verificado é de 1,89 kNm (registado numa das vigas V7 reforçadas), e a deformada máxima é de 2,47 mm. Os respetivos diagramas de momentos fletores e a deformada do Modelo Estrutural 3 encontram-se, respetivamente, nas Figuras 5.11 e 5.12.

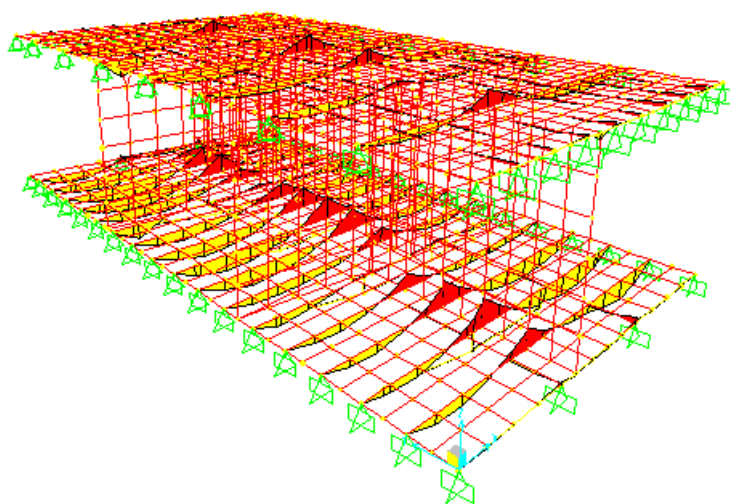


Figura 5.11 – Diagrama de momentos fletores para a carga regulamentar do Modelo Estrutural 3 (kNm)

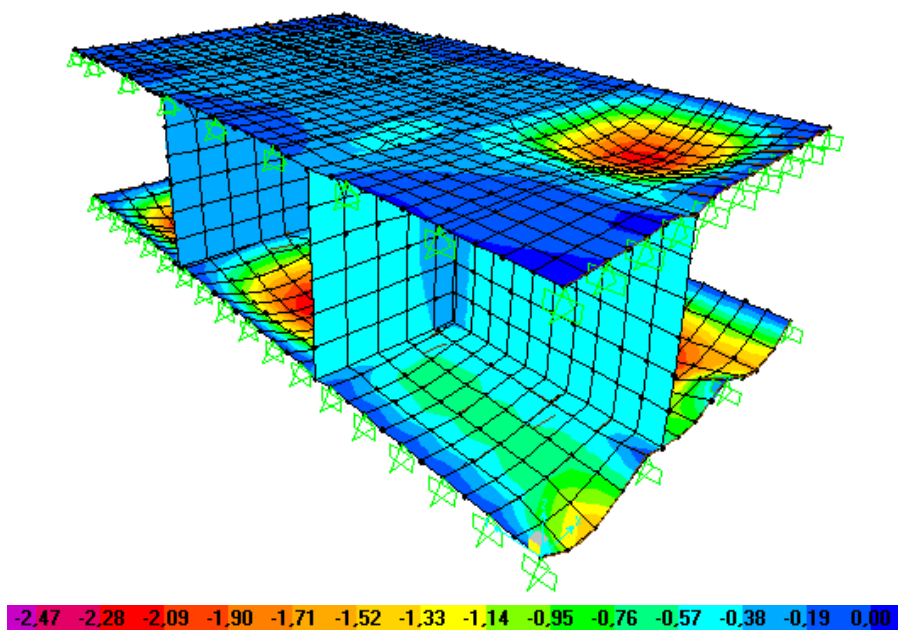


Figura 5.12 – Deformada da estrutura para a carga regulamentar referente ao Modelo Estrutural 3 (mm)

Por sua vez, o diagrama de tensão de von Mises instalado nas paredes de tabique e no soalho dos pavimentos, para a carga regulamentar, está apresentado na Figura 5.13.

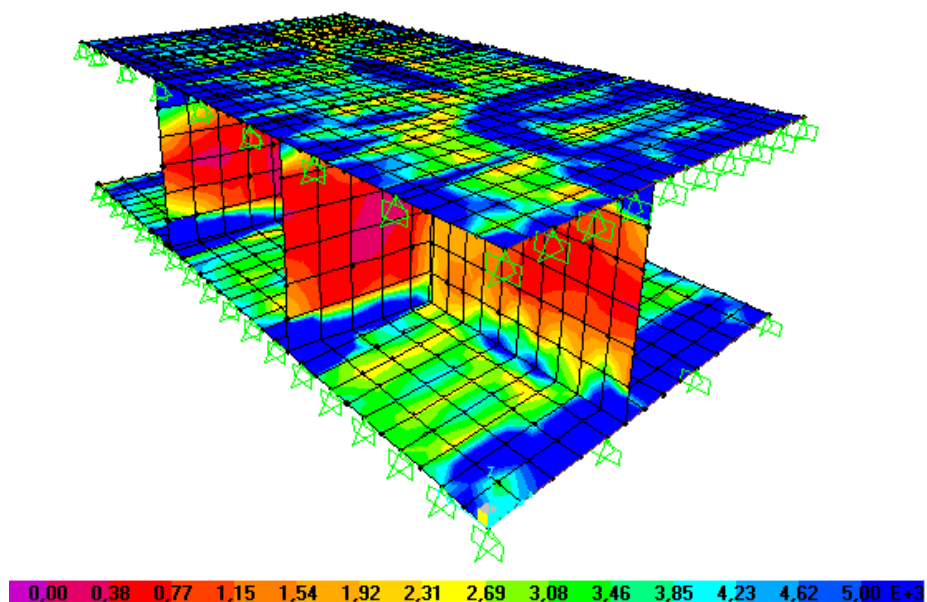


Figura 5.13 – Diagrama da tensão de von Mises instalado nas superfícies constituintes do edifício (kPa)

Capítulo 5 – Avaliação da Capacidade Resistente da Estrutura de Madeira

O critério de von Mises tem em conta as tensões principais nas três direções e os seus valores são sempre positivos. A tensão de von Mises é dada pela Expressão 5.5 [28].

$$\sigma_{\text{vonMises}} = \left(\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2}{2} \right)^{1/2} \quad (5.5)$$

Em que: σ_1 , σ_2 e σ_3 são as tensões principais.

Através da Figura 5.13 é possível verificar que existe uma certa linearidade na transmissão das cargas aplicadas ao nível do pavimento das águas-furtadas para o pavimento do rés-do-chão e através das paredes divisórias de tabique. A tensão normal instalada nas paredes de tabique e no soalho não excede o limite máximo previsto no Eurocódigo 5 [21], para a classe de madeira considerada nestes elementos, tanto para a tração como para a compressão.

À semelhança do efetuado no estudo da solução do efeito conjugado dos pavimentos (Modelo Estrutural 1 e 2), também neste caso, se procedeu a um incremento gradual e iterativo do valor das cargas atuantes até que um dos elementos estruturais atingisse a rotura. Este incremento foi constante nas várias ações consideradas, ou seja, foi-se aumentando todas as cargas na mesma proporção. No final, verificou-se que para o Modelo Estrutural 3 é possível aumentar a carga 10,9 vezes em relação à carga atuante, sendo que este valor foi considerado o valor do FS do Modelo Estrutural 3. Neste caso, a rotura dá-se por uma das vigas V6 e a deformada máxima é de 25 mm. Também se verificou que os valores da tensão de von Mises a que as paredes de tabique e as tábuas de soalho estão sujeitas são inferiores à tensão máxima de compressão e de tração previstas em [21].

Também nesta fase, a verificação da estabilidade das ligações pregadas entre os diversos elementos estruturais de madeira não foi contemplada neste estudo de avaliação da capacidade resistente da estrutura de madeira do edifício. Neste caso, a estabilidade da ligação pregada entre as paredes de tabique e os pavimentos apresenta uma importância acrescida.

5.7. Análise de resultados

De forma a simplificar a análise dos resultados obtidos ao longo deste capítulo, apresenta-se na Tabela 5.5 o FS estimado para cada elemento estrutural e para os diferentes modelos estruturais definidos neste estudo, Modelo Estrutural 1 (ME1), Modelo Estrutural 2 (ME2) e Modelo Estrutural (ME3).

Tabela 5.5 – FS dos elementos estruturais de madeira e dos modelos estruturais

Elemento Estrutural	FS
Madre	11,19
V1	3,29
V2	4,05
V4	6,74
B1	2,16
V6	2,12
V7	1,30
V6(T)	4,94
V6(I)	15,03
V7(T)	3,24
V7R	4,17
V7R(T)	5,87
ME1	2,00
ME2	3,01
ME3	10,90

Os FS estimados apresentaram valores superiores a 1, o que revela que os elementos estruturais de madeira e o sistema estrutural dos pavimentos apresentam uma margem de segurança significativa em termos de estabilidade. Tal como já foi referido anteriormente, estes dados podem reforçar a ideia de que os elementos estruturais de madeira de edifícios antigos podem estar sobredimensionados à luz da regulamentação vigente, Eurocódigo 5 [21]. Paralelamente, esta margem de segurança talvez possa justificar o facto de apesar de alguns elementos estruturais de madeira antiga apresentarem patologias graves, tais como, degradação do material ou redução da secção transversal (ou redução da massa), ainda possam continuar em serviço sem sofrer colapso.

Outro aspeto que parece ser relevante nesta análise prende-se com o facto de nos Modelos Estruturais 1, 2 e 3, se ter considerado que toda a estrutura deixava de estar em serviço quando um dos elementos estruturais colapsasse. Esta consideração pode ser vista como sendo muito gravosa para a estrutura porque, na prática, o colapso de um

elemento estrutural de um sistema estrutural não corresponde necessariamente ao colapso total de todo o sistema. Na prática, poderá ocorrer um dano localizado desse sistema correspondente exclusivamente à perda desse elemento estrutural, mesmo após ter ocorrido uma redistribuição de esforços, ou então, a um colapso estrutural progressivo parcial [29, 30]. Tendo em conta estas considerações, os FS estimados através dos Modelos Estruturais 1, 2 e 3, poderão eventualmente ainda ser superiores em relação aos apresentados na Tabela 5.5, o que representa que a estrutura de madeira do edifício em estudo ainda poderá ter uma capacidade resistente superior.

No contexto de processos de demolição, estes elementos estruturais de madeira antiga poderão, então, ainda apresentar propriedades materiais que justifiquem amplamente a sua reutilização entre outras obras.

5.8. Mapa de pontos críticos

Com os resultados obtidos e descritos anteriormente, é possível perceber que existem zonas dos elementos construtivos de madeira que são mais suscetíveis estruturalmente do que outros. Nas Figuras 5.14, 5.15 e 5.16 apresentam-se os mapas de pontos críticos dos elementos estruturais horizontais, sendo que estes pontos se encontram identificados através de circunferências. Estes pontos estão divididos em dois tipos, o Tipo I que corresponde aos pontos do meio vão e onde os esforços instalados são máximos e condicionantes para a estabilidade do elemento estrutural e o Tipo II que é relativo aos pontos de apoio.

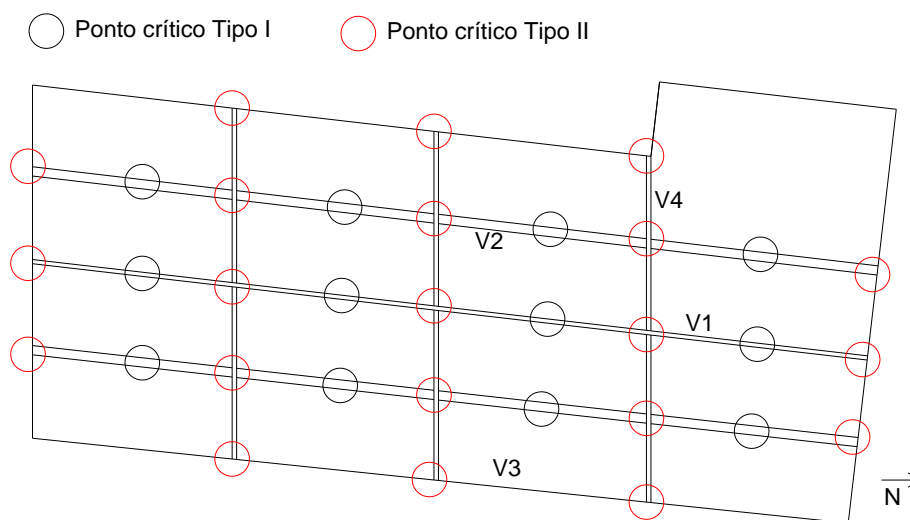


Figura 5.14 – Pontos críticos dos elementos estruturais de madeira da cobertura

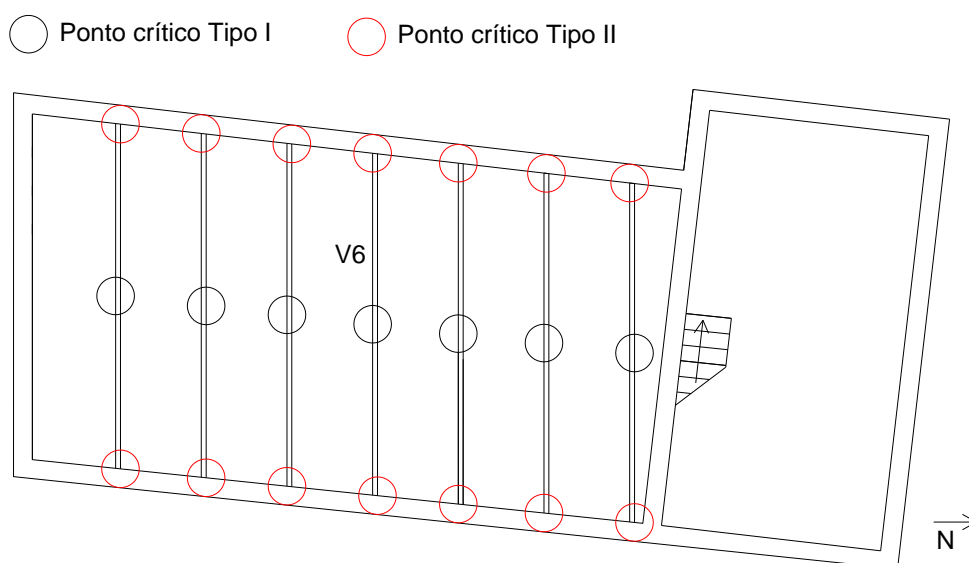


Figura 5.15 – Pontos críticos dos elementos estruturais de madeira do pavimento das águas-furtadas

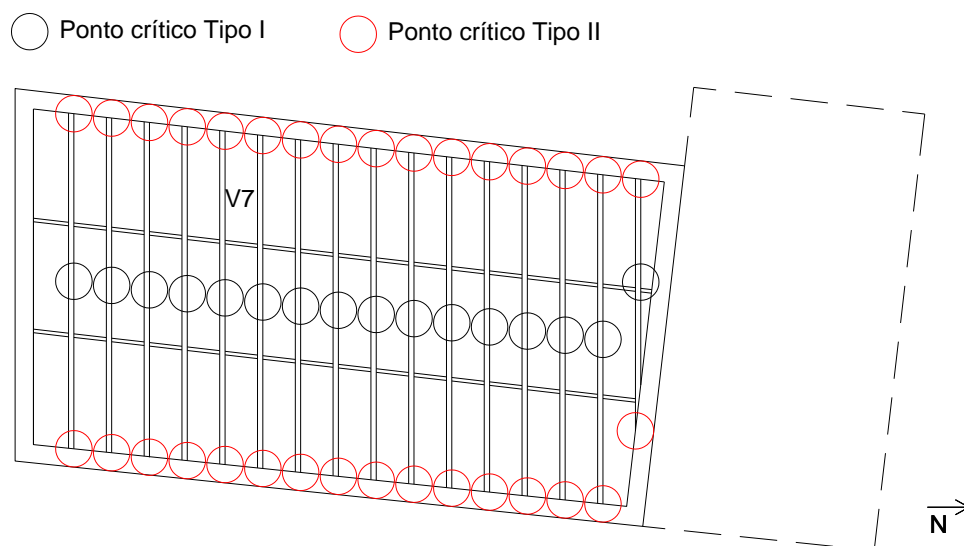


Figura 5.16 – Pontos críticos dos elementos estruturais de madeira do pavimento do rés-do-chão

Tal como foi referido, estes pontos críticos correspondem às zonas em que o valor do momento fletor é mais elevado, que para este tipo de elementos estruturais, ocorre a

meio vão, e aos pontos de apoio dos elementos estruturais, que podem conduzir a uma perda de equilíbrio global ou parcial da estrutura considerada como um corpo rígido.

