



Estudo dos pavimentos de madeira e aplicação da metodologia BIM no âmbito da reabilitação de um edifício antigo

JORGE FILIPE MAIA GONÇALVES

novembro de 2017

Estudo dos pavimentos de madeira e aplicação da metodologia BIM no âmbito da reabilitação de um edifício antigo

JORGE FILIPE MAIA GONÇALVES

Relatório de Estágio submetido para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL – RAMO DE CONSTRUÇÕES

Orientadora: Madalena Maria de Kermenguy Vasconcelos e Serpa Marques

Supervisor: Jerónimo Araújo Botelho Júnior (Jerónimo Botelho – Projeto e Consultoria em Reabilitação do Património Edificado Lda.)

OUTUBRO DE 2017

ÍNDICE GERAL

Resumo	v
Abstract	vii
Agradecimentos	ix
Índice de Texto	xi
Índice de Figuras	xv
Índice de Tabelas.....	xxi
CAPÍTULO 1 Introdução.....	1
CAPÍTULO 2 Descrição do edifício	3
CAPÍTULO 3 Estudo de diagnóstico e metodologias de intervenção	15
CAPÍTULO 4 A metodologia BIM aplicada à reabilitação	55
CAPÍTULO 5 Projeto de dimensionamento – pavimento de madeira	71
CAPÍTULO 6 Solução final	121
CAPÍTULO 7 Conclusão	127
Referências Bibliográficas	129

RESUMO

O presente trabalho refere-se a um relatório de estágio para a conclusão do Mestrado em Engenharia Civil – Ramo de Construções, no Instituto Superior de Engenharia do Porto. O estágio decorreu na empresa Jerónimo Botelho – Projeto e Consultoria em Reabilitação do Património Edificado Lda., durante um período de seis meses.

Este relatório aborda um projeto de reabilitação de um edifício, situado na cidade do Porto. Neste caso, o dono de obra tinha o interesse em manter a máxima quantidade possível de elementos originais do edifício. Foram então desenvolvidas competências na inspeção e diagnóstico estrutural e dimensionamento de estruturas de madeira, mais especificamente relativas aos pavimentos de madeira, que eram os elementos que necessitariam uma maior intervenção. Desta forma, serão apresentadas soluções para os casos em que os pavimentos de madeira ainda podem ser mantidos e soluções de dimensionamento para aqueles que necessitam ser substituídos.

Recorrendo ao software Revit, a metodologia Building Information Modelling (BIM) foi aplicada a este projeto de reabilitação. Houve então o interesse em modelar este edifício e todos os seus elementos, não só pela sua criação em 3D, mas sobretudo pela potencialidade que esta metodologia oferece, com informação referente a cada um dos elementos presentes no edifício e suas relações. Por fim, para aprofundar esta metodologia e perceber mais uma das suas potencialidades, também foi testado o conceito de interoperabilidade entre programas.

Palavras-chave: Reabilitação, Inspeção, Dimensionamento, Pavimentos de madeira, Revit, Building Information Modelling (BIM) e Interoperabilidade.

ABSTRACT

This document refers to an internship report as the conclusion of the master's degree in Civil Engineering (Construction branch), in Instituto Superior de Engenharia do Porto. Over a period of six months Jerónimo Botelho's company "Jerónimo Botelho – Projeto e Consultoria em Reabilitação do Património Edificado Lda." hosted this internship. This report addresses a building rehabilitation project, located in the city of Oporto. In this specific venture, the owner was very keen on keeping as many building elements from the original construction as possible. The wooden floors were the ones that required a greater intervention, which evidently resulted in a greater developing of skills in the subjects of inspection, structural diagnosis and design of wooden structures. Different solutions will be presented regarding not only the scenarios where it was possible to restore the original wooden floors, but also for the cases where they had to be replaced.

Over the last few years the Building Information Modelling (BIM) methodology has been raising within the global community of companies and technicians in the areas of design and construction, as it is being considered a most advanced working platform. So, in an effort to keep up with times this methodology was applied to this rehabilitation project through the Revit software. The building and all its elements were modelled, not only for its 3D mapping importance, but mostly for the potential that this methodology offers, with information regarding each of the elements present in the building and their subsequent interactions. Furthermore, the concept of interoperability between applications was also tested, which further deepened the knowledge in this methodology while tackling yet another aspect of its potential.

Keywords: Rehabilitation, Inspection, Dimensioning, Wooden floors, Revit, Building Information Modelling (BIM) and Interoperability.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a todas as pessoas e entidades que de uma forma ou de outra contribuíram, direta e indiretamente, para a realização deste relatório, nomeadamente:

Ao Eng.º Jerónimo Botelho, pela disponibilidade demonstrada durante a realização deste estágio na sua empresa de Projeto e Consultoria em Reabilitação do Património Edificado;

À Eng.ª Andreia Rebelo, pelo acompanhamento prestado ao longo do estágio;

À minha orientadora, Eng.ª Madalena Marques, pela disponibilidade e apoio demonstrado, em cada reunião;

E aos meus pais, sempre presentes;

Muito obrigado.

ÍNDICE DE TEXTO

CAPÍTULO 1	Introdução.....	1
1.1	Objetivos.....	1
1.2	Métodos utilizados	1
1.3	Organização do relatório	1
CAPÍTULO 2	Descrição do edifício	3
2.1	Generalidades.....	3
2.2	Descrição do edifício.....	4
2.2.1	Localização.....	4
2.2.2	Fundações.....	5
2.2.3	Paredes exteriores.....	5
2.2.4	Pisos.....	8
2.2.5	Coberturas	11
2.2.6	Paredes interiores.....	12
2.2.7	Escadas interiores.....	13
CAPÍTULO 3	Estudo de diagnóstico e metodologias de intervenção	15
3.1	A Importância do Estudo de Diagnóstico.....	15
3.2	Comportamento das estruturas de Madeira	15
3.2.1	Danos de origem não-biótica.....	15
3.2.2	Danos de origem biótica	17
3.2.3	Técnicas de diagnóstico	18
3.2.4	Resultados obtidos das vigas ensaiadas	24
3.2.5	Avaliação da segurança	34

ÍNDICE DE TEXTO

3.2.6	Metodologias de intervenção.....	36
3.2.7	Medidas de carácter estrutural – Apoios	40
3.2.8	Atuação sobre peças submetidas à flexão.....	44
3.2.9	Tipo de ligações	51
3.2.10	Tratamentos e acabamentos	52
CAPÍTULO 4	A metodologia BIM aplicada à reabilitação	55
4.1	Generalidades	55
4.2	Plataformas e ferramentas BIM.....	57
4.2.1	Revit.....	57
4.2.2	<i>Level of Development</i> (LOD)	63
4.2.3	Modelação paramétrica	65
4.2.4	Robot Structural Analysis.....	66
4.3	Interoperabilidade	67
4.3.1	Aplicação da interoperabilidade.....	68
CAPÍTULO 5	Projeto de dimensionamento – pavimento de madeira	71
5.1	Generalidades.....	71
5.2	Classes de serviço e duração das ações	71
5.3	Modelos de cálculo estrutural	72
5.4	Verificação de segurança	73
5.5	Especificidades das estruturas de madeira.....	74
5.5.1	Especificidades mais importantes	74
5.5.2	Durabilidade e preservação	74
5.5.3	Comportamento ao fogo	75
5.5.4	Ligações	75
5.5.5	Preparação para o cálculo de estruturas de madeira.....	75
5.6	Bases de projeto	76
5.7	Duração das ações e teor em água.....	78

5.7.1	Estados Limites de Utilização/Serviço	78
5.7.2	Estados Limites Últimos.....	78
5.8	Verificação pelo método dos coeficientes parciais.....	79
5.8.1	Valor de cálculo duma propriedade de um material	79
5.8.2	Valor de cálculo das resistências	79
5.9	Principais propriedades mecânicas.....	83
5.9.1	Resistência à tração paralela às fibras.....	83
5.9.2	Resistência à compressão paralela às fibras.....	83
5.9.3	Resistência à tração perpendicular às fibras	84
5.9.4	Resistência à compressão perpendicular às fibras	84
5.9.5	Resistência ao corte ou esmagamento.....	84
5.9.6	Dureza.....	84
5.9.7	Resistência à fadiga	85
5.9.8	Fluência.....	85
5.10	Valores de cálculo – Madeira nova	85
5.11	Valores de cálculo – Madeira lamelada colada	87
5.12	Verificação à tração e compressão	89
5.12.1	Tração e compressão paralelas ao fio	89
5.12.2	Tração e compressão perpendiculares ao fio	90
5.12.3	Efeito de volume.....	90
5.12.4	Tração paralela ao fio	90
5.12.5	Tração perpendicular ao fio.....	91
5.12.6	Compressão paralela ao fio	91
5.12.7	Compressão perpendicular ao fio.....	91
5.13	Verificação à Flexão.....	92
5.13.1	Segurança de peças fletidas	92
5.13.2	Verificação de segurança à flexão	93

ÍNDICE DE TEXTO

5.13.3	Verificação de segurança ao bambeamento	95
5.13.4	Verificação de segurança ao corte.....	98
5.14	Dimensionamento do pavimento de madeira	100
5.14.1	Dimensionamento da viga V1.....	102
5.14.2	Dimensionamento da viga V2.....	106
5.14.3	Dimensionamento da viga V3.....	110
5.14.4	Dimensionamento da viga V4.....	114
5.15	Dimensionamento do pavimento de madeira e a interoperabilidade	118
CAPÍTULO 6	Solução final.....	121
6.1	Divisão Sul, lado poente.....	121
6.2	Divisão Sul, lado nascente	122
6.3	Divisão Norte, lado poente	122
6.4	Divisão Norte, lado nascente	123
6.5	Circulações horizontais comuns.....	124
CAPÍTULO 7	Conclusão.....	127
7.1	Desenvolvimentos Futuros	128

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Vista aérea do edifício (Google Maps, Julho 2017).	4
Figura 2.2 – Parede fachada principal.	6
Figura 2.3 – Parede fachada principal.	6
Figura 2.4 – Parede fachada de tardoz.....	6
Figura 2.5 – Parede fachada de tardoz.....	6
Figura 2.6 – Parede em tabique das águas furtadas.	7
Figura 2.7 – Parede interior em alvenaria de pedra.....	7
Figura 2.8 – Parede de meação em alvenaria de pedra granítica.	7
Figura 2.9 – Parede de meação em alvenaria de pedra granítica.	7
Figura 2.10 – Vigas de madeira de secção circular, constituintes dum pavimento inacessível.	8
Figura 2.11 – Pormenor duma viga de madeira com a face superior aparada.	8
Figura 2.12 – Pormenor de vigas de madeira com as quatro faces falqueadas.	8
Figura 2.13 – Pormenor de vigas de madeira com as quatro faces falqueadas.	8
Figura 2.14 – Pormenor do pavimento de madeira.	9
Figura 2.15 – Pavimento de madeira degradado.	9
Figura 2.16 – Teto sem revestimento.....	10
Figura 2.17 – Teto ainda estucado.	10
Figura 2.18 – Pormenor do teto fasquiado e parcialmente estucado, no rés-do-chão.....	10
Figura 2.19 – Pormenor do teto tabuado e parcialmente estucado, na zona da caixa de estacas.	10
Figura 2.20 – Claraboia, vista inferior.....	12
Figura 2.21 – Claraboia, vista inferior.....	12
Figura 2.22 – Parede da caixa de escadas.	12

Figura 2.23 – Pormenor de uma parede divisória interior.	12
Figura 2.24 – Paredes divisórias interiores desmanteladas.	13
Figura 2.25 – Pormenor de uma parede divisória interior.	13
Figura 2.26 – Escadas interiores, tipo pescoço de cavalo em madeira.	13
Figura 2.27 – Escadas interiores.	13
Figura 3.1 – Vigas a serem ensaiadas localizadas numa divisão a Sul do edifício, piso 1.	25
Figura 3.2 – Vigas a serem ensaiadas localizadas numa divisão a Sul do edifício, piso 1.	25
Figura 3.3 – Inspeção e preparação da viga para a realização do ensaio.	26
Figura 3.4 – Limpeza da viga para a posterior execução do ensaio.	26
Figura 3.5 – Regístógrafo modelo 4453-P, da marca Rinntech.	26
Figura 3.6 – Realização do ensaio.	26
Figura 3.7 – Obtenção do resultado do ensaio.	27
Figura 3.8 – Comparação de resultados dos ensaios.	27
Figura 3.9 – Divisão Sul no piso 1.	27
Figura 3.10 – Divisão Norte no piso 1.	27
Figura 3.11 – Divisão Sul no piso 2.	27
Figura 3.12 – Pormenor da divisão Sul no piso 2.	27
Figura 3.13 – Planta do piso 1, com os ensaios numerados de 1 a 9.	28
Figura 3.14 – Planta do piso 2, com os ensaios numerados de 10 a 11.	28
Figura 3.15 – Resistógrafo: ensaio número 1, piso 1.	29
Figura 3.16 – Resistógrafo: ensaio número 2, piso 1.	30
Figura 3.17 – Resistógrafo: ensaio número 3, piso 1.	30
Figura 3.18 – Resistógrafo: ensaio número 4, piso 1.	30
Figura 3.19 – Resistógrafo: ensaio número 5, piso 1.	31
Figura 3.20 – Resistógrafo: ensaio número 6, piso 1.	31
Figura 3.21 – Resistógrafo: ensaio número 7, piso 1.	32
Figura 3.22 – Resistógrafo: ensaio número 8, piso 1.	32

Figura 3.23 – Resistógrafo: ensaio número 9, piso 1.	32
Figura 3.24 – Resistógrafo: ensaio número 10, piso 2.	33
Figura 3.25 – Resistógrafo: ensaio número 11, piso 2.	33
Figura 3.26 – Apoio das extremidades das vigas. Solução com cachorros de madeira. Arriaga [1].....	42
Figura 3.27 – Apoio das extremidades das vigas. Solução com perfil metálico. Arriaga [1]	42
Figura 3.28 – Apoio das extremidades das vigas. Solução com betão armado. Arriaga [1].....	42
Figura 3.29 – Madeira LVL (<i>laminated veneer lumber</i>).	43
Figura 3.30 – Madeira PSL (<i>parallel strand lumber</i>).	43
Figura 3.31 – Consolidação da extremidade da viga com argamassa à base de resina epóxi. Arriaga [1].	43
Figura 3.32 – Tipos de reforços das vigas constituintes dum pavimento de madeira. Arriaga [1].....	44
Figura 3.33 – Reforço do pavimento com a aplicação duma nova viga a meio vão. Arriaga [1]	44
Figura 3.34 – Consolidação com placas internas. Arriaga [1].....	45
Figura 3.35 – Consolidação da viga com barras de reforço. Arriaga [1].....	46
Figura 3.36 – Aumento da secção da viga com a anexação de novas peças de madeira. Arriaga [1].....	47
Figura 3.37 – Aplicação duma camada de betão armada na face superior do pavimento. Arriaga [1]	48
Figura 3.38 – Solução mista de madeira com betão armado. Arriaga [1]	49
Figura 3.39 – Reparação pontual utilizando placas e perfis metálicos. Arriaga [1].....	50
Figura 3.40 – Diferentes soluções com perfis metálicos servindo se substitutos estruturais às vigas de madeira. Arriaga [1]	51
Figura 3.41 – Ligação através da abertura de calhas na madeira. Arriaga [1].....	52
Figura 4.1 – Cronograma representativo da interação de cada interveniente num projeto. À esquerda: projeto elaborado da forma tradicional. À direita: projeto com recurso à metodologia BIM.....	56
Figura 4.2 – Comandos existentes no separador Arquitetura.....	58
Figura 4.3 – Comandos existentes no separador Estrutura.	58
Figura 4.4 – Cotagem dos pisos.....	59
Figura 4.5 – Exemplos das paredes genéricas criadas.....	60
Figura 4.6 – Exemplos dos pavimentos genéricos criados.	60
Figura 4.7 – Possibilidade de edição das camadas constituintes duma parede.....	60

Figura 4.8 – Vista em planta e 3D do início da modelação do edifício.	61
Figura 4.9 – Vista 3D do faseamento construtivo da modelação do edifício.	62
Figura 4.10 – Alçados e vista 3D do edifício.	62
Figura 4.11 – Corte em vista 3D do edifício.	63
Figura 4.12 – LOD aplicado a um edifício. (Adaptado de McPhee [19]).....	64
Figura 4.13 – LOD aplicado a um edifício (Adaptado de McPhee [19])......	65
Figura 4.14 – Exemplo da criação e parametrização de uma viga de madeira com secção circular.	66
Figura 4.15 – Revit. Pavimento de madeira com vigas em secção retangular. Teste de interoperabilidade.	69
Figura 4.16 – Robot Structural Analysis. Pavimento de madeira com vigas em secção retangular. Teste de interoperabilidade.	69
Figura 5.1 – Exemplo de vigas de madeira conífera (pinho).	86
Figura 5.2 – Exemplo de viga de madeira folhosa (castanho).	86
Figura 5.3 – Exemplo de vigas de madeira lamelada colada.	88
Figura 5.4 – Modelação em Revit do novo pavimento (vigamento) da divisão a Norte, lado nascente. .	100
Figura 5.5 – Modelação em Revit do novo pavimento (vigamento) da divisão Norte, lado nascente. Viga V1.	102
Figura 5.6 – Modelação em Revit do novo pavimento (vigamento) da divisão Norte, lado nascente. Viga V2.	106
Figura 5.7 – Modelação em Revit do novo pavimento (vigamento) da divisão Norte, lado nascente. Viga V3.	110
Figura 5.8 – Modelação em Revit do novo pavimento (vigamento) da divisão Norte, lado nascente. Viga V4.	114
Figura 5.9 – Cargas permanentes consideradas.	118
Figura 5.10 – Sobrecargas consideradas.	119
Figura 5.11 – Resultado final.	119
Figura 6.1 – Estado do pavimento da divisão Sul, lado poente, piso 2.	121
Figura 6.2 – Estado do pavimento da divisão Sul, lado poente, piso 2.	121

Figura 6.3 – Estado do pavimento da divisão Sul, lado nascente, piso 2.	122
Figura 6.4 – Estado do pavimento da divisão Sul, lado nascente, piso 1.	122
Figura 6.5 – Estado do pavimento da divisão Norte, lado poente, piso 1.	123
Figura 6.6 – Estado do pavimento da divisão Norte, lado poente, piso 1.	123
Figura 6.7 – Estado do pavimento da divisão Norte, do lado nascente, piso 2.	123
Figura 6.8 – Estado do pavimento da divisão Norte, do lado nascente, piso 2.	123
Figura 6.9 – Estado do pavimento das circulações horizontais comuns, piso 1.	124
Figura 6.10 – Estado do pavimento das circulações horizontais comuns, piso 1.	124
Figura 6.11 – Planta de teto do piso 1.	125
Figura 6.12 – Pormenor do tipo de ligação que será usada.	126
Figura 6.13 – Pormenor do tipo de ligação que será usada.	126

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1 – Relação entre classes de qualidade e classe de resistência.....	21
Tabela 4.1 – Plataforma e ferramenta BIM de análise estrutural.	57
Tabela 5.1 – Valor dos coeficientes parciais de segurança γ_M	80
Tabela 5.2 – Valores de k_{mod}	81
Tabela 5.3 – Valores de k_{def}	82
Tabela 5.4 – Propriedades físicas e mecânicas de madeira para estruturas (coníferas).....	87
Tabela 5.5 – Propriedades mecânicas de madeira lamelada colada.....	89
Tabela 5.6 – Valores de m	97
Tabela 5.7 – Cargas permanentes a serem consideradas no dimensionamento do vigamento.	100
Tabela 5.8 – Somatório das cargas permanentes.	101
Tabela 5.9 – Sobrecargas consideradas.	101
Tabela 5.10 – Propriedades da madeira maciça.....	102
Tabela 5.11 – Dimensões da viga V1.	103
Tabela 5.12 – Cargas permanentes consideradas no dimensionamento da viga V1.	103
Tabela 5.13 – Sobrecarga considerada no dimensionamento da viga V1.....	103
Tabela 5.14 – Cargas lineares consideradas no dimensionamento da viga V1.	103
Tabela 5.15 – Combinações de ações para o dimensionamento da viga V1.....	104
Tabela 5.16 – Verificação de segurança da viga V1.....	104
Tabela 5.17 – Verificação de segurança à flexão simples da viga V1.	105
Tabela 5.18 – Verificação ao bambeamento da viga V1.	105
Tabela 5.19 – Verificação ao corte da viga V1.....	105
Tabela 5.20 – Verificação ao ELS da viga V1.....	105

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 5.21 – Propriedades da madeira maciça.....	106
Tabela 5.22 – Dimensões da viga V2.	107
Tabela 5.23 – Cargas permanentes consideradas no dimensionamento da viga V2.	107
Tabela 5.24 – Sobrecarga considerada no dimensionamento da viga V2.....	107
Tabela 5.25 – Cargas lineares consideradas no dimensionamento da viga V2.	107
Tabela 5.26 – Combinações de ações para o dimensionamento da viga V2.....	108
Tabela 5.27 – Verificação de segurança da viga V2.....	108
Tabela 5.28 – Verificação de segurança à flexão simples da viga V2.	109
Tabela 5.29 – Verificação ao bambeamento da viga V2.	109
Tabela 5.30 – Verificação ao corte da viga V2.....	109
Tabela 5.31 – Verificação ao Estado-Limite de Utilização da viga V2.....	109
Tabela 5.32 – Propriedades da madeira maciça.....	110
Tabela 5.33 – Dimensões da viga V3.	111
Tabela 5.34 – Cargas permanentes consideradas no dimensionamento da viga V3.	111
Tabela 5.35 – Sobrecarga considerada no dimensionamento da viga V3.....	111
Tabela 5.36 – Cargas lineares consideradas no dimensionamento da viga V3.	111
Tabela 5.37 – Combinações de ações para o dimensionamento da viga V3.....	112
Tabela 5.38 – Verificação de segurança da viga V3.....	112
Tabela 5.39 – Verificação de segurança à flexão simples da viga V3.	113
Tabela 5.40 – Verificação ao bambeamento da viga V3.	113
Tabela 5.41 – Verificação ao corte da viga V3.....	113
Tabela 5.42 – Verificação ao Estado-Limite de Utilização da viga V3.....	113
Tabela 5.43 – Propriedades da madeira lamelada colada.....	114
Tabela 5.44 – Dimensões da viga V4.	115
Tabela 5.45 – Cargas permanentes consideradas no dimensionamento da viga V4.	115
Tabela 5.46 – Sobrecarga considerada no dimensionamento da viga V4.....	115
Tabela 5.47 – Cargas lineares consideradas no dimensionamento da viga V4.	115

Tabela 5.48 – Combinações de ações para o dimensionamento da viga V4.....	116
Tabela 5.49 – Verificação de segurança da viga V4.....	116
Tabela 5.50 – Verificação de segurança à flexão simples da viga V4.	117
Tabela 5.51 – Verificação ao bambeamento da viga V4.	117
Tabela 5.52 – Verificação ao corte da viga V4.....	117
Tabela 5.53 – Verificação ao Estado-Limite de Utilização da viga V4.....	117

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 OBJETIVOS

Este relatório aborda um projeto de reabilitação dum edifício antigo, situado na cidade do Porto, para o qual foram traçados três objetivos: a pesquisa de soluções para a preservação dos pavimentos de madeira originais através da apresentação de diferentes métodos, o dimensionamento de pavimentos de madeira para as situações em que precisem de ser substituídos e a aplicação da metodologia Building Information Modeling (BIM) a um projeto de reabilitação estrutural duma construção já existente.

1.2 MÉTODOS UTILIZADOS

Para atingir os objetivos propostos, além do conhecimento adquirido no decorrer da formação académica, foram estudadas as publicações de autores especializados, estudos e dissertações adequadas. A experiência que a empresa possui na área da reabilitação também foi tida em conta, em relação à tomada de decisões quanto às soluções finais na preservação ou no dimensionamento dos pavimentos de madeira.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO

Este relatório, encontra-se dividido em 7 capítulos.

No Capítulo 1 é efetuada uma breve introdução ao trabalho realizado, e apresentada a estrutura do relatório.

No Capítulo 2 é feita a descrição dos elementos constituintes, mais relevantes, do edifício estudado. Este edifício apresenta características típicas dum edifício burguês da cidade do Porto, do século XIX. Assim, após a inspeção visual e registo fotográfico de todos os elementos, concluiu-se que os pavimentos de madeira seriam os elementos que necessitariam a maior intervenção e por isso serão o alvo deste relatório.

CAPÍTULO 1

No Capítulo 3 são abordados os estudos de diagnóstico e metodologias de intervenção referentes aos pavimentos de madeira. São aqui introduzidas noções teóricas sobre a evolução dos danos de origem não-biótica e biótica, técnicas de diagnóstico, avaliação da segurança, metodologias de intervenção, medidas de carácter estrutural relativas aos apoios, medidas de carácter estrutural de peças submetidas à flexão e os resultados obtidos através duma técnica de ensaio não destrutiva, usando o Registógrafo. Ou seja, este capítulo apresenta soluções para os casos em que os pavimentos de madeira ainda podem ser mantidos.

No Capítulo 4 é introduzida a metodologia Building Information Modeling (BIM), desta vez, aplicada à reabilitação. Era do interesse da empresa de acolhimento que esta temática fosse desenvolvida. Então, aqui são mostradas todas as fases de modelação do edifício em questão como todas as potencialidades que esta metodologia apresenta. A interoperabilidade entre programas é uma dessas potencialidades.

No Capítulo 5 é feito o dimensionamento dos pavimentos que precisavam de ser substituídos. Para isso, em primeiro lugar, são referidos todos as noções e elementos necessários ao cálculo, representados em bibliografia da especialidade e Eurocódigo 5. Por fim, e tendo em conta todo o que está exposto neste capítulo, é feito o dimensionamento de quatro vigas de madeira que integrarão o novo pavimento do edifício. Desta forma, tratando-se de vigas simplesmente apoiadas, será feita a verificação de segurança à flexão simples, ao bambeamento, ao corte e aos Estados Limites de Utilização.

No Capítulo 6 é apresentada a solução final para cada pavimento, baseada na experiência da empresa, nas noções adquiridas no Capítulo 3 e no resultado do dimensionamento do Capítulo 5.

Por fim, no Capítulo 7 são retiradas as conclusões gerais alcançadas com este relatório.

CAPÍTULO 2

DESCRIÇÃO DO EDIFÍCIO

2.1 GENERALIDADES

Teixeira [24] define e caracteriza a evolução tipológica dos edifícios na cidade do Porto, durante o século XIX. O edifício que foi atribuído como caso de estudo durante o estágio curricular está situado no limite Norte do Jardim de São Lázaro, é um edifício cuja construção data do século XIX e por esta razão será feita uma abordagem às suas características arquitetónicas.

No século XIX, além dos edifícios de habitação que mantêm a tipologia tradicional com várias características funcionais, surgem também os edifícios destinados somente à habitação. É também neste século que passa a ser obrigatória a construção de instalações sanitárias, normalmente adjacentes ao alçado do tardo, os edifícios crescem em altura com o aumento do pé-direito dos pisos e os logradouros passam a ser preenchidos com jardins e hortas. Estas mudanças observadas são comuns a estes dois tipos de edifícios.

As principais características tipológicas e funcionais desta nova casa apelidada de burguesa são: rés-do-chão destinado à cozinha, situada nas traseiras, e os restantes compartimentos a uma ocupação social. Nos pisos superiores estão situados os quartos e salas e no último piso, normalmente recuado ou com uma área menor que os restantes pisos inferiores, situa-se o sótão com águas furtadas. A comunicação entre os pisos continua a ser feita por uma caixa de escadas central e transversal, que se desenvolve em dois ou três lanços e é iluminada por uma claraboia, que também serve de iluminação aos compartimentos interiores.

A sistematização e padronização dos elementos construtivos das casas burguesas do Porto, alcançada durante este século, conferiu à arquitetura da cidade um carácter homogéneo contribuindo para a formação de uma imagem unitária.

De uma forma geral, a casa burguesa tem a forma de um paralelepípedo de largura variável entre os quatro e os sete metros, um comprimento variável entre os quinze e os vinte e cinco metros e uma altura, correspondente a três pisos, de sensivelmente onze metros.

Em seguida, será feita a descrição do edifício, onde serão feitas referências aos elementos constituintes desta casa típica burguesa do século XIX.

2.2 DESCRIÇÃO DO EDIFÍCIO

O edifício apresenta uma tipologia que corresponde à típica casa burguesa do Porto, do século XIX. O edifício encontrava-se dividido interiormente, ou seja, na realidade eram duas habitações separadas. O dono-de-obra comprou essas duas habitações e pretende convertê-las num só edifício. Assim, respeitando a maior parte da arquitetura original, mas respeitando os requisitos regulamentares exigidos, será transformado e adaptado para albergar um hostel com uma vertente ecológica. Cada habitação tem de largura aproximada de 5,75m e o comprimento máximo de 28,3m. Estas dimensões são as dimensões típicas das casas burguesas do Porto. A cota da cumeeira do edifício está a uma altura de aproximadamente 17,50m, e é constituído por rés-do-chão e três andares, sendo o último águas-furtadas. De seguida será feita referência aos elementos, constituintes do edifício, mais importantes para o trabalho em questão. Este registo fotográfico decorreu em julho de 2017.

2.2.1 Localização

O edifício está situado no Passeio do Jardim de São Lázaro, a Norte deste jardim, e encontra-se inserido numa zona de construção consolidada. O Jardim de São Lázaro é o jardim municipal mais antigo da cidade do Porto. A sua inauguração data de 1834 e enquadrou-se numa política camarária de ajardinamento de espaços públicos, bem inseridos na malha urbana.

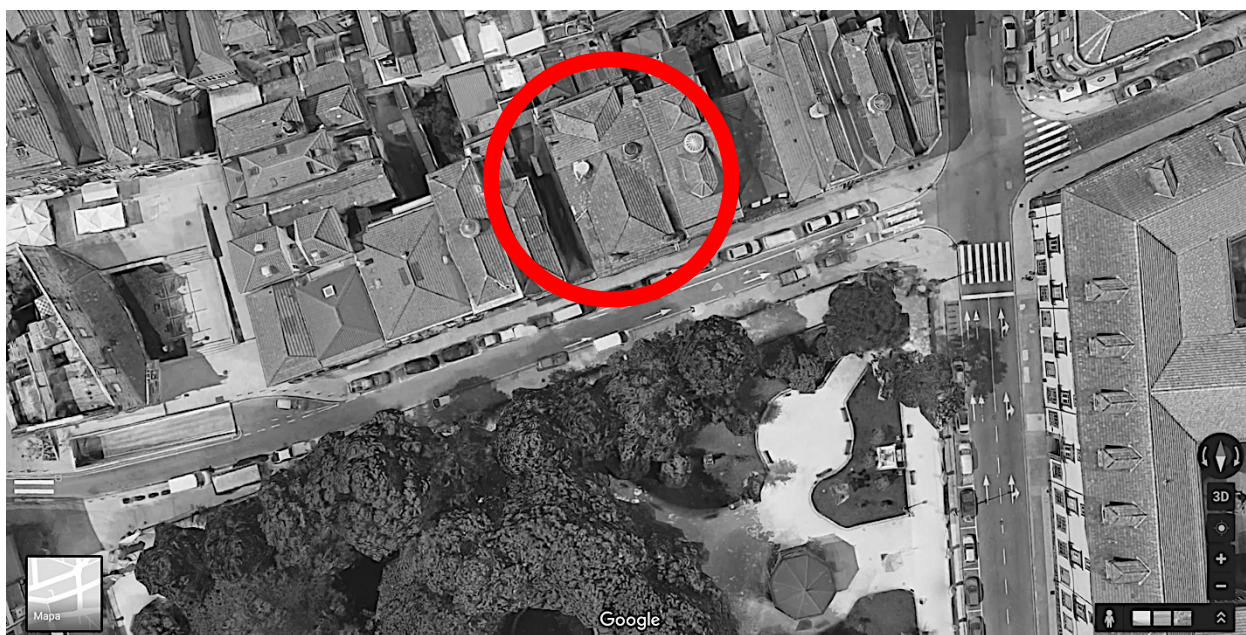


Figura 2.1 – Vista aérea do edifício (Google Maps, Julho 2017).

2.2.2 Fundações

Relativamente às fundações, pode-se considerar que a largura e profundidade determinada para as fundações, embora de forma empírica, estão diretamente dependentes das qualidades do terreno onde se implanta o edifício. Segundo Córias [4], em muitas zonas do Porto as fundações alcançam profundidades muito reduzidas, por se encontrarem sobre afloramentos rochosos. Contudo, quando o terreno é de baixa resistência e compacidade (como acontece na proximidade dos cursos de água), as fundações assentam sobre estacaria de madeira.

Apesar da visita à obra, não foi possível perceber qual a solução de fundações adotada, para este edifício. Por isso, e como o edifício se enquadra no grupo de edifícios burgueses do século XIX, é natural que as fundações sejam semelhantes ao anteriormente descrito.

2.2.3 Paredes exteriores

Fachada e fachada de tardo

As paredes das fachadas em alvenaria de pedra, com espessuras médias de 30cm e 70cm respetivamente, formam uma estrutura contínua que assenta sobre o nivelamento estabelecido para as paredes das fundações. Estas últimas aumentam de espessura, para assim garantirem uma melhor descarga dos esforços sobre o terreno. Deste modo, a profundidade das fundações está diretamente dependente das qualidades do terreno.

São predominantemente constituídas por peças aparelhadas em cantaria, presentes nos vãos de portas e janelas sob a forma de lancis de soleiras, de parapeitos, de ombreiras e de lintéis ou vergas e ainda sob a forma de diversos elementos decorativos, tais como pilastras, frisos, cimalkas e socos.

Estas paredes de pedra apresentam sempre espessuras consideráveis, pelo facto de serem autoportantes e de grande parte da sua superfície conter aberturas. Decorrente da evolução do desenho das fachadas e das técnicas construtivas, observa-se uma progressiva harmonização entre as dimensões destas paredes e a configuração geométrica dos elementos construtivos associados aos vãos.

Estas eram revestidas pelo exterior com rebocos à base de argamassas de saibro e cal, com acabamento de estuque pintado. A partir de meados do século XIX, quando o azulejo começa a ser produzido em larga escala passa a ser o revestimento mais comum das paredes das fachadas (Figuras 2.2 e 2.3). Pelo interior, estas paredes eram revestidas por rebocos à base de argamassas de saibro, areia e cal, com acabamento de estuque pintado.

A partir do início do século XIX, as paredes das fachadas de tardo adquirem largas varandas apoiadas em cachorros de grandes dimensões, onde passaram a ser localizados os sanitários (Figuras 2.4 e 2.5). Estas

varandas eram frequentemente fechadas por marquises em estrutura de madeira, em tudo semelhante às paredes de tabique simples reforçado.



Figura 2.2 – Parede fachada principal.



Figura 2.3 – Parede fachada principal.



Figura 2.4 – Parede fachada de tardoz.



Figura 2.5 – Parede fachada de tardoz.

Tabique

As paredes dos pisos acrescentados (muitas vezes águas furtadas), são construídas integralmente em tabique simples ou tabique simples reforçado. Estas são estruturalmente executadas com barrotes de madeira de pinho, dispostos em forma de trama, revestido por um duplo tabuado de madeira. A Figura 2.6 mostra a parede em tabique reforçado das águas furtadas, sem revestimentos e já com a cobertura intervencionada. O revestimento e acabamento exterior mais comuns destas paredes são as placas de ardósia ou em chapa zincada ondulada. Tal como as paredes de alvenaria, pelo interior, estas eram revestidas por rebocos à base de argamassas de saibro, areia e cal, com acabamento de estuque pintado (Figura 2.7).



Figura 2.6 – Parede em tabique das águas furtadas.



Figura 2.7 – Parede interior em alvenaria de pedra.

Meação em alvenaria

As paredes de meação em alvenaria de pedra granítica, têm espessuras médias de 30cm e 70cm respetivamente, formam uma estrutura contínua que assenta sobre o nivelamento estabelecido para as paredes das fundações. Estas paredes aumentam de espessura nos pisos inferiores, para assim garantirem uma melhor descarga dos esforços sobre o terreno. Deste modo, a profundidade das fundações está diretamente dependente das qualidades do terreno.



Figura 2.8 – Parede de meação em alvenaria de pedra granítica.



Figura 2.9 – Parede de meação em alvenaria de pedra granítica.

Pelo interior, estas paredes eram revestidas por rebocos à base de argamassas de saibro, areia e cal, com acabamento de estuque pintado. Pelo exterior, as partes expostas destas paredes tinham como camada exterior de proteção a chapa zincada ondulada, no final do século.

Também podem existir paredes de meação em tabique, mas as paredes de meação deste edifício eram todas em alvenaria de pedra granítica.

2.2.4 Pisos

A madeira devido às suas dimensões variáveis e ao ser parte essencial no sistema construtivo das habitações, influenciou o tamanho dos elementos construtivos e por consequência a dimensão das casas.



Figura 2.10 – Vigas de madeira de secção circular, constituintes dum pavimento inacessível.



Figura 2.11 – Pormenor duma viga de madeira com a face superior aparada.



Figura 2.12 – Pormenor de vigas de madeira com as quatro faces falqueadas.



Figura 2.13 – Pormenor de vigas de madeira com as quatro faces falqueadas.

Podemos assim concluir que a estrutura dos pisos ou sobrados é constituída por um vigamento de troncos de madeira, com diâmetros que variam maioritariamente entre os 20 e os 30cm e comprimentos que dependem da altura das árvores, nunca ultrapassando os 7m (Figura 2.10).

As vigas de madeira apresentam-se aparadas ou falqueadas em duas faces, para receberem os revestimentos do pavimento e do teto (Figura 2.11), podendo em alguns casos, junto às paredes das

fachadas, serem utilizadas vigas falqueadas em quatro faces (Figuras 2.12 e 2.13). Para estes elementos alcançarem uma maior longevidade, antes da sua colocação, os topos das vigas pintados com tinta de óleo, zarcão ou alcatrão, para a sua proteção.

O vigamento encontra-se apoiado nas paredes de meiação, com uma profundidade de cerca de dois terços da espessura destas paredes, chegando, nalguns exemplos, a apoiar-se em toda a sua espessura. As vigas de madeira são dispostas paralelamente entre si, com afastamentos que variam maioritariamente entre os 50 e os 70cm. Esta modulação começa e termina com uma viga encostada às paredes das fachadas. Todo o vigamento é travado por tarugos espaçados em média cerca de 1,5m.

Contudo, mas não sendo a regra, o vigamento não assenta diretamente nas paredes de meiação, mas sobre um frechal corrido, embutido na alvenaria, permitindo desta forma uma melhor distribuição das cargas.

Todas as vigas de madeira maciça que constituem os pisos são em madeira de castanho.

Pavimentos

Os pavimentos são revestidos por um tabuado (soalho) em madeira de pinho, de espessuras que variam entre 2,5 e os 5cm, largas entre os 12 e 13cm e comprimentos que podem alcançar os 8m (Figura 2.14).

Na sua forma de execução tradicional, as tábuas de soalho, depois de assentes, unidas por encaixe (em forma de macho-fêmea ou meia madeira) e pregadas ao vigamento, eram afagadas manualmente a fim de se obter uma superfície uniforme. Posteriormente eram enceradas, de modo a aumentar o seu embelezamento e a garantir a sua proteção e conservação (Figura 2.15).



Figura 2.14 – Pormenor do pavimento de madeira.



Figura 2.15 – Pavimento de madeira degradado.

O tratamento da madeira é fundamental para assegurar a sua longevidade. Isto porque, na maioria das vezes, os pavimentos são dos elementos mais degradados dos edifícios por reabilitar. Este facto deve-se à maior utilização destes elementos comparativamente a outros elementos do edifício.

Tetos

As Figuras 2.16, 2.17, 2.18 e 2.19 representam exemplos dos tetos presentes do edifício.

Os tetos que inicialmente eram revestidos por um tabuado, a partir de meados do século XVIII, passam a ser estucados com variados motivos decorativos. A qualidade e quantidade destes motivos decorativos eram muitas das vezes um barómetro da qualidade da construção geral do edifício.



Figura 2.16 – Teto sem revestimento.



Figura 2.17 – Teto ainda estucado.



Figura 2.18 – Pormenor do teto fasquiado e parcialmente estucado, no rés-do-chão.



Figura 2.19 – Pormenor do teto tabuado e parcialmente estucado, na zona da caixa de estacas.

De um modo geral, todos os tetos deste edifício são constituídos por dois tabuados ortogonais pregados às faces inferiores das vigas de madeira, formando uma superfície regular que servirá de base ao estucamento. Estes tabuados ortogonais possuem, normalmente, secções diferentes. O aspeto regular (horizontalidade) é importante porque muitas das vezes as vigas de madeira, constituintes dos pavimentos, não têm as mesmas secções, o que impossibilitaria assegurar a regularidade do teto. O tabuado inferior é então revestido a estuque e em todas as divisões existem motivos decorativos, desde

sancas, elementos transversais a todas as divisões, até a motivos mais pormenorizados localizados ao centro dos tetos.

2.2.5 Coberturas

Os telhados típicos das casas do Porto, correspondentes ao século XIX, são maioritariamente de quatro águas, constituídos por duas vertentes principais, correspondentes às paredes de meiação.

