



UNIVERSIDADE DE
COIMBRA

Cláudia Cristina Pires Miranda Ferreira da Silva

INTERVENÇÃO DE REABILITAÇÃO ESTRUTURAL NA
COBERTURA DE EDIFÍCIO URBANO DE ALVENARIA
NO PORTO

Dissertação “Intervenção de Reabilitação Estrutural na Cobertura de Edifício de Alvenaria no Porto”, realizado no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Civil, sob a orientação, respetivamente, do Prof. Dr. Paulo M.M.P. Providência e Costa e Prof. Dr. Anísio Alberto Martinho de Andrade e apresentados à Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

Outubro 2021

Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra
Departamento de Engenharia Civil

Cláudia Cristina Pires Miranda Ferreira da Silva

Intervenção de Reabilitação Estrutural na Cobertura de Edifício Urbano de Alvenaria no Porto

Structural Rehabilitation of the Roof of a masonry building in Porto

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, na área de Especialização em Estruturas,
orientada pelo Professor Doutor Paulo M.M.P Providência e Costa e pelo Professor Doutor Anísio Alberto Martinho Andrade

Esta Dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor. O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC
declina qualquer responsabilidade, legal ou outra, em relação a erros ou omissões que possa conter.

Outubro de 2021



UNIVERSIDADE D
COIMBRA

Esta cópia da tese é fornecida na condição de que quem a consulta reconhece que os direitos de autor são pertença do autor da tese e que nenhuma citação ou informação obtida a partir dela pode ser publicada sem a referência apropriada.

This copy of the thesis has been supplied on condition that anyone who consults it is understood to recognize that its copyright rests with its author and that no quotation from the thesis and no information derived from it may be published without proper acknowledgement.

Agradecimentos

Começo por agradecer o apoio e contributo profissional do Prof. Dr. Paulo Providência, que acompanhou até ao último suspiro. Muito obrigada.

Escrevo este parágrafo com um ligeiro tremer de mãos e já se fazem notar as lágrimas que me escorrem dos olhos, esta emoção indetifico-a com alívio, sentimento incrédulo que este momento está acontecer! Após tanto esforço, tanta resiliência à vontade de desistir, após a existência de dias de esperança, dias de desespero, dias dos dois ao mesmo tempo e separado, mas dias, e um conjunto de dias faz um mês e muitos meses fazem uma dissertação. Desta vez houve ponto final de um ciclo. Há grandes mentes que nos dizem que a felicidade está no caminho para as metas e não nas próprias, no entanto aqui, assumo que a meta é o pináculo da felicidade! E esta especialmente, porque já se tinha revelado o meu calcanhar de Aquiles e ultrapassá-lo é dos melhores sabores e prazeres da vida.

Acompanhado de felicidade e emoção que ainda não foi processada por falta de tempo, está também mais uma tomada de consciência, e essa sim a mais importante a nível pessoal. Consciência essa de que fiz esta caminhada da dissertação, acompanhada de amor, carinho e ternura pelos meus mais queridos, as pessoas que acompanham lado a lado, e são os pilares basilares da minha existência enquanto ser habitante deste planeta. Obrigada Pai, Mãe e Avós!

Especial agradecimento ao meu irmão André e à companheira dele, Adriana, que foram incansáveis na fase final deste processo, apesar das adversidades circunstanciais, tiveram a maior paciência e dedicação, a eles um muito obrigada!

Aos meus amigos mais próximos, que assistiram sempre de perto ao status deste ciclo, que para além de assistir participaram com empatia, preocupação e conselhos, obrigada! Finalmente, agradecer à minha companheira Liliana, pelo companheirismo diário, pela lealdade, afeto e ternura mas essencialmente, por nunca desistir de mim, mesmo até quando eu desisto. Obrigada!

Resumo

Como resposta à necessidade emergente sobre alternativa à construção nova, associado ao carácter urgente de revitalização dos centros históricos em Portugal e à sustentabilidade do setor da construção, destaca-se este caso de estudo de intervenção num edifício da segunda metade do séc. XIX, detentor de elevado valor patrimonial, na cidade do Porto.

Esta intervenção foca-se na análise estrutural da cobertura de madeira existente do edifício em alvenaria de pedra, sob enquadramento do Eurocódigo 5 (EN 1995-1-1:2004) e a modelação estrutural em software da AutodeskTM Robot Structural Analysis®.

Como estado de arte, a recolha de informação espectra-se entre o enquadramento geral da reabilitação, as principais anomalias, abordagens a técnicas de reabilitação e, por fim, a técnicas de inspeção e diagnóstico, como base científica para sustentar o levantamento do caso de estudo.

Numa segunda fase do trabalho, privilegia-se a verificação de segurança da estrutura de cobertura existente aos estados limites últimos e de serviço, em condições anteprojetado (ideais) e condições após influência das anomalias identificadas. Através da modelação estrutural com auxílio do software, avalia-se a segurança da proposta prevista no projeto de estabilidades para este edifício, bem como se avalia a segurança da proposta inserida em fase de início de trabalhos de reabilitação da estrutura de cobertura. Finalmente, modela-se a solução de reforço estrutural alternativa, que não é a solução menos intrusiva mas que representa uma solução mais fiável a longo prazo, no cumprimento das verificações de segurança aos estados limites últimos e de serviço.

Procede-se a análise comparativa das soluções, de acordo com critérios sustentados na preocupação orçamental, o tempo e modo de execução, e o seu grau de intrusão dando ênfase às exigências ambientais e de preservação de património.

Finalmente, registam-se as conclusões que pretendem auxiliar na definição de modos de atuação na reabilitação estrutural de coberturas em sistema de asnas antigas, como um contributo para o processo de desenvolvimento e fiabilidade de um mercado alternativo à construção nova. Estas conclusões são acompanhadas pelas portas abertas da identificação dos tópicos com promissor desenvolvimento futuro.

Palavras-Chave: Reabilitação de edifícios; Coberturas em madeira; Eurocódigo 5; Inspeção e diagnóstico; Modelação AutodeskTM Robot Structural Analysis®

Abstract

As a response to the emerging need for an alternative to new construction, associated with the urgent character of the revitalization of historic centers in Portugal and sustainability of construction market, the case study of building from the second half of the XIX century, in the city of Porto, is considered in this study.

This intervention focuses on the structural analysis of the existing timber roof of the building in stone masonry, under the framework of Eurocode 5 (EN 1995-1-1:2004) and the structural modeling in AutodeskTM Robot Structural Analysis[®] software.

The state of the art, reviews the information about rehabilitation of masonry buildings, the main anomalies, approaches to rehabilitation techniques and, finally, inspection and diagnosis techniques, as a scientific basis to support the survey of the case of study.

In a second phase of the work, priority was given to checking the safety of the existing roof structure regarding both Ultimate Limit States and Service Limit States. Both these analyses are made regarding pre-project conditions (ideal) as well as adding influence of the identified anomalies.

Through the structural modeling with the help of the indicated software, the safety of the proposal foreseen in the stability project for this building is evaluated, as well as the safety of the proposal inserted in the beginning phase of rehabilitation works of the roof structure is evaluated. Finally, the alternative structural reinforcement solution is modeled, which is not the least intrusive solution but represents a more reliable solution in the long term, in the fulfillment of security evaluations.

A comparative analysis according to criteria based on cost consideration, the time and mode of execution, and its degree of intrusion, emphasizing environmental and of heritage preservation.

Finally, the main conclusions are registered that intend to help in the definition of ways of acting in the structural rehabilitation of roofs in old trusses, as a contribution to the process of development and reliability of an alternative market to new construction. New topics on the scope of this dissertation are identified, leaving an open door for future and promising development.

Keywords: Rehabilitation of buildings; Timber roofs; Inspection and diagnosis; Eurocode 5; comparative analysis; AutodeskTM Robot Structural Analysis[®] modelling

Índice de Figuras

2.1	Representação das variantes de tipos de asnas de coberturas na cidade do Porto, adaptado de (Teixeira, 2004)	6
2.2	Coberturas de madeira características dos edifícios da cidade do Porto, adaptado de (Dias, 2008)	7
2.3	Metodologia de Restauro de Edifícios Históricos adaptado de (Faria, 2002)	8
2.4	Descrição geral dos danos, adaptado de (Padrão, 2004)	10
2.5	Esquemas de ligações em peças de madeira, adaptado de (Freitas, 2012)	13
3.1	Localização do imóvel, adaptado de NCREP (2020)	15
3.2	Vista interior do 1º piso para a fachada principal em alvenaria de pedra.	18
3.3	Esquerda: Vigamento de madeira do pavimento de Piso 1 (adaptado de (PORTO VIVO SRU, 2020)) Direita: Vigamento de madeira do Piso 2 (adaptado de (PORTO VIVO SRU, 2020))	18
3.4	Configuração geométrica de uma asna Pequena sem pendural adaptado de (Bastos, 2011)	19
3.5	Esquerda: Estrutura da cobertura em madeira maciça espécie Castanho, (adaptado de (PORTO VIVO SRU, 2020)). Direita: Asnas pequenas com linha baixa e linha cima da cobertura do edifício caso de estudo	19
4.1	: Resultados gráficos da variação de resistência à perfuração com auxílio do Resistograph, em viga de pavimento do piso 1 do edifício, bem como resultados do ensaio de Resistograph em Perna de Asna de Cobertura, adaptado de NCREP (2020)	27
4.2	Resultados gráficos da variação de resistência à perfuração com auxílio do Resistograph, em linha de asna de cobertura do edifício em estudo, adaptado de NCREP (2020)	27
4.3	Representação dos valores iniciais (A) e finais (B) do intervalo estável do funcionamento do Resistograph, adaptado de Júnior (2006)	28
4.4	Representação gráfica dos valores iniciais (J) e finais (K) do intervalo considerado para os valores médios de resistência, adaptado de Júnior (2006)	29
5.1	: Pressão exercida em superfícies de um edifício, adaptado de CT 115 (LNEC) (2010)	38
5.2	Pressão exterior sobre as zonas das paredes verticais com a ação do vento a incidir na direção ortogonal 0°, adaptado de CT 115 (LNEC) (2010)	38
5.3	Pressão exterior com a ação do vento a incidir na direção ortogonal 90°, sobre as zonas das paredes verticais, adaptado de CT 115 (LNEC) (2010)	39
5.4	Zonas a ter em conta em cobertura de quatro vertentes, quer em direção vento $\theta = 0^\circ$ quer em direção vento $\theta = 90^\circ$, adaptado de CT 115 (LNEC) (2010)	40
5.5	Componentes de deformação em elementos de madeira, adaptado de (CEN, 2008)	44
6.1	Geometria de apoio adaptado de (Correia, 2009)	50
6.2	Carregamentos aplicados na direção perpendicular à direção dos elementos de madeira, (a)- apoios contínuos, (b) – apoios discretos, figura adaptada de (CEN, 2008).	57

6.3	Condições de suporte para forças concentradas F, que pode vir a ser desprezado no cálculo do esforço transversal adaptado de (CEN, 2008)	58
6.4	Tensões atuantes de compressão resultantes de esforços que incidem sobre um ângulo em relação à direção do fio do elemento de madeira, α , adaptado de (CEN, 2008)	59
6.5	Bambeamento de uma viga sujeita a Momento Flector em torno do eixo principal, adaptado de Correia (2009)	61
6.6	Configuração geométrica da ligação Perna-Linha, adaptado de Bastos (2011) . . .	63
7.1	Representação gráfica das várias seções transversais distinguidas por cores através do <i>software Autodesk® Robot Structural Analysis Professional 2021TM</i> . . .	67
7.2	Representação geométrica do modelo estrutural da cobertura – CASO 0 criado no <i>software Autodesk® Robot Structural Analysis Professional 2021TM</i>	67
7.3	Representação de cargas submetidas no modelo caso 0 segundo a combinação 1 dos ELU	68
7.4	Representação gráfica da Asna 1 por diferentes elementos e seções transversais	71
7.5	Representação gráfica da Asna 2 por diferentes elementos e seções transversais	72
7.6	Deformação nas Asnas devido à combinação 3 dos SLS	73
7.7	Representação gráfica das várias seções transversais distinguidas por cores através do <i>software Autodesk® Robot Structural Analysis Professional 2021TM</i> , com destaque das diferenças de condições de apoio.	75
7.8	Representação gráfica do sistema de duas asnas em madeira do modelo caso 1 .	76
7.9	Representação gráfica geral do modelo estrutural Caso 2, através do <i>software Autodesk® Robot Structural Analysis Professional 2021TM</i>	82
7.10	Representação gráfica do modelo caso 2, das várias seções transversais distinguidas por cores através do <i>software Autodesk® Robot Structural Analysis Professional 2021TM</i>	82
7.11	Representação gráfica do sistema de duas asnas em madeira do modelo caso 2 .	83
7.12	Verificação de segurança para ELU em Asna 1 e Asna 2 - modelo Caso 2	83
7.13	Verificação de segurança para ambas as asnas em relação aos estados limites de utilização – Caso 2	87
7.14	Representação gráfica do modelo caso 3, das várias seções transversais distinguidas por cores através do <i>software Autodesk® Robot Structural Analysis Professional 2021TM</i>	88
7.15	Verificação de segurança das Asnas e da estrutura global aos ELU, Caso 3	90
7.16	Resultados da análise de verificação de segurança aos estados limites de utilização, modelo estrutural Caso 3	91
7.17	Representação gráfica do modelo 4 com as várias seções transversais distinguidas por cores através do <i>software Autodesk® Robot Structural Analysis Professional 2021TM</i>	93
7.18	Esquema conceptual dos produtos Steico, adaptado de (Steico Natural building products)	94
7.19	Resultados do <i>Autodesk® Robot Structural Analysis Professional 2021TM</i> para o modelo Caso 4	95

7.20	Verificação de segurança aos ELU para os elementos da Asna 1 e 2 do modelo Caso 4	96
7.21	Representação do coeficiente de segurança em todas as barras, bem como a representação de encurvadura do modelo Caso 4, construído através do <i>software Autodesk® Robot Structural Analysis Professional 2021TM</i>	105
7.22	Ligação entalhada entre a perna e a linha das asnas, adaptado de Almeida (2012)	106
7.23	Representação geométrica e numéricas dos nós e elementos barra do modelo Caso 4, retirado do <i>software Autodesk® Robot Structural Analysis Professional 2021TM</i>	107
7.24	Ligação entalhada com dente simples aplicado na parte anterior da linha, adaptado de (Almeida, 2012)	108
A.1	Planta de Intervenção estrutural em cobertura, proposta pela equipa NCREP, Caso 2 de modelação estrutural	123
A.2	Corte estrutural sobre o sistema de asnas, Modelo Caso 2 de modelação estrutural, fornecido pela equipa NCREP	124
B.1	Esquerda: Mapeamento de danos Piso 2, fornecido por NCREP (2020). Direita: Mapeamento de danos em cobertura, fornecido pela equipa NCREP(2020)	125
B.2	Legenda de Danos Estruturais, fornecido por NCREP (2020)	126
C.1	Fotografia da rua Sá Noronha, dando destaque à fachada do edifício em estudo, fornecida por NCREP (2020)	127
C.2	Fotografia de fachada em fase de demolições, fornecido por NCREP(2020)	127
D.1	Diagrama do Esforço Axial da combinação 1 do Caso 0 dos modelos estruturais, construído através do <i>software Autodesk® Robot Structural Analysis Professional 2021TM</i>	128
D.2	Diagrama do Esforço Transverso, F_y para Combinação 1 do Caso 0 dos modelos estruturais, construído através do <i>software Autodesk® Robot Structural Analysis Professional 2021TM</i>	128
D.3	Diagrama do Esforço Transverso, F_z , para Combinação 1 do Caso 0 dos modelos estruturais, construído através do <i>software Autodesk® Robot Structural Analysis Professional 2021TM</i>	129
D.4	Diagrama do Momento Fletor, M_y , para Combinação 1 do Caso 0 dos modelos estruturais, construído através do <i>software Autodesk® Robot Structural Analysis Professional 2021TM</i>	129
D.5	Diagrama do Momento Fletor, M_z , para Combinação 1 do Caso 0 dos modelos estruturais, construído através do <i>software Autodesk® Robot Structural Analysis Professional 2021TM</i>	129
D.6	Diagrama do Esforço Axial da combinação 1 do Caso 1 dos modelos estruturais, construído através do <i>software Autodesk® Robot Structural Analysis Professional 2021TM</i>	130
D.7	Diagrama do Esforço Transverso, F_y para Combinação 1 do Caso 1 dos modelos estruturais, construído através do <i>software Autodesk® Robot Structural Analysis Professional 2021TM</i>	130

D.8 Diagrama do Esforço Transverso, F_z para Combinação 1 do Caso 1 dos modelos estruturais, construído através do software Autodesk® Robot Structural Analysis Professional 2021 TM	130
D.9 Diagrama de Momento Fletor, M_y para Combinação 1 do Caso 1 dos modelos estruturais, construído através do software Autodesk® Robot Structural Analysis Professional 2021 TM	131
D.10 Diagrama de Momento Fletor, M_z para Combinação 1 do Caso 1 dos modelos estruturais, construído através do software Autodesk® Robot Structural Analysis Professional 2021 TM	131
D.11 Diagrama do Esforço Axial da combinação 3 do Caso 2 dos modelos estruturais, construído através do software Autodesk® Robot Structural Analysis Professional 2021 TM	131
D.12 Diagrama do Esforço Transverso, F_y para Combinação 3 do Caso 2 dos modelos estruturais, construído através do software Autodesk® Robot Structural Analysis Professional 2021 TM	132
D.13 Diagrama do Esforço Transverso, F_z para Combinação 3 do Caso 2 dos modelos estruturais, construído através do software Autodesk® Robot Structural Analysis Professional 2021 TM	132
D.14 Diagrama de Momento Fletor, M_y para Combinação 3 do Caso 2 dos modelos estruturais, construído através do software Autodesk® Robot Structural Analysis Professional 2021 TM	133
D.15 Diagrama de Momento Fletor, M_z para Combinação 3 do Caso 2 dos modelos estruturais, construído através do software Autodesk® Robot Structural Analysis Professional 2021 TM	133
D.16 Diagrama do Esforço Axial da combinação 1 do Caso 3 dos modelos estruturais, construído através do software Autodesk® Robot Structural Analysis Professional 2021 TM	133
D.17 Diagrama do Esforço Transverso, F_y para Combinação 1 do Caso 3 dos modelos estruturais, construído através do software Autodesk® Robot Structural Analysis Professional 2021 TM	134
D.18 Diagrama do Esforço Transverso, F_z para Combinação 1 do Caso 3 dos modelos estruturais, construído através do software Autodesk® Robot Structural Analysis Professional 2021 TM	134
D.19 Diagrama de Momento Fletor, M_y para Combinação 1 do Caso 3 dos modelos estruturais, construído através do software Autodesk® Robot Structural Analysis Professional 2021 TM	134
D.20 Diagrama de Momento Fletor, M_z para Combinação 1 do Caso 3 dos modelos estruturais, construído através do software Autodesk® Robot Structural Analysis Professional 2021 TM	135
D.21 Diagrama de Esforço Axial da combinação 3 do Caso 4, no Autodesk® Robot Structural Analysis Professional 2021 TM	135
D.22 Diagrama do Esforço Transverso, F_y para Combinação 3 do Caso 4 dos modelos estruturais, construído através do software Autodesk® Robot Structural Analysis Professional 2021 TM	135

D.23 Diagrama do Esforço Transverso, F_z , para Combinação 3 do Caso 4 dos modelos estruturais, construído através do <i>software Autodesk® Robot Structural Analysis Professional 2021TM</i>	136
D.24 Diagrama do Momento Fletor, M_y , para Combinação 3 do Caso 4 dos modelos estruturais, construído através do <i>software Autodesk® Robot Structural Analysis Professional 2021TM</i>	136
D.25 Diagrama do Momento Fletor, M_z , para Combinação 3 do Caso 4 dos modelos estruturais, construído através do <i>software Autodesk® Robot Structural Analysis Professional 2021</i>	136

Índice de Tabelas

3.1	Descrição de áreas do Rés-do-chão	16
3.2	Descrição de áreas do 1º Andar	16
3.3	Descrição de áreas em 3º Andar: Habitação T0 e circulação comum	16
3.4	Descrição de áreas do 2º Andar - Habitação T0 e circulação comum	16
4.1	Técnicas de ação mecânica, adaptado de Pavão (2016)	22
4.2	Problemas frequentes de estabilidade em estruturas de cobertura em madeira adaptado de (Lopes, 2007)	25
5.1	Valores para os coeficientes ψ para edifícios adaptado de ((LNEC), 2009)	33
5.2	Valores de cálculo de ações adaptado de ((LNEC), 2009)	34
5.3	Categorias de terreno e respetivos parâmetros adaptado de (CT 115 (LNEC), 2010)	36
5.4	Valores dos coeficientes de pressão exterior para as paredes verticais deste edifício em estudo adaptado do Quadro 7.1 de CT 115 (LNEC) (2010)	39
5.5	Valores recomendados dos coeficientes de pressão exterior para paredes verticais deste edifício com a direção ortogonal 90°, adaptado de (CT 115 (LNEC), 2010) .	39
5.6	Coeficientes de pressão exterior para coberturas de quatro vertentes	40
5.7	Valores dos coeficientes de pressão interior, c_{pi} , para cobertura de quatro vertentes adaptado de (CT 115 (LNEC), 2010)	42
5.8	Valores de coeficientes de pressão para combinação 1 e 2, em cobertura de quatro vertentes, nas direções indicadas.	42
5.9	Valores de pressão exercida pelo vento nas diferentes zonas, segundo a direção $\theta = 0^\circ$	42
5.10	Valor de pressão exercida pelo vento nas diferentes zonas, segundo a direção do vento $\theta = 90^\circ$	42
5.11	Valores de cálculo das ações a utilizar em combinação de ações dos estados limites de utilização	44
5.12	Valores de k_{def} , adaptado de EC5, (CEN, 2008).	45
5.13	Valores limites para a deformação das vigas adaptado de (CEN, 2008)	45
5.14	Fatores de segurança para as propriedades dos materiais, retirado de (CEN, 2008)	46
5.15	Valores de k_{mod} adaptado de EC5	46
5.16	Quadro de valores para k_h adaptado de (Dias, 2012)	46
5.17	Classe de Duração de Ações, adaptado de (Dias et al, 2009)	47
5.18	Classes de serviço de acordo com EC5 para as estruturas de madeira, adaptado de (Dias et al., 2009)	47
5.19	Características mecânicas da espécie folhosa Castanho segundo a UNI 11035-2: 2003	48
6.1	Cargas uniformemente distribuídas em vãos entre apoios para a Placas OSB adaptado de Catálogo fornecido por https://www.jular.pt	52
6.2	Propriedades mecânicas da Placa OSB escolhida adaptado de catálogo consultado em https://www.jular.pt	52
6.3	Sobrecargas em cobertura da Categoria H adaptado de EC0	53

6.4	Coeficiente efetivos de encurvadura para vigas em bambeamento adaptado de (CEN, 2008)	62
7.1	Descrição dimensões das seções dos elementos do sistema de asnas para o Caso 0 do caso de estudo	66
7.2	Tabela de cargas do modelo estrutural do Caso 0, com recurso ao software <i>Autodesk® Robot Structural Analysis Professional 2021™</i>	68
7.3	Tabela de combinações de cargas do modelo estrutural do Caso 0, com recurso ao software <i>Autodesk® Robot Structural Analysis Professional 2021™</i>	68
7.4	Tabela com os valores do coeficiente k_n	69
7.5	Valores de cálculo da resistência à tração paralela ao fio dos elementos das Asnas 1 e 2, em madeira maciça, para as diferentes combinações de ações	70
7.6	Valores de cálculo da resistência à compressão paralela ao fio dos elementos das Asnas 1 e 2, em madeira maciça, para as diferentes combinações de ações	70
7.7	Valores de cálculo da resistência à compressão perpendicular ao fio dos elementos das Asnas 1 e 2, em madeira maciça, para as diferentes combinações de ações	70
7.8	Valores de cálculo da resistência ao corte dos elementos das Asnas 1 e 2, em madeira maciça, para as diferentes combinação de ações	70
7.9	Parâmetros para a verificação à encurvadura para o elemento Perna Direita Asna 1	71
7.10	Descrição das dimensões das seções dos elementos do sistema de asnas para o Caso 1	75
7.11	Tabela de cargas do modelo estrutural do Caso 1, com recurso ao software <i>Autodesk® Robot Structural Analysis Professional 2021™</i>	75
7.12	Cálculos de parâmetros para a verificação de segurança em relação à encurvadura para o elemento 5 – Perna Direita da Asna 1	77
7.13	Equações de verificação de segurança de acordo com EC5 para o elemento 5, Perna Direita da Asna 1	78
7.14	Equação de verificação de segurança em relação à flexão composta com esforço de compressão para o elemento 6, Perna Esquerda da Asna 2	79
7.15	Resultados das deformações instantâneas, finais e líquidas na Asna 1	80
7.16	Descrição das dimensões das seções dos elementos do sistema de asnas para o Caso 2	81
7.17	Tabela de cargas do modelo estrutural do Caso 2, com recurso ao software <i>Autodesk® Robot Structural Analysis Professional 2021™</i>	82
7.18	Cálculos de parâmetros para a verificação de segurança em relação à encurvadura para a Perna VM2 da Asna 2	85
7.19	Equações de verificação de segurança de acordo com EC5 para Perna VM2 da Asna 2	85
7.20	Cálculos de parâmetros para a verificação de segurança em relação à encurvadura para a Perna VM2 da Asna 1	86
7.21	Descrição das dimensões das seções dos elementos do sistema de asnas para o Caso 3	88
7.22	Tabela de cargas do modelo estrutural do Caso 3, com recurso ao software <i>Autodesk® Robot Structural Analysis Professional 2021™</i>	89

7.23	Equações de verificação de segurança de acordo com EC5 para o elemento 5, Perna Direita da Asna 1	90
7.24	Cálculos de parâmetros para a verificação de segurança em relação à encurvadura para o elemento 5 – Perna Direita da Asna 1	91
7.25	Nova Asna 3, introduzida entre as Asnas 1 e 2, com as mesmas seções transversais	93
7.26	Tabela de cargas do modelo estrutural do Caso 4, no <i>Autodesk® Robot Structural Analysis Professional 2021TM</i>	94
7.27	Mudança de altura de seção para os elementos Pernas das Asnas 1 e 2	96
7.28	Parâmetros de instabilidade em relação à encurvadura para o elemento Linha baixa Asna 1	97
7.29	Verificação de segurança à encurvadura para a Perna Direita – Elemento 4 da Asna1	99
7.30	Equações de verificação de segurança de acordo com EC5 para Perna Esquerda da Asna 1	99
7.31	Parâmetros adicionais para o efeito de bambeamento para a Perna Direita Elemento 5	100
7.32	Equações de verificação de segurança de acordo com EC5 para Perna Direita Asna 1 – Elemento 5	101
7.33	Parâmetros adicionais para o efeito de bambeamento para a Perna Esquerda Elemento 6	101
7.34	Equações de verificação de segurança de acordo com EC5 para Perna Esquerda Asna 2– Elemento 6	102
7.35	Equações de verificação de segurança de acordo com EC5 para Perna Direita Asna2	103
7.36	Parâmetros de instabilidade em relação à encurvadura para o elemento Linha baixa Asna 1	104
7.37	Parâmetros de instabilidade em relação à encurvadura para o elemento Linha baixa Asna 1	104
7.38	Resultado das Forças e Momentos resultantes do modelo Caso 4, construído pelo software <i>Autodesk® Robot Structural Analysis Professional 2021TM</i>	108
8.1	Comparação de soluções de acordo com o critério equilíbrio com a restante estrutura	112
8.2	Comparação de soluções de acordo com o critério ligação às paredes	113
8.3	Comparação de soluções de acordo com o critério Custo	114
8.4	Comparação de soluções de acordo com o critério Tempo e Modo de Execução .	115
8.5	Comparação de soluções de acordo com o critério Reversibilidade e Sustentabilidade	116

Índice

Índice de Figuras	v
Índice de Tabelas	x
1 Introdução	1
1.1 Motivação e Objectivos	1
1.2 Organização da dissertação	2
2 Revisão bibliográfica: intervenção em estruturas existentes	3
2.1 Enquadramento geral	3
2.2 Breve caracterização do parque edificado da cidade do Porto	5
2.3 Principais anomalias e abordagens a técnicas de reabilitação	7
2.3.1 Introdução	7
2.3.2 Anomalias estruturais	9
2.3.2.1 Anomalias em coberturas de madeira	9
2.3.3 Levantamento geométrico e reconhecimentos	10
2.3.4 Técnicas de intervenção	11
2.3.4.1 Reforço em coberturas	14
3 Levantamento do Caso de Estudo	15
3.1 Identificação do imóvel	15
3.2 Levantamento arquitetónico	15
3.3 Levantamento estrutural	17
3.3.1 Estrutura resistente vertical	17
3.3.2 Estrutura resistente horizontal	18
3.3.3 Cobertura	19
4 Inspeção e Diagnóstico	20
4.1 Introdução	20
4.2 Técnicas de diagnóstico estrutural	20
4.3 Identificação das anomalias	24
5 Projeto de Intervenção na Cobertura	31
5.1 Análise estrutural	31
5.2 Estados Limites Últimos	32
5.2.1 Ações variáveis: Sobrecarga	33
5.2.2 Ações variáveis: Vento	34
5.3 Estados Limites de Utilização	42
5.3.1 Combinação característica	43
5.3.2 Combinação frequente	43
5.3.3 Combinação quase permanente	43
5.4 Propriedades resistentes dos materiais	45
5.5 Classes de serviço e durações de ações	47
5.6 Classes de Qualidade	48

6	Verificação de segurança segundo o Eurocódigo 5	49
6.1	Quantificação de ações	50
6.1.1	Ações permanentes	50
6.1.2	Cargas variáveis	53
6.1.3	Ação do vento	53
6.2	Combinação de ações	53
6.2.1	Estados Limites Últimos	53
6.2.2	Estados Limites de Utilização	54
	6.2.2.1 Combinação característica (para estados irreversíveis):	54
	6.2.2.2 Combinação frequente (estados limites reversíveis)	54
6.3	Flexão desviada	55
6.4	Tração na direção paralela às fibras da madeira	55
6.5	Tração na direção perpendicular às fibras da madeira	56
6.6	Compressão na direção paralela às fibras da madeira	56
6.7	Compressão na direção perpendicular às fibras da madeira	56
6.8	Corte	57
6.9	Torção	58
6.10	Esforços combinados	58
	6.10.1 Compressão a um ângulo com o fio do elemento em madeira	59
	6.10.2 Flexão composta com esforço de tração	59
	6.10.3 Flexão composta com esforço de compressão	60
6.11	Encurvadura	60
6.12	Instabilidade por flexão-torção ou bambeamento	61
6.13	Verificação de segurança nas ligações das asnas	63
6.14	Cálculo estrutural	64
	6.14.1 Tensão de flexão	64
	6.14.2 Flexão composta desviada	65
	6.14.3 Tensão tangencial de corte	65
7	Modelação da cobertura em sistema de asnas de madeira	66
7.1	Modelo estrutural – Caso 0	66
7.1.1	Geometria do modelo e parâmetros de seção	66
7.1.2	Cargas	67
7.1.3	Esforços	68
	7.1.3.1 Combinação 1: ULS– AVB: Vento 0°:	68
7.1.4	Verificações de Segurança	69
	7.1.4.1 Verificação de segurança Asna 1	70
	7.1.4.2 Verificação de segurança Asna 2	71
	7.1.4.3 Verificação em relação aos estados limites de utilização	72
7.2	Modelo estrutural- Caso 1	74
7.2.1	Geometria do modelo e parâmetros de seção	74
7.2.2	Cargas	75
7.2.3	Esforços	76
7.2.4	Verificações de Segurança	77
	7.2.4.1 Verificação de segurança Asna 1:	77

7.2.4.2	Verificação de segurança Asna 2:	78
7.2.5	Verificação em relação aos estados limites de utilização	79
7.3	Modelo estrutural- Caso 2:	81
7.3.1	Geometria do modelo e parâmetros de seção	81
7.3.2	Cargas	82
7.3.3	Esforços	82
7.3.4	Verificações de Segurança	83
7.3.4.1	Verificação de segurança Asna 2:	84
7.3.4.2	Verificação de segurança Asna 1:	85
7.3.4.3	Verificação em relação aos estados limites de utilização	87
7.4	Modelo estrutural- Caso 3:	88
7.4.1	Geometria do modelo e parâmetros de seção	88
7.4.2	Cargas	88
7.4.3	Esforços	89
7.4.4	Verificações de Segurança	89
7.4.4.1	Verificação de segurança Asna 1:	89
7.4.4.2	Verificação de segurança Asna 2	90
7.4.4.3	Verificação em relação aos estados limites de utilização	91
7.5	Modelo estrutural - Caso 4	92
7.5.1	Geometria do modelo e parâmetros de seção	93
7.5.2	Cargas	93
7.5.3	Esforços	95
7.5.4	Verificações de Segurança	95
7.5.5	Ligação Perna- Linha	105
8	Análise Comparativa	111
8.1	Introdução	111
8.2	Compatibilidade com a Restante Estrutura	112
8.3	Ligações às Paredes	112
8.4	Custo	113
8.5	Tempo e Modo de Execução	114
8.6	Reversibilidade e Sustentabilidade	115
9	Conclusões e Desenvolvimentos Futuros	117
9.1	Conclusões	117
9.2	Desenvolvimentos futuros	118
	Referências	119
	Anexos	122
A	Peças Desenhadas	123
B	Mapeamento de Danos Estruturais em Cobertura	125
C	Fotografias	127
D	Diagramas de esforços	128

1 Introdução

1.1 Motivação e Objectivos

Até há uma dúzia de anos atrás a construção nova dominava em Portugal. Mas nos últimos anos, as intervenções de reabilitação estão em ascensão, e têm vindo a ocupar um espaço significativo. Tem-se tornado evidente a importância da conservação do edificado existente, mais precisamente nos centros urbanos, onde a densidade de construção é enorme, não havendo espaço para construção nova, sem destruir a existente. Associado a este facto existe o fator económico da reabilitação ser atrativa, bem como o fator sociocultural da manutenção do património e herança histórica do edificado.

Esta consciencialização eminente da reabilitação dos centros urbanos, assenta na revitalização dos imóveis existentes e consequentemente na melhoria qualidade de vida dos cidadãos moradores destes mesmos centros urbanos das cidades. Estes centros ricos em história de arquitetura e engenharia estrutural, com metodologias e elementos estruturais tradicionais cimentados na sustentabilidade e reduzido impacto ambiental, têm sido palco de atração turística que se reflete num mercado da reabilitação catalisador e impulsionador.

A necessidade de ajustamento da legislação em vigor ao mercado da reabilitação urbana tornou-se pronunciada fazendo emergir o decreto-lei nº 95/2019, de 18 de julho, que dinamiza este mercado, e simultaneamente revoga os anteriores regulamentos estruturais e os substitui pelos Eurocódigos Estruturais. Ainda que este decreto-lei seja de âmbito alargado, tende a uma melhor adequação às exigências dos padrões de segurança, habitabilidade, sustentabilidade ambiental e de proteção de património edificado.