5.9. Considerações finais

Com este capítulo foi possível concluir que:

- Foram propostos diferentes modelos numéricos capazes de simular a estrutura de madeira de um edifício antigo;
- No caso dos elementos estruturais isolados, aquele que apresenta o maior FS é a madre de cobertura, (FS = 11,19), enquanto que a viga V7 simples, é o elemento estrutural que apresenta o menor FS, (FS = 1,30);
- Em termos de elementos estruturais compostos, a viga V7 com a secção transversal tipo T, é aquele que apresenta o menor FS, (FS = 3,24) e que a viga V6 com secção transversal tipo I é aquele que apresenta o maior FS (FS = 15,03);
- Quando os elementos estruturais são considerados a trabalhar em conjunto então pode existir um acréscimo significativo da capacidade resistente e, que neste caso, foi traduzido pelo aumento do FS;
- O Modelo Estrutural 3 é aquele que apresenta um FS superior devido ao facto de considerar todos os elementos estruturais de madeira que constituem o edifício a trabalhar em conjunto;
- Todos os elementos estruturais de madeira antiga apresentam um FS superior à unidade o que justifica terem estado em serviço até ao momento da demolição do edifício considerado como caso de estudo. Esta informação também permite concluir que provavelmente os elementos estruturais de madeira de edifícios antigos possam cumprir os critérios de verificação da estabilidade prescritos na regulamentação em vigor. A margem de segurança aferida também pode justificar o facto de apesar destes elementos estruturais poderem ser alvo de danos ocorridos durante o respetivo período de vida ainda possam continuar em serviço. Paralelamente, estes resultados também reforçam a ideia de que caso estes elementos estruturais possam ser resíduos de obra resultantes de um processo de demolição, então poderão ser reutilizados como elementos

estruturais ou como material de construção noutras obras podendo haver um interesse económico e de sustentabilidade subjacente;

- Um modelo numérico (Modelo Estrutural 3) de simulação de toda a estrutura de madeira do edifício é proposto. Tendo em conta que o edifício estudado pode ser considerado um edifício tipo de construção tradicional de granito e de tabique, então, o modelo numérico proposto também poderá ser considerado tipo e, por isso, poderá ser utilizado noutros trabalhos de investigação futuros a realizar neste contexto;
- Mapas de incidência dos pontos críticos em termos estruturais dos elementos estruturais horizontais também foram desenvolvidos e propostos neste capítulo.

6. PROPOSTA DE MITIGAÇÃO

6.1. Objetivos

Com este capítulo pretende-se:

- Averiguar se existe alguma correlação entre espécie de madeira, patologia e ponto crítico estrutural e propor mapa de incidência;
- Propor uma escala de grau de gravidade de ataque, de grau de vulnerabilidade e o conceito de mapa de vulnerabilidade;
- Aplicar as propostas ao caso de estudo;
- Propor algumas soluções técnicas construtivas preventivas de forma a minimizar a suscetibilidade de degradação precoce da integridade estrutural de peças de madeira antiga.

6.2. Introdução

Com vista à concretização dos objetivos apresentados anteriormente foi tido em conta toda a informação presente neste trabalho de investigação, em particular, a identificação das espécies de madeira dos elementos estruturais, as patologias identificadas e descritas, e o funcionamento estrutural dos elementos de madeira, nomeadamente, os pontos críticos identificados.

De forma a perceber se existe alguma correlação entre espécie de madeira, tipo de patologia e localização de pontos críticos estruturais, procedeu-se à sobreposição dos mapas de espécies de madeira, de patologias e de pontos críticos. As conclusões a retirar deste processo de análise serão sempre condicionadas pelo facto de se ter apenas baseado numa construção antiga. Embora o edifício usado como caso de estudo neste trabalho de investigação possa ser considerado como referência deste tipo de construção antiga existente no norte do país, a possibilidade de apresentação de conclusões mais rigorosas sobre esta matéria carece do estudo de um maior número de edifícios antigos. Esta possibilidade só poderá ser alcançada através da realização de trabalhos de investigação, análogos ao relativo desenvolvido nesta dissertação de mestrado, a desenvolver futuramente.

Os mapas identificados anteriormente e a sobreposição destes, permitirão identificar zonas vulneráveis da estrutura de madeira do edifício antigo que, por sua vez,

permitirão também obter ilações sobre possíveis procedimentos técnicos capazes de prevenir futura degradação da estrutura de madeira existente. Estas soluções técnicas também poderão ser incorporadas em processos de construção nova que incluam elementos estruturais de madeira nova ou reutilizada. É sempre importante frisar o relevante caráter de sustentabilidade que está intrínseco às estruturas de madeira atendendo a que este tipo de material é local, renovável, natural e reciclável, e não carece de qualquer processo tecnológico de preparação que seja indutor de grandes consumos energéticos, de água ou de grandes teores de emissão de gases poluentes para a atmosfera.

6.3. Proposta de mapa de vulnerabilidade

No sentido de conciliar a informação relativa ao tipo de espécie de madeira, ao tipo de ataque de madeira e localização dos pontos críticos estruturais, pretende-se propor um mapa de vulnerabilidade de estruturas de madeira. Este mapa de vulnerabilidade pretende ser uma ferramenta de auxílio em processos de manutenção e de reabilitação de estruturas de madeira e porque resulta de um processo de inspeção prévio realizado nessa estrutura.

Uma escala de vulnerabilidade composta por três graus de vulnerabilidade é proposta. Esses três graus de vulnerabilidade são: o grau de muito vulnerável, o grau de vulnerável e o grau de pouco vulnerável. Zonas da estrutura classificadas de muito vulnerável deverão ser as zonas prioritárias de intervenções de reabilitação e/ou de reforço. Também deverão ser as zonas de tratamento, a destacar nos processos de manutenção.

Considerou-se que o grau de vulnerabilidade é função da incidência combinada de gravidade de ataque e de ponto crítico. Por sua vez, o grau de gravidade de ataque é considerado como sendo dependente da incidência combinada de tipos de ataque.

De forma a clarificar estas ideias, a Tabela 6.1 apresenta a relação definida entre incidência combinada de tipos de ataque e grau de gravidade de ataque, e a Tabela 6.2 apresenta a relação definida entre incidência combinada de grau de gravidade de ataque e ponto crítico.

Capítulo 6 – Proposta de Mitigação

Tabela 6.1 – Grau de gravidade de ataque

Incidência combinada de tipos de ataque	Grau de gravidade de ataque
Térmitas + Caruncho + Fungos	Muito Gravoso
Térmitas + Caruncho	Muito Gravoso
Térmitas + Fungos	Muito Gravoso
Térmitas	Muito Gravoso
Caruncho + Fungos	Gravoso
Caruncho	Gravoso
Fungos	Apreensivo

Tal como foi referido anteriormente, é sabido que o ataque de térmitas na madeira pode ter um impacto devastador na integridade material e estrutural de um elemento de madeira caso não seja processado um tratamento adequado da madeira atempadamente. Mesmo este aspeto de tratamento poderá estar altamente condicionado porque este tipo de ataque, o qual pode não ser facilmente detetado. Por estes motivos, nos vários cenários possíveis de incidência combinada de tipos de ataque contempladas na Tabela 6.1, foi sempre atribuído o grau de gravidade de ataque muito gravoso.

Por sua vez, o ataque da madeira por caruncho poderá ser mais lento, mais circunscrito e mais detetável. Por isso, nos cenários de incidência combinada de tipos de ataque que contemplem a incidência isolada de ataque de caruncho ou a incidência combinada de ataque de caruncho e de fungos, foi atribuído o grau de gravidade de ataque de gravoso, e tal como apresenta a Tabela 6.1.

Finalmente, para o cenário de incidência isolada de ataque de fungos foi atribuído o grau de gravidade de ataque de apreensivo. Neste caso, não ocorre uma perda de massa ou de secção transversal do elemento atacado por fungos e, por isso, é que foi atribuído este tipo de grau e numa perspetiva de vulnerabilidade estrutural. Contudo, o ataque da madeira por fungos pode provocar uma alteração de material até ser atingido no limite o estado de podridão, o que é deveras nefasto em termos de propriedades mecânicas do material e, implicitamente, em termos estruturais. Simultaneamente, este processo de ataque de fungos poderá ser lento e detetável facilmente, o que permitirá adotar atempadamente medidas de tratamento e de prevenção. A ocorrência deste tipo de ataque também poderá ser indicadora que as condições termohigrométricas, as condições de ventilação do espaço ou os processos de manutenção não têm sido os mais adequados ou os mais eficazes. Paralelamente, estas condições poderão ser favoráveis ao surgimento de outros tipos de ataques subsequentes e mais gravosos. Face ao

Capítulo 6 – Proposta de Mitigação

exposto, está justificada a atribuição do grau de apreensivo ao ataque dos fungos na madeira.

Avaliando a incidência combinada de grau de gravidade de ataque e de ponto crítico estrutural é possível aferir qualitativamente o grau de vulnerabilidade da estrutura de madeira e de acordo com o previsto na Tabela 6.2.

Tabela 6.2 – Grau de vulnerabilidade

Incidência combinada de grau de gravidade de ataque e de ponto crítico estrutural	Grau de vulnerabilidade
Muito gravoso + Ponto crítico estrutural	Muito Vulnerável
Muito gravoso + Ponto não crítico estruturalmente	Muito Vulnerável
Gravoso + Ponto crítico estrutural	Vulnerável
Gravoso + Ponto não crítico estruturalmente	Pouco Vulnerável
Apreensivo + Ponto crítico estrutural	Vulnerável
Apreensivo + Ponto não crítico estruturalmente	Pouco Vulnerável

Tendo em conta o exposto anteriormente é possível perceber o grau de vulnerabilidade atribuído a cada cenário de incidência combinada de grau de gravidade de ataque e de ponto crítico estrutural previsto na Tabela 6.2. Contudo, talvez seja importante justificar a razão pela qual foi atribuído o grau de vulnerabilidade de Muito Vulnerável ao cenário de incidência combinada de grau de gravidade de ataque Muito Gravoso e de Ponto Não Crítico Estruturalmente. Esta atribuição é justificada pelo facto da ocorrência do ataque de térmitas numa zona intermédia do elemento estrutural de madeira poder resultar no aparecimento de uma rótula causada pela diminuição da secção transversal e que seja conducente ao colapso desse elemento estrutural.

De forma a exemplificar a aplicação do conceito de mapa de vulnerabilidade de estruturas de madeira proposto neste trabalho de investigação, a Figura 6.1 mostra um mapa deste tipo de forma genérica. Por sua vez, as secções seguintes deste capítulo irão complementar esta figura e fornecer uma aplicação detalhada.

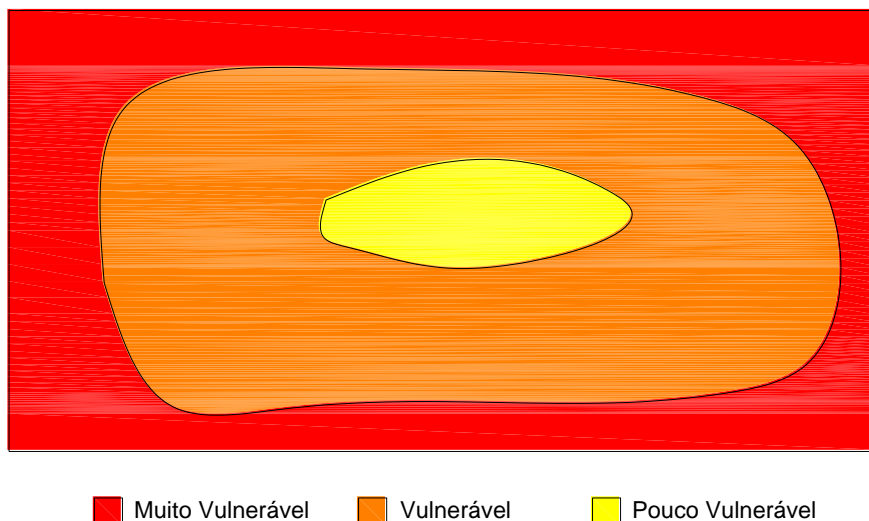


Figura 6.1 – Exemplo de mapa de vulnerabilidade de um pavimento de madeira

6.4. Mapas de vulnerabilidade do caso de estudo

Com toda a informação apresentada anteriormente neste trabalho de investigação é possível fazer uma previsão das zonas que requerem uma maior atenção em possíveis obras de reabilitação. As zonas em que é preciso fazer uma primeira intervenção são as zonas em que os esforços são máximos. Como neste caso os elementos estruturais se apresentavam simplesmente apoiados ou encastrados parcialmente em ambas as extremidades, a zona de maiores esforços é correspondente ao meio vão. Por sua vez, as zonas dos apoios também devem ser consideradas prioritárias para evitar uma perda de equilíbrio global ou parcial da estrutura considerada como um corpo rígido. Este facto ainda é mais relevante tendo em conta os resultados experimentais obtidos. Como se pôde comprovar, os valores da resistência obtidos pelo ensaio do resistógrafo eram mais baixos nas extremidades da viga, ou seja, nas zonas de apoio. Também no ensaio da termografia foi possível verificar uma tonalidade mais clara junto à extremidade direita da viga. E, para complementar ainda mais esta constatação, a zona de rotura da viga, no ensaio de flexão em três pontos, localizou-se precisamente na extremidade direita, mais próximo do apoio da viga.

Com todos estes factos, e sobrepondo os mapas apresentados nos Capítulos 2, 3 e 5, apresentam-se nas Figuras 6.2 a 6.4 os mapas resultantes das sobreposições (designados de mapas de incidências), e numa tentativa de perceber se existe uma relação entre a espécie de madeira, o tipo de patologia e a localização do ponto crítico estrutural.

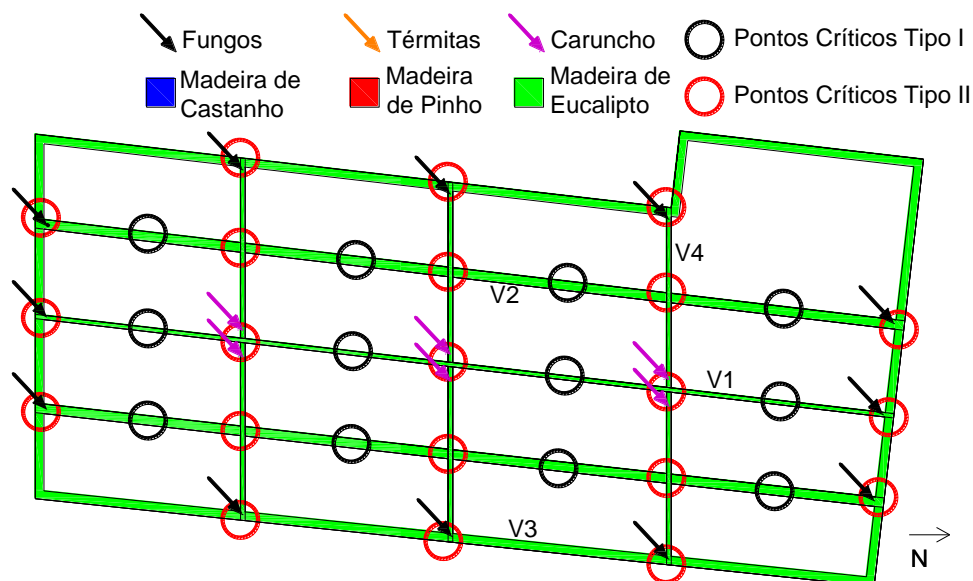


Figura 6.2 – Mapa de incidências da estrutura da cobertura

O mapa de incidências da estrutura da cobertura mostra uma tendência acentuada de ocorrência de ataque isolado de fungos (grau de gravidade de ataque classificado de apreensivo) nas zonas de apoio dos elementos estruturais de madeira antiga da cobertura (pontos críticos estruturais) e também uma tendência acentuada de ocorrência de ataque isolado de caruncho (grau de gravidade de ataque classificado de gravoso) na zona de meio vão (pontos críticos estruturais) de alguns elementos estruturais localizados na parte central da estrutura.

Por simplificação a identificação do tipo de ataque ocorrido nas tábuas de soalho e nas tábuas de forro não foi incluída nos mapas de incidências expostos de seguida. Tal como foi apresentado no Capítulo 3, mais precisamente na Figura 3.4.a, as tábuas de soalho apresentavam sinais de ataque isolado de caruncho na zona de ligação entre as tábuas.

No respeitante ao pavimento de madeira do piso das águas-furtadas e tendo em consideração a informação disponibilizada no respetivo mapa de incidências, Figura 6.3, é possível observar que as vigas V6 que foram os únicos elementos estruturais deste pavimento identificados como estando sujeitos ao ataque isolado de caruncho (grau de gravidade de ataque classificado de Gravoso e segundo a Tabela 6.1) nas zonas dos apoios, pontos críticos estruturais do tipo II.