A partir de meados do século XIX, a divulgação da telha Marselha, plana, com encaixes e permitindo pendentes acentuadas, vem incentivar a construção de telhados de duas águas, com pendentes no sentido frente-traseiras (Sul-Norte), possibilitando assim um maior aproveitamento dos seus vãos. A estrutura do telhado é constituída por asnas, apoiadas nas paredes de meiação e espaçadas entre si cerca de 3m, podendo este ritmo ser interrompido pela localização da claraboia.

A utilização de coberturas com duas águas vulgarizou-se com a aplicação da telha tipo Marselha, que possibilitou o aumento das pendentes das vertentes, facilitando assim um maior vão da cobertura.

Neste caso em concreto existe uma mistura, ou seja, a cobertura principal é de duas águas, com pendentes no sentido frente-traseira e depois as coberturas das águas furtadas (frente e traseira) são coberturas de três águas (Figura 2.1).

Mirantes e águas furtadas

A construção de águas furtadas e mirantes apresenta uma prática frequente, quer durante a construção da casa, quer futuramente, constituindo por isso uma característica intemporal das casas do Porto.

A estrutura das paredes das trapeiras e mirantes é de construção idêntica à das paredes de tabique simples dos pisos recuados dos acrescentos. As suas coberturas são igualmente baseadas no princípio de construção dos telhados de quatro águas, embora de menores dimensões. Neste caso em concreto, a cobertura das águas furtadas é de três águas.

Claraboias e chaminés

As claraboias podem ser redondas ou ovais (Figura 2.20) e quadradas ou retangulares. Pelo interior, as claraboias eram revestidas da mesma forma que as restantes paredes da casa e, pelo exterior, podiam ser revestidas por telha caleira, chapas de zinco. Neste caso em concreto, as claraboias são redondas, com estrutura em tabique e rebocadas interiormente como as paredes interiores. As duas claraboias, que o edifício possui, estão situadas nas zonas das caixas de escadas, providenciando luz natural para as divisões interiores do edifício (Figura 2.21). Exteriormente estão revestidas com chapas de zinco.

As chaminés não são um elemento particularmente característico das casas do Porto, aparecendo sempre discretas, próximo ou no prolongamento, das fachadas de tardoz.



Figura 2.20 – Claraboia, vista inferior.

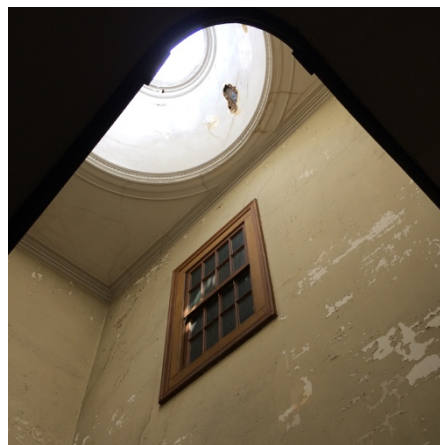


Figura 2.21 – Claraboia, vista inferior.

2.2.6 Paredes interiores

As Figuras 2.22, 2.23, 2.24 e 2.25 são exemplos de paredes interiores constituintes do edifício a ser reabilitado.



Figura 2.22 – Parede da caixa de escadas.



Figura 2.23 – Pormenor de uma parede divisória interior.

As paredes interiores, de compartimentação e da caixa de escadas, são construídas em tabique simples ou tabique simples reforçado. Embora sejam raros os exemplos, é possível encontrar paredes da caixa de escadas em alvenaria de pedra, ao nível do piso do rés-do-chão.

As paredes interiores de compartimentação têm dimensões que variam dos 10cm aos 25 cm e as da caixa de escadas têm dimensão constante ao longo dos pisos de 18cm. Como revestimento estas paredes são rebocadas com estuque pintado. Contudo, em algumas divisões é observada a aplicação papel de parede.



Figura 2.24 – Paredes divisórias interiores desmanteladas.



Figura 2.25 – Pormenor de uma parede divisória interior.

2.2.7 Escadas interiores

As escadas interiores de madeira têm dois lanços, com um patamar intermédio, entre pisos. Todos os seus componentes são contruídos em madeira. As duas escadas do edifício serão restauradas e integradas no projeto final de reabilitação (Figuras 2.26 e 2.27).

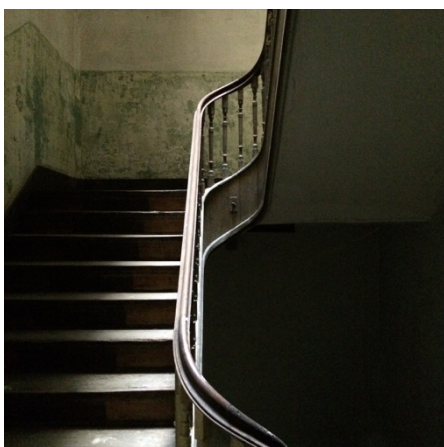


Figura 2.26 – Escadas interiores, tipo pescoço de cavalo em madeira.



Figura 2.27 – Escadas interiores.

CAPÍTULO 3

ESTUDO DE DIAGNÓSTICO E METODOLOGIAS DE INTERVENÇÃO

3.1 A IMPORTÂNCIA DO ESTUDO DE DIAGNÓSTICO

Num processo de reabilitação de edifícios existentes é imprescindível avaliar o seu estado atual para que seja possível propor soluções que permitam atingir o desempenho desejado. A reabilitação deve ser adaptativa, assim, como não devem existir estratégias pré-definidas, é necessário um diagnóstico específico e fundamentado, caso a caso, que permita propor uma metodologia técnica e economicamente adequada.

Por exemplo, relativamente aos pavimentos de madeira, a correta avaliação do estado e do comportamento estrutural dos pavimentos de madeira existentes é o primeiro passo a dar, quando se pretende que sejam preservados.

3.2 COMPORTAMENTO DAS ESTRUTURAS DE MADEIRA

3.2.1 Danos de origem não-biótica

As causas de origem não-biótica que podem provocar danos nas peças de madeira são os agentes atmosféricos (radiação solar e chuva) e o fogo.

Ação da radiação solar

A madeira, quando exposta à luz solar, sofre uma mudança de cor. A radiação ultravioleta, da luz solar, degrada os componentes da madeira começando pela lignina¹. Esta ação traduz-se no escurecimento superficial da madeira. Em contacto com a água da chuva, os produtos que resultam da degradação são eliminados pela água, restando, assim, a celulose, menos sensível às radiações solares. As células externas podem recobrir-se lentamente com bolores, que vivem da humidade da madeira e dos produtos da

¹ A lignina é uma molécula tridimensional amorfa observada nas plantas terrestres, em associação com a celulose na parede celular, de natureza polimérica e tridimensional, com finalidade de conferir rigidez, impermeabilidade e resistência contra ataques biológicos aos tecidos vegetais.

fotodegradação², dando à superfície uma coloração acinzentada e preta. Na prática, a água e o sol atuam de forma combinada, e em conjunto contribuem para o aparecimento de mais efeitos.

Não obstante, a degradação da madeira exposta à intempérie é muito lenta. A perda da camada superficial de madeira é pequena. Esta perda varia em função do clima e orientação a que está exposta e da espécie de madeira.

Ação da água

A água presente na superfície da madeira sem proteção é absorvida rapidamente devido à capilaridade da sua superfície. O vapor de água é absorvido diretamente por absorção das paredes das células e devido à diferença de humidade, entre o interior e a camada superior, a madeira aumenta de volume, inchando.

O efeito da água da chuva combinado com a radiação solar constitui a principal causa de deterioração da superfície da madeira. Contudo, deve considerar-se que este deterioramento superficial não afeta, significativamente, as propriedades mecânicas da madeira.

Ação do fogo

Para a determinação da capacidade resistente das peças de madeira, depois do incêndio, pode surgir o seguinte planeamento: proceder-se à limpeza da superfície carbonizada até deixar à vista a superfície de madeira sã. Se a espécie for conhecida, pode ser classificada para se determinar a sua qualidade estrutural e, portanto, a sua resistência.

Os pontos mais críticos numa estrutura de madeira, em caso de incêndio, são as suas uniões e principalmente aquelas que contêm elementos metálicos. Os elementos de fixação tipo cavilha, como a utilização de pernos, constituem caminhos fáceis para a entrada do calor para o interior da secção. Também as arestas nas zonas de encontro entre peças podem sofrer o avanço mais rápido do fogo.

O Eurocódigo 5 Parte 1.2 (EC5-1.2) é relativa a estruturas de madeira, em situação de incêndio.

Efeito da idade do material na estrutura

Arriaga [1] afirma, baseado em estudos previamente feitos, que a idade da madeira não tem especial importância na variação da sua resistência. A perda de resistência que se pode encontrar em alguns casos está relacionada com outras razões, tal como a existência de agentes bióticos ou o aumento das fendas das peças de madeira, aquando expostas à intempérie. Contudo, pode ser aplicado um coeficiente de modificação da resistência e da rigidez de 0,9, utilizado como margem de segurança devido às incertezas da redução das propriedades mecânicas da madeira relacionadas com a idade da estrutura.

² A fotodegradação é a decomposição ou dissociação de compostos químicos causada pela luz ou pela radiação ultravioleta.

3.2.2 Danos de origem biótica

A determinação da gravidade dos danos provocados pelos agentes bióticos na madeira de um edifício baseia-se no conhecimento do modo de vida dos organismos xilófagos que causaram a sua deterioração. É necessário conhecer a extensão e intensidade destes e a sua forma de ataque.

A extensão do ataque, de modo geral, é maior ou menor dependendo do tipo de agente xilófago. Alguns ficam limitados às zonas próximas da madeira humedecida, mas outros podem estender-se com facilidade a um local ou a todo o edifício.

Um critério conservador para estimar o seu efeito consiste em descontar a profundidade afetada às dimensões reais da secção da peça. Este desconto de uma dada profundidade está relacionado com a intensidade do ataque. Assim, pode descontar-se menos profundidade se o ataque tiver zonas sãs.

De seguida, são apresentados os modos de atuação de cada agente xilófago e o tipo de deterioração que produz e as suas consequências na estrutura. Também se incluem alguns critérios para avaliar a perda de capacidade resistente.

Fungos

Para existirem fungos é necessário existir uma percentagem superior a aproximadamente 20% de humidade. Assim, normalmente, a extensão destes ataques reduz-se às zonas das cozinhas e casas de banho defeituosas, onde esta percentagem de humidade é facilmente ultrapassada. São ataques que não se generalizam ou se estendem a grandes superfícies do edifício.

As consequências dos seus efeitos são a destruição da madeira na zona afetada. A degradação começa na destruição do borne³ da peça e posteriormente termina afetando o cerne⁴. No caso das vigas apoiadas sobre muros traduz-se na perda de secção nos apoios.

Outro local onde normalmente ocorre esta degradação é nos nós das peças de madeira, da estrutura de cobertura. As infiltrações na cobertura humedecem a estrutura de madeira e a água tende a reter-se nas zonas das uniões e nós.

É natural que com os fungos se encontre a atividade de insetos de ciclo larvário.

Insetos de ciclo larvário

³ O borne é o conjunto das camadas exteriores do tronco, de menor qualidade e apresenta uma cor geralmente mais clara comparativamente ao cerne.

⁴ O cerne é o conjunto de camadas interiores do tronco, da árvore em crescimento.

Os insetos de ciclo larvário produzem danos durante a fase de larva em que esta se alimenta da madeira, realizando galerias no seu interior. De modo geral estas galerias situam-se na zona do borne e raramente passa para o cerne. Quando se observam orifícios de saída na superfície das peças pode-se afirmar nessa peça existiu uma geração de insetos. Quanto mais orifícios, mais gerações possivelmente habitaram essa peça de madeira.

Térmitas

A extensão dum ataque de térmitas pode chegar a ser muito grande, se a condições de humidade o permitirem. Normalmente a forma de avanço do ataque é em forma piramidal, com a base no solo. Os danos iniciam-se na madeira que se encontra no piso inferior tendendo a diminuir ascendentemente. Caso a infestação tenha origem em edifícios contíguos, a sua transmissão varia.

As térmitas alimentam-se do borne da madeira da maioria das espécies coníferas e folhosas. A destruição da camada de borne, em estados avançados, chega a ser praticamente completa. É frequente, também, que os ataques não sejam homogéneos em toda a estrutura, assim, algumas peças podem ficar totalmente destruídas internamente, mas outras que se encontram ao seu lado estão intactas. De certa maneira, a evolução dos danos nas zonas afetadas pelas térmitas deve fazer-se inspecionando cada uma das peças da estrutura, devido à grande variedade da sua ocorrência.

3.2.3 Técnicas de diagnóstico

Freitas [16] aconselha que antes de se propor qualquer solução de intervenção numa estrutura existente, há que elaborar um diagnóstico cuidado da estrutura existente. Então, é necessário realizar um levantamento arquitetónico e estrutural cuidados, aliado a um rigoroso reconhecimento visual exterior e alguns ensaios que permitam avaliar com segurança o estado de segurança.

Negrão [20] mostra que o sistema europeu de classificação de madeiras em classes de qualidade baseia-se nas quatro normas da série EN 14081:

- EN 14801.1 – Timber Stuctres – Strength graded structural timber with rectangular cross section – Part 1 – General requirements;
- EN 14801.2 – Timber Stuctres – Strength graded structural timber with rectangular cross section – Part 2 – Machine grading: additional requirements for initial type testing;
- EN 14801.3 – Timber Stuctres – Strength graded structural timber with rectangular cross section – Part 3 – Machine grading: additional requirements for factory production control;
- EN 14801.4 – Timber Stuctres – Strength graded structural timber with rectangular cross section – Part 3 – Machine grading – grading machine settings for machine controlled systems.

Estas quatro normas definem as regras gerais de classificação de madeiras, visual e mecânica, para uso estrutural. Estes apresentam-se como os dois métodos atualmente disponíveis para a classificação de madeiras.

A nível nacional, existem sistemas de classificação visual de madeiras, aplicáveis apenas a um conjunto reduzido de espécies. Estas normas definem classes de qualidade associadas à limitação de defeitos:

- A norma alemã DIN 4074.1, aplicável a madeiras de resinosas de pinho, abeto e cipreste;
- A norma nórdica INSTA 142, aplicável às mesmas resinosas da norma alemã, acima referidas;
- A norma espanhola UNE 56544, aplicável a diversas espécies de pinho espanhol;
- A norma francesa B52-001, aplicável a madeira de carvalho;
- A norma portuguesa NP 4305, aplicável a madeira de pinho bravo português.

Na avaliação da segurança de estruturas antigas, é também fundamental relacionar as lesões e defeitos resultantes do uso com os esforços a que as peças estão sujeitas, de modo a poder avaliar se esses defeitos são críticos, face aos esforços a que as peças irão estar sujeitas.

E para terminar, é fundamental descobrir as fendas resultantes de roturas provocadas por esforços mecânicos, muitas vezes resultantes de erros humanos de utilização, falhas nas ligações ou falhas pontuais de elementos estruturais.

Metodologia baseada na classificação visual

A classificação visual da madeira é estabelecida através da apreciação das características, dos defeitos associados à sua estrutura, a forma como foi cortada e as alterações verificadas.

Esta técnica de classificação apresenta vantagens e desvantagens na sua aplicação:

- É uma técnica simples e de fácil compreensão, só implicando, no entanto, uma preparação prévia do operador;
- Carece de falta de objetividade e rigor, que depende sobretudo do classificador;
- É segura para o cliente, mas ineficiente para o produtor. Esta classificação visual subestima a qualidade resistente da madeira. Para minimizar este facto, é usual combinar a classificação visual com métodos não destrutivos de determinação da resistência;
- Tem de ser feita peça a peça, e com alguma rapidez para ser economicamente viável;
- Não necessita de utilização de equipamentos dispendiosos, e permite a confirmação de resultados em qualquer altura.

Identificação da espécie da madeira

A resistência dum peça de madeira depende de vários fatores. Entre eles, logicamente, encontra-se a espécie da madeira em que está construída. Em construções antigas é frequente encontrar as seguintes espécies:

- Coníferas: pinheiro bravo e pinho larício;
- Folhosas: carvalho, castanho, ulmo, faia e choupo.

Algumas espécies de árvores folhosas são possíveis de serem identificadas a olho nu ou com uma lupa. No entanto, às vezes isso não é suficiente e é necessário recorrer-se a um laboratório especializado que realize análises microscópicas a partir de amostras de madeira.

Na prática, as espécies de pinho, para a mesma qualidade apresentam propriedades mecânicas idênticas, o que simplifica em parte o problema. As variações de resistência devidas à qualidade da madeira são de uma ordem muito superior à variação que pode existir em função da espécie.

Qualidade da madeira

A qualidade da madeira, no ponto de vista da resistência, evolui em função da qualidade e do tamanho dos defeitos presentes nas peças (nós, fendas, desvio das fibras, etc.). Esta avaliação efetua-se mediante uma inspeção visual de acordo com uma norma de classificação.

Supondo que se pode solucionar este problema, uma vez que se conhece a espécie da madeira e a sua qualidade, pode-se atribuir às peças de madeira uma determinada classe resistente. Portanto, é recomendável que se atue com prudência ou de maneira conservadora no uso deste procedimento. Inclusive, é normal que dentro do mesmo edifício estejam presentes diferentes espécies de madeiras de diferentes qualidades, o que dificulta a atribuição de uma classe.

Por exemplo, a norma portuguesa *NP 4305: Madeira serrada de pinho bravo para estruturas (1995)* classifica o pinho quanto à sua qualidade. Dependendo das características e defeitos da madeira, esta norma apresenta duas classes de qualidade possíveis para o pinho: Classe de Qualidade E (Estruturas) e Classe de Qualidade EE (Especial para Estruturas).

A *Especificação M2: Pinho bravo para estruturas (1997)*, do LNEC, relaciona as Classes de Qualidade com as Classes de Resistência e demonstra que a Classe de Qualidade EE corresponde a uma Classe de Resistência C35 e a Classe de Qualidade E corresponde a uma Classe de Resistência C18. As Classes de Resistência podem ser consultadas na norma *EN 338 (1995)*.

Tabela 3.1 – Relação entre classes de qualidade e classe de resistência.

Espécie da Madeira	Classe de Qualidade (Norma)	Classe de Resistência
Pinho Bravo (Pinus Pinaster Ait.)	E (NP 4305)	C18

A classificação de madeiras permite definir genericamente a qualidade da madeira estrutural e permite definir os principais parâmetros definidores das características físicas e de resistência das peças estruturais em madeira. Constitui, assim, uma metodologia essencial de credenciação do processo construtivo das estruturas de madeira. A classificação faz, igualmente, com que a especificação em projetos seja mais fácil, e a relação preço qualidade muito mais clara.

Ao projetista bastará assim apenas usar os valores definidos na norma *EN 338 (1995)*, tendo o cuidado de escolher classes de resistência a que correspondam produtos disponíveis no mercado em que opera. Por exemplo, em Portugal, as classes de resistência mais comuns são a C18, C24 e D30.

Técnicas de inspeção corrente

Para se realizar a inspeção da madeira deve aceder-se ao local com roupa adequada e munir-se preferencialmente de alguns dos seguintes utensílios, consoante o tipo de estrutura que madeira a ser inspecionada:

- Caderno e lápis para tirar notas e fazer esboços;
- Lanterna ou foco de luz;
- Medidor de humidade;
- Lupa e espelhos refletores;
- Martelo com cabeça larga;
- Punção, chave de parafusos e formão;
- Berbequim elétrico;
- Pincéis para limpar a madeira;
- Câmara fotográfica;
- Óculos, máscara de pó, capacete;
- Outras ferramentas (como por exemplo: pé-de-cabra);
- Andaimos e escadas de acesso seguros.

Técnicas de ensaio não-destrutivas

Negrão [20] afirma que a classificação mecânica é um processo, tal como o nome indica, no qual a madeira é classificada por um sensor de uma máquina, num processo não destrutivo, onde são determinadas uma

ou mais propriedades (usualmente o módulo de elasticidade), não sendo necessário recorrer a inspeção visual. Através do ensaio, a madeira é classificada em classes, às quais podem ser ligadas valores característicos de resistência, massa volúmica e rigidez, entre outros.

As técnicas de ensaio não-destrutivas incluem:

- a. Resistógrafo;
- b. Ultrassons (métodos de ecos, de ressonância ou de transmissão);
- c. Georradar;
- d. Método das vibrações induzidas;
- e. Medição da densidade superficial – Pylodin;
- f. Deteção acústica de insetos xilófagos;
- g. Radiografia (raios X e raios γ);
- h. Dendrocronologia/Carbono 14 (datação da madeira).

a. Resistógrafo

O Resistógrafo é um aparelho que perfura as peças de madeira, avaliando a sua resistência, em função da energia despendida na perfuração, a uma velocidade constante.

É um método de inspeção não destrutivo bastante interessante para estruturas com interesse patrimonial, pois as perfurações que realiza são quase impercetíveis e sem qualquer influência na resistência mecânica da peça, permitindo assim detetar defeitos internos, variações de densidade e secções dos elementos estruturais, quando tal não é possível medir ou avaliar visualmente de forma direta.

Os valores retirados do resistógrafo são relacionáveis com as suas propriedades mecânicas, tais como a densidade ou massa volúmica (ρ), o módulo de elasticidade na direção do fio (E_0) e a resistência à flexão ($f_{m,k}$). Assim, de forma a ser possível extrair informação quantitativa da inspeção por este método, torna-se necessário estabelecer correlação numérica, em função de cada espécie.

b. Ultrassons

Este método é um dos ensaios não destrutivos mais utilizados na inspeção de estruturas de madeira e consiste na estimativa do módulo de elasticidade dinâmico, com base na relação de velocidade de propagação de ondas acústicas e as propriedades elásticas da madeira. Em função da espécie em análise, é possível correlacionar o seu valor com o módulo de elasticidade estático e com a resistência mecânica do elemento de madeira ensaiado.

c. Georradar

O Georradar é uma técnica geofísica de alta resolução utilizada para a análise não destrutiva de materiais, mas que na área de inspeção de estruturas de madeira ainda está num período de desenvolvimento inicial. O funcionamento deste método baseia-se na análise da propagação de ondas eletromagnéticas, emitidas por impulsos de curta duração, sendo posteriormente captadas por antenas.

d. Método de vibrações induzidas

Este método consiste na medição da velocidade de propagação de ondas de choque ao longo das fibras de madeira, podendo ser um bom indicador das suas propriedades mecânicas. Conhecendo-se a geometria e valores de propriedades mecânicas de peças de madeira da mesma espécie, previamente ensaiadas, é possível estabelecer-se correlações que permitam obter parâmetros como o módulo de elasticidade e a massa volúmica, entre outros. Da mesma forma, e uma vez que as ondas de choque se propagam mais rapidamente em madeira sã do que em madeira degradada, é possível identificar podridões, defeitos e vazios interiores, tal como na técnica de medição de velocidade de propagação de ultrassons.

e. Medição da densidade superficial - Pylodin

A medição da densidade superficial da madeira constitui uma técnica de inspeção não destrutiva de muito fácil utilização, sendo a mesma realizada por um aparelho denominado de *Pylodin*. Este consiste num cilindro metálico, constituído no seu interior por uma barra metálica circular de 2,5mm, a qual é introduzida na madeira por impacto, com determinada energia. Em função da profundidade (máximo 40mm) é possível estabelecer relações com a dureza da madeira na direção transversal e, conseqüentemente, com a sua massa volúmica.

f. Detecção acústica de insetos xilófagos

Como a sua designação induz, esta técnica consiste na utilização de aparelhos para a deteção de insetos xilófagos, nomeadamente térmitas e carunchos, pela captação e amplificação das ondas sonoras que estes produzem durante a sua atividade, as quais se propagam através das fibras de madeira.

g. Radiografia – Raios X e Raios γ

O uso de Raios X na inspeção de estruturas de madeira começou a partir de 1960. O método baseia-se na transmissão de energia radiográfica através do material a inspecionar, sob a forma de Raios X, fornecendo uma imagem da sua constituição. Uma vez que a densidade do material condiciona a quantidade de radiação que o atravessa, o resultado consiste num esquema bidimensional da variação de densidade do elemento atravessado.

Devido ao seu custo elevado e à problemática da transmissão de radiação, esta técnica foi progressivamente substituída pela radiografia por Raios γ . Esta apresenta menor perigosidade devido ao tipo de radiações que utiliza e menor custo e fornece uma imagem do elemento em análise, quase como uma câmara de filmar, isto é, em tempo real.

h. Dendrocronologia

A dendrocronologia consiste numa metodologia de inspeção a partir da qual se consegue apurar, com grande precisão, a idade de determinado elemento estrutural de madeira. O fundamento do método consiste na análise dos anéis de crescimento da madeira, a partir dos quais, e com base no estudo das características específicas da espécie em questão, é possível inferir o tempo de vida do elemento inspecionado.

Esta técnica fornece informação qualitativa com grande utilidade na avaliação da capacidade resistente de elementos estruturais, nomeadamente na compreensão de fenómenos de fadiga e de fluência. Contudo, é uma técnica mais utilizada em estruturas antigas com valor patrimonial, histórico e artístico.

3.2.4 Resultados obtidos das vigas ensaiadas

Nesta inspeção feita à obra (julho de 2017), o meio de inspeção mecânico utilizado foi o resistógrafo. O resistógrafo é um instrumento que relaciona a energia despendida pela penetração, a velocidade constante, de uma broca de pequeno diâmetro num elemento de madeira, com a resistência que o elemento oferece à penetração. Este ensaio permite avaliar as zonas dos elementos de madeira em mau estado de conservação, ou seja, que apresentam degradações, podridões ou vazios internos.

Os ensaios com o uso do resistógrafo foram executados nas vigas dos pavimentos de madeira, que à partida, através de uma análise visual prévia, apresentavam condições razoáveis para serem mantidas durante a reabilitação do edifício (Figuras 3.1 e 3.2). Ou seja, não apresentavam grandes vestígios da presença de danos de origem biótica ou não-biótica. Os ensaios foram realizados nas zonas dos apoios das vigas, por estas serem, normalmente, as mais degradadas devido à presença de uma maior percentagem de humidade, mas também por uma razão logística, pois eram os únicos locais do pavimento a que se tinha acesso.



Figura 3.1 – Vigas a serem ensaiadas localizadas numa divisão a Sul do edifício, piso 1.



Figura 3.2 – Vigas a serem ensaiadas localizadas numa divisão a Sul do edifício, piso 1.

Antes da realização dos ensaios, deve-se proceder à inspeção visual e limpeza da superfície das vigas para que se obtenha, posteriormente, um resultado mais fidedigno. Para isso, foi usado um formão e pincel de limpeza (Figuras 3.3 e 3.4). Foi também feito o levantamento das dimensões de todas as vigas ensaiadas.

Terminadas estas tarefas, foram executados os ensaios com o recurso ao resistógrafo da marca Rinntech, modelo 4453-P (Figura 3.5). As vigas ensaiadas encontram-se nas divisões onde ainda será possível manter os pavimentos de madeira, pois são os que menos foram afetados por danos de origem biótica e não-biótica e que, por esta razão, existe o interesse do dono de obra e da Arquitetura para que sejam mantidos.

Durante a realização dos ensaios, o aparelho tem que estar imóvel e para não danificar a sua agulha optou-se por realizar os ensaios na vertical. Após ser colocado o mais verticalmente possível, o gatilho é disparado, e toda a secção da viga de madeira é perfurada (Figura 3.6). Este furo mede cerca de 1mm e a sua presença não influencia a capacidade resistente da viga. Após ser perfurada, o gatilho é libertado e o aparelho recolhe automaticamente a agulha.



Figura 3.3 – Inspeção e preparação da viga para a realização do ensaio.



Figura 3.4 – Limpeza da viga para a posterior execução do ensaio.



Figura 3.5 – Registógrafo modelo 4453-P, da marca Rinntech.



Figura 3.6 – Realização do ensaio.

À medida que a perfuração é feita, o aparelho regista a dureza da madeira, em profundidade a que se encontra (Figura 3.7 e 3.8). Este processo repetiu-se por onze vigas localizadas em três divisões do edifício. A Figura 3.9 representa a divisão a Sul do edifício, localizada no piso 1, onde foram realizados os ensaios números 1, 2, 3, 4 e 5. Estes ensaios estão representados na planta do piso 1 (Figura 3.12). A Figura 3.10 representa a divisão Norte do edifício, localizada no piso 1, onde foram realizados os ensaios números 6, 7, 8 e 9. Estes ensaios estão representados na planta do piso 1 (Figura 3.12). A Figura 3.11 e 3.12 representam a divisão a Norte do edifício, localizada no piso 2, onde foram realizados os ensaios números 10 e 11. Estes ensaios estão representados na planta do piso 2 (Figura 3.13).



Figura 3.7 – Obtenção do resultado do ensaio.



Figura 3.8 – Comparação de resultados dos ensaios.



Figura 3.9 – Divisão Sul no piso 1.



Figura 3.10 – Divisão Norte no piso 1.



Figura 3.11 – Divisão Sul no piso 2.



Figura 3.12 – Pormenor da divisão Sul no piso 2.

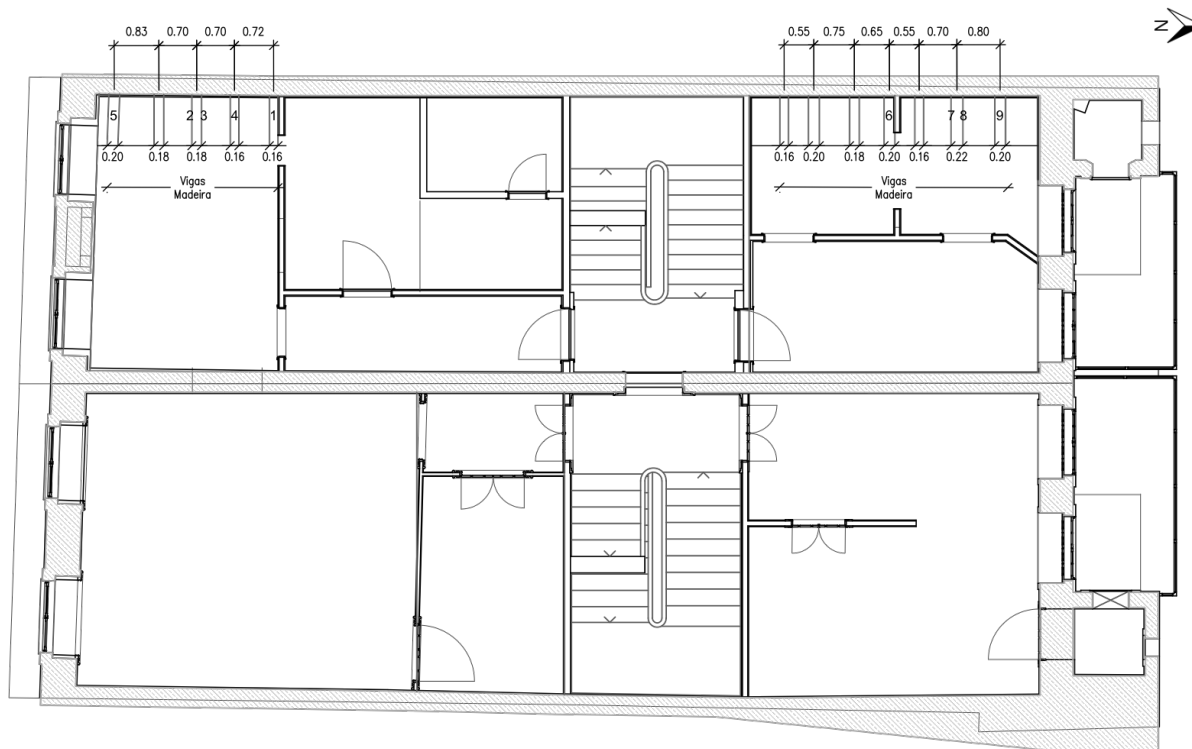


Figura 3.13 – Planta do piso 1, com os ensaios numerados de 1 a 9.

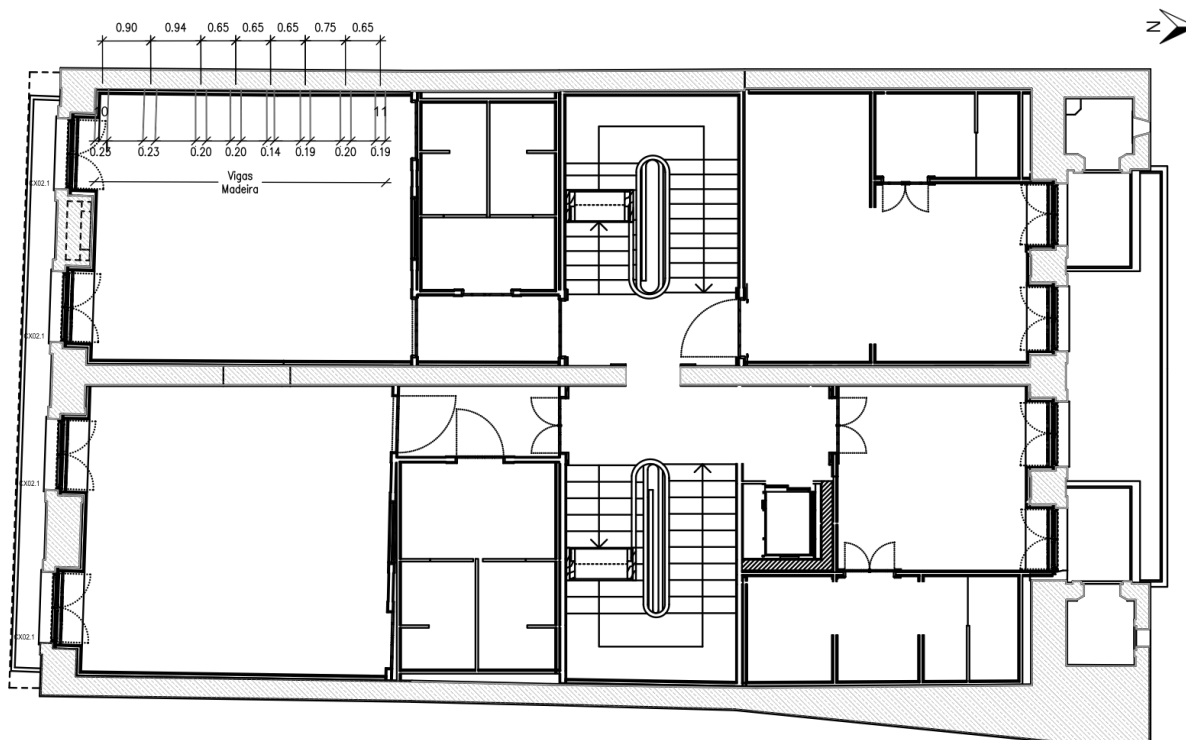


Figura 3.14 – Planta do piso 2, com os ensaios numerados de 10 a 11.

Os gráficos que se encontram a seguir são o resultado da inspeção realizada às vigas de madeira (Figuras 3.13 e 3.14). O principal objetivo desta inspeção foi a deteção do seu estado de conservação interior e verificar se haverá necessidade de serem substituídas. Através das leituras do resistógrafo é possível estimar algumas características mecânicas da madeira, avaliar o estado de conservação dos elementos estruturais e definir secções residuais úteis.

A resistência encontrada à penetração da broca de sondagem permite distinguir variações de densidade da madeira. O eixo das abcissas representa a profundidade de furação/tamanho da secção (mm). O eixo das ordenadas representa a amplitude (%) de variação do estado de conservação.

A Figura 3.15 representa o gráfico do ensaio que foi realizado numa viga de madeira, no piso 1, do edifício (Figura 3.13). Esta viga apresenta uma secção retangular de aproximadamente 16x22cm. A partir deste gráfico pode-se concluir que a viga mantém o seu estado de conservação ao longo da secção analisada pois não apresenta nenhuma variação significativa. Ou seja, aparentemente, esta viga não necessitará de adotar qualquer tipo de medida de melhoramento estrutural.

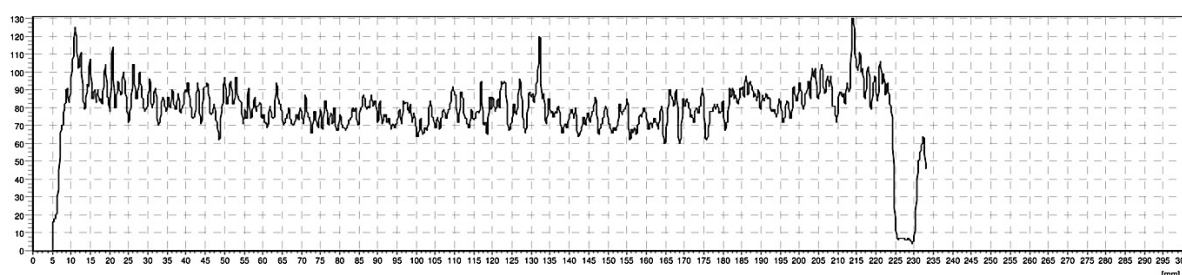


Figura 3.15 – Resistógrafo: ensaio número 1, piso 1.

As Figuras 3.16 e 3.17 representam os gráficos dos ensaios que foram realizados numa viga de madeira no piso 1 do edifício (Figura 3.13). Esta viga apresenta uma secção retangular de aproximadamente 18x24cm. A partir da Figura 3.16 pode-se concluir que a viga não apresenta uma grande variação no seu estado de conservação, excetuando a secção localizada aos 210mm onde se encontra uma zona mais frágil (grande variação). Esta zona mais frágil pode ser um defeito pontual na madeira, porque, quando analisada a Figura 3.17 (resultado dum ensaio na mesma viga, mas num ponto diferente), já não se verifica essa variação de conservação. Aparentemente não necessita duma intervenção de melhoramento estrutural, mas será sensato não excluir essa opção.

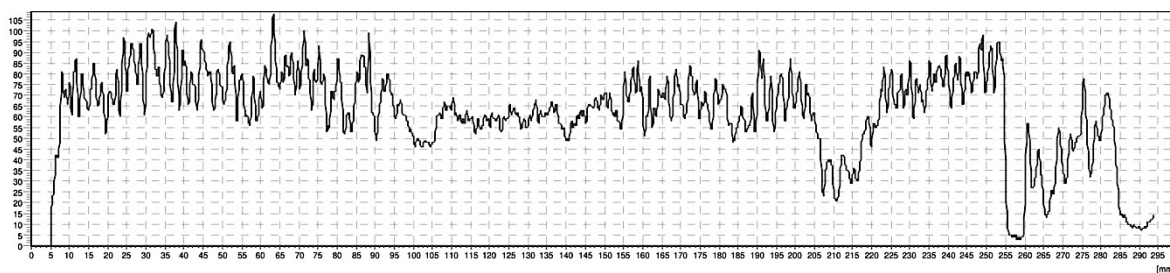


Figura 3.16 – Resistógrafo: ensaio número 2, piso 1.

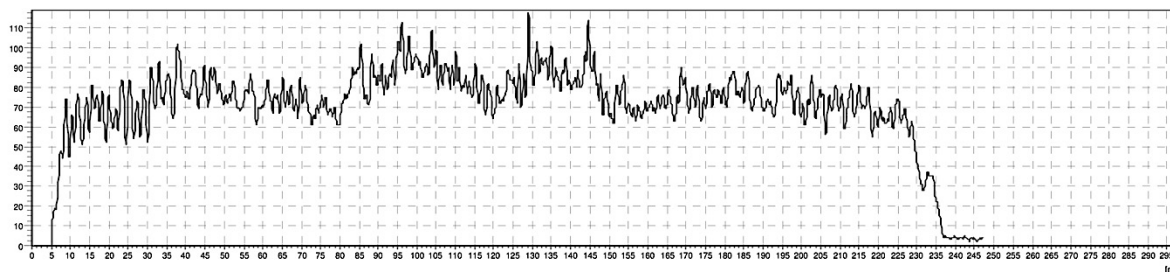


Figura 3.17 – Resistógrafo: ensaio número 3, piso 1.

A Figura 3.18 representa o gráfico do ensaio que foi realizado numa viga de madeira situada no piso 1 do edifício (Figura 3.13). Esta viga apresenta uma secção circular de aproximadamente 16cm de diâmetro. A partir deste gráfico pode-se concluir que a viga não apresenta grandes variações do seu estado de conservação.

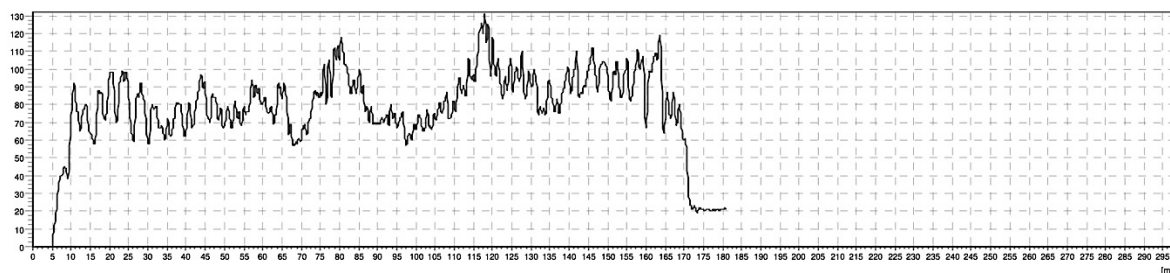


Figura 3.18 – Resistógrafo: ensaio número 4, piso 1.