A principal dificuldade no mercado da reabilitação de edifícios existentes revela-se na escassez do conhecimento organizado e de um “know-how” sustentado na abordagem científica e menos frequente no conhecimento empírico. Tem-se desenvolvido um conjunto de estudos, teses de doutoramento e dissertações de mestrado sobre análises e mapeamentos de anomalias e consequentemente desenvolvimento de técnicas de intervenção estrutural, que a um ritmo lento de crescimento tem chegado ao seu público-alvo, que são os construtores, projetistas, autoridades locais e proprietários.

O presente trabalho tem como objetivo analisar cinco casos de modelação estrutural através do software Robot Structural Analysis® da cobertura de um edifício de alvenaria na baixa da cidade do Porto, e avaliar a sua segurança de acordo com o Eurocódigo 5. Após isso parte-se para uma análise comparativa, com critérios plausíveis para a reabilitação, das soluções que verifiquem a sua segurança para a intervenção da cobertura. O dono de obra do edifício em estudo, empresa local de natureza municipal, com a designação Porto-Vivo - Sociedade de Reabilitação Urbana, forneceu a informação necessária para o levantamento arquitetónico e estrutural, nomeadamente o projeto de estabilidade já desenvolvido pelo NCREP, empresa de consultoria em projetos de reabilitação de património, que serviu como ponto de partida para o presente trabalho.

1.2 Organização da dissertação

A presente dissertação organiza-se por nove distintos capítulos.

O primeiro capítulo apresenta o tema, a motivação para esta escolha, os objetivos que se pretende atingir, e esta organização da dissertação.

O segundo capítulo tem como função contextualizar e apresentar uma súpula da bibliografia técnica, científica e legal existente, que sustentará o caso de estudo. Subdivide-se na exposição de princípios de conservação de património, numa breve caracterização do parque edificado existente, nomeadamente do centro histórico urbano do Porto, e também na apresentação de abordagens aos mapeamentos de patologias estruturais bem como técnicas de reabilitação.

O terceiro capítulo dedica-se ao levantamento do caso de estudo, incluindo toda a informação existente do projeto até à data da escrita da dissertação.

O quarto capítulo retrata o processo de inspeção e o diagnóstico normalmente utilizado, e particularmente do caso de estudo, identificando as anomalias e patologias do edifício.

O quinto capítulo apresenta o projeto de intervenção na cobertura, com uma introdução à análise estrutural, seguido da descrição dos estados limites últimos e de utilização bem como as propriedades resistentes dos materiais e por fim, as classes de serviço e de qualidade.

O sexto capítulo apresenta o procedimento para a verificação de segurança de acordo com os Eurocódigos dos vários casos de análise estrutural de intervenção na cobertura do edifício, com a quantificação de ações, as combinações de ações e a verificação da segurança dos elementos da cobertura.

O sétimo capítulo apresenta os cálculos relativos aos cinco casos de modelos estruturais e as suas verificações de segurança, com reflexão nas principais conclusões retiradas.

O oitavo capítulo faz uma análise comparativa relativamente aos critérios definidos, entre os casos de modelos estruturais estudados que verificam a segurança.

O nono e último capítulo reúne as principais conclusões e apresenta ideias para desenvolvimentos futuros.

2 Revisão bibliográfica: intervenção em estruturas existentes

2.1 Enquadramento geral

Como anteriormente foi mencionado de forma introdutória ao tema de dissertação, a reabilitação urbana tem na atualidade um papel chave na evolução sociocultural dos centros urbanos, uma vez que neles há necessidade de revitalizar o parque edificado devoluto e garantir uma habitação condigna para os seus habitantes. A conservação do património torna-se assim uma prioridade indubitável para o crescimento económico sustentável.

A conservação e reabilitação do património apenas surge por volta do século XIX, no contexto do restauro de monumentos e edifícios históricos, com o pioneiro arquiteto francês Eugène Viollet-le-Duc, tendo trabalhado essencialmente em catedrais e castelos medievais, a sua filosofia de reabilitação baseava-se na destruição de acrescentos de épocas anteriores de modo a restituir cientificamente o original, a contrapor essa filosofia John Ruskin mencionava que isso era uma medida de *“destruição de vestígios históricos, acompanhada de uma falsa descrição desses vestígios”*, a discussão gerada por essas duas filosofias foi continuada por outros pensadores. Entretanto nos finais do século XIX e inícios de século XX, o arquiteto Camillo Boito defendia um nível intermédio das duas filosofias para as intervenções. (Almeida, 2009)

Na carta de Atenas recomendava-se *“o respeito pela obra histórica ou artística do passado sem proscriver o estilo de nenhuma época”*, e também *“emprego judicioso de todos os recursos da técnica moderna, especialmente do betão armado”*, estas indicações da carta refutam as ideias das filosofias de reabilitação descritas anteriormente. (Almeida, 2009)

Na carta de Veneza em 1964, define-se um espectro alargado do património, juntando-se aos monumentos históricos, o património urbano ou rural que tenham testemunhado uma civilização particular ou acontecimento histórico, ou seja, as obras modestas passavam a ser também contempladas uma vez que demonstrassem sentido cultural. Continuando esta carta a substanciar as diretrizes tomadas na Carta de Atenas, aconselhando técnicas modernas de restauro, quando as técnicas tradicionais se revelarem desajustadas, desde que a sua eficácia seja fundamentada cientificamente. (Almeida, 2009)

Destaca-se a Carta de Cracóvia em 2000, pelo amadurecimento do reconhecimento da importância da temática de conservação e restauro, da qual se extraiu a seguinte citação: *“A conservação do património construído é executada de acordo com o projeto de restauro, que se inscreve numa estratégia para a sua conservação a longo prazo. O ‘projeto de restauro’ deverá basear-se num conjunto de opções técnicas apropriadas e ser elaborado segundo um processo cognitivo que integra a recolha de informações e a compreensão do edifício ou do sítio. Este processo pode incluir o estudo dos materiais tradicionais, ou novos, o estudo estrutural, análises gráficas e dimensionais e a identificação dos significados histórico, artístico e sociocultural. No projeto de restauro devem participar todas as disciplinas pertinentes e a coordenação deve ser levada a cabo por uma pessoa qualificada na área da conservação e restauro.”* Esta citação justifica a importância da fase pluridisciplinar de inspeção e diagnóstico, apropriada a qualquer caso de

estudo. (Melucco, et al., 2000)

As recomendações redigidas pelo ICOMOS – Comité Científico Internacional para a Análise e Restauro de Estruturas do Património Arquitectónico, são também uma referência atual para a reabilitação do património, que emite o respeito pelo valor de cada construção, e o valor das metodologias e materiais associados, desta forma, desaprova os critérios de conservação associados à destruição na totalidade das estruturas internas dos edifícios, mantendo apenas as fachadas. Defende também, que não se deve agir sem primeiro analisar o benefício e prejuízo para o património em causa, uma vez a urgência da intervenção surja, deve-se evitar a transformação permanente, mesmo que redutora, dos elementos estruturais. E todas as medidas devem obedecer a todas as exigências de conservação e segurança. (ICOMOS, 2004)

No espectro português só a partir da década de 70 é que os esforços relativamente à reabilitação dos centros urbanos tiveram visibilidade, com o surgimento do Decreto-Lei n.º 8/73, de 8 de janeiro que diligencia que as Autarquias juntamente com o Fundo Fomento de Habitação (FFH) que promovam planos de transformação para áreas urbanas deterioradas. (Dias, 2012) Devido ao cambio ininterrupto de governos e instabilidade política resultou em consequências diretas na atualização ajustada de legislação para a reabilitação, porém com algum suporte financeiro para a reabilitação residencial. (Dias, 2012)

Em 1996, foram criados dois programas de regime de apoio à reabilitação de edifícios, o Regime de Apoio à Recuperação Habitacional em Áreas Urbanas (REHABITA) e o Regime Especial de Participação e Financiamento na Recuperação de Prédios Urbanos em Regime de Propriedade Horizontal (RECRIPH), com finalidade de remediar lacunas nas legislações antecedentes. (Dias, 2012)

No ano de 2008, surgiu o Programa de apoio à Reabilitação (ProReabilita) sobre alçada do Instituto de Habitação e Reabilitação Urbana (IHRU), este programa aglutina/substitui os programas já descritos e existentes até à data. Este mesmo Instituto de Habitação e Reabilitação Urbana implementou o Plano Estratégico de Habitação 2008/2013 que autoriza as autarquias locais fazerem parte da regulação do mercado de habitação, tendo a liberdade de penalizar a nível fiscal os proprietários de habitações e edifícios degradados. Pese embora, este programa não surtir o resultado pretendido, devido a fatores como baixos rendimentos por parte de inquilinos e descapitalização dos proprietários. (Dias, 2012)

As preocupações ambientais existentes no planeta, são hoje destacadas como nunca, o que vem justificar a necessidade de reabilitar e conservar o património edificado, dar prioridade à renovação do espaço existente, sendo que permite reduzir e reutilizar os consumos de energia comparativamente à construção nova de raiz, uma vez que tem como finalidade aumentar o período útil de vida dos edifícios existentes. (Dias, 2012)

As preocupações de inclusão social também fundamentam a promoção da reabilitação de bairros degradados, como objetivo de dinamizar atividades dentro da estrutura urbana, melhorar as condições de habitabilidade e preservar os valores sociais e culturais das comunidades locais. (Dias, 2012)

A coesão territorial revela-se também um fator fomentador do crescimento da reabilitação, pois permite a instalação de atividades económicas e reduz a saída dos habitantes dos centros urbanos para as zonas periféricas das cidades impulsionando assim o turismo. A coesão territorial con-

trola a expansão urbana, que automaticamente diminui o consumo de energia, matérias-primas e produção de resíduos. (Dias, 2012)

Tendo enumerado algumas vantagens da reabilitação do edificado habitacional, como em tudo, também existem desvantagens que não se devem descurar, e por isso ser necessário estudar as reabilitações caso a caso, estudar o seu estado de conservação, de valor patrimonial ou arquitetónico, condicionalismos técnicos, logísticos e económicos da intervenção e sustentabilidade ambiental atingida. (Dias, 2012)

Há dois pilares basilares para tomar o conhecimento das técnicas de construção tradicionais:

- Conhecer o objeto de intervenção antes de estudar e intervencionar;
- Conhecer as técnicas tradicionais, uma vez que esse mesmo será a base das soluções mais recomendáveis para as intervenções. (Appleton, 2011)

No próxima secção faz-se uma breve caracterização da cidade do Porto, de forma a identificar as principais anomalias construtivas deste tipo de edifícios. Esta caracterização ajudará a determinar as técnicas de intervenção mais apropriadas, sempre que possível reversíveis e adequadas ao diagnóstico realizado.

2.2 Breve caracterização do parque edificado da cidade do Porto

No caso particular da cidade do Porto, que será o foco deste caso de estudo, a utilização da madeira verificou-se com maior incidência até ao início do século XX, nomeadamente em coberturas e pavimentos de edifícios, e em alguns casos, a madeira chegou mesmo a formar na íntegra a estrutura dos edifícios, sendo também o material utilizado para as paredes resistentes. (Dias, 2008)

A zona antiga da cidade contém na sua maioria, as coberturas e os pavimentos em madeira, o que se revela uma problemática no que toca ao seu estado de conservação, com uma necessidade eminente de reabilitação na maioria do número de edifícios existentes, a que se aglutina os problemas sociais associados ao abandono populacional e das atividades de comércio e serviços. Com efeito, em relação à cidade do Porto e outras cidades portuguesas com o mesmo denominador de problemas em comum, é de extrema importância reunir esforços para definir soluções harmoniosas de sistemas e tipologias construtivos para a sua preservação histórica, com base numa análise cuidada executada por técnicos especializados e sensibilizados para questões históricas, patrimoniais e sociais. (Dias, 2008)

A cidade do Porto é marcada pela sua “desorganização visual” à primeira vista, no entanto com alguma atenção entende-se facilmente as semelhanças entre os edifícios, sendo a verticalidade, uma das características perceptíveis, com edifícios altos e esguios, geralmente constituídos por duas paredes de fachada e duas de empena, em alvenaria de pedra, e por pavimentos e coberturas em madeira. Este grupo de casas são casas típicas burguesas, com um comportamento estrutural muito dependente dos pavimentos. No entanto, ainda no Porto, temos a habitação que se desenvolve na horizontal, este segundo grupo são casas nobres, de construção mais isolada, normalmente com apenas dois pisos, e de fachadas espraçadas, distinguindo-se do primeiro

grupo de casas, pela sua robustez, com as paredes exteriores e interiores de alvenaria de pedra, salvo raras exceções em tabique. A nível de comportamento estrutural este segundo grupo é mais complexo, uma vez que tem de vencer vãos maiores, logo o sistema de vigeamento torna-se mais complexo. (Faria, 2016)

Especial incidência nas variantes dos tipos de asnas de coberturas de três ou quatro águas, ilustrado na Figura 2.1:

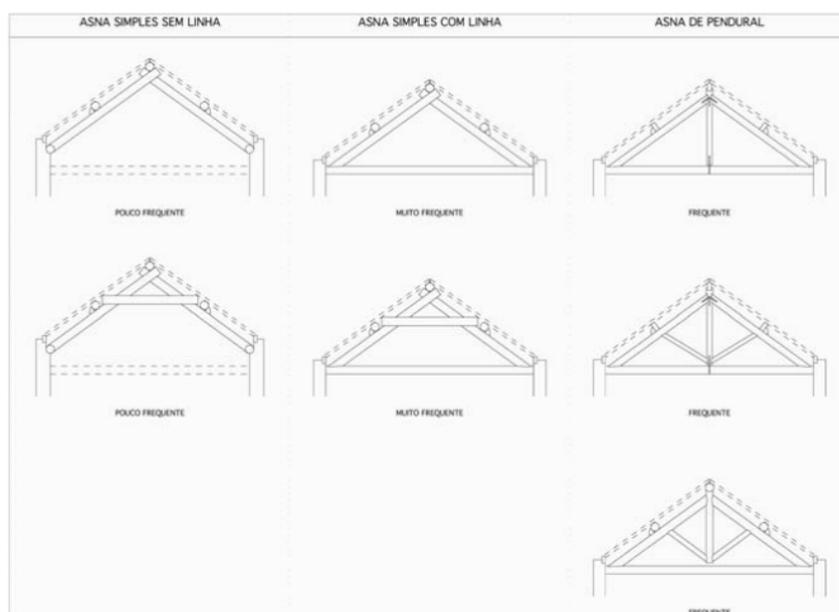


Figura 2.1: Representação das variantes de tipos de asnas de coberturas na cidade do Porto, adaptado de (Teixeira, 2004)

A asna tem como origem o Renascimento Italiano, estando identificada nos trabalhos de Andreas Palladio, é uma estrutura que permite economizar a madeira e vencer vãos de dimensões maiores, tem-se asnas afastadas de 70 cm, soluções com seções transversais mais esbeltas, onde assenta diretamente o forro, o ripado, as varas e as telhas, mas também existem com vãos superiores a 2 metros, onde sobre as asnas apoiam-se as madres, que servem de suporte ao forro, ao ripado, varas e telhas. As asnas tem sempre forma triangular, e as mais simples são constituídas apenas por duas pernas e uma linha, e outras com um pendural de acréscimo, e vencem vãos até 6 a 8 metros. (Lopes, 2007)

Quanto às coberturas, “(...) *salvas raríssimas exceções, até meados do século XIX, as casas do Porto têm telhados de quatro águas, o que significa que os oitões terminam horizontalmente, na mesma linha do beiral frontal. Nas casas mais estreitas, o telhado é tão baixo que não permite o aproveitamento do seu vão para sótão (...)*” (Oliveira, et al., 1992)

Como menciona Freitas (2012) e se pode ver na Figura 2.2, “(...) *As estruturas destes telhados de origem ancestral, tendo a sua forma rudimentar perdurado com soluções de asnas mais complexas, devido à simplicidade da sua construção e ao facto de permitir o aproveitamento do vão da cobertura que se encontra liberto de elementos estruturais. Esta estrutura é constituída por uma armação simples de duas barras ou pernas, dispostas em forma de tesoura e apoiadas numa viga transversal ou linha que, por sua vez, se apoia nas paredes de meação como travamento*

transversal outra barra de menor dimensão colocada a cerca de dois terços da altura, e apoiada nas pernas ou tesoura, por encaixe a meia madeira. (...)”. Os telhados do Porto apresentam claraboias de muitos formatos, sendo o mais comum o de claraboia circular ou elíptica. (Freitas, 2012)

A estrutura mais simples de cobertura é constituída por duas peças principais, as pernas, que permitem definir a inclinação, muito frequente em edifícios antigos, e outras peças com a mesma seção transversal que define os cumes junto às empenas, em coberturas de quatro águas. A estrutura de cobertura pode-se definir como a estrutura responsável pela transição entre as ripas onde assentam as telhas e as paredes resistentes ou vigas do edifício. (Lopes, 2007)

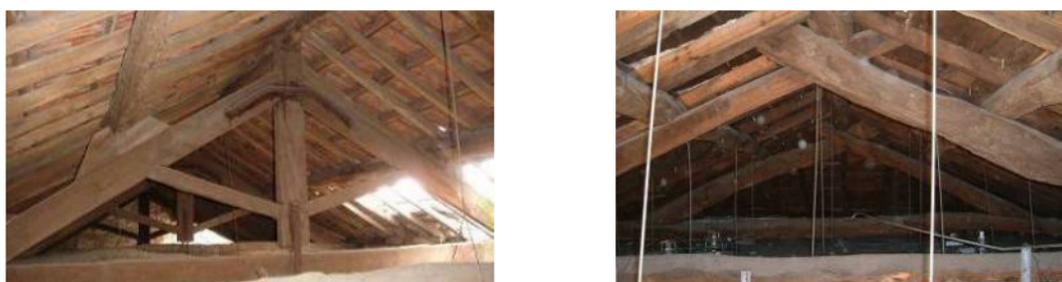


Figura 2.2: Coberturas de madeira características dos edifícios da cidade do Porto, adaptado de (Dias, 2008)

As asnas têm como função vencer vãos de até 12 metros, e são compostas por quatro ou mais escoras travadas por tirantes de ferro, que fazem a ligação das escoras com as pernas à linha. As asnas ostentam também a linha, as duas pernas e o pendural. As madres depois são colocadas sobre as pernas, quando estas se encontram com as escoras. (Andrade, 2014)

2.3 Principais anomalias e abordagens a técnicas de reabilitação

2.3.1 Introdução

Como ponto de partida para um projeto de reabilitação, a realização de um estudo diagnóstico torna-se fulcral, para averiguação das condições de conservação e segurança do edifício e da sua estrutura. Isso implica um bom levantamento arquitetónico e rigoroso levantamento estrutural. Este estudo pretende registar as principais características construtivas e estruturais, bem como um registo das principais patologias acompanhado das suas causas. (Appleton, 2011)

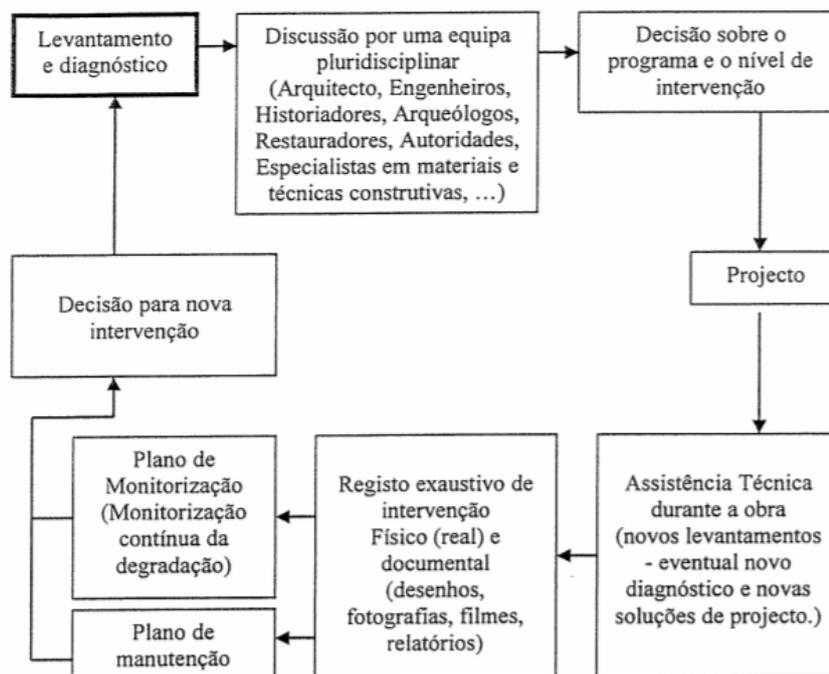


Figura 2.3: Metodologia de Restauro de Edifícios Históricos adaptado de (Faria, 2002)

Em “Reabilitação de Coberturas em Madeira em Edifícios Históricos” Faria (2002) pode-se ler “Os aspectos mais importantes a salientar neste processo são os seguintes:

- Necessidade de tomar decisões considerando a contribuição de todas as especialidades envolvidas;
- Ter em consideração, o custo da intervenção, o estado de conservação da estrutura, os materiais tradicionais e modernos disponíveis e todos os restantes critérios adiante referidos; a decisão deverá ser tomada num contexto multi-critério e com juízes múltiplos;
- Respeitar o programa e o nível de intervenção decididos de forma coerente; tratar o edifício na globalidade dentro de um determinado âmbito de intervenção;
- Assegurar o comportamento da obra pelos técnicos que elaboraram o projecto; entender como aceitável a necessidade de proceder a ajustamentos mais ou menos significativos das soluções projectadas como resultado da verificação e estudo das partes ocultas do edifício durante o levantamento inicial;
- Documentar, exhaustivamente a intervenção para permitir no futuro uma actuação compatível com as decisões tomadas em cada contexto;
- Preparar um plano de manutenção para a obra em fase de utilização;
- Preparar um plano de monitorização de degradação dos aspectos mais críticos do edifício (normalmente só aplicável a edifícios de grande significado histórico e/ou elevado valor patrimonial). “(Faria J. , 2002)

De acordo com ICOMOS (2004), “O diagnóstico é baseado em informação histórica e em abordagens qualitativas e quantitativas. A abordagem qualitativa é baseada na observação directa

dos danos estruturais e degradações dos materiais, como também na investigação histórica e arqueológica, enquanto que a abordagem quantitativa requer ensaios das estruturas e dos materiais, monitorização e análise estrutural. Antes de se tomar uma decisão sobre a intervenção estrutural, é indispensável determinar anteriormente as causas de danos e degradações e, em seguida, avaliar o nível de segurança actual da estrutura. ”

Ainda de acordo com ICOMOS (2004). “O conhecimento da estrutura requer informação sobre a sua concepção, sobre as técnicas utilizadas na sua construção, sobre os processos de degradação e dano, sobre alterações que a tenham afectado e, finalmente, sobre o seu estado actual. Este conhecimento pode ser atingido pelas seguintes etapas:

- definição, descrição e compreensão do significado histórico e cultural da construção;
- descrição dos materiais e das técnicas originais da construção;
- investigação histórica abrangendo a vida completa da estrutura, incluindo tanto as modificações da sua forma, como quaisquer intervenções estruturais anteriores;
- descrição da estrutura no seu estado actual incluindo a identificação de danos, degradações e possíveis fenómenos em curso, adoptando formas de ensaio apropriadas;
- descrição das acções envolvidas, do comportamento estrutural e dos tipos de materiais.”

2.3.2 Anomalias estruturais

Na fase de identificação de danos, pode-se dividir em quatro grandes grupos: danos físicos, danos mecânicos, danos químicos e danos biológicos, sendo ter com a respetiva origem em ações físicas, ações mecânicas, ações químicas e biológicas, tal como se representa na Figura 2.4: (Padrão, 2004)

Os danos estruturais, tratados nesta seção, comprometem o comportamento estrutural do edifício, pondo em causa a sua segurança.

2.3.2.1 Anomalias em coberturas de madeira

As anomalias em coberturas de edifícios antigos, têm maioritariamente origem na deficiência de projeto e execução, parco dimensionamento das seções das peças de madeira, que se refletem insuficientes, a escassez de informação sobre as características mecânicas e químicas do material. Devido ao facto da cobertura estar envolvente com a exposição qualquer agente atmosférico, quer chuva como sol, o vento, as variações de temperatura, acresce o facto de terem sido seleccionadas sem o cuidado da colocação de produtos protetores de agentes bióticos, como fungos e insetos como térmitas e caruncho. Tal como indicado nas anomalias dos pavimentos, também aqui a presença de água é a principal razão da origem de anomalias, nomeadamente, as infiltrações nas zonas correntes da cobertura, ou infiltrações devido ao sistema débil de rede de drenagem de águas pluviais. (Appleton, 2011)

Um caso específico de anomalias em coberturas de madeira, corresponde às coberturas em asnas de madeira, onde a degradação do material dá-se nos pontos de ligação, a ligação nos apoios entre os elementos de linha e das pernas das asnas de madeira. Quando se dá a rotura desta ligação entre estes elementos da linha e das pernas, a estrutura de cobertura é automaticamente

Danos	Tipo de dano	Primária	Secundária
Físicos	Humidade:		
	- De obra	S	
	- Capilar	S	
	- Por infiltração	S	
	- Por condensação	S	S
	- Acidental		S
	Erosão:		
	- Atmosférica	S	S
	Sujidade	S	
	Deformações:		
- Encurvadura	S	S	
- Abalamento	S	S	
- Deslocamento	S	S	
- Flechas	S		
Mecânicos	Fendas:		
	- Por carga	S	S
	- Por dilatação-contracção	S	S
	Fissuras:		
	- Por suporte	S	S
	- Por acabamento	S	S
	Desprendimentos	S	S
	Erosão:		
	- Mecânica	S	S
	Biológicos	Organismos:	
- Animais		S	
- Vegetais			S
Químicos	Eflorescências	S	S
	Oxidação e Corrosão:		
	- Oxidação	S	
	Corrosão:		
	- Por imersão		S
	- Por aeração diferencial	S	S
	- Por par galvânico	S	
	- Intergranular	S	
	Erosão:		
	- Química		S

Figura 2.4: Descrição geral dos danos, adaptado de (Padrão, 2004)

obrigada a redistribuir os esforços e transferir para as paredes os impulsos horizontais, devido ao seu peso próprio. (Appleton, 2011)

2.3.3 Levantamento geométrico e reconhecimentos

É comum não se encontrar o projeto dos edifícios existentes, seja porque nunca foram feitos, o que é pouco provável, ou porque se extraviaram parcial ou totalmente. Contudo, sempre que se pretende intervir num edifício existente, é indispensável a obtenção de um conjunto de informação sobre ele, para garantir rigor técnico e económico. (Appleton, 2011)

Assim, é necessário fazer o levantamento geométrico do edifício, para verificar o projeto existente, caso o haja, e para o desenvolvimento das peças desenhadas do projeto de reabilitação, tais como plantas, alçados e cortes gerais com cotas planimétricas e altimétricas. (Appleton, 2011)

A utilização de informação gráfica é a habitual em engenharia civil, facilitando a permuta de informação entre os múltiplos agentes envolvidos no processo de reabilitação. (Andrade, 2014)

Nas coberturas torna-se importante levantar as inclinações e deformações dos diferentes elementos constituintes e as suas ligações de apoio, bem como o seu estado de conservação. Mais uma vez, faz-se a esquematização das estruturas e, seguidamente, o levantamento das anomalias, que deve incluir o seu grau de relevância. (Appleton, 2011)

Segundo Júnior (2006), “A redução do intervalo de valores entre as técnicas tradicionais e os métodos modernos de inspeção não destrutiva permitirá fornecer dados mais razoáveis, e experimentalmente apoiados, aos projetistas e promotores, condição essencial para que se inverta esta tendência abusiva e inconsciente de diversos agentes da construção que, por incapacidade de análise das condições presentes, invariavelmente optam por substituições ou reforços desadequados de estruturas de madeira, descurando as suas reais potencialidades estruturais.”

2.3.4 Técnicas de intervenção

Existem dois grandes grupos de técnicas de reabilitação estrutural, as técnicas de reparação ou consolidação e as técnicas de reforço. As primeiras têm como objetivo final a recuperação das capacidades resistentes do sistema estrutural, enquanto as técnicas de reforço prendem-se com a finalidade de diminuir as deformações presentes e aumentar a capacidade de carga dos elementos estruturais. (Branco, 2014)

Segundo (Carneiro, 2012), existem algumas considerações a aplicar para uma boa prática de reabilitação de estruturas em madeira:

- Análise dos outros sistemas estruturais existentes, como fundações, paredes, tirantes em aço, em relação ao estado de conservação e de estabilidade;
- Evitar a desmontagem integral do sistema estrutural, pois como anteriormente mencionado, a montagem futura de elementos irá criar estados de tensões diferentes, pois serão ligações novas;
- Dar preferência por sistemas estruturais que aumentam a rigidez, e conjugá-los com coeficientes de segurança maiores que os presentes no sistema estrutural atual, uma vez que não existe certeza relativamente à capacidade de resistência da madeira que se encontra em serviço;
- Manutenção periódica tendo sob o controlo dos seguintes fatores: temperatura, humidade, taxa de renovação do ar, deformações e defeitos dos elementos estruturais e teor de humidade;
- Melhorar as condições de serviço com medidas como manter a renovação do ar, através de uma boa prática de ventilação dos espaços, limpar as superfícies periodicamente e eliminar as causas exteriores visíveis de deterioração;
- Facilitar o acesso de todas as estruturas com o objetivo de poderem ser examinadas do ponto de vista físico e visual;
- Na introdução de novos elementos de madeira, introduzi-los com a mesma classe estrutural dos já existentes;
- Assegurar uma ventilação adequada dos apoios, evitando assim o contato direto da madeira com outros materiais que possam reter humidade ou evitar que a madeira “respire”. (Carneiro, 2012)

Normalmente, a origem dos problemas encontrados estende-se em dois grandes grupos: danos de ordem biológica, com a redução de seção da peça de madeira e o segundo por incumprimento

das exigências normativas de verificação dos estados limites últimos e de utilização. (Lopes, 2007)

De forma sucinta, os tipos de intervenção admissíveis em reabilitação são os seguintes (Freitas, 2012):

- Limitação no uso: este tipo de solução pretende minimizar as ações na estrutura existente, preservando-a;
- Reparação ou substituição de elementos deteriorados, por exemplo, com a reparação de asnas de madeira ou de vigas nas zonas de entregas nas paredes, que se tenha verificado estarem danificadas;
- Inclusão de elementos estruturais complementares. Por exemplo, introdução de vigas transversais ou dupla viga para reforço de um pavimento danificado, ou, no caso de paredes, a introdução de elementos de ligação;
- Alteração de materiais estruturais. Como exemplo, a substituição de vigas de madeira por vigas metálicas, ou pavimentos de madeira por lajes de betão armado, tendo em conta depois a verificação de segurança com as novas condicionantes, nomeadamente o comportamento sísmico do edifício;
- Modificação do sistema estrutural. Para exemplificação deste tipo de intervenção, por exemplo, a introdução de caixa de elevadores, a mudança da posição da caixa de escadas;
- Demolição parcial da estrutura. Deve-se evitar este tipo de ação, contudo e após leitura do relatório de inspeção e diagnóstico estrutural, às vezes, esta é a única solução, que deve ser sempre acompanhada de registo fotográfico minucioso.

É de salvaguardar que não se considera reabilitação o denominado de “fachadismo”, ou seja, a demolição total do interior do edifício mantendo-se apenas a fachada ou elementos com maior visibilidade. (Freitas, 2012)

Para a reabilitação de estruturas de madeira deve-se ter em conta quatro situações distintas:

- Reparação e substituição pontual de elementos deteriorados através de técnicas antigas;
- Reparação e substituição pontual de elementos deteriorados através de técnicas antigas e materiais de ligação modernos;
- Substituição na íntegra da estrutura com madeiras antigas, materiais e técnicas modernas e desenhos arquitetónicos correspondentes com os existentes;
- Substituição na íntegra da estrutura tendo em conta materiais, técnicas e materiais de ligação modernos, como solução moderna completa. (Freitas, 2012)

As duas primeiras mencionadas são as principais soluções e as mais utilizadas, porém a segunda tem melhor desempenho. Os materiais utilizados na intervenção devem melhorar o comportamento estrutural comparativamente ao existente. (Freitas, 2012)

Dentro da reparação e substituição pontual com uso a técnicas antigas, parte-se do princípio que as peças de madeira se encontram de forma geral em boas condições, e as suas ligações são feitas através de samblagens e por ligadores tipo cavilha. Aquando da necessidade de substituição, deve-se substituir por peças de madeira com tempos de secagem adequados, e equilibradas em

termos dimensionais, para cumprir com as condições termohigrométricas actuais. Deve-se também garantir as condições de ventilação das estruturas de madeira e proteção contra os agentes bióticos, nomeadamente na zona dos frechais. (Freitas, 2012)

Na figura 2.5 adaptada do quadro 5.9 em (Freitas, 2012) pode-se ver o diferente tipo de ligações em peças de madeira.