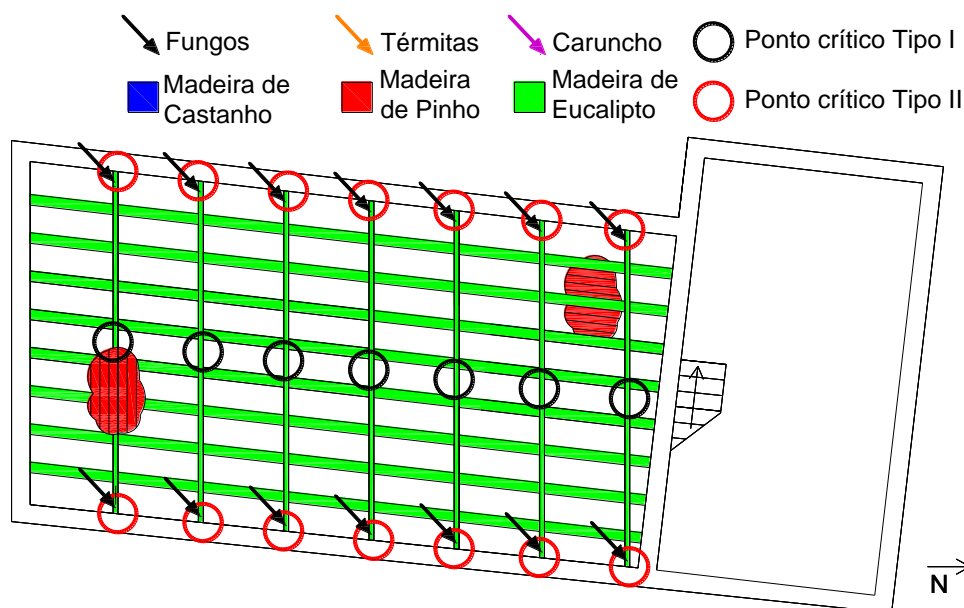


Figura 6.3 – Mapa de incidências do pavimento do piso das águas-furtadas

Através do mapa de incidências do pavimento do piso do rés-do-chão (Figura 6.4), observa-se que as vigas V7 (simples e reforçadas) deste pavimento de madeira mostravam sinais de ataque isolado de térmitas (grau de gravidade de ataque classificado de Muito Gravoso, Tabela 6.1) na zona do meio vão (ponto crítico estrutural do tipo I), e que esta informação permite concluir que a zona central deste pavimento possa ser considerada de Muito Vulnerável, Tabela 6.2. Por sua vez, estas mesmas vigas também mostravam sinais de ataque isolado de fungos (grau de gravidade de ataque classificado de Apreensivo e segundo a Tabela 6.1) na zona dos apoios (ponto crítico estrutural do tipo II). Esta informação permite avaliar a zona limítrofe do pavimento de madeira do piso do rés-do-chão, referente à zona de apoio deste pavimento nas paredes de alvenaria de pedra de granito enterradas, de Vulnerável, Tabela 6.2.

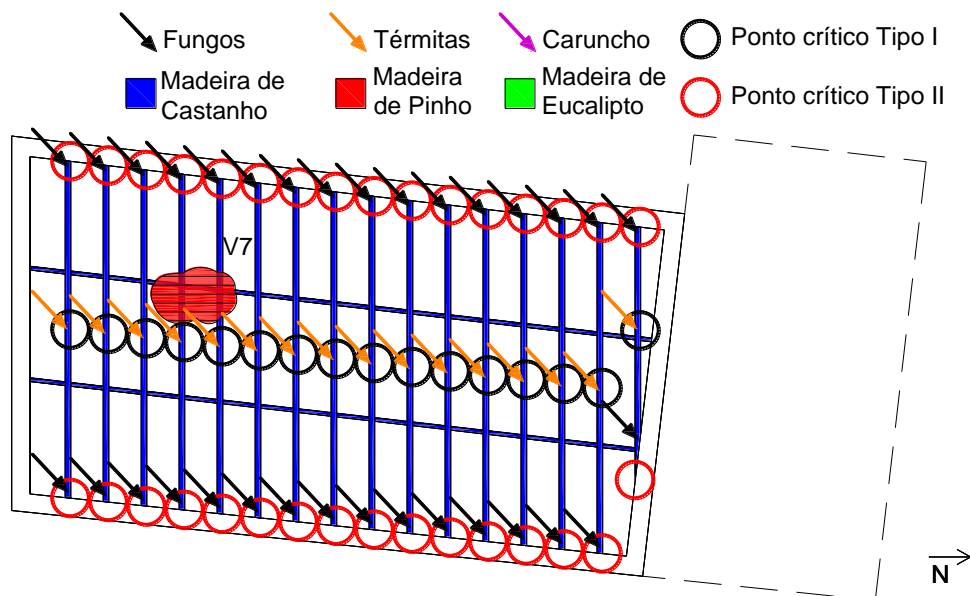


Figura 6.4 – Mapa de incidências do pavimento do piso do rés-do-chão

Face ao exposto e de acordo com o processo de avaliação do grau de vulnerabilidade previsto na Tabela 6.2 é possível obter os mapas de vulnerabilidades de cada piso estrutural do edifício usado como caso de estudo, Figuras 6.5 a 6.7.

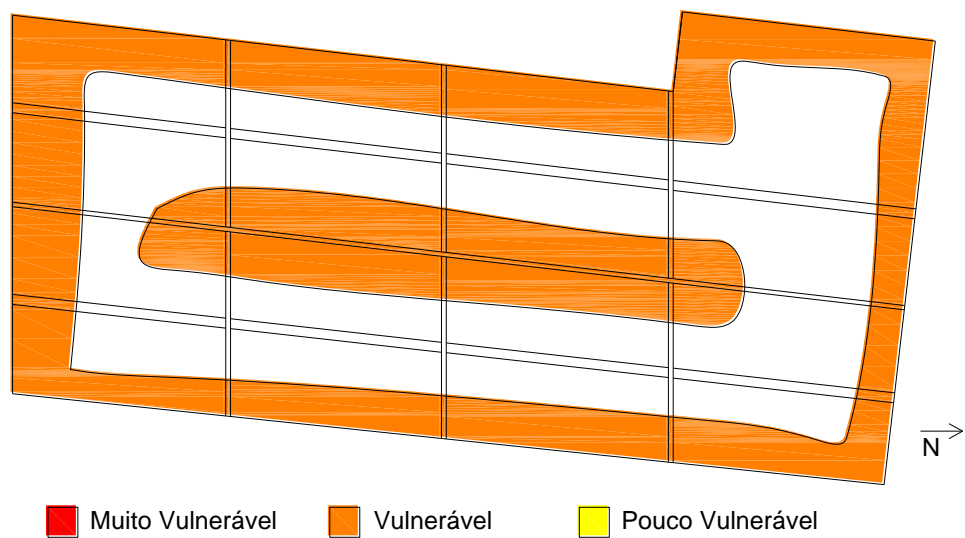


Figura 6.5 – Mapa de vulnerabilidade da estrutura da cobertura do edifício

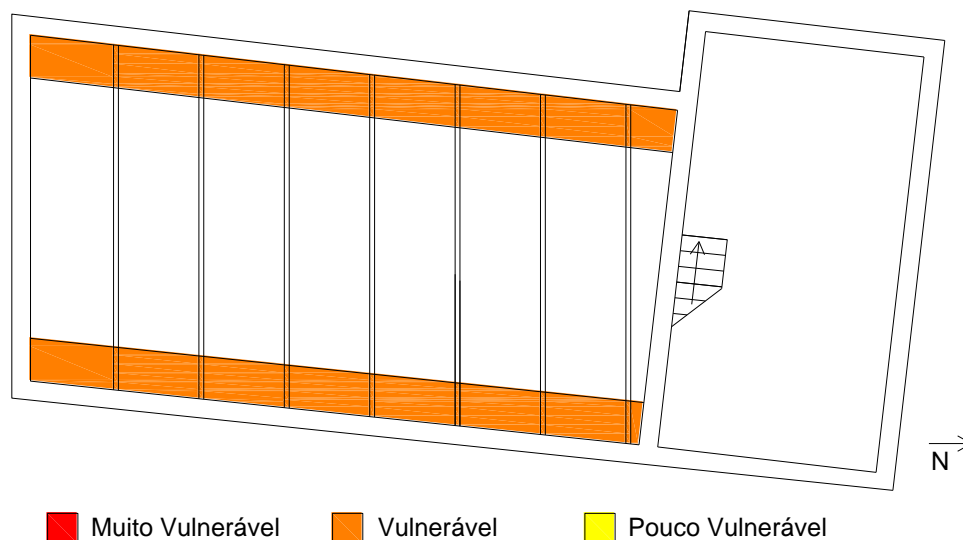


Figura 6.6 – Mapa de vulnerabilidade do pavimento do piso das águas-furtadas

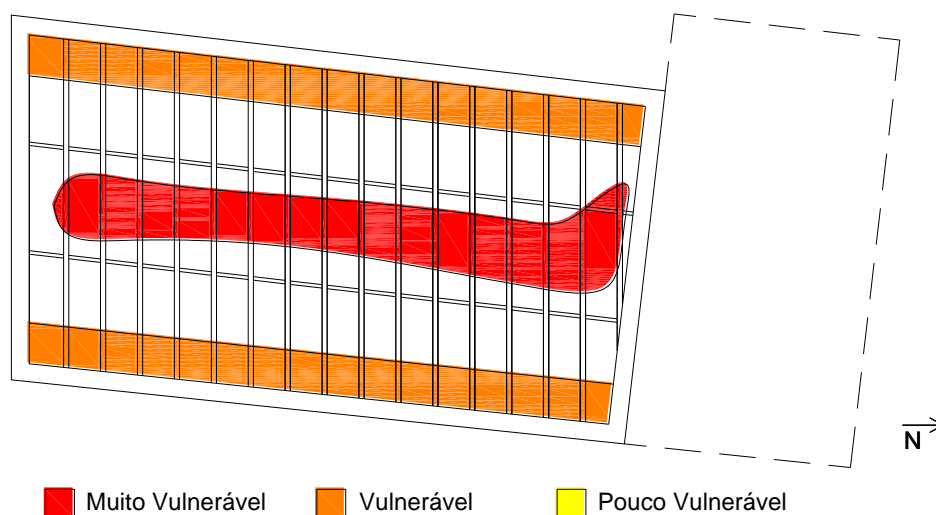


Figura 6.7 – Mapa de vulnerabilidade do pavimento de madeira do rés-do-chão

Por sua vez, os mapas de incidências apresentados anteriormente também permitem lembrar que neste caso de estudo a madeira de eucalipto foi aquela mais aplicada em obra porque foi utilizada na estrutura da cobertura e na estrutura do pavimento do piso das águas-furtadas. Seguidamente, a madeira de castanho também tem um papel importante, porque a estrutura do pavimento do piso do rés-do-chão foi essencialmente construída com esta madeira. A madeira de pinho foi utilizada na construção do forro do piso do rés-do-chão e no soalho dos pavimentos das águas-furtadas e do rés-do-chão. Face aos tipos de ataque identificados nos mapas de incidências apresentados

anteriormente facilmente se percebe que todos estes tipos de espécie de madeira são suscetíveis ao ataque de fungos, a madeira de eucalipto também é suscetível ao ataque de caruncho e que a madeira de castanho também é suscetível ao ataque das térmitas. Esta conclusão é exclusivamente assente no resultado da inspeção efetuada ao edifício usado como caso de estudo e, o mais certo, é que todas as espécies de madeira sejam suscetíveis a todos estes tipos de ataques.

Outro aspeto técnico que pode suscitar algum interesse é saber porque é que neste edifício se aplicou a madeira de eucalipto nos elementos estruturais dos pisos superiores e se aplicou apenas a madeira de castanho no pavimento do piso do rés-do-chão, que é aquele que se encontra livre (sem apoios intermédios) e num compartimento muito suscetível ao ataque dos agentes xilófagos (insetos e térmitas).

6.5. Propostas de procedimentos técnicos conducentes à mitigação

Com este subcapítulo pretende-se apresentar uma espécie de manual de boas práticas de mitigação composto por um conjunto de procedimentos técnicos simples de adotar em processos de manutenção e que possam evitar ou retardar o aparecimento de patologias nos elementos estruturais de madeira.

Relativamente aos elementos constituintes da estrutura de madeira da cobertura e podendo estes ser em muito afetados pela ocorrência de anomalias nas telhas cerâmicas de revestimento exterior é aconselhável proceder a uma inspeção regular (com periodicidade anual a ocorrer no verão) de modo a localizar telhas partidas e a substituí-las por novas, a limpar caleiras e a desobstruir tubos de queda. Quando possível, seria desejável proceder a uma impermeabilização complementar através da aplicação de uma sub-telha e à aplicação de uma proteção térmica de modo a que os elementos estruturais de madeira da cobertura possam estar mais protegidos e a promover um ambiente mais acolhedor no interior do compartimento das águas-furtadas. No entanto, este acréscimo de qualidade não pode descurar a ventilação natural necessária dos elementos de madeira da cobertura e também não pode aumentar de forma significativa a carga permanente a que estes elementos irão estar sujeitos, a qual poderá interferir na sua estabilidade estrutural quando esta passa a ser excedida.

Capítulo 6 – Proposta de Mitigação

Ainda ao nível da cobertura, é necessário ter em atenção o sistema de drenagem de águas pluviais. Geralmente, em edifícios antigos deste género, as caleiras de drenagem estão localizadas no tardo das paredes de alvenaria de granito, o que torna difícil proceder à sua manutenção. Qualquer obstrução destes elementos pode causar a entrada de água no interior do edifício e, conseqüentemente, aumentar o teor de humidade dos elementos de madeira e criar condições higrométricas propícias ao ataque dos agentes xilófagos.

O sistema de drenagem de águas pluviais não deve ser tido em conta apenas ao nível da cobertura, mas também deve-se verificar o local onde os tubos de queda descarregam. Neste tipo de edifício não é usual ver-se a presença de caixas de areia (ou similar), e sistemas de drenagem da água pluvial para longe do perímetro do edifício. Se existirem paredes enterradas, como acontece no edifício de caso de estudo, a água das chuvas pode saturar o solo envolvente, que por sua vez humidificam as paredes enterradas que podem passar essa humidade para o interior do edifício e, logo, para os elementos de madeira aí existentes.

Existem outras soluções alternativas de impermeabilização de paredes de alvenaria de pedra tais como, a impermeabilização superficial do terreno, colocação de um dreno no tardo da parede e impermeabilização do pano exterior da parede, rebaixamento do nível freático, entre outras soluções.

A ventilação dos compartimentos também não pode ser descurada. Os compartimentos onde estão presentes elementos de madeira necessitam de ter uma boa ventilação de modo a evitar níveis elevados de teor de humidade relativa do compartimento. Para tal, podem adotar-se aberturas posicionadas adequadamente (ventilação natural), ou a adoção de sistemas de ventilação, quer sejam sistemas naturais (por introdução de condutas) quer sejam sistemas forçados (recorrendo a aparelhos mecânicos).

A inspeção visual é a primeira ação a tomar num processo de manutenção deste tipo de elementos. Por isso, é importante ter cuidado com o risco de obstrução dos compartimentos. Principalmente, naqueles destinados a arrumos e de modo a facilitar o acesso e a permitir inspeção visual regular. Outros compartimentos sensíveis à propagação de patologias são os locais destinados ao armazenamento de lenha. Esta lenha pode estar contaminada com agentes biológicos que se podem facilmente

Capítulo 6 – Proposta de Mitigação

propagar aos elementos estruturais de madeira do edifício em questão. Este tipo de produto deverá ser armazenado em locais afastados e exteriores ao edifício. Um simples móvel contaminado poderá ser causador de um ataque xilófago dos distintos elementos de madeira do edifício.