A Figura 3.19 representa o gráfico do ensaio que foi realizado numa viga de madeira situada no piso 1 do edifício (Figura 3.13). Esta viga apresenta uma secção circular de aproximadamente 20cm de diâmetro. A gráfico apresenta grandes variações de resultados (aos 70mm, 107mm e 163mm) o que significa que a viga está num mau estado de conservação. Será fundamental a aplicação de medidas de melhoramento estrutural, melhorando assim a sua capacidade resistente, ou até possivelmente a sua substituição integral.

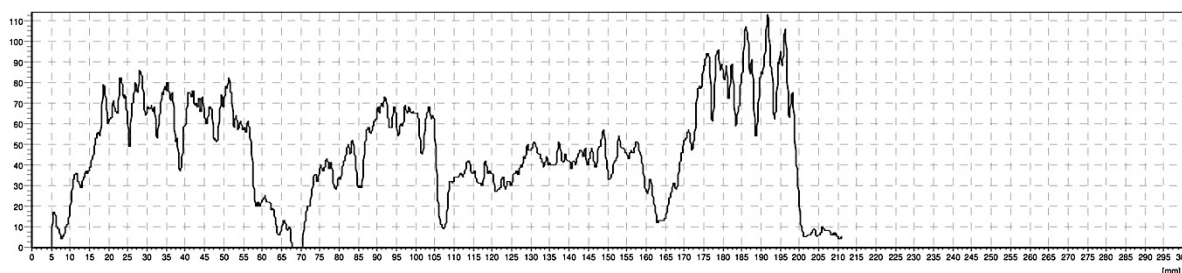


Figura 3.19 – Resistógrafo: ensaio número 5, piso 1.

A Figura 3.20 representa o gráfico do ensaio que foi realizado numa viga de madeira situada no piso 1 do edifício (Figura 3.13). Esta viga apresenta uma secção circular de aproximadamente 20cm de diâmetro. A partir deste gráfico pode-se concluir que a viga apresenta algumas variações no seu estado de conservação ao longo da furação. Esta variação pode refletir um problema no interior da viga contribuindo para um decréscimo de densidade e de capacidade resistente.

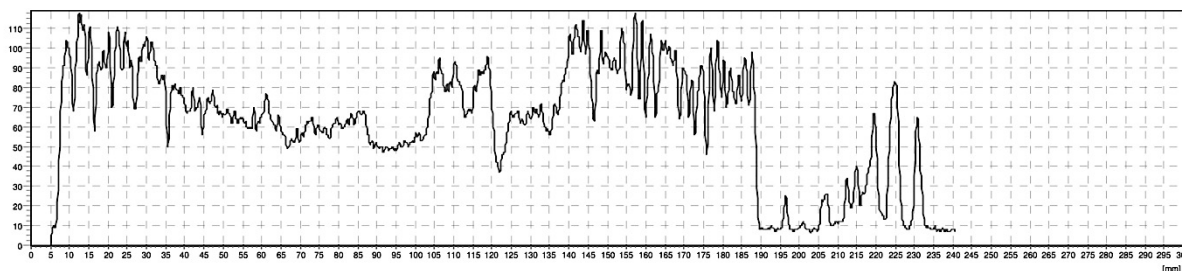


Figura 3.20 – Resistógrafo: ensaio número 6, piso 1.

As Figuras 3.21 e 3.22 representam os gráficos dos ensaios que foram realizados numa viga de madeira situada no piso 1 do edifício (Figura 3.13). Esta viga apresenta uma secção circular de aproximadamente 22cm de diâmetro. A partir da Figura 3.21 pode-se concluir que a viga apresenta interiormente uma zona em mau estado de conservação, podendo tratar-se duma zona com anomalias. Contudo, analisando também a Figura 3.22 (ensaio realizado na mesma viga, mas num ponto diferente) conclui-se que os resultados são diferentes. Ou seja, a extensão da anomalia anteriormente verificada não está representada. Assim, para que a viga possa ser mantida, pode existir a necessidade de serem adotadas medidas de melhoramento estrutural.

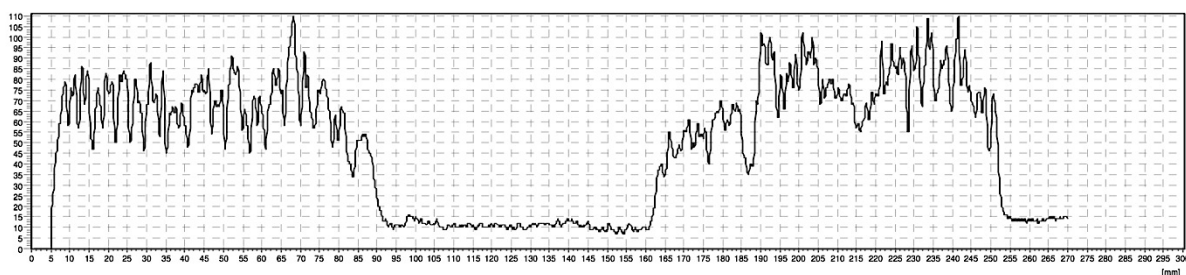


Figura 3.21 – Resistógrafo: ensaio número 7, piso 1.

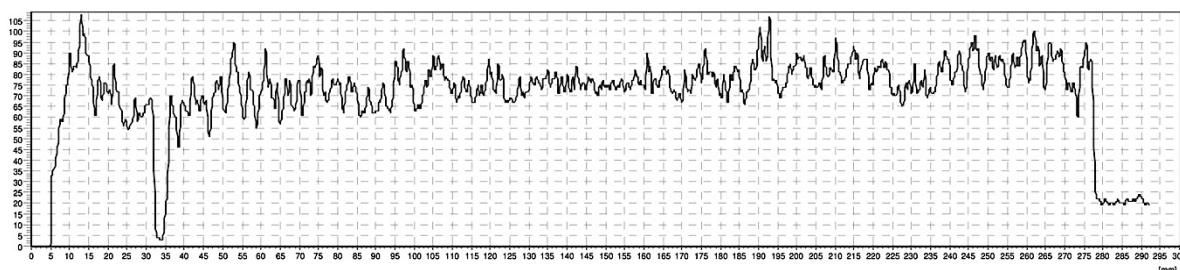


Figura 3.22 – Resistógrafo: ensaio número 8, piso 1.

A Figura 3.23 representa o gráfico do ensaio que foi realizado numa viga do pavimento de madeira situada no piso 1 do edifício (Figura 3.13) e apresenta uma secção retangular de aproximadamente 20x25cm. Esta viga encontra-se numa zona onde a presença de grandes níveis de humidade, devido a estar próxima duma deficiente rede de água, contribuiu para que a degradação (biótica e não-biótica) da sua superfície seja uma realidade. A partir deste gráfico pode-se concluir que a viga se encontra muito degradada nas suas camadas exteriores, apresentando uma secção útil bastante reduzida (praticamente só 1/3 da sua secção original). A aplicação de medidas de melhoramento estrutural ou a sua substituição integral são as opções a serem tomadas.

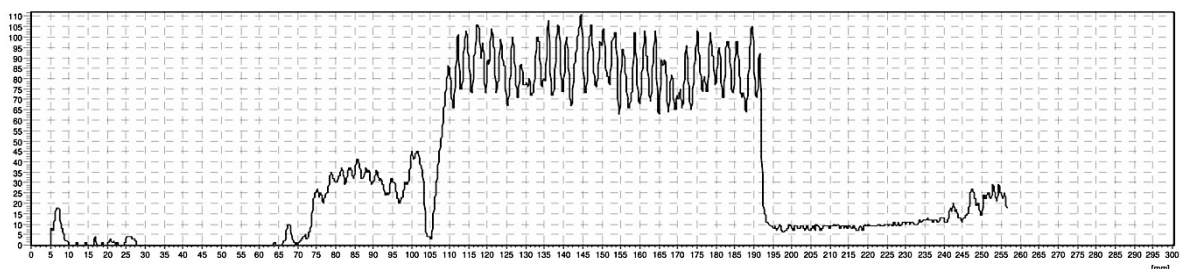


Figura 3.23 – Resistógrafo: ensaio número 9, piso 1.

A Figura 3.24 representa o gráfico do ensaio que foi realizado numa viga situada no piso 2 do edifício (Figura 3.14). Esta viga apresenta uma secção circular de aproximadamente 24cm de diâmetro. A partir da análise do gráfico, pode-se concluir que a viga apresenta interiormente uma degradação do seu estado de conservação (155mm), podendo tratando-se duma zona de defeito da madeira. Assim, para que a viga

possa ser mantida existe a necessidade de serem adotadas medidas de melhoria estrutural para que esta situação seja revertida e passe a ser alcançada a capacidade de resistente desejada.

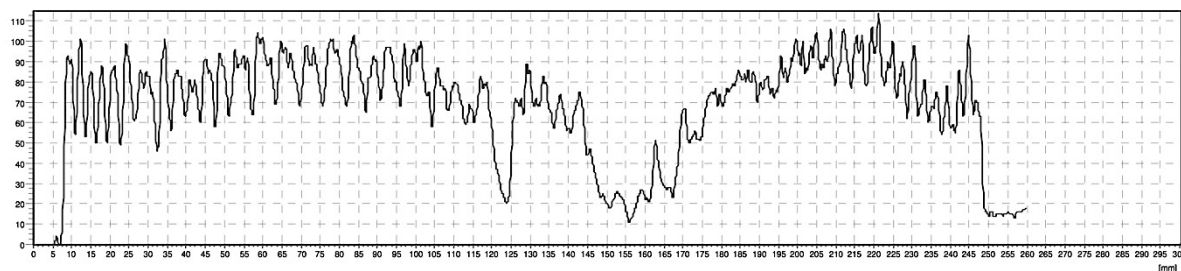


Figura 3.24 – Resistógrafo: ensaio número 10, piso 2.

A Figura 3.25 representa o gráfico do ensaio que foi realizado numa viga de madeira situada no piso 2 do edifício (Figura 3.14). Esta viga apresenta uma secção circular de aproximadamente 19cm de diâmetro. Analisando este gráfico conclui-se que, localmente, aos 45mm verifica-se uma quebra no estado de conservação, possivelmente pela existência dum defeito pontual na madeira. Para não existirem dúvidas quanto à sua capacidade resistente, é aconselhável que esta viga sofra medidas de melhoria, passando pela adoção de medidas de carácter estrutural.

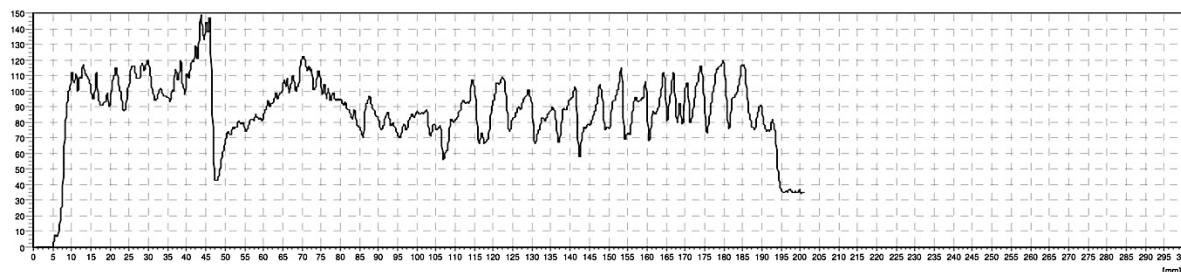


Figura 3.25 – Resistógrafo: ensaio número 11, piso 2.

3.2.5 Avaliação da segurança

Propriedades mecânicas da madeira

O atual método de cálculo de verificação estrutural, segundo o Eurocódigo 5 ou regulamentos de estruturas de madeira, prevê a verificação à rotura por metodologias semelhantes às seguidas para outros materiais estruturais como o aço e o betão.

As peças de madeira sem defeitos ensaiadas à flexão, em geral, iniciam o processo de rotura pela zona comprimida (a resistência à compressão é menor que a sua resistência à flexão-tração), onde ocorre a plastificação das fibras, o que implica a subida do eixo neutro e a consequente rotura das fibras tracionadas.

Em geral, os defeitos mais importantes nas peças correntes de estruturas de madeira são os nós. Nestas peças, o ensaio à flexão conduz muitas vezes a uma rotura à volta do nó por perda simultânea de resistência à tração no sentido perpendicular e no sentido do fio, ocasionando a redução de secção útil da peça e a consequente rotura com início, em geral, na zona tracionada.

Por estes motivos, atualmente realizam-se ensaios sobre peças de dimensões comerciais e com defeitos semelhantes aos que ocorrem na madeira estrutural disponível no mercado.

Defeitos das peças de madeira

Os principais fatores que afetam a qualidade e consequentemente os valores das propriedades físicas e mecânicas da madeira são os defeitos e as anomalias das peças. Os defeitos correntemente considerados são os seguintes:

- Nós;
- Desvio da indicação do fio em relação ao eixo das peças;
- Fendas;
- Empenos;
- Descaio;
- Taxa de crescimento (velocidade de crescimento irregular);
- Bolsas de resina;
- Presença de medula e entrecasco;
- Madeira de reação;
- Madeira juvenil;
- Ataques de insetos e fungos: deficiências no material lenhoso.

Outros fatores que influenciam a resistência mecânica de madeira estrutural

Os defeitos das peças estruturais de madeira representam o principal fator que provoca a variação da sua capacidade resistente às ações mecânicas. Para além dos defeitos, os outros principais fatores com influência importante na resistência dos elementos estruturais de madeira são:

- **Massa volúmica** – A massa volúmica é um dos fatores mais importantes que pode servir de indicador da resistência de um elemento estrutural em madeira.
- **Ângulo de direção do esforço com o fio de madeira** – Dado que a madeira é um material anisotrópico⁵, a sua resistência diminui significativamente se a direção da carga não é de resistência para atuações de carga fazendo ângulo diferente de 90° com a direção do fio.
- **Tempo de atuação das cargas (fluência)** – A madeira está, em geral, sujeita a um processo de fluência quando submetida à ação de cargas elevadas. Pode afirmar-se que a velocidade de aumento da deformação é aproximadamente proporcional ao estado de tensão instalado, o que implica que a madeira se comporta melhor em situações em que está sujeita a estados de tensão baixos para cargas permanentes, aguentando bem aumentos localizados de tensões, por períodos relativamente reduzidos de tempo.
- **Dimensões das peças** – Em geral, a resistência aumenta com a diminuição das dimensões das peças. Este defeito é considerado no EC5, para peças de muito pequenas dimensões.
- **Fadiga** – O fenómeno fadiga relaciona-se com a perda de resistência como resultado do efeito de variações alternadas e muito frequentes dos esforços a que uma peça está sujeita. Contudo, a madeira tem um ótimo comportamento à fadiga, contrariamente ao que ocorre em materiais estruturais com estrutura quimicamente organizada (do tipo cristalino).
- **Idade da madeira** – Estudos realizados nos últimos 50 anos indicam que, em princípio, a resistência da madeira não diminui de forma visível com a idade. Alguns estudos chegaram à conclusão que, com a idade, a madeira terá tendência a ficar com uma maior dureza superficial e resistência mecânica, mas a perder flexibilidade, tornando-se mais frágil. Sujeita a cargas permanentes, terá tendência a sofrer uma ligeira diminuição do módulo de elasticidade. Contudo, será prudente considerar uma ligeira perda das propriedades para madeiras antigas, o que será compensado pelo facto da madeira antiga ter, em geral, muito menos defeitos congénitos de formação. Os maiores problemas de resistência das madeiras antigas associar-se-ão sempre às fendas e à perda de material lenhoso resultante de ataques de fungos e de insetos xilófagos.

⁵ Anisotrópico significa que certas propriedades físicas (dureza, resistência mecânica, por exemplo) dependem da direção em que são medidas.

Apresentam-se, de seguida, um conjunto de indicações sobre a ação e a importância relativa de cada um desses fatores.

3.2.6 Metodologias de intervenção

Modelos teóricos de reabilitação

Freitas [16] divide em quatro as opções de uma reabilitação de uma estrutura de madeira:

- a. Reparação e substituição pontual de elementos degradados usando técnicas antigas;
- b. Reparação e substituição pontual de elementos degradados usando técnicas antigas e materiais de ligação modernos;
- c. Substituição integral da estrutura usando madeiras antigas, materiais e técnicas de ligação modernas e desenhos arquitetónicos similares aos antigos;
- d. Substituição integral da estrutura por soluções modernas ao nível da conceção, madeiras, materiais e técnicas de ligação usados.

A solução ideal será normalmente a que corresponde às duas primeiras situações, contudo, admite-se que a segunda solução assegura um desempenho melhorado. Os materiais utilizados na intervenção não devem limitar a durabilidade da estrutura, devem sim, na medida do possível, apresentar um comportamento melhorado face aos existentes.

a. Reparação e substituição pontual de elementos degradados usando técnicas antigas

É a situação mais corrente. Pressupõe que os diversos elementos em madeira se encontram em geral em boas condições, permitindo que a estrutura se mantenha no local com a forma anterior à intervenção. As ligações entre as peças parcialmente substituídas serão feitas por samblagem e por ligadores do tipo cavilha (normalmente pregos).

As peças integralmente removidas são substituídas por peças de dimensões análogas, ligadas às peças antigas por pregos. Devem usar-se madeiras antigas estabilizadas em termos de secagem e equilíbrio dimensional para as condições termo-higrométricas correntes. É necessário calçar as peças antigas para obter estruturas geometricamente corretas. Muitas vezes, nestes calços, são utilizadas madeiras de fraca qualidade, o que é um erro grave. As madeiras usadas em calços, tacos e em outras condições adversas devem ser de muito boa qualidade em termos de dureza e durabilidade natural.

Os erros mais graves cometidos no passado em estruturas de madeira dizem respeito à deficiente ventilação da estrutura, sobretudo na zona dos frechais⁶, o que implica a degradação biológica que se

⁶ O frechal é uma estrutura que circunda as paredes de alvenaria e fazem de suporte ao pavimento.

transmite também rapidamente aos apoios das peças. Numa intervenção concreta deve-se garantir a adequada ventilação e proteção contra térmitas dos novos frechais.

b. Reparação e substituição pontual de elementos degradados usando técnicas antigas e materiais de ligação modernos

É uma situação em tudo análoga à anteriormente descrita, mas em que se procura resolver os problemas das ligações recorrendo a métodos e técnicas modernas. Por exemplo, não faz sentido usar atualmente pregos galvanizados com uma velocidade de corrosão relativamente elevada quando é possível recorrer a parafusos de aço inoxidável muito mais duráveis e igualmente resistentes e que, para além disso, permitem a reversibilidade das montagens por desaparafusamento. É importante salientar, no entanto, que o aço inox é em geral mais frágil não sendo adequado para estruturas muito flexíveis pois pode partir por corte com facilidade quando sujeito a movimentos importantes.

No que diz respeito às próteses de apoio, a solução a adotar será influenciada pela dimensão do ataque. Se não houver limitações estéticas importantes será em geral mais económica a utilização de próteses metálicas em situações de degradação exclusiva de apoios e de ligações de topo em peças à tração. Não existem regras universais que indiquem a melhor solução para cada caso. Todas as operações implicam a remoção dos revestimentos da estrutura. Realizar intervenções em estruturas sem os retirar é uma tarefa de muita elevada complexidade e que potencia riscos inaceitáveis, de intervenções deficientes, para não se encontrarem lesões ocultas importantes.

c. Substituição integral da estrutura usando madeira antigas, materiais e técnicas de ligação modernas

Para alguns casos, por questões arquitetónicas ou construtivas, não é possível realizar o trabalho de restauro sem desmontar a estrutura. Nesses casos, desmontam-se cuidadosamente as peças e colocam-se de novo no local seguindo técnicas de ligação modernas e recorrendo a madeiras usadas de igual espécie, qualidade e com idade semelhante.

Peças degradadas nos extremos podem ser aproveitadas para realizar outros elementos de menor dimensões. Deve-se salientar que uma peça estrutural de madeira antiga de uma espécie durável é um material estrutural de elevado valor, devendo ser cuidadosamente recolhido e guardado para futuras utilizações.

Por exemplo, uma viga de 7m de comprimento com 0,5m de partes degradadas em cada lado permite realizar uma viga de 6m de comprimento em ótimas condições, cortando dos dois lados os topos degradados, correspondente aos apoios.

d. Substituição integral por uma nova estrutura moderna

É uma solução limite a adotar apenas em situações extremas de ausência de materiais antigos ou em casos onde os projetistas entendam não se justificar a realização de uma estrutura com materiais antigos, normalmente de custo mais elevado. Em geral, não se justifica o recurso a esta solução se for possível recorrer à terceira hipótese. É uma solução extremamente aliciante em casos de reabilitação urbana onde é possível, por exemplo, aproveitar as madeiras provenientes das coberturas para outros fins (no local ou em outras obras) e conceber uma cobertura totalmente nova com lamelado colado, por exemplo.

A substituição das estruturas de soalhos e coberturas de madeira por soluções em betão armado apoiadas nas alvenarias de pedra existentes é, em geral, uma solução limite que apenas se justifica quando a intervenção no existente for antieconómica ou tiver um reduzido interesse patrimonial (esta solução obriga a ter uma atenção especial sobre o comportamento global da estrutura de modo a perceber as implicações associadas ao incremento de peso próprio da nova solução). Em geral, será sempre mais económico manter pelo menos os vigamentos dos soalhos desde que reutilizáveis em mais de 50%. O problema da solução a adotar é essencialmente um problema da Arquitetura que deverá considerar, para além dos contributos da Engenharia estrutural, diretrizes claras de intervenção no património histórico ou urbano a definir pelas entidades licenciadoras e/ou gestoras patrimoniais.

Recomendações específicas para estruturas de madeira

Freitas [16] afirma que as estruturas de madeira têm especificidades próprias de justificam a consideração de um subgrupo autónomo em termos de reabilitação. Essas especificidades resultam essencialmente de facto de a matéria-prima de que são feitas ser de origem vegetal o que lhes confere um processo de degradação muito diferente do previsto para as estruturas executadas com base em materiais de origem mineral. Apresentam-se em seguida um conjunto de regras gerais concretas a aplicar no restauro da estrutura de madeira:

- Verificar sempre, previamente, os outros sistemas estruturais (fundações, paredes, tirantes de aço) em termos de estabilidade e nível de degradação;
- Evitar desmontar os elementos estruturais em madeira: a futura montagem irá colocar esses elementos em diferentes estados de tensão, como resultado das novas ligações;
- Usar soluções robustas: usar coeficientes de segurança mais elevados que o corrente;
- Fazer inspeções periódicas às estruturas (controlar os seguintes fatores: temperatura, humidade, taxa de renovação de ar, teor de humidade da madeira, deformações e defeitos dos elementos estruturais);
- Melhorar as condições de serviço das peças de madeira:
 - Evitar o contacto direto com aço ou vidro, se potenciar condensações;

- Melhorar a ventilação geral e localizada dos espaços (a renovação do ar é essencial para a madeira);
- Proceder a limpezas periódicas da estrutura;
- Eliminar todas as causas exteriores de degradação (especialmente as provenientes da envolvente do edifício – paredes e cobertura).
- Sempre que possível, deixar após cada intervenção de restauro, a possibilidade de todas as estruturas serem examinadas do ponto de vista físico e/ou visual próximos;
- Assegurar a ventilação adequada dos apoios evitando nesses locais, tanto quanto possível, o contacto direto da madeira com outros materiais que possam reter a humidade ou evitar que a madeira “respire”;
- Evitar esconder os elementos estruturais em madeira de acabamento sobretudo forros e tetos falsos de forma a que a degradação seja detetável;
- Restaurar o edifício da fundação para a cobertura, assegurando sempre a estabilidade e baixa deformabilidade dos elementos de suporte antes de intervir nas estruturas de madeira por eles suportados;
- Restaurar primeiro os elementos mais importantes, mais robustos e/ou mais degradados.

Autenticidade original

Segundo Freitas [16] e no contexto de uma intervenção de restauro de estruturas em madeira põe-se o problema de decidir o que fazer no que diz respeito à hipótese de manter ou não a autenticidade original das soluções. Como princípio geral, deverá tentar seguir-se a ideia de manter o mais possível a estrutura no seu estado no momento da intervenção (muitos especialistas em restauro defendem a reposição da solução mais antiga quando manifestamente as intervenções anteriores de restauro degradaram de forma substancial a imagem ou o funcionamento da estrutura). Nessas situações, o restauro deverá cingir-se à substituição das peças irrecuperáveis colocadas de novo de acordo com as técnicas antigas de montagem, mas usando ligadores modernos, ou respeitando integralmente os materiais e técnicas antigas (em estruturas pouco ou nada danificadas).

Algumas regras gerais devem ser seguidas:

- Quando forem materiais e soluções modernas, respeitar o passado, preservando tanto quanto possível os materiais existentes;
- Aceitar a necessidade de intervenções futuras, respeitar as intervenções precedentes e o seu contexto;
- Deixar boas indicações físicas da intervenção (por exemplo: parafusos de aço inoxidável à vista);
- Não usar soluções inovadoras mal conhecidas;
- Tentar escolher sempre ligações reversíveis;

- Não intervir em termos arquitetónicos de uma forma moderna e altamente destruidora tentando deixar uma marca profunda da intervenção; a melhor solução é aquela que deixar o mínimo possível de alterações à solução encontrada em cada momento de reabilitação.

Instalações e serviços modernos

Segundo Freitas [16], um dos problemas que se põe na reabilitação tem a ver com a necessidade de melhorar a funcionalidade e qualidade arquitetónica dos espaços reabilitados. Nessas situações põe-se o problema de modificar ou aumentar o nível de esforço das estruturas existentes. Para esse efeito a solução a adotar deverá seguir as seguintes regras fundamentais:

- Se necessário, introduzir uma segunda estrutura, não usar nunca a capacidade residual de estruturas antigas em madeira (essa capacidade residual assegura-lhe uma esperança de vida muito superior);
- Projetar um “novo” edifício junto com o “velho” edifício (partilhar o mesmo volume sem interferência direta);
- Não disfarçar os dois sistemas estruturais (velho e novo), mas sim, colocá-los juntos e fáceis de identificar.

Ações para aumentar a durabilidade das intervenções

Freitas [16] avisa que no momento de qualquer ação de reabilitação põe-se o problema de decidir o seu âmbito e profundidade e logo o respetivo programa e nível de custos associados. A vida projetada de cada intervenção não é uma questão matemática. Normalmente projeta-se prevendo a próxima intervenção passados 50 a 70 anos, mas poderá haver a necessidade de proceder a intervenções significativas antes de decorridos 50 anos.

No entanto, em cada intervenção, é fundamental intervir de forma que os eventuais problemas (causas de degradação) existentes sejam todos identificados e resolvidos:

- Impermeabilização da envolvente exterior (fachadas, empenas e cobertura);
- Drenagem interior e exterior do piso térreo;
- Introduzir boas soluções de recolha de águas pluviais;
- Estabilidade das fundações;
- Estabilidade global do edifício em geral e de todos os seus subsistemas em particular.

3.2.7 Medidas de carácter estrutural – Apoios

As zonas de apoio das vigas constituem zonas com risco de deterioramento, pois são as mais sujeitas à influência da humidade. Como consequência, chega-se a uma perda de secção, o que implica a falta da

zona de apoio. Mesmo que o resto da peça se encontre em boas condições, é necessário atuar para recuperar a estabilidade estrutural já comprometida.

Segundo Arriaga [1], após um diagnóstico estrutural, deduzem-se as medidas de carácter estrutural que deverão adotar-se para recuperar a segurança e estabilidade da construção. Geralmente, os tipos de problemas que se apresentam podem-se resumir nos dois seguintes grupos:

- Origem biótica – através da perda de secção resistente da peça de madeira, provocada pela ação dos agentes bióticos.
- Outros requisitos regulamentares – exigências normativas atuais que requerem, entre elas, uma consideração de sobrecargas mais altas e uma limitação mais restrita na deformação da estrutura.

De seguida, serão descritas as possíveis soluções técnicas que podem ser utilizadas nos diferentes problemas que possam surgir.

Utilização de escoramentos

Consiste numa intervenção mínima que pretende manter, às vezes com carácter provisório, a estabilidade do elemento construtivo sem a alteração do seu estado. Dentro deste ponto encontram-se todas as soluções de escoramento, disposição de batentes ou de calços nos apoios defeituosos. São soluções económicas, mas o resultado da intervenção fica visível.

É uma solução encontrada frequentemente em estruturas antigas que sofreram danos de podridão nas extremidades das vigas (Figuras 3.26, 3.27 e 3.28).

Utilização de perfis metálicos

Consiste na utilização de perfis metálicos de reforço que, em alguns casos, dão lugar a soluções pobres do ponto de vista estrutural e estético. Contudo, com o aço é possível serem fabricadas peças especiais para solucionarem problemas estáticos complexos.

A utilização de perfis metálicos como reforço das zonas de apoio das vigas é um recurso frequente em obras de reabilitação e que apresenta um carácter pouco elaborado.

Geralmente é possível encontrar reparações pontuais das extremidades das vigas colocando placas metálicas e ou perfis metálicos seccionados no comprimento desejado, para aumentar o comprimento da viga de madeira. Contudo são considerados quase como remendos de difícil justificação e garantia ao nível de cálculo.

Uma versão de maior consistência é a anexação de perfis metálicos, que se sobrepõem à madeira sã num comprimento entre os 50 e 80cm, conectados através de pernos. Contudo, a solução pode ser excessivamente deformável comparada com a estrutura original (Figuras 3.26, 3.27 e 3.28).

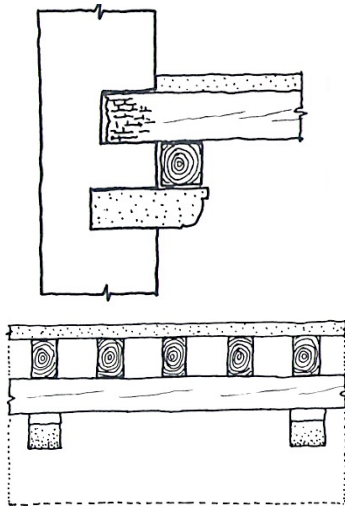


Figura 3.26 – Apoio das extremidades das vigas. Solução com cachorros de madeira. Arriaga [1]

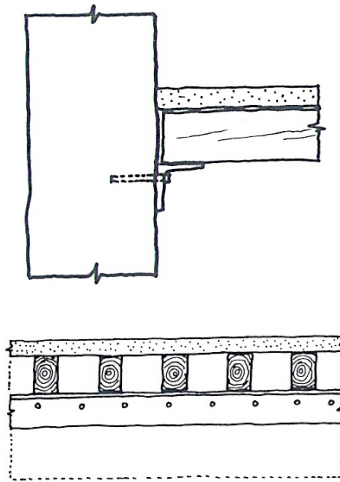


Figura 3.27 – Apoio das extremidades das vigas. Solução com perfil metálico. Arriaga [1]

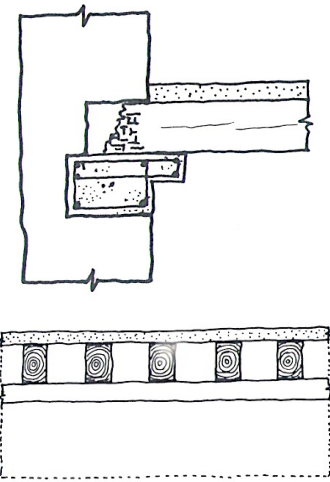


Figura 3.28 – Apoio das extremidades das vigas. Solução com betão armado. Arriaga [1]

Soluções com betão

Consiste na utilização de betão em soluções de substituição das peças de madeira, deixando, às vezes, a estrutura como uma simples cofragem sem função estrutural. Caso se opte por esta solução, o projetista tem que ter em especial atenção os apoios destes elementos, pois é uma solução que impõe um grande acréscimo de carga.

Soluções com madeira

Consiste na utilização de madeira para a consolidação ou o reforço da estrutura. Em muitos casos o reforço pode consistir simplesmente em anexar novas peças de madeira às existentes. Também se podem substituir as peças existentes por novas, com a simplificação das operações construtivas. Quando existe a substituição da madeira, pode-se optar por produtos derivados da madeira, como é o caso da madeira LVL (*laminated veneer lumber*) (Figura 3.29) ou madeira PSL (*parallel strand lumber*) (Figura 3.30), sobretudo quando não é possível encontrar grandes secções ou peças com o comprimento desejado.

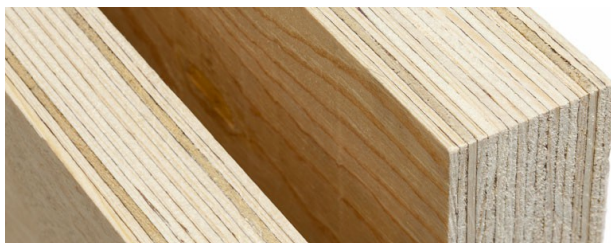


Figura 3.29 – Madeira LVL (*laminated veneer lumber*).



Figura 3.30 – Madeira PSL (*parallel strand lumber*).

Anexando peças de madeira, através de meios mecânicos, a consolidação e reforço têm um comportamento mecânico semelhante aos reforços com peças metálicas. A solução mais imediata é a de anexar, à madeira sã, duas novas peças de madeira com parafusos, pregos ou bainhas metálicas, com comprimento suficiente. Contudo, a colocação de uma nova viga, de dimensões iguais e anexada à já existente, é uma solução mais simples

Soluções com resina epóxi

Consiste na aplicação de uma ampla gama de soluções de alta eficácia, que combinam elementos de reforço (geralmente materiais compostos) colados à madeira. São soluções limpas, eficazes no ponto de vista estrutural, mas com custo elevado.

A sua utilização requer precauções com o controlo da temperatura local, a quantidade de humidade na madeira e a pressão da colagem, como qualquer tipo de elemento colado.

A sua principal vantagem é a possibilidade de oferecer para o preenchimento das cavidades sem apresentar problemas de retração e de aderência com quase todos os materiais.

A solução mais representativa da aplicação das resinas de epóxido é a situação da parte deteriorada da cabeça da viga ser substituída por uma argamassa à base de resina de epóxido, que se conecta à madeira sã através de barras polímero (por exemplo, resina de poliéster reforçada com fibra de vidro) (Figura 3.31).

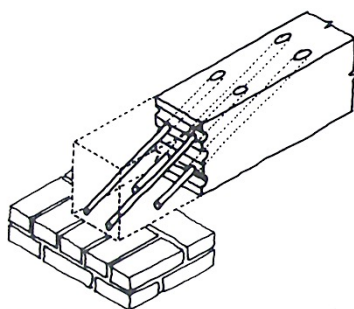


Figura 3.31 – Consolidação da extremidade da viga com argamassa à base de resina epóxi. Arriaga [1]

3.2.8 Atuação sobre peças submetidas à flexão

O principal problema das peças que trabalham à flexão, como é o caso das vigas, encontra-se relacionado com a degradação dos apoios. Porém, existem ocasiões em que o problema tem a ver com a peça em todo o seu comprimento. Esta situação, geralmente, está relacionada com uma secção insuficiente para suportar as cargas existentes. A aplicação de critérios mais exigentes pode, regulamentarmente, invalidar uma estrutura.

Arriaga [1] descreve as orientações para um amento ou reforço da capacidade resistente das vigas.

Soluções com madeira

Nas vigas, em que a sua capacidade resistente não é suficiente, uma das primeiras e mais simples soluções, que não deve deixar de ser considerada é a adição de novas peças, juntas ou intercaladas com as originais. A sua execução é fácil, sempre que o apoio das vigas se possa realizar sobre outra peça sem necessidade de se fazer novos buracos no muro (Figura 3.32). O problema que pode ocorrer é que as peças irão ter diferentes deformações.

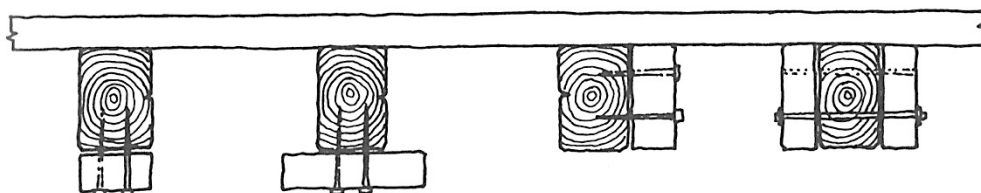


Figura 3.32 – Tipos de reforços das vigas constituintes dum pavimento de madeira. Arriaga [1]

Outra solução, de reforço e de execução relativamente simples é a colocação de vigas (ortogonalmente), com um determinado espaçamento, que façam a divisão do vão servindo de apoio ao vigamento existente (Figura 3.33). Contudo, tem como problema a possível necessidade da aplicação de calços e cunhas nas vigas. Outro possível inconveniente localiza-se nos locais de apoio das vigas de reforço sobre o muro, que provocam cargas concentradas, que em alguns casos podem contribuir para a obrigatoriedade do reforço do muro.

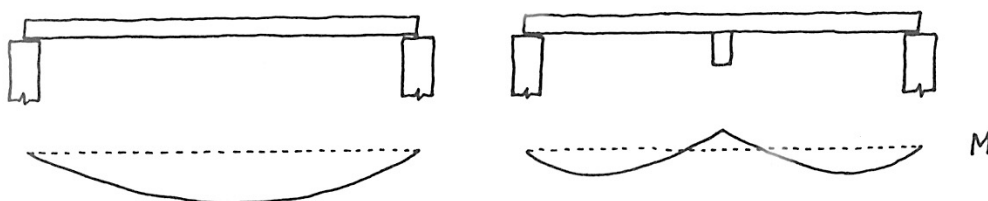


Figura 3.33 – Reforço do pavimento com a aplicação duma nova viga a meio vão. Arriaga [1]

Soluções com resina epóxi

É frequente encontrar pavimentos em que algumas das suas vigas tenham sofrido uma rotura no vão, por estarem debilitadas. Desta forma, as vigas adjacentes irão ser prejudicadas. Para recuperar a continuidade, podem ser aplicados os seguintes sistemas:

a. Consolidação com placas de reforço internas

A utilização de placas interiores de reforço é uma das soluções de execução mais cómodas e que apresenta uma grande rigidez na ligação. Para isso, a viga deverá ser colocada na sua posição original e ser provisória e devidamente apoiada. Depois, são feitas, pelo menos, duas ranhuras para serem introduzidas placas de reforço com um comprimento suficiente para que a transmissão do momento fletor e corte se deem na secção. A ligação deve ser feita em madeira sã (Figura 3.34).

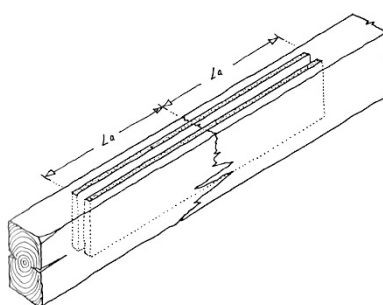


Figura 3.34 – Consolidação com placas internas. Arriaga [1]

Quando o problema é a deterioração duma dada secção da peça, o procedimento de recuperação é semelhante. Porém, antes de se iniciar o processo de reforço com placas internas é necessário retirar a zona deteriorada na secção de madeira.

b. Consolidação com barras de reforço

A instalação de placas de reforço, a funcionarem como armadura das peças de madeira, em ranhuras feitas nas faces, permite consolidar um ponto intermédio do vão da viga e constitui-se uma solução similar às anteriormente descritas (Figura 3.35) O inconveniente apresentado é que a intervenção é perceptível pelo exterior e o reforço fica exposto às consequências das variações higrotérmicas.

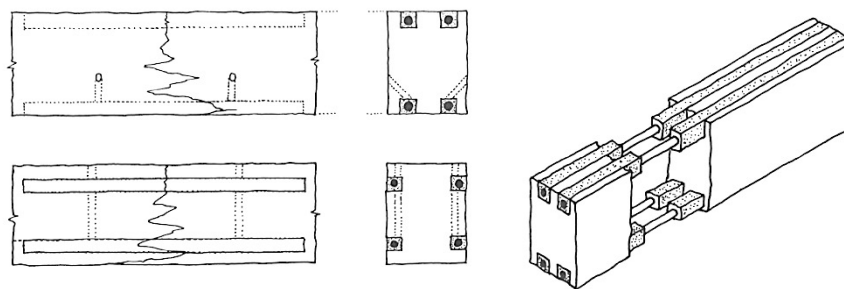


Figura 3.35 – Consolidação da viga com barras de reforço. Arriaga [1]

c. Reforço com barras inclinadas

Nas peças de grandes secções é inevitável o aparecimento de grandes fendas que tendem a dividir a secção original em duas peças. Estas fendas ocorrem como consequência da secagem da madeira que provoca maiores contrações na direção tangencial, ao seu raio, de tal forma que as fendas são radiais e geralmente afetam o plano médio da secção. Estas fendas também aparecem nas faces inferior e superior da secção. As consequências destas fendas estão pouco estudadas, mas é de esperar que a rigidez da viga diminua.

d. Reforço com armadura interior

Arriaga [1] propõe, também, que o reforço das vigas se possa fazer com recurso a uma armadura interior, constituída por barras polímeras, de resina de epóxico reforçadas com fibra de vidro ou com um cabo de aço, que, em conjunto, formam uma espécie de treliça. Estudaram-se três soluções:

- Armadura com barras de fibra de vidro formando armadura de compressão e tração;
- Armadura com barras de fibra de vidro e armadura de tração;
- Armadura de cabos de aço em tração e barras de fibra de vidro nas diagonais.