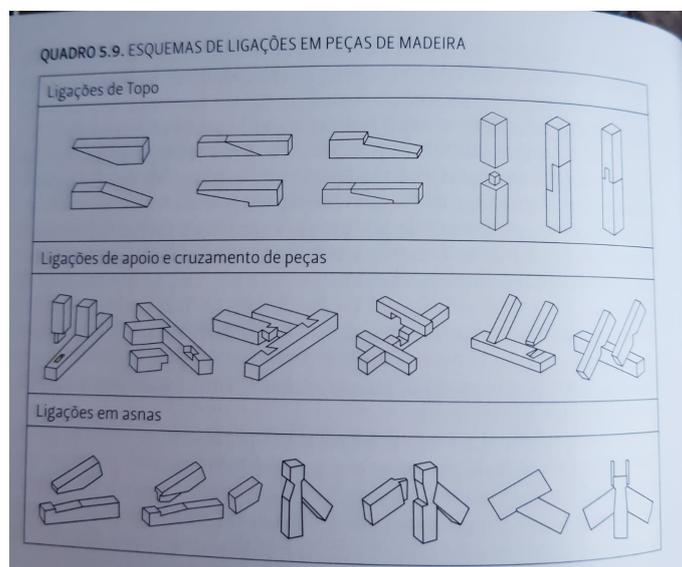


Figura 2.5: Esquemas de ligações em peças de madeira, adaptado de (Freitas, 2012)

A situação de reparação e substituição pontual com ligadores modernos, é em tudo análoga à anterior, no entanto com materiais e técnicas modernas, nomeadamente, na utilização de parafusos de aço inoxidável com maior durabilidade e permite a reversibilidade através do desaparafusamento, porém é preciso ter em conta, as condições de resistência ao corte dos parafusos em estruturas muito flexíveis. Outro exemplo, recorre-se a próteses metálicas, uma vez que estas são uma solução mais económica na zona de apoios e de ligações de topo em peças à tração. (Freitas, 2012)

Pelo facto de a madeira ser um material de origem vegetal e ter um processo de degradação muito distinto comparativamente com materiais de origem mineral, a reabilitação de estruturas de madeira têm particularidades singulares sequentemente define-se as seguintes regras gerais a aplicar:

- Verificação prévia de segurança e de grau de deterioração de outros sistemas estruturais tal como fundações, paredes, tirantes em aço;
- Evitar desmontar sistemas estruturais em madeira, uma vez que os estados de tensão irão ser novos, pois foram criadas ligações;
- Usar coeficientes de segurança mais altos do que os atuais;
- Executar inspeções periódicas às estruturas de madeira, como controlar temperatura, humidade, taxa de renovação do ar, deformações e defeitos dos elementos estruturais;
- Permitir, após intervenção, acesso fácil à examinação visual dos elementos estruturais;

- Em termos ambientais, dispor sempre os elementos de madeira na mesma classe de serviço;
- Assegurar a ventilação adequada dos apoios, evitando o contacto com materiais que possam reter a humidade ou que não permitem que a madeira “respire”;
- Evitar tetos falsos, que tapam os elementos estruturais, de forma que a inspeção periódica visual seja efetuada;
- A reabilitação deve ser feita no sentido das fundações para a cobertura, certificando que a estabilidade é garantida, garantindo também a baixa deformabilidade dos elementos de suporte, tal como, escoramento;
- Reabilitar primeiro os elementos estruturais de madeira mais robustos e/ou mais danificados. (Freitas, 2012)

2.3.4.1 Reforço em coberturas

Para os reforços em coberturas poderá ser válidas todas as técnicas de solução mencionadas anteriormente, apenas com alguns pontos distintivos. (Appleton, 2011)

Devido à exposição de agressividade ambiental, tal como chuvas, as coberturas estão sujeitas a um grau de degradação elevado, ou seja, tem-se como principais anomalias, a perda de estanquidade, a deformação excessiva e a deterioração de elementos estruturais e não estruturais, incluindo os sistemas de drenagem de águas pluviais. Este grau de degradação torna-se tão elevado, que é frequente a substituição integral da mesma. Estas quando são em madeira, a principal preocupação passa pela eliminação de fungos e insectos, tal como se sucede em pavimentos de madeira. Assim sendo, é importante proceder à reparação e reforço destas estruturas, substituindo ou reconstituindo as zonas degradadas das asnas, aplicando os mesmos procedimentos para os pavimentos em madeira. (Appleton, 2011)

Propõe-se então que nas asnas a reparar ou a reconstituir, os eles sejam sempre reforçados com elementos metálicos anticorrosivos de ligação. Em caso de substituição, como também já foi referido, é importante que os novos elementos sejam geometricamente compatíveis com os elementos existentes, de modo a obter harmonia, tendo estes elementos varões e barras de ferro, pregadas à linha das asnas e chumbadas na alvenaria diretamente ou através do frechal quando este exista. Estas ligações têm como principal função de transmissão de forças de tração, associadas à ação do vento ou dos sismos. Sugere-se que se faça uma análise estrutural plana ou tridimensional com as cargas reais ocorrentes nas coberturas, que trará informação útil para a execução do reforço estrutural. (Appleton, 2011)

Para coberturas em alvenaria, arcos e abóbadas, a solução generalizada e corrente nos dias de hoje, passa pela introdução de tirantes a ligar as nascenças dos arcos ou contrafortes. Para o problema já mencionado de fendilhação e degradação das alvenarias, aplica-se as mesmas técnicas de injeção ou reconstituição de elementos deteriorados. Para o aumento da estanquidade das coberturas, anomalia mencionada em supra, reforça-se os sistemas de drenagem de águas pluviais bem como os sistemas de impermeabilização. (Appleton, 2011)

3 Levantamento do Caso de Estudo

3.1 Identificação do imóvel

Este capítulo tem como objetivo a apresentação do caso de estudo, um edifício de habitação e comércio na baixa da cidade do Porto, mais precisamente, na Rua de Sá Noronha, 149 a 153, pertencente à União de Freguesias de Cedofeita, Santo Ildefonso, Sé, Miragaia, São Nicolau e Vitória. O promotor “Porto Vivo SRU” pretende realizar a sua reabilitação.

O edifício encontra-se ligeiramente deteriorado, sendo objetivo do trabalho a criação de melhores condições de habitabilidade, melhorar as infraestruturas, fachada e cobertura. (Porto Vivo SRU, S.A., 2020)

A localização do edifício é na zona poente da atual Rua de Sá Noronha, tal como indica a Figura 11, sendo parte integrante de um conjunto de edificado homogéneo com fachada contínua que termina a Norte o quarteirão de Carlos Alberto, que tem um significativo valor patrimonial, construído no final do século XIX, com algumas exceções do início do século XX. (Porto Vivo SRU, S.A., 2020)



Figura 3.1: Localização do imóvel, adaptado de NCREP (2020)

Relativamente à topografia, este quarteirão apresenta pendentes suaves entre os arruamentos e os espaços, o que é geralmente benéfico em termos dos possíveis assentamentos das construções.

O edifício está inserido num lote retangular com 8,5 metros de profundidade e cerca de 5,5 metros de largura, ocupando na totalidade da sua área de implantação. Quanto à altimetria, não existe grande desvio entre a cota de soleira e a Rua Sá Noronha e desenvolve-se em três vãos na fachada única Nascente. (Porto Vivo SRU, S.A., 2020)

3.2 Levantamento arquitetónico

Como já se referiu, trata-se de um edifício de habitação e comércio da 2ª metade do século XIX, que ocupa a totalidade da área do Lote, sem variação de altimetria entre a cota de soleira para a Rua de Sá Noronha, e com três vãos numa única fachada a Nascente. O rés-do-chão serve de armazém comercial e tem mais três pisos de habitação com um fogo por piso.

A comunicação vertical interna no edifício é possibilitada por um conjunto de escadas interiores, com patamares intermédios entre os pisos 1/2 e 2/3. Quanto à sua organização funcional, o edifício organiza-se assim em 4 pisos, com as seguintes características geométricas: ((Porto Vivo SRU, S.A., 2020)

- Área do lote: 51,14m²;
- Área de implantação: 51,14 m²;
- Área bruta de intervenção: 204,56 m²;
- Altura total: 15 metros;
- Cércea: 13,20 metros;
- Pisos acima da cota de soleira: 4.

A distribuição da área útil por piso é apresentada nas Tabelas 3.1 a 3.4

Áreas do Rés-do-chão	
Área de entrada	3,48 m ²
Área de circulação	3,58 m ²
Área de estabelecimento	31,77 m ²
Área de arrumo	2,00 m ²
Área de sanitário	1,50 m ²

Áreas do 1º Andar	
Área circulação	9,07 m ²
Área cozinha	6,07 m ²
Área sala comum	13,40 m ²
Área alcova	10,46 m ²
Área casa de banho	4,29 m ²

Tabela 3.1: Descrição de áreas do Rés-do-chão **Tabela 3.2:** Descrição de áreas do 1º Andar

Áreas do 3º Andar	
Área circulação	8,52 m ²
Área cozinha	5,73 m ²
Área sala comum	12,77 m ²
Área alcova	10,46 m ²
Área casa de banho	4,28 m ²

Áreas do 2º Andar	
Área circulação	9,02 m ²
Área cozinha	5,64 m ²
Área sala comum	13,80 m ²
Área alcova	10,46 m ²
Área casa de banho	4,28 m ²

Tabela 3.3: Descrição de áreas em 3º Andar: **Tabela 3.4:** Descrição de áreas do 2º Andar - Habitação T0 e circulação comum

O sistema construtivo é o tradicional, não muito complexo, com paredes resistentes em granito e vigas em madeira, com soalho em madeira de pinho, cobertura no sistema comum de asnas de madeira e com telha cerâmica de barro, as caixilharias em sistema de guilhotina com vidro simples e no rés-do-chão encontra-se a porta original em madeira na entrada, e a porta para o armazém comercial em caixilharia de alumínio, que não é a original. (Porto Vivo SRU, S.A., 2020)

Relativamente à inserção urbana deste projeto, de acordo com o disposto no artigo 14º do RPDM do Porto, encontram-se cumpridos os critérios de privilegiar a conservação e reabilitação do edifício existente, que potenciam a ocupação por usos qualificadores e dinamizadores da vivência urbana, conservando assim a hegemonia do quarteirão, com uma inserção urbanística que conservar os valores arquitetónicos e paisagísticos da zona circundante. (PORTO VIVO SRU, 2020)

O grau de conservação do armazém comercial é mau, quer nas paredes quer no pavimento e no teto. O revestimento cerâmico do pavimento está deteriorado.

Na entrada para as habitações, o pavimento é lajeado de granito, e o resto do espaço de circulação é em madeira, também degradado. A caixa de escadas e os patamares de chegada fazem parte integrante dos fogos. As frações habitacionais têm pavimentos em madeira revestidos com material plástico tipo “oleado” e as zonas consideradas húmidas revestidas a betonilha aplicada sobre soalho. As paredes e tetos evidenciam algumas patologias, e estão estucados. A fraca ventilação dos espaços interiores é evidente, principalmente na zona dos banhos e nas alcovas. (Porto Vivo SRU, S.A., 2020)

Relativamente à segurança contra incêndio, este edifício, situado numa zona com bom acesso a viaturas dos Bombeiros, cumpre o disposto no Decreto-Lei 220/2008, de 12 de novembro, estando assegurada a proteção contra o risco de propagação de fogo em caso de incêndio. Está prevista a instalação de meios mecânicos de extração e ventilação da caixa de escada de acesso aos pisos. (Porto Vivo SRU, S.A., 2020)

No Anexo C, é possível ver um portfólio de fotografias do edifício em estudo, algumas retiradas pela autora deste trabalho, outras fornecidas por Porto Vivo SRU (2020).

3.3 Levantamento estrutural

O funcionamento estrutural inclina-se sobre três aspetos importantes, os materiais utilizados e o seu estado de conservação, as ligações entre os elementos e as forças e deformações que se encontram presentes nos elementos.

A nível estrutural, o edifício possui estruturas portantes originais em bom estado de desempenho. A intervenção prevista de trabalho implementa uma solução que, para evitar a introdução de estruturas pesadas de betão armado e aço, reforça as entregas das vigas de madeira nos apoios, substitui outras vigas em pior estado de conservação, e introduz perfis de aço para complementar a estrutura principal em madeira, apenas onde necessário. As peças desenhadas relativas ao levantamento estrutural são apresentadas no Anexo A, fornecidas pela equipa do NCREP (2020).

3.3.1 Estrutura resistente vertical

O edifício em estudo tem uma estrutura resistente vertical constituída por:

Paredes exteriores em alvenaria de pedra com espessura estimada de aproximadamente 0,50 m, com exceção da parede de fachada com uma espessura aproximada de 0,65 m nos três primeiros pisos e de 0,35 m no último piso;

As paredes interiores são em alvenaria e tabique;

Piso 0

Parede interior de alvenaria de tijolo com uma espessura estimada de 0,25 m, que tem como função apoiar os pavimentos de madeira do piso 1 e a escada entre os pisos 0/1.

Piso 1

A parede divisória resistente sobre o patamar de escada, passa a ser em tabique.

As restantes paredes de tabique, dispostas paralelamente ao vigeamento do pavimento, têm como única finalidade a de divisórias. (NCREP, 2020)

Relativamente ao estado de conservação dos elementos resistentes verticais, após visita técnica, verificou-se que as paredes de alvenaria que se pretende manter, apresentam um bom estado de conservação, necessitando de reforço e consolidação apenas pontualmente, particularmente na parede interior do piso 0, que indicia fissuração na ligação com a parede em tabique sobre ela apoiada. (NCREP, 2020)

Através da observação direta numa janela de sondagem ao nível do patamar intermédio entre os pisos 1 e 2, observou-se o colapso parcial por deterioração do material na parede de tabique do alinhamento 3, com origem em agentes bióticos, mais especificamente, fungos de podridão cúbica. O fator principal de proliferação deste fungo deve-se ao facto desta parede ladear divisões de instalações sanitárias cujo pavimento em betonilha não teve tratamento de impermeabilização adequado. As restantes paredes em tabique apresentam algumas fissuras aparentemente causadas por um deficiente funcionamento estrutural. (NCREP, 2020)



Figura 3.2: Vista interior do 1º piso para a fachada principal em alvenaria de pedra.

3.3.2 Estrutura resistente horizontal

Os pavimentos do edifício têm vigas de madeira maciça em castanho com seção circular de diâmetro entre 18 e 24 cm, espaçadas aproximadamente 0,50 m, dispostas paralelamente à fachada. O soalho, sobre estas vigas, é duplo em algumas zonas. Estas vigas apoiam nas paredes meias de alvenaria de pedra ou em paredes interiores de alvenaria, no piso 0, ou paredes interiores em tabique, nos pisos 1,2 e 3. Em algumas divisões o pavimento está revestido com betonilha. (NCREP, 2020)

Os elementos horizontais dos pavimentos apresentam deformação acentuada, devido ao desalinhamento vertical, até às fundações, das paredes de tabique que limitam a caixa de escadas. (NCREP, 2020)



Figura 3.3: **Esquerda:** Vigamento de madeira do pavimento de Piso 1 (adaptado de (PORTO VIVO SRU, 2020)) **Direita:** Vigamento de madeira do Piso 2 (adaptado de (PORTO VIVO SRU, 2020))

3.3.3 Cobertura

A cobertura, com estrutura principal em asnas de madeira de castanho, apresenta quatro águas e os seguintes elementos em madeira maciça: (PORTO VIVO SRU, 2020)

- Duas asnas compostas por linha baixa com seção quadrada com 16 cm de lado, linha alta com seção circular $\phi 12$ e pernas com seção quadrada com 14cm de lado, as asnas encontram-se espaçadas aproximadamente de 3,50m;
- Cumeeira com seção circular estimada de $\phi 16$;
- Madres com uma seção circular de $\phi 16$ alinhadas perpendicularmente à fachada;
- Rincões de seção circular estimada de $\phi 16$ que fazem os encontros entre as vertentes;
- Varas com secção quadrada de 8cm de lado espaçadas entre si de 0,30m.

Estes tipos de asnas designam-se de asnas pequenas, que normalmente são utilizadas em vãos mais pequenos, cerca de quatro metros no máximo, contudo não é o que se verifica para este caso de estudo. Neste caso a asna é uma asna sem pendural como se ilustra na figura 3.4:

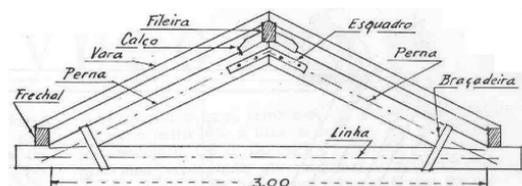


Figura 3.4: Configuração geométrica de uma asna Pequena sem pendural adaptado de (Bastos, 2011)

Na figura 3.5 está representada a estrutura da cobertura em sistema de asnas existente:



Figura 3.5: Esquerda: Estrutura da cobertura em madeira maciça espécie Castanho, (adaptado de (PORTO VIVO SRU, 2020)). **Direita:** Asnas pequenas com linha baixa e linha cima da cobertura do edifício caso de estudo

4 Inspeção e Diagnóstico

4.1 Introdução

Para que possa haver um bom programa de intervenção é importante reunir o máximo de elementos acerca do edifício em questão, sendo a primeira etapa do processo de inspeção. Principalmente em estruturas de madeira, um material altamente variável dentro da mesma espécie e em espécies diferentes, com comportamento anisotrópico, higroscópico e sujeito a enorme degradação biológica, uma vez que se trata de um material natural.

No início torna-se relevante realizar-se uma inspeção geral visual para conhecimento do edifício e haver um reconhecimento visual do mesmo. Torna-se um grande auxílio a existência de anteriores plantas de arquitetura e de estabilidades do edifício. Nessa primeira análise e visita ao local, são marcados os pontos onde se irá proceder a janelas de sondagem e de inspeção. Numa segunda fase, procede-se a análise de locais onde se encontraram patologias e numa última e terceira fase, já em fase de desenvolvimento de inspeção, abrem-se janelas de sondagem em zonas, entretanto detetadas, que não eram visíveis nas fases anteriores, por estarem ocultas. (Carneiro, 2012)

Esta informação serve como ponto de partida para uma avaliação baseada na verificação de defeitos ou insuficiências, como, por exemplo, a redução por degradação de seções transversais, redução do valor das propriedades (resistência) dos materiais, aumento do valor das ações na estrutura a que a estrutura ficará sujeita depois de intervencionada. (Dias, 2008)

Em teoria, o diagnóstico devia basear-se num modelo de comportamento do edifício. Na prática, este modelo é difícil e complexo uma vez que os fatores das anomalias são diversos, em virtude das diferentes fases de ciclo de vida do edifício e a diversidade de elementos estruturais, bem como a possibilidade de uma dada anomalia ter mais do que uma causa associada. Como este modelo é teórico, o processo de diagnóstico de anomalias deverá ser um processo iterativo, analisando-se de forma metódica todas as possíveis causas de uma anomalia. (Pereira, 2017)

Como já foi mencionado, este edifício de habitação e comércio foi construído na segunda metade do século XIX, mais propriamente no ano de 1857, constituindo uma construção tradicional de paredes resistentes de granito, pavimento em madeira e cobertura em sistema de asnas de madeira.

Para um bom processo de inspeção e diagnóstico, é necessário ter acesso à estrutura, limpeza da superfície de madeira, existência de iluminação artificial, sempre que não haja acesso a fontes de iluminação natural ou estas sejam precárias, a existência de elementos gráficos, topográficos e outras peças desenhadas que orientem a inspeção. (Feio & Lourenço, 2005)

4.2 Técnicas de diagnóstico estrutural

Em qualquer tipo de estrutura antiga, principalmente se a maior parte dos elementos forem elementos estruturais de madeira, é necessário recorrer a ensaios in situ ou em laboratório, preferencialmente de natureza não destrutiva, para determinar o estado de conservação da estrutura, e as características mecânicas dos elementos constituintes.

Segundo Feio & Lourenço (2005) as técnicas de diagnóstico dividem-se em técnicas propriamente ditas e ensaios, em função de dois objetivos de aplicação distintos:

- Defeitos ocultos: deteção de defeitos, alterações ou danos na madeira, em partes não visíveis ou inacessíveis da estrutura, utilizando-se equipamentos como extensão “tecnológica” dos cinco sentidos do operador;
- Determinação das características físico-mecânicas: determinação (preferencialmente) não destrutiva de grandezas físico-mecânicas correlacionadas com a resistência e/ou deformabilidade do elemento em estudo, com o objetivo de atribuir um nível de desempenho tão próximo da realidade quanto possível, em que a inspeção visual se revela insuficiente.

Segundo Pavão (2016), as técnicas de diagnóstico podem ser classificadas de acordo com:

- Local de aplicação da técnica de diagnóstico (in situ ou em laboratório);
- Nível de destruição da peça em causa: não destrutivo, parcialmente destrutivo ou destrutivo;
- Princípios usados, tais como, sensoriais, mecânicos, térmicos, químicos, eletroquímicos, elétricos, magnéticos, eletromagnéticos, ultrassónicos, radioativos e outros;
- Tipo de resultados alcançados, de acordo com as propriedades a analisar;
- Elementos e componentes de construção: estruturais ou não estruturais;
- Atividade em que se enquadram: controlo de qualidade, inspeção de edifícios, verificação de requisitos normativos, entre outros;
- Conjunto de pressupostos a avaliar, como conjunto de questões, objetos e atividades.

Segundo Arêde, et al. (2009), para um diagnóstico estrutural rigoroso é necessário recorrer a ensaios para quantificar as características físicas e mecânicas mais importantes para a uma boa avaliação de comportamento estrutural. Como tal, estes meios auxiliares de diagnóstico em estruturas existentes são divididas em destrutivos e não destrutivos, optando-se sempre que possível, por motivos óbvios de preservação de património, por técnicas de ensaio não destrutivas em construções antigas, pois não requerem ações directas invasivas na estrutura. Geralmente, com exceção dos ensaios dinâmicos, estes ensaios fornecem resultados mais qualitativos. (Arêde, et al., 2009)

As técnicas de percepção sensorial, não destrutivas, são simples e de recurso facilitado, em que o inspetor realiza o processo de diagnóstico através dos seus próprios sentidos, tais como a observação visual ou com auxílio de equipamentos que potenciam os sentidos. Como forma de reforçar a observação visual, utilizam-se outras impressões sensoriais tais como o som resultante da percussão da superfície do elemento e o olfato para deteção de odores específicos de presença de humidade. (Pavão, 2016)

As técnicas de ação mecânica podem ser menos ou mais destrutivas e intrusivas, dependendo dos dispositivos mecânicos, elétricos, hidráulicos ou eletromecânicos e da remoção de partes do elemento construtivo. Se o ensaio medir apenas de forma elástica, sem rotura local do material como, para a madeira, é o caso de Pylodin, é pouco intrusivo, ao invés do ensaio de Resistograph, que implica uma agressão localizada no material. Na Tabela 4.1 descrevem-se as técnicas mencionadas de ação mecânica e outras. (Pavão, 2016)

Medição da densidade superficial de madeira com Pylodin	Ensaio não destrutivo, in situ, e através do aparelho Pylodin mede a densidade superficial das peças de madeira.	Caracterização da densidade superficial de elementos de madeira.	Vantagens: Fácil verificação da dureza e densidade do elemento de madeira. Desvantagens: Fraca deteção de defeitos no seu interior, o que impede correlações eficazes com a resistência mecânica.
Avaliação de integridade de elementos de madeira com Resistograph (aparelho com broca de diâmetro muito reduzido e sistema que regista e calcula a potência exigida na furação)	Técnica pouco intrusiva, in situ	Deteção de deterioração em elementos de madeira. Aprovisiona dados sobre a densidade de acordo com a furação.	Vantagens: Através de uma fita de papel, podendo-se seleccionar uma dada escala, permite um registo automático. Desvantagens: Discrepância de grau de rigor e consequentemente produção de resultados ambíguos pouco fiáveis.

Tabela 4.1: Técnicas de ação mecânica, adaptado de Pavão (2016)

Algumas anomalias são facilmente detetadas apenas por observação visual, como manchas de humidade, fendilhação na superfície das paredes, enquanto outras só são detetadas com recurso a técnicas mais apuradas de inspeção. Esta inspeção implica ensaios in situ que permitem obter informação adicional, e caso estes não forneçam resultados conclusivos, é necessário fazer ensaios laboratoriais sobre amostras recolhidas em obra. (Pereira, 2017)

Nesta secção só se vão abordar os ensaios não destrutivos in situ, para a identificação de possíveis danos estruturais.

Ensaio não destrutivos

Os ensaios não destrutivos permitem determinar os valores das propriedades físicas e mecânicas do material, de forma não destrutiva, ajudando a determinar o estado de conservação dos elementos estruturais. Para estes ensaios, são utilizados instrumentos mais tradicionais, como o martelo e o formão, que permitem determinar informações muito úteis sobre o estado de conservação dos elementos, e instrumentos mais sofisticados, como o Resistógrafo, o Pilodyn ou sísmógrafos, que permitem determinar resultados in situ. (Andrade, 2014)

Ensaio sínicos

Esta técnica permite gerar um impulso sonoro ou impulso ultrassónico num ponto aleatório da estrutura, sendo que o receptor de sinal pode estar em vários locais. O método consiste na medir o tempo que o sinal do impulso demora a percorrer a estrutura de um material, tendo conhecimento das distâncias entre o gerador de sinal e o receptor do mesmo. Quando o elemento estrutural apresenta cavidades, diminui a amplitude das reflexões de onda produzidas e aumenta a propagação. Esta técnica de diagnóstico estrutural permite estimar o módulo de elasticidade e a resistência de compressão, a partir de correlações com a velocidade de propagação de ondas sínicas; bem como o grau de homogeneidade dos materiais estruturais, a existência de fendas e reforços anteriores. (Arêde, et al., 2009)

Ensaio de georadar

Esta técnica consiste na emissão de ondas electromagnéticas de alta frequência (100MHz-1GHz)

com impulsos muito curtos, permitindo identificar e localizar superfícies que separam materiais com diferentes características, onde ocorrem a reflexão das ondas electromagnéticas, incluindo defeitos nos materiais. A desvantagem é o custo elevado destes ensaios, pelo que só se utiliza em casos especiais. (Arêde, et al., 2009)

Sylvatest

Sylvatest é o ensaio não destrutivo mais recrutado na fase de inspeção e diagnóstico de estruturas de madeira e permite determinar o módulo de elasticidade dinâmico (MOE_{US}) por relacionamento com a velocidade de propagação de ondas acústicas (V_{US^2}) e a massa volúmica (ρ) da madeira através da equação 4.1: (Lladró, et al., 2006)

$$MOE_{US} = V_{US^2} \cdot \rho \quad (4.1)$$

A utilização do martelo e formão é uma forma expedita e prática de avaliar a existência de vazios, degradação interna, fendas e outras anomalias. Consiste na produção do som através do embate do martelo numa peça degradada e outra não degradada. A utilização do formão possibilita a fácil avaliação da dureza superficial da madeira, analisando então a integridade da mesma. No entanto, é susceptível a erros, uma vez que não se consegue avaliar nem quantificar a gravidade da degradação nem a sua extensão. (Andrade, 2014)

A utilização do humidímetro, é uma técnica de laboratório ou in situ, que facilita o mapeamento da humidade na superfície da peça em análise. O humidímetro é constituído por dois eléctrodos em borracha que em contacto com o material a analisar, originam um campo eléctrico que permite medir a resistência eléctrica do material em função da qual se determina o teor de água. (Andrade, 2014)

Na madeira, as técnicas de inspeção tradicional revelam-se eficazes para uma avaliação direta, tanto visual como táctil, através da procura de sinais de agentes bióticos à superfície, sendo dada especial atenção às zonas mais críticas para a segurança estrutural e de elevado risco. (Andrade, 2014)

Neste caso de estudo, a inspeção visual foi predominante. Este método simples permite a um técnico experiente, retirar conclusões através das características visuais, tais como a cor da madeira, largura dos veios de Verão e de Inverno, dureza superficial, diferenças entre borne e cerne, e outras características, permitindo determinar a espécie de madeira, os defeitos mecânicos e os sinais de deterioração dos elementos estruturais. Principais pontos chave a ter em conta numa inspeção visual, enumerados por Brites (2011) :

- Presença de micélio e/ou esporos que representa de forma directa um ataque de fungos, mas sem revelar a extensão do ataque. Alguns fungos produzem micélio e/ou esporos numa fase preliminar da degradação biológica e outros numa fase mais avançada de deterioração;
- Observação de desaprumo de faces dos elementos estruturais, ou depressões localizadas, que pode indiciar deterioração subjacente;
- Alterações cromáticas indicam teor de humidade altos, reveladores da presença de excesso de água. Manchas em ligadores metálicos também indicam corrosão pela presença de água;

- Existência de orifícios, excrementos, pó de madeira ou outros indícios são, por norma, sinais de presença de insectos xilófagos;
- O crescimento de vegetação, tais como plantas e musgo em fendas, bem como acumulação de solo, indica que os elementos estruturais apresentaram teor de água elevado em longos períodos de tempo.

Os resultados da inspeção visual são resultados qualitativos (exceto algumas medições), que com o cruzamento com outros ensaios não destrutivos resulta de conclusões e pareceres quantitativos da qualidade da peça. (Brites, 2011)

4.3 Identificação das anomalias

Naturalmente, as estruturas necessitam de reabilitação por manifestarem anomalias próprias do envelhecimento ou por apresentarem sinais de degradação devido à falta de manutenção, erros de projeto, construção deficiente ou fatores acidentais. Outras anomalias referem-se às exigências estruturais, mais precisamente à falta de capacidade resistente das peças de madeira às ações atuantes na estrutura, que resulta em deformações excessivas. (Branco et al., 2008)

A tabela 4.2 adaptada de Lopes (2007), representa, de uma forma simples, as principais patologias e danos estruturais associados e mais frequentes à estabilidade das estruturas de madeira em coberturas.

Na inspeção da equipa do NCREP ao edifício foram observadas as seguintes anomalias, com a peça desenhada do mapeamento de danos da cobertura em Anexo B:

- Fachada principal: Sem anomalias estruturais graves. Degradação do revestimento, pintura envelhecida, com destacamento de camadas de reboco e fissuras em algumas áreas. Cornijas com colonização biológica devida às infiltrações. Os beirados cederam e apresentam degradação de telhões e vegetação exuberante;
- Zonas comuns interiores: Átrio de entrada e restantes pavimentos em madeira em mau estado de conservação. As escadas em madeira e o estuque em gesso do tecto deteriorados;
- Piso 0: Humidade e degradação de rebocos a todo o comprimento dos elementos em alvenaria;
- Piso 1: Deformação significativa do vigamento de madeira no pavimento na sala de estar; Pavimento em betonilha sem impermeabilização adequada; Soalho evidencia degradação por ataque de fungos e fissuração no teto; Parede resistente de alvenaria recuada com degradação de reboco;
- Piso 2: Fissuração vertical de parede em tabique lateral; Parede em tabique em colapso parcial e com grave degradação de ataque de fungos; Colapso parcial na zona curva de uma parede resistente em alvenaria, como mostra a peça desenhada do mapeamento de danos (Figura Anexo B.1); Padieira inclinada em vãos interiores embutidos em paredes de tabique divisórias; Pavimento em betonilha também sem impermeabilização adequada; Queda de estuque e manchas de humidade em algumas zonas dos tetos;
- Piso 3: Fissuração diagonal na parede de tabique divisória; Colapso parcial de parede em

Problema	Causas
Seção insuficiente	Deformações excessivas e possíveis roturas de elementos estruturais, devido a excesso de cargas atuantes não previstas ou aumento de cargas originais
Deformações Excessivas	Efeito de fluência, com agravamento em peças que são colocadas no local ainda verde ou com ciclos de secagem
Rotura de ligadores ou falhas nas ligações	Mau dimensionamento, ou má execução do projeto que pode dar azos a deformações. Rotura por esmagamento por compressão, ou rotura por esforço de corte nos empalmes.
Roturas pontuais em elementos	Existência de nós, por exemplo a meio vão
Rotação dos apoios e entregas nas paredes	Modificação de cargas e das combinações de cargas ou falha nos ligadores
Deficiência ou inexistência de contraventamento	Afastamentos excessivos entre asnas
Perda de seção transversal	Devido a agentes bióticos
Empenamento	Efeito de retração na madeira após secagem, assimetria de cargas, efeito de cargas provenientes dos elementos de apoio
Encurvadura	Excesso de esbelteza das peças de madeira, aumenta esforço de compressão nos elementos de madeira
Entrega de apoios insuficiente	Entrega em paredes mestras, frechais, que de modo geral, deve-se cumprir os 15 cm + ½ da espessura da peça de madeira
Má execução de pormenores construtivos	Aplicação de madres com excentricidade em relação aos nós das asnas

Tabela 4.2: Problemas frequentes de estabilidade em estruturas de cobertura em madeira adaptado de (Lopes, 2007)

tabique com degradação por ataque de fungos; Inclinação de padieira em vão interior de parede divisória em tabique; Pavimentos em betonilha sem impermeabilização adequada;

- Cobertura com humidade, ataque de fungos e fissuração diagonal;
- Patamar intermédio 1-2 com ataque de caruncho em parede de tabique subjacente ao vão de escadas e colapso parcial de parede em tabique;
- Patamar intermédio 2-3: A mesma parede em tabique encontra-se em colapso parcial.

As anomalias mais frequentes e graves em pavimentos e coberturas de madeira são:

- Madeira em cobertura com grandes abatimentos, devido principalmente ao apodrecimento das vigas por entrada de água;
- Fungos e insectos xilófagos;
- Vigas de pavimento com flecha de deformação devido a um dimensionamento escasso;
- Apodrecimento das entregas das vigas de madeira das coberturas com a causa assentada na humidade descendente provocada pelo contacto com as águas pluviais, residuais ou de consumo. (Fagulha et al, 2016)

Através da inspeção visual, consegue-se destacar a anomalia principal da cobertura, o apodreci-

mento da linha e pernas do sistema de as duas asnas da cobertura, com proeminência nas zonas de apoio, devido à ação de fungos de podridão, conseqüente da presença de humidade descendente proveniente de infiltração de águas pluviais através da zona de junção com os elementos cerâmicos do telhado, com causa na escassez de manutenção e falta de ventilação da cobertura.

A equipa do NCREP também usou o Resistograph para avaliar o estado de conservação de alguns elementos específicos dos pavimentos em madeira, escolhidos para verificar a conformidade com os resultados de técnicas de perceção sensorial, contudo não teve acesso aos registos editáveis.

O Resistograph é um instrumento utilizado para a inspeção de estruturas de edifícios desde 1985, e faz a correlação entre a energia necessária para a penetração da agulha com a resistência da peça de madeira a esta mesma penetração. (Freitas, 2012)

Este método é um dos mais frequentes, devido à sua fácil interpretação de resultados, e ao facto de manter a integridade das peças de madeira, com estes ensaios podem-se retirar informações qualitativas de grande interesse, pois reflete a variação de resistência ao longo da perfuração, que permite identificar variações de densidade ao longo das seções das peças estruturais, zonas de degradação biológica, fendas, anéis de crescimento e vazios existentes nas peças estruturais, que não são perceptíveis na inspeção de perceção sensorial. (Andrade, 2014)

Torna-se importante o técnico de inspeção ter conhecimento das características da madeira, e saber identificar os anéis de crescimento, medições radiais e tangenciais, identificar defeitos de lenho inicial e final, para que haja uma boa interpretação dos resultados do ensaio. (Dias, 2008)

Foram feitas medições com o Resistograph em diferentes elementos de madeira ao longo dos pisos do edifício, que estão representadas nas Figuras 4.1 e 4.2.

Salvaguardar que após interpretação e análise ao resumo da inspeção fornecida pela equipa NCREP (Núcleo de Conservação e Reabilitação de Edifícios e Património), chega-se à conclusão que a informação sobre os ensaios "*in situ*" é parca a nível quantitativo e inconclusiva, por falta de dados passíveis de serem trabalhados e correlacionados com as características mecânicas da madeira constituinte da estrutura de cobertura. Contudo, assume-se, após inspeção visual, uma perda de seção transversal em todos os elementos envolventes da estrutura da cobertura, para um dos casos da modelação estrutural.

Segundo Júnior (2006), "A perfuração é realizada a velocidade constante, ajustável pelo utilizador, através de uma agulha de diâmetro de 1,5mm, sendo mais larga na extremidade (3mm). Em função do modelo comercial, estas agulhas podem ter vários comprimentos, sendo que 280 mm e 950 mm são, respetivamente, os valores mínimos e máximos conhecidos."