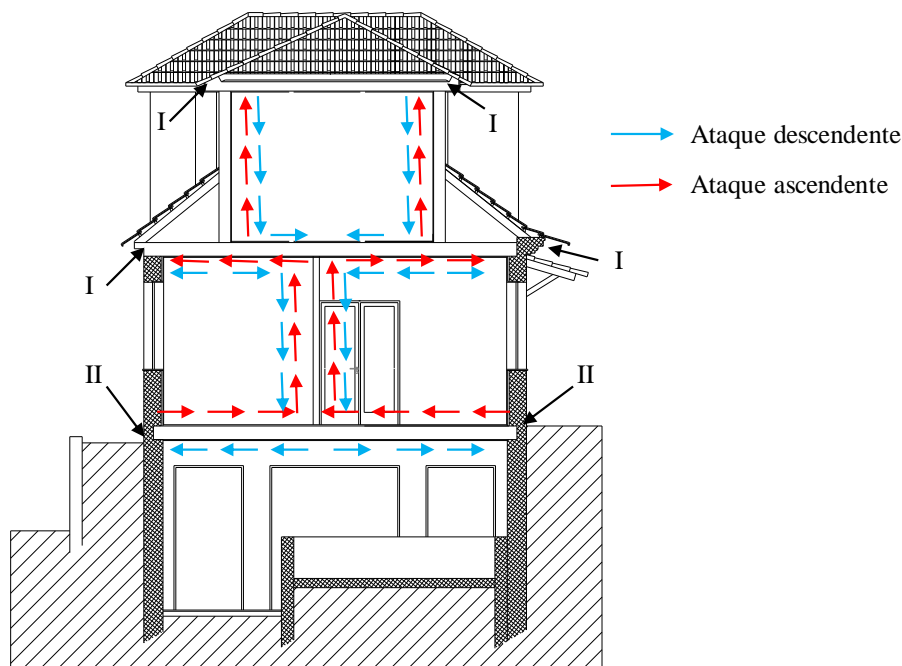
Também se deve ter em atenção a eventual proliferação de plantas junto aos elementos de madeira, ou mesmo até à formação de ninhos de pássaros juntos destes. Estes elementos são também uma fonte de transmissão de agentes biológicos e, consequentemente, potenciar o aparecimento de patologias.

Quando se detetarem zonas das peças de madeira infestadas, deve proceder-se a um tratamento adequado. Num cenário de reabilitação, essas zonas podem ser substituídas parcialmente ou totalmente por outras peças de madeira novas que estejam devidamente tratadas. Nesta fase, deve-se optar por uma espécie de madeira que seja menos suscetível a agentes biológicos.

Estes procedimentos técnicos propostos só podem ser postos em prática se existirem processos de manutenção regulares, sendo aconselhável uma periodicidade anual para estes processos. Estes processos de manutenção só serão possíveis se, para os vários elementos a verificar, forem previstos adequados mecanismos de acessibilidade. Zonas críticas de acessibilidade de um edifício antigo podem ser os sótãos e as caves.

De forma a complementar esta reflexão, na Figura 6.8 é apresentado esquematicamente um possível processo de transmissão de ataque entre elementos de madeira. Para o efeito, usou-se um corte transversal do edifício em estudo como base de trabalho.

Como se pode observar na Figura 6.8, podem existir dois sentidos preferenciais de transmissão. A origem do ataque pode ocorrer ao nível da cobertura (zona I, Figura 6.8) e propagar-se descendentemente pelas paredes de tabique até atingir os elementos de madeira existentes ao nível do rés-do-chão. Todavia, este processo pode ocorrer de maneira inversa, ou seja, a origem do ataque pode ocorrer nos elementos de madeira localizados ao nível do rés-do-chão (zona II, Figura 6.8) e progredirem ascendentemente até atingir a zona de cobertura.



Legenda: I – Zona de aparecimento de patologias na cobertura; II – Zona de aparecimento de patologias no rés-do-chão

Figura 6.8 – Um possível processo de transmissão de ataque xilófago do tipo insetos

De seguida, Figura 6.9, é apresentada uma possível solução técnica de mecanismo de prevenção de contaminação inter-edifício e que é designado de mecanismo de corte.

Pode observar-se na Figura 6.9 que as zonas a intervir correspondem aos topos das paredes de tabique. Se estas zonas forem tratadas de modo a impedir a transmissão da contaminação inter-edifício, então poderão ser criadas as condições adequadas de prevenção de contaminação entre pisos, sendo deste modo possível circunscrever a zona afetada e facilitar o processo de tratamento.

O tratamento destas zonas de corte pode consistir na injeção ou na impregnação de materiais tóxicos de longa duração. Trabalhos de investigação recentemente desenvolvidos no âmbito da construção de tabique existente na região de Trás-os-Montes e Alto Douro [11, 31], têm chegado à conclusão que o revestimento e o enchimento tradicional de paredes de tabique à base de terra argilosa simples ou à base de uma argamassa terrosa bastarda tem demonstrado ser uma solução de proteção ideal da estrutura de madeira de paredes de tabique, permitindo de uma forma impressionante aumentar a durabilidade destes elementos de madeira que apresentavam geralmente um estado de conservação muito bom. Contudo, os topos das tábuas verticais de madeira

Capítulo 6 – Proposta de Mitigação

não estão protegidos por estes tipos de materiais de revestimento e, poderão por isso, serem zonas suscetíveis de ataque e de transmissão. Esses topos são precisamente correspondentes às zonas de ligação entre as paredes de tabique e os pavimentos de madeira.

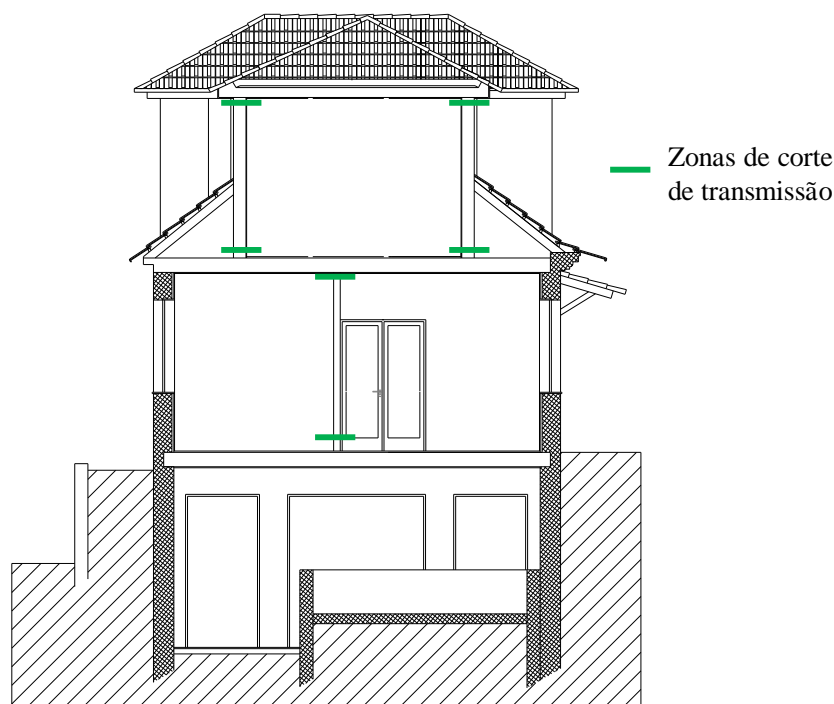


Figura 6.9 – Proposta de mecanismo de corte de transmissão

Paralelamente, outros pavimentos localizados em diferentes pisos são as escadas de madeira interior características dos edifícios antigos de alvenaria de pedra de granito e de tabique. Estes elementos estruturais de madeira poderão também ser veículo de transmissão de ataque de agentes xilófagos do tipo insetos. Claro, que no caso de insetos voadores (tal como as térmitas num determinado período do seu ciclo de vida) esta transmissão poderá ser mais facilitada e o proposto anteriormente perde eficácia.

No contexto Português e no período áureo da construção deste tipo de edifícios existiam outros tipos de espécie de madeira que também eram utilizados frequentemente. No sentido de avaliar o impacto da espécie de madeira na capacidade resistente da estrutura global de madeira do edifício em estudo foram considerados vários cenários de aplicação diferenciada de espécies de madeira. As espécies de madeira contempladas neste estudo são o castanho, o carvalho, o eucalipto, a macieira e o pinho. Consideraram-se seis cenários de obra distintos. Os cenários de 1 a 5, preveem que

Capítulo 6 – Proposta de Mitigação

todos os elementos de madeira são de castanho, de carvalho, de eucalipto, de macieira e de pinho, respetivamente. Por sua vez, o cenário 6 prevê elementos estruturais horizontais de eucalipto e a estrutura de madeira das paredes de tabique (paredes divisórias) de madeira de pinho. Este último cenário foi selecionado de modo a ter em conta a relação entre boa capacidade resistente e baixa densidade.

O módulo de elasticidade (E) e a densidade de cada uma das espécies de madeira considerada estão apresentados na Tabela 6.3.

Tabela 6.3 – Módulo de elasticidade (E) e densidade das espécies consideradas [32]

Espécie de Madeira	E (GPa)	Densidade (kg/m ³)
Castanho (<i>Castanea dentata</i>)	8,53	454
Carvalho (<i>Quercus velutina</i>)	11,31	669
Eucalipto (<i>Eucalyptus marginata</i>)	14,34	787
Macieira (<i>Pyrus malus</i>)	8,81	745
Pinho (<i>Pinus strobus</i>)	8,77	373

Neste estudo, foi utilizado o Modelo Estrutural 3 apresentado no Capítulo 5 e a ação regulamentar. Desta análise, resultam as deformadas máximas e os momentos fletores máximos apresentados na Tabela 6.4.

Tabela 6.4 – Resultados dos cenários considerados

Cenário	1	2	3	4	5	6
Deformada máxima (mm)	3,13	2,47	1,95	3,12	2,86	2,08
Momento fletor máximo (kNm)	2,33	2,47	2,54	2,51	2,28	2,51

Na Tabela 6.4 verifica-se que não existe uma variabilidade significativa em termos de comportamento estrutural da estrutura de madeira em função da espécie adotada.

De forma análoga ao processado no Capítulo 5 também se estimou o FS associado a cada cenário de espécie de madeira. Os resultados obtidos estão apresentados sob a forma de gráfico de barras na Figura 6.10.

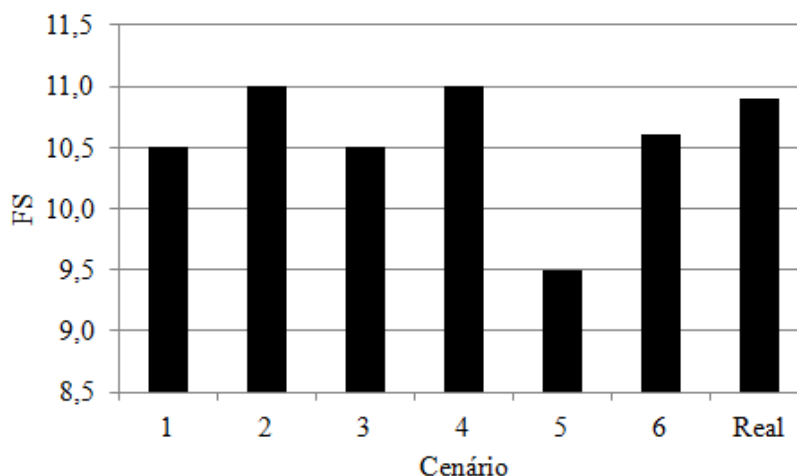


Figura 6.10 – FS para os vários cenários de espécie de madeira considerados

Os diferentes cenários de obra estudados são conducentes a um FS sensivelmente análogo (valores compreendidos entre 10,5 e 11,0). Apenas é exceção a esta realidade o cenário de obra que prevê a utilização de madeira de pinho e cujo respetivo FS estimado foi de cerca de 9,5.

Dentro dos cenários previstos, os cenários 2 e 4 (carvalho e macieira) foram aqueles que permitiram alcançar o maior FS (11). O cenário existente em obra (cenário real) também é conducente a um FS próximo de 11.

Tal como foi referido anteriormente, verifica-se que uma estrutura de madeira antiga pode estar sobredimensionada e face à regulamentação. Tendo em conta esta informação, talvez também possa ser afirmado, e baseado nos resultados alcançados, que a aplicação de uma madeira de qualidade inferior ou de uma madeira de espécie considerada menos adequada em termos de material de construção estrutural, possam ser soluções construtivas de interesse.

6.6. Manual de Mitigação

Com base na informação disponibilizada ao longo deste capítulo, apresenta-se seguidamente uma proposta de um manual de mitigação de ataque de agentes xilófagos. Este manual pretende ser um documento simples e de forma a agilizar e a facilitar a sua aplicação pelos utilizadores de edifícios antigos, e de forma a alertar para práticas importantes a realizar nos processos de manutenção regulares deste tipo de edifícios. Este manual de mitigação está apresentado na Figura 6.11.

Capítulo 6 – Proposta de Mitigação












Cobertura	
Verificar o estado de conservação das telhas e proceder a substituição quando necessário	
Verificar o estado de conservação dos materiais de isolamento térmico e de impermeabilização	
Verificar o estado das caleiras e dos beirais e limpar regularmente	
Aferir se existe uma ventilação natural adequada dos compartimentos	
Rés-do-chão	
Verificar a existência de um sistema adequado de escoamento de águas pluviais (caixas de areia) e proceder a limpeza regular	
Garantir que o solo subjacente ao edifício está devidamente impermeabilizado	
Assegurar um sistema de ventilação natural adequado dos compartimentos	
Semicave	
Perceber se existe impermeabilização adequada das paredes enterradas e avaliar o estado de conservação	
Garantir uma adequada acessibilidade aos compartimentos e evitar a obstrução destes	
Evitar o armazenamento de lenha infestada	
Assegurar uma ventilação adequada dos compartimentos	

Figura 6.11 – Manual de Mitigação

6.7. Considerações finais

Com este capítulo foi possível:

- Concluir que no edifício de caso de estudo, o facto de se ter verificado a existência de patologias em elementos de madeira de uma determinada espécie de madeira específica, poderá indicar que possivelmente existem espécies de madeira mais suscetíveis a efeitos patológicos do que outras;
- Propor uma escala de grau de gravidade de ataque, escala esta dividida em três graus, muito gravoso (Térmitas + Caruncho + Fungos, Térmitas + Caruncho, Térmitas + Fungos e Térmitas), gravoso (Caruncho + Térmitas e Caruncho) e apreensivo (Fungos);

Capítulo 6 – Proposta de Mitigação

- Apresentar mapas de incidências para cada elemento estrutural horizontal (cobertura e pavimentos), resultante da sobreposição dos mapas de espécie de madeira, dos mapas de patologias e dos mapas de pontos críticos;
- Apresentar uma escala de vulnerabilidade dividida em muito vulnerável (Muito gravoso + Ponto crítico estrutural e Muito gravoso + Ponto não crítico estruturalmente), vulnerável (Gravoso + Ponto crítico estrutural e Apreensivo + Ponto crítico estrutural) e pouco vulnerável (Gravoso + Ponto não crítico estruturalmente e Apreensivo + Ponto não crítico estruturalmente);
- Perceber que no caso de estudo existem zonas de vulnerabilidade consideradas como vulneráveis e muito vulneráveis;
- Concluir que as patologias resultantes do ataque de agentes xilófagos se podem progredir progressivamente atendendo a que é possível haver uma transmissão destes agentes entre pisos;
- Verificar que não parece existir uma vantagem expressiva em se considerar todos os elementos estruturais de uma espécie de madeira específica e porque os FS obtidos para cada espécie foram muito próximos, entre si. Este facto pode ser justificado pelos esforços não dependerem intrinsecamente das características da madeira;
- Propor um manual de mitigação que contempla um conjunto de regras básicas que podem ser levadas a cabo regularmente (pelo menos anualmente) pelos proprietários ou pelos inquilinos de edifícios antigos similares ao estudado neste trabalho de investigação.

7. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

7.1. Conclusões

Através deste trabalho de investigação foi possível constatar que os edifícios de habitação unifamiliar tradicionais são essencialmente concebidos em paredes exteriores de alvenaria de pedra natural (usualmente granito ou xisto) e em elementos estruturais interiores de madeira. Os elementos construtivos de madeira podem ser madres, ripas, treliças ou asnas, barrotes, vigas, tábuas de soalho, tábuas de forro, a estrutura das paredes interiores divisórias, entre outros. A arquitetura associada a este tipo de edifícios usualmente é simples. No caso de estudo está prevista uma semicave ampla para arrumos, e o rés-do-chão e as águas-furtadas destinadas à habitação. Os compartimentos são relativamente pequenos em termos de área e simples em termos de forma.

Os elementos estruturais de madeira do edifício estudado apresentavam uma disposição reticulada regular, dispostos sensivelmente ortogonalmente entre si e igualmente afastados entre si.

As espécies de madeira dos vários elementos estruturais e construtivos de madeira existentes no edifício foram identificadas experimentalmente, concluindo-se que essas espécies são a madeira de eucalipto (na estrutura da cobertura e nos elementos estruturais do pavimento das águas-furtadas), a madeira de pinho bravo (nas tábuas de soalho e de forro) e a madeira de castanho (na estrutura do pavimento do rés-do-chão).