Os resultados dos ensaios mostraram uma diminuição da flecha original de aproximadamente 60%. Mesmo assim, este reforço é de execução complexa e não muito usado.

Reconstrução da parte superior da secção da viga através duma argamassa à base de resina de epóxico

Em algumas ocasiões, o pavimento apresenta degradações originadas pelas galerias internas feitas pelos insetos xilófagos, a partir da face superior das vigas. Muitas vezes estes ataques decorrem da existência de entabulado mais suscetível de ser vítima de ataques xilófagos (borne).

Para recuperar a secção original pode-se proceder à eliminação do ataque com o aplainamento da madeira, até chegar à zona sã. De seguida, inserem-se conetores, que podem ser placas de poliéster reforçado com fibra de vidro, situados em furos realizados desde a face superior. Em seguida, e com a

cofragem das laterais da peça, verte-se a argamassa à base de resina de epóxico. De modo geral, a aderência entre a resina e a madeira, e a presença dos conetores são suficientes para a transmissão dos esforços. Se, além dos conetores, forem executados rasgos nas peças de madeira (amentando a sua superfície de contacto) a ligação sairá melhorada.

Aumento da secção da viga mediante peças de madeira anexadas

Quando a secção das peças do pavimento é insuficiente para as condições de carga e de deformação especificadas, pode-se aumentar a sua altura com outra peça de madeira unida à face superior, ligadas com resina de epóxico. Esta nova peça não tem que necessariamente ter a mesma secção da peça existente, podendo formar assim uma secção em T. Comparativamente a outras alternativas, a vantagem da argamassa à base de resina de epóxico é a capacidade de preencher as irregularidades da superfície, dum forma homogénea (Figura 3.36).

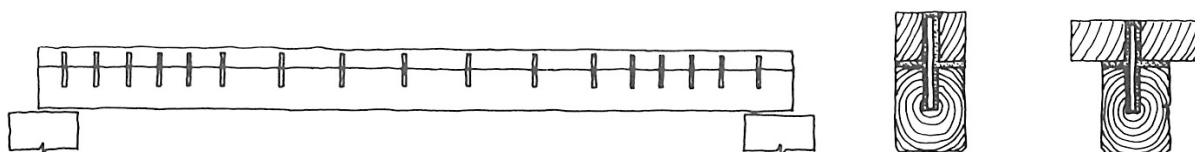


Figura 3.36 – Aumento da secção da viga com a anexação de novas peças de madeira. Arriaga [1]

Os dois tipos de madeira deverão ter um teor de humidade semelhante. Para isso, as novas peças de madeira, depois de secas, deveriam ser mantidas nos locais do edifício onde serão aplicadas, empilhadas sobre calços, o tempo necessário para que adquiram a humidade do local. Quando a secção da nova peça é muito grande, a secagem é mais lenta e difícil. Assim, para este problema ser contornado, podem ser usadas peças de menor espessura, dispostas por camadas até ser alcançada a espessura pretendida. Assim, a secagem dá-se em menos tempo.

Soluções de substituição com betão

O uso de betão na consolidação e reparação de pavimentos de madeira só tem sentido em soluções mistas.

Nesta solução, o pavimento é reforçado com uma camada de betão armado. A confiança nesta solução baseia-se na disposição uniforme e transversal das cargas. Assim, caso exista alguma peça débil ou danificada, as cargas serão transferidas para as peças contíguas. Porém, as cargas aumentam significativamente para o ganho que se obtém, e além do perigo que existe com a não comprovação do estado real das peças danificadas e dos apoios. De seguida, serão mostradas três opções de substituição com betão.

a. Lajeta de betão armado sobre o pavimento de madeira

A solução mais simples deste tipo consiste em contruir uma lajeta de betão armado com uma espessura de 10 a 15cm sobre o pavimento de madeira, passando este a servir quase como a cofragem da solução (Figura 3.37). Normalmente, esta solução é usada quando as vigas do pavimento se encontram danificadas e apresentam grandes flechas, mas existe o interesse que a face inferior seja preservada.

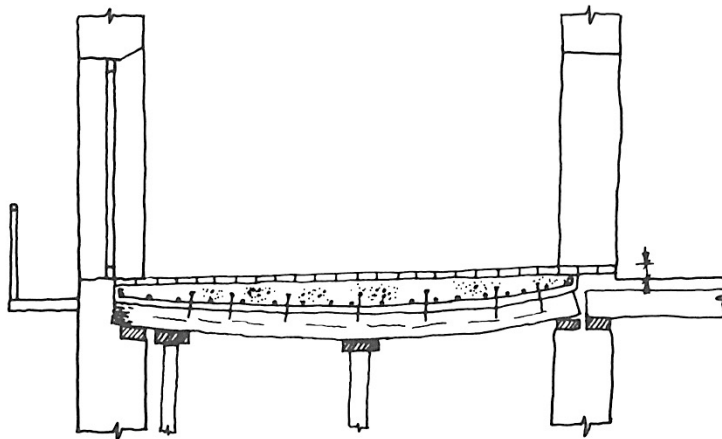


Figura 3.37 – Aplicação duma camada de betão armada na face superior do pavimento. Arriaga [1]

Para a execução desta solução, o pavimento é escorado na sua face inferior, dividindo o seu vão em, normalmente, em duas ou três partes. Devido à possibilidade de serem encontradas diferentes flechas nas diferentes vigas, é necessário que também nas suas faces inferiores sejam colocadas cunhas, para se poder obter uma superfície superior nivelada. Depois de desmontar o pavimento e do betão ganhar presa, recomenda-se que seja dado um tratamento químico sobre a madeira com o fim de o prevenir de possíveis ataques xilófagos. Na face superior das vigas de madeira são introduzidos parafusos, dispostos em intervalos regulares, deixando-os com cerca de 5cm sobressaídos. Esta medida tem como finalidade assegurar a união entre a estrutura de madeira e a camada de betão armado.

Um dos problemas que esta solução apresenta é que a espessura da camada de betão pode ser muito irregular, alcançando uma espessura máxima a meio vão, local de maior flecha, a não ser que através do escoramento seja obtido, na face superior do pavimento, um plano completamente horizontal.

Outro ponto delicado encontra-se no apoio da camada de betão armado sobre os muros. Antes de estes serem sobrecarregados com mais carga, é necessário que o seu estado seja verificado.

Assim, e para se reduzir o peso desta opção pode-se recorrer a betões aligeirados ou à colocação de alvenaria (oca), nas zonas em que a camada apresenta maior espessura.

b. Lajeta de betão armado sobre as vigas principais

Uma solução, similar à anterior, que procura evitar a necessidade de sobrecarregar o muro de uma maneira contínua é a disposição duma lajeta apoiada em vigas que, dispostas em intervalos regulares, apoiam-se sobre os muros de maneira pontual. A zona de apoio no muro deve ser reforçada, já que as cargas são concentradas e de valor muito superior. Geralmente, o muro continua a funcionar como apoio ou contigualmente a ele, para suportar estas novas cargas, podem ser construídos novos pilares.

c. Soluções mistas de madeira e betão armado

A utilização de betão armado para reforçar um pavimento de madeira mediante a formação dum sistema misto é uma solução com grandes possibilidades. Para isso dispõe-se uma capa de betão, armado com uma malha metálica, sobre as vigas do pavimento devidamente conectada (Figura 3.28). O betão trabalha à compressão e a madeira predominantemente à tração. O peso da solução resultante não é muito elevado já que a espessura de betão, nesta solução, é reduzida (5 a 8cm). É importante ter em consideração que, o funcionamento correto deste sistema misto só é possível se as ligações entre ambos os materiais forem projetadas adequadamente.

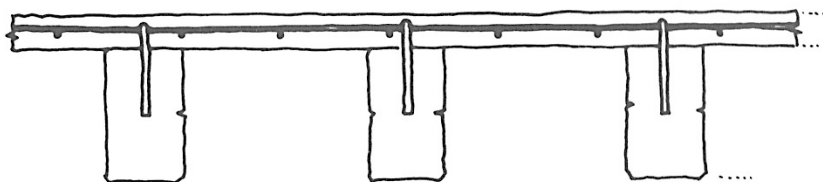


Figura 3.38 – Solução mista de madeira com betão armado. Arriaga [1]

Este tipo de sistema construtivo utiliza-se predominantemente na Europa, não só como solução para incrementar a capacidade resistente dos pavimentos já existentes, como também das novas obras. A rigidez à flexão, em teoria, pode triplicar ou quadruplicar. Com esta solução, o desempenho acústico melhora, com o aumento da massa, assim como também o problema das vibrações.

Soluções mistas de madeira e painéis de madeira

Duma maneira análoga ao reforço do pavimento com uma capa de betão, podem também ser aplicados, como forma de substituição, painéis de derivados da madeira. Porém, não é muito utilizado no reforço de estruturas existentes, talvez pelas dificuldades acarretadas para conseguir um nivelamento adequado e alcançar uma correta ligação entre vigas e painéis de madeira.

Além de que, os painéis de derivados de madeira têm normalmente um módulo de elasticidade inferior ao da madeira maciça. Portanto, a melhoria da rigidez no conjunto é menor que a que se obtém com uma camada de betão. Não obstante, têm a vantagem de conseguir soluções com pouco acréscimo de carga.

Soluções com aço

O aço tem sido utilizado para a reparação ou reforço das peças em flexão com soluções de diferente eficácia. A menor eficácia são as que pretendem uma reparação pontual de algum problema nas peças. É uma solução pouco estética porque é uma intervenção que fica à vista, além de que limita a estabilidade do conjunto relativamente ao fogo.

a. Reforço com perfis metálicos

A utilização de perfis metálicos e placas para a reparação de roturas em vigas é um dos recursos mais comuns que aparecem na consolidação pontual de obras antigas. Geralmente consiste na reparação da continuidade da viga com o uso de perfis ou placas fixadas à madeira com o uso de parafusos (Figura 3.39).

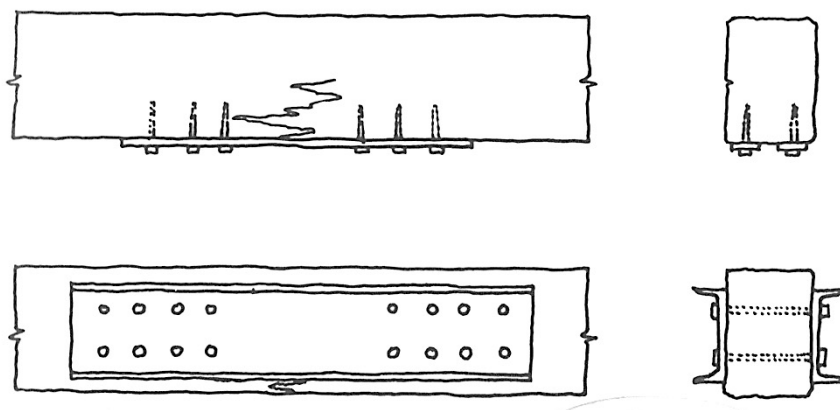


Figura 3.39 – Reparação pontual utilizando placas e perfis metálicos. Arriaga [1]

b. Reforço com tirantes metálicos

A disposição de tirantes de aço na parte inferior da viga permite aumentar a inércia da peça, deixando o tirante tracionado e a viga comprimida. O tirante apoia-se e mantém um espaçamento da viga através de espaçadores metálicos comprimidos. Apresenta como inconveniente as dificuldades de ancoragem do tirante nos extremos da viga, que implica, às vezes, a sua desmontagem.

c. Substituição estrutural da madeira com perfis metálicos

Recentemente algumas empresas comercializam sistemas de reforço de pavimentos de madeira utilizando perfis de aço colocados debaixo de cada viga degradada. Um deles consiste na disposição dum perfil tipo “IPE” com outro perfil tipo “U”. A concavidade do perfil tipo “U” é preenchido parcialmente com argamassa de cimento de alta resistência. O apoio nos muros de suporte realiza-se através duma base metálica com ancoragens metálicas ou químicas, dependendo das características do muro (Figura 3.40-a).

Outras opções utilizam perfis tipo “V” ou “U” que abraçam por completo a viga (Figura 3.40-b e Figura 3.40-c). Os perfis de reforço são em aço inoxidável para aumentar a sua durabilidade. Contudo, são soluções a não serem consideradas a quando a não intervenção/reforço dos muros de suporte.

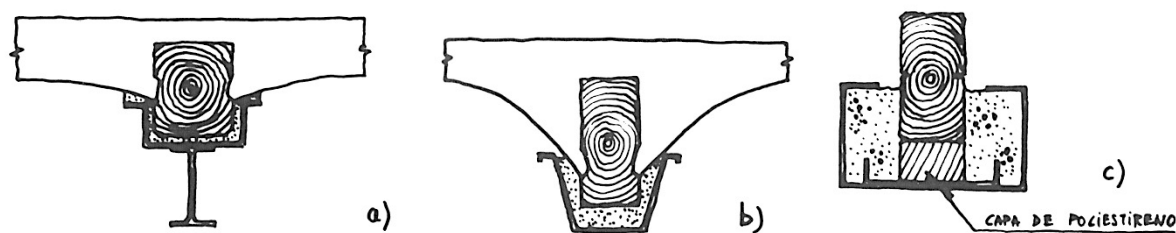


Figura 3.40 – Diferentes soluções com perfis metálicos servindo se substitutos estruturais às vigas de madeira. Arriaga [1]

3.2.9 Tipo de ligações

As ligações podem classificar-se pela sua rigidez e de maneira aproximada nos seguintes tipos:

Com cavilhas

Este tipo está constituído pelos elementos de fixação mais simples como por exemplo: pregos, parafusos e as barras de aço dobradas. Quando submetidos ao corte, e para parafusos, cavilhas e pregos com aderência melhorada o EC5 Parte 2 permite considerar um incremento de 20% da capacidade de carga que se obteria para unir duas peças de madeira e um incremento de 100% na rigidez da união.

Com ligadores de superfície

Uma solução com uma rigidez algo maior do que a anterior consiste na utilização dos ligadores que se usam nas uniões da madeira, como os ligadores tipo anilha ou dentados, ou inclusive a inserção de tubos metálicos como se fossem conetores. A maior capacidade de carga destes conetores permite um maior espaçamento entre eles e conseguir uma rigidez maior.

Com furações na madeira

Nesta solução, o betão penetra na madeira através de calhas ou ranhuras, com o fim de conseguir a transmissão do corte mediante uma pressão direta entre as superfícies do betão e da madeira. A capacidade de carga deve ser comprovada no betão e na madeira. Existem versões com calhas em forma de cilindros ou com furações retangulares (Figura 3.41). Para evitar que exista o levantamento da camada de betão, relativo ao plano da madeira, dispõe-se barras que garantem uma melhor união. Também se citam sistemas em que as calhas têm forma trapezoidal e a ligação realiza-se mediante barras que foram coladas previamente na madeira e depois do betão ganhar presa, são tensionadas para aumentar as forças de atrito.

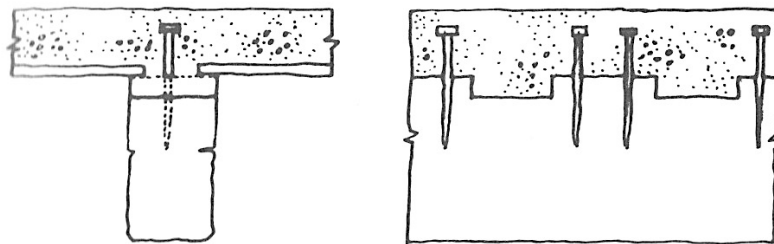


Figura 3.41 – Ligação através da abertura de calhas na madeira. Arriaga [1]

Com uniões coladas

Neste caso a rigidez da união é máxima e pode admitir-se um comportamento solidário entre o betão e a madeira. As disposições construtivas que se utilizam consistem simplesmente em placas de aço que se inserem nas ranhuras longitudinais na viga e unem-se com a aplicação duma argamassa à base de resina de epóxido.

De maneira apropriada, pode-se afirmar que a rigidez eficaz à flexão das soluções anteriores varia desde 50% para as soluções do tipo cavilha, e até 100% para as soluções coladas.

3.2.10 Tratamentos e acabamentos

Freitas [16] afirma que para melhorar o comportamento, a madeira necessita de proteção adequada. De seguida, serão apresentadas áreas de tratamento a serem consideradas.

Tratamentos curativos e preventivos de preservação

Os diversos produtos incluem o principio ativo, um solvente e um fixador. Em geral os produtos classificam-se de acordo com o tipo de solvente e incluem:

- Protetores hidrossolúveis;
- Emulsões;
- Protetores em solvente orgânico;
- Protetores mistos;
- Protetores orgânicos naturais.

Quanto ao modo de aplicação podem ser aplicados por pintura (pincelagem ou pulverização), por injeção ou em pasta. Um tratamento é curativo quando pretende eliminar uma infestação ativa e preventivo quando se destina a retardar ou evitar totalmente os ataques pelos agentes bióticos.

Quando uma estrutura está atacada por térmitas ativas o problema é relativamente grave, já que apresentam grande capacidade de regeneração. A eliminação das térmitas passa por eliminar as causas das patologias (água sob diversas formas) e tentar envenenar as colónias recorrendo a gorduras de efeito retardado ou infestação com vírus, fungos, bactérias ou parasitas (guerra biológica).

O tratamento preventivo clássico passa por criar barreiras químicas (venenos) no exterior e ao nível de todos os acessos às estruturas e tratar localmente, por injeções, as peças afetadas. Em muitos casos poderá ser necessário substituir várias peças por novas e queimar as antigas dado que pode ser antieconómico recuperar uma peça muito infestada.

Tratamento contra o fogo

A proteção contra o fogo pode ser efetuada com:

- Produtos retardadores da combustão e/ou inibidores de chama (aplicados como pinturas);
- Produtos incorporados na massa (sobretudo, em derivados da madeira).

A aplicação pode ser, assim, feita por pincelagem, pulverização, injeção ou incorporação na massa, no seu fabrico.

A pinturas intumescentes aumentam de volume por efeito do calor incrementando dessa forma o efeito protetor (estanquidade aos fumos, isolamento térmico e proteção por barreira não combustível).

É necessário ter muito cuidado com a compatibilidade entre os produtos de preservação biológica, de proteção contra o fogo e de proteção contra o envelhecimento e acabamento.

Os produtos de ignifugação de madeiras podem ter alguns inconvenientes que importa controlar, como por exemplo:

- Se forem solúveis podem cristalizar à superfície e provocar destaque de vernizes e pinturas de acabamento;
- Podem durar pouco se solúveis;
- Podem mudar de cor com o tempo ou afetar a cor da madeira;
- Podem corroer os ligadores;
- Podem diminuir a resistência mecânica das peças;
- Se forem à base de fósforo ou azoto podem facilitar o crescimento de fungos;
- Podem provocar um efeito abrasivo nas ferramentas de corte da madeira;
- Podem dificultar a colagem de peças.

Proteção contra o envelhecimento e acabamento nas madeiras

A madeira localizada no exterior necessita de proteção contra os efeitos conjuntos do sol e da chuva que levam ao seu envelhecimento precoce.

Uma estrutura de madeira colocada interiormente, deverá ser bem ventilada e protegida com um bom esquema de pintura que inclui:

- Um primeiro tratamento de lixagem e emassamento para a regularizar a superfície;
- Uma demão de selante (tapa-poros);
- Uma demão de primário de aderência;
- Pelo menos duas demãos de acabamento.

Os esquemas de pintura a aplicar devem ser sempre validados pelos fabricantes que devem dispor de departamentos técnicos compatíveis com essa necessidade.

Pinturas tradicionais

Este é um modo muito complexo que requer um conhecimento técnico muito profundo dos materiais utilizados e da composição química das soluções. A constituição de uma pintura tradicional inclui solventes (água, terebintina, benzina, pós minerais, diversos óleos vegetais, etc.) e pigmentos naturais (solos, vegetais, pós minerais, produtos obtidos dos animais).

Os pigmentos garantem a proteção conferida pela tinta e melhoram o comportamento na presença de calor e humidade. As pinturas tradicionais podem classificar-se em:

- óleos de origem vegetal ou animal;
- ceras (minerais, vegetais ou animais);
- colas (solúveis em água);
- resinas (solúveis em solventes orgânicos).

CAPÍTULO 4

A METODOLOGIA BIM APLICADA À REABILITAÇÃO

4.1 GENERALIDADES

Com a metodologia BIM (Building Information Modeling – Modelagem de Informações da Construção), é possível criar digitalmente um ou mais modelos virtuais de uma construção. Eles oferecem suporte ao projeto ao longo das suas fases, permitindo uma melhor análise e controle do que os processos manuais. Quando concluídos, esses modelos gerados por computador contêm geometria e dados precisos e necessários para o apoio às atividades de construção e fabricação. Eastman, et al. [6]

Magalhães [17] afirma que a metodologia BIM pressupõe que quando o edifício é modelado virtualmente, utilizando ferramentas tridimensionais (Revit, Archicad, entre outras), toda a informação necessária encontra-se no modelo. Este modelo contém informação sobre as características dos elementos que o constituem quanto à sua geometria, propriedades dos materiais (BIM 3D), faseamento construtivo e controlo de tempos (BIM 4D) e controlo dos custos da obra (BIM 5D). Esta informação é acessível através de software. Mais recentemente existem já fluxos que incorporam o BIM 6D e o BIM 7D que correspondem à sustentabilidade e à gestão das instalações, respetivamente. Desta forma, a partir do momento em que se desenha um elemento ou conjunto de elementos, toda a informação necessária para a sua execução, encontra-se automaticamente associada a cada um dos seus elementos constituintes.

Com a execução virtual do projeto, a metodologia BIM oferece a oportunidade de testar soluções previamente, antes da construção da estrutura no local, precavendo, desta forma, algum possível problema em obra. As partes constituintes do projeto podem consultar e rever o projeto mais facilmente, o que ajuda a garantir a sua precisão e integridade, e visualizar e avaliar alternativas em termos de custos, quantidades e/ou outros parâmetros do projeto.

A metodologia BIM oferece a possibilidade de todas os envolvidos no projeto poderem estar a trabalhar com o mesmo modelo do projeto on-line permitindo, assim, que todas as alterações possam ser vistas por todas as equipas.

Os seguintes cronogramas (Figura 4.1) são exemplo disso, na atualidade a metodologia BIM pode ser o elo de ligação de todas as especialidades intervenientes no projeto, permitindo detetar mais facilmente

conflitos no processo construtivo e melhorar a compreensão do planeamento aos vários intervenientes do processo. Antes da metodologia BIM, as especialidades trabalhavam sozinhas, sendo o acesso a informação de outras especialidades mais lento e difícil. Esta dificuldade de comunicação entre especialidades contribuía para erros e custos desnecessários, ao longo do projeto.

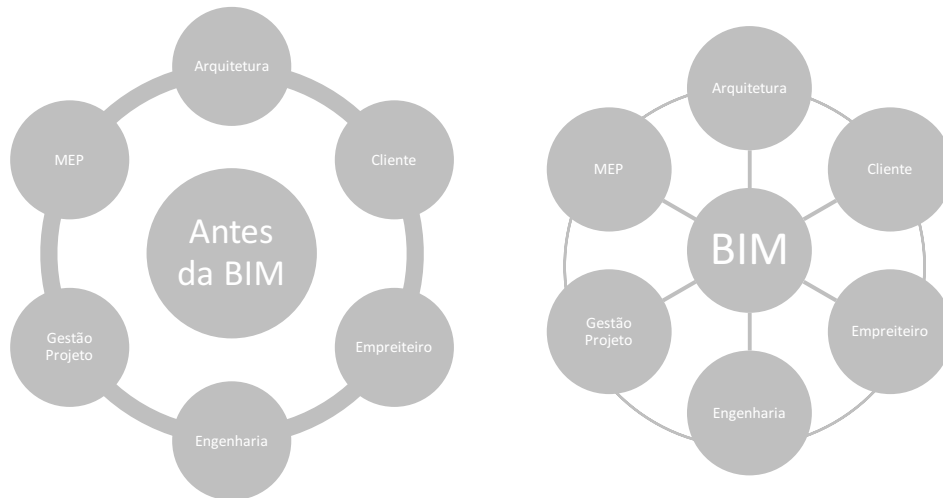


Figura 4.1 – Cronograma representativo da interação de cada interveniente num projeto. À esquerda: projeto elaborado da forma tradicional. À direita: projeto com recurso à metodologia BIM.

Magalhães [17] afirma que a implementação da metodologia BIM ainda não é transversal ao panorama da construção em Portugal, devido, sobretudo, aos seus custos iniciais. Nas empresas em que é implementada, verifica-se inicialmente uma normal queda da produtividade dos trabalhadores e projetistas devido a um período normal de habituação a esta nova maneira de trabalhar. Trata-se, assim, de um investimento de médio a longo prazo. Contudo, este é ressarcido devido à previsível eficiência e eficácia desta metodologia.

Os motivos e objetivos que levaram as empresas a adotarem a metodologia BIM:

- Melhorar o entendimento geral sobre as intenções do design;
- Melhorar a qualidade geral do projeto;
- Reduzir conflitos durante a construção;
- Reduzir mudanças durante a construção;
- Ciclos de aprovação do cliente mais rápidos;
- Melhor controle/previsão de custo;
- Reduzir o número de pedidos de informação;
- Adaptação a uma nova realidade de projetar.

Após a adoção desta nova metodologia e da empresa ver restabelecido e aumentado o seu nível de produtividade, a BIM demonstra, efetivamente, a sua potencialidade. Exemplo disso são os seguintes resultados:

- Melhor coordenação e colaboração entre especialidades;
- Detecção de conflitos e mitigação do risco;
- Alto nível de personalização e flexibilidade;
- Otimização de planeamento e custos;
- Fácil manutenção durante o ciclo de vida do edifício;
- Rápido grafismo, sem perda de qualidade nem aumento de custos.

4.2 PLATAFORMAS E FERRAMENTAS BIM

Muitas vezes, pensa-se que a metodologia BIM é apenas a utilização de um software para a modelação de uma construção e não uma metodologia que define novas formas de trabalho. Tal como foi dito anteriormente, a plataforma BIM permite armazenar, organizar e editar a informação de cada elemento desenhado, assim como conter a representação dos vários modelos das diversas especialidades (arquitetura, estrutura e instalações) separadas e o modelo agrupado por todas as especialidades, de forma a encontrar mais facilmente possíveis conflitos.

Na Tabela 4.1 é referenciada a empresa e respetivas plataforma e ferramenta BIM usadas em ambiente empresarial.

Tabela 4.1 – Plataforma e ferramenta BIM de análise estrutural.

Empresa	Plataforma BIM	Ferramenta BIM de análise estrutural
Autodesk	Revit	Robot Structural Analysis

De seguida é apresentada uma pequena descrição dos *softwares* utilizados no trabalho desenvolvido, nomeadamente, o Revit e o Robot Structural Analysis da Autodesk (2016).

4.2.1 Revit

Esta plataforma BIM divide-se em várias especialidades como a arquitetura (Revit Architecture), engenharia de estruturas (Revit Structure) e instalações mecânicas, elétricas e hidráulicas (Revit MEP). O Revit é um modelador paramétrico que já contém bibliotecas de objetos, designadas por famílias, (por exemplo, vigas, pilares e lajes) e materiais. Além das famílias e materiais base que o Revit dispõe, é possível ainda modelar ou criar novos objetos e materiais.

Com base nestas funcionalidades, é possível também gerar desenhos 2D (cortes e pormenores construtivos) instantaneamente. Sendo um produto da Autodesk, o Revit tem uma ligação direta e

bidirecional com os programas de cálculo comercializados pela mesma empresa, nomeadamente o Robot Structural Analysis.

De seguida, deu-se início à modelação do edifício atribuído no estágio curricular.

O primeiro passo para a realização deste trabalho foi o levantamento da informação disponível sobre o edifício. Apenas foram modelados os elementos necessários das especialidades consideradas indispensáveis para a realização deste projeto, no caso, arquitetura e estrutura. As barras de comandos representadas nas Figuras 4.2 e Figura 4.3 mostram os principais comandos utilizados para a modelação dos principais elementos constituintes do edifício.

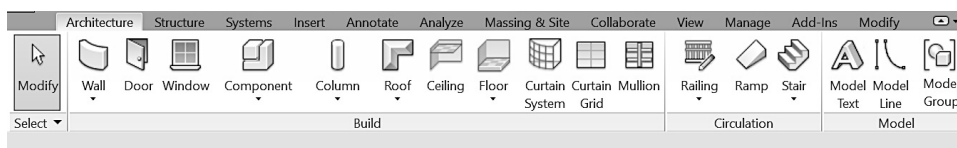


Figura 4.2 – Comandos existentes no separador Arquitetura.

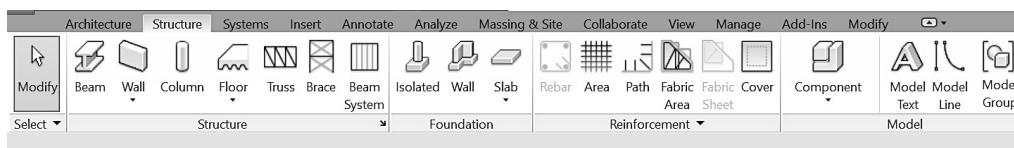


Figura 4.3 – Comandos existentes no separador Estrutura.

A pesquisa de informação sobre o edifício, teve por base o formato digital. Ou seja, foram analisados os ficheiros de levantamento arquitetónico realizados previamente por arquitetos. Esta informação relativa a esta construção não reabilitada será utilizada na sua íntegra para a modelação da edificação. Na informação recolhida sobre a edificação foi importante ter bem definido que tipo de informação era pretendida, para que apenas fosse modelado o necessário. De forma a atender aos requisitos pedidos e também de forma a não sobrecarregar o modelo com informação que não fosse útil. Por exemplo, as especialidades integradas nas infraestruturas ficaram fora do âmbito deste trabalho, porque à data ainda não existia informação relativa às redes de eletricidade, águas, gás e AVAC.

Após serem analisados os ficheiros, em Autocad, que continham o levantamento gráfico total do edifício em questão, deu-se início à sua modelação em Revit. Esta análise dos ficheiros culminou no levantamento total de todas as dimensões dos elementos constituintes do edifício.

A procura por uma simplificação na modelação, de forma a tornar o tamanho do ficheiro digital do modelo o mais pequeno possível, mas também a inclusão da informação apenas considerada essencial, foi a opção tomada inicialmente. Dessa forma as camadas dos vários constituintes das paredes, interiores e exteriores, e das lajes dos pisos não serão representadas.

Em primeiro lugar, foram estabelecidos os níveis (cotas de pavimento) a que cada piso se encontrava (Figura 4.4).

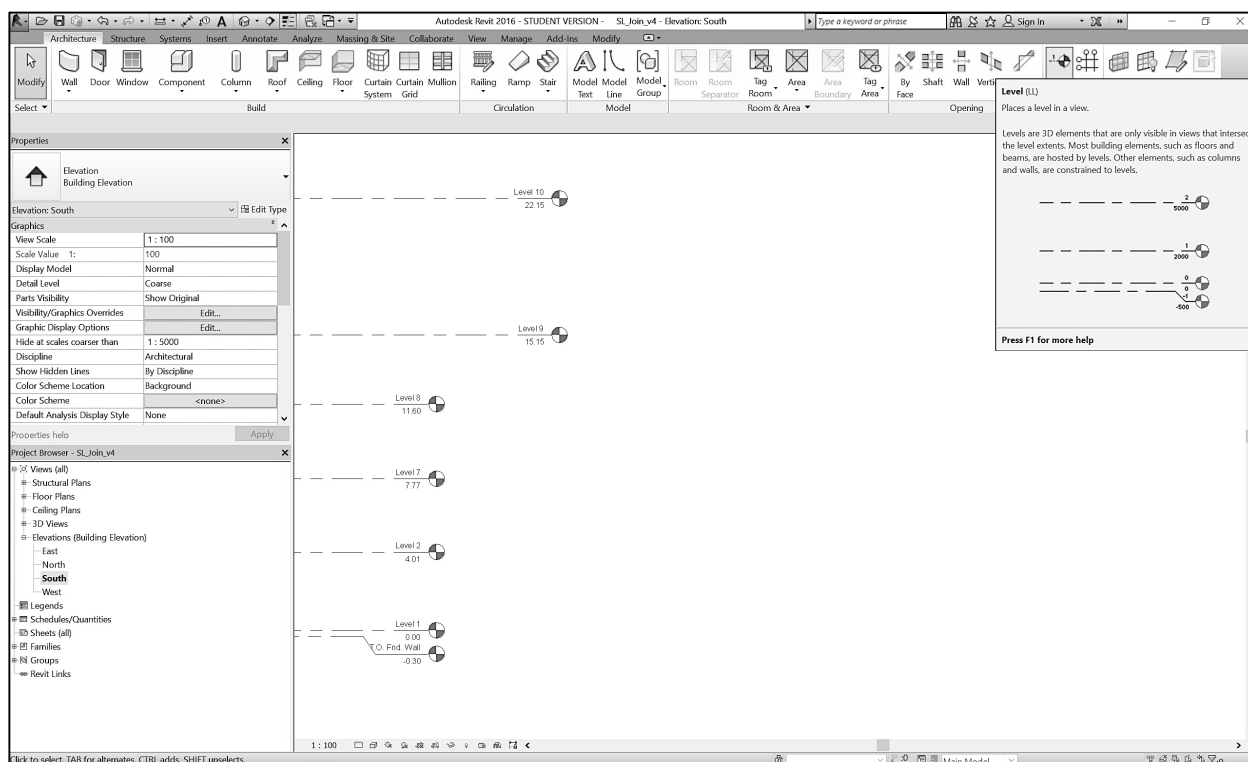


Figura 4.4 – Cotagem dos pisos.

De seguida, foi assumida graficamente a existência dum ensoleiramento geral, meramente para servir de base ao modelo que iria crescer ascendentemente. À cota zero, deu-se início à modelação das paredes estruturais e não estruturais com as dimensões presentes nos ficheiros em formato digital (Autocad). Devido a não existir uma standardização da construção quando o edifício foi construído, foi necessário modelar mais de uma dezena de tipos de paredes genéricas com dimensões diferentes (Figura 4.5).

De seguida, foram modelados os pavimentos do piso superior, depois de anteriormente já terem sido analisadas as dimensões dos pavimentos e todos os pés-direitos de todas as divisões do edifício (Figura 4.6). Este processo repetiu-se até atingir a cobertura, culminando na criação de dezenas de elementos modelados.

No caso da cobertura, esta foi modelada tal e qual a existente no edifício. Interiormente foi modelada a caixa de escadas, com o número exato de degraus, fazendo, assim, a união dos vários pisos. Para finalizar e para que a nível exterior este modelo do edifício se assemelhasse à realidade, foram também modeladas as portas, janelas e varandim.

Como a parametrização de todos os elementos pode ser feita a qualquer momento, depois de finalizar o modelo a nível estrutural, foi possível tentar parametrizar todos os elementos que o constituem,

alterando, como por exemplo, integrar nas paredes as suas camadas constituintes (revestimentos), alterar o tipo de material de elementos (Figura 4.7) e alterar as dimensões de elementos que não tenham sido bem introduzidas.

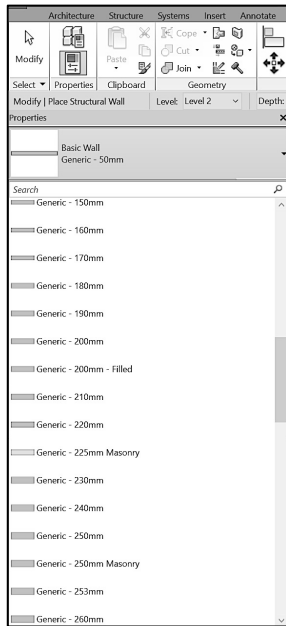


Figura 4.5 – Exemplos das paredes genéricas criadas.

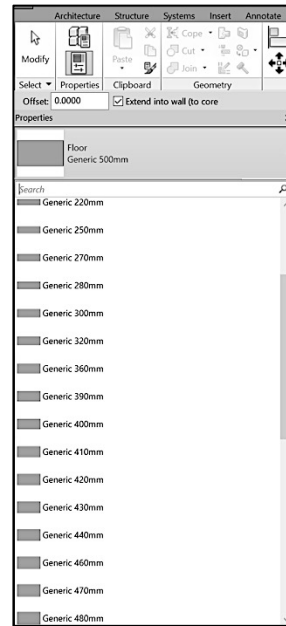


Figura 4.6 – Exemplos dos pavimentos genéricos criados.

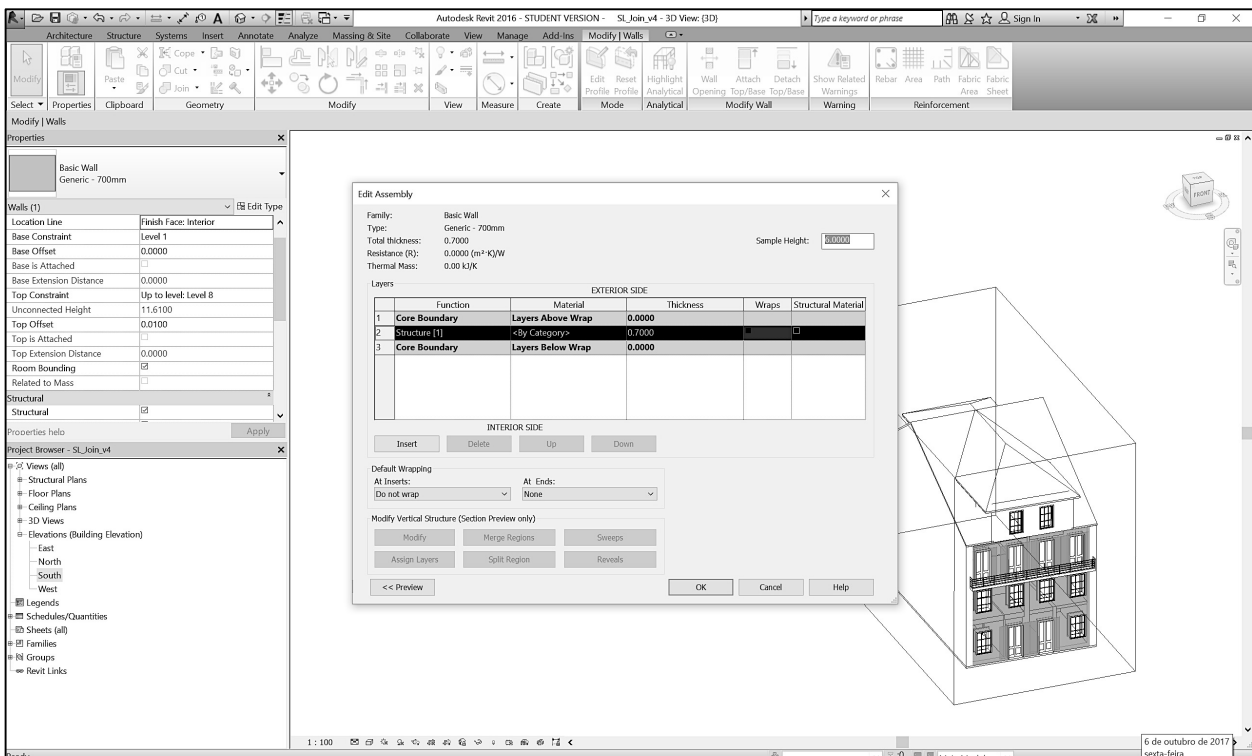


Figura 4.7 – Possibilidade de edição das camadas constituintes duma parede.

A Figura 4.8 e a Figura 4.9 representam o início e o faseamento da modelação do edifício, respetivamente. Este faseamento foi feito piso a piso para se conseguir um maior rigor no resultado final.

Na Figura 4.10 já se encontra representado o modelo em Revit do edifício proposto para o estágio curricular.

A Figura 4.11 representa a vista em 3D de um corte do modelo. O Revit possibilita ao utilizador que possa realizar cortes no modelo em qualquer altura da sua modelação. Esta ferramenta facilita e possibilita ao utilizador a visualização de alguma irregularidade relativa à construção do modelo. A nível visual também pode ser importante que se pretenda uma apresentação mais interativa do modelo realizado.

Com o corte é possível visualizar-se os elementos interiores, que de outra forma não seria possível. Assim, passam a estar visíveis, por exemplo, as divisões interiores, as paredes interiores com diferentes espessuras, as vigas de madeira em secção circular que fazem parte do pavimento de madeira e a caixa de escadas. Este comando do Revit contribui, assim, para uma visualização mais interessante do modelo finalizado.