O Resistograph, regista medições radiais e tangenciais, no entanto na inspeção não é possível distinguir as duas, então a solução passa pela utilização de um valor médio, uma vez que não existe grande variação entre os valores radiais e os valores tangenciais. Com os resultados do Resistograph, consegue-se relacionar as características mecânicas, tais como, a densidade ou massa volúmica (ρ), o módulo de elasticidade na direção do fio (E0) e o módulo de rutura na direção do fio (fm). (Júnior, 2006)

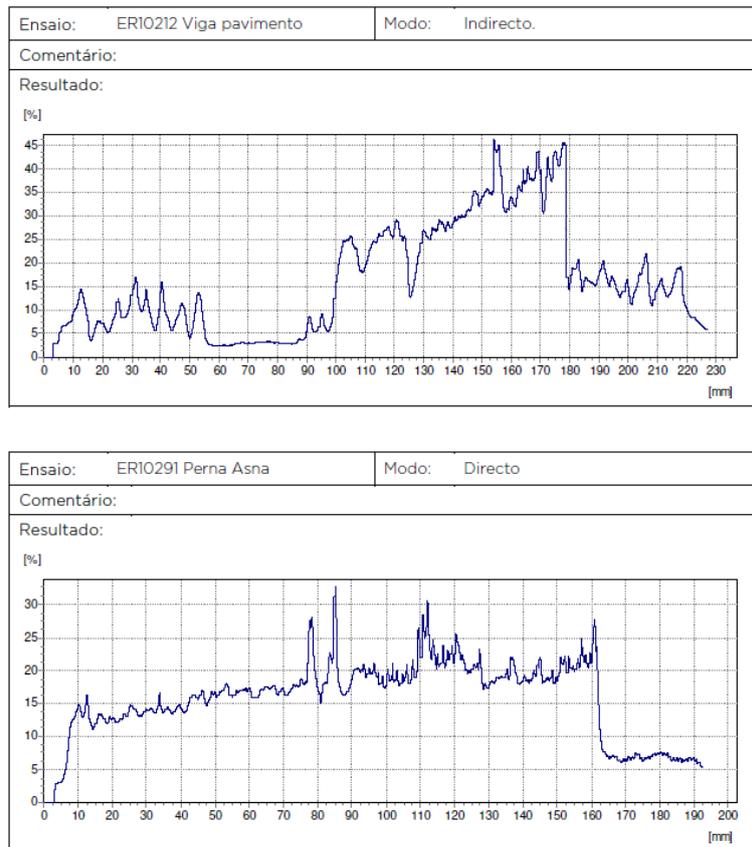


Figura 4.1: Resultados gráficos da variação de resistência à perfuração com auxílio do Resistograph, em viga de pavimento do piso 1 do edifício, bem como resultados do ensaio de Resistograph em Perna de Asna de Cobertura, adaptado de NCREP (2020)

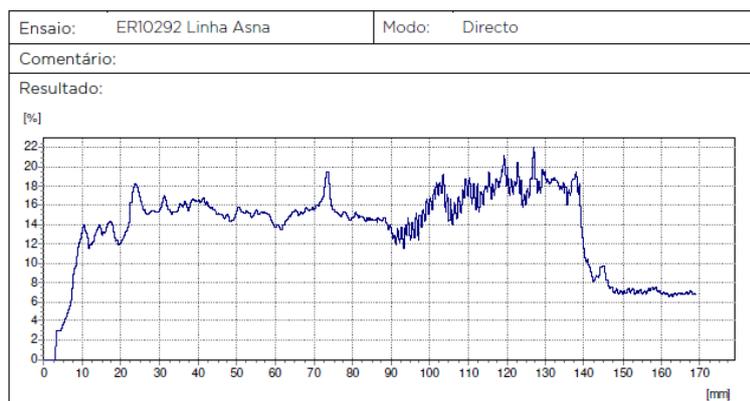


Figura 4.2: Resultados gráficos da variação de resistência à perfuração com auxílio do Resistograph, em linha de asna de cobertura do edifício em estudo, adaptado de NCREP (2020)

Para o tratamento destes dados gráficos, procede-se à diminuição do intervalo de análise, pois o aparelho Resistograph não tem resultados fiáveis no início e no final da perfuração, o que significa que não são representativos para o cálculo do valor médio de resistência, a seleção dos pontos onde se começa e acaba a análise são determinados graficamente, através da subtração dos valores iniciais e finais, que correspondem a 1/6 de amostragem para as duas extremidades. (Júnior, 2006)

Estes valores médios são correlacionados com as propriedades mecânicas da madeira, como a densidade ou massa volúmica ρ , o módulo de elasticidade na direção do fio E_0 , e o módulo de rotura na direção do fio f_m . (Júnior, 2006)

Como já foi referido, despreza-se os valores iniciais e finais do gráfico matemático obtido com os resultados do Resistograph, isto deve-se ao facto do instrumento não ter um funcionamento estável, e como tal, estes valores não são representativos no valor global da resistência. Esta seleção dos valores iniciais e finais, que são os pontos A e B, é feita por análise numérica ou gráfica, e prende-se na seleção dos pontos em que se atinge o valor máximo da curva inicial de estabilização e o último ponto quando alcança o valor máximo na curva final descendente de estabilização. Como se pode visualizar o exemplo dado por (Júnior, 2006), através da Figura 4.3:

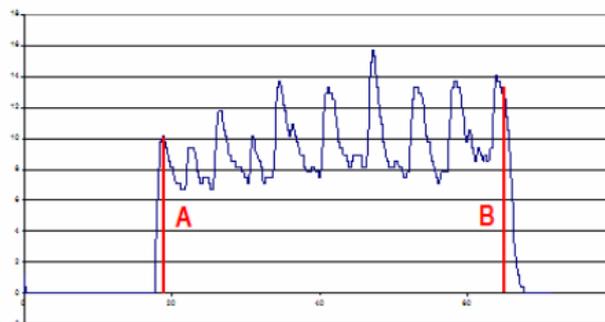


Figura 4.3: Representação dos valores iniciais (A) e finais (B) do intervalo estável do funcionamento do Resistograph, adaptado de Júnior (2006)

Em elementos de madeira atacados biologicamente por fungos e insetos xilófagos, não se deve eliminar apenas os sextos iniciais e finais, mas deve-se considerar apenas a zona sã, sendo esta zona a zona correspondida pela seção útil, contudo existe a metodologia ilustrada na figura seguinte, que analisa apenas 2/3 do intervalo [A,B], partindo da ideia de que o valor médio da resistência ocorre nos valores intermédios da perfuração. (Júnior, 2006)

Os valores J e K são calculados através das seguintes expressões:

$$J = A + \frac{1}{6} \times (B - A) \quad (4.2)$$

$$K = B - \frac{1}{6} \times (B - A) \quad (4.3)$$

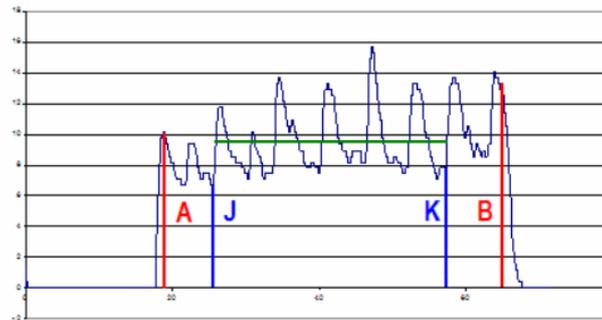


Figura 4.4: Representação gráfica dos valores iniciais (J) e finais (K) do intervalo considerado para os valores médios de resistência, adaptado de Júnior (2006)

E o valor médio calcula-se com a seguinte expressão:

$$VR_{medio} = \frac{\sum_{i=1}^N R_i}{N} \quad (4.4)$$

$$N = \frac{K - J}{0,04} \quad (4.5)$$

Em que:

R_i - valor de resistência à perfuração, para cada um dos pontos do gráfico em intervalos de 0,04 mm em 0,04 mm;

Segundo Capuz et al. (2006), as expressões obtidas para os valores do módulo de elasticidade obtido em classificadora normalizada (MOETM), em função do valor médio de Resistograph é a seguinte:

$$MOETM = 1486,2 \times VR^2 = 46,81\% \quad (4.6)$$

Ainda em Capuz et al. (2006), menciona que com a notação do Eurocódigo 5, obtém-se as seguintes expressões correlacionadas com as propriedades mecânicas das peças de madeira:

$$f_m = -21,896 + 4,3744 \times VR \quad (4.7)$$

$$E_0 = 1486,2 \times VR - 5381,9537 \quad (4.8)$$

Contudo, verifica-se que a avaliação do f_m (resistência à flexão) de forma direta por meio de ensaios não destrutivos “in situ” é pouco prudente, por escassez de informação quantitativa relativamente à presença de defeitos localizados. No entanto, com o Resistograph para avaliar a massa volúmica ρ da peça de madeira com bastante fiabilidade. (Capuz et al.,2006)

Com ensaios não destrutivos obtém-se resultados inferiores do que os obtidos por ensaios destrutivos, numa escala de aproximadamente 30% no caso do E_0 (Módulo de elasticidade inicial), e 50% no caso de f_m . (Capuz et al.,2006)

Deve-se concluir que com a utilização do Resistograph, tem-se os seguintes resultados (Capuz et al.,2006):

- Excelentes resultados qualitativos;
- Correlações baixas;
- Expressões para 95% de confiança são muito conservadoras;
- Bom ensaio de estimar o ρ .

5 Projeto de Intervenção na Cobertura

5.1 Análise estrutural

Apesar de na fase de inspeção e diagnóstico ter sido recolhida pouca informação relativamente a ensaios e técnicas de inspeção, sabe-se que as coberturas dos edifícios antigos apresentam quadros generalizados de patologias. Como tal, após visita ao local e inspeção visual, vão-se assumir algumas propriedades mecânicas e físicas dos materiais existentes no sistema estrutural da cobertura, para uma boa calibração do modelo numérico para reprodução mais fidedigna do seu comportamento estrutural.

Em Portugal, a típica cobertura é constituída por asnas, sendo este o elemento estrutural principal, com uma pendente variável entre os 20° e os 30°, sendo constituída por telhas cerâmicas apoiadas sobre varas espaçadas entre 40-50 cm, que repousam sobre a cumeeira, as madres e o frechal. As asnas simples apresentam vulgarmente vãos médios de 6 a 7 metros. Normalmente, as asnas formam-se através dos elementos horizontais, as linhas, os elementos inclinados que são as pernas, de modo a formar as pendentes do telhado e ligadas à linha, um elemento vertical ao centro no ponto de ligação entre as duas pernas, o pendural, e duas escoras inclinadas, que suportam as pernas no pendural. (Branco et al., 2006)

Estes últimos elementos não estão presentes no sistema de asnas da cobertura em estudo, trata-se de uma asna simples constituída apenas pelo elemento horizontal, a linha de baixo e uma linha de cima, ver Figura 7.1, bem como as pernas com a sua base na linha baixa e unindo-se ao centro, onde suportam a cumeeira.

Um erro que se costuma cometer no dimensionamento das estruturas de madeira reflete-se na falta de capacidade de reproduzir de forma minuciosa o comportamento da estrutura, uma vez que é muito difícil caracterizar todas as ligações existentes, e também as condições de fronteira, principalmente na zona de apoio, sendo que quando se trata de reabilitação de estruturas de madeira ainda se agrava esta dificuldade. (Correia, 2009)

Para a verificação de segurança aos estados limites últimos e de serviço, nas duas asnas de cobertura deste caso de estudo, é necessário identificar as ações bem como os critérios de combinação de ações e apresentar um modelo de cálculo global do sistema estrutural da cobertura.

As asnas estão habitualmente sujeitas a tensões normais normalmente associadas a esforços axiais e esforços de flexão, devido ao peso próprio e ao carregamento de sobrecargas assimétricas. As pernas são os elementos constituintes das asnas que suportam mais cargas e apresentam esforços maiores, resultantes das tensões tangenciais e tensões normais. A linha resiste a um esforço axial de tração. (Bastos, 2011)

Para a avaliação do comportamento da asna deve-se ter em conta as seguintes condicionantes:

- A alteração da distribuição dos esforços nas asnas mais propriamente nas pernas, com a introdução de madres com excentricidade relativamente aos nós;
- As ligações Perna-Linha são as ligações mais condicionantes, não apenas por serem zonas

de ataques de agentes bióticos, mas também pelo facto de serem os elementos com maior concentração de tensões. (Bastos, 2011)

5.2 Estados Limites Últimos

Os Estados Limites Últimos correspondem, como o nome indica, a uma situação de rutura ou colapso da estrutura, que põe em causa a segurança do utilizador. Estes estados verificam-se através de perda de equilíbrio global ou parcial da estrutura, ou por deformação excessiva, rutura ou perda de estabilidade da estrutura global ou de alguns elementos estruturais.

A verificação de segurança em relação aos Estados Limites Últimos (ELU) requer que as tensões nos elementos estruturais sejam inferiores à resistência dos materiais existentes.

O estado limite último tem de ser verificado para as ações relevantes em cada solução de intervenção na cobertura, obedecendo à seguinte equação:

$$E_d \leq R_d \quad (5.1)$$

Em que:

E_d - valor de cálculo do efeito de ação, por exemplo, um esforço;

R_d - valor da resistência correspondente ao efeito de ação.

Na seção 6.4.3.2 do EC0, para combinação de ações fundamentais, é definido o valor de cálculo do efeito das ações combinadas para os estados limites últimos,

$$E_d = E \{ \gamma_{G,j} G_{k,j} ; \gamma_p P ; \gamma_{Q,i} Q_{k,1} ; \gamma_{Q,i} \Psi_{0,i} Q_{k,i} \} ; j \geq 1 ; i > 1 \quad (5.2)$$

Ou

$$E_d = \sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_p P + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \Psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (5.3)$$

em que:

$G_{k,j}$ – valor característico da ação permanente ;

P – valor representativo da ação de pré-esforço;

$Q_{k,1}$ – valor característico da ação variável de base da combinação;

$Q_{k,i}$ – valor característico da ação variável acompanhante;

$\gamma_{G,j}$ – coeficiente parcial relativo à ação permanente j;

γ_p – coeficiente parcial relativo a ações de pré-esforço;

$\gamma_{Q,1}$ – coeficiente parcial relativo à ação variável de base da combinação;

$\gamma_{Q,i}$ – coeficiente parcial relativo à ação variável i;

$\Psi_{0,i}$ – coeficiente para a determinação do valor de combinação de uma ação variável;

Σ – significa “o efeito combinado de”;

“+” – significa “a combinar com”.

Ou seja, a primeira parcela desta expressão refere-se às ações permanentes, e terceira à ação variável de base, e a última às restantes ações variáveis secundárias.

5.2.1 Ações variáveis: Sobrecarga

O EC0 (CEN;2009a) indica para as ações permanentes, se o seu efeito for desfavorável, $\gamma_{G,i} = \gamma_{G,i,Sup} = 1,35$ e para ações variáveis $\gamma_{Q,i} = \gamma_{Q,i,Sup} = 1,5$. Se o seu efeito for favorável, $\gamma_{G,i} = \gamma_{G,i,Inf} = 1,0$ e para ações variáveis $\gamma_{Q,i} = 0,0$.

O EC0, define o valor dos coeficientes de redução $\Psi_{0,i}$ no quadro que se reproduz na Tabela 5.1:

Acção	ψ_0	ψ_1	ψ_2
Sobrecargas em edifícios (ver a EN 1991-1-1)			
Categoria A: zonas de habitação	0,7	0,5	0,3
Categoria B: zonas de escritórios	0,7	0,5	0,3
Categoria C: zonas de reunião de pessoas	0,7	0,7	0,6
Categoria D: zonas comerciais	0,7	0,7	0,6
Categoria E: zonas de armazenamento	1,0	0,9	0,8
Categoria F: zonas de tráfego, peso dos veículos ≤ 30 kN	0,7	0,7	0,6
Categoria G: zonas de tráfego, 30 kN < peso dos veículos ≤ 160 kN	0,7	0,5	0,3
Categoria H: coberturas	0	0	0
Acção da neve em edifícios (ver a EN 1991-1-3) ¹⁾			
– Finlândia, Islândia, Noruega, Suécia	0,70	0,50	0,20
– Restantes Estados-Membros do CEN, para obras localizadas à altitude $H > 1000$ m acima do nível do mar	0,70	0,50	0,20
– Restantes Estados-Membros do CEN, para obras localizadas à altitude $H \leq 1000$ m acima do nível do mar	0,50	0,20	0
Acção do vento em edifícios (ver a EN 1991-1-4)	0,6	0,2	0
Temperatura (excepto incêndio) em edifícios (ver a EN 1991-1-5)	0,6	0,5	0

NOTA: Os valores de ψ poderão ser definidos no Anexo Nacional.
¹⁾ Para os países não mencionados, considerar as condições locais relevantes.

Tabela 5.1: Valores para os coeficientes ψ para edifícios adaptado de ((LNEC), 2009)

No ponto (4) do Anexo A1, do EC0, indica que “o projecto dos elementos estruturais (STR) que não envolva ações geotécnicas deverá ser verificado utilizando os valores de cálculo de ações indicados no Quadro A.1.2(B).” que se reproduz na Tabela 5.2:

Para este caso de estudo, a variável sobrecarga insere-se na categoria H, sendo um caso de uma cobertura não acessível.

Situções de projecto persistentes e transitórias	Acções permanentes		Acção variável de base da combinação ^{*)}	Acções variáveis acompanhantes ^{*)}	
	Desfavoráveis	Favoráveis		Principais (caso existam)	Outras
(Expressão 6.10)	$\gamma_{Gj,sup}G_{kj,sup}$	$\gamma_{Gj,inf}G_{kj,inf}$	$\gamma_{Q,1}Q_{k,1}$		$\gamma_{Q,2}\psi_{0,1}Q_{k,1}$
(Expressão 6.10a)	$\gamma_{Gj,sup}G_{kj,sup}$	$\gamma_{Gj,inf}G_{kj,inf}$		$\gamma_{Q,1}\psi_{0,1}Q_{k,1}$	$\gamma_{Q,2}\psi_{0,1}Q_{k,1}$
(Expressão 6.10b)	$\xi\gamma_{Gj,sup}G_{kj,sup}$	$\gamma_{Gj,inf}G_{kj,inf}$	$\gamma_{Q,1}Q_{k,1}$		$\gamma_{Q,2}\psi_{0,1}Q_{k,1}$

^{*)} As acções variáveis são as consideradas no Quadro A1.1.

NOTA 1: A escolha entre (6.10), ou (6.10a) e (6.10b), será feita no Anexo Nacional. No caso de (6.10a) e (6.10b), o Anexo Nacional poderá ainda modificar (6.10a) de forma a incluir apenas acções permanentes.

NOTA 2: Os valores de γ e de ξ poderão ser definidos no Anexo Nacional. Recomendam-se os seguintes valores para γ e ξ quando se utilizam as expressões (6.10), ou (6.10a) e (6.10b):
 $\gamma_{Gj,sup} = 1,35$
 $\gamma_{Gj,inf} = 1,00$
 $\gamma_{Q,1} = 1,50$ nos casos desfavoráveis (0 nos casos favoráveis)
 $\gamma_{Q,2} = 1,50$ nos casos desfavoráveis (0 nos casos favoráveis)
 $\xi = 0,85$ (de modo que $\xi\gamma_{Gj,sup} = 0,85 \times 1,35 = 1,15$).
 Ver também as EN 1991 a EN 1999 relativamente aos valores de γ a utilizar para as deformações impostas.

NOTA 3: Os valores característicos de todas as acções permanentes com a mesma origem são multiplicados por $\gamma_{G,sup}$, caso o efeito total das acções resultante seja desfavorável, e por $\gamma_{G,inf}$, caso o efeito total das acções resultante seja favorável. Por exemplo, todas as acções devidas ao peso próprio da estrutura poderão ser consideradas como sendo da mesma origem; tal também se aplica se estiverem envolvidos diferentes materiais.

NOTA 4: Para determinadas verificações, os valores de γ_s e de $\gamma_{Q,1}$ poderão ser subdivididos em γ_s e $\gamma_{Q,1}$ e no coeficiente de incerteza do modelo $\gamma_{\phi,s}$. Na maioria dos casos correntes, pode utilizar-se um valor de $\gamma_{\phi,s}$ variando entre 1,05 e 1,15, o qual pode ser modificado no Anexo Nacional.

Tabela 5.2: Valores de cálculo de ações adaptado de ((LNEC), 2009)

5.2.2 Ações variáveis: Vento

A ação do vento varia em função do tempo e atua diretamente em forma de pressões, sobre as superfícies exteriores de construções. No caso de estruturas fechadas, atua também em superfícies interiores, devido à porosidade da superfície exterior. Destas pressões resultam forças perpendiculares à superfície do edifício nos dos elementos de revestimento individuais. No caso de superfícies grandes, estas pressões podem desenvolver forças de atrito significativas, tangenciais à superfície. (CT 115 (LNEC), 2010)

Em seguida, determina-se a pressão do vento nas superfícies da cobertura, tanto a interior como a exterior.

Pressão dinâmica de pico

Pressão dinâmica de pico é determinada pela seguinte expressão, da seção 4.5 da EC1-1-4:

$$q_p(z) = \left[1 + 7 \times I_v(z) \times \frac{1}{2} \times \rho \times v_m^2(z) = c_e(z) \times q_b \right] \quad (5.4)$$

Em que:

$I_v(z)$ - intensidade de turbulência;

ρ - massa volúmica do ar, que depende de diversos fatores como a altitude, temperatura e pressão atmosférica da região durante as situações mais desfavoráveis de vento;

v_m - velocidade média do vento;

$c_e(z)$ - coeficiente de exposição;

q_b - pressão dinâmica de referência.

O valor recomendado pela norma para a massa volúmica do ar, ρ é de 1,25 kg/m³.

Segundo a seção NA.2.3 da norma o valor de $c_e(z)$ é:

$$c_e(z) = \frac{q_p(z)}{q_b} \quad (5.5)$$

A pressão dinâmica de referência q_b , é calculada através da seguinte expressão:

$$q_b = \frac{1}{2} \times \rho \times v_b^2 \quad (5.6)$$

Em que:

v_b - valor de referência da velocidade do vento.

O valor básico de referência da velocidade do vento é o valor característico da velocidade média do vento referida a períodos de 10 min, sem dependência da direção do vento e da época do ano, a uma altura de 10 m acima do nível do solo em terreno descampado com vegetação curta, e obstáculos isolados com uma distância superior pelo menos 20 vezes à sua altura. É determinado através da expressão 4.1 do EC1-1-4: (CT 115 (LNEC), 2010)

$$V_b = C_{dir} \times C_{season} \times V_{b,0} \quad (5.7)$$

Em que:

c_{dir} - coeficiente de direção, com valor básico recomendado 1,0, mas que de acordo com uma nota no Anexo Nacional, pode, eventualmente, ser considerada uma redução limitada a 15% deste valor básico, ou seja, $c_{dir} \geq 0,85$;

c_{season} - coeficiente de sazão com valor básico recomendado 1, mas que de acordo com a Nota 3 na NA-4.2(2)P, se a situação do projeto ocorrer na íntegra entre Maio e Agosto, pode ser considerada uma redução limitada a 10% deste valor básico, ou seja, $c_{season} \geq 0,90$;

$v_{b,0}$ - valor básico da velocidade de referência do vento de 27 m/s, de acordo com a Nota 2 da NA-4.2(1) do Anexo Nacional, para a Zona A, ou seja, as regiões do continente não situadas numa faixa costeira com 5 km de largura nem a altitudes superiores a 600 m.

Sendo assim, o valor básico de referência da velocidade do vento é:

$$v_b = 1,0 \times 1,0 \times 27 = 27 \text{ m/s} \quad (5.8)$$

e a pressão dinâmica de referência q_b , é dada pela seguinte expressão:

$$q_b = \frac{1}{2} \times 1,25 \times 27^2 = 455,625 \text{ N/m}^2 \quad (5.9)$$

Para o cálculo é ainda necessária a pressão dinâmica de pico à altura z , que depende da velocidade média das flutuações de curta duração da velocidade do vento.

A velocidade média do vento a uma altura z acima do solo $v_m(z)$ depende da rugosidade do

terreno, a sua orografia e de v_b :

$$v_m(z) = c_r(z) \times c_0(z) \times v_b \quad (5.10)$$

Em que:

$c_r(z)$ - coeficiente de rugosidade;

$c_0(z)$ - coeficiente de orografia recomendado igual a 1,0 salvo exceções descritas no EC1-1-4, seção 4.3.3, ou Anexo Nacional, caso os efeitos da orografia não possam ser desprezados, o coeficiente de orografia deve ser calculado através do procedimento descrito em A.3 para situações aí mencionadas, casos esses de colinas isoladas ou em cadeia, ou em falésias e escarpas; neste caso específico os efeitos da orografia podem ser desprezados, logo, $c_0(z)$ igual a 1,0;

Segundo EC1-1-4, para o coeficiente de rugosidade do terreno $c_r(z)$, as condicionantes para a variabilidade da velocidade média do vento no local do edifício são as seguintes:

- Altura acima do nível do solo;
- Rugosidade do terreno a barlavento do edifício, na direção do vento considerada.

O coeficiente de rugosidade à altura z é definido pela expressão (4.4) do EC1-1-4:

$$c_r(z) = k_r \times \frac{z}{z_0} \text{ para } z_{min} \leq z \leq z_{max} \quad (5.11)$$

$$c_r(z) = c_r(z_{min}) \text{ para } z \leq z_{min} \quad (5.12)$$

Segundo o Quadro NA-4.1 do Anexo Nacional do EC1-1-4, os valores dos parâmetros z_{min} e z_0 são indicados pela tabela 5.3:

Categoria do terreno	$z_0[m]$	$z_{min}[m]$
IV Zona na qual pelo menos 15% da superfície está coberta por edifícios com uma altura média superior a 15 m	1,0	15

Tabela 5.3: Categorias de terreno e respetivos parâmetros adaptado de (CT 115 (LNEC), 2010)

k_r - coeficiente de terreno dependente do comprimento de rugosidade z_0 , dado pela seguinte expressão:

$$k_r = 0,19 \times \left(\frac{z_0}{0,11}\right)^{0,07} = 0,19 \times \left(\frac{1,0}{0,05}\right)^{0,07} = 0,24 \quad (5.13)$$

Então, o coeficiente de rugosidade à altura z é dado pela seguinte expressão:

$$c_r(z) = 0,24 \times \ln\left(\frac{15}{1,0}\right) = 0,65 \quad (5.14)$$

e a velocidade média do vento a uma altura z acima do solo vale

$$v_m(z) = 0,65 \times 1,0 \times 27 = 17,55 \text{ m/s} \quad (5.15)$$

Segundo a secção 4.do EC1-1-4, a intensidade de turbulência à altura z , vale:

$$I_V(z) = \frac{\Sigma_V}{v_m(z)} = \frac{k_r \times v_b \times k_l}{c_0(z) \times \ln(z_{\min}/z_0)} = \frac{0,24 \times 27 \times 1,0}{1,0 \times \ln(15/1,0)} = 2,39 \quad (5.16)$$

Sendo assim, a pressão dinâmica de pico à altura z , $q_p(z)$, vale:

$$q_p(z) = [1+7 \times I_V(z)] \times \frac{1}{2} \times \rho \times v_m^2(z) = [1 + 7 \times 2,39] \times \frac{1}{2} \times 1,25 \times 17,55^2 = 3413,05 \text{ N/m}^2 = 3,4 \text{ kN/m}^2 \quad (5.17)$$

Pressão exercida pelo vento em superfícies

Segundo a expressão (5.1) do EC1-1-4, a pressão exercida pelo vento nas superfícies exteriores é dada por:

$$W_e = q_p(z_e) \times c_{pe} \quad (5.18)$$

Em que:

$q_p(z_e)$ - pressão dinâmica do pico;

z_e - altura de referência para a pressão exterior, dada pela secção 7 da mesma norma;

c_{pe} - coeficiente de pressão para a pressão exterior; ver secção 7 da mesma norma.

E para pressões exercidas pelo vento nas superfícies interiores de um edifício, w_i , deverá ser obtida através da expressão:

$$W_i = q_p(z_i) \times c_{pi} \quad (5.19)$$

Em que:

$q_p(z_i)$ - valor para pressão dinâmica de pico;

z_i - valor para altura de referência para a pressão interior, dada pela secção 7 da mesma norma;

c_{pi} - valor de coeficiente de pressão interior, dada pela secção 7 da mesma norma.

Pelo descrito pelo EC1-1-4, na secção 5.2, no ponto (3), numa cobertura, a pressão resultante exercida é a diferença entre as pressões que atuam sobre as faces opostas tendo em conta os sinais. A pressão exercida contra a superfície é positiva, e a pressão atuando com o sentido oposto, que afasta a superfície, é uma pressão negativa, ver Figura 5.1.

Para o cálculo dos coeficientes de pressão exterior, o EC1-1-4, na secção 7, diz que estes coeficientes dependem das dimensões da superfície carregada A , que representa a área de construção onde atua a ação do vento na secção a ser calculada. (CT 115 (LNEC), 2010)

Os coeficientes $c_{pe,1}$ e $c_{pe,10}$ correspondem as pressões exteriores para superfícies carregadas A de 1 m^2 e de 10 m^2 , respetivamente, sendo que são coeficientes locais e coeficientes globais, também respetivamente. (CT 115 (LNEC), 2010)

Para o cálculo de elementos de pequena dimensão, tal como, revestimento e elementos de cobertura, com uma área igual ou inferior a 1 m^2 , utilizam-se os coeficientes $c_{pe,1}$. Para o cálculo da estrutura resistente global de edifícios, utilizam-se os coeficientes $c_{pe,10}$. (CT 115 (LNEC), 2010)

Zona	A		B	
h/d	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$
5	-1,2	-1,4	-0,8	-1,1

Tabela 5.4: Valores dos coeficientes de pressão exterior para as paredes verticais deste edifício em estudo adaptado do Quadro 7.1 de CT 115 (LNEC) (2010)

No caso de a ação do vento incidir sobre o edifício na direção de 90° , então $b=5,5$ metros e $h=15$ metros, então $e=\min\{5,5;30\}=5,5$ metros.

Verifica-se que e é menor que d , pois d igual a 8,5 metros, e concluindo-se que é necessário ter em consideração as cinco zonas, A, B, C, D e E como ilustra a Figura 5.3.

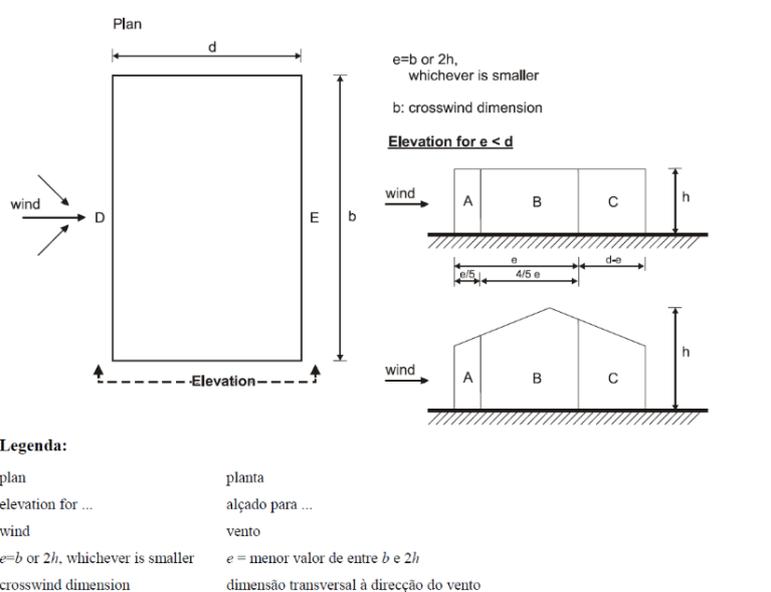


Figura 5.3: Pressão exterior com a ação do vento a incidir na direção ortogonal 90° , sobre as zonas das paredes verticais, adaptado de CT 115 (LNEC) (2010)

Neste caso h/d é igual a 1,76, assume-se os valores para h/d igual a 1.

Zona	A		B		C		D		E	
h/d	$C_{pe,100}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$
1	-1,2	-1,4	-0,8	-1,1	-0,5		+0,8	+1,0	-0,5	

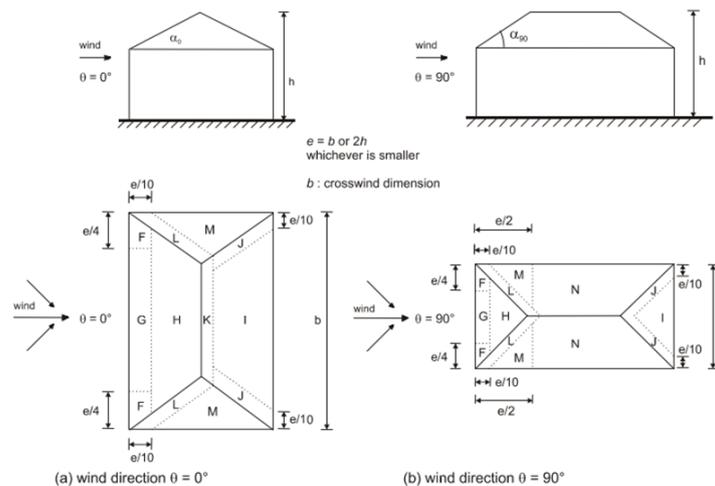
Tabela 5.5: Valores recomendados dos coeficientes de pressão exterior para paredes verticais deste edifício com a direção ortogonal 90° , adaptado de (CT 115 (LNEC), 2010)

Ângulo de inclinação α_{90}	Zonas; Direção do vento $\theta=0^\circ$ e $\theta=90^\circ$																	
	F		G		H		I		J		K		L		M		N	
	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$
15°	-0,9	-2	-0,8	-1,5	-0,3	0,2	-0,5	-1,0	-1,5	-1,2	-2	-1,4	-2	-0,6	-1,2	-0,3		
23,9°	-0,8	-1,875	-0,725	-1,5	-0,275	0,275	-0,475	-0,925	-1,425	-1,025	-1,625	-1,4	-2	-0,65	-1,2	-0,275		
30°	-0,5	-1,5	-0,5	-1,5	-0,2	0,4	-0,4	-0,7	-1,2	-0,5	-1,4	-2	-0,8	-1,2	-0,2			

Tabela 5.6: Coeficientes de pressão exterior para coberturas de quatro vertentes

Coeficientes de pressão para cobertura de quatro vertentes

Segundo a subsecção 7.2.6, do EC1-1-4, a cobertura também se divide por zonas conforme representa a Figura 5.4.



Legenda:

- wind / vento
- wind direction $\theta=0^\circ$ / direcção do vento $\theta=0^\circ$
- wind direction $\theta=90^\circ$ / direcção do vento $\theta=90^\circ$
- $e = b$ or $2h$, whichever is smaller / $e =$ menor valor de entre b e $2h$
- crosswind dimension / dimensão transversal à direcção do vento

Figura 5.4: Zonas a ter em conta em cobertura de quatro vertentes, quer em direção vento $\theta = 0^\circ$ quer em direção vento $\theta = 90^\circ$, adaptado de CT 115 (LNEC) (2010)

A altura de referência z_e deve ser considerada igual a h , de acordo com o ponto (2) da subsecção 7.2.5 do EC1-1-4.

Para a direção do vento 0° , $b=8,5$ metros, e $h=15$ metros, sendo assim, $e=\min\{8,5;30\}=8,5$ metros.

Para a direção ortogonal do vento a 90° , $b=5,5$ metros e $h=15$ metros, sendo que, $e = \min\{5,5;30\}=5,5$ metros.

Por consulta do Quadro 7.5, pode-se retirar os coeficientes de pressão exterior para coberturas de quatro vertentes, para as direções ortogonal do vento a 0° e para as direções ortogonal do vento a 90° , e como o ângulo de inclinação α , para este edifício em estudo é de $23,9^\circ$, tem de se proceder a uma interpolação linear de valores, que resultam nos valores apresentados na Tabela 5.6.