Durante as visitas realizadas ao edifício de caso de estudo foi possível proceder a um levantamento das patologias visíveis à vista desarmada dos elementos estruturais de madeira. As principais patologias identificadas em obra foram degradação do material devido a fungos, às térmicas e ao caruncho.

De modo a complementar os resultados obtidos em obra, dois ensaios não destrutivos (o ensaio do resistógrafo e o ensaio da termografia) também foram realizados a uma amostra de viga de madeira real do edifício. Com estes dois ensaios foi possível constatar que este elemento não apresentava um estado patológico acentuado e que pudesse pôr em causa a sua estabilidade e a estabilidade do edifício. Concluiu-se ainda que é benéfico realizar o ensaio de termografia logo após a peça de madeira ter sido pré-aquecida naturalmente. Verificou-se que o ensaio do resistógrafo apesar de ser expedito

Capítulo 7 – Conclusões e Trabalhos Futuros

e simples de realizar é dependente de alguns fatores tais como, a relação entre a direção das fibras e a direção de penetração da agulha, e a forma da secção transversal da peça de madeira a ensaiar.

Após a realização destes dois ensaios foi possível verificar que estes podem apresentar uma certa correlação embora com algumas limitações.

Tendo em conta os resultados obtidos em ambos os ensaios, é possível afirmar que a viga de madeira ensaiada não parece apresentar um estado patológico acentuado.

Através da realização do ensaio à flexão em três pontos a uma viga V7 reforçada do edifício, verificou-se que esta atingiu a rotura à flexão para uma carga de aproximadamente 70 kN. A rotura da viga ocorreu numa das extremidades, e contrariamente ao que seria expectável porque em vigas simplesmente apoiadas o momento fletor máximo ocorre a meio vão. Também foi possível perceber que as vigas de madeira antiga deste tipo apresentam uma rotura do tipo dúctil. No decorrer deste ensaio houve a formação de uma rótula plástica a meio vão, tendo ocorrido a transição do comportamento elástico para o comportamento plástico. A deformada máxima verificada na viga V7 reforçada foi de aproximadamente 115 mm.

Foram propostos diferentes modelos numéricos capazes de simular a estrutura de madeira de um edifício antigo, sendo que foram considerados modelos de complexidade crescente.

No caso dos elementos estruturais isolados, aquele que apresenta o maior FS é a madre de cobertura, (FS = 11,19), enquanto que a viga V7 simples, é o elemento estrutural que apresenta o menor FS, (FS = 1,30). Por outro lado dos elementos estruturais compostos, a viga V7 com a secção transversal tipo T, é aquele que apresenta o menor FS, (FS = 3,24) e a viga V6 com secção transversal tipo I é aquele que apresenta o maior FS (FS = 15,03).

Quando os elementos estruturais são considerados em conjunto existe um acréscimo significativo da capacidade resistente traduzido pelo aumento do FS.

Foi proposto um modelo numérico de simulação de toda a estrutura de madeira do edifício. Tendo em conta que o edifício estudado pode ser considerado um edifício tipo

Capítulo 7 – Conclusões e Trabalhos Futuros

de construção tradicional de granito e de tabique, então, o modelo numérico proposto também poderá ser considerado tipo e, por isso, poderá ser utilizado noutros trabalhos de investigação a reutilizar neste contexto. Este modelo é aquele que apresenta um FS superior, com um valor de 10,90.

Todos os elementos estruturais de madeira antiga apresentam um FS superior à unidade o que justifica terem estado em serviço até ao momento da demolição do edifício considerado como caso de estudo. Esta informação também permite concluir que provavelmente os elementos estruturais de madeira de edifícios antigos possam cumprir os critérios de verificação da estabilidade prescritos na regulamentação em vigor. A margem de segurança aferida também pode justificar o facto de apesar destes elementos estruturais poderem ser alvo de danos ocorridos durante o respetivo período de vida ainda possam continuar em serviço. Paralelamente, estes resultados também reforçam a ideia de que caso estes elementos estruturais possam ser resíduos de obra resultantes de um processo de demolição, então poderão ser reutilizados como elementos estruturais ou como material de construção noutras obras podendo haver um interesse económico e de sustentabilidade subjacente.

Tendo em conta os resultados obtidos pela análise analítica e numérica foram propostos mapas de incidência dos pontos críticos em termos estruturais dos elementos estruturais horizontais.

No edifício de caso de estudo, o facto de se ter verificado a existência de patologias em elementos de madeira de uma determinada espécie de madeira específica, poderá indicar que possivelmente existem espécies de madeira mais suscetíveis a efeitos patológicos do que outras.

Com base nas patologias identificadas foi possível propor uma escala de grau de gravidade de ataque, escala esta dividida em três graus, muito gravoso (Térmitas + Caruncho + Fungos, Térmitas + Caruncho, Térmitas + Fungos e Térmitas), gravoso (Caruncho + Térmitas e Caruncho) e apreensivo (Fungos).

Através da sobreposição dos mapas de espécie de madeira, mapas de patologias e mapas de pontos críticos foram desenvolvidos mapas de incidências para cada elemento estrutural horizontal (cobertura e pavimentos).

Capítulo 7 – Conclusões e Trabalhos Futuros

Considerando a influência conjunta da escala de gravidade com os mapas de incidências, foi ainda proposta uma escala de vulnerabilidade, dividida em muito vulnerável (Muito gravoso + Ponto crítico estrutural e Muito gravoso + Ponto não crítico estruturalmente), vulnerável (Gravoso + Ponto crítico estrutural e Apreensivo + Ponto crítico estrutural) e pouco vulnerável (Gravoso + Ponto não crítico estruturalmente e Apreensivo + Ponto não crítico estruturalmente). Aplicando esta escala ao caso de estudo percebeu-se que existem zonas de vulnerabilidade consideradas como vulneráveis e muito vulneráveis.

As patologias resultantes do ataque de agentes xilófagos podem-se progredir progressivamente atendendo a que é possível haver uma transmissão destes agentes entre pisos.

Finalmente foi feita uma proposta de um manual de mitigação que contempla um conjunto de regras básicas que podem ser levadas a cabo regularmente (anualmente) pelos proprietários de edifícios antigos similares ao estudado neste trabalho de investigação.

7.2. Trabalhos Futuros

Tendo em conta o exposto ao longo desta Dissertação de Mestrado, torna-se importante desenvolver trabalhos de investigação adicionais nesta área de modo a ser possível afirmar de uma forma mais consistente se existe viabilidade de reutilização de elementos estruturais de madeira antiga em outras obras.

Poderá ser importante adotar a metodologia de trabalho proposta neste trabalho de investigação, mas tendo por base uma amostragem mais representativa.

Outro estudo que parece ser pertinente realizar futuramente é o relativo à avaliação do impacto de sustentabilidade associado à solução construtiva de reutilização de elementos de madeira antiga em detrimento da aplicação de materiais estruturais correntes (betão, aço, madeira ou glulam nova), bem como o estudo de viabilidade económica destas soluções.

Capítulo 7 – Conclusões e Trabalhos Futuros

Também será importante desenvolver trabalhos de investigação focados no estado de técnicas de restauro e/ou reforço de elementos estruturais de madeira de edifícios antigos, e da ligação destes às paredes de alvenaria de pedra.

O aperfeiçoamento do modelo numérico proposto para simular toda a estrutura de madeira do edifício de forma integrada também poderá ser um importante contributo neste contexto. A modelação numérica das ligações pregadas entre elementos de madeira, em particular, da ligação das paredes de tabique aos pavimentos de madeira, será prioritária.

De forma a poder validar este modelo numérico também será requerido a realização de ensaios que poderão decorrer em laboratório (através do recurso de modelos) ou em obra (através de ensaios de carga).

BIBLIOGRAFIA

- [1] J. Mascarenhas, *Sistemas de Construção. III - Paredes (2ª parte) e Materiais Básicos (1ª parte)*, Lisboa: Livros Horizonte, 2010.
- [2] H. Wallbaum, Y. Ostermeyer, C. Salzer e E. Z. Escamilla, “Indicator based sustainability assessment tool for affordable housing,” em *Ecological Indicators*, Elsevier, pp. 353-364, 2012.
- [3] M. Arman, J. Zuo, L. Wilson, G. Zillante e S. Pullen, “Challenges of responding to sustainability with implications for affordable housing,” em *Ecological Economics*, Elsevier, pp. 3034–3041, 2009.
- [4] T. F. Martins, *Dimensionamento de Estruturas em Madeira - Coberturas e Pavimentos*, Lisboa: IST, 2010.
- [5] L. E. Marques, *O Papel da Madeira na Sustentabilidade da Construção*, Porto: FEUP, 2008.
- [6] L. Morgado, J. B. Pedro, H. Cruz e P. Pontífice, *Projeto e Construção de Casas de Madeira em Portugal*, Lisboa: LNEC, 2012.
- [7] L. Bragança, “Sustainability of Constructions: Integrated approach to life-time structural engineering,” em *Sustainable Construction*, Malta, 2010.
- [8] “Google Earth,” Google Inc., 2011. [Online]. Available: earth.google.com.
- [9] *Projeto de Reabilitação do Edifício situado na Rua Costa Grande de Cima - Amarante*, Amarante, 2011.
- [10] J. Branco, A. Santos e P. Cruz, “Asnas Tradicionais de Madeira: Evolução, Comportamento e Reforço com Materiais Compósitos,” *Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas*, pp. 1-12.
- [11] J. Pinto, R. Cardoso, A. Paiva, S. Cunha, D. Cruz, J. Vieira, J. Lousada e H. Varum, “Caracterização de paredes tradicionais de tabique,” em *Paredes divisórias. Passado, presente e futuro*, Editado por: Paulo B. Lourenço, Graça Vasconcelos, Paulo Mendonça, Aires Camões, Ricardo Mateus, Luís Bragança, Luís Ramos. Livro de Atas. Chapa 5 - Guimarães. ISBN: 978-972-8692-60-5. pp. 25-35, 2011.

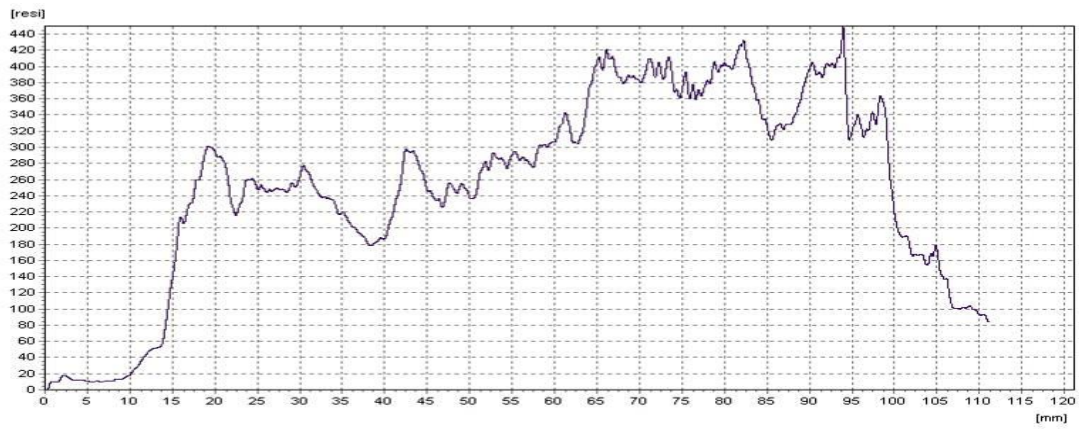
Bibliografia

- [12] J. Pinto, H. Varum, A. Cepeda, P. Tavares, J. Louzada, P. Silva e J. Vieira, “Study of the traditional tabique constructions in the Alto Tâmega region,” em *The Sustainable World*, British Librabry, 2010, pp. 299-307.
- [13] R. M. Rodrigues, Construções antigas de madeira: Experiência de Obra e Reforço Estrutural, Dissertação de Mestrado, Guimarães: Universidade do Minho, 2004.
- [14] M. J. Reis, Reabilitação duma Estrutura de Alvenaria de Pedra, Dissertação de Mestrado, Porto: FEUP, 2011.
- [15] A. O. Feio, Inspeção e diagnóstico de estruturas históricas de madeira: Correlação com métodos não destrutivos e comportamento estrutural, Tese de Doutoramento, Guimarães: Universidade do Minho, 2006.
- [16] P. B. Lourenço, A. O. Feio e J. S. Machado, “Chestnut wood in compression perpendicular to the grain: Non-destructive correlations for test results in new and old wood,” em *Construction and Building Materials 21*, Elsevier, pp. 1617–1627, 2007.
- [17] J. Pinto, A. Paiva, V. Humberto, A. Costa, D. Cruz, S. Pereira, L. Fernandes, P. Tavares e J. Agarwal, “Corn`s cob as a potential ecological thermal insulation material,” em *Energy and Buildings*, Elsevier, Volume 43, Issue 8 August 2011, pp. 1985-1990 DOI information: 10.1016/j.enbuild.2011.04.004.
- [18] J. Pinto, H. Pereira, P. Vilela, C. Jacinto, J. Vieira, A. Paiva, J. Ferreira, V. Cunha e H. Varum, Camada de regularização com agregado de granulado de caroço da espiga de milho, Auditório da Reitoria da Universidade de Coimbra. Coimbra. Portugal. 29 e 30 de Março de 2012. Editado em CD: APFAC.
- [19] T. Tanaka, “Wood inspection by thermography,” em *12th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood*, Hungria, 2001.
- [20] I. Computers and Structures, “SAP2000 - Structural Analysis Program”. 2012.
- [21] CEN, Eurocódigo 5 - Projecto de estruturas de madeira; Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios, Lisboa: IPQ, 1998.
- [22] CEN, Eurocódigo 0 - Bases para o projeto de estruturas, Lisboa: IPQ, 2009.
- [23] *ASTM D143, Standard test methods for small clear specimens of timber*, American Society for testing and materials, 2000.
- [24] CEN, Eurocódigo 1 - Ações em estruturas; Parte 1-1: Ações gerais; Pesos

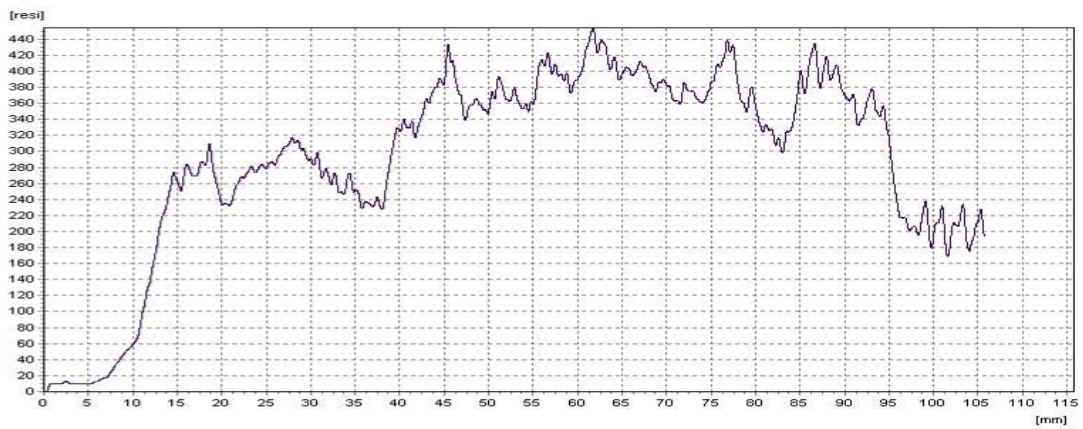
Bibliografia

- volúmicos, pesos próprios, sobrecargas em edifícios, Lisboa: IPQ, 2009.
- [25] CEN, Eurocódigo 1 - Ações em estruturas; Parte 1-3: Ações gerais; Ações da neve, Lisboa: IPQ, 2009.
- [26] A. Correia dos Reis, M. Brazão Farinha e J. P. Brazão Farinha, Tabelas Técnicas, Lisboa: Edições Técnicas E.T.L.,L., 2007.
- [27] A. d. Carvalho, Madeira Portuguesas - Estrutura anatómica; Propriedades; Utilizações, Direcção-Geral das Florestas , 1997.
- [28] SolidWorks, “2012 Ajuda do SolidWorks: Critério de tensão de von Mises máxima,” [Online]. Available: http://help.solidworks.com/2012/Portuguese-brazilian/SolidWorks/cworks/prot_vonm.htm. [Acedido em 19 Outubro 2012].
- [29] J. T. Pinto, D. I. Blockley e N. J. Woodman, “The risk of vulnerable failure,” em *Structural Safety and Reliability*, Swets & Zeitlinger, ISBN 905809 197X. Edited in CD., 2001.
- [30] A. Murta, J. Pinto e H. Varum, “Structural vulnerability of two traditional Portuguese timber structural systems,” em *Engineering Failure Analysis*, doi:10.1016/j.engfailanal.2010.12.017, 2011.
- [31] R. Cardoso, A. Paiva, J. Pinto, A. Murta, H. Varum, L. Nunes e L. Ramos, “Building Details of a Tabique Dwelling in Trás-os-Montes e Alto Douro Region,” em *Proceedings of the XII DBMC - 12th International Conference on Durability of Building Materials and Components*, Faculty of Engineering, University of Porto, Porto, Portugal. April 12th-15th, 2011. Volume II. Edited by Vasco Peixoto de Freitas, Helena Carvalho, Michael Lacasse. FEUPedições. ISBN: 978-972-752-132-6. pp. 729-736. Also edited in CD, 2011.
- [32] O. Seely, “Physical Properties of Common Woods,” [Online]. Available: <http://www.csudh.edu/oliver/chemdata/woods.htm>. [Acedido em 10 Outubro 2012].