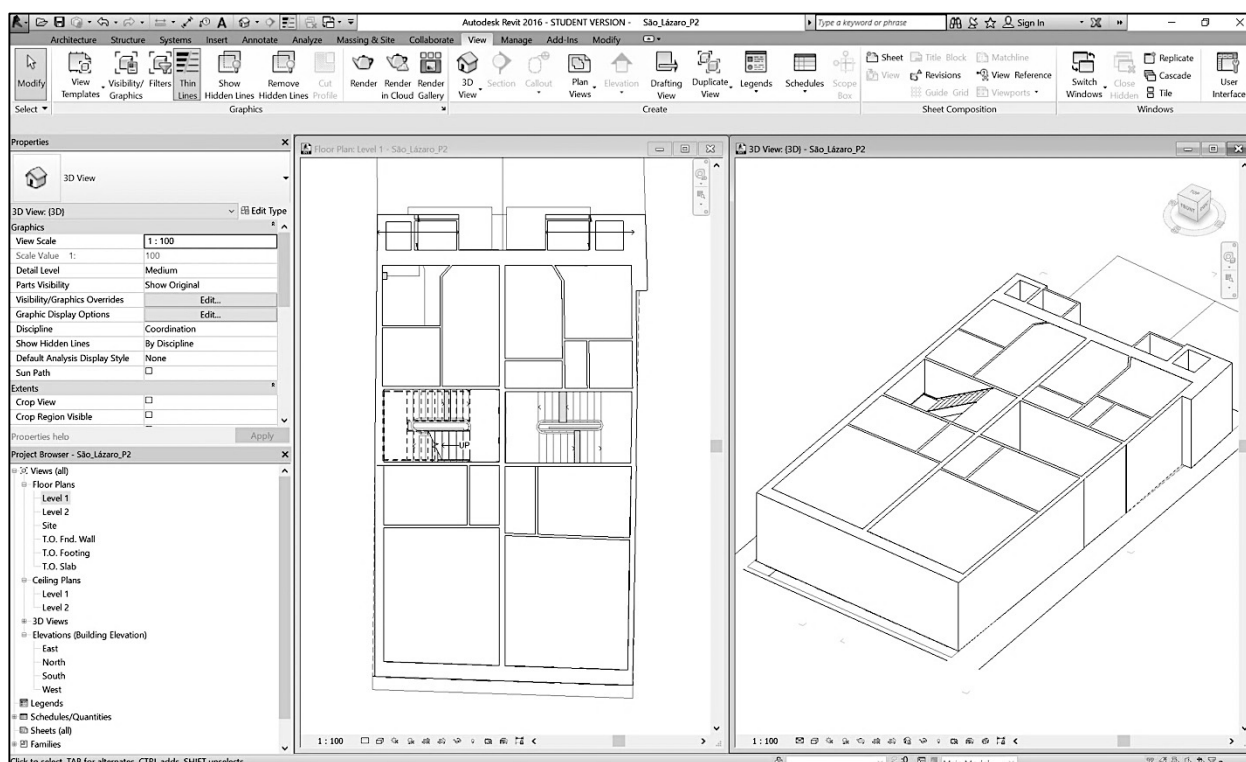


Figura 4.8 – Vista em planta e 3D do início da modelação do edifício.

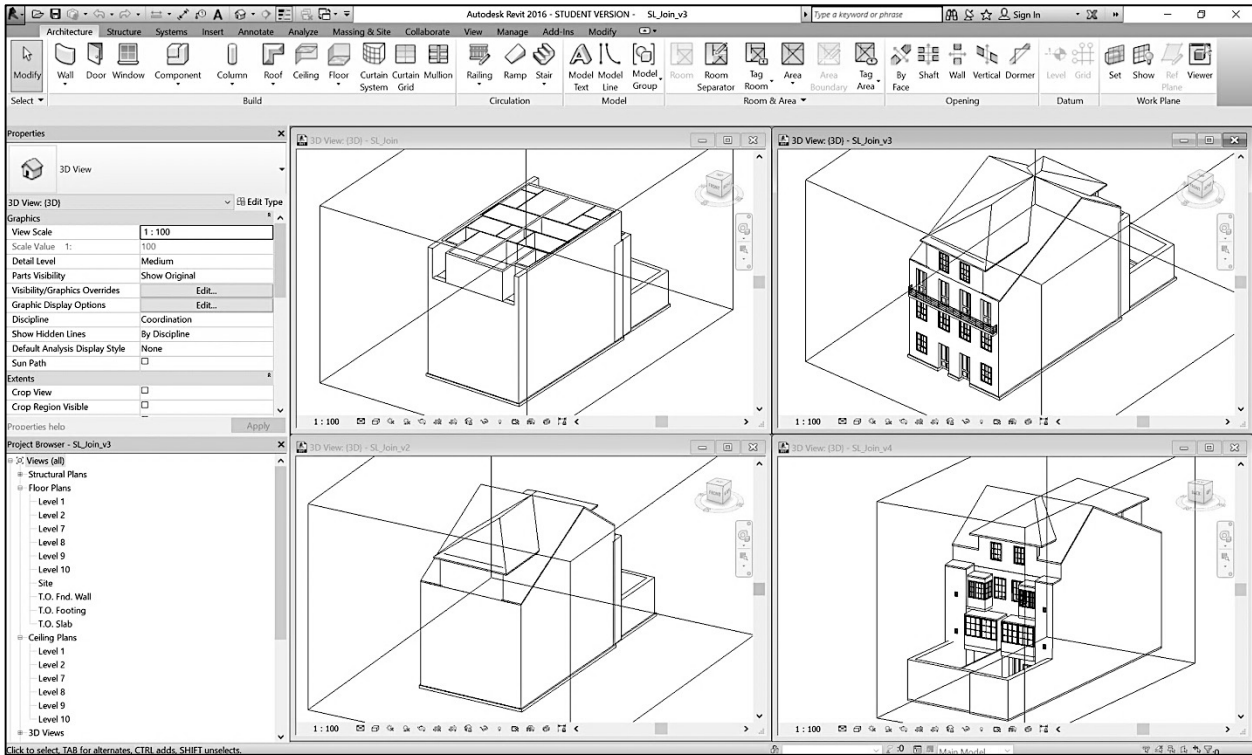


Figura 4.9 – Vista 3D do faseamento construtivo da modelação do edifício.

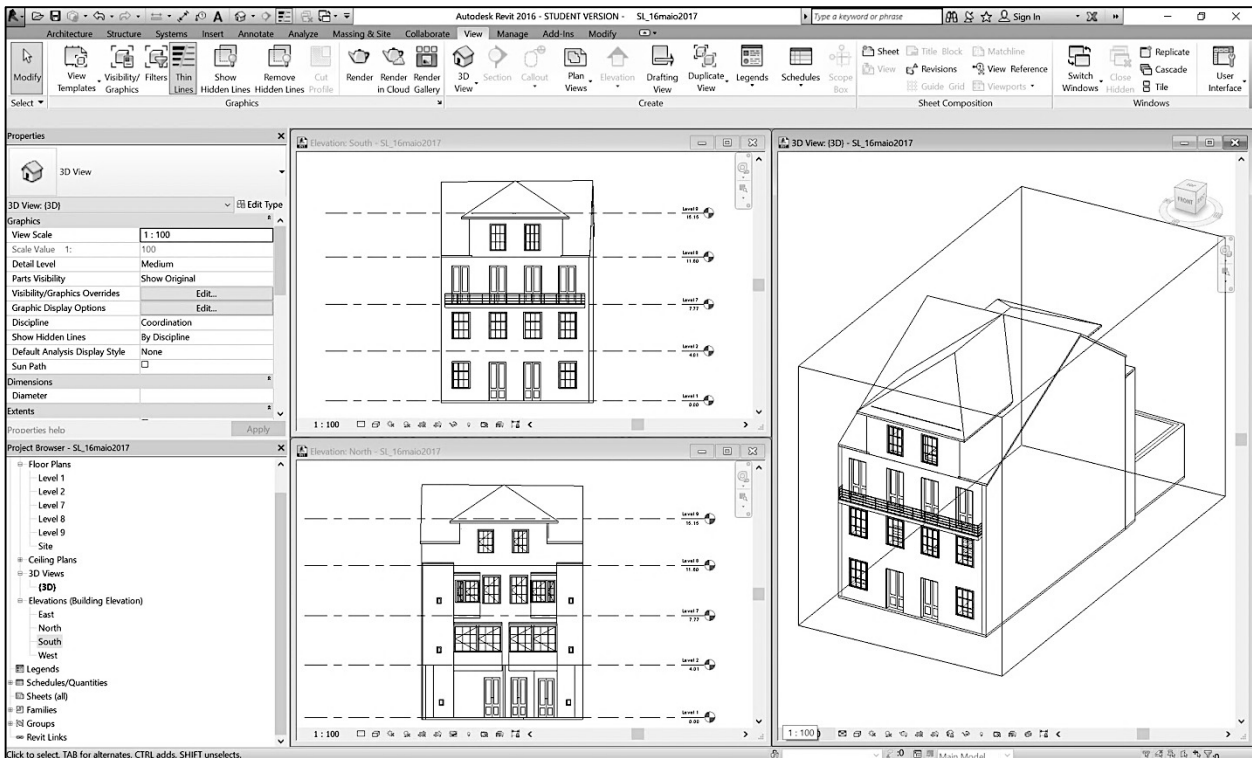


Figura 4.10 – Alçados e vista 3D do edifício.

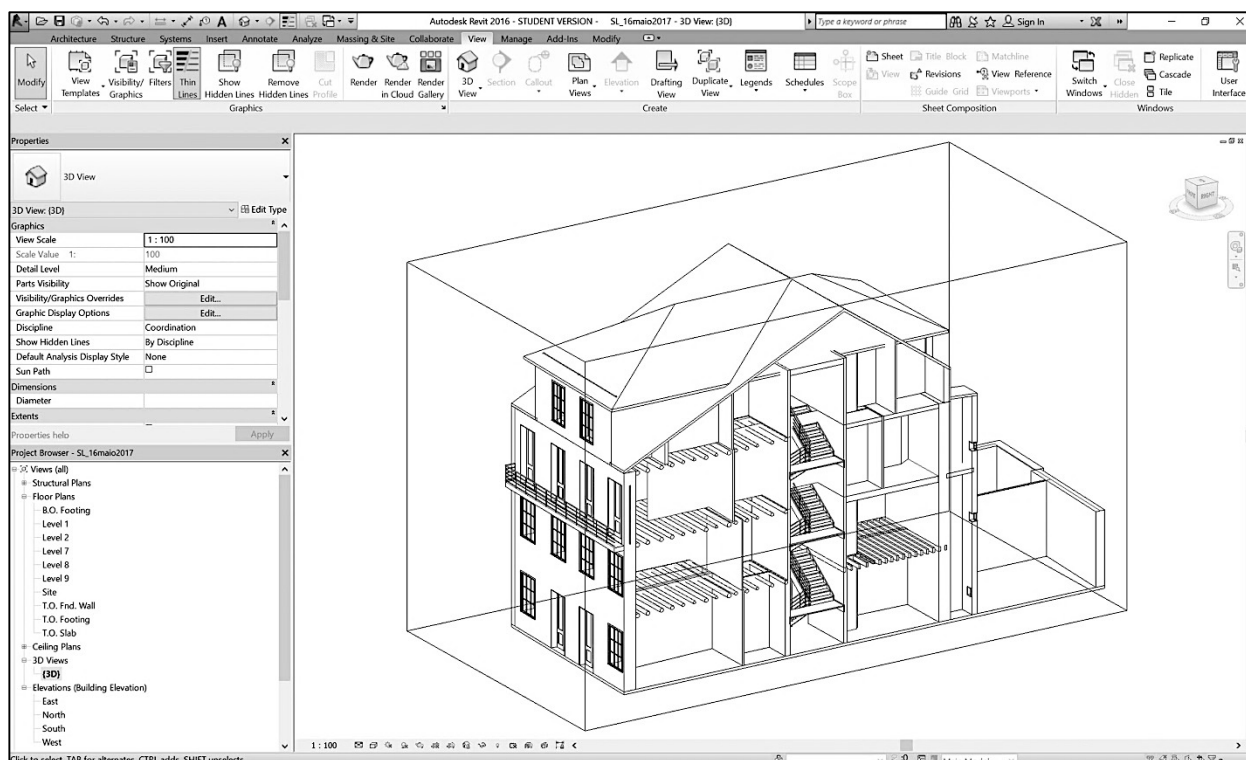


Figura 4.11 – Corte em vista 3D do edifício.

4.2.2 Level of Development (LOD)

Segundo Soares [23], outro componente importante na viabilidade da metodologia BIM é o *Level of Development* (LOD). O LOD é a quantidade de informação e geometria fornecida pelo autor do conteúdo ou por outro participante do projeto.

Segundo a VICO [24], o LOD para um modelo BIM deve corresponder às necessidades do modelador, do engenheiro projetista, e dos orçamentistas. O LOD identifica a quantidade de informação que é conhecida sobre um elemento do modelo em um determinado momento. Esta "riqueza de informações" cresce à medida que o projeto se aproxima da conclusão.

Existem cinco níveis, desde o modelo conceitual até ao modelo *as-built* que classificam a forma lógica de progressão do modelo. Os níveis dividem-se no LOD 100, LOD 200, LOD 300, LOD 400 e no LOD 500, segundo a linguagem utilizado nos EUA (Figura 4.12). O LOD não é necessariamente uma medida da quantidade de informação, embora, obviamente, deve existir informação suficiente para satisfazer o nível LOD em que o objeto se encontra. Também não é uma medida da quantidade de precisão ou qualidade gráfica.

Silva [22] faz assim a seguinte divisão: os primeiros três níveis são aplicados à fase de projeto, o quarto à construção e o quinto à operação e manutenção do edifício.

Portanto, em termos gerais, os níveis de LOD podem ser:

- LOD 100 – Modelo Conceptual;
- LOD 200 – Modelo de geometria aproximada;
- LOD 300 – Modelo de geometria mais precisa;
- LOD 400 – Modelo de fabrico;
- LOD 500 – Modelo *as-built*.

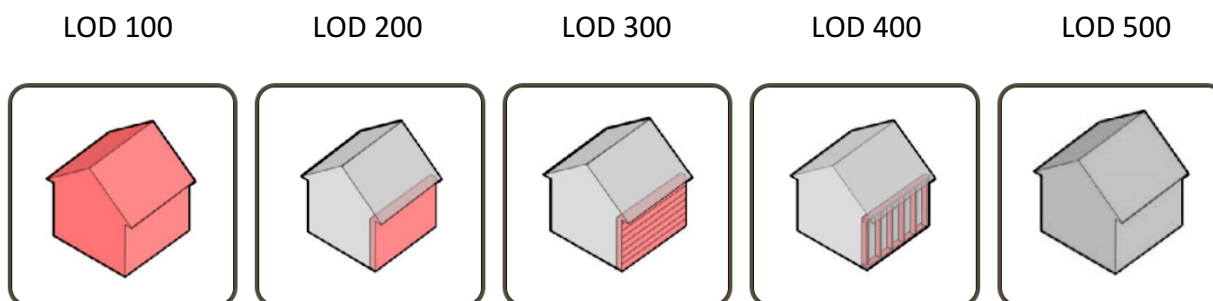


Figura 4.12 – LOD aplicado a um edifício. (Adaptado de McPhee [19])

Uma forma de facilmente demonstrar este conceito é a sua aplicação num objeto (por exemplo, uma cadeira) (Figura 4.13). Portanto, os níveis de LOD para uma cadeira podem ser:

- LOD 100 – Existe uma cadeira;
- LOD 200 – Existe uma cadeira com um determinado volume;
- LOD 300 – Existe uma cadeira com um determinado volume, com rodas e descanso para os braços;
- LOD 400 – Existe uma cadeira com um determinado volume, com rodas e descanso para os braços, de uma determinada marca e modelo;
- LOD 500 – Existe uma cadeira com um determinado volume, com rodas e descanso para os braços, de uma determinada marca e modelo e que foi adquirida numa determinada data a um determinado fornecedor.

Ao observar a Figura 4.13, apesar de existir uma aparente regressão gráfica no LOD 300, isso não significa que esse modelo possua menos informação que os anteriores. O nível de detalhe do objeto, ajustável no Revit, não significa um progresso no projeto, isto porque a evolução no LOD significa que existe um aumento de informação do objeto.

Devido à enorme quantidade de possibilidades na utilização da metodologia BIM, pode tornar-se confuso determinar qual o correto nível de detalhe a usar. É fácil perceber que diferentes fins como um estudo da volumetria do edifício e resultados de consumos energéticos do edifício irão necessitar de níveis de detalhe da informação completamente diferentes.

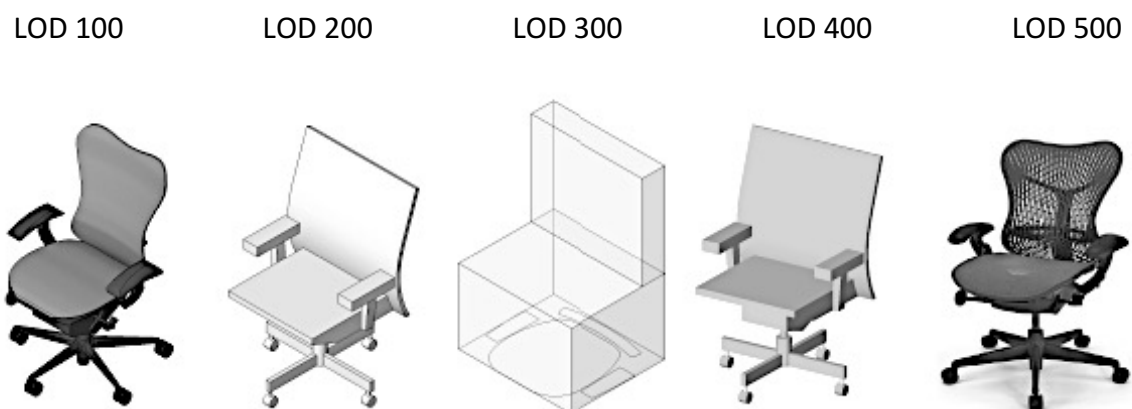


Figura 4.13 – LOD aplicado a um edifício (Adaptado de McPhee [19]).

4.2.3 Modelação paramétrica

Como já foi referido anteriormente e segundo Magalhães [17], a BIM é uma metodologia de partilha de informação, que vem revolucionar os métodos de projeto tradicionais uma vez que é baseada num modelo tridimensional do edifício comum aos vários intervenientes, ajudando arquitetos, engenheiros e construtores num planeamento mais eficiente e otimizado do projeto do edifício.

A grande diferença entre um *software* de modelagem 3D e um *software* BIM é a sua capacidade de gerar objetos paramétricos. É a parametrização que permite gerar objetos editáveis que podem ser alterados automaticamente. Assim, para cada elemento construtivo é possível especificar os parâmetros geométricos como também outros parâmetros como os constituintes do elemento, propriedades térmicas e acústicas, custos de material e custos de construção. Após feitas as alterações pretendidas, o modelo executa automaticamente essas alterações, mantendo sempre a sua relação com os elementos adjacentes.

A construção da parte estrutural do modelo é, então, realizada através de uma modelação paramétrica. O Revit dispõe de vários elementos estruturais, sendo todos eles parametrizáveis (por exemplo: pilares, vigas, lajes maciças, etc.). Ou seja, em cada elemento, todas as suas características físicas podem ser alteradas.

Modelação paramétrica de uma viga de madeira com secção circular

Para a criação de um modelo com o conceito BIM é necessária a existência de objetos capazes de traduzir os diversos elementos necessários para a construção do mesmo. Para isso, existem "Famílias de objetos" (paramétricos) que permitem ao utilizador criar novos objetos com base na modificação de objetos existentes.

CAPÍTULO 4

Neste caso em concreto e com o edifício que foi abordado no estágio curricular, foi necessário criar uma viga de madeira com secção circular parametrizável. As vigas constituintes do edifício tinham estas características, mas o Revit não possuía este tipo de elementos. Como na altura da construção do edifício não existia uma standardização da produção de vigas de madeira, cada viga possui comprimentos e diâmetros diferentes. Desta forma, foi criada uma viga de madeira com comprimento e diâmetro parametrizáveis. Assim, foi possível fazer um correto levantamento dos elementos encontrados no edifício.

Na Figura 4.14 é possível ver a viga de madeira com secção circular apresentada em diferentes vistas:

1. Vista 3D do objeto;
2. Vista em planta do objeto;
3. Vista em alçado do objeto;
4. Propriedades do objeto.

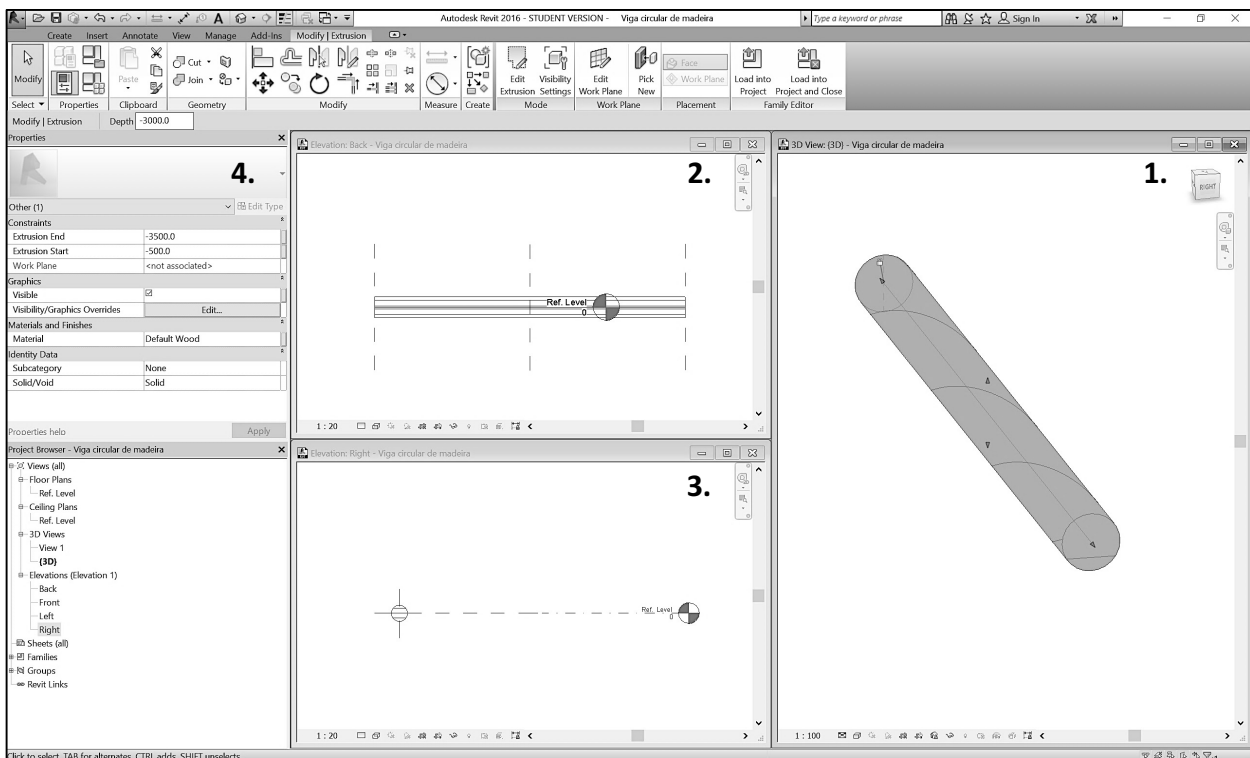


Figura 4.14 – Exemplo da criação e parametrização de uma viga de madeira com secção circular.

Mais uma vez, caso uma família não esteja disponível no projeto Revit, é possível criá-la de raiz e importar para o projeto.

4.2.4 Robot Structural Analysis

Esta ferramenta tem como função a análise estrutural, permitindo ao utilizador análises avançadas (análises estáticas, lineares, não lineares e dinâmicas) de diversos tipos de estruturas. O Robot Structural

Analysis dispõe também de módulos avançados de dimensionamento de estruturas metálicas, de betão armado e de madeira. O software disponibiliza uma ligação direta com a plataforma Revit, facilitando a implementação de uma metodologia BIM.

4.3 INTEROPERABILIDADE

Um dos pilares que permite a funcionalidade da metodologia BIM é a interoperabilidade.

Segundo Soares [23], um edifício é algo extremamente complexo, constituído por diversas soluções, sendo extremamente complicado criar um ficheiro que consiga compreender todos os conceitos nas diversas soluções possíveis. Esta tarefa torna-se ainda mais complexa quando existem vários softwares existentes com a sua própria maneira de trocar informação (linguagem). A interoperabilidade, representa a capacidade de comunicação entre os diversos softwares existentes, mas sobretudo a comunicação entre os diferentes intervenientes do processo construtivo. Este conceito ganha uma maior importância numa metodologia BIM.

Segundo Martins [18], o ciclo de vida de um edifício é composto por uma sequência de fases, que não são independentes umas das outras nem têm ligações rígidas. Em cada uma dessas fases são criadas e utilizadas informações que serão posteriormente utilizadas e necessárias em todo o ciclo de vida do edifício, por diferentes intervenientes.

A compatibilização de modelos é o ponto mais forte da tecnologia BIM, possibilitando uma visão geral sobre o projeto, a compatibilização dos elementos, a identificação de erros e omissões, a produção de vistas e pormenores complexos e a extração de quantidades globais.

A interoperabilidade define-se como a aptidão de vários modelos e sistemas operarem em conjunto de forma a trocarem informações de forma eficiente. Relativamente à metodologia BIM, cujos principais objetivos são a colaboração, coordenação e comunicação entre as várias especialidades, é essencial que o processo de partilha de informação seja dependente no que toca à capacidade de se obter informação relevante sobre os modelos. Para tal, é necessária uma normalização dos formatos para a partilha de dados. Este conceito é a base do sucesso de implementação da metodologia BIM, e foi isso que, por exemplo, a Autodesk conseguiu com os seus programas. Ou seja, possibilitou que a informação disponibilizada num ficheiro, fosse possível de ser lida num outro programa.

Com o crescente aumento do uso da metodologia BIM e da quantidade de informação produzida, os problemas de interoperabilidade, foram conseqüentemente, agravados, no entanto está a ganhar cada vez maior importância. Foi então necessário criar uma plataforma de partilha que permitisse comunicação entre os diferentes softwares.

Mais concretamente, a interoperabilidade entre o Revit e o Robot Structural Analysis que é feita através de uma extensão (de instalação obrigatória, não pré-definida) no Revit, possibilita ao utilizador o envio do modelo diretamente para o Robot Structural Analysis ou proceder à atualização do modelo de Revit a partir de um modelo de Robot Structural Analysis. Deste modo, podem ser transferidos dados para um ficheiro do Robot Structural Analysis possibilitando ao projetista de continuar a trabalhar no ficheiro Revit Structure, enquanto outro técnico trabalha no modelo Robot Structural Analysis.

O intercâmbio entre Revit e Robot Structural Analysis é bidirecional permitindo o modelo em BIM reconhecer as alterações ao projeto de estruturas efetuadas no processo de dimensionamento do Robot Structural Analysis. Esta alterações podem envolver modificações da secção dos elementos, adição e remoção de elementos, entre outras.

4.3.1 Aplicação da interoperabilidade

Para testar esta funcionalidade de interoperabilidade entre programas foi desenhado, no Revit, um pavimento de madeira com vigas de madeira em secção retangular, que será integrado no projeto de reabilitação. Depois de ter sido feito um pré-dimensionamento, sem grandes compromissos com a realidade. (Figura 4.15).

Depois de terminada esta etapa, foi aberta extensão que permite fazer a ligação do Revit ao Robot Structural Analysis. A Figura 4.16 representa o mesmo pavimento de madeira com vigas em secção retangular.

O pavimento foi modelado no Revit, contudo, o Robot Structural Analysis continua a permitir a sua modelação, modificação ou parametrização. Permite também a definição de pesos próprios, ações estáticas, tipos de combinações e a posterior análise de resultados, que permitirá perceber a viabilidade desta solução.

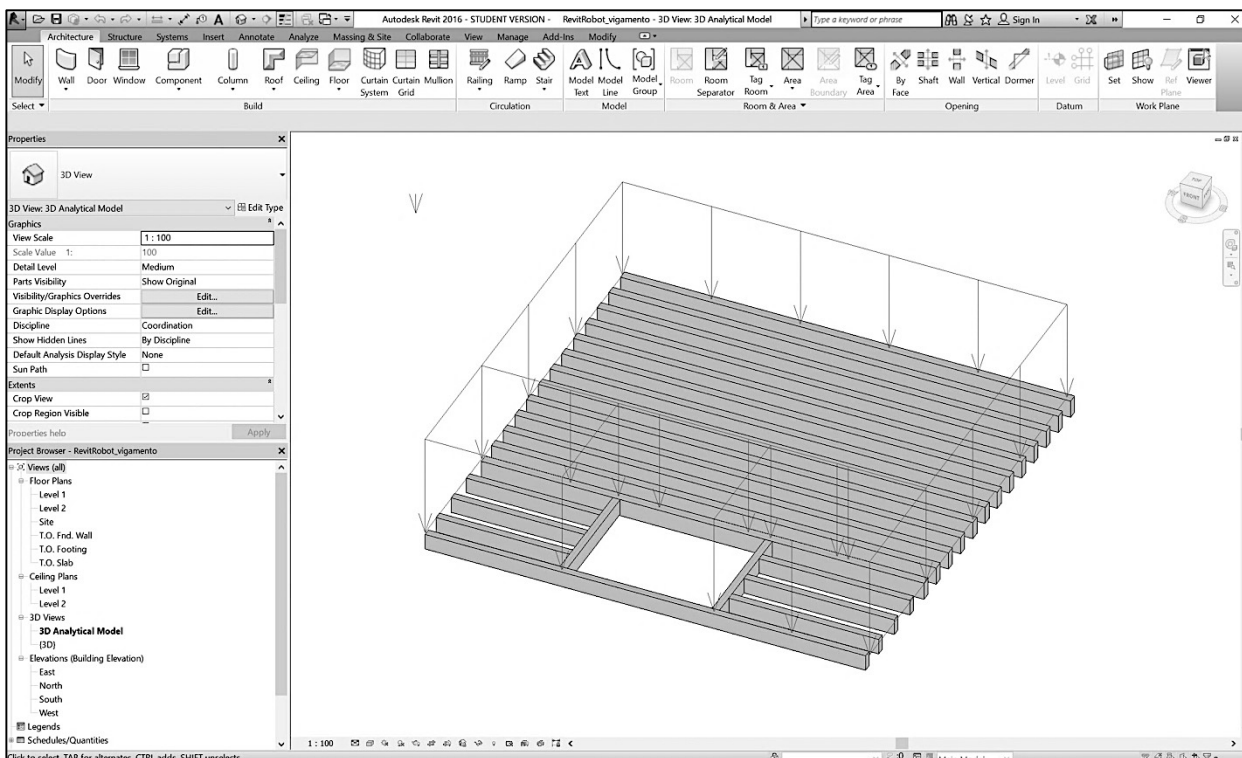


Figura 4.15 – Revit. Pavimento de madeira com vigas em secção retangular. Teste de interoperabilidade.

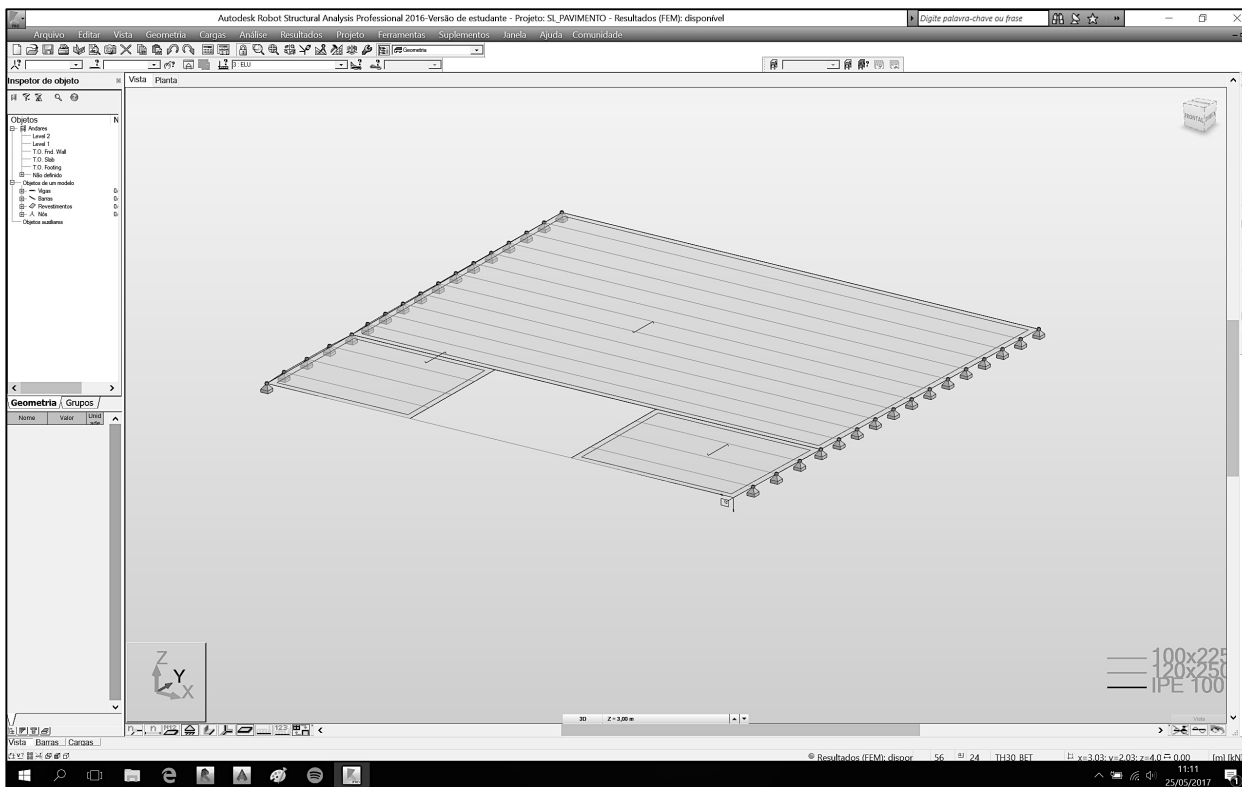


Figura 4.16 – Robot Structural Analysis. Pavimento de madeira com vigas em secção retangular. Teste de interoperabilidade.

CAPÍTULO 4

No próximo capítulo serão dimensionadas as novas vigas de madeira através do cálculo normalizado, respeitando as normas em vigor (EC5) e será feita a comparação com os resultados obtidos através da interoperabilidade entre estes programas. Este exemplo de interoperabilidade entre programas serviu para perceber as potencialidades que estas ferramentas fornecem aos utilizadores.

CAPÍTULO 5

PROJETO DE DIMENSIONAMENTO – PAVIMENTO DE MADEIRA

5.1 GENERALIDADES

A inspeção duma estrutura de madeira antiga apresenta características específicas que são diferentes das características dos projetos de novas estruturas. Por exemplo, quando se pretende mudar o tipo de utilização e dar um novo funcionamento a um edifício já existente, isso poderá implicar um aumento das cargas atuantes, que em alguns casos podem ser incompatíveis com o tipo de estrutura original do edifício. Os seguintes pontos abordam as noções gerais necessárias a ter para o dimensionamento das estruturas de madeira. Estas noções foram baseadas e retiradas de autores especialistas nesta área e da regulamentação aplicada.

5.2 CLASSES DE SERVIÇO E DURAÇÃO DAS AÇÕES

Negrão [20] afirma que as estruturas de madeira devem ser calculadas de forma diferente consoante o ambiente em que se encontram, pois este determina as condições de equilíbrio termoigrométrico, que se refletem em diferentes dimensões das peças consoante o teor em água a que está exposto.

O Eurocódigo 5: *Design of timber structures – Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings (1995)*, (EC5-1.1), resolve esta questão através do conceito de classes de serviço. As classes de serviço 1, 2 e 3, estão definidas na norma NP EN 335-1: *Durabilidade da madeira e de produtos derivados (1994)*, as quais se destinam a enquadrar o problema da durabilidade natural da madeira face às condições ambientais em que se encontram as peças.

A norma NP EN 335-1 especifica cinco classes de risco:

- Classe de risco 1: ambiente interior protegido;
- Classe de risco 2: ambiente interior não protegido ou exterior não sujeito à ação direta da água das chuvas e com contatos muito esporádicos com água líquida;
- Classe de risco 3: ambiente exterior com contatos frequentes com água das chuvas, muitas vezes e em períodos longos;
- Classe de risco 4: em contato permanente com água doce em fase líquida;

- Classe de risco 5: permanente contato com água salgada.

O EC5-1.1 não se aplica a estruturas sujeitas às classes de risco 4 ou 5 e as classes de risco 1 a 3 correspondem sensivelmente às classes de serviço 1 a 3 previstas nesta norma. Arriaga [1] descreve as três primeiras classes de serviço, tal que:

A Classe de Serviço 1 é caracterizada por um teor de humidade nos materiais correspondente a uma temperatura de $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ e uma humidade relativa do ar que só excede 65% em poucas semanas durante o ano. Nesta classe, o teor de humidade médio de equilíbrio higroscópico, na maioria das madeiras coníferas, não excede os 12%. As estruturas não ventiladas, geralmente, pertencem a esta classe.

A Classe de Serviço 2 é caracterizada por um teor de humidade nos materiais correspondente a uma temperatura de $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ e uma humidade relativa do ar que só excede 85% em poucas semanas durante o ano. Nesta classe o teor de humidade médio de equilíbrio higroscópico, na maioria das madeiras coníferas, não excede os 20%. As estruturas não ventiladas e expostas ao ambiente exterior (sótãos) e estruturas cobertas ventiladas em climas húmidos geralmente pertencem a esta classe.

A Classe de Serviço 3 é caracterizada por condições climáticas que conduzam a teores de humidade superiores aos da classe de serviço 2. Na classe de serviço 3 encontram-se as estruturas expostas as condições atmosféricas, em contacto com água ou solo.

Quanto à duração das ações, o EC5-1.1 prevê 5 categorias:

- Permanentes: mais de 10 anos de duração (peso próprio);
- Longa duração: entre 6 meses e 10 anos de duração (sobrecarga de carácter permanente);
- Média duração: entre 1 semana e 6 meses (sobrecargas correntes ou neve em certos casos);
- Curta duração: menos de uma semana (vento, neve em certos casos);
- Instantâneas: vento, sismo, ações de acidente.

Negrão [20] afirma que, de modo geral em Portugal, a neve será sempre uma ação de curta duração e as sobrecargas serão consideradas como ações de média duração.

Os coeficientes de segurança a usar na verificação da estabilidade são definidos em função de dois coeficientes para cada situação concreta em função da classe de serviço e da duração da ação (k_{mod} e k_{def}) e dos coeficientes de segurança a considerar para os materiais utilizados (γ_M).

5.3 MODELOS DE CÁLCULO ESTRUTURAL

De modo geral, assume-se, de forma simplificada, que no plano perpendicular ao fio da madeira a resistência é uniforme segundo qualquer direção, definindo-se assim duas direções resistentes: a direção

do fio e a direção perpendicular ao fio. A orientação das peças não deve ser aleatória, devendo estas ser orientadas de modo a que os esforços atuantes solicitem preferencialmente as peças na direção do fio.

É necessário também ter em conta o efeito que o modo de ligar as peças tem no comportamento global da estrutura. Dado que existe sempre alguma ductilidade e deformabilidade localizada de qualquer ligação entre duas peças de madeira, não é possível conhecer com rigor se a ligação é rígida ou articulada. Qualquer ligação será sempre capaz de transmitir algum momento fletor, mas não será nunca totalmente rígida, ou seja, o modelo de cálculo contínuo não será perfeitamente representativo dos reais esforços atuantes.

A avaliação dos esforços nos diversos elementos estruturais é também em si um processo em tudo semelhante às estruturas metálicas com a dificuldade acrescida, já atrás referida, que resulta na dificuldade de conhecer com rigor a capacidade de uma dada ligação transmitir esforços, com destaque para o momento fletor.

A maior dificuldade no cálculo de estruturas de madeira reside, assim, no domínio das ligações. De qualquer forma, face à dificuldade em conhecer de forma rigorosa a capacidade resistente de um dado elemento estrutural em madeira, os coeficientes de segurança reais considerados na avaliação da capacidade resistente dos materiais, são, em geral, muito elevados, pelo que, ao nível do cálculo, não valerá a pena em geral, recorrer a modelos de cálculo muito sofisticados. O importante é conhecer com rigor a ordem de grandeza das tensões, deformações e vibrações atuantes e projetar sempre com alguma segurança, considerando dimensionamentos relativamente confortáveis.

Aliás, recorrentemente o fator condicionante do dimensionamento será o estado limite de utilização, já que a madeira tem um módulo de elasticidade relativamente baixo, quando comparado com as principais propriedades (resistência à flexão na direção do fio, resistência à compressão na direção do fio, resistência à tração na direção do fio). O comportamento às vibrações é também um problema importante já que a madeira tem um coeficiente de amortecimento relativamente baixo, tendo alguma dificuldade em dissipar rapidamente a energia vibratória atuante, o que pode conduzir a problemas complicados na utilização.

De qualquer forma, em geral, face à enorme capacidade de transmissão de esforços entre peças que a madeira possui (plasticidade das ligações), o fator mais decisivo na conceção estrutural consiste na modelação correta das estruturas.