Analisando o quadro pode-se observar, que para ângulo de inclinação de $23,9^\circ$, existem valores para os coeficientes positivos e valores negativos. Isto deve-se ao facto, segundo a nota 1 do quadro 7.5, do EC1-1-4, de com $\theta = 0^\circ$ e para ângulos de inclinação entre $\alpha = \pm 5^\circ$ e $\alpha = \pm 45^\circ$, a pressão variar rapidamente entre valores positivos e negativos quando o vento está virado a barlavento. Para estas coberturas, é necessário considerar dois casos: caso com todos os valores positivos e outro caso com todos os valores negativos., não sendo permitida a mistura de valores negativos com positivos. (CT 115 (LNEC), 2010)

Pressão interior

De acordo com o que pode ler na subsecção 7.2.9, ponto (1), do EC1-1-4, as pressões interiores e exteriores devem ser tidas em conta como se atuassem simultaneamente. Como tal, deve-se ter em conta a combinação mais desfavorável das pressões interiores e exteriores. (CT 115 (LNEC), 2010)

Ao contrário da definição dos valores de $c_{pe,10}$, a definição dos c_{pi} , torna-se mais complexa. Este caso de estudo, tal como menciona no ponto (5) do EC1-1-4, é um edifício com face predominante, sendo que “a pressão interior deverá ser considerada igual a uma fração da pressão exterior ao nível das aberturas na face predominante.” (CT 115 (LNEC), 2010)

Como tal, o valor de c_{pi} , para quando a área das aberturas na face predominante é igual ao dobro da área das aberturas nas faces restantes, é dado por

$$c_{pi} = 0,75 \times c_{pe} \quad (5.20)$$

Para quando a área das aberturas na face predominante é igual, a pelo menos, três vezes a área das aberturas nas faces restantes”, então é dada pela seguinte expressão:

$$c_{pi} = 0,90 \times c_{pe} \quad (5.21)$$

“Em que c_{pe} é o valor do coeficiente de pressão exterior ao nível das aberturas na face predominante. Quando estas aberturas se localizam em zonas com valores diferentes das pressões exteriores, deverá utilizar-se um valor médio, ponderado em área, para c_{pe} .” (CT 115 (LNEC), 2010)

Quando o vento incide sobre a direção $\theta = 0^\circ$, a face predominante é atravessada pelas zonas A e B, sendo que a zona B tem mais área de aberturas, o valor para $c_{pe,10} = -0,8$. Por outro lado, quando o vento incide sobre a direção $\theta = 90^\circ$, a face predominante é atravessada pela zona D, e o valor para $c_{pe,10} = +0,8$.

Após definição de faces predominantes e zonas a considerar, pode-se apresentar os valores para os coeficientes de pressão interior c_{pi} , para cobertura de quatro vertentes segundo as direções do vento $\theta = 0^\circ$ e $\theta = 90^\circ$, na tabela 5.7.

Segundo a nota 1 do Quadro 7.5, do EC1-1-4, para a direção $\theta = 0^\circ$, e inclinações $\alpha = \pm 5^\circ$ e $\alpha = \pm 45^\circ$, as combinações de estudadas devem ser as seguintes:

Combinação 1 – Valores todos negativos de $c_{pe,10}$ para as zonas F, G, H, I, J, K, L, M e N;

Combinação 2- Valores todos positivos de $c_{pe,10}$ para as zonas F, G, H, I, J, K, L, M e N.

Zona	B	D
θ	c_{pi}	c_{pi}
0°	-0,72	
90°		+0,72

Tabela 5.7: Valores dos coeficientes de pressão interior, c_{pi} , para cobertura de quatro vertentes adaptado de (CT 115 (LNEC), 2010)

Como tal resulta da Tabela 5.8 , com os resultados dos coeficientes de pressão para as combinações descritas.

	Ângulo de inclinação	Zonas; Direção do vento $\theta=0^\circ$ e $\theta=90^\circ$								
		F	G	H	I	J	K	L	M	N
		$c_{pe,10}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,10}$
Combinação 1	23,9°	-0,80	-0,73	-0,28	-0,48	-0,93	-1,03	-1,40	-0,60	-0,30
Combinação 2		0,23	0,32	+0,25	+0,00	+0,00	+0,00	+0,00	+0,00	+0,00

Tabela 5.8: Valores de coeficientes de pressão para combinação 1 e 2, em cobertura de quatro vertentes, nas direções indicadas.

Após a definição completa dos coeficientes de pressão exterior e interior sobre as superfícies de cobertura, para a direção vento $\theta = 0^\circ$, determinam-se as pressões resultantes exercidas pelo vento, w , para cada zona da cobertura, ver Tabela 5.9.

Pressão exercidas pelo vento, w (kN/m ²)									
Zona	F	G	H	I	J	K	L	M	N
	w	w	w	w	w	w	w	w	w
Combinação 1	-0,272	-0,017	1,513	0,833	-0,697	-1,037	-2,312	0,238	1,513
Combinação 2	3,23	3,536	3,298	2,448	2,448	2,448	2,448	2,448	2,448

Tabela 5.9: Valores de pressão exercida pelo vento nas diferentes zonas, segundo a direção $\theta = 0^\circ$

E para a direção ortogonal do vento $\theta = 90^\circ$, obtém-se os seguintes valores de pressão exercida pelo vento nas diferentes zonas da cobertura, expostos na Tabela 5.10.

Pressão exercidas pelo vento, w (kN/m ²)									
Zona	F	G	H	I	J	K	L	M	N
	w								
Combinação 1	-5,168	-4,913	-3,383	-4,063	-5,593	-5,933	-7,208	-4,658	-3,383
Combinação 2	-1,666	-1,36	-1,598	-2,448	-2,448	-2,448	-2,448	-2,448	-2,448

Tabela 5.10: Valor de pressão exercida pelo vento nas diferentes zonas, segundo a direção do vento $\theta = 90^\circ$

5.3 Estados Limites de Utilização

Os estados limites de serviço ou utilização referem-se aos estados em que, uma vez ultrapassados, a estrutura deixa de estar em condições de serviço. Estes estados limites manifestam-se

através de deformações ou deslocamentos que possam prejudicar a sua utilização normal, bem como afetar elementos não estruturais, incluindo vibrações desconfortáveis.

A seção 6.5 do EC0, relativa aos estados limites de utilização, indica que se deve verificar:

$$E_d \leq C_d \quad (5.22)$$

Em que:

E_d valor de cálculo dos efeitos das ações especificadas no critério de utilização, determinado com base na combinação em causa.

C_d valor de cálculo correspondente ao valor limite do critério de utilização;

5.3.1 Combinação característica

$$E_d = E \{ G_{k,j}; P; Q_{k,1}; \Psi_{0,i} Q_{k,i} \} \quad j \geq 1; i > 1 \quad (5.23)$$

Ou

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + "P" + "Q_{k,1}" + \sum_{i > 1} \psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (5.24)$$

Os valores do coeficiente Ψ são apresentados no quadro mencionado anteriormente, Quadro A.1.1. do EC 0; para a Categoria H: coberturas são 0 e para o vento $\psi_0 = 0,6$; $\psi_1 = 0,2$; $\psi_2 = 0$.

Normalmente a combinação característica é normalmente utilizada para os estados limites irreversíveis, segundo nota do EC0.

5.3.2 Combinação frequente

$$E_d = E \{ G_{k,j}; P; Q_{k,1}; \Psi_{1,i} Q_{k,1}; \Psi_{2,i} Q_{k,i} \} \quad j \geq 1; i > 1 \quad (5.25)$$

Ou

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + "P" + " \Psi_{1,1} Q_{k,1} " + \sum_{i > 1} \psi_{2,i} Q_{k,i} \quad (5.26)$$

$\Psi_{1,1}$ - coeficiente para a determinação do valor frequente da ação variável base.

$\psi_{2,i}$ - coeficiente para a determinação do valor frequente da ação variável acompanhante.

5.3.3 Combinação quase permanente

Segundo o ponto 2 da seção 6.5.3 do EC0 a combinação de ações quase permanente é dada pelas seguintes expressões:

$$E_d = E \{ G_{k,j}; P; \Psi_{2,i} Q_{k,i} \} \quad j \geq 1; i > 1 \quad (5.27)$$

Ou

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + "P" + \sum_{i > 1} \psi_{2,i} Q_{k,i} \quad (5.28)$$

Em que:

$\psi_{2,i}$ - coeficiente para a determinação do valor quase permanente da ação variável.

De acordo com o quadro A.1.1. do EC0, acima apresentado, o valor de ψ_2 para sobrecargas em coberturas de edifícios é igual a zero.

O EC0, em Anexo 1, A1.4.1 no ponto (1), menciona que para os estados limites de utilização, os coeficientes parciais relativos às ações tomam-se iguais a 1,0. A Tabela 5.11 indica os valores de cálculo das ações em combinação de ações.

Combinação	Ações permanentes G_d		Ações variáveis Q_d	
	Desfavoráveis	Favoráveis	De base da combinação	Outras
Característica	$G_{kj,sup}$	$G_{kj,inf}$	$Q_{k,1}$	$\psi_{0,1} Q_{k,i}$
Frequente	$G_{kj,sup}$	$G_{kj,inf}$	$\psi_{1,1} Q_{k,1}$	$\psi_{2,1} Q_{k,i}$
Quase-permanente	$G_{kj,sup}$	$G_{kj,inf}$	$\psi_{2,1} Q_{k,1}$	$\psi_{2,1} Q_{k,i}$

Tabela 5.11: Valores de cálculo das ações a utilizar em combinação de ações dos estados limites de utilização

A verificação dos estados limite de serviço é efetuada através de valores médios finais do módulo de elasticidade, módulo de distorção, e do módulo de deslizamento, para o cálculo da deformação final.

O EC5, subsecção 7.2, indica os valores limites para as deformações que resultam de uma determinada combinação de ações, de acordo com o esquema da Figura 5.5:

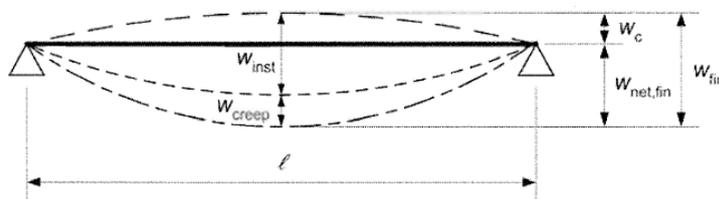


Figura 5.5: Componentes de deformação em elementos de madeira, adaptado de (CEN, 2008)

Em que:

w_c - Contraflecha (caso exista);

w_{inst} - Deformação instantânea;

w_{creep} - Deformação por fluência;

w_{fin} - Deformação final;

$w_{net,fin}$ - Deformação final, depois de subtrair a eventual contraflecha aplicada.

O valor $w_{net,fin}$ é dado pela seguinte expressão:

$$w_{net,fin} = w_{inst} + w_{creep} - w_c = w_{fin} - w_c \quad (5.29)$$

Estas deformações devem ser determinadas para a combinação de ações usada para a determinação das deformações de curto prazo. (Dias,2012)

Ações permanentes -

$$w_{fin}=w_{inst}+w_{creep}= w_{inst}(1+k_{def}) \quad (5.30)$$

Ações quase permanentes -

$$w_{fin}=w_{inst}+w_{creep}= w_{inst}(1+\Psi_2k_{def}) \quad (5.31)$$

Os valores de ψ_2 são definidos no Quadro A1.1 do EC0, ver Figura 5.1.

O valor de k_{def} , é definido na tabela 3.2 do EC5 (CEN, 2008), ver Tabela 5.12.

Material	Norma	Classe de Serviço		
		1	2	3
Madeira Maciça	EN 14081-1	0,6	0,80	2,00

Tabela 5.12: Valores de k_{def} , adaptado de EC5, (CEN, 2008).

A tabela 5.13 apresenta os valores limite definidos segundo o EC5, para a deformação de vigas com um determinado vão, ℓ .

Condições de apoio da viga	w_{inst}	$w_{net,fin}$	w_{fin}
Simplemente apoiada	$\ell/300$ a $\ell/500$	$\ell/250$ a $\ell/350$	$\ell/150$ a $\ell/300$
Consola	$\ell/150$ a $\ell/250$	$\ell/125$ a $\ell/175$	$\ell/175$ a $\ell/150$

Tabela 5.13: Valores limites para a deformação das vigas adaptado de (CEN, 2008)

5.4 Propriedades resistentes dos materiais

As propriedades mecânicas dos materiais e os seus valores característicos, para as diferentes classes de resistência, encontram-se na norma EN 338 para madeira maciça.

As propriedades resistentes dos materiais são minoradas através da seguinte equação:

$$X_d=k_{mod} \times \frac{X_k}{\gamma_M} \quad (5.32)$$

Em que:

X_k – valor característico das propriedades resistentes dos materiais, calculadas através da classe resistente a que pertence o material;

γ_M - valor de coeficiente de segurança dos materiais, definido na Tabela 2.3 do EC5 , que se reproduz na Tabela 5.14;

k_{mod} - valor de coeficiente de modificação que tem em conta o efeito da duração de carga e da classe de serviço em que o elemento de madeira está aplicado, ver Tabela 5.15.

O valor de k_{mod} pode ser determinado para os diferentes produtos de madeira, seja maciça ou derivados de madeira, na Tabela 5.15:

Combinações fundamentais	γ_M
Madeira maciça	1,3
Madeira lamelada colada	1,25
LVL, contraplacado e OSB	1,20
Ligações	1,3
Ligadores em placas metálicas perfuradas	1,25
Combinações acidentais	1,0

Tabela 5.14: Fatores de segurança para as propriedades dos materiais, retirado de (CEN, 2008)

Material	Norma	Classe de Serviço	Ação Permanente	Ação de longa duração	Ação de média duração	Ação de curta duração	Ação instantânea
Madeira Maciça	EN 14081-1 (2005)	1	0,6	0,7	0,8	0,9	1,1
		2	0,6	0,7	0,8	0,9	1,1
		3	0,5	0,55	0,65	0,7	0,9

Tabela 5.15: Valores de k_{mod} adaptado de EC5

Em combinações de ações em que a duração de ações não é igual para todas as ações, o k_{mod} deve ser determinado considerando a ação de menor duração. (Dias et al., 2009)

Contudo na modelação numérica, o software Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2021™, permite indicar a duração de ação para cada tipo de carga submetida no modelo, o que possibilita uma indicação mais rigorosa e descarta-se a opção da média duração prevista em teoria.

Para elementos de peças de madeira com seção transversal de pequenas dimensões, o EC5 recomenda que se use um coeficiente de majoração k_h , na determinação do valor de cálculo da resistência à flexão e tração, porque as peças de madeira de menor dimensão têm um menor número de nós que condicionam de forma muito significativa a resistência à flexão e tração. Os valores para este coeficiente de majoração k_h são apresentados na tabela 5.16.

Material	Dimensão - esforço	Dimensão de referência	k_h
Madeira maciça com $\rho_k \leq 700 \text{ kg/m}^3$	Altura - flexão	< 150 mm	$\min \left\{ \left(\frac{150}{h} \right)^{0,2}, 1,3 \right\}$
	Largura - Tração		
Madeira lamelada colada	Altura - flexão	< 600 mm	$\min \left\{ \left(\frac{600}{h} \right)^{0,1}, 1,1 \right\}$
	Largura - tração		

Tabela 5.16: Quadro de valores para k_h adaptado de (Dias, 2012)

Assim, nos elementos em que este coeficiente de majoração é aplicável, o valor de cálculo das propriedades resistentes é dado por:

$$X_d = k_h \times k_{mod} \times \frac{X_k}{\gamma_M} \quad (5.33)$$

5.5 Classes de serviço e durações de ações

A duração de cargas influencia diretamente a capacidade resistente das estruturas de madeira, porque a resistência da madeira tende a diminuir proporcionalmente à duração de carga. Quanto maior o período de atuação de cargas maior é a redução da capacidade resistente da madeira. Isto deve-se à expulsão de água existente nas fibras de madeira durante as ações de carga. Já o módulo de elasticidade não se altera em relação com o tempo. (Correia, 2009)

De acordo com o EC5, há classes de duração de ações diferentes que podem ocorrer durante o período de vida útil da estrutura de madeira, ver Tabela 5.17.

Classe de duração	Período de atuação	Exemplos de ações
Permanente	Superior a 10 anos	Peso Próprio
Longa Duração	Entre 6 meses a 10 anos	Mobiliário, Produtos armazenados
Média Duração	Entre 1 semana e 6 meses	Sobrecarga de pessoas / de utilização
Curta Duração	Inferior a 1 semana	Vento, Neve
Instantânea	Instantânea	Vento, Ações Acidentais

Tabela 5.17: Classe de Duração de Ações, adaptado de (Dias et al., 2009)

Relativamente às classes de serviço, existem 3, de acordo com o teor de humidade e condições ambientais a que a madeira está submetida ao longo do seu tempo útil de vida, ver Quadro 20, onde W (%) é o teor de água de equilíbrio.

Classe	Condições	W (%) (teor de água de equilíbrio)	Exemplos de situações
1	Corresponde a temperatura ambiente de 20 graus Celsius e uma humidade relativa do ar que excede os 65% num pequeno número de semanas no ano	12	Ambientes interiores sujeitos a aquecimento
2	Corresponde a uma temperatura de 20 graus Celsius e uma humidade relativa do ar que excede os 85% num pequeno número de semanas no ano	20	Ambiente exteriores sem exposição direta a focos de humidade ou contacto com o solo, exemplo, alpendres cobertos, coberturas ventiladas
3	Condições climáticas que permitem teores de água na madeira com valores superior aos da classe 2	>20	Ambientes onde existe exposição direta a focos de humidade e ou contacto com o solo

Tabela 5.18: Classes de serviço de acordo com EC5 para as estruturas de madeira, adaptado de (Dias et al., 2009)

Para este caso de estudo assume-se para a cobertura **classe de serviço 2**, devido à presença de humidade, $W=20\%$, e por ser ventilada.

5.6 Classes de Qualidade

A classificação de madeiras tem como função definir a qualidade estrutural da madeira de forma genérica, em função das suas características físicas e de resistência. O que facilita a especificação de madeiras para os projetos, bem como uma exposição da relação qualidade-preço. Esta é uma metodologia fulcral de credenciação do processo construtivo das estruturas de madeira. (Luzio, 2011)

A classe de qualidade dos elementos estruturais pode ser determinada pela observação visual, pela identificação e mapeamento dos defeitos naturais da madeira. Esta avaliação toma com base a norma europeia EN 14081 que estabelece requisitos gerais para a classificação visual. (Bastos, 2011)

Os principais defeitos a limitar, para reduzir a afetação na capacidade de resistência das peças de madeira são (Luzio, 2011):

- Número e localização de nós;
- Desvio do fio de madeira em relação ao eixo da peça;
- Descaio (cantos gastos nas peças);
- Empenos;
- Fendas.

A norma portuguesa NP4305 é aplicável à madeira de pinho bravo português, no entanto para outras espécies tem de se recorrer a normas europeias. (Bastos, 2011) No caso da presente cobertura, em Castanho, interessa a EN 975-2 (2004) para espécies folhosas.

Quanto à classificação da madeira de Castanho, algumas fontes bibliográficas defendem a utilização da norma de classificação italiana UNI 11035-1:2003, que tanto permite classificar madeiras de espécie folhosa como resinosa, que são as mais utilizadas em Itália, particularmente o Castanho. Esta norma estabelece que todas as espécies folhosas têm uma classe única de qualidade S, caracterizada na Tabela 5.19.

Propriedades mecânicas e densidade	Espécie de folhosa e classe visual S, Castanho
Resistência à flexão (5%) [MPa] $f_{m,k}$	28
Resistência à tração paralela ao fio (5%) [MPa] $f_{t,0,k}$	17
Resistência à tração perpendicular ao fio (5%) [MPa] $f_{t,90,k}$	0,5
Resistência à compressão paralela ao fio (5%) [MPa] $f_{c,0,k}$	22
Resistência à compressão perpendicular ao fio (5%) [MPa] $f_{c,90,k}$	3,8
Resistência ao corte (5%) [MPa] $f_{v,k}$	2,0
Módulo de elasticidade paralela ao fio (médio) [MPa] $E_{0,mean}$	11000
Módulo de elasticidade paralelo ao fio (5%) [MPa] $E_{0,05}$	8000
Módulo de elasticidade perpendicular ao fio (médio) [MPa] $E_{90,mean}$	730
Módulo de distorção médio [MPa] G_{mean}	950

Tabela 5.19: Características mecânicas da espécie folhosa Castanho segundo a UNI 11035-2: 2003

Todos os elementos da cobertura, tais como as ripas, as madres e o forro, foram considerados de Castanho.

6 Verificação de segurança segundo o Eurocódigo 5

A verificação de segurança é efetuada através do EC5, um método baseado nos estados limites, com coeficientes parciais de segurança. Os valores das tensões/deformações são determinados através das combinações de ações apropriadas, definidas no EC0 (EC0), e os valores das resistências estão definidas no EC5, mais exatamente, a “EN 1995-1-1”, que descreve as regras gerais para estruturas de madeira.

Na análise de estruturas de madeira é sempre linear elástica, não se considerando a análise plástica, uma vez que a natureza da madeira é frágil. Só nos elementos sujeitos a esforços à compressão se considera normalmente a não linearidade. (Correia, 2009)

Para o dimensionamento de estruturas de madeira, sejam elas novas ou existentes (reabilitação), assume-se frequentemente que as ligações das asnas de madeira são articuladas, embora não tenham rigidez desprezável. Noutras situações é necessário determinar um valor adequado para o valor de rigidez das ligações, principalmente em sistemas estruturais antigos, onde existe grande variabilidade de inércias. (Lopes, 2007)

Nos casos mais comuns, a flexibilidade das ligações pode modelar-se através de rótulas ou ligações rígidas, consoante a ligação tenda para ser mais articulada ou mais rígida. Se houver dúvidas relativamente às características de deformabilidade da ligação, deve-se modelar a sua rigidez de acordo com o EC5. (Correia, 2009)

Na verificação de segurança em relação aos ELU é necessário considerar o efeito da encurvadura e do bambeamento. (Correia, 2009)

O método simplificado apenas pode ser utilizado se as condicionantes a seguir descritas forem cumpridas:

- Não existência de reentrâncias nas pernas;
- A largura de apoio estar situada no comprimento a_1 e a distância a_2 ser menor que $\frac{a_1}{3}$ ou 100 mm (Figura 6.1);
- A altura da asna é maior que 15% do vão e 10 vezes maior que a altura da seção da perna.

Sendo estas condições cumpridas, então pode-se calcular o esforço axial das barras admitindo que as barras têm todos os nós rotulados.

O caso de estudo não cumpre com os requisitos para utilização do método simplificado.

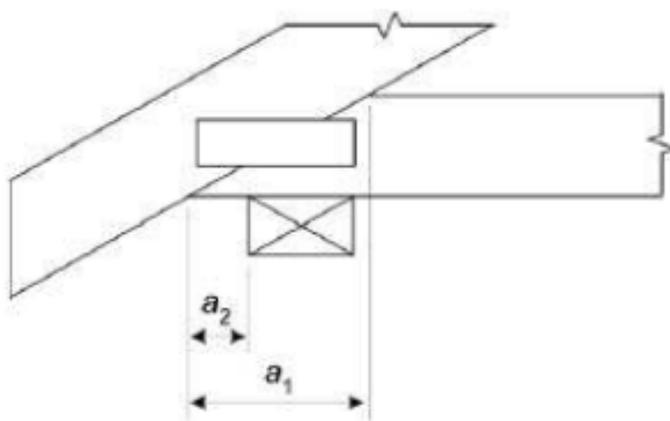


Figura 6.1: Geometria de apoio adaptado de (Correia, 2009)

6.1 Quantificação de ações

Neste capítulo consideram-se os seguintes cenários:

Caso 0: Ações pré-existentes na estrutura de cobertura constituída por asnas de madeira;

Caso 1: Ações existentes hoje na estrutura de cobertura constituída por asnas de madeira;

Caso 2: Ações previstas no projeto previsto para este caso de estudo fornecido pelo (NCREP, 2020);

Caso 3: Ações definitivas previstas durante a execução da obra;

Caso 4: Ações contabilizadas para a solução estrutural.

Em resultado da inspeção visual, e apesar de não ter sido realizado nenhum ensaio laboratorial, assume-se neste capítulo que os elementos estruturais são em madeira maciça da espécie Castanho (*Castanea sativa*, Mill).

6.1.1 Ações permanentes

Conforme o EC0, as ações permanentes abrangem o peso próprio de todas as peças constituintes da estrutura de cobertura em madeira e o peso próprio das telhas, pois não sofrem alteração ao longo do período útil de vida.

Caso 0:

Ações na cobertura:

Madeira maciça (D30)	6,4 kN/m ³
----------------------	-----------------------

- Peso Próprio da telha Lusa = 0,50 kN/m²;
- Peso do ripado e varas = 0,21 kN/m²;
- Madres em madeira maciça classe D30
- Pernas e linhas das asnas em madeira maciça classe D30

- Peso próprio do forro em madeira maciça D30, com 1,6 cm de espessura, para suportar as varas e ripas, que cobre toda a área de planta de cobertura:

$$pp_{forro} = \gamma_{D30} \times espessura \quad (6.1)$$

Em que:

γ_{D30} - peso volúmico da madeira maciça de classe D30.

$$pp_{forro} = 6,4 \times 0,016 = 0,1024 \text{ kN/m}^2 \quad (6.2)$$

Caso 1:

Ações na cobertura:

Para este caso 1, a cobertura sofre uma perda de 15% da quantidade de ripado e varas, o que se traduz na redução da ação permanente do peso próprio do ripado e varas. Relativamente ao resto do peso próprio das estruturas de asnas, sofre uma redução nas seções transversais de 30%, estudadas no capítulo da modelação estrutural.

- Peso próprio da telha Lusa = 0,50 kN/m²;
- Peso próprio do ripado e varas = 0,75 × 0,21 kN/m² = 0,16 kN/m² ;
- Madres em madeira maciça classe D30
- Pernas e linhas das asnas em madeira maciça classe D30

Para o peso próprio do forro existente, também se aplica a mesma metodologia de redução, uma vez que se encontra deteriorado em grande parte da sua superfície, e como tal assume-se uma redução de 10% do seu peso próprio em relação ao Caso 0, caso estudado em condições ideais.

$$\bullet \quad pp_{forro} = 6,4 \times 0,016 \times 90\% = 0,092 \text{ kN/m}^2$$

Caso 2:

- Peso específico dos elementos em madeira maciça D30: 6,4 kN/m³;
- Peso próprio das telhas, ripas e varas: 0,65 kN/m²;

Caso 3:

Após visita ao local da reabilitação do edifício, onde se encontrava já em modo execução dos trabalhos previstos em projeto desenvolvido por (NCREP, 2020), e após comunicação com a direção de obra e por decisão tomada em unanimidade entre a equipa de projeto e a construtora, optou-se por uma decisão de revestimento em placa OSB com fins de melhoramento térmico, com 3 cm de espessura, painel XPS "Roofmate" com 8 cm de espessura, sobreposto com painel sandwich de poliuretano ondulado com 3 cm de espessura com a sobreposição das telhas lusa aba-canudo colocadas com o auxílio de ripas em PVC de 2 cm de altura transversais espaçadas de 0,38 metros.

As telhas de aba-canudo são atualmente bastante utilizadas pois a sua geometria permite um efeito estético semelhante ao encontrado na construção antiga portuguesa, com telha canudo.

- Peso Próprio da telha Lusa = $0,50 \text{ kN/m}^2$;
- Peso do ripado = $0,21 \text{ kN/m}^2$;
- Peso Próprio do Painel sandwich poliuretano da marca ERFI™ ondulado com 3 ondas, e com 3 cm de espessura = $1,39 \text{ kN/m}^2$
- Peso Próprio da Placa OSB 3 250x125x22mm = $5,3 \times 0,022 = 0,12 \text{ kN/m}^2$
- Placa rígida de espuma de poliestireno extrudido (XPS) “Roofmate”, com 8 cm de espessura = $0,35 \times 0,08 = 0,028 \text{ kN/m}^2$

Caso 4:

- Peso Próprio: Telhas, ripas e varas = $0,71 \text{ kN/m}^2$;
- Peso Próprio: Placa rígida de espuma de poliestireno extrudido (XPS) com espessura de 6,0 cm = $0,35 \times 0,06 = 0,021 \text{ kN/m}^2$;
- Peso Próprio da Placa OSB KRONOPLY 3 = $6,4 \times 0,022 = 0,14 \text{ kN/m}^2$, com as características técnicas representadas nas Tabelas 6.1 e 6.2:

VÃOS MÁXIMOS ENTRE APOIOS (EM CM) EM FUNÇÃO DAS CARGAS E DAS ESPESURAS

Espaisseur (mm)	KRONOPLY 2 Utilização em ambiente seco (classe serviço 1)					KRONOPLY 3 Utilização em ambiente seco (classe serviço 1)					KRONOPLY 3 Utilização em ambiente húmido (classe serviço 2)																									
	12	15	18	22	25	12	15	18	22	25	12	15	18	22	25																					
Carga Uniformemente Repartida (daN/m ²)	150	40	50	59	72	82	46	57	68	83	94	44	55	65	79	90																				
	200	36	46	54	66	75	42	53	62	76	87	40	50	60	73	83																				
	250	34	43	51	62	70	39	49	58	71	81	38	47	56	68	78																				
	350	31	38	46	56	63	35	44	53	64	73	34	42	50	62	70																				
	400	29	37	44	53	61	34	42	50	62	70	32	41	48	59	67																				
	500	27	34	41	50	57	31	39	47	57	65	30	38	45	55	63																				
Esforço em flexão daN/cm ²		70,8					67,9					95,2					88,9					80,6					75,2									
Módulo de elasticidade daN/cm ²		55 000					75 000					75 000					75 000					75 000					75 000									
Massa volumica kg/m ³		600					580					640					630					640					75 000					630				

Tabela 6.1: Cargas uniformemente distribuídas em vãos entre apoios para a Placas OSB adaptado de Catálogo fornecido por <https://www.jular.pt>

PROPRIEDADE	TESTE	UNIDADE	KRONOPLY 2			KRONOPLY 3		
			6-10	11-18	19-25	6-10	11-18	19-25
TOLERANCIA								
Espessura	EN.324-1	mm	±0,3			±0,3		
Comprimento/largura	EN.324-1	mm	±2			±2		
Rectidão dos bordos	EN.324-2	mm/m	1,5			1,5		
Perpendicularidade dos bordos	EN.324-2	mm/m	2			2		
MASSA VOLUMICA ±40	EN.323	kg/m ³	620	600	580	660	640	630
RESISTENCIA A FLEXÃO	EN.789-7	N/mm ²						
Longitudinal			24	22	21	31	30	27
Transversal			14	12	12	16	15	14
Após ensaio ciclico V 313	EN.321-310		/	/	/	14	13	12
MÓDULO DE ELASTICIDADE	EN.789-7	N/mm ²						
Longitudinal			5 500			7 500		
Transversal			2 200			3 500		
TRACÇÃO PERPENDICULAR		N/mm ²						
No estado inicial	EN.319		0,34	0,32	0,31	0,48	0,42	0,38
Após ensaio ciclico V 313	EN.321-319		/	/	/	0,25	0,20	0,18
Após ensaio c/ água fervente V100	EN.1087-1		/	/	/	0,27	0,23	0,13
INCHAMENTO após 24 h de imersão	EN.317	%	15			12		
HUMIDADE DE EQUILIBRIO		%	9±3			9±3		
COEFICIENTE ϵ_k	DIN 52615		Média 400 - Min. 250					
CONDUTIVIDADE TERMICA λ	DIN 52612	W/m ² K	0,12					
TEOR EM FORMALDEIDO	EN.120	mg/100 g	< 6,5					

Tabela 6.2: Propriedades mecânicas da Placa OSB escolhida adaptado de catálogo consultado em <https://www.jular.pt>

6.1.2 Cargas variáveis

O EC0, define no quadro NA-6.10 valores característicos mínimos q_k e Q_k para sobrecargas em cobertura de Categoria H, não acessível: 0,4 kN/m², ver Tabela 6.3.

Cobertura	q_k [kN/m ²]	Q_k [kN]
Categoria H	0,4	1,0

Tabela 6.3: Sobrecargas em cobertura da Categoria H adaptado de EC0

6.1.3 Ação do vento

De acordo com os cálculos apresentados na seção 5.2.2., a ação do vento tem como resultado para todos os casos de modelação numérica os valores das Tabelas 5.9, e 5.10.

6.2 Combinação de ações

6.2.1 Estados Limites Últimos

Para todos os casos de modelação foram utilizadas combinação de ações fundamentais com a ação variável de base: Sobrecarga e com a ação variável de base: Vento.

Para ação variável de base: Vento

Para todos os modelos foram analisadas duas combinações de ações, em que uma considera a ação do vento como pressão positiva (compressão sobre a cobertura) sentido descendente da carga, neste caso quando o vento exerce sobre a direção 0°, e a segunda combinação de ações onde a ação do vento se toma como a ação de sentido ascendente de carga, exercendo sucção sobre a cobertura, neste caso sendo o vento com a direção de 90° sobre a cobertura.

Para o vento como compressão, sentido descendente de carga, as ações permanentes e sobrecarga produzem um efeito desfavorável, obtém-se a seguinte expressão:

Combinação1: ULS–AVB:Vento 0°:

$$E_d = \gamma_{Gj,sup} \times G_{kj,sup} + \gamma_{Q,1} \times Q_{k,1} + \gamma_{Q,i} \times \Psi_{0,i} \times Q_{k,i} \leftrightarrow 1,35 \times (PP_{estrutura} + PP_{revestimentos}) + 1,5 \times W_{0^\circ} + 1,5 \times 0 \times Sobrecarga_{categoria\ H}$$

Para o vento como sucção, sentido ascendente de carga, as ações permanentes e sobrecarga produzem um efeito favorável, obtém-se a seguinte expressão:

Combinação2: ULS–AVB:Vento 90°:

$$E_d = \gamma_{Gj,inf} \times G_{kj,inf} + \gamma_{Q,1} \times Q_{k,1} + \gamma_{Q,i} \times \Psi_{0,i} \times Q_{k,i} \leftrightarrow 1,0 \times (PP_{estrutura} + PP_{revestimentos}) + 1,5 \times W_{90^\circ} + 0,0 \times 0 \times Sobrecarga_{categoria\ H}$$

Pois o valor do coeficiente $\Psi_{0,i}$ para coberturas Categoria H é igual a 0, como indica na tabela 12. Os valores de $\gamma_{Gj,inf} = 1,0$ para casos favoráveis, e $\gamma_{Gj,sup} = 1,35$ para casos desfavoráveis em ações permanentes. Os valores $\gamma_{Q,1} = 1,5$ para casos desfavoráveis em ações variáveis e valores $\gamma_{Q,1} = 0,0$ para casos com efeitos favoráveis em ações variáveis.

Para ação variável de base: Sobrecarga

Foram analisadas duas combinações de ações, uma com a ação variável acompanhante o vento na direção 0° (compressão), e com a ação variável acompanhante o vento na direção 90° (sucção).