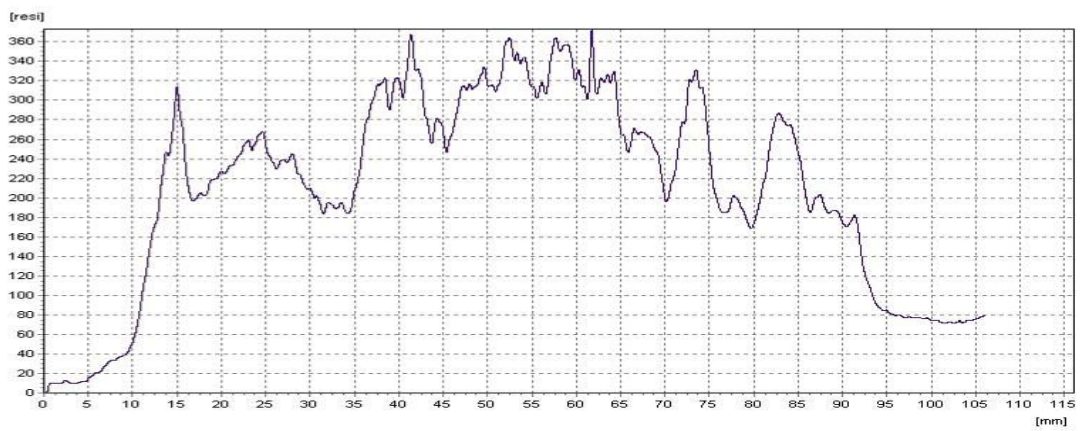
Anexo 1



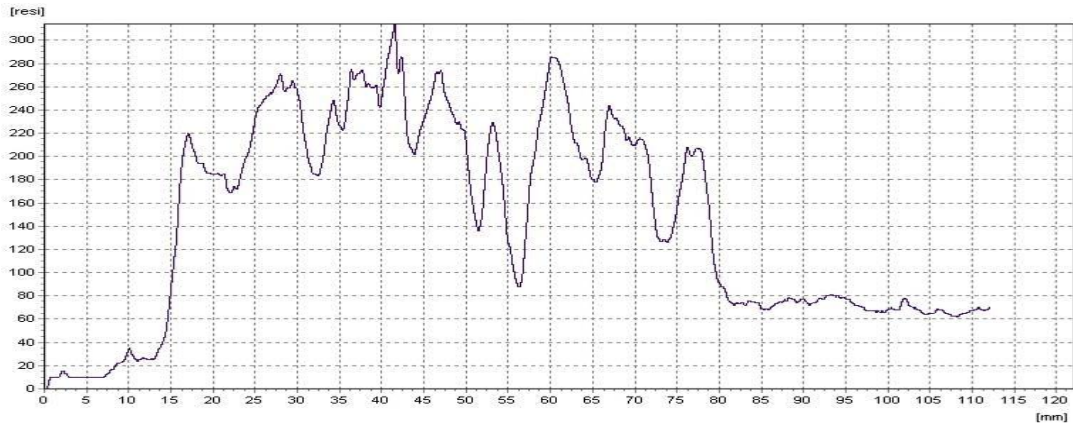
Ponto de Perfuração P1



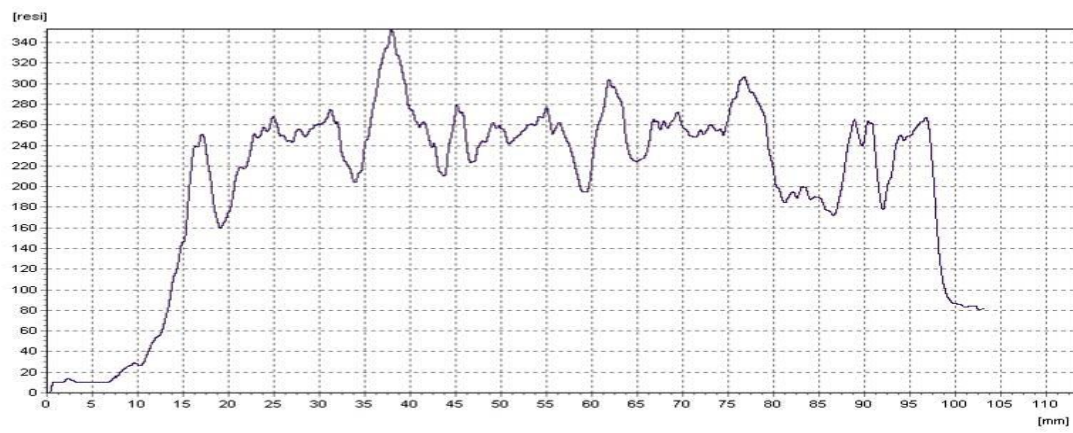
Ponto de Perfuração P2



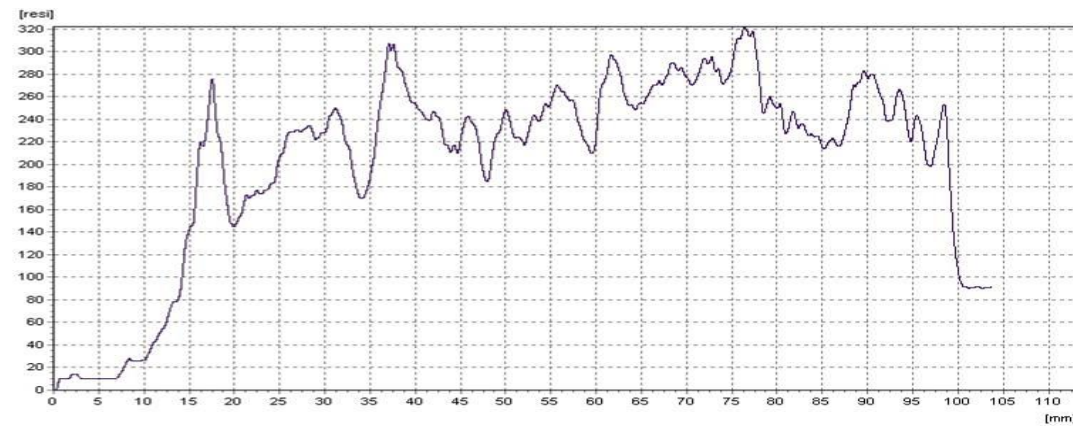
Ponto de Perfuração P3



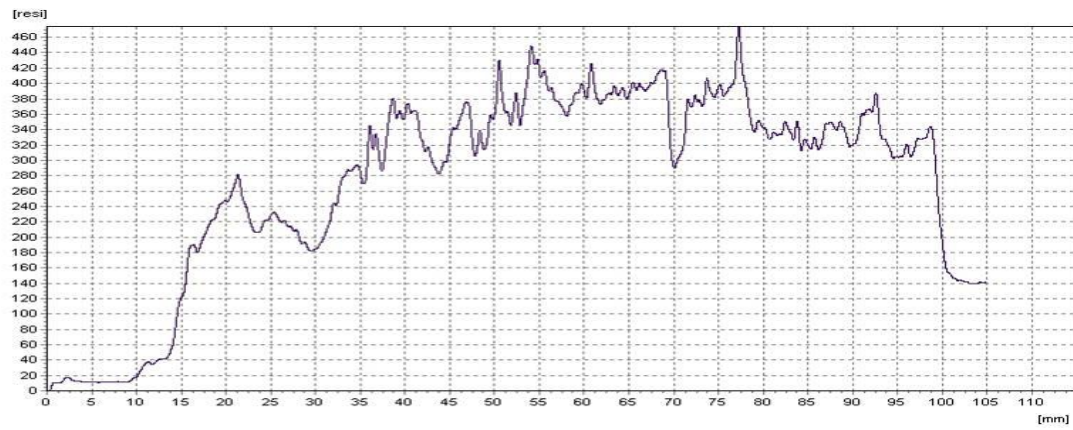
Ponto de Perfuração P4



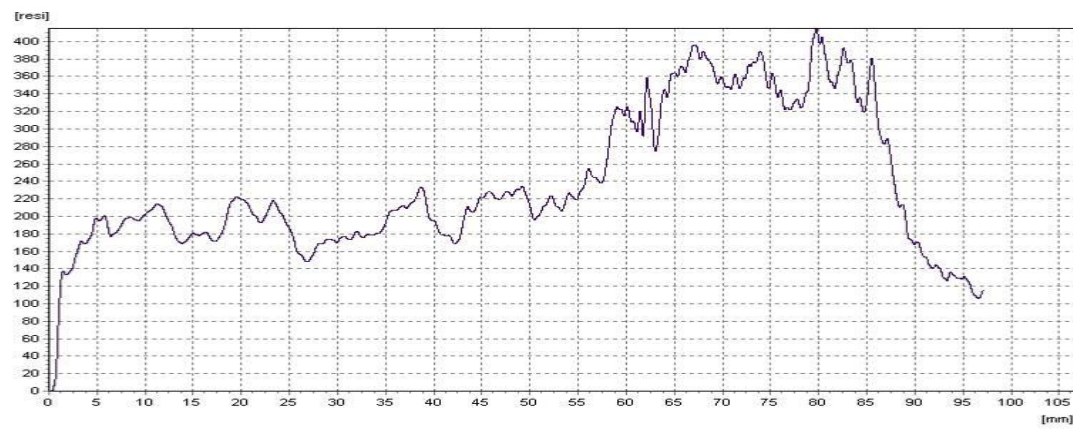
Ponto de Perfuração P5



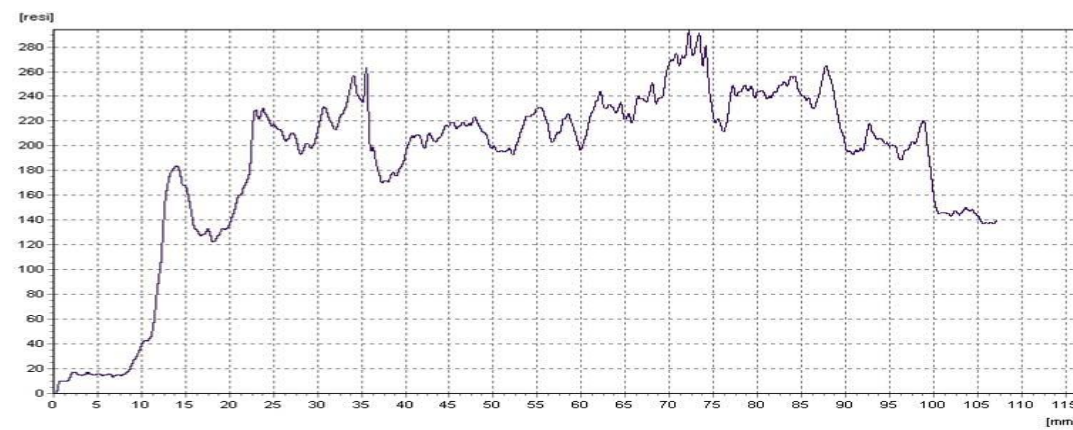
Ponto de Perfuração P6



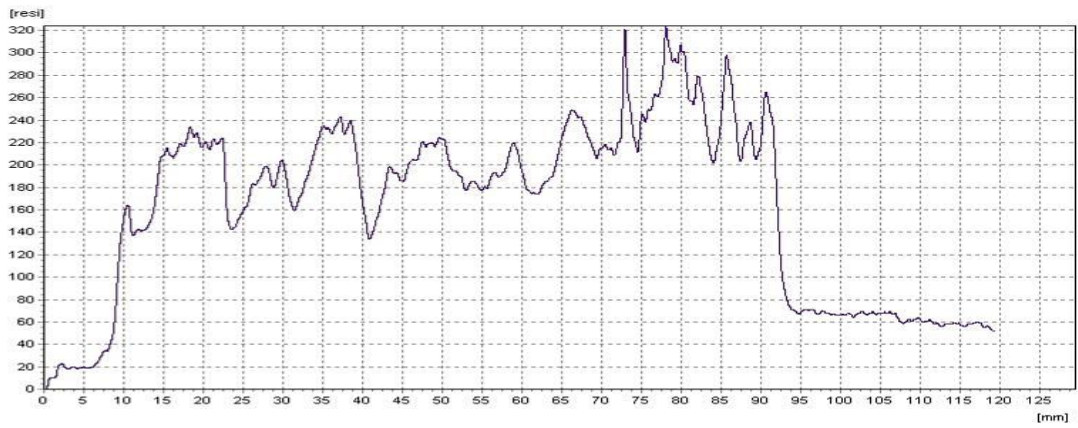
Ponto de Perfuração P7



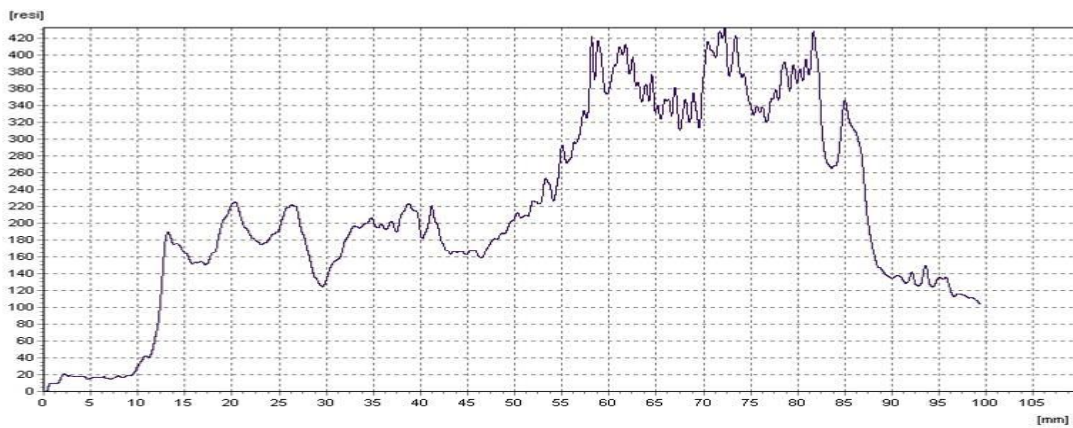
Ponto de Perfuração P8



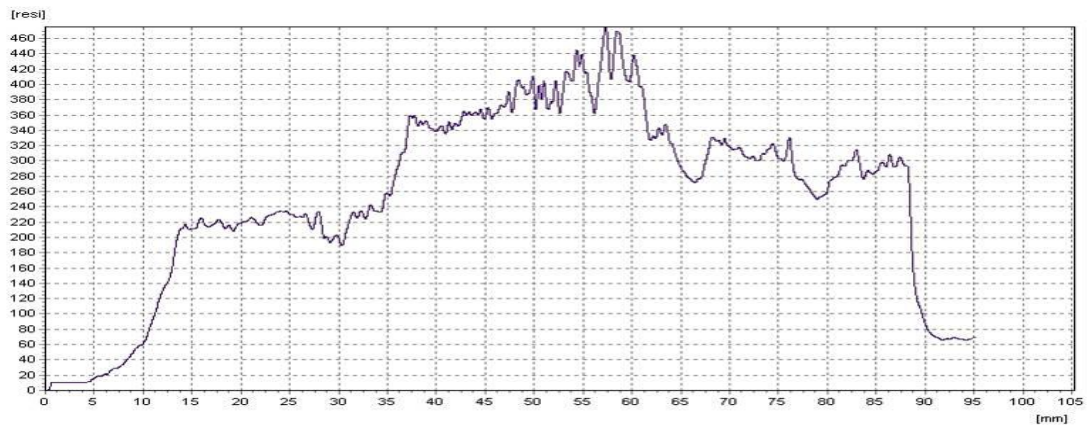
Ponto de Perfuração P9



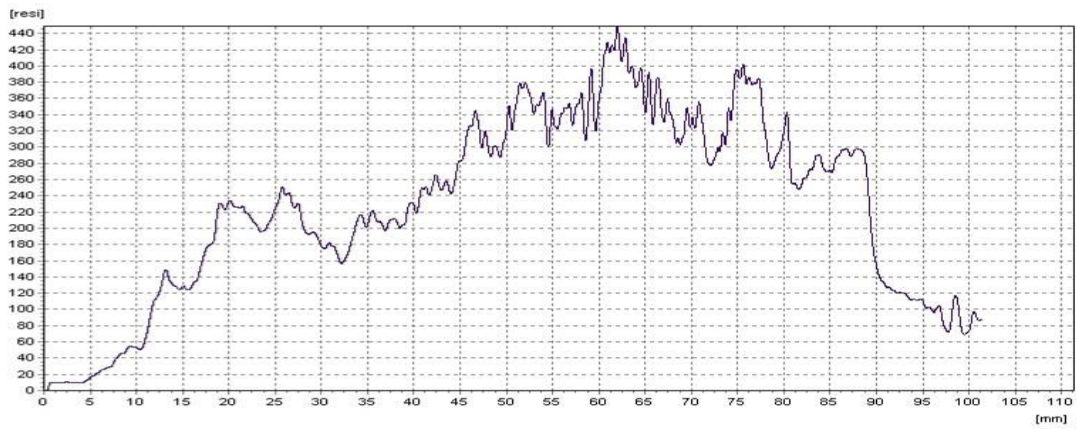
Ponto de Perfuração P10



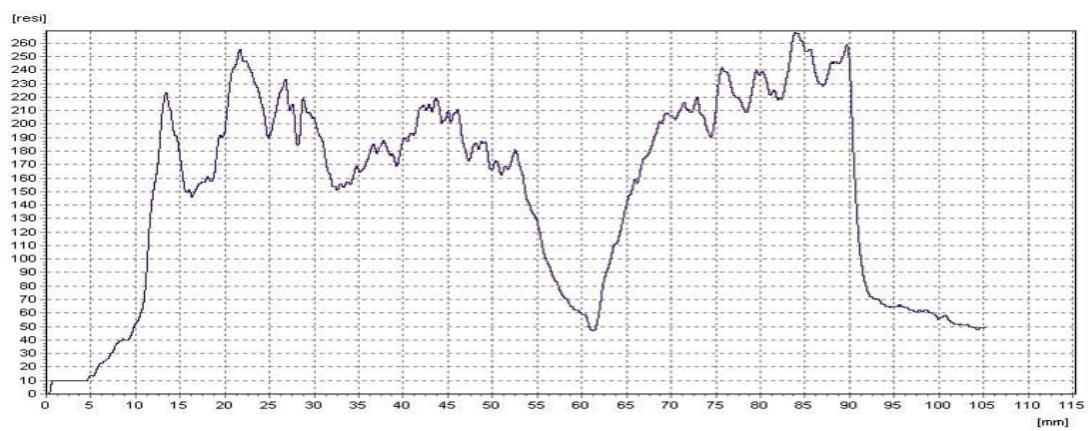
Ponto de Perfuração P11



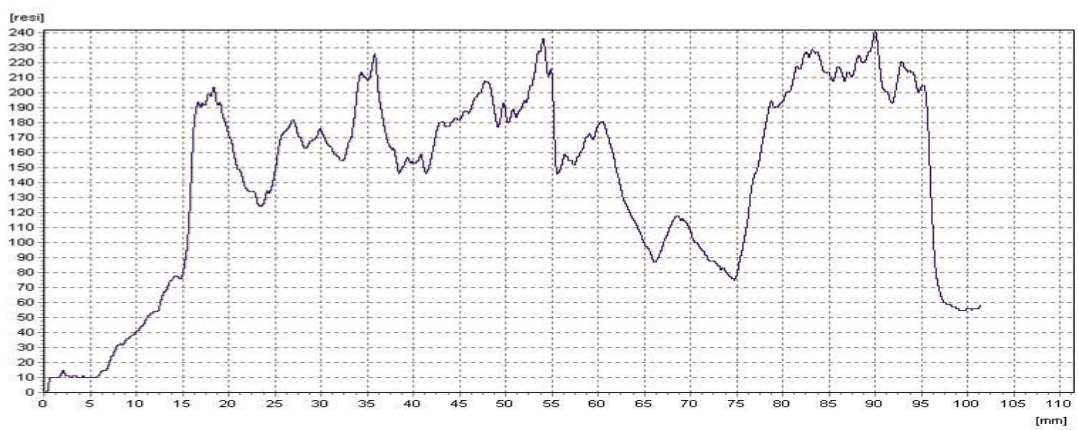
Ponto de Perfuração P12



Ponto de Perfuração P13