5.4 VERIFICAÇÃO DE SEGURANÇA

A verificação de segurança de estruturas de madeira é preferencialmente executada de acordo com as regras definidas no Eurocódigo 5 (EC5). Este divide-se em três partes:

- A **Parte 1.1** (EC5-1.1) apresenta alguns modelos de cálculo e diversos formulários, especificamente aplicáveis à avaliação da capacidade resistente de elementos estruturais em madeira, quer na verificação aos estados-limite últimos quer na verificação aos estado-limite de utilização. Apresenta ainda um formulário e regras de dimensionamento geométrico para os diversos tipos de ligadores aplicáveis a estruturas de madeira;
- A **Parte 1.2** (EC5-1.2) é relativa a estruturas de madeira, em situação de incêndio;
- A **Parte 2** (EC5-2) é relativa a pontes em madeira.

5.5 ESPECIFICIDADES DAS ESTRUTURAS DE MADEIRA

5.5.1 Especificidades mais importantes

Como problemas mais importantes das estruturas de madeira podem referir-se:

- A obrigatoriedade de analisar o problema das vibrações (Estados Limites de Utilização, ELS);
- A obrigatoriedade de efetuar análises lineares de 2ª ordem em algumas estruturas (pórticos);
- A dificuldade de calcular ligações;
- A importância como o modo de ligar as peças tem nos esforços a que as mesmas estão sujeitas; a necessidade de escolher bem o modelo de cálculo de acordo com o processo de ligação escolhido;
- A importância da deformação (muitas vezes os ELS são críticos em termos de dimensionamento);
- As variações dimensionais das peças resultantes da variação da temperatura e humidade do ambiente envolvente das estruturas;
- A anisotropia da madeira e respetiva influência no modo de montar as peças.

5.5.2 Durabilidade e preservação

Sendo um material natural, a madeira degrada-se de forma diferente do betão armado e do aço. Degrada-se porque é atacada por fungos e insetos xilófagos. Por esse motivo, é fundamental conceber as estruturas de modo a que a madeira esteja sujeita a ventilação frequente e para que não esteja em contacto permanente com humidade.

Ao conceber estruturas de madeira é assim necessário conseguir que o teor em água de equilíbrio da mesma fique sempre próximo dos 13 a 17%, o que se consegue eliminando as causas de infiltração de água nas estruturas (capilaridade, condensações, chuva incidente) ou com ventilação.

Em ambiente interior protegido, a madeira não necessita em geral de tratamento de preservação. No exterior, em geral a madeira e derivados não têm durabilidade natural suficiente para resistirem aos

ataques dos agentes bióticos sem tratamento preventivo. Como já mencionado anteriormente, a proteção com pintura ou velatura é sempre desejável, devendo estas ser objeto de ações regulares de manutenção, pelo menos de 3 em 3 anos.

5.5.3 Comportamento ao fogo

A madeira é um material combustível e por isso tem um deficiente comportamento em termos de reação ao fogo. Contudo, a resistência ao fogo das estruturas sem tratamento é em geral superior à das estruturas de betão armado ou metálicas projetadas em alternativa para os mesmos casos de projeto.

O comportamento deficiente ao fogo das estruturas de madeira é assim um falso problema já que, em Portugal, as estruturas não recebem geralmente proteção contra o fogo, pelo que as estruturas de madeira cumprirão mais facilmente as disposições regulamentares que as suas competidoras, fabricadas com outros materiais.

5.5.4 Ligações

A maior dificuldade no cálculo de estruturas de madeira associa-se às ligações. A anisotropia da madeira introduz diversas limitações no modo de ligar as peças. A capacidade mecânica numa ligação é, em geral, bastante reduzida devido à falta de espaço físico para colocar os ligadores necessários.

A durabilidade das ligações é sempre um fator importante a considerar. O cálculo das ligações e a garantia da sua estabilidade ao longo da vida da estrutura, tendo em conta um plano de manutenção a definir em projeto, constituem assim um difícil desafio para os projetistas.

Convém, no entanto, realçar que as ligações de peças em madeira, sobretudo em madeira lamelada colada, para vãos pequenos, são simples de calcular e pormenorizar pois os esforços são relativamente reduzidos e o cálculo das ligações não oferece dificuldades especiais.

5.5.5 Preparação para o cálculo de estruturas de madeira

Calcular estruturas de madeira não difere muito em relação ao cálculo de estruturas de outros materiais estruturais correntes. Existem, no entanto, dois aspetos essenciais que é fundamental dominar para se poder realizar projetos de estruturas de madeira novas ou existentes com suficiente segurança:

- A necessidade de conhecer EC5;
- O conhecimento dos perigos associados à incorreta utilização da madeira em estruturas e de deficiente estimativa dos valores de cálculo a usar para os materiais.

5.6 BASES DE PROJETO

Negrão [20] afirma que, o projeto de estruturas de madeira deve estar de acordo com o Eurocódigo 0: *Bases para o projeto de estruturas*, (EC0), que define as regras base de projeto utilizando os Eurocódigos.

Como aspetos fundamentais específicos das estruturas de madeira vale a pena referir a questão da duração das ações, a importância do teor em água e a definição dos princípios de cálculo segundo a metodologia dos Estados-Limites.

No caso dos ELS, introduzem-se neste ponto os conceitos de fator de deformação (k_{def}) e módulo de deslizamento (K_{ser}) que basicamente resolvem aspetos específicos das estruturas de madeira relacionados com a duração das ações, fluência e classes de serviço atrás definidas.

Definem-se os diversos coeficientes de segurança (γ_M) para os materiais correntemente usados em estruturas de madeira e a forma de determinar os valores de cálculo a partir dos valores característicos das propriedades dos materiais e especifica-se genericamente a forma de avaliar as ações que atuam sobre as estruturas de madeira.

Genericamente, a verificação da estabilidade assenta nos princípios gerais definidos no EC0, utiliza ações definidas pelo projetista nos termos do Eurocódigo 1: *Ações em estruturas*, (EC1) e recorre aos métodos definidos nas 3 partes do EC5 para avaliar a capacidade resistente, nas condições de utilização e a durabilidade.

Os modelos de cálculo para os diferentes Estados Limites devem ter em conta, conforme o caso:

- As diferentes propriedades dos materiais (por exemplo: resistência e rigidez);
- Os diferentes comportamentos no tempo dos materiais (duração da ação, fluência);
- As diferentes condições climáticas (temperatura, variação de humidade);
- As diferentes situações de cálculo (fases de construção, alteração das condições de apoio).

Em geral, o cálculo estrutural pode ser efetuado sem adotar precauções especiais na definição dos parâmetros de rigidez devendo usar-se valores médios (E_{mean} , G_{mean} , K_{ser}).

A análise das estruturas aos estados-limite de utilização deve ser efetuada recorrendo aos princípios definidos no EC5-1.1.

As situações a verificar dizem respeito a deformações nos elementos estruturais, aos efeitos desconfortáveis causados por vibrações resultantes do uso corrente ou as provocadas por equipamentos incorporados nas obras e à limitação do deslizamento das ligações entre elementos.

A deformação de uma estrutura, resultante dos efeitos das ações (tais como, esforços normais e transversos e momentos fletores) e da variação do teor em água, deve manter-se dentro de limites apropriados, tendo em atenção, por um lado, a possibilidade de ocorrência de danos em materiais de

revestimento, tetos, pavimentos, divisórias e acabamentos, e, por outro lado, as exigências funcionais e de aspeto.

A deformação instantânea, u_{inst} , deverá ser calculada para a combinação característica de ações, conforme definida no ECO, utilizando valores médios apropriados dos módulos de elasticidade, de distorção e de deslizamento, e utilizando, em geral, valores resultantes de uma análise linear elástica de primeira ordem.

A deformação final, u_{fin} , deverá ser calculada para a combinação de ações quase-permanentes, conforme definida no ECO, e utilizando as Expressões 5.1 a 5.4, abaixo mencionadas. Para estruturas constituídas por elementos, componentes e ligações com as mesmas características de fluência, e na hipótese de uma relação linear entre as ações e as deformações correspondentes, a deformação final, u_{fin} , poderá ser considerada igual:

$$u_{fin} = u_{fin,G} + u_{fin,Q_1} + \sum_{i>1} u_{fin,Q_i} \quad (5.1)$$

Em que, a deformação final para uma ação permanente, G , $u_{fin,G}$:

$$u_{fin,G} = u_{inst,G} \times (1 + k_{def}) \quad (5.2)$$

Onde:

$u_{inst,G}$ – é a deformação instantânea para a ação G ;

k_{def} – é o fator de deformação definido nos Capítulos 2 e 3 do EC5-1.1.

Em que, a deformação final para uma ação variável de base da combinação, Q_1 , u_{fin,Q_1} :

$$u_{fin,Q_1} = u_{inst,Q_1} \times (1 + \Psi_{2,1} \times k_{def}) \quad (5.3)$$

Onde:

u_{inst,Q_1} – é a deformação instantânea para a ação Q_1 ;

$\Psi_{2,1}$ – é o coeficiente para o valor quase-permanente das ações variáveis.

Em que, a deformação final para uma ação variável de base da combinação, $Q_i (i > 1)$, u_{fin,Q_i} :

$$u_{fin,Q_i} = u_{inst,Q_i} \times (\Psi_{0,i} + \Psi_{2,i} \times k_{def}) \quad (5.4)$$

Onde:

u_{inst,Q_i} – é a deformação instantânea para a ação Q_i ;

$\Psi_{0,i}$ – é o coeficientes para o valor de combinação das ações variáveis;

$\Psi_{2,i}$ – é o coeficiente para o valor quase-permanente das ações variáveis.

5.7 DURAÇÃO DAS AÇÕES E TEOR EM ÁGUA

Segundo Negrão [20], a duração das ações e o teor em água afetam as propriedades de resistência e de rigidez dos elementos de madeira e de derivados de madeira, e devem ser tidos em conta no cálculo da resistência mecânica e da aptidão ao uso. Apresentam-se em seguida as expressões de cálculo a adotar nesses casos.

5.7.1 Estados Limites de Utilização/Serviço

Para a verificação da segurança em relação aos ELS, se a estrutura for constituída por elementos ou componentes com diferentes propriedades no tempo, os valores médios finais do módulo de elasticidade, $E_{mean,fin}$, do módulo de distorção, $G_{mean,fin}$, e do módulo de deslizamento, $K_{ser,fin}$, utilizados para o cálculo da deformação final, deverão ser obtidos a partir das seguintes expressões:

$$E_{mean,fin} = \frac{E_{mean}}{(1 + k_{def})} \quad (5.5)$$

Onde:

E_{mean} – é o valor médio do módulo de elasticidade;

k_{def} – é o fator para a avaliação da deformação devida à fluência e que tem em conta a classe de serviço pertinente (Tabela 6.3);

$$G_{mean,fin} = \frac{G_{mean}}{(1 + k_{def})} \quad (5.6)$$

Onde:

G_{mean} – é o valor médio do módulo de distorção;

$$K_{ser,fin} = \frac{K_{ser}}{(1 + k_{def})} \quad (5.7)$$

Onde:

K_{ser} – é o módulo de deslizamento, em N/mm^2 , aplicável ao cálculo do deslizamento de uma ligação (em mm) em função do esforço aplicado em Newton;

5.7.2 Estados Limites Últimos

Para a verificação da segurança em relação aos Estados Limites Últimos (ELU), em que a distribuição dos esforços nos elementos é afetada pela distribuição de rigidez na estrutura, os valores médios finais do módulo de elasticidade, $E_{mean,fin}$, do módulo de distorção, $G_{mean,fin}$, e do módulo de deslizamento, $K_{ser,fin}$, deverão ser obtidos a partir das seguintes expressões:

$$E_{mean,fin} = \frac{E_{mean}}{(1 + \Psi_2 \times k_{def})} \quad (5.8)$$

Onde:

Ψ_2 – é o coeficiente para o valor quase-permanente da ação.

$$G_{mean,fin} = \frac{G_{mean}}{(1 + \Psi_2 \times k_{def})} \quad (5.9)$$

$$K_{ser,fin} = \frac{K_{ser}}{(1 + \Psi_2 \times k_{def})} \quad (5.10)$$

5.8 VERIFICAÇÃO PELO MÉTODO DOS COEFICIENTES PARCIAIS

5.8.1 Valor de cálculo duma propriedade de um material

O valor de cálculo X_d de uma propriedade de resistência deve ser calculado de acordo com:

$$X_d = k_{mod} \times \frac{X_k}{\gamma_M} \quad (5.11)$$

Onde,

X_k – é o valor característico de uma propriedade de resistência;

γ_M – é o coeficiente parcial de segurança para uma propriedade de um material (Tabela 5.1);

k_{mod} – é o fator de modificação da resistência, que tem em conta o efeito da duração das ações e do teor em água (Tabela 5.2).

O valor de cálculo de uma propriedade de rigidez de um elemento E_d ou G_d deve ser calculado segundo:

$$E_d = \frac{E_{mean}}{\gamma_M} \quad (5.12)$$

$$G_d = \frac{G_{mean}}{\gamma_M} \quad (5.13)$$

5.8.2 Valor de cálculo das resistências

O valor de cálculo R_d de uma resistência (capacidade resistente) deve ser calculado como:

$$R_d = k_{mod} \times \frac{R_k}{\gamma_M} \quad (5.14)$$

Onde,

R_k – é o valor característico da capacidade resistente.

Tabela 5.1 – Valor dos coeficientes parciais de segurança γ_M .

Combinações fundamentais	
Madeira maciça	1,3
Madeira lamelada colada	1,25
LVL, contraplacado, OSB	1,2
Aglomerado de partículas de madeira	1,3
Aglomerado de fibras de madeira duro	1,3
Aglomerado de fibras de madeira semiduro	1,3
Aglomerado de fibras de madeira média-densidade (MDF)	1,3
Aglomerado de fibras de madeira brando	1,3
Ligações	1,3
Ligadores em placas metálicas perfuradas	1,25
Combinações de acidente	1,0

Tabela 5.2 – Valores de k_{mod} .

Material	Norma	Class e de serviço	Classe de duração das ações				
			Ação permanente	Ação de longa duração	Ação de média duração	Ação de curta duração	Ação instantânea
Madeira maciça	EN 14081-1	1	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
		2	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
		3	0,50	0,55	0,65	0,70	0,90
Madeira lamelada colada	EN 14080	1	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
		2	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
		3	0,50	0,55	0,65	0,70	0,90
LVL	EN 14374 e EN 14279	1	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
		2	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
		3	0,50	0,55	0,65	0,70	0,90
Contraplacado	EN 636 Parte 1, 2 e 3 Parte 2 e 3 Parte 3	1	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
		2	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
		3	0,50	0,55	0,65	0,70	0,90
OSB	EN 300 OBS/2 OBS/3 e OBS/4 OBS/3 e OBS/4	1	0,30	0,45	0,65	0,85	1,10
		2	0,40	0,50	0,70	0,90	1,10
		3	0,30	0,40	0,55	0,70	0,90
Aglomerado de partículas de madeira	EN 312 Parte 4 e 5 Parte 5 Parte 6 e 7 Parte 7	1	0,30	0,45	0,65	0,85	1,10
		2	0,20	0,30	0,45	0,60	0,80
		1	0,30	0,50	0,70	0,90	1,10
		2	0,40	0,40	0,55	0,70	0,90
Aglomerado de fibras de madeira duro	EN 622-2 HB.LA, HB.HLA 1 ou 2 HB.HLA 1 ou 2	1	0,30	0,45	0,65	0,85	1,10
		2	0,20	0,30	0,45	0,60	0,80
Aglomerado de fibras de madeira semiduro	EN 622-3 MBH.LA 1 ou 2 MBH.LS 1 ou 2 MBH.LS 1 ou 2	1	0,20	0,40	0,60	0,80	1,10
		1	0,20	0,20	0,60	0,80	1,10
		2	-	-	-	0,45	0,80
Aglomerado de fibras de madeira de média densidade (MDF)	EN 622-5 MDF.LA e MDF.HLS MDF.HLS	1	0,20	0,40	0,60	0,80	1,10
		2	-	-	-	0,45	0,80

Tabela 5.3 – Valores de k_{def} .

Material	Norma	Classe de serviço		
		1	2	3
Madeira maciça	EN 14081-1	0,60	0,80	2,00
Madeira lamelada colada	EN 14080	0,60	0,80	2,00
LVL	EN 14374 e EN 14279	0,60	0,80	2,00
Contraplacado	EN 636			
	Parte 1	0,80	-	-
	Parte 2	0,80	1,00	-
	Parte 3	0,80	1,00	2,50
OSB	EN 300			
	OBS/2	2,25	-	-
	OBS/3 e OBS/4	1,50	2,25	-
Aglomerado de partículas de madeira	EN 312			
	Parte 4	2,25	-	-
	Parte 5	2,25	3,00	-
	Parte 6	1,50		-
	Parte 7	1,50	2,25	-
Aglomerado de fibras de madeira duro	EN 622-2			
	HB.LA	2,25	-	-
	HB.HLA 1 e 2	2,25	3,00	-
Aglomerado de fibras de madeira semiduro	EN 622-3			
	MBH.LA 1 e 2	3,00	-	-
	MBH.LS 1 e 2	3,00	4,00	-
Aglomerado de fibras de madeira de média densidade (MDF)	EN 622-5			
	MDF.LA	2,25	-	-
	MDF.HLS	2,25	3,00	-

5.9 PRINCIPAIS PROPRIEDADES MECÂNICAS

Negrão [20] afirma que, o estudo do comportamento mecânico da madeira implica que se conheça a sua estrutura anatómica, dada a natureza orgânica, higroscópica, e heterogênea que a caracteriza. Desta forma, torna-se indispensável o seu conhecimento para uma correta avaliação da sua capacidade resistente e dimensionamento estrutural.

Deste modo, percebe-se que não é correto falar de resistência mecânica global de um elemento estrutural de madeira, mas sim, do seu comportamento perante determinado tipo de solicitação, nomeadamente, da sua grandeza, duração e direção. Este último, é mesmo um fator preponderante, pois verificam-se grandes diferenças de valores de resistência para solicitações no sentido paralelo e perpendicular às fibras. Seguidamente apresenta-se uma análise resumida das principais propriedades mecânicas da madeira:

- Resistência à tração paralela às fibras ou axial;
- Resistência à compressão paralela às birbas ou axial;
- Resistência à flexão estática;
- Resistência à tração perpendicular às fibras;
- Resistência ao corte ou escorregamento;
- Dureza;
- Resistência à fadiga;
- Fluência.

5.9.1 Resistência à tração paralela às fibras

Dada a natureza da estrutura fibro-anatómica da madeira, verifica-se que a sua resistência à tração no sentido paralelo às fibras ou axial é bastante elevada, quando comparada com a resistência a outros esforços, nomeadamente à compressão axial. A resistência à tração axial pode ser até três vezes superior à resistência à compressão axial, para peças livres de defeitos.

Este facto deve-se à solicitação de tração, no sentido axial, provocar a aproximação das fibras, contribuindo para o aumento da coesão e aderência da peça de madeira. Deste modo, é compreensível que, normalmente, os elementos não sofram rotura pela ação isolada deste esforço, quer no estado de árvore, quer aplicada em estruturas correntes.

5.9.2 Resistência à compressão paralela às fibras

A resistência dos elementos estruturais de madeira à compressão axial está intrinsecamente ligada aos seguintes fatores:

- Teor em água – atinge-se o valor máximo de resistência à compressão quando a madeira está sob o estado anidro⁷, e mínimo quando supera o ponto de saturação das fibras, ou seja, cerca de 30% de teor em água;
- Massa volúmica – quanto maior for esta grandeza, maior será o valor de resistência à compressão axial.

5.9.3 Resistência à tração perpendicular às fibras

A madeira é caracterizada por possuir uma estrutura fibro-anatômica complexa, a qual lhe confere características mecânicas bastante diferentes, em função da direção da solicitação. Por exemplo, para o pinho bravo, verifica-se que a resistência à tração no sentido perpendicular às fibras atinge valores muito baixos, na ordem dos 3MPa (peças perfeitas).

5.9.4 Resistência à compressão perpendicular às fibras

A resistência à compressão, no sentido perpendicular às fibras, pode ser traduzida pela sua resistência ao esmagamento, sendo função da massa volúmica do material.

5.9.5 Resistência ao corte ou esmagamento

A resistência ao corte ou esmagamento pode ser quantificada pela ação de 3 tipos de tensões, em função da orientação do fio da madeira:

- Tensões tangenciais, normais à fibra;
- Tensões tangenciais, paralelas às fibras;
- Tensões tangenciais, oblíquas às fibras.

Verifica-se que a resistência dos elementos de madeira é mínima no caso de tensões tangenciais paralelas às fibras, as quais provocam o seu deslizamento ou escorregamento. Para o pinho bravo, verifica-se que a resistência ao corte ou escorregamento é da ordem dos 12MPa. A resistência ao corte é bastante influenciada pela existência de defeitos, como fendas e fissuras.

5.9.6 Dureza

A dureza é uma característica mecânica que traduz a resistência do material no que diz respeito à sua penetração, riscagem e desgaste.

⁷ Anidro é um termo geral utilizado para designar uma substância de qualquer natureza que não contém, ou quase não contém, água na sua composição.

A dureza é um parâmetro com interesse de apurar, dado que se relaciona com a densidade e trabalhabilidade da madeira, e porque permite realizar uma seleção adequada da espécie de madeira em função do fim a que se destina (por exemplo, as madeiras a aplicar em pavimentos deverão ser mais duras).

5.9.7 Resistência à fadiga

Define-se resistência à fadiga ou a cargas alternadas, como a capacidade que o elemento estrutural tem em se deformar sem atingir a rotura, quando sujeito a esforços alternados de compressão e tração.

5.9.8 Fluência

A fluência (resistência a cargas de longa duração) correspondente à deformação ou perda de resistência de um elemento estrutural, quando sujeito a cargas superiores ao limite de elasticidade do material com algum grau de permanência.

O teor em água da madeira tem grande influência na fluência das peças, sendo que para madeiras com maiores teores em água ou sujeitas a ciclos de humidificação/secagem frequentes, o valor da fluência é bastante superior.

Deste modo, a prevenção ou diminuição do impacto da fluência na resistência global de elementos estruturais de madeira pode ser garantida, se forem tomadas uma série de medidas previamente à sua aplicação:

- Garantir que o elemento estrutural não está sujeito a grandes variações térmicas e higrométricas;
- Montar os elementos estruturais devidamente estabilizados, em termos de teor em água;
- Sobrestimar as cargas atuantes sobre a estrutura ou subestimar o valor do módulo de elasticidade, para efeitos de dimensionamento, de forma a impedir que o elemento estrutural entre em regime plástico;
- Recorrer a contra flechas.

5.10 VALORES DE CÁLCULO – MADEIRA NOVA

Para Negrão [20], o conceito de classes de resistência, implementado na Europa através da norma EN 338: *Structural Timber – Strength classes, 1995* (EN 338), pretende tratar a madeira para estruturas exatamente da mesma forma que o betão armado ou o aço, introduzindo assim um fator de segurança adicional na especificação dos materiais, já que bastará ao projetista definir a classe de resistência que usou no cálculo.

O conceito de classe de resistência vem ainda mais disciplinar o controlo de qualidade da madeira estrutural e facilitar a atividade dos projetistas na especificação do material e na correta escolha das propriedades físicas e mecânicas a usar nos cálculos.

Cada classe de resistência mecânica é definida por uma sigla que identifica automaticamente as principais propriedades mecânicas a usar nos cálculos, facilitando assim extraordinariamente a especificação por parte dos projetistas.

As classes de resistência mecânica, definidas na norma europeia EN 338, encontram-se divididas em C14, C16, C18, C20, C22, C24, C27, C30, C35, C40, C45 e C50, para as coníferas, e D30, D35, D40, D50, D60, e D70, para as folhosas. Esta norma apresenta os valores numéricos das propriedades físicas e mecânicas com interesse para o projeto de estruturas (Tabela 5.4).

A letra C refere-se a coníferas (*coniferous*) (Figura 5.1) e o número indica o valor da resistência característica à flexão, na direção do fio. A letra D refere-se a folhosas (*deciduous*) (Figura 5.2) e o número indica o valor da resistência característica à flexão, na direção do fio.

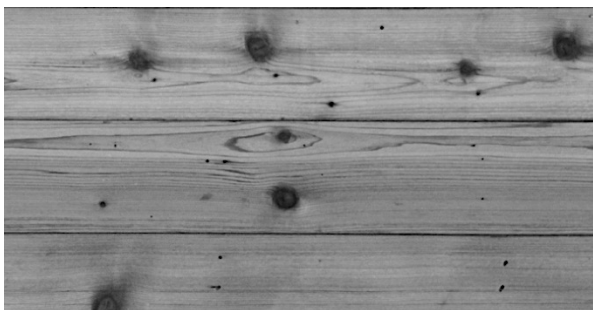


Figura 5.1 – Exemplo de vigas de madeira conífera (pinho).

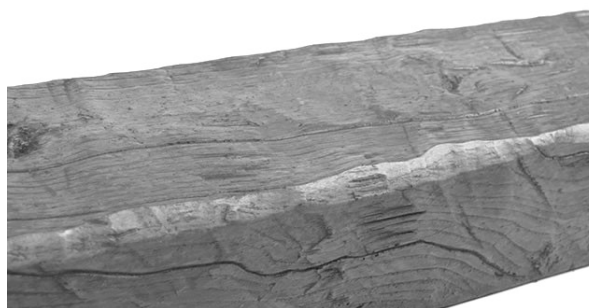


Figura 5.2 – Exemplo de viga de madeira folhosa (castanho).

No cálculo à rotura, utiliza-se o valor médio ou característico das propriedades indicadas na norma.

A correta aplicação da especificação em classes de resistência implica a existência de madeira para estruturas, classificada em classes de qualidade, de acordo com as normas aplicáveis. Tal implica, por um lado, a existência no mercado desses materiais, e por outro, a disponibilidade da madeira para a classificação, ou seja, a madeira não poderá ser montada de forma oculta e com difícil acesso para apreciação visual.

É assim muito mais complexa a tarefa de avaliar a segurança estrutural de estruturas de madeira existentes pois, para esse efeito, será necessário avaliar a resistência, o estado sanitário e a integridade dos elementos estruturais que as compõem.

Tabela 5.4 – Propriedades físicas e mecânicas de madeira para estruturas (coníferas).

		Espécies coníferas											
		C14	C16	C18	C20	C22	C24	C27	C30	C35	C40	C45	C50
Propriedades resistentes em MPa													
Flexão	$f_{m,k}$	14	16	18	20	22	24	27	30	35	40	45	50
Tração	$f_{t,0,k}$	8	10	11	12	13	14	16	18	21	24	27	30
Tração	$f_{t,90,k}$	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
Compressão	$f_{c,0,k}$	16	17	18	19	20	21	22	23	25	26	27	29
Compressão	$f_{c,90,k}$	2,0	2,2	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3,1	3,2
Corte	$f_{v,k}$	1,7	1,8	2,0	2,2	2,4	2,5	2,8	3,0	3,4	3,8	3,8	3,8
Propriedades de rigidez em GPa													
Módulo de elasticidade	$E_{0,mean}$	7	8	9	9,5	10	11	11,5	12	13	14	15	16
Módulo de elasticidade (5º percentil)	$E_{0,05}$	4,7	5,4	6,0	6,4	6,7	7,4	7,7	8,0	8,7	9,4	10,0	10,7
Módulo E	$E_{90,mean}$	0,23	0,27	0,30	0,32	0,33	0,37	0,38	0,40	0,43	0,47	0,50	0,53
Módulo de distorção	G	0,44	0,50	0,56	0,59	0,63	0,69	0,72	0,75	0,81	0,88	0,94	1,00
Massa volúmica em Kg/m³													
Característica	ρ_k	290	310	320	330	340	350	370	380	400	420	440	460
Média	ρ_{mean}	350	370	380	390	410	420	450	460	480	500	520	550

5.11 VALORES DE CÁLCULO – MADEIRA LAMELADA COLADA

A madeira lamelada colada (Figura 5.3) é um dos produtos derivados de madeira que permite contornar essas dificuldades devido ao seu processo de fabrico. Este processo permite reduzir significativamente a importância dos defeitos das peças de madeira e assim obter um produto mais homogêneo e fiável e relativamente mais resistente que a madeira maciça que lhe dá origem.

A escolha da cola a usar na união das lamelas está ligada às condições ambientais a que as peças se encontram.

Resumidamente uma cola para o uso em madeiras lameladas deve possuir as seguintes características:

- Deve formar uma película, de forma a fluir em todas as direções da superfície da madeira;
- Deve ser capaz de penetrar nas duas superfícies a unir;
- Deve aderir adequadamente à madeira;
- O processo de cura deve ser passível de ser cuidadosamente controlado, que por variações de temperatura, quer por aceleradores de crescimento.

Relativamente ao seu processo de fabrico, ele pode ser dividido em cinco fases:

- Secagem das lamelas;
- Ligação de topo das lamelas de madeira maciça (execução dos *fingerjoints*);
- Colagem das lamelas sob pressão;

- Preparação da forma das peças;
- Aplicação de tratamentos de preservação e de acabamentos.

O fabrico da madeira lamelada colada é um processo complexo que requer elevada precisão de forma a garantir o nível de qualidade exigido, o seu fabrico encontra-se regulamentado por normas (normas de produção e normas de produto: EN 386: *Glued laminated timber. Performance requirements and minimum production requirements (2001)*, EN 385: *Finger-jointed structural timber. Performance requirements and minimum production requirements (2001)*, EN 387: *Glued laminated timber – Larger finger-joints. Performance requirements and minimum production requirements (2001)* e EN 14080: *Timber structures. Glued laminated timber. Requirement (2013)*). A aposição CE (Conformidade Europeia) é uma vantagem que esta madeira possui, pois, a sua qualidade final do produto é regulada.



Figura 5.3 – Exemplo de vigas de madeira lamelada colada.

Quanto à constituição interna das lamelas, a madeira lamelada colada pode ser homogénea ou combinada. A homogénea é constituída por lamelas com a mesma classe de resistência e a mesma espécie ou combinação de espécies. A madeira lamelada combinada é constituída por lamelas interiores e exteriores que pertencem a classes de resistência diferentes ou espécies diferentes. As lamelas exteriores são de resistência superior, para suportar os esforços mecânicos mais elevados.

A norma EN 1194: *Timber Structures – Glued laminated timber – Strength classes and determination of characteristic values (1999)* contém os valores das propriedades físicas deste material a serem usados em cálculo. Para a madeira lamelada colada homogénea (h) as classes previstas são: GL24h, GL28h, GL32h e GL36h (Tabela 5.5).

No caso da madeira lamelada colada combinada (c) as classes previstas são: GL24c, GL28c, GL32c e GL36c. O número usado na nomenclatura traduz o valor da resistência característica à flexão na direção do fio em MPa (Tabela 5.5).

Tabela 5.5 – Propriedades mecânicas de madeira lamelada colada.

Propriedade	Símbolo	Unidade	GL24h	GL28h	GL32h	GL36h	GL24c	GL28c	GL32c	GL36c
Flexão	$f_{m,g,k}$	MPa	24	28	32	36	24	28	32	36
Tração	$f_{t,0,g,k}$	MPa	16,5	19,5	22,5	26	14	16,5	19,5	22,5
Tração	$f_{t,90,g,k}$	MPa	0,4	0,45	0,5	0,6	0,35	0,4	0,5	0,6
Compressão	$f_{c,0,g,k}$	MPa	24	26,5	29	31	21	24	29	31
Compressão	$f_{c,90,g,k}$	MPa	2,7	3,0	3,3	3,6	2,4	2,7	3,3	3,6
Corte	$f_{v,g,k}$	MPa	2,7	3,2	3,8	4,3	2,2	2,7	3,8	4,3
Módulo de elasticidade	$E_{0,g,mean}$	GPa	11,6	12,6	13,7	14,7	11,6	12,6	13,7	14,7
Módulo elas. (5º percentil)	$E_{0,g,k}$	GPa	9,4	10,2	11,1	11,9	9,4	10,2	11,1	11,9
Módulo elas. perpendicular	$E_{90,g,mean}$	GPa	0,39	0,42	0,46	0,49	0,32	0,39	0,46	0,49
Módulo de distorção	$G_{g,mean}$	GPa	0,72	0,78	0,85	0,91	0,59	0,72	0,85	0,91
Massa volúmica	$\rho_{g,k}$	Kg/m ³	380	410	430	450	350	380	430	450

5.12 VERIFICAÇÃO À TRAÇÃO E COMPRESSÃO

Em condições naturais, a madeira está predominantemente sujeita a tensões de compressão na direção do fio, resultantes do peso próprio da árvore. A estas podem adicionar-se tensões de flexão na mesma direção, as quais podem ser permanentes, como as suscitadas pelo desvio de verticalidade do tronco, ou ocasionais, como as devidas a regimes de ventos dominantes.

Pode-se concluir que a madeira está preparada naturalmente para resistir melhor à flexão e esforço axial na direção do fio.

5.12.1 Tração e compressão paralelas ao fio

Em primeiro lugar, há que fazer a distinção entre madeira limpa (geralmente só possível de conseguir em provetes pequenos) e madeira estrutural, constituinte de elementos de dimensão real.

Os valores experimentais obtidos do ensaio de provetes pequenos traduzem a resistência inerente das fibras de madeira, isto é, excluído o efeito perturbador dos defeitos de crescimento, como nós, variação de espessura, entre outros.

Pode constatar-se que o comportamento em tração paralela ao fio é particularmente linear até à rotura a qual, para madeiras de construção coníferas correntes, ocorre para valores da ordem de 80 a 90MPa. Pode também observar-se que a rotura por tração é de tipo frágil, sem ocorrência de plastificação na vizinhança da rotura.

Os valores da resistência à compressão paralela ao fio rondam, para resinosas comuns, os 40 a 50MPa.

5.12.2 Tração e compressão perpendiculares ao fio

A curva de tensão-extensão para provetes limpos solicitados perpendicularmente ao fio apresenta um comportamento semelhante ao observado para a direção paralela. A rotura por tração é de tipo frágil, ocorrendo para valores reduzidos da tensão, da ordem de 1 a 2MPa. Esta resistência é extremamente sensível à presença de defeitos, como fendas e nós, pelo que apresenta, em elementos de dimensão estrutural, uma grande variabilidade. A resistência contabilizável em projeto (isto é, o quantilho 5%) reduz-se, assim, a um valor residual, pelo que a opção geralmente utilizada é a de evitar a ocorrência deste esforço, mediante a adoção de disposições construtivas adequadas. Além da tração e compressão perpendicular ao fio, existe também a tração e compressão a um ângulo com o fio.

5.12.3 Efeito de volume

O volume dos elementos de madeira afeta os valores das suas propriedades de resistência, particularmente em tração e flexão. Existem teorias de natureza probabilística que avançam explicações satisfatórias para este facto. No entanto, pode observar-se que a probabilidade de rotura, de um volume de madeira sujeito a um nível especificado de tensão, é tanto maior quanto maior o volume em questão.

5.12.4 Tração paralela ao fio

O critério de verificação da segurança para tração paralela ao fio, expresso no EC5-1.1, é:

$$\sigma_{t,0,d} \leq f_{t,0,d} \quad (5.15)$$

Onde,

$\sigma_{t,0,d}$ – é o valor de cálculo da tensão atuante de tração, para a combinação de ações relevante;

$f_{t,0,d}$ – é o valor de cálculo da resistência à tração paralela ao fio.

Este valor pode ser conservadoramente calculado pela Expressão genérica (5.11). No entanto, quando a secção transversal é de pequenas dimensões pode, por força do efeito de volume, considerar-se um aumento daquela resistência. Para efeitos de aplicação na Expressão (5.15) deverá então utilizar-se o valor:

$$f'_{t,0,d} = k_h \times f_{t,0,d} \quad (5.16)$$

Onde,

k_h – é o coeficiente, não inferior a 1, que depende da maior dimensão (h) da secção transversal.

Para secções retangulares, o EC5 propõe as seguintes expressões, dimensão (h) expressa em mm:

De madeira maciça:

$$k_h = \min \left\{ \left(\frac{150}{h} \right)^{0,2}, h \leq 150 \text{ mm} \right. \quad (5.17)$$

De madeira lamelada colada:

$$k_h = \min \left\{ \left(\frac{600}{h} \right)^{0,1}, h \leq 600 \text{ mm} \right. \quad (5.18)$$

A respeito destas expressões, são oportunas algumas observações:

- Só beneficiam do efeito de volume as pequenas secções, considerando-se como tal as secções de madeira maciça de maior dimensão inferior a 150 mm e as de madeira lamelada colada de maior dimensão inferior a 600 mm;
- O valor máximo do acréscimo de resistência é de 30% em madeira maciça, mas de somente 10% em madeira lamelada-colada. Esta diferença justifica-se pelo facto de as propriedades mecânicas da madeira lamelada colada, em consequência da sua menor variabilidade, apresentam valores característicos superiores aos das propriedades das lamelas constituintes. Além disso, o coeficiente γ_m , também ele exprimindo a presença de defeitos redutores da resistência, é fixado com o valor de 1,30 para madeiras maciças, mas apenas de 1,25 para a madeira lamelada colada.

5.12.5 Tração perpendicular ao fio

O EC5-1.1 não prevê a solicitação direta da madeira e derivados em tração perpendicular ao fio, sendo esta, pelo contrário, uma situação a evitar por meio de uma conceção e pormenorização estruturais adequadas.

5.12.6 Compressão paralela ao fio

O critério de verificação da segurança para a compressão paralela ao fio consiste em limitar o valor de cálculo da tensão atuante de compressão ao da resistência à compressão paralela ao fio:

$$\sigma_{c,0,d} \leq f_{c,0,d} \quad (5.19)$$

Onde,

$\sigma_{c,0,d}$ – é o valor de cálculo da tensão atuante de compressão, para a combinação de ações relevante;

$f_{c,0,d}$ – é o valor de cálculo da resistência à tração paralela ao fio.

5.12.7 Compressão perpendicular ao fio

Como no caso anterior, o principio básico é o de impor um limite ao valor de cálculo da tensão atuante de compressão. No entanto, enquanto no caso anterior o tal limite era fixo e igual a $f_{c,0,d}$, ele variará

agora em função da geometria e da extensão da zona carregada. Dependendo dessa configuração, a resistência à compressão poderá variar de um mínimo de $f_{c,90,d}$ até 1,75 vezes esse valor. Este efeito é introduzido por meio do coeficiente $k_{c,90}$, utilizando no critério de verificação da segurança:

$$\sigma_{c,90,d} \leq k_{c,90} \times f_{c,90,d} \quad (5.20)$$

Onde,

$\sigma_{c,90,d}$ – é o valor de cálculo da tensão atuante de compressão, para a combinação de ações relevante;

$f_{c,90,d}$ – é o valor de cálculo da resistência à tração perpendicular ao fio;

$k_{c,90}$ – é o coeficiente que tem em conta a configuração da carga.

Chama-se a atenção para o facto de que o uso de valores elevados de $k_{c,90}$, mesmo que seguro do ponto de vista de resistência, pode conduzir a deformações transversais de compressão de até 10%, as quais podem causar problemas do ponto de vista de utilização e do correto desempenho das ligações.

O valor de cálculo da tensão atuante de compressão perpendicular ao fio é obtido com referência a uma área de contacto efetiva, A_{ef} :

$$\sigma_{c,90,d} = \frac{F_{c,90,d}}{A_{ef}} \quad (5.21)$$

Esta área A_{ef} obtém-se prolongando o comprimento carregado real de até 30mm para cada lado, com o máximo (por lado) dado pelo menor de a , l ou $l/2$.

Em regra, o coeficiente $k_{c,90}$ deverá ser considerado igual à unidade, podendo, nos casos particulares de se tratarem de vigas continuamente apoiadas, com $h \leq l_1/2$ e vigas sobre apoios discretos, com $h \leq l_1/2$.

5.13 VERIFICAÇÃO À FLEXÃO

Embora com boa capacidade para suportar esforços de tração e compressão, é em vigas e peças fletidas que a madeira revela, em plenitude, o seu potencial como material estrutural.

5.13.1 Segurança de peças fletidas

A observação da segurança em relação aos ELU de peças fletidas envolve, em regra, as seguintes verificações:

- Resistência das secções à flexão;
- Instabilidade da viga (bambeamento);
- Resistência ao corte (e, eventualmente, à tração);

- Resistência ao esmagamento dos apoios;
- Resistência de ligações (quando existentes).

Complementarmente, devem ser observados os limites que configuram a ocorrência de ELS, no que respeita a:

- Deformação;
- Vibração.

Neste capítulo são discutidos e enfatizados os aspetos respeitantes às duas primeiras verificações, remetendo-se as restantes para as secções correspondentes.

5.13.2 Verificação de segurança à flexão

Flexão simples

O modelo construtivo linear elástico é generalizadamente aceite para descrever o comportamento à flexão de elementos de madeira.

O critério de segurança genérica consiste em limitar o valor máximo (em módulo) de cálculo da tensão atuante de flexão ao valor de cálculo da resistência à flexão:

$$\sigma_{m,d} \leq f_{m,d} \quad (5.22)$$

Onde,

$\sigma_{m,d}$ – é o valor de cálculo da tensão máxima de flexão;

$f_{m,d}$ – é o valor de cálculo da resistência à flexão.