Combinação 3: ULS– AVB: Sobrecarga c/Vento 0°:

$$E_d = \gamma_{Gj,sup} \times G_{kj,sup} + \gamma_{Q,1} \times Q_{k,1} + \gamma_{Q,1} \times \Psi_{0,i} \times Q_{k,i} = 1,35 \times (PP_{estrutura} + PP_{revestimentos}) + 1,5 \times Sobrecarga_{categoria\ H} + 1,5 \times 0,6 \times W_{0^\circ}$$

Combinação 4 ULS– AVB: Sobrecarga c/ Vento 90°:

$$E_d = \gamma_{Gj,inf} \times G_{kj,inf} + \gamma_{Q,1} \times Q_{k,1} + \gamma_{Q,1} \times \Psi_{0,i} \times Q_{k,i} \leftrightarrow 1,0 \times (PP_{estrutura} + PP_{revestimentos}) + 0,0 \times Sobrecarga_{categoria\ H} + 0,0 \times 0,6 \times W_{90^\circ}$$

6.2.2 Estados Limites de Utilização

Para todos os casos de modelação estrutural, foram utilizadas as combinações de ações para os estados limites de utilização seguintes:

6.2.2.1 Combinação característica (para estados irreversíveis):

Combinação 1: SLS: AVB: Sobrecarga c/ Vento 0°:

$$E_d = \sum_{j \geq 1} G_{k,j} + Q_{k,1} + \Psi_{0,i} \times Q_{k,i} = (PP_{estrutura} + PP_{revestimentos}) + Sobrecarga_{categoria\ H} + 0,6 \times W_{0^\circ}$$

Combinação 2: SLS: AVB: Sobrecarga c/ Vento 90°:

$$E_d = \sum_{j \geq 1} G_{k,j} + Q_{k,1} + \Psi_{0,i} \times Q_{k,i} = (PP_{estrutura} + PP_{revestimentos}) + Sobrecarga_{categoria\ H} + 0,6 \times W_{90^\circ}$$

Combinação 3: SLS: AVB: Vento 0°:

$$E_d = \sum_{j \geq 1} G_{k,j} + Q_{k,1} + \Psi_{0,i} \times Q_{k,i} = (PP_{estrutura} + PP_{revestimentos}) + W_{0^\circ} + 0,0 \times Sobrecarga_{categoria\ H}$$

Combinação 4: SLS: AVB: Vento 90°:

$$E_d = \sum_{j \geq 1} G_{k,j} + Q_{k,1} + \Psi_{0,i} \times Q_{k,i} = (PP_{estrutura} + PP_{revestimentos}) + W_{90^\circ} + 0,0 \times Sobrecarga_{categoria\ H}$$

6.2.2.2 Combinação frequente (estados limites reversíveis)

Combinação 5: SLS: AVB: Sobrecarga c/ Vento 0°:

$$E_d = \sum_{j \geq 1} G_{k,j} + \psi_{1,1} Q_{k,1} + \psi_{2,i} \times Q_{k,i} = (PP_{estrutura} + PP_{revestimentos}) + 0,0 \times Sobrecarga_{categoria\ H} + 0,0 \times W_{0^\circ}$$

Combinação 6: SLS: AVB: Sobrecarga c/ Vento 90°:

$$E_d = \sum_{j \geq 1} G_{k,j} + \psi_{1,1} Q_{k,1} + \psi_{2,i} \times Q_{k,i} = (PP_{estrutura} + PP_{revestimentos}) + 0,0 \times Sobrecarga_{categoria\ H} + 0,0 \times W_{90^\circ}$$

Combinação 7: SLS: AVB: Vento 0°:

$$E_d = \sum_{j \geq 1} G_{k,j} + \psi_{1,1} Q_{k,1} + \psi_{2,i} \times Q_{k,i} = (PP_{estrutura} + PP_{revestimentos}) + 0,2 \times W_{0^\circ} + 0,0 \times Sobrecarga_{categoria\ H}$$

Combinação 8: SLS: AVB: Vento 90°:

$$E_d = \sum_{j \geq 1} G_{k,j} + \psi_{1,1} Q_{k,1} + \psi_{2,i} \times Q_{k,i} = (PP_{estrutura} + PP_{revestimentos}) + 0,2 \times W_{90^\circ} + 0,0 \times \text{Sobrecarga}_{categoria H}$$

Combinação quase-permanentes (para efeitos a longo prazo e aspeto da estrutura):

Estas combinações podem ser desprezáveis uma vez que $\Psi_{2,i}$ segundo a Tabela 5.1, são igual a zero, tanto para ação do vento bem como para a ação de sobrecarga em cobertura – Categoria H. Sendo assim seriam apenas combinações com a contabilização das ações permanentes.

6.3 Flexão desviada

De acordo com o EC5, para esforços de flexão reduzidos pode assume-se que o eixo neutro das secções passa pelo centro de gravidade da peça.

Flexão desviada de acordo com EC5, subsecção 6.1.6, as tensões terão de satisfazer

$$\frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \times \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (6.3)$$

$$k_m \times \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (6.4)$$

Em que:

$\sigma_{m,y,d}$ e $\sigma_{m,z,d}$ - tensões de flexão do projeto sobre os eixos principais, devidas aos momentos flectores nas direções y e z, respetivamente;

$f_{m,y,d}$ e $f_{m,z,d}$ - tensões resistentes de madeira maciça à flexão em relação ao eixo dos $\bar{y}\bar{y}$ e dos $\bar{z}\bar{z}$, respetivamente;

k_m - coeficiente que pressupõe uma redistribuição de esforços e o efeito da heterogeneidade do material ao longo da seção do elemento de madeira. Neste caso, madeira maciça, k_m é igual a 0,7 e 1,0, em seções retangulares ou não, respetivamente.

6.4 Tração na direção paralela às fibras da madeira

A tração na direção das fibras da madeira é abordada na subsecção 6.1.2. do EC5. A condição para a verificação de segurança de um elemento sujeito a esforços de tração paralelos ao fio ou às fibras da madeira é a seguinte:

$$\sigma_{t,0,d} \leq f_{t,0,d} \quad (6.5)$$

Em que:

$\sigma_{t,0,d}$ - tensão atuante de tração paralela ao fio no elemento de madeira;

$f_{t,0,d}$ - tensão resistente à tração paralela ao fio.

6.5 Tração na direção perpendicular às fibras da madeira

O EC5 não refere qualquer verificação para este tipo de esforços, apenas refere que o efeito de escala deve ser tido em conta. Para este tipo de esforços, sugere-se a adaptação do EC5 para vigas de eixo curvo, uma situação em que a direção perpendicular à direção do fio não pode ser evitada. E para isso é dada a seguinte equação:

$$\sigma_{t,90,d} \leq k_{vol} \times f_{t,90,d} \quad (6.6)$$

Em que:

$\sigma_{t,90,d}$ - valor de cálculo da tensão de tração na direção perpendicular às fibras;

$f_{t,90,d}$ - valor de cálculo da tensão resistente de tração na direção perpendicular às fibras;

$$k_{vol} = \begin{cases} 1,0 & \text{madeira maciça} \\ \frac{0,01}{V} & \text{madeira lamelada colada e LVL com as fibras todas na mesma direção} \end{cases}$$

V - volume da peça sujeito a esforços de tração perpendiculares à direção das fibras. (Dias,2012)

6.6 Compressão na direção paralela às fibras da madeira

Segundo o EC5, na subsecção 6.1.4, a verificação de segurança para um elemento sujeito a esforços de compressão paralelos às fibras da madeira, é dada pela seguinte condição:

$$\sigma_{c,0,d} \leq f_{c,0,d} \quad (6.7)$$

Em que:

$\sigma_{c,0,d}$ - valor de cálculo da tensão de compressão no elemento na direção paralela às fibras;

$f_{c,0,d}$ - valor de cálculo da tensão resistente de compressão no elemento na direção paralela às fibras da madeira.

Elementos esbeltos sujeitos a este tipo de esforços devem ser analisados relativamente à encurvadura. (Almeida, 2012)

6.7 Compressão na direção perpendicular às fibras da madeira

Segundo o EC5, na subsecção 6.1.5., a verificação de segurança para um elemento sujeito a esforços de compressão perpendiculares às fibras da madeira, é dada pela seguinte condição:

$$\sigma_{c,90,d} \leq k_{c,90} \times f_{c,90,d} \quad (6.8)$$

$$\sigma_{c,90,d} = \frac{F_{c,90,d}}{A_{ef}} \quad (6.9)$$

Em que:

$\sigma_{c,90,d}$ – valor de cálculo da tensão atuante de compressão perpendicular às fibras da madeira na área efetiva de contacto;

$F_{c,90,d}$ - valor de cálculo da força de compressão atuante perpendicular às fibras da madeira;

A_{ef} - área efetiva de contacto em compressão perpendicular às fibras da madeira, calculada através da multiplicação da largura de atuação da força pelo comprimento de atuação da força, com um acréscimo no mínimo de (30 mm, a , ℓ , ℓ_1 , $\ell_1/2$) para cada um dos lados, tal como indica na figura 6.2 adaptado de (CEN, 2008)

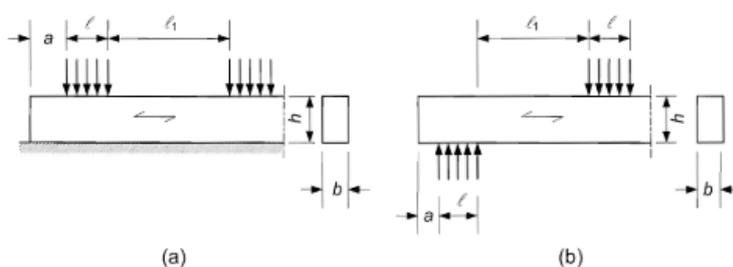


Figura 6.2: Carregamentos aplicados na direção perpendicular à direção dos elementos de madeira, (a)- apoios contínuos, (b) – apoios discretos, figura adaptada de (CEN, 2008).

$k_{c,90}$ - vale 1,0, exceto em seções de madeira maciça de espécies resinosas e seções de madeira lamelada-colada de espécies resinosas, em que apoios contínuos com $\ell_1/2 \geq 2h$, em que se considera 1,25 e 1,5 para seções de madeira maciça de espécies resinosas e lamelada colada de espécies resinosas, respetivamente. Em apoios discretos com $\ell_1/2 \geq 2h$, considerar $k_{c,90}$ igual a 1,5 e 1,75 (para $\ell \leq 400 \text{ mm}$), respetivamente para seções de madeira maciça e lamelada colada, respetivamente, ambas de espécies resinosas;

$f_{c,90,d}$ - valor de cálculo da resistência à compressão na direção perpendicular às fibras.

6.8 Corte

Segundo o EC5, na subseção 6.1.7., a verificação de segurança para um elemento para tensões tangenciais com uma componente de esforço de corte, paralelo às fibras da madeira, com as componentes perpendiculares às fibras de madeira, é dada pela seguinte condição:

$$\tau_d \leq f_{v,d} \quad (6.10)$$

Em que:

τ_d - Tensão tangencial atuante no elemento determinada através da resistência dos materiais com a utilização de uma largura efetiva determinada através da seguinte equação:

$$b_{ef} \leq k_{cr} \times b \quad (6.11)$$

Em casos de peças à flexão, deve ser considerada uma largura reduzida da seção resistente pelo

fator redutor k_{cr} , que para madeira maciça assume o valor e 0,67. Este coeficiente tem em conta a possível existência de fendas longitudinais no elemento de madeira, o que reduz a sua largura.

$f_{v,d}$ – Valor de cálculo da resistência ao corte.

O EC5 menciona que se há forças concentradas transversais, F, junto aos apoios de vigas, a uma distância h ou h_{ef} a partir da extremidade do apoio, ver figura 6.3, pode-se desprezar a sua contribuição para o efeito do esforço transverso. Para situações em que a viga contém entalhes no apoio, a redução do esforço transverso apenas se aplica quando o entalhe se localiza no lado oposto ao do apoio. (Almeida, 2012)

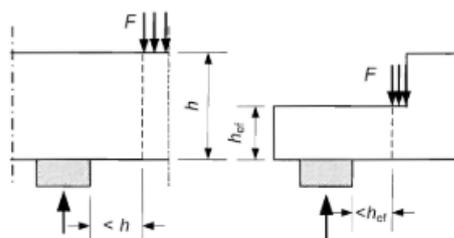


Figura 6.3: Condições de suporte para forças concentradas F, que pode vir a ser desprezado no cálculo do esforço transverso adaptado de (CEN, 2008)

6.9 Torção

Em elementos sujeitos a esforços de torção, segundo o EC5, na seção 6.1.8, deve ser verificada a seguinte condição:

$$\tau_{tor,d} \leq k_{shape} \times f_{vd} \quad (6.12)$$

Em que:

$\tau_{tor,d}$ – Valor de cálculo da tensão de torção atuante no elemento através da resistência da madeira;

k_{shape} - é um factor que tem em conta a geometria de seção do elemento de madeira, determinado através de:

$$\begin{cases} 1,2 & \text{– Seções circulares} \\ \min \left\{ \begin{array}{l} 1 + 0,15 \times \frac{h}{b} \\ 2,0 \end{array} \right. & \text{– Seções rectangulares} \end{cases}$$

Em que:

h- maior dimensão da seção transversal do elemento;

b – menor dimensão da seção transversal do elemento.

f_{vd} - Valor de cálculo da resistência ao corte.

6.10 Esforços combinados

Para elementos sujeitos a tensões combinadas, os critérios para a verificação de segurança, das seções 6.2.2 a 6.2.4 do EC5, aplicam-se a elementos com seção não variável de madeira maciça.

Considera-se que o elemento está sujeito a tensões resultantes de ações combinadas ou a tensões atuando em dois ou três de seus eixos principais.

6.10.1 Compressão a um ângulo com o fio do elemento em madeira

Quando um elemento de madeira está sujeito a esforços de compressão que incidem num ângulo em relação à direção do fio do elemento de madeira maciça, como indica a Figura 6.4, deve ser satisfeita a seguinte condição:

$$\sigma_{c,\alpha,d} \leq \frac{f_{c,0,d}}{\frac{f_{c,0,d}}{k_{c,90} \times f_{c,90,d}} \times \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha} \quad (6.13)$$

Em que:

$\sigma_{c,\alpha,d}$ - valor da tensão de compressão atuante a um ângulo força-direção do fio, α ;

α - ângulo entre força e o fio do elemento de madeira;

$k_{c,90}$ - coeficiente que considera o tipo de carga, a possibilidade de formação de fendas e nível da deformação provocada pelo esforço de compressão, definido nas secções 6.7.

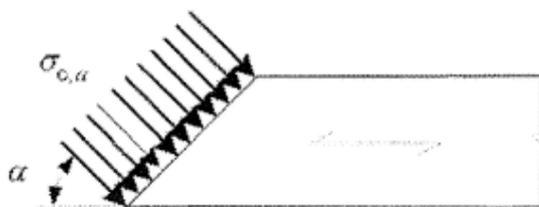


Figura 6.4: Tensões atuantes de compressão resultantes de esforços que incidem sobre um ângulo em relação à direção do fio do elemento de madeira, α , adaptado de (CEN, 2008)

6.10.2 Flexão composta com esforço de tração

Para os elementos sujeitos à flexão combinada com esforço axial de tração devem cumprir as seguintes condições, indicadas na subsecção 6.2.3 do EC5:

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \times \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (6.14)$$

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + k_m \times \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (6.15)$$

6.10.3 Flexão composta com esforço de compressão

Para os elementos sujeitos à flexão combinada com esforço axial de compressão devem cumprir as seguintes condições, indicadas na subsecção 6.2.4 do EC5:

$$\left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}}\right)^2 + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \times \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (6.16)$$

$$\left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}}\right)^2 + k_m \times \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (6.17)$$

6.11 Encurvadura

Verifica-se a encurvadura com as seguintes expressões, da seção 6.3.2 do EC5:

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y} \times f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \times \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (6.18)$$

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} \times f_{c,0,d}} + k_m \times \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (6.19)$$

Em que:

$$k_{c,y} = \frac{1}{k_y + \sqrt{k_y^2 - \lambda_{rel,y}^2}} \quad (6.20)$$

$$k_{c,z} = \frac{1}{k_z + \sqrt{k_z^2 - \lambda_{rel,z}^2}} \quad (6.21)$$

$$k_y = 0,5 \times (1 + \beta_c \times (\lambda_{rel,y} - 0,3) + \lambda_{rel,y}^2) \quad (6.22)$$

$$k_z = 0,5 \times (1 + \beta_c \times (\lambda_{rel,z} - 0,3) + \lambda_{rel,z}^2) \quad (6.23)$$

Em que:

β_c - factor de linearidade dos elementos, que para madeira maciça toma o valor de 0,2.

Os coeficientes de esbelteza relativos, ou seja, $\lambda_{rel,y}$ e $\lambda_{rel,z}$ são calculados através das seguintes expressões:

$$\lambda_{rel,y} = \frac{\lambda_y}{\pi} \times \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} \quad (6.24)$$

$$\lambda_{rel,z} = \frac{\lambda_z}{\pi} \times \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} \quad (6.25)$$

Em que:

λ_y e $\lambda_{rel,y}$ - coeficientes de esbelteza relativamente à flexão em torno do eixo y (deformação ao longo da direção z);

λ_z e $\lambda_{rel,z}$ - coeficientes de esbelteza relativamente à flexão em torno do eixo z (deformação ao longo da direção y);

$E_{0,05}$ - valor característico inferior do módulo de elasticidade correspondente ao quantil de 5%.

Se se verificar que os coeficientes de esbelteza $\lambda_{rel,y}$ e $\lambda_{rel,z}$ são superiores a 0,3, pode-se dispensar o cumprimento das condições descritas nas expressões 6.26 e 6.27, pelo contrário, se se concluir que simultaneamente $\lambda_{rel,y} \leq 0,3$ e $\lambda_{rel,z} \leq 0,3$ então as condições descritas nas expressões mencionadas terão de ser garantidas.

Os coeficientes de esbelteza λ_y e λ_z são determinados através da seguinte expressão:

$$\lambda_y = \frac{L_y}{i} \quad (6.26)$$

$$\lambda_z = \frac{L_z}{i} \quad (6.27)$$

Em que:

L_y e L_z - Comprimentos de curvatura para flexão em torno dos eixos y e z, que corresponde aos planos xz e xy;

i - raio de giração;

Em que: $i_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}}$ e $i_z = \sqrt{\frac{I_z}{A}}$ Em que:

I_y e I_z - momento de inércia do elemento respetivamente em y e z;

A - área da seção do elemento.

6.12 Instabilidade por flexão-torção ou bambeamento

Em vigas de madeira esbeltas (relações h/b elevadas) pode-se dar o fenómeno de bambeamento, onde ocorre instabilidade por flexão-torção. O momento crítico de instabilização de uma viga simplesmente apoiada sujeitas a momentos de flexão nas extremidades é função do seu comprimento, rigidez de flexão (EI) e rigidez de torção (GJ). (Dias, 2012)

A Figura 6.5 ilustra o fenómeno:

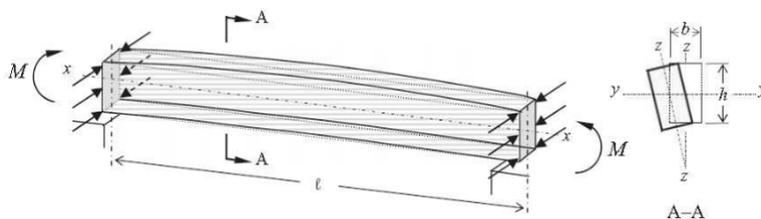


Figura 6.5: Bambeamento de uma viga sujeita a Momento Flector em torno do eixo principal, adaptado de Correia (2009)

A verificação de segurança em relação ao risco de bambeamento é descrita através da seguinte condição:

$$\sigma_{m,d} \leq k_{crit} \times f_{m,d} \quad (6.28)$$

Em que:

k_{crit} - valor do coeficiente que tem como ponderação redução da resistência à flexão devido ao bambeamento.

k_{crit} é dado pelas curvas de encurvadura por flexão-torção da seção 6.3.3. do EC5:

$$k_{crit} = \begin{cases} 1 & \text{para } \lambda_{rel,m} \leq 0,75 \\ 1,56 - 0,75 \times \lambda_{rel,m} & \text{para } 0,75 < \lambda_{rel,m} \leq 1,4 \\ \frac{1}{\lambda_{rel,m}^2} & \text{para } 1,4 < \lambda_{rel,m} \end{cases} \quad (6.29)$$

Em que:

$$\lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{f_{m,k}}{\sigma_{m,crit}}} \quad (6.29)$$

Em que o valor da tensão crítica de flexão $\sigma_{m,crit}$, é calculada através da expressão:

$$\sigma_{m,crit} = \frac{M_{y,crit}}{W_y} = \frac{\pi \times \sqrt{E_{0,05} \times I_z \times G_{0,05} \times I_{tor}}}{\ell_{ef} \times W_y} \quad (6.30)$$

Em que:

$M_{y,crit}$ - valor do momento fletor crítico;

$E_{0,05}$ - valor característico inferior do módulo de elasticidade correspondente ao quantil 5%;

$G_{0,05}$ - valor característico inferior do módulo de distorção correspondente ao quantil 5%;

I_z - momento de inércia relativamente ao eixo fraco $\bar{z}\bar{z}$ da área de seção do elemento de madeira;

I_{tor} - momento de inércia relativamente à torção da seção do elemento de madeira;

W_y - módulo de flexão em relação ao eixo $\bar{y}\bar{y}$;

ℓ_{ef} - comprimento efetivo de bambeamento, com diferenciações relativamente ao tipo de carregamento e o tipo de apoio, como se pode verificar na Tabela 6.4.

Condições de apoio	Tipo de carregamento	
Simplesmente apoiada	Momento constante	1,0
	Carga uniformemente distribuída	0,9
	Carga concentrada a meio vão	0,8
Consola	Carga uniformemente distribuída	0,5
	Carga concentrada na extremidade livre	0,8

Tabela 6.4: Coeficiente efetivos de encurvadura para vigas em bambeamento adaptado de (CEN, 2008)

Para uma seção retangular com espessura fina ($I_{tor}=hb^3/3$) e $G=E/16$, então a expressão da tensão crítica pode ser simplificada para a seguinte expressão:

$$\sigma_{m,crit} = \frac{M_{y,crit}}{W_y} = \frac{0,78b^2}{h\ell_{ef}} \times E_{0,05} \quad (6.31)$$

Em que:

h- maior dimensão da seção transversal do elemento;

b – menor dimensão da seção transversal do elemento.

Quando existe combinação de esforços, como esforço axial à compressão com flexão, a interação deve ser verificada segundo a seguinte expressão, de acordo com o EC5:

$$\left(\frac{\sigma_{m,d}}{k_{crit} \times f_{m,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} \times f_{c,0,d}} \leq 1 \quad (6.32)$$

6.13 Verificação de segurança nas ligações das asnas

No sistema de asnas, a ligação com maior risco de rotura é a ligação Perna-Linha ou Linha Perna, ver figura 6.6.

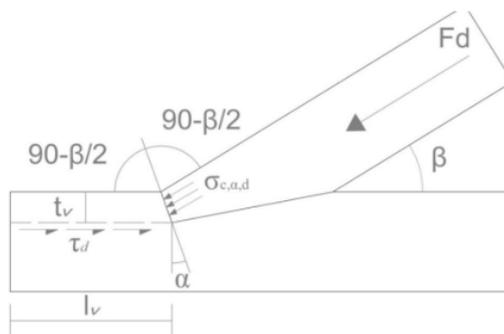


Figura 6.6: Configuração geométrica da ligação Perna-Linha, adaptado de Bastos (2011)

Torna-se necessário verificar a segurança relativamente ao esmagamento da ligação através da seguinte expressão:

$$\sigma_{c,\alpha,d} \leq \frac{f_{c,0,d}}{\frac{f_{c,0,d}}{f_{c,90,d}} \times \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha} \quad (6.33)$$

Em que:

$f_{c,0,d}$ - valor de resistência à compressão paralela às fibras dos elementos de madeira;

Calculado através de :

$$f_{c,0,d} = \frac{k_{mod} \times f_{c,0,k}}{\gamma_M} \quad (6.34)$$

$f_{c,90,d}$ - valor de resistência à compressão na direção perpendicular às fibras dos elementos de madeira;

Calculado através de:

$$f_{c,90,d} = \frac{k_{mod} \times f_{c,90,k}}{\gamma_M} \quad (6.35)$$

$\sigma_{c,\alpha,d}$ - valor da tensão atuante à compressão relativamente a um ângulo α , e calcula-se através de:

$$\sigma_{c,\alpha,d} = \frac{F_d \times \cos\left(\frac{\beta}{2}\right)^2}{b_{ef} \times t_v} \quad (6.36)$$

Bem como efetuar a verificação ao corte na direção paralela às fibras do elemento de madeira, dado pela seguinte expressão:

$$\tau_{v,d} \leq f_{v,d} \quad (6.37)$$

Em que:

$\tau_{v,d}$ - Tensão tangencial atuante no elemento determinada através da resistência dos materiais com a utilização de uma largura efetiva determinada através da seguinte equação:

$$\tau_{v,d} = \frac{Fd \times \cos\left(\frac{\beta}{2}\right)^2}{b_{ef} \times l_v} \quad (6.38)$$

$f_{v,d}$ – Valor de cálculo da resistência ao corte, calcula-se através da seguinte expressão:

$$f_{v,d} = \frac{k_{mod} \times f_{v,k}}{\gamma_M} \quad (6.39)$$

6.14 Cálculo estrutural

Para o projeto da estrutura de asnas da cobertura requer que se faça o cálculo estrutural dos esforços de acordo com as ações tomadas e as combinações das mesmas.

6.14.1 Tensão de flexão

Para o cálculo da tensão de flexão atuante nos elementos estruturais utiliza-se a seguinte expressão:

$$\sigma_{m,Ed} = \frac{M_{Ed,y}}{I_y} \times z \quad (6.40)$$

Em que:

$M_{Ed,y}$ - valor de cálculo do momento fletor atuante nos elementos estruturais;

I_y - valor de cálculo do momento de inércia em relação ao eixo dos \overline{yy} ;

z - distância do centro de gravidade da seção dos elementos estruturais às fibras do banzo superior ou inferior;

Os momentos inércia em relação aos eixos \overline{yy} e \overline{zz} da área de seção dos elementos estruturais do sistema de asnas da cobertura são dados por:

$$I_y = \frac{b \times h^3}{12} \quad (6.41)$$

$$I_z = \frac{b^3 \times h}{12} \quad (6.42)$$

Em que:

h - altura da seção do elemento estrutural;

b - largura da seção do elemento estrutural.

6.14.2 Flexão composta desviada

A tensão dos elementos sujeitos a flexão composta desviada é dada pela seguinte expressão:

$$\sigma_{FC,Ed} = \frac{N_{Ed}}{A} + \frac{M_{Ed,y}}{I_y} \times z + \frac{M_{Ed,e,z}}{I_z} \times y \quad (6.43)$$

6.14.3 Tensão tangencial de corte

Para o cálculo da tensão tangencial de corte atuante nos elementos estruturais utiliza-se a seguinte expressão:

$$\tau_{Ed} = \frac{V_{Ed} \times S_y}{I_y \times b} \quad (6.44)$$

Em que:

V_{Ed} - valor de cálculo do esforço transversal atuante nos elementos estruturais;

S_y - valor de cálculo de momento estático.

O momento estático determina-se através da seguinte expressão:

$$S_y = A_m \times d_z \quad (6.45)$$

Em que:

A_m - área da seção de referência para cada elemento estrutural;

d_z - valor da distância desde o centro de gravidade da seção de referência até ao centro de gravidade global do elemento estrutural em estudo.

O valor de τ_{Ed} pode ser obtido, uma vez que a madeira é um material de rotura frágil, sem consideração da plastificação da seção.

No caso de seções retangulares o valor τ_{Ed} é dado por:

$$\tau_{Ed,máx} = \frac{3}{2} \times \frac{V}{b \times h} \quad (6.46)$$

Em que:

V- valor máximo para o esforço transversal.

7 Modelação da cobertura em sistema de asnas de madeira

Relativamente à modelação da cobertura em sistema de asnas de madeira, começa-se por mencionar os diferentes casos de modelo a ter em conta:

Caso 0: Sistemas das duas asnas em condições ideais de seção e propriedades mecânicas de resistência para a estrutura já existente no momento antes de intervenção e anteprojetado;

Caso 1: Sistema das duas asnas em condições alteradas conforme a interpretação dos gráficos dos ensaios do *Resistograph* para a Linha e para a Perna da mesma estrutura existente e após inspeção visual;

Caso 2: Solução para o sistema das duas asnas prevista no projeto executado por (NCREP, 2020);

Caso 3: Solução para o sistema das duas asnas prevista em fase de construção em condições ideais de seção e propriedades mecânicas de resistência;

Caso 4: Solução proposta de reforço com condições ideais dos elementos existentes;

7.1 Modelo estrutural – Caso 0

7.1.1 Geometria do modelo e parâmetros de seção

Para o **caso 0**, considera-se a tabela 7.1 que apresenta as dimensões dos elementos constituintes pelas duas asnas de madeira em análise, medidas com uma fita métrica, pela autora desta dissertação:

Elemento	Dimensões
Linha Baixa Asna 1 e 2	0,16m × 0,16m
Linha Alta Asna 1 e 2	Seção circular com $\Phi=12$ cm
Pernas Asna 1 e 2	Seção quadrada com 14 cm de lado
Cumeeira	Seção circular com $\Phi=16$ cm
Madres	Seção circular com $\Phi=16$ cm
Rincões	Seção circular com $\Phi=16$ cm
Varas	$8 \times 8 \text{ cm}^2$ espaçadas de 0,30 metros

Tabela 7.1: Descrição dimensões das seções dos elementos do sistema de asnas para o Caso 0 do caso de estudo

A memória descritiva fornecida por NCREP (2020), face ao levantamento estrutural da cobertura, indica um afastamento entre asnas de madeira cerca de 3,5 metros, o que não reflete na realidade medida "in situ", e como tal, assume-se a medida "in situ", que é uma distância de 2,55 metros o espaçamento entre as duas asnas de madeira pertencentes ao sistema estrutural de cobertura. A distância entre a primeira asna até à parede do alçado principal é de 3,75 metros e a última asna até à parede tardoz é de 2,2 metros.

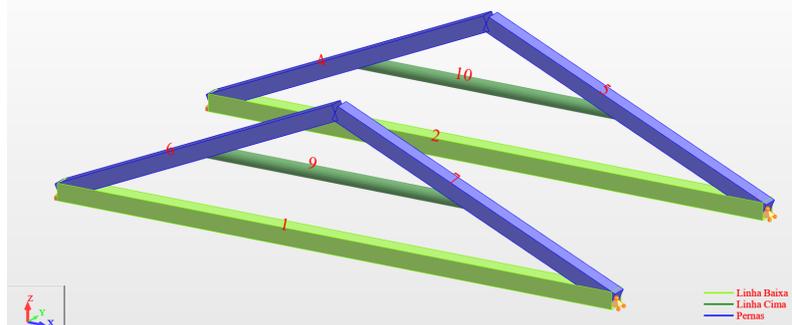


Figura 7.1: Representação gráfica das várias secções transversais distinguidas por cores através do software Autodesk® Robot Structural Analysis Professional 2021TM

O comprimento da estrutura de cobertura é de 8,5 m e a largura de aproximadamente 5,40 m. A cobertura tem as duas asnas com uma linha, e uma inclinação de $23,96^\circ$. As duas asnas têm um pé direito entre a linha baixa e o encontro entre as pernas de aproximadamente 1,20 m.

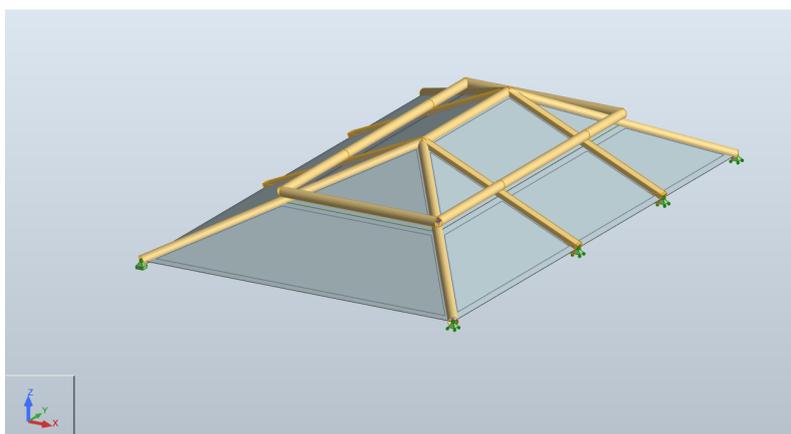


Figura 7.2: Representação geométrica do modelo estrutural da cobertura – CASO 0 criado no software Autodesk® Robot Structural Analysis Professional 2021TM

Relativamente aos apoios, o modelo possui um apoio simples com apenas o impedimento do deslocamento vertical, e o outro apoio triplo, com restrição total de deslocamento.

As ligações foram consideradas rígidas quanto à rotação no modelo numérico estrutural, uma vez que a deformação não influencia, de forma significativa, a distribuição dos esforços nos elementos envolventes das asnas de madeira.

7.1.2 Cargas

Para este modelo estrutural, a Tabela 7.2 representa as cargas introduzidas:

A Tabela 7.3 apresenta as combinações de ações definidas manualmente no Autodesk® Robot Structural Analysis Professional 2021TM, ver na secção 6.2

As cargas distribuem-se pela superfície criada através de revestimento nas duas direcções em toda a cobertura tal como indica a Tabela 7.3.

Caso	Tipo de carga	Lista	Valores da carga (m) (kN) (Deg)
2:Peso Própri	peso próprio	1 2 4para12 1	'PZ Negativo Fator=1,00
1:Peso Própri	(EF) uniforme	29para44	'PZ=-0,71(kN/m2)
4:Sobrecarga	(EF) uniforme	29para44	'PZ=-0,40(kN/m2)
7:PP Forro	(EF) uniforme	29para44	'PZ=-0,10(kN/m2)
5:Vento_0	(EF) uniforme	34	'PZ=-3,54(kN/m2) local
5:Vento_0	(EF) uniforme	38	'PZ=-3,30(kN/m2) local
5:Vento_0	(EF) uniforme	33 35	'PZ=-3,23(kN/m2) local
5:Vento_0	(EF) uniforme	30para32 37	'PZ=-2,45(kN/m2) local
5:Vento_0	(EF) uniforme	43	'PZ=-2,45(kN/m2) local
5:Vento_0	(EF) uniforme	39 40	'PZ=-2,45(kN/m2) local
6:Vento_90	(EF) uniforme	29	'PZ=1,36(kN/m2) local
6:Vento_90	(EF) uniforme	37	'PZ=1,60(kN/m2) local
6:Vento_90	(EF) uniforme	43 44	'PZ=2,48(kN/m2) local
6:Vento_90	(EF) uniforme	30para36 38p	'PZ=2,48(kN/m2) local
5:Vento_0	(EF) uniforme	29 37	'PZ=-2,45(kN/m2) local

Tabela 7.2: Tabela de cargas do modelo estrutural do Caso 0, com recurso ao software Autodesk® Robot Structural Analysis Professional 2021™

Combinções	Nome	Tipo de análise	Tipo de combina	Natureza do caso	Definição
11 (C)	ULS_Sobrecarga	Combinção linear	ULS	Estrutural	(1+2+7)*1.35+4*1.50+5*0.90
12 (C)	ULS_Vento0	Combinção linear	ULS	Estrutural	(1+2+7)*1.35+5*1.50
13 (C)	ULS_Sobrecarga	Combinção linear	ULS	Estrutural	(1+2+7)*1.00
14 (C)	ULS_Vento90	Combinção linear	ULS	Estrutural	(1+2+7)*1.00+6*1.50
15 (C)	Comb1	Combinção linear	SLS:CHR	Estrutural	(1+2+7+4)*1.00+5*0.60
16 (C)	ULS_Sobrecarga	Combinção linear	ULS	Estrutural	(1+2+7)*1.35+4*1.50
30 (C)	Comb2	Combinção linear	SLS:CHR	Estrutural	(1+2+4+7)*1.00+6*0.60
31 (C)	Comb3	Combinção linear	SLS:CHR	Estrutural	(1+2+5+7)*1.00
32 (C)	Comb4	Combinção linear	SLS:CHR	Estrutural	(1+2+6+7)*1.00
33 (C)	Comb5	Combinção linear	SLS:FRE	Estrutural	(1+2+7)*1.00
34 (C)	Comb6	Combinção linear	SLS:FRE	Estrutural	(1+2+7)*1.00
35 (C)	Comb7	Combinção linear	SLS:FRE	Estrutural	(1+2+7)*1.00+5*0.20
36 (C)	Comb8	Combinção linear	SLS:FRE	Estrutural	(1+2+7)*1.00+6*0.20

Tabela 7.3: Tabela de combinações de cargas do modelo estrutural do Caso 0, com recurso ao software Autodesk® Robot Structural Analysis Professional 2021™

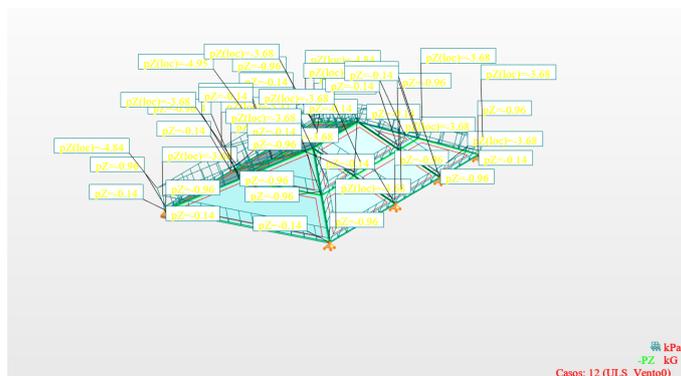


Figura 7.3: Representação de cargas submetidas no modelo caso 0 segundo a combinação 1 dos ELU

7.1.3 Esforços

A convenção dos sinais para o esforço axial no software é sinal positivo para a compressão.