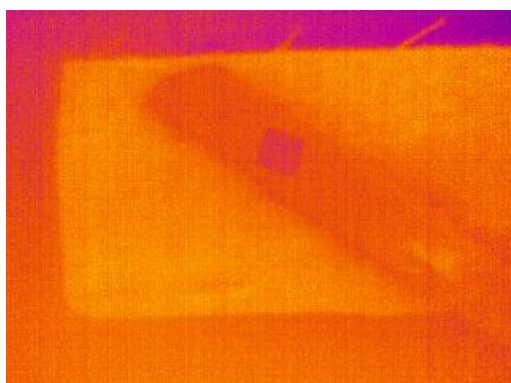


Ponto de Perfuração P14

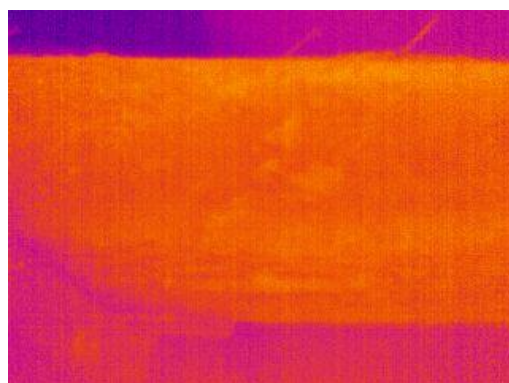


Ponto de Perfuração P15

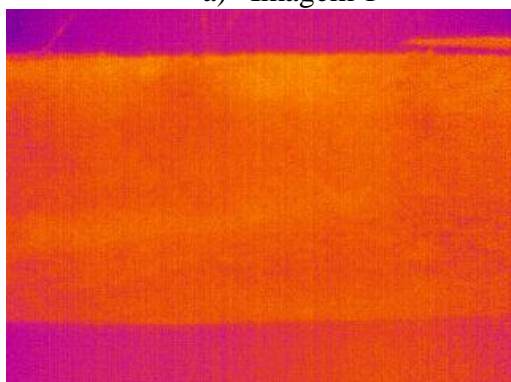
Anexo 2



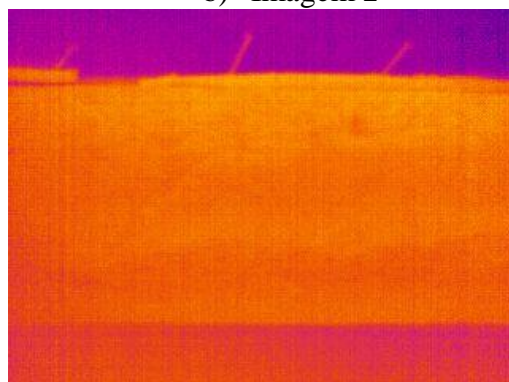
a) Imagem 1



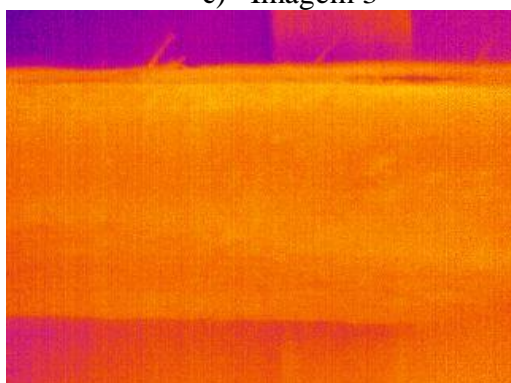
b) Imagem 2



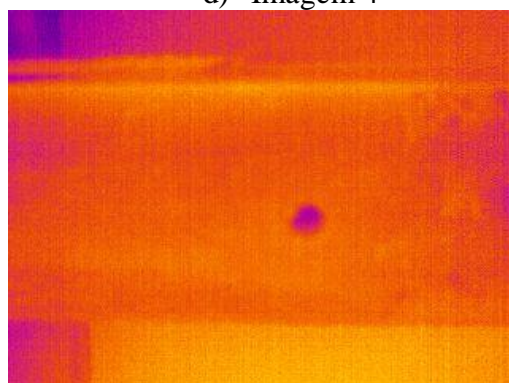
c) Imagem 3



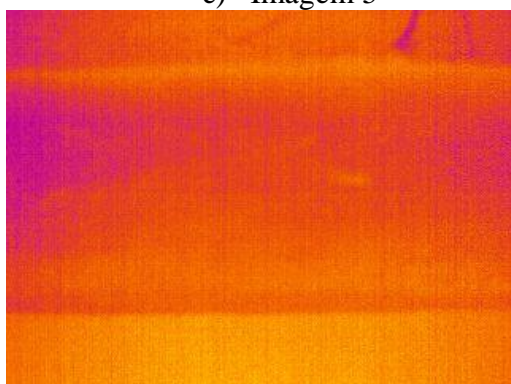
d) Imagem 4



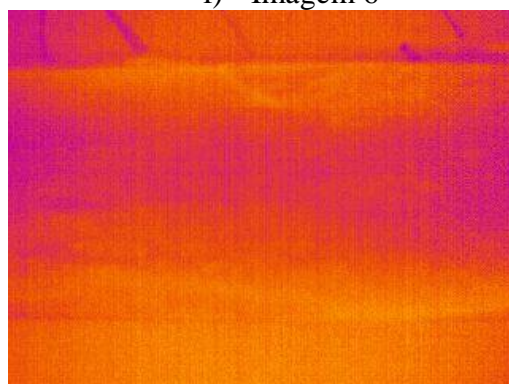
e) Imagem 5



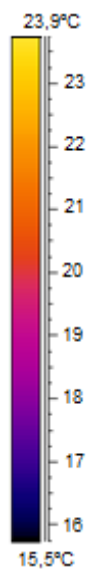
f) Imagem 6



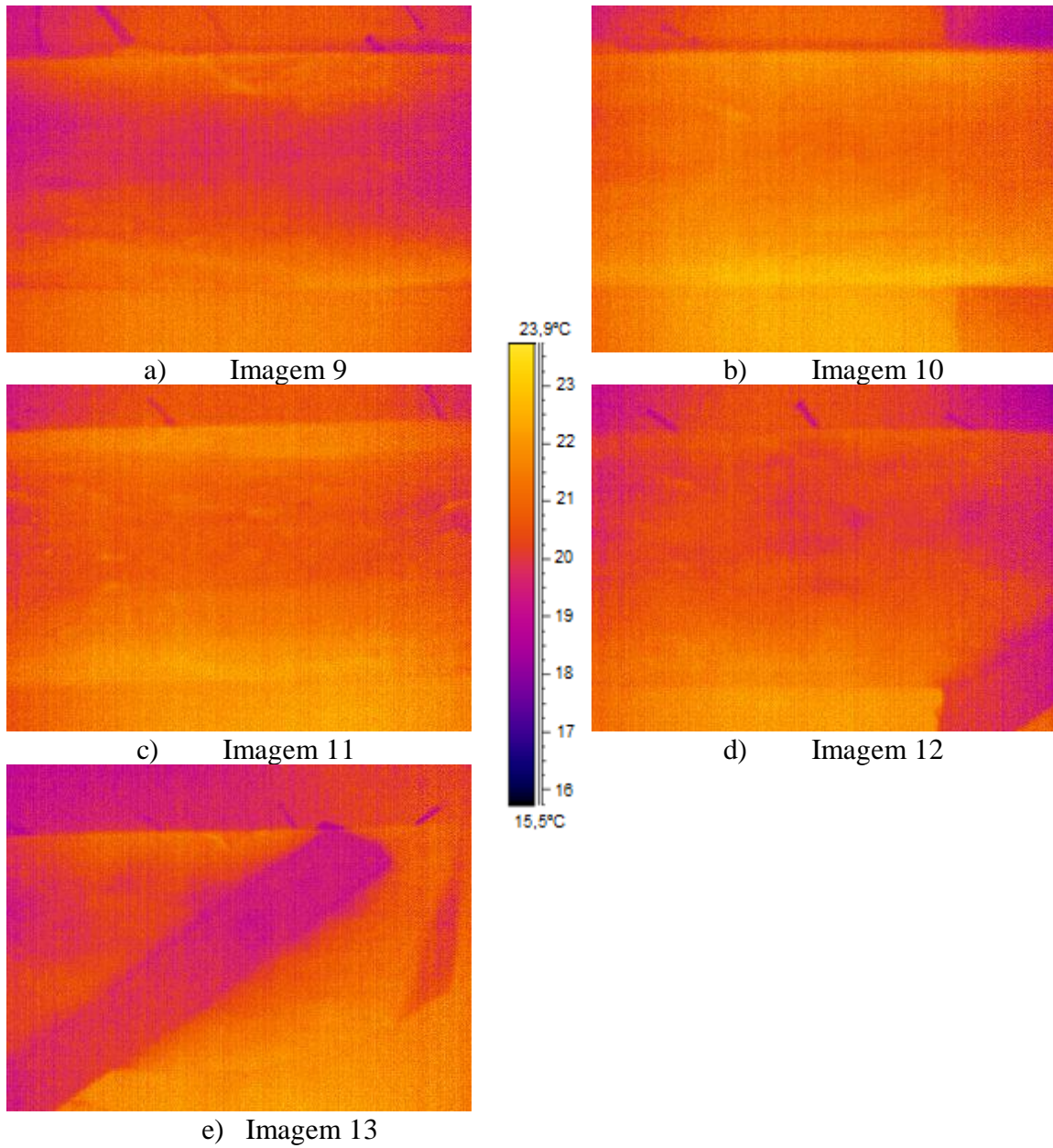
g) Imagem 7



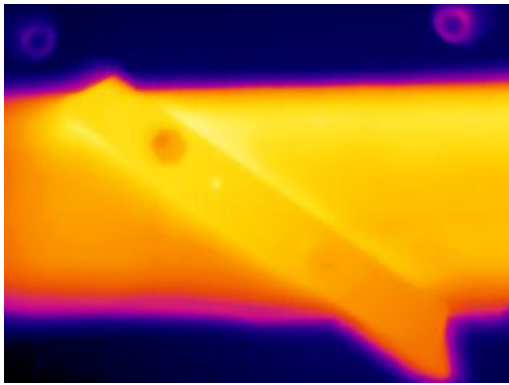
h) Imagem 8



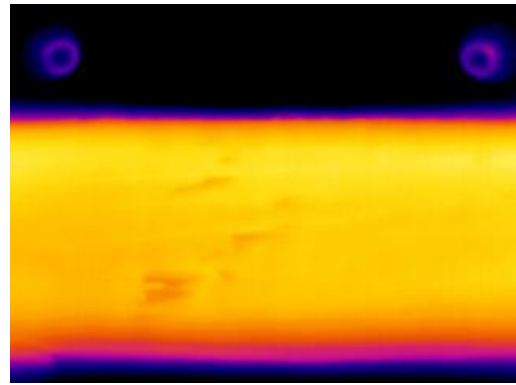
Imagens termográficas de cada troço da viga analisado, sem pré-aquecimento (1)



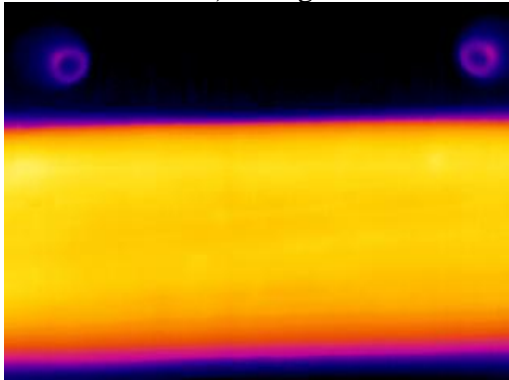
Imagens termográficas de cada troço da viga analisado, sem pré-aquecimento (2)