Por estes motivos, o critério de verificação da segurança de secções sujeitas a flexão simples desviada admite uma redução, para este caso específico, da contribuição de uma das componentes do momento fletor, sendo a outra contabilizada por inteiro. Não existindo um critério plausível para definir qual das componentes deve ser reduzida, o EC5-1.1 propõe a verificação simultânea das duas condições, correspondendo uma à redução da contribuição de M_y e a outra à de M_z :

$$k_m \times \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (5.23)$$

Onde,

$\sigma_{m,y,d}$ – é o valor de cálculo da tensão máxima de flexão, devido ao momento fletor de cálculo $M_{y,d}$;

$f_{m,y,d}$ – é o valor de cálculo da resistência à flexão no plano xOy;

$\sigma_{m,z,d}$ – é o valor de cálculo da tensão máxima de flexão, devido ao momento fletor de cálculo $M_{z,d}$;

$f_{m,z,d}$ – é o valor de cálculo da resistência à flexão no plano xOz;

k_m – é o um coeficiente de redistribuição de esforços e de mitigação da heterogeneidade do material. Para madeira maciça, lamelada colada e LVL, $k_m = 0,7$ (secções retangulares) ou $k_m = 1$ (outro tipo de secções).

$$\frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \times \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (5.24)$$

No caso particular (mas mais comum em situações práticas de flexão plana), os primeiros membros das Expressões 5.23 e 5.24 reduzem-se à combinação única (de M_y , por exemplo):

$$k_m \times \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} \leq 1 \quad (5.25)$$

Flexão composta com tração

Para a ação conjunta de momento fletor e esforço axial de tração, o EC5-1.1 propõe uma metodologia semelhante à utilizada para flexão simples, sendo acrescentado às Expressões 5.23 e 5.24 um termo à contribuição do esforço axial:

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + k_m \times \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (5.26)$$

Onde,

$\sigma_{t,0,d}$ – é o valor de cálculo da tensão máxima de tração;

$f_{t,0,d}$ – é o valor da resistência à tração na direção do fio.

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \times \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (5.27)$$

Flexão composta com compressão

Na mesma linha de pensamento do parágrafo anterior, e porque o ramo de compressão da curva tensões-extensões da madeira é marcadamente não linear, é utilizada uma relação de interação quadrática para o caso de flexão composta com compressão. A relação, expressa pelas condições:

$$\left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} \right)^2 + k_m \times \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (5.28)$$

Onde,

$\sigma_{c,0,d}$ – é o valor de cálculo da tensão máxima de compressão;

$f_{c,0,d}$ – é o valor da resistência à compressão na direção do fio.

$$\left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}}\right)^2 + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \times \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (5.29)$$

Como no caso de flexão simples, quando existe apenas uma componente de momento fletor, umas das expressões anteriores é sempre dominante em relação à outra. Considerando, a título ilustrativo, que é nula a componente M_z , a verificação da segurança reduzir-se-á a:

$$\left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}}\right)^2 + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} \leq 1 \quad (5.30)$$

5.13.3 Verificação de segurança ao bambeamento

O bambeamento ou instabilidade lateral-torcional é um fenómeno de instabilidade suscetível de ocorrer em vigas esbeltas com flexão de eixo forte, isto é, com carregamento normal ao eixo de inércia máxima da secção transversal. O modo de deformação consiste na ocorrência de deslocamentos transversais ao plano de carga, acompanhados de torção da secção.

Embora a formulação teórica do fenómeno apresente alguma complexidade, o seu comportamento peculiar pode ser apreendido recorrendo a um modelo mecânico simples.

Momento crítico elástico

Para um determinado carregamento e condições de apoio de uma viga, o momento crítico é o valor do momento fletor. Tomando como referência uma viga simplesmente apoiada, atuada por momentos de extremidade, carregamento a que corresponde um estado de flexão pura ou circular, vem:

$$M_{crit} = \frac{\pi}{l_{ef}} \times \sqrt{E \times I_z \times I_{tor} \times G} \quad (5.31)$$

Onde,

E – é o módulo de elasticidade;

I_z – é o módulo de inércia em relação ao eixo fraco z;

G – é o módulo de distorsão;

I_{tor} – é o momento de inércia de torção da secção;

l_{ef} – é o comprimento efetivo de bambeamento, que depende do tipo de carregamento aplicado e das condições de apoio.

No caso da madeira devem, do lado da segurança, ser utilizados os valores de E e G correspondentes aos quantilhos de 5% das respetivas curvas de distribuição.

$$\sigma_{m,crit} = \frac{M_{crit}}{w} = \frac{\pi}{l_{ef} \times w} \times \sqrt{E_{0,05} \times I_z \times I_{tor} \times G_{0,05}} \quad (5.32)$$

Onde,

$E_{0,05}$ – é o quantilho de 5% do módulo de elasticidade;

$G_{0,05}$ – é o quantilho de 5% do módulo de distorsão.

Para a gama de dimensões habituais de secções retangulares de madeira e considerando $E_{0,05}/G_{0,05} = 16$, a expressão anterior pode ser reduzida a:

$$\sigma_{m,crit} = 0,78 \times \frac{E_{0,05} \times b^2}{h \times l_{ef}} \quad (5.33)$$

Fator de momento uniforme equivalente

No caso de flexão não uniforme, existirão troços do vão com um regime de tensões inferior ao máximo, pelo que a instabilização ocorrerá para valores do momento crítico superiores ao especificado para o caso de referência.

Esse aspeto é levado em conta, nas Expressões 5.33 e 5.34, mediante a seleção de um valor adequado do comprimento efetivo de bambeamento, l_{ef} . Este pode ser obtido afetando o comprimento real da barra de um fator de momento uniforme equivalente, m (Tabela 5.6), dependente da forma do diagrama de momentos (o qual, por sua vez, depende do carregamento e das condições de apoio).

Este fator representa a relação que deve existir entre o vão de uma viga com uma determinada distribuição uniforme, por forma a que o momento crítico seja igual em ambas.

Destas interpretações resulta que o fator de momento uniforme equivalente é sempre igual ou inferior à unidade, uma vez que, como já se referiu, o diagrama de momentos uniforme corresponde à situação mais desfavorável e, portanto, à menor tensão crítica para o bambeamento.

Além dos valores presentes na Tabela 5.6, segundo Negrão [20], por exemplo, no caso duma viga simplesmente apoiada e com uma carga uniformemente distribuída, o fator de momento uniforme equivalente, $m = 0,88$.

Assim, a Expressão 5.34 pode escrever-se da seguinte maneira:

$$\sigma_{m,crit} = 0,78 \times \frac{E_{0,05} \times b^2}{h \times m \times l} \quad (5.34)$$

Onde,

l – é o vão real da viga.

Contudo, o EC5-1.1 propõe os seguintes valores de m :

Tabela 5.6 – Valores de m .

Tipo de viga	Carregamento	$m = l_{ef}/l$
Simplesmente apoiada	Momento constante	1,0
	Carga uniformemente distribuída	0,9
	Força a meio vão	0,8
Consola	Carga uniformemente distribuída	0,5
	Força da extremidade	0,8

Assim, caso a carga seja aplicada na face superior, l_{ef} deve ser aumentado de $2h$, devendo ser reduzido de $0,5h$, para uma carga suspensa na face inferior.

Verificação regulamentar

A metodologia de verificação da segurança em relação ao risco de bambeamento, preconizada pelo EC5-1.1, consiste em limitar o valor de cálculo da tensão atuante de flexão a uma fração k_{crit} do valor de cálculo da resistência à flexão da madeira ou material derivado:

$$\sigma_{m,d} \leq k_{crit} \times f_{m,d} \quad (5.35)$$

k_{crit} obtém-se da curva de bambeamento, a qual é estabelecida analiticamente no EC5-1.1, em termos da esbelteza relativa da peça, dada por:

$$\lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{f_{m,k}}{\sigma_{m,crit}}} \quad (5.36)$$

Onde,

$\sigma_{m,crit}$ – é o valor de cálculo da tensão crítica;

$f_{m,k}$ – é o valor característico da resistência à flexão.

A curva é definida por troços, com as expressões:

$$k_{crit} = \begin{cases} 1 & \lambda_{rel,m} \leq 0,75 \\ 1,56 - 0,75 \times \lambda_{rel,m} & 0,75 \leq \lambda_{rel,m} \leq 1,40 \\ 1/(\lambda_{rel,m})^2 & \lambda_{rel,m} \geq 1,40 \end{cases} \quad (5.37)$$

Os troços laterais configuram modos de rotura diferentes, enquanto o intermédio faz a transição entre aqueles.

Para as peças de baixa esbelteza relativa, como vigas de pequeno vão e/ou secção compacta ($b \sim h$), não haverá lugar à ocorrência de bambeamento antes do esgotamento da resistência à flexão da secção. Prevalecendo este modo de rotura. De facto, considerando $k_{crit} = 1$ na Expressão 5.36, recupera-se a condição da Expressão 5.22, que constitui o critério de segurança para flexão simples.

Para vigas de grande vão e/ou secção esbelta ($h \gg b$), a rotura dá-se por bambeamento da viga, numa fase em que o regime de tensões de flexão da peça se encontra ainda em domínio elástico.

Mitigação do risco de bambeamento

Face a um risco excessivo de bambeamento, coloca-se a questão de saber que tipo de medidas atenuadoras podem ser tomadas. Uma redução de risco significa, para uma estrutura e carregamento dados, um aumento do valor da tensão crítica. Observando a Expressão 5.35, verifica-se que esse objetivo pode ser alcançado pelas seguintes formas:

- Aumento do módulo de elasticidade do material;
- Aumento da largura da secção transversal;
- Redução da altura da secção transversal;
- Redução do comprimento efetivo de bambeamento.

A primeira opção é, em princípio, de excluir, uma vez que implica uma mudança de material estrutural, medida desproporcionada com o objetivo pretendido.

O aumento da largura da secção transversal, bem como a redução da sua altura podem ser conseguidos colocando a secção ao baixo. A eficiência mecânica da secção será, no entanto, muito menor, e provavelmente insuficiente para garantir a capacidade resistente necessária. Além disso, propiciará a ocorrência de maiores deformações. Por estas razões, a aplicação de secções ao baixo é geralmente ditada por critérios não estritamente estruturais, como a ocultação do talão de vigas em lajes, sendo excepcional em estruturas de madeira.

Também o aumento puro e simples da largura da secção representa um desperdício proporcional de material, admitindo, como parece lógico, que a secção em estudo apresentava já a capacidade resistente necessária.

Resta a redução do comprimento efetivo, que corresponde ao travamento contínuo ou discreto do banzo comprimido da viga, que é suscetível à instabilização.

5.13.4 Verificação de segurança ao corte

O critério de verificação de segurança ao corte de elementos de madeira consiste em limitar o valor de cálculo da tensão atuante de corte ao valor de cálculo da resistência ao corte da madeira, ou seja:

$$\tau_d \leq f_{v,d} \quad (5.38)$$

Onde,

τ_d – é o valor de cálculo da tensão atuante de corte;

$f_{v,d}$ – é o valor de cálculo da resistência ao corte.

$$\tau_d = \left(\frac{3}{2}\right) \times \left(\frac{V_{sd}}{b \times h}\right) \quad (5.39)$$

Onde,

V_{sd} – é o valor do esforço transversal máximo

No caso de peças à flexão, deve ser considerada uma largura reduzida de secção (b_{ef}), para levar em conta o efeito das fendas. Esta largura é dada por:

$$b_{ef} = k_{cr} \times b \quad (5.40)$$

Com:

$k_{cr} = 0,67$ (para madeira maciça)

$k_{cr} = 0,67$ (para madeira lamelada colada)

$k_{cr} = 1$ (para outros derivados da madeira)

Este procedimento corresponde a afetar a resistência ao corte, dado pela Expressão 5.38, de um fator redutor, k_{cr} , para secções com entalhes.

5.14 DIMENSIONAMENTO DO PAVIMENTO DE MADEIRA

Para ser feito o dimensionamento das vigas de madeira de secção retangular, que integrarão os novos pavimentos de madeira que farão parte da reabilitação do edifício, começou-se por calcular as ações a que iriam estar sujeitos. Da Tabela 5.7 à 5.9 são mostradas as cargas permanentes e sobrecargas que foram consideradas para se chegar às combinações de ações em ELU e ELS, para a divisão a Norte, lado nascente. Será, assim, feito o dimensionamento das vigas do pavimento, na divisão em que não existe possibilidades deste ser mantido (Figura 5.4).

As quantidades, massas volúmicas dos elementos e as suas espessuras foram dados fornecidos pelo supervisor do estágio.

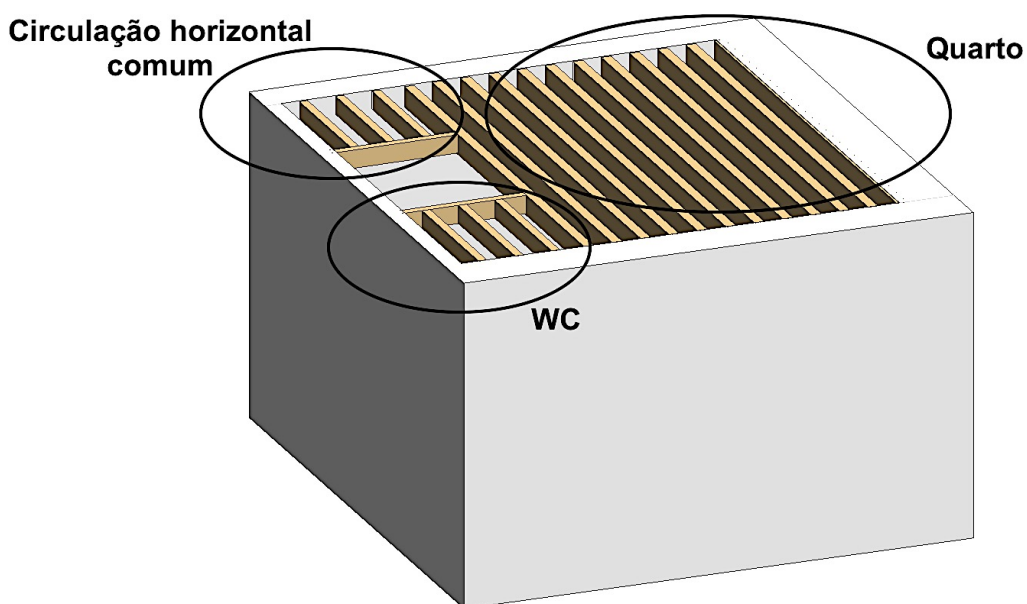


Figura 5.4 – Modelação em Revit do novo pavimento (vigamento) da divisão a Norte, lado nascente.

Tabela 5.7 – Cargas permanentes a serem consideradas no dimensionamento do vigamento.

Cargas permanentes	Quantidade	kN/m^3	Espessura (m)	kN/m^2
Painéis gesso cartonado	2	7	0,015	0,21
Lã-de-rocha	1	0,7	0,05	0,035
OBS	1	8	0,025	0,2
Placa Wedi	1	9	0,012	0,108
Mosaico hidráulico	1	20	0,02	0,4
Paredes divisórias				0,5

Tabela 5.8 – Somatório das cargas permanentes.

Somatório (kN/m^2)	
Quarto (uma parte será revestida com mosaico hidráulico)	0,95
WC	0,95
Circulação horizontal comum (não será revestido com mosaico hidráulico)	0,55

Tabela 5.9 – Sobrecargas consideradas.

Sobrecargas (kN/m^2)	Habitacional	2
	Público	5

Após terem sido determinadas as cargas, procedeu-se ao dimensionamento de quatro diferentes vigas que integram o pavimento que será dimensionado. A escolha destas três vigas recaiu pelo facto de serem constituídas por tipos de madeira diferentes (madeira maciça e madeira lamelada colada), por apresentarem secções diferentes e por estarem localizadas em sítios onde há uma mudança no tipo de carregamento.

Serão utilizadas vigas de madeira maciça de pinho C18 e duas vigas de madeira lamelada colada GL24h.

Será considerada a classe de serviço 1, que inclui ambientes interiores protegidos e ações de média duração. O k_{mod} considerado para o dimensionamento das vigas de madeira maciça e madeira lamelada colada será $k_{mod} = 0,8$ (média duração).

Todas as vigas são simplesmente apoiadas e será feita a verificação de segurança à flexão simples, ao bambeamento, ao corte e aos ELS (deformação).

Contudo, para se ser mais conservador e obter resultados mais seguros, no dimensionamento pode ser considerada a classe de serviço 3 e ações de longa duração.

5.14.1 Dimensionamento da viga V1.

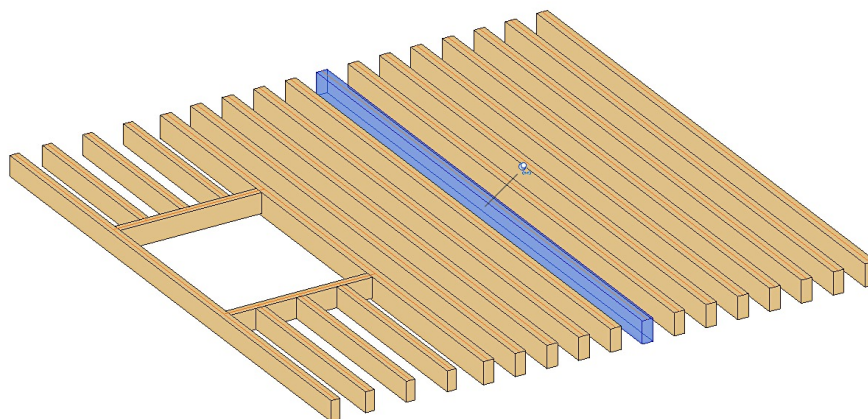


Figura 5.5 – Modelação em Revit do novo pavimento (vigamento) da divisão Norte, lado nascente.
Viga V1.

Tabela 5.10 – Propriedades da madeira maciça.

Propriedades do material			
$f_{m,k} (kPa) =$	18000		EN 338 (1995): 6.2 Classe de resistência da madeira.
$f_{v,k} (kPa) =$	2000		EN 338 (1995): 6.2 Classe de resistência da madeira.
$E_{0,05} (kPa) =$	6000000		EN 338 (1995): 6.2 Classe de resistência da madeira.
$E_{0,mean} (kPa) =$	9000000		EN 338 (1995): 6.2 Classe de resistência da madeira.
$\rho (kN/m^3) =$	3,8		EN 338 (1995): 6.2 Classe de resistência da madeira.
$k_{mod} =$	0,8		EC5-1.1 (2003): 3.1.3 Strength modification factors for service classes and load-duration classes.
$\gamma_M =$	1,3		EC5-1.1 (2003): 2.4.1 Design value of material property.
$k_h =$	1		EN 1995-1-1 (2003): 3.2 Solid timber.
$k_{sys} =$	1		EC5-1.1 (2003): 6.6 System strength.
$k_n =$	5		EC5-1.1 (2003): 6.5.2 Beams with a notch at the support.
$k_{def} =$	0,6		EC5-1.1 (2003): 3.1.4 Deformation modification factors for service classes.

Tabela 5.11 – Dimensões da viga V1.

Dimensões			
$b (m) =$	0,120	$I_x (m^4) =$	1,563E-04
$h (m) =$	0,250	$W_x (m^3) =$	1,250E-03
$L (m) =$	5,600	$A (m^2) =$	3,000E-02
<i>Espaçamento entre elementos (m) =</i>	0,400		
$l_{ef}(m) =$	5,540	$l_{ef} = m \times l + 2h = 0,9 \times 5,6 + 2 \times 0,25$	

Tabela 5.12 – Cargas permanentes consideradas no dimensionamento da viga V1.

Cargas permanentes		
<i>Peso próprio (kN/m) =</i>	0,114	$3,000E - 02 \times 3,8$
<i>Revestimentos (kN/m²) =</i>	0,950	$2 \times 7 \times 0,015 + 0,7 \times 0,05 + 8 \times 0,025 + 9 \times 0,012 + 20 \times 0,02$
<i>Paredes Divisórias (kN/m²) =</i>	0,500	

Tabela 5.13 – Sobrecarga considerada no dimensionamento da viga V1.

Sobrecarga (EC1 Quadro NA.6.2)			
<i>Sobrecarga (kN/m²) =</i>	2	Categoria A	
<i>Coefficientes de sobrecarga: (ECO Tabela NA.A1.1)</i>	φ_0	φ_1	φ_2
	0,7	0,5	0,3

Tabela 5.14 – Cargas lineares consideradas no dimensionamento da viga V1.

Cargas lineares		
G (permanentes) (kN/m) =	0,694	$0,114 + (0,950 + 0,500) \times 0,400$
Q (sobrecarga) (kN/m) =	0,800	$2 \times 0,400$

Tabela 5.15 – Combinações de ações para o dimensionamento da viga V1.

Combinações de ações		
ELU (kN/m) =	2,137	$1,35 \times 0,694 + 1,50 \times 0,800$
Combinação característica (kN/m) =	1,494	$0,694 + 0,800$
Combinação quase-permanente (kN/m) =	0,934	$0,694 + 0,3 \times 0,800$

Tabela 5.16 – Verificação de segurança da viga V1.

Verificação de segurança (Resistência)			
$P_{sd}(kN/m) =$	2,137	ELU	$1,35 \times 0,694 + 1,50 \times 0,800$
$M_{m\acute{a}x}(kN \times m) =$	8,377	$\frac{P_{sd} \times l^2}{8}$	$\frac{2,137 \times 5,60^2}{8}$
$\sigma_{m,d}(kPa) =$	6701,6	$\frac{M_{m\acute{a}x}}{W_x}$	$\frac{8,377}{1,250E-03}$
$\sigma_{m,crit}(kPa) =$	48658,5	$0,78 \times \left(\frac{b^2}{l_{ef} \times h} \right) \times E_{0,05}$	$0,78 \times \left(\frac{0,12^2}{5,54 \times 0,25} \right) \times 6000000$
$\lambda_{rel,m} =$	0,608	$\sqrt{\frac{f_{m,k}}{\sigma_{m,crit}}}$	$\sqrt{\frac{18000}{48658,5}}$
$k_{crit} =$	1	$\lambda_{rel,m} \leq 0,75$	
$V_{sd}(kN) =$	5,983	$\frac{P_{sd} \times l}{2}$	$2,137 \times \frac{5,60}{2}$
$\tau_d(kPa) =$	299,2	$\frac{3}{2} \times \frac{V_{sd}}{A}$	$\left(\frac{3}{2} \right) \times \frac{5,983}{3,000E-02}$

Tabela 5.17 – Verificação de segurança à flexão simples da viga V1.

Flexão Simples			
$\sigma_{m,d} \leq f_{m,d}$			
$f_{m,d}(kPa) =$	11076,9	$k_{mod} \times k_h \times k_{sys} \times \frac{f_{m,k}}{\gamma_M} = 0,8 \times 1 \times 1 \times \frac{18000}{1,3}$	OK

Tabela 5.18 – Verificação ao bambeamento da viga V1.

Bambeamento			
$\sigma_{m,d} \leq k_{crit} \times f_{m,d}$			
$k_{crit} \times f_{m,d}(kPa) =$	11076,9	$k_{crit} \times k_{mod} \times k_h \times k_{sys} \times \frac{f_{m,k}}{\gamma_M} = 1 \times 0,8 \times 1 \times 1 \times \frac{18000}{1,3}$	OK

Tabela 5.19 – Verificação ao corte da viga V1.

Corte			
$\tau_d \leq f_{v,d}$			
$f_{v,d}(kPa) =$	1230,8	$f_{v,d} = 0,8 \times \frac{2000}{1,3}$	OK

Tabela 5.20 – Verificação ao ELS da viga V1.

Verificação Estado Limite de Utilização			
$u_{i,adm}(m) =$	0,0187	$L/300$	
$u_{f,adm}(m) =$	0,0224	$L/250$	
$u_{i,G}(m) =$	0,0063	$((5/384) \times G \times L^4) / (E_{0,mean} \times I_x) = ((5/384) \times 0,694 \times 5,60^4) / (9000000 \times 1,563E - 04)$	
$u_{i,Q}(m) =$	0,0073	$((5/384) \times Q \times L^4) / (E_{0,mean} \times I_x) = ((5/384) \times 0,800 \times 5,60^4) / (9000000 \times 1,563E - 04)$	
$u_i(m) =$	0,0136	$u_{i,G} + u_{i,Q} \leq u_{i,adm}$	OK
$u_{f,G}(m) =$	0,0101	$u_{i,G} \times (1 + k_{def})$	
$u_{f,Q}(m) =$	0,0086	$u_{i,Q} \times (1 + \Psi_{2,1} \times k_{def})$	
$u_f(m) =$	0,0187	$u_{f,G} + u_{f,Q} \leq u_{f,adm}$	OK

5.14.2 Dimensionamento da viga V2.

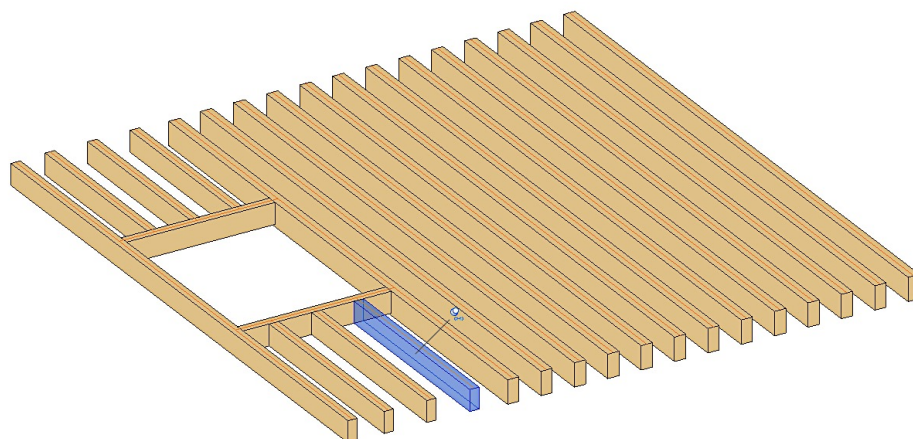


Figura 5.6 – Modelação em Revit do novo pavimento (vigamento) da divisão Norte, lado nascente. Viga V2.

Tabela 5.21 – Propriedades da madeira maciça.

Propriedades do material			
$f_{m,k}$ (kPa) =	18000		338 (1995): 6.2 Classe de resistência da madeira.
$f_{v,k}$ (kPa) =	2000		338 (1995): 6.2 Classe de resistência da madeira.
$E_{0,05}$ (kPa) =	6000000		338 (1995): 6.2 Classe de resistência da madeira.
$E_{0,mean}$ (kPa) =	9000000		338 (1995): 6.2 Classe de resistência da madeira.
ρ (kN/m ³) =	3,8		338 (1995): 6.2 Classe de resistência da madeira.
k_{mod} =	0,8		EN 1995-1-1 (2003): 3.1.3 Strength modification factors for service classes and load-duration classes.
γ_M =	1,3		EN 1995-1-1 (2003): 2.4.1 Design value of material property.
k_h =	1		EN 1995-1-1 (2003): 3.2 Solid timber.
k_{sys} =	1		EN 1995-1-1 (2003): 6.6 System strength.
k_n =	5		EN 1995-1-1 (2003): 6.5.2 Beams with a notch at the support.
k_{def} =	0,6		EN 1995-1-1 (2003): 3.1.4 Deformation modification factors for service classes.

Tabela 5.22 – Dimensões da viga V2.

Dimensões			
$b (m) =$	0,100	$I_x (m^4) =$	9,492E-05
$h (m) =$	0,225	$W_x (m^3) =$	8,438E-04
$L (m) =$	2,000	$A (m^2) =$	2,250E-02
<i>Espaçamento entre elementos (m) =</i>	0,450		
$l_{ef}(m) =$	2	$l_{ef} = m \times l + 2h = 0,9 \times 2 + 2 \times 0,225 = 2,25$ Nota ⁸	

Tabela 5.23 – Cargas permanentes consideradas no dimensionamento da viga V2.

Cargas permanentes		
<i>Peso próprio (kN/m) =</i>	0,086	$2,250E - 02 \times 3,8$
<i>Revestimentos (kN/m²) =</i>	0,950	$2 \times 7 \times 0,015 + 0,7 \times 0,05 + 8 \times 0,025 + 9 \times 0,012 + 20 \times 0,02$
<i>Paredes Divisórias (kN/m²) =</i>	0,500	

Tabela 5.24 – Sobrecarga considerada no dimensionamento da viga V2.

Sobrecarga (EC1 Quadro NA.6.2)			
<i>Sobrecarga (kN/m²) =</i>	2	Categoria A	
<i>Coefficientes de sobrecarga:</i> (ECO Tabela NA.A1.1)	φ_0	φ_1	φ_2
	0,7	0,5	0,3

Tabela 5.25 – Cargas lineares consideradas no dimensionamento da viga V2.

Cargas lineares		
G (permanentes) (kN/m) =	0,738	$0,086 + (0,950 + 0,500) \times 0,450$
Q (sobrecarga) (kN/m) =	0,900	$2 \times 0,450$

⁸ Nota: o momento crítico elástico será calculado através do fator de momento uniforme equivalente (Expressão 5.34), com $m = 0,88$.

Tabela 5.26 – Combinações de ações para o dimensionamento da viga V2.

Combinações de ações		
ELU (kN/m) =	2,346	$1,35 \times 0,738 + 1,50 \times 0,900$
Combinação característica (kN/m) =	1,638	$0,738 + 0,900$
Combinação quase-permanente (kN/m) =	1,008	$0,738 + 0,3 \times 0,900$

Tabela 5.27 – Verificação de segurança da viga V2.

Verificação de segurança (Resistência)			
$P_{sd}(kN/m) =$	2,346	ELU	$1,35 \times 0,738 + 1,50 \times 0,900$
$M_{m\acute{a}x}(kN \times m) =$	1,173	$P_{sd} \times \frac{l^2}{8}$	$2,346 \times \frac{2^2}{8}$
$\sigma_{m,d}(kPa) =$	1390,4	$\frac{M_{m\acute{a}x}}{W_x}$	$\frac{1,173}{8,438E - 04}$
$\sigma_{m,crit}(kPa) =$	118181,8	$0,78 \times \frac{E_{0,05} \times b^2}{h \times m \times l}$	$0,78 \times \left(\frac{6000000 \times 0,10^2}{0,225 \times 0,88 \times 2} \right)$
$\lambda_{rel,m} =$	0,390	$\sqrt{\frac{f_{m,k}}{\sigma_{m,crit}}}$	$\sqrt{\frac{18000}{118181,8}}$
$k_{crit} =$	1	$\lambda_{rel,m} \leq 0,75$	
$V_{sd}(kN) =$	2,346	$P_{sd} \times \frac{l}{2}$	$2,346 \times \frac{2}{2}$
$\tau_d(kPa) =$	156,4	$\left(\frac{3}{2}\right) \times \frac{V_{sd}}{A}$	$\left(\frac{3}{2}\right) \times \frac{2,346}{2,250E - 02}$

Tabela 5.28 – Verificação de segurança à flexão simples da viga V2.

Flexão Simples			
$\sigma_{m,d} \leq f_{m,d}$			
$\sigma_{m,adm}(kPa) =$	11076,9	$k_{mod} \times k_h \times k_{sys} \times \frac{f_{m,k}}{\gamma_M} = 0,8 \times 1 \times 1 \times \frac{18000}{1,3}$	OK

Tabela 5.29 – Verificação ao bambeamento da viga V2.

Bambeamento			
$\sigma_{m,d} \leq k_{crit} \times f_{m,d}$			
$k_{crit} \times f_{m,d}(kPa) =$	11076,9	$k_{crit} \times k_{mod} \times k_h \times k_{sys} \times \frac{f_{m,k}}{\gamma_M} = 1 \times 0,8 \times 1 \times 1 \times \frac{18000}{1,3}$	OK

Tabela 5.30 – Verificação ao corte da viga V2.

Corte			
$\tau_d \leq f_{v,d}$			
$f_{v,d}(kPa) =$	1230,8	$f_{v,d} = 0,8 \times \frac{2000}{1,3}$	OK

Tabela 5.31 – Verificação ao Estado-Limite de Utilização da viga V2.

Verificação Estado Limite de Utilização			
$u_{i,adm}(m) =$	0,0067	$L/300$	
$u_{f,adm}(m) =$	0,0080	$L/250$	
$u_{i,G}(m) =$	1,800E-04	$((5/384) \times G \times L^4) / (E_{0,mean} \times I_x) = ((5/384) \times 0,738 \times 2^4) / (9000000 \times 9,492E - 05)$	
$u_{i,Q}(m) =$	2,195E-04	$((5/384) \times Q \times L^4) / (E_{0,mean} \times I_x) = ((5/384) \times 0,900 \times 2^4) / (9000000 \times 9,492E - 05)$	
$u_i(m) =$	3,995E-04	$u_{i,G} + u_{i,Q} \leq u_{i,adm}$	OK
$u_{f,G}(m) =$	2,880E-04	$u_{i,G} \times (1 + k_{def})$	
$u_{f,Q}(m) =$	2,590E-04	$u_{i,Q} \times (1 + \Psi_{2,1} \times k_{def})$	
$u_f(m) =$	5,470 E-04	$u_{f,G} + u_{f,Q} \leq u_{f,adm}$	OK

5.14.3 Dimensionamento da viga V3.

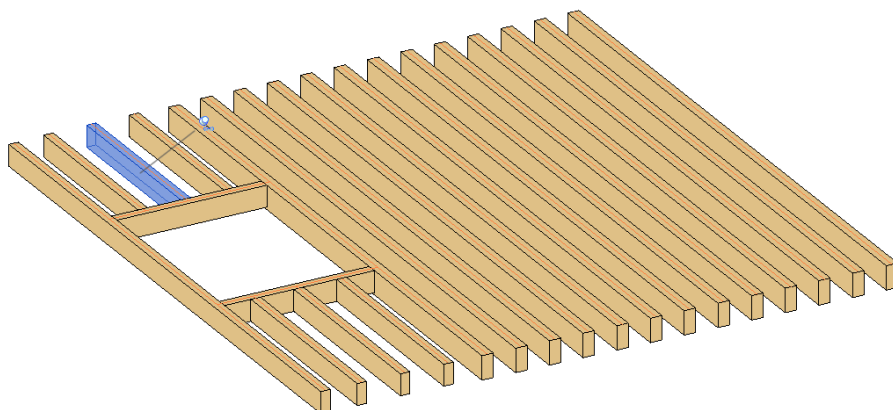


Figura 5.7 – Modelação em Revit do novo pavimento (vigamento) da divisão Norte, lado nascente.
Viga V3.

Tabela 5.32 – Propriedades da madeira maciça.

Propriedades do material			
$f_{m,k} (kPa) =$	18000		EN 338 (1995): 6.2 Classe de resistência da madeira.
$f_{v,k} (kPa) =$	2000		EN 338 (1995): 6.2 Classe de resistência da madeira.
$E_{0,05} (kPa) =$	6000000		EN 338 (1995): 6.2 Classe de resistência da madeira.
$E_{0,mean} (kPa) =$	9000000		EN 338 (1995): 6.2 Classe de resistência da madeira.
$\rho (kN/m^3) =$	3,8		EN 338 (1995): 6.2 Classe de resistência da madeira.
$k_{mod} =$	0,8		EN 1995-1-1 (2003): 3.1.3 Strength modification factors for service classes and load-duration classes.
$\gamma_M =$	1,3		EN 1995-1-1 (2003): 2.4.1 Design value of material property.
$k_h =$	1		EN 1995-1-1 (2003): 3.2 Solid timber.
$k_{sys} =$	1		EN 1995-1-1 (2003): 6.6 System strength.
$k_n =$	5		EN 1995-1-1 (2003): 6.5.2 Beams with a notch at the support.
$k_{def} =$	0,6		EN 1995-1-1 (2003): 3.1.4 Deformation modification factors for service classes.

Tabela 5.33 – Dimensões da viga V3.

Dimensões			
$b (m) =$	0,100	$I_x (m^4) =$	9,492E-05
$h (m) =$	0,225	$W_x (m^3) =$	8,438E-04
$L (m) =$	1,650	$A (m^2) =$	2,250E-02
<i>Espaçamento entre elementos (m) =</i>	0,450		
$l_{ef}(m) =$	1,650	$l_{ef} = m \times l + 2h = 0,9 \times 1,65 + 2 \times 0,225 = 1,94$ Nota ⁹	

Tabela 5.34 – Cargas permanentes consideradas no dimensionamento da viga V3.

Cargas permanentes			
<i>Peso próprio (kN/m) =</i>	0,086	$2,250E - 02 \times 3,8$	
<i>Revestimentos (kN/m²) =</i>	0,553	$2 \times 7 \times 0,015 + 0,7 \times 0,05 + 8 \times 0,025 + 9 \times 0,012$	
<i>Paredes Divisórias (kN/m²) =</i>	0,500		

Tabela 5.35 – Sobrecarga considerada no dimensionamento da viga V3.

Sobrecarga (EC1 Quadro NA.6.2)			
<i>Sobrecarga (kN/m²) =</i>	5	Categoria C3	
<i>Coefficientes de sobrecarga: (ECO Tabela NA.A1.1)</i>	φ_0	φ_1	φ_2
	0,7	0,7	0,6

Tabela 5.36 – Cargas lineares consideradas no dimensionamento da viga V3.

Cargas lineares			
$G (permanentes) (kN/m) =$	0,560	$0,086 + (0,553 + 0,500) \times 0,450$	
$Q (sobrecarga) (kN/m) =$	2,250	$5 \times 0,450$	

⁹ Nota: o momento crítico elástico será calculado através do fator de momento uniforme equivalente (Expressão 5.34), com $m = 0,88$.

Tabela 5.37 – Combinações de ações para o dimensionamento da viga V3.

Combinações de ações		
ELU (kN/m) =	4,134	$1,35 \times 0,560 + 1,50 \times 2,250$
Combinação característica (kN/m) =	2,810	$0,560 + 2,250$
Combinação quase-permanente (kN/m) =	1,910	$0,560 + 0,6 \times 2,250$

Tabela 5.38 – Verificação de segurança da viga V3.

Verificação de segurança (Resistência)			
$P_{sd}(kN/m) =$	4,134	ELU	$1,35 \times 0,560 + 1,50 \times 2,250$
$M_{m\acute{a}x}(kN \times m) =$	1,407	$P_{sd} \times l^2 / 8$	$4,134 \times \frac{1,65^2}{8}$
$\sigma_{m,d}(kPa) =$	1667,56	$M_{m\acute{a}x} / W_x$	$\frac{1,407}{8,438E - 04}$
$\sigma_{m,crit}(kPa) =$	143250,7	$0,78 \times \frac{E_{0,05} \times b^2}{h \times m \times l}$	$0,78 \times \left(\frac{6000000 \times 0,10^2}{0,225 \times 0,88 \times 1,65} \right)$
$\lambda_{rel,m} =$	0,354	$\sqrt{\frac{f_{m,k}}{\sigma_{m,crit}}}$	$\sqrt{\frac{18000}{143250,7}}$
$k_{crit} =$	1	$\lambda_{rel,m} \leq 0,75$	
$V_{sd}(kN) =$	3,411	$P_{sd} \times \frac{l}{2}$	$4,134 \times \frac{1,65}{2}$
$\tau_d(kPa) =$	227,4	$\left(\frac{3}{2}\right) \times \frac{V_{sd}}{A}$	$\left(\frac{3}{2}\right) \times \left(\frac{3,411}{2,250E - 02}\right)$

Tabela 5.39 – Verificação de segurança à flexão simples da viga V3.

Flexão Simples			
$\sigma_{m,d} \leq f_{m,d}$			
$f_{m,d}(kPa) =$	11076,9	$k_{mod} \times k_h \times k_{sys} \times \frac{f_{m,k}}{\gamma_M} = 0,8 \times 1 \times 1 \times \frac{18000}{1,3}$	OK

Tabela 5.40 – Verificação ao bambeamento da viga V3.

Bambeamento			
$\sigma_{m,d} \leq k_{crit} \times f_{m,d}$			
$k_{crit} \times f_{m,d}(kPa) =$	11076,9	$k_{crit} \times k_{mod} \times k_h \times k_{sys} \times \frac{f_{m,k}}{\gamma_M} = 1 \times 0,8 \times 1 \times 1 \times \frac{18000}{1,3}$	OK

Tabela 5.41 – Verificação ao corte da viga V3.

Corte			
$\tau_d \leq f_{v,d}$			
$f_{v,d}(kPa) =$	1230,8	$f_{v,d} = 0,8 \times \frac{2000}{1,3}$	OK

Tabela 5.42 – Verificação ao Estado-Limite de Utilização da viga V3.