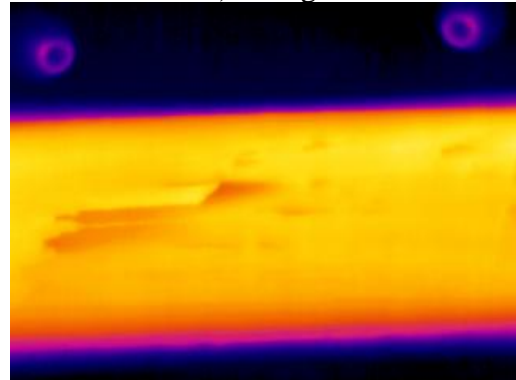
a) Imagem 1



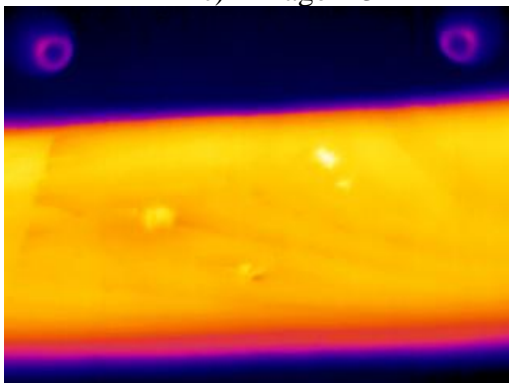
b) Imagem 2



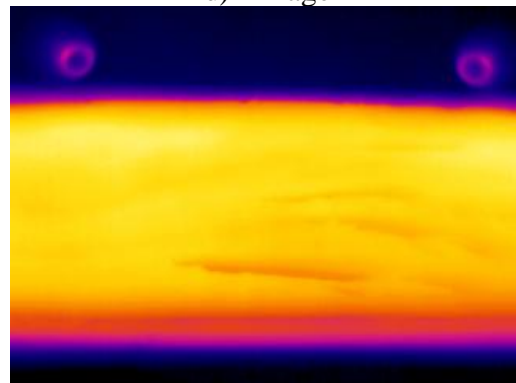
c) Imagem 3



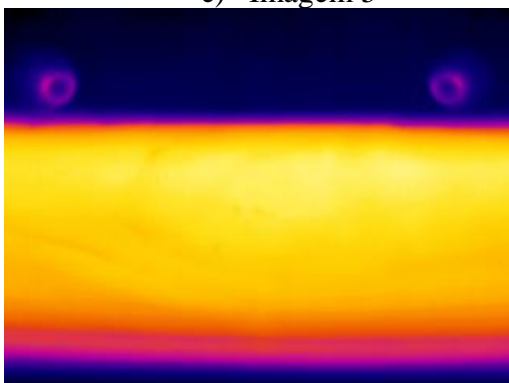
d) Imagem 4



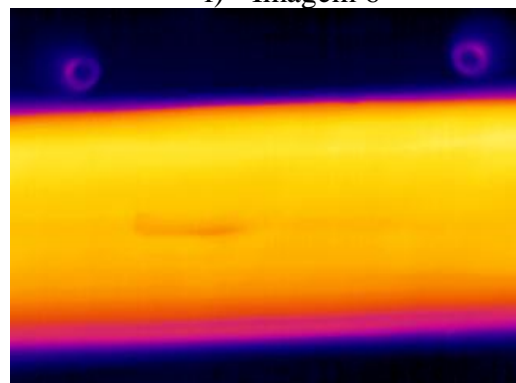
e) Imagem 5



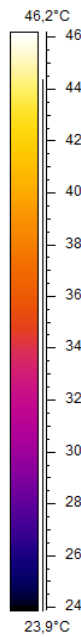
f) Imagem 6



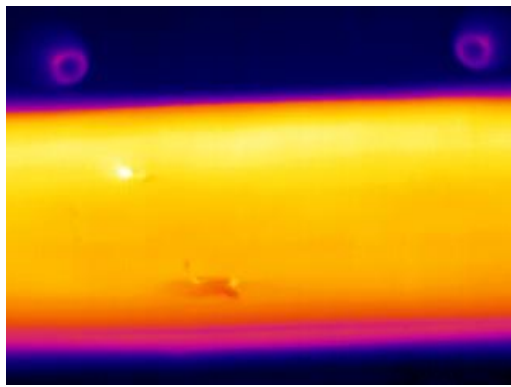
g) Imagem 7



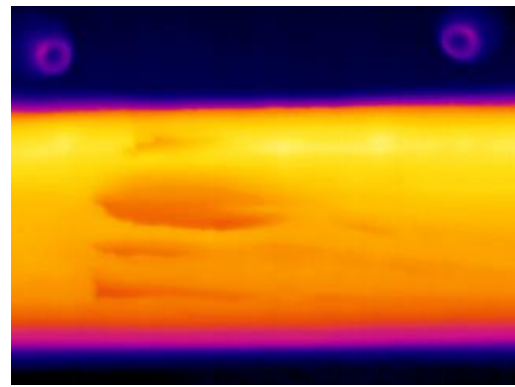
h) Imagem 8



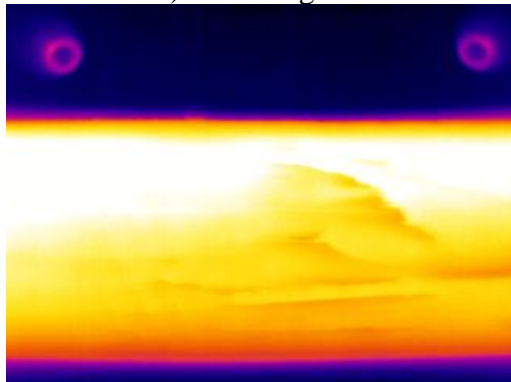
Imagens termográficas de cada troço da viga analisado, 1º ensaio após pré-aquecimento (1)



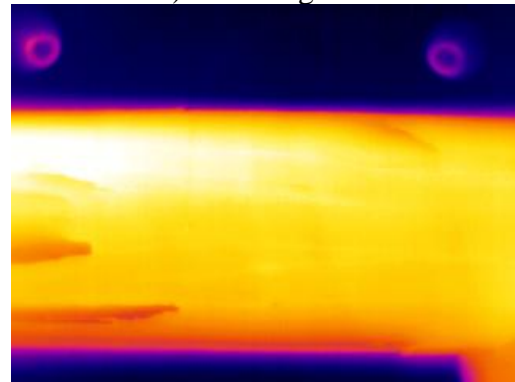
a) Imagem 9



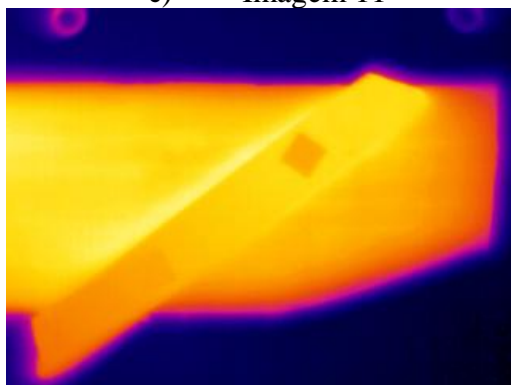
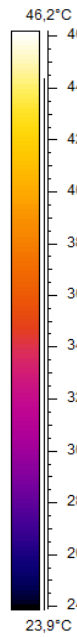
b) Imagem 10



c) Imagem 11

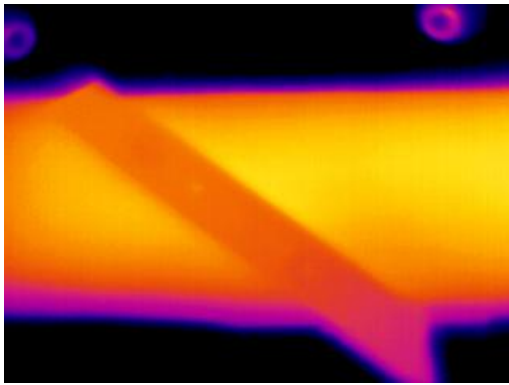


d) Imagem 12

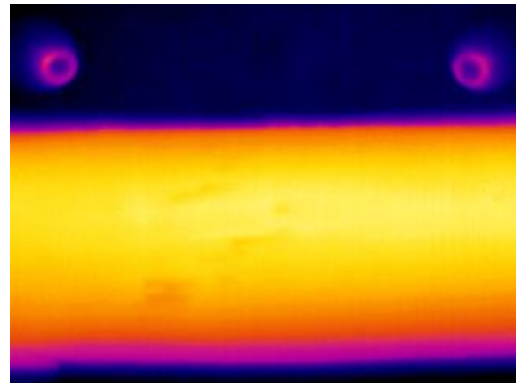


e) Imagem 13

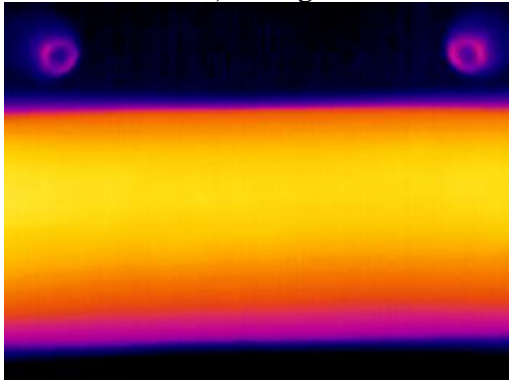
Imagens termográficas de cada troço da viga analisado, 1º ensaio após pré-aquecimento (2)



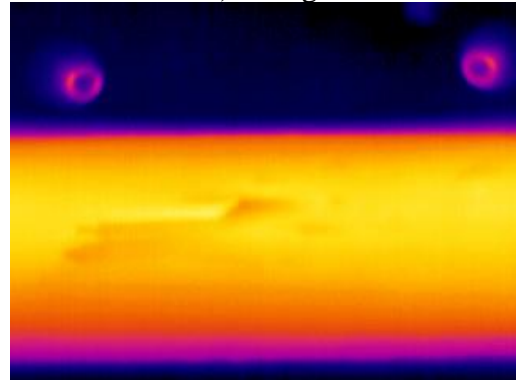
a) Imagem 1



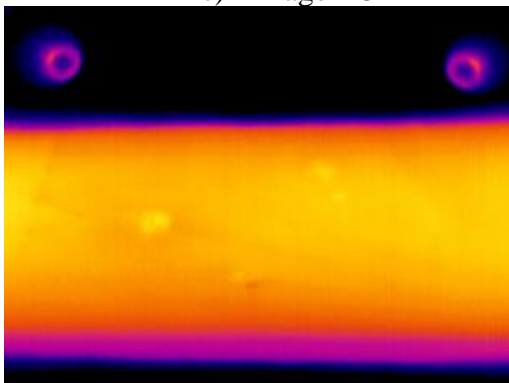
b) Imagem 2



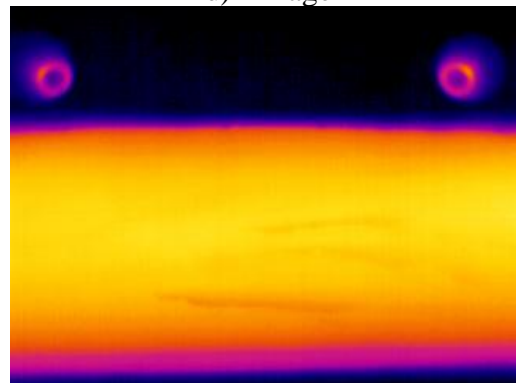
c) Imagem 3



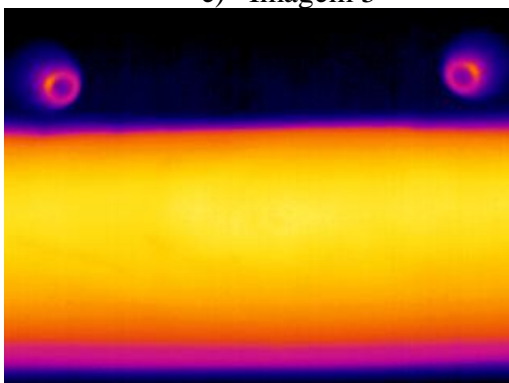
d) Imagem 4



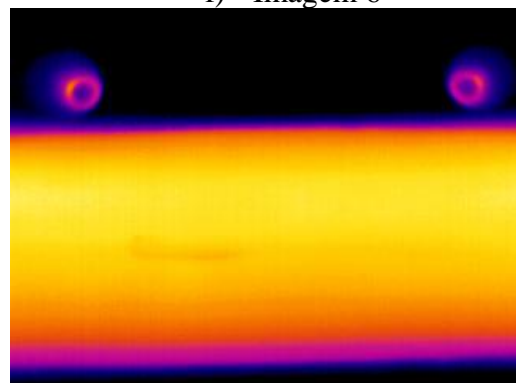
e) Imagem 5



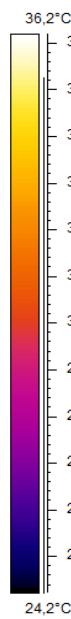
f) Imagem 6



g) Imagem 7

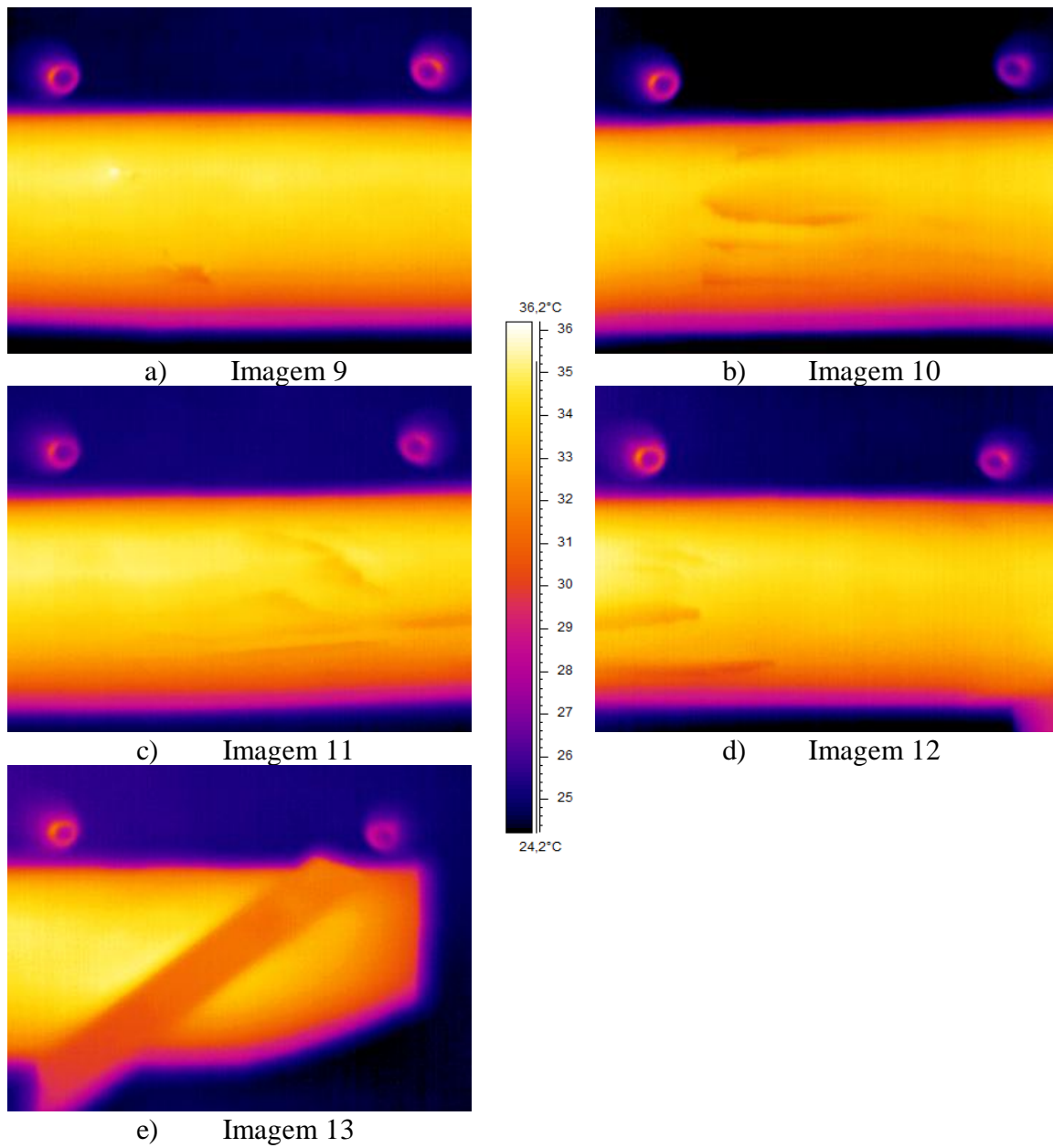


h) Imagem 8



Imagens termográficas de cada troço da viga analisado, 2º ensaio após pré-aquecimento

(1)



Imagens termográficas de cada troço da viga analisado, 2º ensaio após pré-aquecimento

(2)