Verificação Estado Limite de Utilização			
$u_{i,adm}(m) =$	0,0055	$L/300$	
$u_{f,adm}(m) =$	0,0066	$L/250$	
$u_{i,G}(m) =$	6,326E-05	$((5/384) \times G \times L^4) / (E_{0,mean} \times I_x) = ((5/384) \times 0,560 \times 1,65^4) / (9000000 \times 9,492E - 05)$	
$u_{i,Q}(m) =$	2,542E-04	$((5/384) \times Q \times L^4) / (E_{0,mean} \times I_x) = ((5/384) \times 2,250 \times 1,65^4) / (9000000 \times 9,492E - 05)$	
$u_i(m) =$	3,175E-04	$u_{i,G} + u_{i,Q} \leq u_{i,adm}$	OK
$u_{f,G}(m) =$	1,012E-04	$u_{i,G} \times (1 + k_{def})$	
$u_{f,Q}(m) =$	3,457E-04	$u_{i,Q} \times (1 + \Psi_{2,1} \times k_{def})$	
$u_f(m) =$	4,469E-04	$u_{f,G} + u_{f,Q} \leq u_{f,adm}$	OK

5.14.4 Dimensionamento da viga V4.

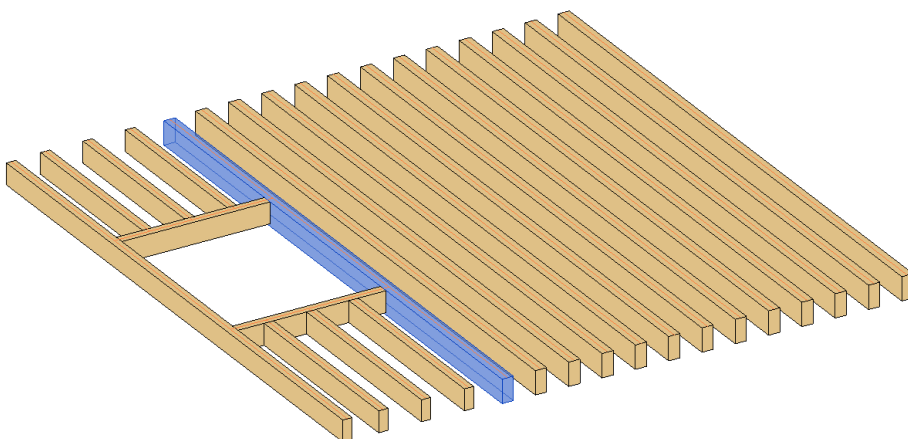


Figura 5.8 – Modelação em Revit do novo pavimento (vigamento) da divisão Norte, lado nascente. Viga V4.

Tabela 5.43 – Propriedades da madeira lamelada colada.

Propriedades do material			
$f_{m,k}$ (kPa) =	24000		EN 338 (1995): 6.2 Classe de resistência da madeira.
$f_{v,k}$ (kPa) =	2700		EN 338 (1995): 6.2 Classe de resistência da madeira.
$E_{0,05}$ (kPa) =	9400000		EN 338 (1995): 6.2 Classe de resistência da madeira.
$E_{0,mean}$ (kPa) =	11600000		EN 338 (1995): 6.2 Classe de resistência da madeira.
ρ (kN/m ³) =	3,8		EN 338 (1995): 6.2 Classe de resistência da madeira.
k_{mod} =	0,8		EN 1995-1-1 (2003): 3.1.3 Strength modification factors for service classes and load-duration classes.
γ_M =	1,25		EN 1995-1-1 (2003): 2.4.1 Design value of material property.
k_h =	1,1		EN 1995-1-1 (2003): 3.2 Solid timber.
k_{sys} =	1,1		EN 1995-1-1 (2003): 6.6 System strength.
k_n =	6,5		EN 1995-1-1 (2003): 6.5.2 Beams with a notch at the support.
k_{def} =	0,6		EN 1995-1-1 (2003): 3.1.4 Deformation modification factors for service classes.

Tabela 5.44 – Dimensões da viga V4.

Dimensões			
$b (m) =$	0,140	$I_x (m^4) =$	16,128E-05
$h (m) =$	0,240	$W_x (m^3) =$	13,440E-04
$L (m) =$	5,6	$A (m^2) =$	3,360E-02
<i>Espaçamento entre elementos (m) =</i>	0,40	Será considerado o mesmo espaçamento da viga V1.	
$l_{ef}(m) =$	5,52	$l_{ef} = m \times l + 2h = 0,9 \times 5,6 + 2 \times 0,24$	

Tabela 5.45 – Cargas permanentes consideradas no dimensionamento da viga V4.

Cargas permanentes		
<i>Peso próprio (kN/m) =</i>	0,128	$2,250E - 02 \times 3,8$
<i>Revestimentos (kN/m²) =</i>	0,950	$2 \times 7 \times 0,015 + 0,7 \times 0,05 + 8 \times 0,025 + 9 \times 0,012 + 20 \times 0,02$
<i>Paredes Divisórias (kN/m²) =</i>	0,500	

Tabela 5.46 – Sobrecarga considerada no dimensionamento da viga V4.

Sobrecarga (EC1 Quadro NA.6.2)			
<i>Sobrecarga (kN/m²) =</i>	2	Categoria A	
<i>Coefficientes de sobrecarga:</i> (ECO Tabela NA.A1.1)	φ_0	φ_1	φ_2
	0,7	0,5	0,3

Tabela 5.47 – Cargas lineares consideradas no dimensionamento da viga V4.

Cargas lineares		
$G (permanentes) (kN/m) =$	0,708	$0,128 + (0,950 + 0,500) \times 0,40$
$Q (sobrecarga) (kN/m) =$	0,800	$2 \times 0,400$

Tabela 5.48 – Combinações de ações para o dimensionamento da viga V4.

Combinações de ações		
ELU (kN/m) =	2,156	$1,35 \times 0,708 + 1,50 \times 0,8$
Combinação característica (kN/m) =	1,508	$0,708 + 0,8$
Combinação quase-permanente (kN/m) =	0,948	$0,708 + 0,3 \times 0,8$

Tabela 5.49 – Verificação de segurança da viga V4.

Verificação de segurança (Resistência)			
$P_{sd}(kN/m) =$	2,156	ELU	$1,35 \times 0,708 + 1,50 \times 0,8$
$M_{m\acute{a}x}(kN \times m) =$	8,451	$P_{sd} \times l^2 / 8$	$2,156 \times \frac{5,6^2}{8}$
$\sigma_{m,d}(kPa) =$	6288,33	$M_{m\acute{a}x} / W_x$	$\frac{8,451}{13,440E - 04}$
$\sigma_{m,crit}(kPa) =$	108083,0	$0,78 \times \left(\frac{b^2}{l_{ef} \times h} \right) \times E_{0,05}$	$0,78 \times \left(\frac{0,14^2}{5,54 \times 0,24} \right) \times 9400000$
$\lambda_{rel,m} =$	0,471	$\sqrt{\frac{f_{m,k}}{\sigma_{m,crit}}}$	$\sqrt{\frac{24000}{108083,0}}$
$k_{crit} =$	1	$\lambda_{rel,m} \leq 0,75$	
$V_{sd}(kN) =$	6,037	$P_{sd} \times \frac{l}{2}$	$2,156 \times \frac{5,6}{2}$
$\tau_d(kPa) =$	269,5	$\left(\frac{3}{2} \right) \times \frac{V_{sd}}{A}$	$\left(\frac{3}{2} \right) \times \left(\frac{6,037}{3,360E - 02} \right)$

Tabela 5.50 – Verificação de segurança à flexão simples da viga V4.

Flexão Simples			
$\sigma_{m,d} \leq f_{m,d}$			
$f_{m,d}(kPa) =$	18585,6	$k_{mod} \times k_h \times k_{sys} \times \frac{f_{m,k}}{\gamma_M} = 0,8 \times 1,1 \times 1,1 \times \frac{24000}{1,25}$	OK

Tabela 5.51 – Verificação ao bambeamento da viga V4.

Bambeamento			
$\sigma_{m,d} \leq k_{crit} \times f_{m,d}$			
$k_{crit} \times f_{m,d}(kPa) =$	18585,6	$k_{crit} \times k_{mod} \times k_h \times k_{sys} \times \frac{f_{m,k}}{\gamma_M} = 1 \times 0,8 \times 1,1 \times 1,1 \times \frac{24000}{1,25}$	OK

Tabela 5.52 – Verificação ao corte da viga V4.

Corte			
$\tau_d \leq f_{v,d}$			
$f_{v,d}(kPa) =$	1728,0	$f_{v,d} = 0,8 \times \frac{2700}{1,25}$	OK

Tabela 5.53 – Verificação ao Estado-Limite de Utilização da viga V4.

Verificação Estado Limite de Utilização			
$u_{i,adm}(m) =$	0,0187	$L/300$	
$u_{f,adm}(m) =$	0,0224	$L/250$	
$u_{i,G}(m) =$	0,0048	$((5/384) \times G \times L^4) / (E_{0,mean} \times I_x) = ((5/384) \times 0,708 \times 5,60^4) / (11600000 \times 16,128E - 05)$	
$u_{i,Q}(m) =$	0,0055	$((5/384) \times Q \times L^4) / (E_{0,mean} \times I_x) = ((5/384) \times 0,8 \times 5,60^4) / (11600000 \times 16,128E - 05)$	
$u_i(m) =$	0,0103	$u_{i,G} + u_{i,Q} \leq u_{i,adm}$	OK
$u_{f,G}(m) =$	0,0077	$u_{i,G} \times (1 + k_{def})$	
$u_{f,Q}(m) =$	0,0065	$u_{i,Q} \times (1 + \Psi_{2,1} \times k_{def})$	
$u_f(m) =$	0,0142	$u_{f,G} + u_{f,Q} \leq u_{f,adm}$	OK

5.15 DIMENSIONAMENTO DO PAVIMENTO DE MADEIRA E A INTEROPERABILIDADE

No Capítulo 4, além do edifício, foi também modelado o novo pavimento de madeira com vigas de madeira de secção retangular, que virá a integrar o projeto de reabilitação. Depois de modelado em Revit, este ficheiro foi aberto no Robot Structural Analysis, onde viria a ser testada a interoperabilidade entre programas. Depois de aberto, foram introduzidas as cargas a serem consideradas para o dimensionamento das vigas de madeira, e testadas todas as verificações necessárias.

As cargas consideradas para o dimensionamento, no *software* de cálculo automático Robot Structural Analysis, estão presentes nas Tabelas 5.7, 5.8 e 5.9.

Na Figura 5.9 e 5.10 estão representadas as cargas permanentes e sobrecargas, respetivamente, consideradas para o dimensionamento do pavimento.

Todos os valores relacionados com as propriedades da madeira, Tabela 5.10 (por exemplo), foram introduzidos no Robot Structural Analysis para poderem ser feitas as verificações necessárias ao dimensionamento.

Após o cumprimento de todas as verificações regulamentares, as soluções foram iguais às obtidas no Ponto 5.13. Ou seja, a solução deste pavimento passará por duas vigas de madeira lamelada colada GL24h com secção de 14x24cm e vigas de madeira maciça C18 com secções de 10x22,5cm no WC e circulação horizontal comum e com secções de 12x25cm no quarto (Figura 5.11).

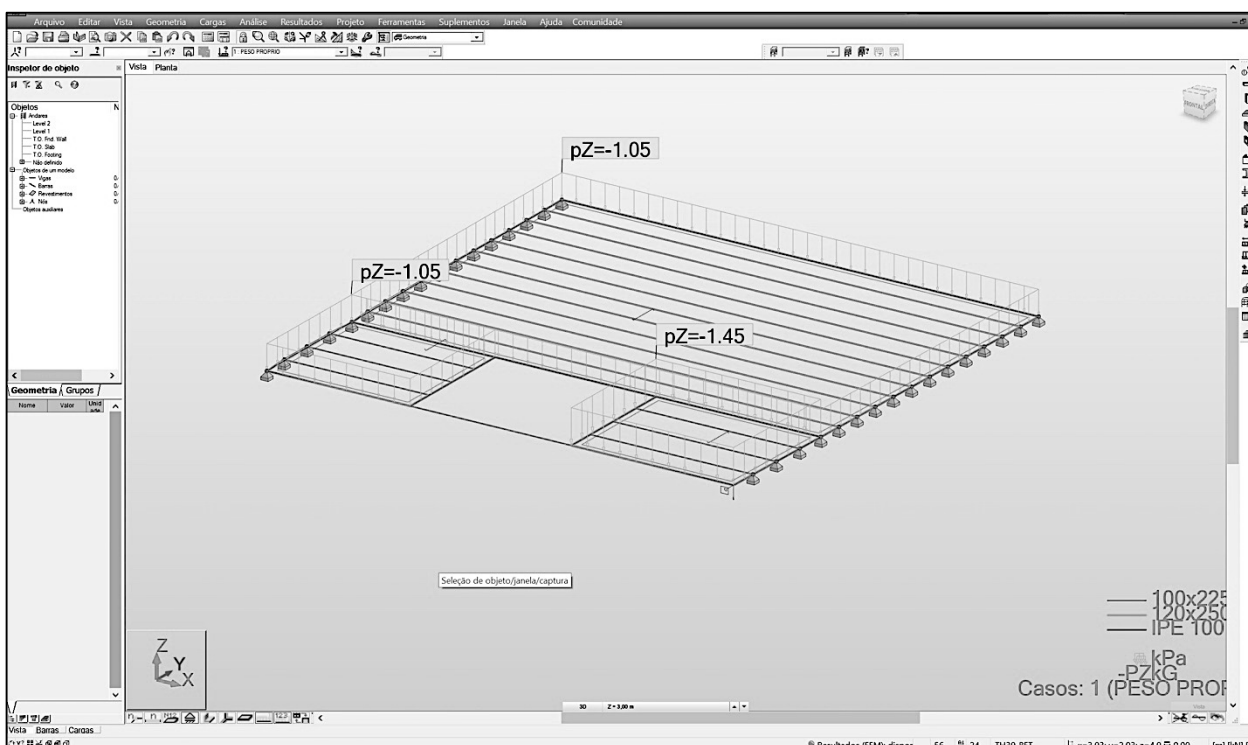


Figura 5.9 – Cargas permanentes consideradas.

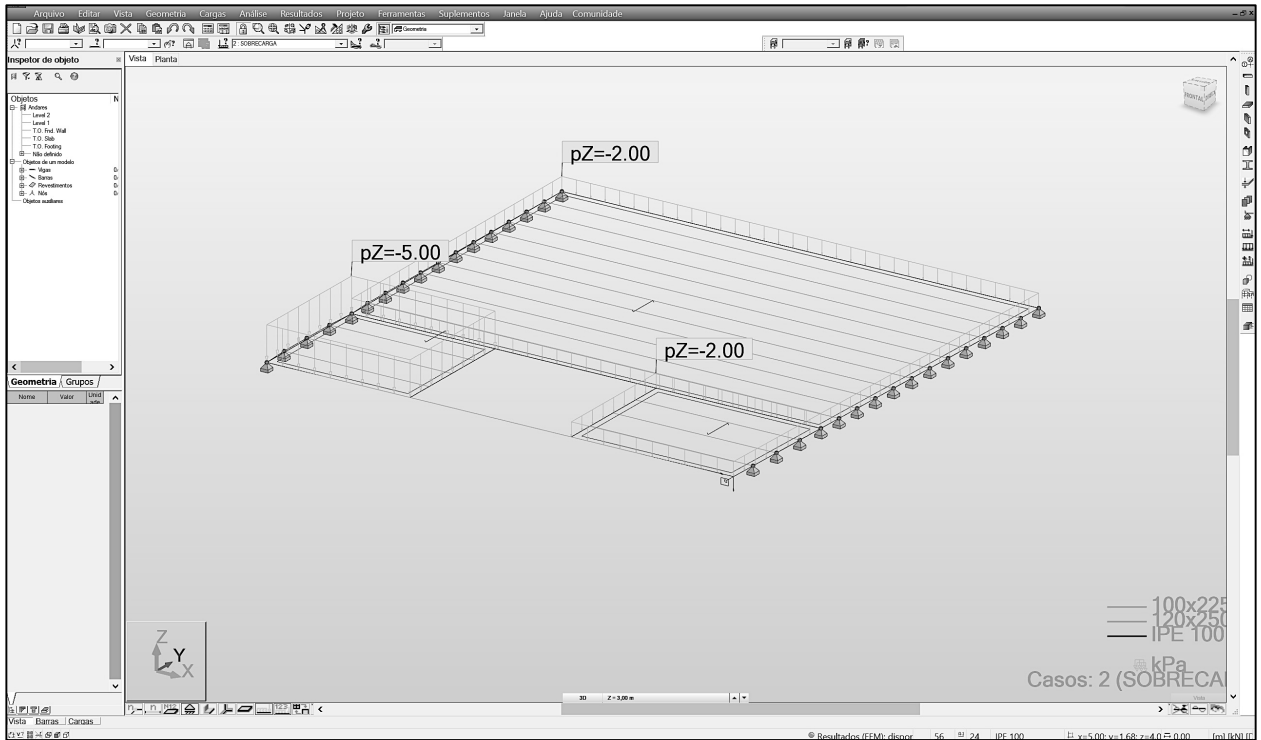


Figura 5.10 – Sobrecargas consideradas.

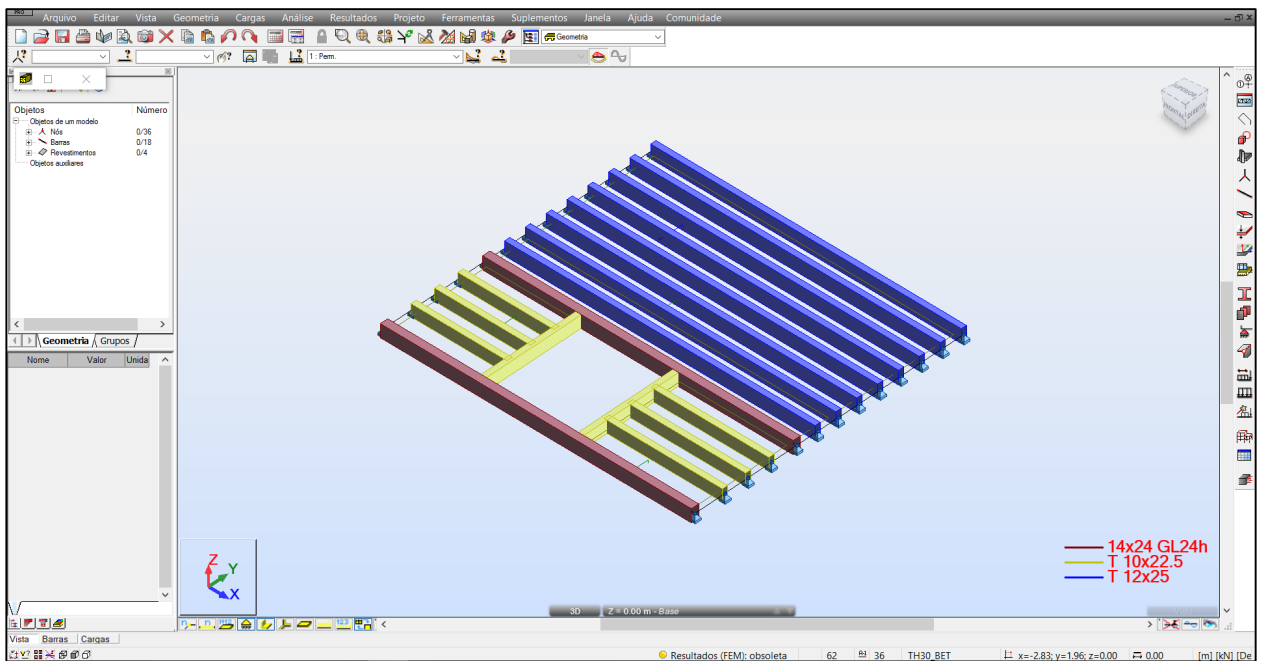


Figura 5.11 – Resultado final.

CAPÍTULO 6

SOLUÇÃO FINAL

Após as inspeções realizadas às vigas de madeira originais dos pavimentos, com recurso ao Registógrafo (presentes no Capítulo 3), e a inspeção visual realizada a todos os elementos constituintes do edifício, concluiu-se que os problemas que afetam uma divisão são transversais a todas as mesmas divisões dos restantes pisos. Por exemplo, todas as divisões orientadas a norte do lado nascente do edifício precisavam que os seus pavimentos fossem totalmente substituídos por novas soluções. Estas divisões foram fortemente atacadas por humidade e conseqüentemente por agentes bióticos.

Desta forma, será abordada uma solução final adotada para um só pavimento, pois os restantes terão soluções semelhantes a estas. Assim, após o dimensionamento feito no anterior Capítulo 5 e tendo em conta a experiência adquirida pela empresa, onde decorreu o estágio curricular, em obras de reabilitação anteriores com características semelhantes, na cidade do Porto, chegou-se às seguintes conclusões:

6.1 DIVISÃO SUL, LADO POENTE

- Devido às suas boas condições, o pavimento original será mantido e reforçado (Figuras 6.1 e 6.2);



Figura 6.1 – Estado do pavimento da divisão Sul, lado poente, piso 2.



Figura 6.2 – Estado do pavimento da divisão Sul, lado poente, piso 2.

- Parte do pavimento será reforçado com vigas de madeira maciça (pinho C18) de secção retangular (0,10x22,5m) intercaladas às vigas já existentes.
- O reforço desta parte do pavimento, deve-se ao facto de ser necessário construir novas instalações sanitárias nessa área. Portanto, ao contrário da zona do pavimento que não é reforçada, esta zona terá um acréscimo de carga devido ao revestimento cerâmico das instalações sanitárias.

6.2 DIVISÃO SUL, LADO NASCENTE

- Devido às suas boas condições, o pavimento original será mantido e reforçado (Figuras 6.3 e 6.4);



Figura 6.3 – Estado do pavimento da divisão Sul, lado nascente, piso 2.



Figura 6.4 – Estado do pavimento da divisão Sul, lado nascente, piso 1.

- Parte do pavimento será reforçado com vigas de madeira maciça (pinho C18) de secção retangular (0,10x22,5m) intercaladas às vigas existentes;
- O reforço desta parte do pavimento, deve-se ao facto de ser necessário construir novas instalações sanitárias nessa área. Portanto, ao contrário da zona do pavimento que não é reforçada, esta zona terá um acréscimo de carga devido ao revestimento cerâmico das instalações sanitárias.

6.3 DIVISÃO NORTE, LADO POENTE

- a. Devido às suas boas condições, parte do pavimento original será mantido (Figuras 6.5 e 6.6);
- b. Na parte traseira desta divisão, o pavimento terá de ser substituído por vigas de madeira maciça (pinho C18) de secção retangular (0,12x0,25m), espaçadas 0,40m;

- c. Na área de contacto entre a cantoneira metálica e a parede de alvenaria de pedra granítica será aplicada uma camada de regularização de superfície da marca Sika, com uma espessura máxima de 30mm.
- d. O reforço desta zona, deve-se ao facto de ser necessário construir novas instalações sanitárias nessa área. Portanto, ao contrário da zona do pavimento que não é reforçada, esta zona terá um acréscimo de carga devido ao revestimento cerâmico das instalações sanitárias.



Figura 6.5 – Estado do pavimento da divisão Norte, lado poente, piso 1.



Figura 6.6 – Estado do pavimento da divisão Norte, lado poente, piso 1.

6.4 DIVISÃO NORTE, LADO NASCENTE

- Devido às suas péssimas condições, todo o pavimento desta divisão não será mantido (Figuras 6.7 e 6.8);

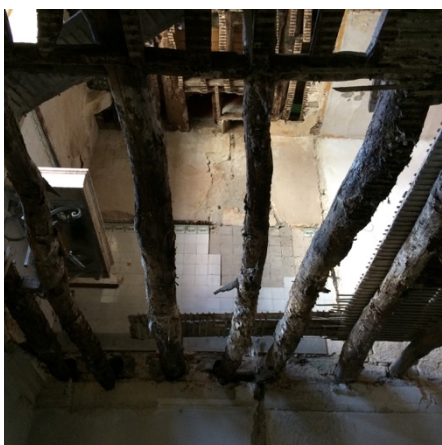


Figura 6.7 – Estado do pavimento da divisão Norte, do lado nascente, piso 2.



Figura 6.8 – Estado do pavimento da divisão Norte, do lado nascente, piso 2.

- Na parte do quarto, o novo pavimento terá vigas de madeira maciça (pinho C18) de secção retangular (0,12x0,25m), espaçadas 0,40m;
- Na parte da instalação sanitária e da circulação horizontal comum (saída do elevador), os novos pavimentos terão vigas de madeira de secção retangular (0,10x0,225m), espaçadas 0,45m. Num dos lados, estas vigas estarão apoiadas em vigas de madeira de secção retangular (0,10x0,225m) que por sua vez, estarão ligadas às duas vigas de madeira lamelada colada;
- Na zona mais esforçada do pavimento (zona do elevador) serão usadas duas vigas de madeira lamelada colada GL24h, de secção retangular (0,14x0,24m);
- Na área de contacto entre a cantoneira metálica e a parede de alvenaria de pedra granítica será aplicada uma camada de regularização de superfície da marca Sika, com uma espessura máxima de 30mm.

Estas novas vigas estarão apoiadas em duas cantoneiras metálicas do tipo L (120x120x10). Horizontalmente estarão cravadas às paredes de alvenaria granítica com recurso a buchas químicas da marca Hilti. O químico de injeção à base de resina de epóxico é o modelo HIT-RE-500 e o varão roscado normal usado em conjunto com o químico de injeção é o modelo HIT-V-8.8 M16, também da Hilti. As buchas químicas serão dispostas em quincôncio, com afastamentos de 0,40m. Verticalmente a fixação às faces inferiores das vigas de madeira será feita através de parafusos totalmente roscados do tipo VGZ 9-120, da marca Rothoblass. Esta solução é transversal a todas as divisões (Fig. 6.12).

6.5 CIRCULAÇÕES HORIZONTAIS COMUNS

Devido às suas boas condições, os pavimentos de madeira serão mantidos (Figuras 6.9 e 6.10).

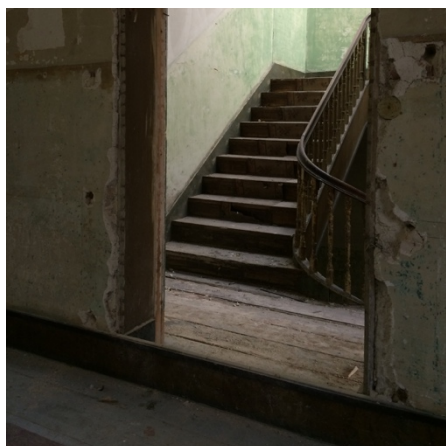


Figura 6.9 – Estado do pavimento das circulações horizontais comuns, piso 1.



Figura 6.10 – Estado do pavimento das circulações horizontais comuns, piso 1.

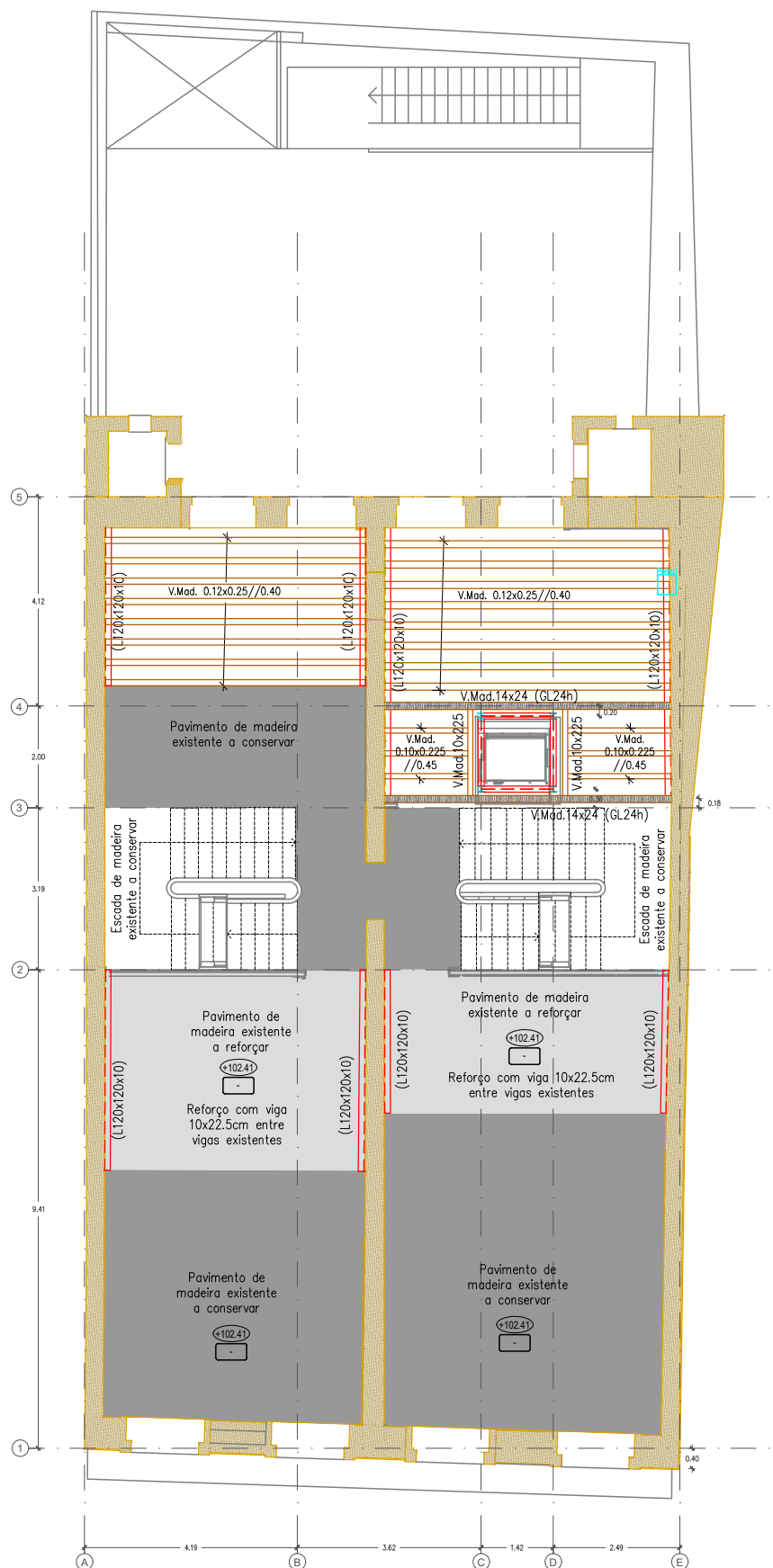


Figura 6.11 – Planta de teto do piso 1.

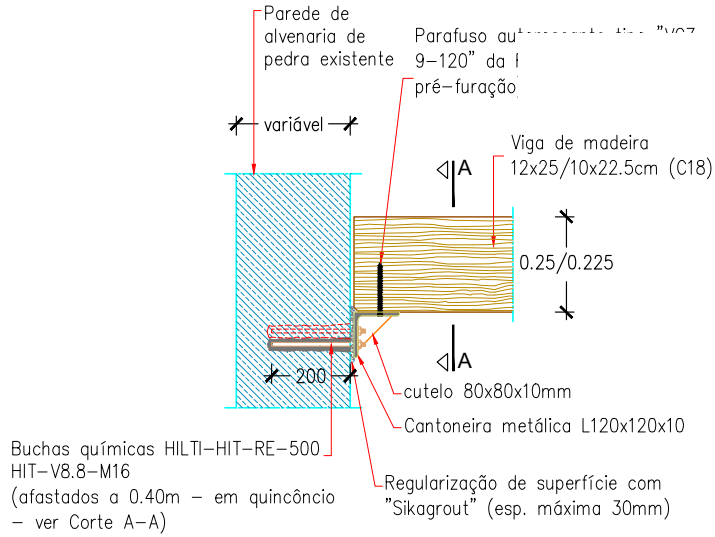


Figura 6.12 – Pormenor do tipo de ligação que será usada.

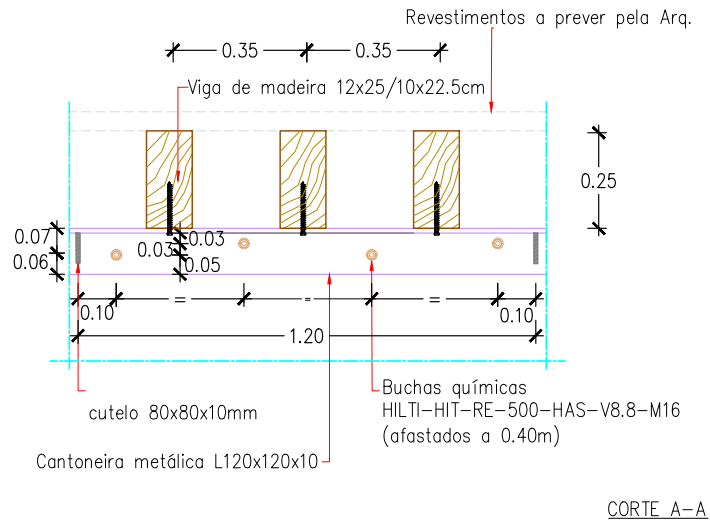


Figura 6.13 – Pormenor do tipo de ligação que será usada.

CAPÍTULO 7

CONCLUSÃO

Este relatório pretendeu apresentar as atividades desenvolvidas, durante o período do estágio curricular, na empresa Jerónimo Botelho – Projeto e Consultoria em Reabilitação do Património Edificado Lda., descrevendo as técnicas de inspeção, ações de reabilitação, reforço, substituição e dimensionamento definidas para um edifício típico da cidade do Porto. Aliada a estas atividades foi também utilizada a metodologia BIM, com a modelação em Revit do edifício em estudo.

Em primeiro lugar, foi realizada a caracterização dos elementos constituintes deste edifício. As paredes exteriores resistentes em alvenaria de pedra granítica, escadas e cobertura encontram-se em bom estado de conservação. As paredes interiores em tabique serão removidas devido à nova tipologia que o edifício passará a ter, depois da reabilitação. Em todas as divisões localizadas a Norte do lado nascente e em parte das divisões localizadas a Norte do lado poente, os pavimentos encontram-se em péssimo e mau estado de conservação, respetivamente, e terão de ser substituídos. Em parte das divisões localizadas a Norte (lado poente) e a Sul (lados nascente e poente), parte dos pavimentos deverão ser reforçados. Todas estas soluções estão indicadas no Capítulo 6.

Foram estudadas técnicas de diagnóstico e metodologias de intervenção nos pavimentos que poderiam ser mantidos neste projeto de reabilitação. A partir da inspeção visual e da realização de ensaios não destrutivos, usando o resistógrafo, foi possível retirar conclusões relativas ao estado de conservação das vigas constituintes dos pavimentos de madeira. Desta forma, foi possível determinar quais as medidas de intervenção possíveis e necessárias à reabilitação dos pavimentos.

Depois, foi proposto o desenvolvimento e integração da metodologia BIM a este projeto de reabilitação, com o âmbito de desenvolver o conhecimento desta nova metodologia de trabalho. O programa usado para a modelação foi Revit 2016 que permite a modelação em 3D de todos os elementos integrantes do edifício.

Como se trata de um edifício antigo, a maior parte dos seus elementos apresentam dimensões diferentes, obrigando assim à modelação de dezenas de elementos, principalmente paredes e pavimentos e à criação de uma viga de madeira de seção circular.

A secção de estruturas do Revit tem como grande vantagem a ligação direta com o programa de análise estrutural Robot Structural Analysis, evitando assim a perda de informação na exportação de modelos. Desta forma, foi criado um pavimento de madeira que contribui para a testar a interoperabilidade entre estes dois programas.

A metodologia BIM é de extremo interesse devido ao potencial que demonstra ter na otimização do processo. É, no entanto, necessário mudar mentalidades para que a implementação da metodologia BIM seja utilizada por todos. A evolução pode criar alguma resistência, mas é importante realçar que, além da visualização em 3D e da sua base de dados, o BIM também é uma ferramenta colaborativa, cujo sucesso depende de todos os intervenientes.

Por fim, após a inspeção aos pavimentos de madeira, concluiu-se que, face ao seu mau estado, em algumas divisões, seria necessário realizar o dimensionamento de novos pavimentos. Desta forma, com base na experiência que a empresa possuía nesta área e baseando o cálculo analítico nos regulamentos e bibliografia aplicáveis foram dimensionadas as vigas de madeira dos novos pavimentos. Através da interoperabilidade entre o Revit e Robot Structural Analysis, o resultado deste dimensionamento foi duplamente verificado, confirmando assim os resultados analiticamente obtidos.

7.1 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Na sequência deste trabalho e da pesquisa bibliográfica desenvolvida, no âmbito deste estágio curricular, surgiram dois aspetos que poderiam ser melhorados. Um relativo aos pavimentos de madeira e outro relativo à metodologia BIM.

A realização de outro tipo de ensaios não destrutivos sobre as peças de madeira, tal como o georradar, poderá eventualmente fornecer informação quantitativa mais rigorosa na avaliação das propriedades mecânicas dos elementos de madeira.

O estudo realizado neste trabalho, depois da aplicação da metodologia BIM, permite diagnosticar algumas oportunidades de desenvolvimento futuro. Por exemplo, depois do conhecimento de todos os revestimentos constituintes dos elementos, que integram o edifício, será possível aplicar ao modelo simulações energéticas que permitiria testar diferentes soluções construtivas e cálculos de ganhos e perdas de energia (análise térmica). Outra funcionalidade que poderá ser explorada no Revit será também a modelação em 3D dos elementos das redes de infraestruturas do edifício.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ARRIAGA MARTITEGUI, Francisco, et al. – **Intervención en estructuras de madera**. Madrid : Asociación de Investigación Técnica de las Industrias de la Madera AITIM, 2002. ISBN 978-848-7381-24-9.
- [2] BOTELHO, J. – Avaliação não destrutiva da capacidade resistente de estruturas de madeira de edifícios antigos. Porto : Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2006. Tese de mestrado.
- [3] COELHO, A. – Inspecção, diagnóstico e projecto no âmbito da reabilitação de edifícios antigos do Porto. Porto : Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2014. Tese de mestrado.
- [4] CÓIAS, Vítor – **Guia prático para a conservação de imóveis: Manual para a utilização durável e economia da habitação, através de uma adequada manutenção**. Lisboa : D. Quixote, 2004. ISBN 972-20-2184-2.
- [5] DIAS, T. – Pavimentos de madeira em edifícios antigos : Diagnóstico e intervenção estrutural. Porto : Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2008. Tese de mestrado.
- [6] EASTMAN, Chuck, et al. – **BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers and Contractors**. New Jersey : John Wiley and Sons Inc., 2011. ISBN 978-0-470-54137-1.
- [7] EN 335-1. 1992, Durability of wood and wood-based products. Definitions of use classes. General. Bruxelas : CEN.
- [8] EN 338. 1995, Structural timber: Strength classes. Bruxelas : CEN.
- [9] EN 1990. 2002, Eurocode 0 – Basis of structural design. Bruxelas : CEN.
- [10] EN 1991-1-1. 2002, Eurocode 1 – Actions on structures – Part 1-1: General actions – Densities, self-weight, imposed loads for buildings. Bruxelas : CEN.
- [11] EN 1995-1-1. 2003, Eurocode 5 – Design of timber structures – Part 1-1: General – Common rules and rules for buildings. Bruxelas : CEN.
- [12] Especificação M1. 1997, Especificação de madeiras para estruturas. Lisboa : LNEC.
- [13] Especificação M2. 1997, Pinho bravo para estruturas de madeira: Classificação visual. Lisboa : LNEC.

- [14] ESTEVES, A. – A metodologia BIM aplicada à preparação de obra. Porto : Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2012. Tese de mestrado.
- [15] FERREIRA, B. – Aplicação de conceitos BIM à Instrumentação de estruturas. Porto : Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2011. Tese de mestrado.
- [16] FREITAS, Vasco – **Manual de apoio ao projecto de reabilitação de edifícios antigos**. Porto : Ordem dos Engenheiros da Região Norte, 2012. ISBN 978-972-9991-87-5.
- [17] MAGALHÃES, Marcelo – Projeto de estruturas de edifícios em betão armado apoiado em ferramentas BIM. Porto : Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2015. Tese de mestrado.
- [18] MARTINS, P. – A interoperabilidade entre sistemas BIM e simulação ambiental computacional : Estudo de caso. Brasília : Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, 2011. Tese de mestrado.
- [19] MCPHEE, A. What is this thing called LOD. 1 do 3 de 2013, disponível no <http://practicalbim.blogspot.pt/2013/03/what-is-this-thing-called-lod.html>
- [20] NEGRÃO, João; FARIA, Amorim – Projecto de Estruturas de Madeira. Porto : Publindústria Edições Técnicas, 2009. ISBN 978-972-8953-36-2.
- [21] NP 4305. 1995, Madeira serrada de pinheiro bravo para estruturas. Lisboa : LNEC.
- [22] SILVA, J. – Princípios para o desenvolvimento de projetos com recurso a ferramentas BIM : Avaliação de melhores práticas e proposta de regras de modelação para projetos de estruturas. Porto : Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2013. Tese de mestrado.
- [23] SOARES, Joel – A metodologia BIM-FM aplicada a um caso prático. Porto : Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2013. Tese de mestrado.
- [24] TEIXEIRA, J. – Descrição do sistema construtivo da casa burguesa do porto entre os séculos XVII e XIX : Contributo para uma história da construção arquitectónica em Portugal. 2004. Provas de aptidão pedagógica e capacidade científica.
- [25] VICO. (2013). Obtido em 13 de Março de 2013, de VICO software: www.vicosoftware.com/BIM-Level-of-Detail/tabid/89638/Default.aspx