7.1.3.1 Combinação 1: ULS– AVB: Vento 0°:

Esforço Axial

A Figura D.1 do Anexo D ilustra, os esforços axiais máximo mínimo, nos elementos constituintes das duas asnas pequenas.

Esforço Transverso

A Figura D.2 e D.3 do Anexo D ilustram, os esforços transversos máximo e mínimo na direção Y e Z, nos elementos constituintes das duas asnas pequenas.

Momento Fletor

A Figura D.4 e D.5 do Anexo D ilustram, os esforços em relação ao momento fletor na direção Y e Z, respetivamente.

Destes diagramas e tabelas de esforços atuantes, pode-se concluir que:

Em todas as combinações de ações, a Asna 2 está submetida a esforços maiores;

Como de esperar a ligação perna-linha está da Asna 2 é a ligação mais solicitada;

As asnas normalmente apresentam esforços normais devido às forças axiais e momentos fletores, isto deve-se às cargas assimétricas, tal como o vento, e o peso próprio da estrutura global;

As pernas são os elementos mais esforçados do sistema de asnas.

Na combinação de ações com a variável base: Vento na direção 0°, os elementos denominados de Pernas, seja em que Asna for, estão submetidas a esforço de compressão axial e flexão composta, com agravamento do efeito de encurvadura.

7.1.4 Verificações de Segurança

A resistência à flexão dos elementos pertencentes à Asna 1 e Asna 2, foram determinados através da seguinte expressão, tendo em conta os coeficientes de segurança já mencionados na 6.3:

$$f_{m,d} = k_{sys} \times k_h \times k_{mod} \times \frac{f_{m,k}}{\gamma_M} \quad (7.1)$$

Em que para o coeficiente k_{sys} , adota-se o valor de 1,0.

Como se explicou na secção 5.4, para elementos com secção cuja altura ou largura sejam inferiores a 150 mm, deve aplicar-se aos valores de cálculo de resistência à flexão e tração o coeficiente k_h dado pela Tabela 7.4:

Elemento de Asna	h (m)	$\left(\frac{150}{h}\right)^{0,2}$	k_h
Linha Baixa	0,16	0,99	1,00
Linha Cima	0,12	1,05	1,05
Pernas	0,14	1,01	1,01

Tabela 7.4: Tabela com os valores do coeficiente k_h

Segundo a Tabela 5.14, da secção 5.4, o valor de γ_M é de 1,3.

Segundo a secção 5.4, para este caso de estudo, para coberturas deste género de enquadramento e exposição ambiental e de humidade, a classe de serviço adequada é a 2. Relativamente à classe de duração de ações corresponde à média duração, $k_{mod} = 0,80$, contudo para a combinação de ações com a variável vento, $k_{mod} = 0,90$, uma vez que a classe de duração é menor para o caso do vento.

A seguinte Tabela representa os valores de cálculo das resistências à flexão, tração, compressão e corte para as combinações de ações diferentes:

Elemento de Asna	ELU_{Sob}	$\$ELU_{\{Vento 0^\circ\}}$	$\$ELU_{\{Vento 90^\circ\}}$
	$f_{m,d}$ (MPa)	$f_{m,d}$ (MPa)	$f_{m,d}$ (MPa)
Linha Baixa	17,23	19,38	19,38
Linha Cima	18,02	20,27	20,27
Pernas	17,47	19,65	19,65

Tabela 7.5: Valores de cálculo da resistência à tração paralela ao fio dos elementos das Asnas 1 e 2, em madeira maciça, para as diferentes combinações de ações

Elemento de Asna	EL_{Sob}	ELU_{Vento0°	$\$ELU_{\{Vento 90^\circ\}}$
	$f_{t,0,d}$ (MPa)	$f_{t,0,d}$ (MPa)	$f_{t,0,d}$ (MPa)
Linha Baixa	10,46	11,77	11,77
Linha Cima	10,94	12,31	12,31
Pernas	10,61	11,93	11,93

Tabela 7.6: Valores de cálculo da resistência à compressão paralela ao fio dos elementos das Asnas 1 e 2, em madeira maciça, para as diferentes combinações de ações

Elemento de Asna	ELU_{Sob}	ELU_{Vento0°	$ELU_{Vento90^\circ}$
	$f_{t,90,d}$ (MPa)	$f_{t,90,d}$ (MPa)	$f_{t,90,d}$ (MPa)
Linha Baixa	0,31	0,35	0,35
Linha Cima	0,32	0,36	0,36
Pernas	0,31	0,35	0,35

Tabela 7.7: Valores de cálculo da resistência à compressão perpendicular ao fio dos elementos das Asnas 1 e 2, em madeira maciça, para as diferentes combinações de ações

Elemento de Asna	ELU_{Sob}	ELU_{Vento0°	$ELU_{Vento90^\circ}$
	$f_{c,0,d}$ (MPa)	$f_{c,0,d}$ (MPa)	$f_{c,0,d}$ (MPa)
Linha Baixa	(MPa)	15,23	15,23
Linha Cima	14,16	15,93	15,93
Pernas	13,73	15,44	15,44

Tabela 7.8: Valores de cálculo da resistência ao corte dos elementos das Asnas 1 e 2, em madeira maciça, para as diferentes combinação de ações

7.1.4.1 Verificação de segurança Asna 1

Propriedades de seção da Perna Direita (Elemento 5) da Asna 1:

$$A_x = 196,00 \text{ cm}^2; A_y = 130,67 \text{ cm}^2; A_z = 130,67 \text{ cm}^2; I_x = 4738,00 \text{ cm}^4; I_y = 3201,33 \text{ cm}^4;$$

$$I_z = 3201,33 \text{ cm}^4; W_y = 457,33 \text{ cm}^3; W_z = 457,33 \text{ cm}^3; h_t = 14,00 \text{ cm};$$

$$b_f = 14,00 \text{ cm}; t_f = 7,00 \text{ cm}; t_w = 7,00 \text{ cm}$$

Esforços em pontos característicos da seção:

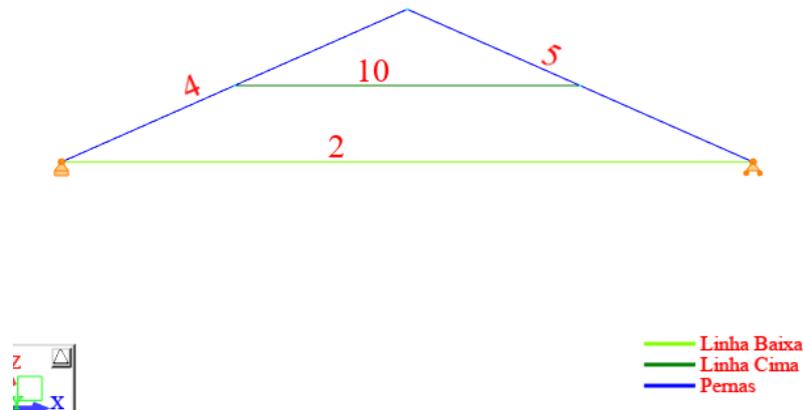


Figura 7.4: Representação gráfica da Asna 1 por diferentes elementos e seções transversais

$$N = 69,30 \text{ kN}; M_y = -1,12 \text{ kNm}; M_z = 4,13 \text{ kNm}; V_y = -5,23 \text{ kN}; V_z = -2,55 \text{ kN}$$

Tensões em pontos característicos da seção transversal

$$\sigma_{c,0,d} = 3,54 \text{ MPa}; \sigma_{m,y,d} = 2,44 \text{ MPa}; \sigma_{m,z,d} = 9,03 \text{ MPa};$$

$$\tau_{y,d} = -0,00 \text{ MPa}; \tau_{z,d} = -0,20 \text{ MPa}; \tau_{tor,y,d} = 0,10 \text{ MPa}; \tau_{tor,z,d} = 0,10 \text{ MPa}$$

Relações de segurança para os seguintes esforços:

L_y	$L_{ef,y}$	$i = \sqrt{\frac{I_y}{A}}$	$\lambda_y = \frac{L_y}{i}$	$\lambda_{rel,y}$	k_y	$k_{c,y}$
2,95 m	2,66 m	0,040	65,80	1,10	1,18	0,62

Tabela 7.9: Parâmetros para a verificação à encurvadura para o elemento Perna Direita Asna 1

Então:

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} \times f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} + k_m \times \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} = 0,92 < 1 \rightarrow OK!$$

$$\frac{\frac{\tau_{y,d}}{k_{cr}} + \frac{\tau_{tor,d}}{k_{shape}}}{f_{vd}} = 0,50 < 1 \rightarrow OK!$$

$$\frac{\frac{\tau_{z,d}}{k_{cr}} + \frac{\tau_{tor,z,d}}{k_{shape}}}{f_{vd}} = 0,28 < 1 \rightarrow OK!$$

7.1.4.2 Verificação de segurança Asna 2

Procede-se a verificação para a Perna Esquerda da Asna 2 com a combinação de ação mais desfavorável:

Combinação2: ULS–AVB:Vento 0° (compressão):

A Figura 7.5 indica a representação gráfica dos elementos da Asna 2

Esforços em pontos característicos de seção

$$N = 105,24 \text{ kN}; M_y = 1,35 \text{ kNm}; M_z = 3,32 \text{ kNm}; V_y = -2,54 \text{ kN}; V_z = -2,48 \text{ kN}$$

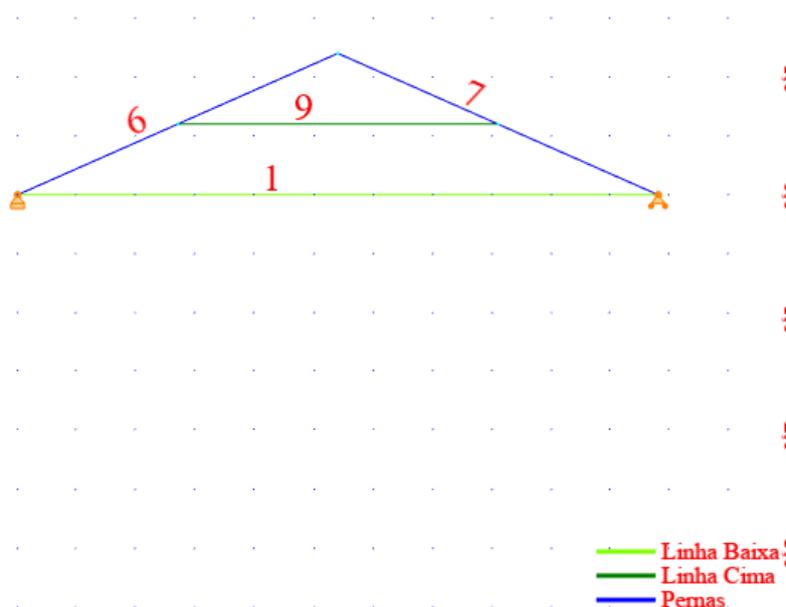


Figura 7.5: Representação gráfica da Asna 2 por diferentes elementos e seções transversais

Tensões em pontos característicos da seção transversal

$$\sigma_{c,0,d} = 5,37 \text{ MPa}; \sigma_{m,y,d} = 2,94 \text{ MPa}; \sigma_{m,z,d} = 7,26 \text{ MPa};$$

$$\tau_{y,d} = -0,19 \text{ MPa}; \tau_{z,d} = -0,19 \text{ MPa}; \tau_{tor,y,d} = 0,14 \text{ MPa}; \tau_{tor,z,d} = 0,14 \text{ MPa}$$

Relações de segurança para os seguintes esforços:

Então:

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} \times f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} + k_m \times \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} = 1,05 > 1 \rightarrow \text{NÃO VERIFICA!}$$

$$\frac{\frac{\tau_{y,d}}{k_{cr}} + \frac{\tau_{tor,d}}{k_{shape}}}{f_{vd}} = 0,30 < 1 \rightarrow \text{OK!}$$

$$\frac{\frac{\tau_{z,d}}{k_{cr}} + \frac{\tau_{tor,d}}{k_{shape}}}{f_{vd}} = 0,30 < 1 \rightarrow \text{OK!}$$

7.1.4.3 Verificação em relação aos estados limites de utilização

Relativamente aos estados limites de utilização ou serviço, a Figura 7.6 retirada do software Autodesk® Robot™ mostra as deformações do sistema de asnas em relação à combinação.

A combinação mais desfavorável para estes elementos de ambas as asnas é a seguinte:

Combinação 3: SLS: AVB: Vento 0°:

$$E_d = \sum_{j \geq 1} G_{k,j} + Q_{k,1} + \Psi_{0,i} \times Q_{k,i} = (PP_{estrutura} + PP_{revestimentos}) + W_{0^\circ} + 0,0 \times Sobrecarga_{categoria H}$$

Segundo o EC5, na seção 2.2.3 no ponto (5), a deformação final é dada pela seguinte expressão:

$$u_{fin} = u_{fin,G} + u_{fin,Q1} + u_{fin,Qi} \quad (7.2)$$

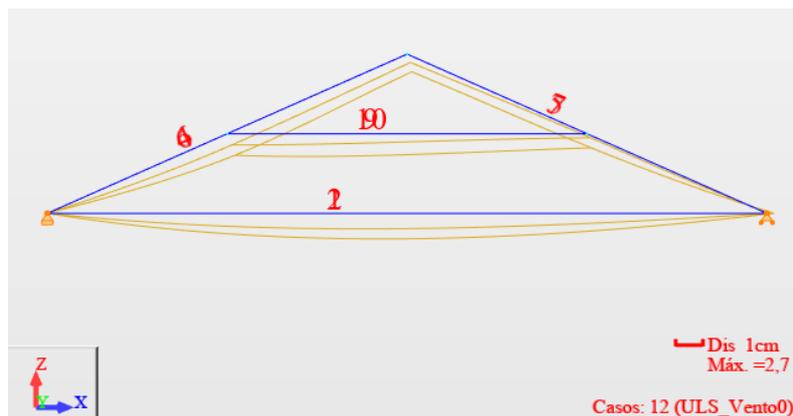


Figura 7.6: Deformação nas Asnas devido à combinação 3 dos SLS

Em que:

$$u_{fin,G} = u_{inst,G} \times (1 + k_{def}) \text{ para ações permanentes;}$$

$$u_{fin,Q,1} = u_{inst,Q,1} \times (1 + \psi_{2,1}k_{def}) \text{ para a ação variável de base;}$$

$$u_{fin,Q,i} = u_{inst,Q,i} \times (\psi_{0,i} + \psi_{2,1}k_{def}) \text{ para ações variáveis acompanhantes}$$

Em que:

$$k_{def} = 0,8 \text{ (classe de serviço 2 em madeira maciça).}$$

Resultados da Linha Baixa Asna 1

$u_{fin,y} = 0.3 \text{ cm} < u_{fin,max,y} = L/300.00 = 1.0 \text{ cm OK!}$

Caso de carga atuante: $(1+0.8)*PP_{estrutura} + (1+0.8)*PP_{telhas+ripado} + (1+0.8)*PP_{forro} + (1+0*0.8)*W_{0^\circ}$

$u_{fin,z} = 0.2 \text{ cm} < u_{fin,max,z} = L/300.00 = 1.0 \text{ cm OK!}$

Caso de carga atuante:

$(1+0.8)*PP_{estrutura} + (1+0.8)*PP_{telhas+ripado} + (1+0.8)*PP_{forro} + (1+0*0.8)*W_{0^\circ}$

$u_{inst,y} = 0.3 \text{ cm} < u_{inst,max,y} = L/500.00 = 0.6 \text{ cm OK!}$

Caso de carga atuante:

$PP_{estrutura} + PP_{telhas+ripado} + PP_{forro} + W_{0^\circ}$

$u_{inst,z} = 0.2 \text{ cm} < u_{inst,max,z} = L/500.00 = 0.6 \text{ cm OK!}$

Caso de carga atuante:

$PP_{estrutura} + PP_{telhas+ripado} + PP_{forro} + W_{0^\circ}$

Em relação a todas as combinações de ações SLS, tanto a Asna 1 e Asna 2 cumprem os requisitos do EC0.

Resultados da Linha Baixa Asna 2

$u_{fin,y} = 0.1 \text{ cm} < u_{fin,max,y} = L/300.00 = 1.8 \text{ cm OK!}$

Caso de carga atuante::

$$(1+0.8)*PP_{estrutura} + (1+0.8)*PP_{telhas+ripado} + (1+0.8)*PP_{forro} + (1+0*0.8)*W_{0^\circ}$$

$u_{fin,z} = 0.9 \text{ cm} < u_{fin,max,z} = L/300.00 = 1.8 \text{ cm OK!}$

Caso de carga atuante::

$$(1+0.8)*PP_{estrutura} + (1+0.8)*PP_{telhas+ripado} + (1+0.8)*PP_{forro} + (1+0*0.8)*W_{0^\circ}$$

$u_{inst,y} = 0.1 \text{ cm} < u_{inst,max,y} = L/500.00 = 1.1 \text{ cm OK!}$

Caso de carga atuante::

$$PP_{estrutura} + PP_{telhas+ripado} + PP_{forro} + W_{0^\circ} u_{inst,z} = 0.7 \text{ cm} < u_{inst,max,z} = L/500.00 = 1.1 \text{ cm OK!}$$

Caso de carga atuante::

$$PP_{estrutura} + PP_{telhas+ripado} + PP_{forro} + W_{0^\circ}$$

7.2 Modelo estrutural- Caso 1

7.2.1 Geometria do modelo e parâmetros de seção

De acordo com Cruz (2011): "(...)a avaliação de segurança implica normalmente assumir valores plausíveis para as propriedades mecânicas e para as medidas das seções úteis dos elementos. (...)"

Através da inspeção visual tornou-se possível verificar a variação de seção transversal, devido ao efeito de fluência e da forte presença de humidade, ataque de fungos de podridão, principalmente na zona dos topos de peças apoiadas dentro das paredes e em zonas de união de peças, onde a retenção de água é mais provável e ventilação é escassa. Como tal procede-se a uma redução das seções transversais dos elementos estruturais devido às anomalias detetadas na inspeção visual, assume-se que a redução é de 30% da sua secção transversal, de acordo com Capuz et al. (2006), citado na seção 4.3, penúltimo parágrafo.

Dito isto, o sistema das duas asnas em condições alteradas de redução de seção transversal em todos os elementos de madeira em 30%, bem como a consideração no software *Robot Structural Analysis*, de um deslocamento com curvatura considerada de 5 cm na direção Z, de forma a simular a deformação por efeito de fluência, e 2 cm na direção Y, em todos os membros de madeira.

Para este modelo, foi tida em conta a consideração prevista no EC5 na seção 3.2 ponto (4), para madeiras maciças com grau de humidade perto do ponto de saturação das fibras com um agravamento do valor previsto do k_{def} , ou seja, $k_{def} + 1$, uma vez que os elementos se encontram em estado deteriorado pela presença de humidade.

Consideração da relação área efetiva de seção/área bruta = 0,9, apenas considerada na deformação dos membros de madeira das asnas submetidas a análise, para os estados limites de utilização.

As condições de apoio em asnas: o apoio na parede lateral esquerda representado por um apoio rígido com os deslocamentos impedidos e a rotação em torno do eixo x restringido; o apoio lateral direito, apoio rígido com impedimento do deslocamento na direção z (vertical) e restringida a

rotação em torno do eixo x.

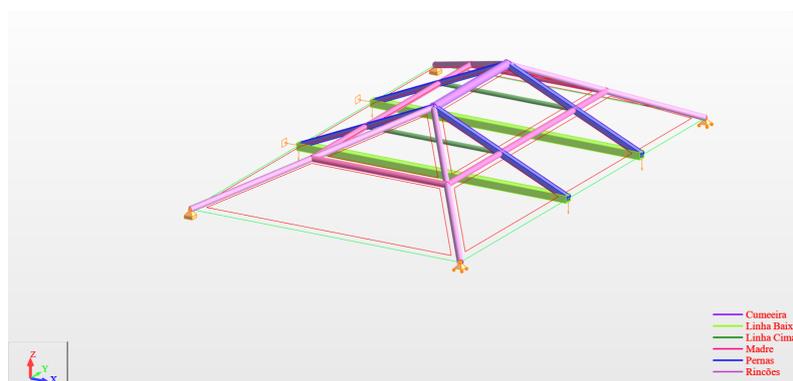


Figura 7.7: Representação gráfica das várias seções transversais distinguidas por cores através do software Autodesk® Robot Structural Analysis Professional 2021™, com destaque das diferenças de condições de apoio.

Elemento	Dimensões
Linha Baixa Asna 1 e 2	0,14m × 0,14m
Linha Cima Asna 1 e 2	Seção circular com $\Phi=8,4\text{cm}$
Pernas Asna 1e 2	Seção quadrada com 9,8 cm de lado
Cumeeira	Seção circular com $\Phi=11,2\text{ cm}$
Madres	Seção circular com $\Phi=11,2\text{ cm}$
Rincões	Seção circular com $\Phi=11,2\text{cm}$
Varas	$5,6 \times 5,6\text{cm}^2$ espaçadas de 0,30 metros

Tabela 7.10: Descrição das dimensões das seções dos elementos do sistema de asnas para o Caso 1

7.2.2 Cargas

Para este modelo estrutural Caso 1, a Tabela 7.11 representa as cargas introduzidas:

	Caso	Tipo de carga	Lista	Valores da carga (m) (kN) (Deg)
	2:Peso Próprio	peso próprio	1 2 4para12 1	' PZ Negativo Fator=1,00
	1:Peso Próprio Telha	(EF) uniforme	29para44	' PZ=-0,66(kN/m2)
	4:Sobrecarga	(EF) uniforme	29para44	' PZ=-0,40(kN/m2)
	7:PP Forro	(EF) uniforme	29para44	' PZ=-0,09(kN/m2)
	5:Vento_0	(EF) uniforme	34	' PZ=-3,54(kN/m2) local
	5:Vento_0	(EF) uniforme	38	' PZ=-3,30(kN/m2) local
	5:Vento_0	(EF) uniforme	33 35	' PZ=-3,23(kN/m2) local
	5:Vento_0	(EF) uniforme	30para32 37	' PZ=-2,45(kN/m2) local
	5:Vento_0	(EF) uniforme	43	' PZ=-2,45(kN/m2) local
	5:Vento_0	(EF) uniforme	39 40	' PZ=-2,45(kN/m2) local
	6:Vento_90	(EF) uniforme	29	' PZ=1,36(kN/m2) local
	6:Vento_90	(EF) uniforme	37	' PZ=1,60(kN/m2) local
	6:Vento_90	(EF) uniforme	43 44	' PZ=2,48(kN/m2) local
	6:Vento_90	(EF) uniforme	30para36 38p	' PZ=2,48(kN/m2) local
	5:Vento_0	(EF) uniforme	29 37	' PZ=-2,45(kN/m2) local

Tabela 7.11: Tabela de cargas do modelo estrutural do Caso 1, com recurso ao software Autodesk® Robot Structural Analysis Professional 2021™

7.2.3 Esforços

Para as mesmas combinações de ações para os estados limites últimos e para os estados limites de utilização do Caso 0, obtém-se os seguintes resultados para os esforços atuantes nas estruturas em sistema de asnas da cobertura do edifício. A figura 7.8 representa as duas asnas em análise do modelo estrutural caso 1.

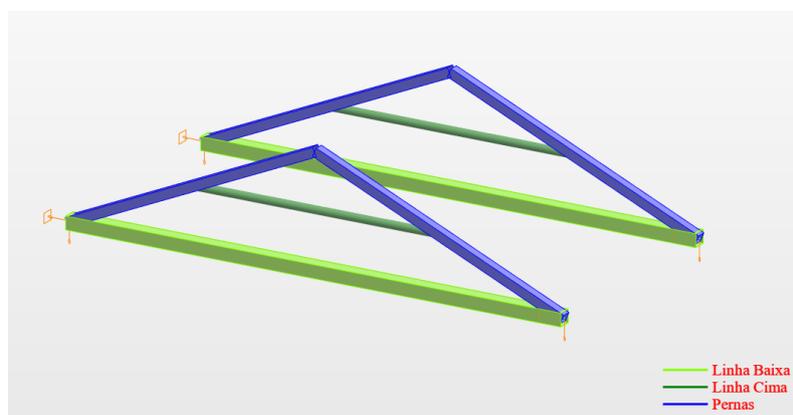


Figura 7.8: Representação gráfica do sistema de duas asnas em madeira do modelo caso 1

Esforço Axial

Para os estados limites últimos, a presença de maiores diagramas de esforço axial é devida à combinação de ações com a ação variável de base: Vento 0° (compressão), tal como indica na Figura D.6, do Anexo D.

Esforço Transverso

Para os estados limites últimos, a presença de maiores diagramas de esforço transverso, F_y e F_z , é devida à combinação de ações com a ação variável de base: Vento 0° (compressão), tal como indicam as Figuras D.7 e D.8, do Anexo D.

Momento Fletor

Para os estados limites últimos, a presença de maiores diagramas de momento fletor, M_y e momento fletor M_z , é devida à combinação de ações com a ação variável de base: Vento 0° (compressão), tal como indicam as Figuras D.9 e D.10, do Anexo D.

Conclusões a retirar, como esperado a Asna 2 continua a ser a asna com maiores esforços de tração na Linha Baixa, a Linha Cima e as Pernas sujeitas à compressão axial em ambas as Asnas, contudo um maior esforço expressão na Asna 2, também é de esperar que os momentos sejam iguais em valor absoluto nas pernas e na linha baixa, no mesmo ponto, em sinais opostos.

Verifica-se também que as combinações com a ação do vento como variável base têm esforços maiores do que com a combinação de ações com a sobrecarga como variável base. Sendo expectável, na combinação com a ação variável de base o vento na direção 0°, os esforços são maiores pois o vento exerce compressão sobre a cobertura.

7.2.4 Verificações de Segurança

7.2.4.1 Verificação de segurança Asna 1:

Verificação de segurança aos estados limites últimos para a estrutura global da Asna 1, o elemento 5 (perna direita da Asna 1) não se encontra em segurança, tal como indica os seguintes cálculos:

ASNA 1

A combinação que tem como ação variável de base o vento na direção de 0° , que se traduz na equação seguinte:

$$E_d = 1,35 \times (PP_{forro} + PP_{telhas+ripado+varas} + PP_{madres+estrutura\ de\ asnas}) + 1,50 \times (W_{vento0^\circ})$$

Propriedades de seção da Perna (Elementos 5):

$$A_x = 96,04\text{cm}^2; A_y = 64,03\text{cm}^2; A_z = 64,03\text{cm}^2; I_y = 768,64\text{cm}^4; I_z = 768,64\text{cm}^4;$$

$$W_y = 156,87\text{cm}^3; W_z = 156,87\text{cm}^3;$$

$$h_t = 9,8\text{cm}; b_t = 9,8\text{cm}; t_f = 4,9\text{cm}; t_w = 4,9\text{cm}; y = 2,8\text{cm}; r_z = 2,8\text{cm}$$

Esforços em pontos característicos de seção

$$N = 63,19\text{kN}; M_y = -0,59\text{kNm}; M_z = -3,84\text{kNm}; V_y = -4,74\text{kN}; V_z = 1,57\text{kN}$$

Tensões em pontos característicos da seção transversal

$$\sigma_{c,0,d} = 6,58\text{MPa}; \sigma_{m,y,d} = 3,75\text{MPa}; \sigma_{m,z,d} = 24,51\text{MPa};$$

$$\tau_{y,d} = -0,74\text{MPa}; \tau_{z,d} = 0,24\text{MPa};$$

$$\tau_{tor,y,d} = 0,49\text{MPa}; \tau_{tor,z,d} = 0,49\text{MPa}$$

Relações de segurança para os seguintes esforços:

Asna 1 – Elemento 5 – Perna Direita

A Tabela 7.12 indica os cálculos para a verificação de segurança aos elementos sujeitos a encurvadura, descritos na seção 6.11.

Elemento 5 – Perna Direita Asna 1	
$L_y = 2,95; L_{fy} = 0,9 \times 2,95 = 2,66$	$L_y = 2,95; L_{fy} = 0,9 \times 2,95 = 2,66$
$\lambda_y = \frac{L_y}{i} = 94$	
$\lambda_{rel,y} = \frac{\lambda_y}{\pi} \times \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} = \frac{94}{\pi} \times \sqrt{\frac{22}{8000}} = 1,57$	
$k_y = k_z = 1,86$	
$k_{c,y} = k_{c,z} = 0,35$	

Tabela 7.12: Cálculos de parâmetros para a verificação de segurança em relação à encurvadura para o elemento 5 – Perna Direita da Asna 1

Então:

Elemento 5 – Perna Direita Asna 1	
$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y} \times f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} + k_m \times \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} = \frac{6,58}{0,35 \times 15,23} + \frac{24,51}{21,11} + 0,7 \times \frac{3,75}{21,11} = 2,52 < 1 \rightarrow$	
<p>NÃO VERIFICA!</p>	
$\frac{\tau_{tor,y,d}}{k_{cr}} + \frac{\tau_{tor,z,d}}{k_{shape}} = \frac{-0,74}{0,67} + \frac{0,49}{1,05} = 1,14 > 1 \rightarrow$	
<p>NÃO VERIFICA!</p>	
$\frac{\tau_{z,d}}{k_{cr}} + \frac{\tau_{shape,d}}{k_{shape}} = \frac{0,24}{0,67} + \frac{-0,49}{1,05} = 0,60 < 1 \rightarrow$	
<p>OK!</p>	

Tabela 7.13: Equações de verificação de segurança de acordo com EC5 para o elemento 5, Perna Direita da Asna 1

Verificação em relação aos estados limites de utilização

Combinação 5: SLS: AVB: Sobrecarga c/ Vento 0°:
$E_d = \sum_{j \geq 1} G_{k,j} + \psi_{1,1} Q_{k,1} + \psi_{2,i} \times Q_{k,i} = (PP_{estrutura} + PP_{revestimentos}) + 0,0 \times Sobrecarga_{categoria H} + 0,0 \times W_{0^\circ}$
Considerar curvatura u _{0,y} = 0.2 cm
u _{fin,y} = 0.8 cm < u _{fin,max,y} = L/300.00 = 1.8 cm OK!
Caso de carga atuante: (1+1.8)* PP _{estrutura asnas} + (1+1.8)* PP _{ripas+varas+telhas} + (1+1.8)* PP _{forro} + (1+0*1.8)* W _{0°}
Considerar curvatura u _{0,z} = 5.0 cm
u _{fin,z} = 2.1 cm > u _{fin,max,z} = L/300.00 = 1.8 cm Não verificado
Caso de carga atuante: (1+1.8)* PP _{estrutura asnas} + (1+1.8)* PP _{ripas+varas+telhas} + (1+1.8)* PP _{forro} + (1+0*1.8)* W _{0°}
Considerar curvatura u _{0,y} = 0.2 cm
u _{inst,y} = 0.6 cm < u _{inst,max,y} = L/500.00 = 1.1 cm OK!
Caso de carga atuante: 1*PP _{estrutura asnas} + 1*PP _{ripas+varas+telhas} + 1*PP _{forro} + 1*W _{0°}
Considerar curvatura u _{0,z} = 5.0 cm
u _{inst,z} = 1.3 cm > u _{inst,max,z} = L/500.00 = 1.1 cm Não verificado
Caso de carga atuante: 1*PP _{estrutura asnas} + 1*PP _{ripas+varas+telhas} + 1*PP _{forro} + 1*W _{0°}
u _{net,fin,y} = u _{fin,y} + u _{0,y} = 0.8 + 0.2 = 1.0 cm < u _{net,fin,max,y} = L/200.00 = 2.7 cm OK!
Caso de carga atuante: (1+1.8)* PP _{estrutura asnas} + (1+1.8)* PP _{ripas+varas+telhas} + (1+1.8)* PP _{forro} + (1+0*1.8)* W _{0°}
u _{net,fin,z} = u _{fin,z} + u _{0,z} = 2.1 + 5.0 = 7.1 cm > u _{net,fin,max,z} = L/200.00 = 2.7 cm Não verificado
Caso de carga atuante: (1+1.8)* PP _{estrutura asnas} + (1+1.8)* PP _{ripas+varas+telhas} + (1+1.8)* PP _{forro} + (1+0*1.8)* W _{0°}

7.2.4.2 Verificação de segurança Asna 2:

Verificação de segurança aos estados limites últimos para a estrutura global da Asna 2, o elemento 6 (perna esquerda da Asna 2) não se encontra em segurança, tal como indica os seguintes cálculos:

ASNA 2

A combinação que tem como ação variável de base o vento na direção de 0°, que se traduz na equação seguinte:

$$E_d = 1,35 \times (PP_{forro} + PP_{telhas+ripado+varas} + PP_{mades+estrutura de asnas}) + 1,50 \times (W_{vento0^\circ}) \quad (7.3)$$

Esforços em pontos característicos de seção

$$N = 121,15kN; M_y = -3,16kNm; M_z = 1,33kNm; V_y = 0,05kN; V_z = 11,90kN$$

Tensões em pontos característicos da seção transversal

$$\sigma_{c,0,d} = 12,61MPa; \sigma_{m,y,d} = 20,12MPa; \sigma_{m,z,d} = 8,48MPa$$

$$\tau_{y,d} = -0,01MPa; \tau_{z,d} = 1,86MPa;$$

$$\tau_{tor,y,d} = 3,43MPa; \tau_{tor,z,d} = 3,43MPa$$

Relações de segurança para os seguintes esforços:

Asna 2 – Elemento 6 – Perna Esquerda

Elemento 6 – Perna Esquerda Asna 2	
$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y} \times f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \times \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} = \frac{12,61}{0,35 \times 15,23} + \frac{20,12}{21,11} + 0,7 \times \frac{8,48}{21,11} = 3,60 >$	$1 \rightarrow \text{NÃO VERIFICA!}$

Tabela 7.14: Equação de verificação de segurança em relação à flexão composta com esforço de compressão para o elemento 6, Perna Esquerda da Asna 2

$$\frac{\tau_{y,d}}{k_{cr}} + \frac{\tau_{tor,y,d}}{k_{shape}} = \frac{0,01}{0,67} + \frac{3,43}{1,05} = 2,37 > 1 \rightarrow \text{NÃO VERIFICA!}$$

$$\frac{\tau_{z,d}}{k_{cr}} + \frac{\tau_{tor,z,d}}{k_{shape}} = \frac{1,86}{0,67} + \frac{3,43}{1,05} = 4,36 > 1 \rightarrow \text{NÃO VERIFICA!}$$

7.2.5 Verificação em relação aos estados limites de utilização

Verificação de segurança aos estados limites de utilização para a estrutura global da Asna 1, o elemento 10 (Linha Cima) não se encontra em segurança, tal como indica os seguintes cálculos:

De forma conservadora, verifica-se a deformação final do elemento 10- Linha Cima Asna 1:

Carga atuante:

$$u_{fin,y} = u_{fin,PPestrutura} \times (1 + 1,8) + u_{fin,PPtelhas+ripado} \times (1 + 1,8) + u_{fin,PPferro} \times (1 + 1,8) +$$

$$+ u_{fin,Sobrecarga} \times (1 + 0,0 \times 1,8)$$

$$u_{fin,y} = 0,2 \text{ cm} < u_{fin,max,y} = L/300 = 0,9 \text{ cm} \rightarrow \text{OK!}$$

$$u_{fin,z} = u_{fin,PPestrutura} \times (1 + 1,8) + u_{fin,PPtelhas+ripado} \times (1 + 1,8) + u_{fin,PPferro} \times (1 + 1,8) +$$

$$+ u_{fin,Vento90^\circ} \times (1 + 0,0 \times 1,8)$$

$$u_{fin,z} = 0,1 \text{ cm} < u_{fin,max,z} = L/300 = 0,9 \text{ cm} \rightarrow \text{OK!}$$

De forma conservadora, verifica-se a deformação instantânea do elemento 10- Linha Cima Asna 1:

A combinação mais desfavorável na direção y é a combinação 2:

Combinação 2: SLS: AVB: Sobrecarga c/ Vento 90°:

$u_{0,y}$	-0,2 cm	Deflexão inicial em direção y (imposto no modelo)
$u_{0,z}$	-5,0 cm	Deflexão inicial direção z (imposto no modelo)
$u_{fin,y}$	0,2 cm	Deflexão final em direção y
$u_{fin,z}$	0,9 cm	Deflexão final em direção z
$u_{inst,y}$	0,1 cm	Deflexão devida a cargas permanentes e cargas variáveis em direção y
$u_{inst,max,y}$	0,5 cm	Deflexão máxima de cargas permanentes e cargas variáveis em direção y
$u_{net,fin,y}$	0,4 cm	Deflexão final líquida em direção y
$u_{net,max,y}$	1,3 cm	Deflexão final líquida máxima em direção y
$u_{inst,z}$	0,1 cm	Deflexão devida a cargas permanentes e cargas variáveis em direção z
$u_{inst,max,z}$	0,5 cm	Deflexão máxima de cargas permanentes e cargas variáveis em direção z
$u_{net,fin,z}$	5,1 cm	Deflexão final líquida em direção z
$u_{net,max,z}$	= 1,3 cm	Deflexão final líquida máxima em direção z
$u_{net,max,y}$		

Tabela 7.15: Resultados das deformações instantâneas, finais e líquidas na Asna 1

$$\begin{aligned}
 E_d &= \sum_{j \geq 1} G_{k,j} + Q_{k,1} + \Psi_{0,i} \times Q_{k,i} = (PP_{estrutura} + PP_{revestimentos}) + \\
 &\quad + Sobrecarga_{categoria H} + 0,6 \times W_{90^\circ} \\
 u_{inst,G} &= u_{inst,PP_{estrutura}} \times 1,0 + u_{inst,PP_{telhas+ripado}} \times 1,0 + \\
 &\quad + u_{inst,PP_{forro}} \times 1,0 + u_{inst,Sobrecarga} \times 1,0 + u_{inst,Vento90^\circ} \times 0,6 \\
 u_{inst,y} &= 0,1 \text{ cm} < u_{fin,max,y} = L/500 = 0,5 \text{ cm} \rightarrow OK!
 \end{aligned}$$

A combinação mais desfavorável na direção z é a combinação 4, descrita anteriormente:

$$u_{inst,z} = 0,1 \text{ cm} < u_{fin,max,y} = L/500 = 0,5 \text{ cm} \rightarrow OK!$$

De forma conservadora, verifica-se a deformação final líquida do elemento 10- Linha Cima Asna1:

$$\begin{aligned}
u_{net,fin,G} &= u_{net,fin,PPestrutura} \times (1 + 1,8) + u_{net,fin,PPtelhas+ripado} \times (1 + 1,8) + \\
&\quad + u_{net,fin,PPforro} \times (1 + 1,8) + u_{inet,fin,Sobrecarga} \times (1 + 0,0 \times 1,8) \\
u_{net,y} = u_{fin,y} + u_{0,y} &= 0,2 + 0,2 = 0,4 \text{ cm} < u_{net,fin,max,y} = L/200 = 1,3 \text{ cm} \rightarrow OK! \\
u_{net,fin,G} &= u_{net,fin,PPestrutura} \times (1 + 1,8) + u_{net,fin,PPtelhas+ripado} \times (1 + 1,8) + \\
&\quad + u_{net,fin,PPforro} \times (1 + 1,8) + u_{net,fin,Vento90^\circ} \times (1 + 0,0 \times 1,8) \\
u_{net,z} = u_{fin,z} + u_{0,z} &= 0,1 + 5,0 = 5,1 \text{ cm} > u_{net,fin,max,z} = L/200 = 1,3 \text{ cm} \rightarrow \text{NÃO VERIFICA!}
\end{aligned}$$

7.3 Modelo estrutural- Caso 2:

7.3.1 Geometria do modelo e parâmetros de seção

Solução para o sistema das duas asnas prevista em projeto de execução para este caso de estudo, descrito no projeto executado por (NCREP, 2020).

O quadro para as seções transversais das duas asnas a considerar no modelo estrutural com configuração tradicional do tipo “Palladio”, espaçadas por 3,5 metros, é o seguinte:

Elemento	Dimensões
Linha de seção VM3	10x18 cm^2
Pernas de seção VM2	10x14 cm^2
Pendural de seção VM2	10x14 cm^2
Escoras com seção VM4	10x10 cm^2
Madres com seção VM7	12x18 cm^2
Cumeeira com seção VM7	12x18 cm^2
Rincões com seção VM7	12x18 cm^2
Varas	8x8 cm^2 espaçadas de 0,50 metros
Frechal em todo o perímetro da cobertura com seção VM4	10x10 cm^2

Tabela 7.16: Descrição das dimensões das seções dos elementos do sistema de asnas para o Caso 2

A Figura 7.9 ilustra o modelo estrutural para o caso 2, com o auxílio do software Autodesk® Robot Structural Analysis Professional 2021™:

Especial destaque para a excentricidade das madres. Destaca-se também pela introdução do frechal em todo o perímetro do edifício em estudo (Figura 7.9)

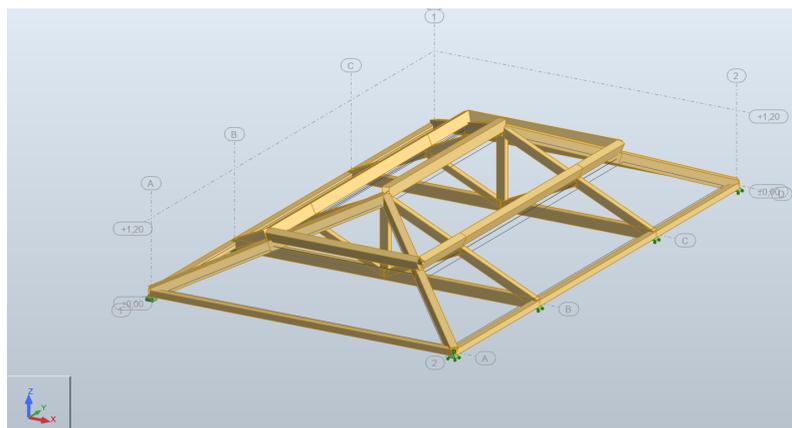


Figura 7.9: Representação gráfica geral do modelo estrutural Caso 2, através do software Autodesk® Robot Structural Analysis Professional 2021TM

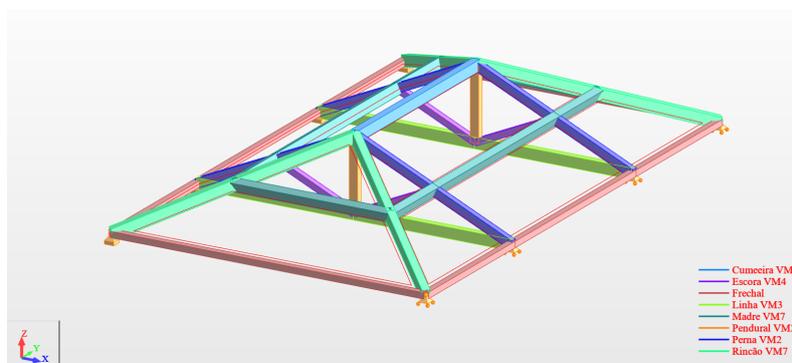


Figura 7.10: Representação gráfica do modelo caso 2, das várias seções transversais distinguidas por cores através do software Autodesk® Robot Structural Analysis Professional 2021TM

7.3.2 Cargas

Para este modelo estrutural, a Tabela 7.17 representa as cargas introduzidas:

Caso	Tipo de carga	Lista	Valores da carga (m) (kN) (Deg)
1:Peso Próprio	peso próprio	1 7 8para47P	'PZ Negativo Fator=1,00
2:Sobrecarga	(EF) uniforme	70para76 78p	'PZ=-0,40(kN/m2)
3:PP Cobertura: Telhas, ripas	(EF) uniforme	70para73 75	'PZ=-0,65(kN/m2)
4:Vento_0	(EF) uniforme	82	'PZ=-3,34(kN/m2) local
4:Vento_0	(EF) uniforme	80 83 84	'PZ=-3,30(kN/m2) local
4:Vento_0	(EF) uniforme	81 85	'PZ=-3,23(kN/m2) local
4:Vento_0	(EF) uniforme	70para76 78	'PZ=-2,45(kN/m2) local
5:Vento_90	(EF) uniforme	70	'PZ=1,36(kN/m2) local
5:Vento_90	(EF) uniforme	75	'PZ=1,60(kN/m2) local
5:Vento_90	(EF) uniforme	78 79	'PZ=2,48(kN/m2) local
5:Vento_90	(EF) uniforme	71para74 76	'PZ=2,48(kN/m2) local

Tabela 7.17: Tabela de cargas do modelo estrutural do Caso 2, com recurso ao software Autodesk® Robot Structural Analysis Professional 2021TM

7.3.3 Esforços

Para as mesmas combinações de ações para os estados limites últimos e para os estados limites de utilização do Caso 0, obtêm-se os seguintes resultados para os esforços atuantes nas estru-

turas em sistema de asnas da cobertura do edifício. A figura 7.11 representa as duas asnas em análise do modelo estrutural caso 2.

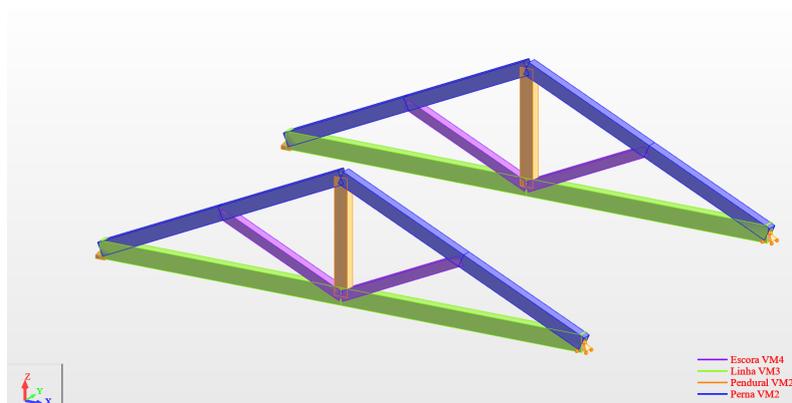


Figura 7.11: Representação gráfica do sistema de duas asnas em madeira do modelo caso 2

Esforço Axial

Para os estados limites últimos, a presença de maiores diagramas de esforço axial é devida à combinação de ações: Combinação 3: ULS– AVB: Sobrecarga c/Vento 0°, tal como indica na Figura D.11, do Anexo D.

Esforço Transverso

Para os estados limites últimos, a presença de maiores diagramas de esforço transverso, F_y , e F_z , é devida à combinação de ações: Combinação 3: ULS– AVB: Sobrecarga c/Vento 0°, tal como indicam as Figuras D.12 e D.13, do Anexo D.

Momento Fletor

Para os estados limites últimos, a presença de maiores diagramas de momento fletor, M_y , e M_z , é devida à combinação de ações: Combinação 3: ULS– AVB: Sobrecarga c/Vento 0°, tal como indicam as Figuras D.14 e D.15, do Anexo D.

7.3.4 Verificações de Segurança

Em relação aos ELU, para a estrutura da Asna 1 e Asna 2, como era expectável verifica a segurança em todos os elementos, destaca-se as pernas, que estão sujeitas a maiores esforços, tal como indica a figura 7.12 retirada do software *Robot Structural Analysis*.

Membro	Seção	Material	Lay	Laz	Relação	Caso
Grupo de código : 2 Asna 2						
53	Perna VM2	D30	32.09	44.92	0.56	6 ULS_Sobrecarga
Grupo de código : 5 Asna 1						
57	Perna VM2	D30	32.09	44.92	0.55	6 ULS_Sobrecarga

Figura 7.12: Verificação de segurança para ELU em Asna 1 e Asna 2 - modelo Caso 2

7.3.4.1 Verificação de segurança Asna 2:

Para a Perna VM2 do grupo Asna 2, a combinação de ações mais desfavorável é a que tem como variável de base Sobrecarga com a variável acompanhante o Vento na direção 0°, e traduz-se na seguinte expressão:

$$E_d = \gamma_{Gj,sup} \times G_{kj,sup} + \gamma_{Q,1} \times Q_{k,1} + \gamma_{Q,1} \times \Psi_{0,i} \times Q_{k,i} = 1,35 \times (PP_{estrutura} + PP_{revestimentos}) + 1,5 \times Sobrecarga_{categoria\ H} + 1,5 \times 0,6 \times W_{0^\circ}$$

Propriedades de seção da Perna VM2:

$$A_x = 140,00cm^2; A_y = 93,33cm^2; A_z = 93,33cm^2$$

$$I_y = 2566,7cm^4; I_z = 2286,67cm^4; W_y = 326,67cm^3; W_z = 233,33cm^3;$$

$$h_t = 14,00cm; b_t = 10,00cm; t_f = 5,0cm; t_w = 5,0cm; r_y = 4,0cm; r_z = 2,9cm;$$

Esforços em pontos característicos de seção

$$N = 47,07kN; M_y = -0,52\ kNm; M_z = 0,46\ kNm; V_y = -0,54\ kN; V_z = -2,12\ kN$$

Tensões em pontos característicos da seção transversal

$$\sigma_{c,0,d} = 3,36\ MPa; \sigma_{m,y,d} = 1,58\ MPa; \sigma_{m,z,d} = 1,98\ MPa;$$

$$\tau_{y,d} = -0,06\ MPa; \tau_{z,d} = -0,23\ MPa; \tau_{tor,y,d} = 0,33\ MPa; \tau_{tor,z,d} = 0,37\ MPa$$

Tensões toleráveis

$$f_{c,0,d} = 13,54\ MPa; f_{m,y,d} = 17,47\ MPa; f_{m,z,d} = 18,69\ MPa; f_{v,d} = 1,23\ MPa$$

Relações de segurança para os seguintes esforços:

As pernas estão sujeitas a flexão composta com compressão como tal é necessário avaliar o risco de bambeamento, procedendo-se às verificações de segurança enunciadas na seção 6.12

Verificação de segurança em relação ao fenómeno de bambeamento:

Método de cálculo tensão crítica para madeira maciça, com a fórmula (6.32) do EC5:

$$\sigma_{m,crit} = \frac{0,78 \times b^2}{h \times l_{ef}} \times E_{0,05} \quad (7.4)$$

Em que:

l_{ef} – comprimento efetivo do elemento, dependendo das condições de apoio e a configuração de carga, de acordo com a Tabela 6.1 do EC5; $l_{ef} = 0,9 \times l = 1,30\ m$ Então:

$$\sigma_{m,crit} = \frac{0,78 \times b^2}{h \times l_{ef}} \times E_{0,05} = \frac{0,78 \times 0,10^2}{0,14 \times 1,30} \times 8000 = 343,71\ MPa \quad (7.5)$$

Para o cálculo da esbelteza relativa para elementos sujeitos a flexão utiliza-se a seguinte expressão:

$$\lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{f_{m,k}}{\sigma_{m,crit}}} = \sqrt{\frac{28}{341,71}} = 0,29 \quad (7.6)$$

E segundo o ponto 4 da subsecção 6.3.3 do EC5, o cálculo do k_{crit} é determinado pela expressão:

$$k_{crit} = \begin{cases} 1 & \text{para } \lambda_{rel,m} \leq 0,75 \\ 1,56 - 0,75 \times \lambda_{rel,m} & \text{para } 0,75 < \lambda_{rel,m} \leq 1,4 \\ \frac{1}{\lambda_{rel,m}^2} & \text{para } 1,4 < \lambda_{rel,m} \end{cases}$$

Logo, para este elemento Perna VM2, o $k_{crit} = 1,0$

As tensões atuantes devem satisfazer a seguinte expressão:

$$\sigma_{m,y,d} \leq k_{crit} \times f_{m,y,d} \equiv 1,58 \leq 1,0 \times 19,65 \rightarrow OK!$$

$$\sigma_{m,z,d} \leq k_{crit} \times f_{m,z,d} \equiv 1,98 \leq 1,0 \times 21,02 \rightarrow OK!$$

Verificação de segurança relativamente à encurvadura, descrita na 6.11

Perna VM2	
$L_y = 1,44; L_{fy} = 0,9 \times 1,44 = 1,30 \text{ m}$	$L_z = 2,95 L_{fz} = 0,9 \times 1,44 = 1,30 \text{ m}$
$i_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}} = 0,040$	$i_z = \sqrt{\frac{I_z}{A}} = 0,029$
$\lambda_y = \frac{L_y}{i_y} = 32,09$	$\lambda_z = \frac{L_z}{i_z} = 44,92$
$\lambda_{rel,y} = \frac{\lambda_y}{\pi} \times \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} = \frac{44,92}{\pi} \times \sqrt{\frac{22}{8000}} = 0,54$	$\lambda_{rel,z} = \frac{\lambda_z}{\pi} \times \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} = \frac{44,92}{\pi} \times \sqrt{\frac{22}{8000}} = 0,75$
$k_y = 0,67$	$k_z = 0,83$
$k_{c,y} = 0,94$	$k_{c,z} = 0,85$

Tabela 7.18: Cálculos de parâmetros para a verificação de segurança em relação à encurvadura para a Perna VM2 da Asna 2

Então:

Perna VM2 – Asna 2
$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y} \times f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} + k_m \times \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} = \frac{6,58}{0,94 \times 13,54} + 0,7 \times \frac{1,58}{17,47} + \frac{1,98}{18,69} = 0,46 < 1 \rightarrow OK!$
$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} \times f_{c,0,d}} + k_m \times \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 = \frac{6,58}{0,85 \times 13,54} + 0,7 \times \frac{1,58}{17,47} + \frac{1,98}{18,69} = 0,74 < 1 \rightarrow OK!$
$\frac{\frac{\sigma_{y,d}}{k_{cr}} + \frac{\sigma_{tor,y,d}}{k_{shape}}}{f_{vd}} = \frac{-0,23 + 0,37}{0,67 + 1,07} = 0,32 < 1 \rightarrow OK!$
$\frac{\frac{\sigma_{z,d}}{k_{cr}} + \frac{\sigma_{tor,z,d}}{k_{shape}}}{f_{vd}} = \frac{-0,23 + 0,37}{0,67 + 1,07} = 0,56 < 1 \rightarrow OK!$

Tabela 7.19: Equações de verificação de segurança de acordo com EC5 para Perna VM2 da Asna 2

7.3.4.2 Verificação de segurança Asna 1:

Para a Perna VM2 do grupo Asna 1, a combinação de ações mais desfavorável é a que tem como variável de base Sobrecarga com a variável acompanhante o Vento na direção 0° , e traduz-se na seguinte expressão:

$$E_d = \gamma_{Gj,sup} \times G_{kj,sup} + \gamma_{Q,1} \times Q_{k,1} + \gamma_{Q,1} \times \Psi_{0,i} \times Q_{k,i} = 1,35 \times (PP_{estrutura} + PP_{revestimentos}) + 1,5 \times Sobrecarga_{categoria H} + 1,5 \times 0,6 \times W_{0^\circ}$$

Esforços em pontos característicos de seção

$$N = 44,94kN; M_y = -0,51 kNm; M_z = -0,49 kNm; V_y = 0,60 kN; V_z = -2,10 kN$$

Tensões em pontos característicos da seção transversal

$$\sigma_{c,0,d} = 3,21 MPa; \sigma_{m,z,d} = 1,55 MPa;$$

$$\tau_{y,d} = 0,06 MPa; \tau_{z,d} = -0,23 MPa;$$

$$\tau_{tor,y,d} = 0,33 MPa; \tau_{tor,z,d} = 0,37 MPa$$

Relações de segurança para os seguintes esforços:

Verificação de segurança em relação ao fenómeno de bambeamento:

As tensões atuantes devem verificar a segurança, de acordo com o descrito 6.12.

$$\sigma_{m,y,d} \leq k_{crit} \times f_{m,y,d} \equiv 1,55 \leq 1,0 \times 17,47 \rightarrow OK!$$

$$\sigma_{m,z,d} \leq k_{crit} \times f_{m,z,d} \equiv 2,12 \leq 1,0 \times 18,69 \rightarrow OK!$$

Para os elementos sujeitos à flexão combinada com esforço axial de compressão devem cumprir as expressões da secção 6.10.3

$$\left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}}\right)^2 + k_m \times \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \equiv \left(\frac{3,21}{13,54}\right)^2 + 0,7 \times \frac{1,55}{17,47} + \frac{2,12}{18,69} = 0,23 < 1 \rightarrow OK!$$

A verificação em relação é encurvadura, como descrito na secção 6.11.

Em que,

L_y	$L_{ef,y}$	$i = \sqrt{\frac{I_y}{A}}$	$\lambda_y = \frac{L_y}{i}$	$\lambda_{rel,y}$	k_y	$k_{c,y}$
1,44 m	1,30 m	0,040	32,068	0,54	0,67	0,94
L_z	$L_{ef,z}$	$i = \sqrt{\frac{I_z}{A}}$	$\lambda_z = \frac{L_z}{i}$	$\lambda_{rel,z}$	k_z	$k_{c,z}$
1,44 m	1,30 m	0,029	44,92	0,75	0,83	0,85

Tabela 7.20: Cálculos de parâmetros para a verificação de segurança em relação à encurvadura para a Perna VM2 da Asna 1

Então:

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y} \times f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \times \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \equiv \frac{3,21}{0,94 \times 13,54} + \frac{1,55}{17,47} + 0,7 \times \frac{2,55}{18,69} = 0,42 < 1 \rightarrow OK!$$

Na direção Z, também é necessário verificar a segurança descrita 6.11.

Então:

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} \times f_{c,0,d}} + k_m \times \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \equiv \frac{3,21}{0,85 \times 13,54} + 0,7 \times \frac{1,55}{17,47} + \frac{2,12}{18,69} = 0,46 < 1 \rightarrow OK!$$

$$\frac{\tau_{y,d}}{k_{cr}} + \frac{\tau_{tor,y,d}}{k_{shape}} = \frac{0,06 + 0,33}{0,67 + 1,07} = 0,32 < 1 \rightarrow OK!$$

$$\frac{\tau_{z,d}}{k_{cr}} + \frac{\tau_{tor,z,d}}{k_{shape}} = \frac{-0,23 + 0,37}{0,67 + 1,07} = 0,55 < 1 \rightarrow OK!$$

7.3.4.3 Verificação em relação aos estados limites de utilização

Verificação de segurança aos estados limites de utilização ou de serviço para a estrutura global da Asna 1 e 2, as Linhas VM3 encontram-se em segurança, tal como indica os seguintes cálculos:

Figura 7.13: Verificação de segurança para ambas as asnas em relação aos estados limites de utilização – Caso 2

A combinação mais desfavorável para estes elementos de ambas as asnas é a seguinte:

Combinação 3: SLS: AVB: Vento 0°:

$$E_d = \sum_{j \geq 1} G_{k,j} + Q_{k,1} + \Psi_{0,i} \times Q_{k,i} = (PP_{estrutura} + PP_{revestimentos}) + W_{0^\circ} + 0,0 \times Sobrecarga_{categoria H}$$

De forma conservadora, verifica-se a deformação final do elemento 15- Linha Asna 1:

Considerar curvatura $u_{0,y} = 0.0$ cm $u_{fin,y} = 0.2$ cm $< u_{fin,max,y} = L/300.00 = 0.9$ cm $\rightarrow OK!$

Caso de carga atuante: $(1+0.8) \cdot PP_{estrutura\ asna} + (1+0.8) \cdot PP_{revestimentos} + (1+0 \cdot 0.8) \cdot W_{0^\circ}$

Considerar curvatura $u_{0,z} = 0.0$ cm

$u_{fin,z} = 0.1$ cm $< u_{fin,max,z} = L/300.00 = 0.9$ cm $\rightarrow OK!$

Caso de carga atuante: $(1+0.8) \cdot PP_{estrutura\ asna} + (1+0.8) \cdot PP_{revestimentos} + (1+0 \cdot 0.8) \cdot W_{0^\circ}$

Considerar curvatura $u_{0,y} = 0.0$ cm

$u_{inst,y} = 0.1$ cm $< u_{inst,max,y} = L/500.00 = 0.5$ cm $\rightarrow OK!$

Caso de carga atuante: $PP_{estrutura\ asna} + PP_{revestimentos} + W_{0^\circ}$

Considerar curvatura $u_{0,z} = 0.0$ cm

$u_{inst,z} = 0.1$ cm $< u_{inst,max,z} = L/500.00 = 0.5$ cm $\rightarrow OK!$

Caso de carga atuante: $PP_{estrutura\ asna} + PP_{revestimentos} + W_{0^\circ}$

$u_{net,fin,y} = u_{fin,y} - u_{0,y} = 0.2 - 0.1 = 0.1$ cm $< u_{net,fin,max,y} = L/200.00 = 1.3$ cm $\rightarrow OK!$

Caso de carga atuante: $(1+0.8) \cdot PP_{estrutura\ asna} + (1+0.8) \cdot PP_{revestimentos} + (1+0 \cdot 0.8) \cdot W_{0^\circ}$

$u_{net,fin,z} = u_{fin,z} - u_{0,z} = 0.1 - 0.1 = 0.0$ cm $< u_{net,fin,max,z} = L/200.00 = 1.3$ cm $\rightarrow OK!$

Caso de carga atuante: $(1+0.8) \cdot PP_{estrutura\ asna} + (1+0.8) \cdot PP_{revestimentos} + (1+0 \cdot 0.8) \cdot W_{0^\circ}$

7.4 Modelo estrutural- Caso 3:

7.4.1 Geometria do modelo e parâmetros de seção

- **Caso 3:** Solução para o sistema das duas asnas prevista em fase de reabilitação em condições ideais de propriedades mecânicas de resistência;
- **Consideração da relação área efetiva de seção/área bruta = 0,9, para representação de perda de seção por degradação pela presença de fungos xilófagos.**

Elemento	Dimensões
Linha Baixa Asna 1 e 2	0,16m × 0,16m
Linha Alta Asna 1 e 2	Seção circular com $\Phi=12$ cm
Pernas Asna 1 e 2	Seção quadrada com 14 cm de lado
Cumeeira	Seção circular com $\Phi=16$ cm
Madres	Seção circular com $\Phi=16$ cm
Rincões	Seção circular com $\Phi=16$ cm
Varas	$8 \times 8 \text{ cm}^2$ espaçadas de 0,30 metros

Tabela 7.21: Descrição das dimensões das seções dos elementos do sistema de asnas para o Caso 3

Este caso 3, tal como o caso 0 e caso 1, tem a mesma tabela de seções transversais de elementos de madeiras com a distinção das cargas assimétricas submetidas no modelo, relativamente às cargas permanentes acerca de revestimentos de cobertura, que em fase de construção/reabilitação foram escolhidas como opção de reabilitação no sentido do melhorar o desempenho térmico e de ventilação da cobertura.

A Figura 7.14 ilustra o modelo estrutural para o caso 3, com o auxílio do software *Autodesk® Robot Structural Analysis Professional 2021™*.

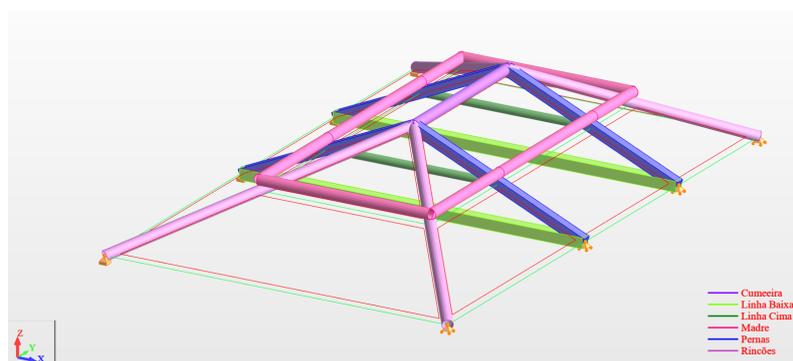


Figura 7.14: Representação gráfica do modelo caso 3, das várias seções transversais distinguidas por cores através do software *Autodesk® Robot Structural Analysis Professional 2021™*

7.4.2 Cargas

Para este modelo estrutural, a Tabela 7.22 representa as cargas introduzidas:

Caso	Tipo de carga	Lista	Valores da carga (m) (kN) (Deg)
2:Peso Próprio	peso próprio	1 2 4 para 12 1	* PZ Negativo Fator=1,00
1:Peso Próprio Telha	(EF) uniforme	29 para 44	* PZ=-0,71(kN/m ²)
4:Sobrecarga	(EF) uniforme	29 para 44	* PZ=-0,40(kN/m ²)
5:Vento_0	(EF) uniforme	34	* PZ=-3,54(kN/m ²) local
5:Vento_0	(EF) uniforme	38	* PZ=-3,30(kN/m ²) local
5:Vento_0	(EF) uniforme	33 35	* PZ=-3,23(kN/m ²) local
5:Vento_0	(EF) uniforme	30 para 32 37	* PZ=-2,45(kN/m ²) local
5:Vento_0	(EF) uniforme	43	* PZ=-2,45(kN/m ²) local
5:Vento_0	(EF) uniforme	39 40	* PZ=-2,45(kN/m ²) local
6:Vento_90	(EF) uniforme	29	* PZ=1,36(kN/m ²) local
6:Vento_90	(EF) uniforme	37	* PZ=1,60(kN/m ²) local
6:Vento_90	(EF) uniforme	43 44	* PZ=2,48(kN/m ²) local
6:Vento_90	(EF) uniforme	30 para 36 38 p	* PZ=2,48(kN/m ²) local
5:Vento_0	(EF) uniforme	29 37	* PZ=-2,45(kN/m ²) local
11:Peso próprio Painel Sandwich	(EF) uniforme	29 para 44	* PZ=-1,39(kN/m ²)
12:PP Placa OSB	(EF) uniforme	29 para 44	* PZ=-0,12(kN/m ²)
13:PP Placa XPS	(EF) uniforme	29 para 44	* PZ=-0,03(kN/m ²)
13:PP Placa XPS	(EF) uniforme		
*			

Tabela 7.22: Tabela de cargas do modelo estrutural do Caso 3, com recurso ao software Autodesk® Robot Structural Analysis Professional 2021TM

7.4.3 Esforços

Esforço Axial

Para os estados limites últimos, a presença de maiores diagramas de esforço axial é devida à combinação de ações com a ação variável de base: Vento 0° (compressão), tal como indica a Figura D.16, do Anexo D.

Esforço Transverso

Para os estados limites últimos, a presença de maiores diagramas de esforço transverso, F_y , e F_z , é devida à combinação de ações: Combinação 1:AVB: Vento 0° (compressão), tal como indicam as Figuras D.17 e D.18, do Anexo D.

Momento Fletor

Para os estados limites últimos, a presença de maiores diagramas de momento fletor, M_y , e M_z é devida à combinação de ações: Combinação 1: ULS– AVB: Vento 0° (compressão), tal como indica as Figuras D.19 e D.20, do Anexo D.

7.4.4 Verificações de Segurança

Em relação aos ELU, para a estrutura da Asna 1 e Asna 2, não verifica a segurança em todos os elementos, destaca-se as pernas mais uma vez, que estão sujeitas a maiores esforços combinados, tal como indica a figura 7.15 retirada do software *Robot Structural Analysis*.

7.4.4.1 Verificação de segurança Asna 1:

A combinação que tem como ação variável de base o vento na direção de 0°, que se traduz na equação seguinte:

$$E_d = 1,35 \times (PP_{\text{forro}} + PP_{\text{telhas+ripado+varas}} + PP_{\text{painel sandwich}} + PP_{\text{forro placa OSB}} + PP_{\text{isolamento placa XPS}} + PP_{\text{madres+estrutura de asnas}}) + 1,50 \times (W_{\text{vento}0^\circ})$$

Figura 7.15: Verificação de segurança das Asnas e da estrutura global aos ELU, Caso 3

Para este caso 3, as propriedades de seção são as mesmas que no Caso 0 e Caso 1, uma vez que não é necessário voltar a descrevê-las.

Trata-se da Perna Direita -Elemento 5 do modelo estrutural, também já mencionado nos casos anteriores.

Esforços em pontos característicos de seção

$$N = 97,23 \text{ kN}; M_y = -1,27 \text{ kNm}; M_z = 5,41 \text{ kNm}; V_y = -6,91 \text{ kN}; V_z = -3,30 \text{ kN}$$

Tensões em pontos característicos da seção transversal

$$\sigma_{c,0,d} = 4,96 \text{ MPa}; \sigma_{m,y,d} = 2,78 \text{ MPa}; \sigma_{m,z,d} = 11,82 \text{ MPa};$$

$$\tau_{y,d} = -0,53 \text{ MPa}; \tau_{z,d} = -0,25 \text{ MPa};$$

$$\tau_{tor,y,d} = 0,13 \text{ MPa}; \tau_{tor,z,d} = 0,13 \text{ MPa}$$

Relações de segurança para os seguintes esforços:

Elemento 5 – Perna Direita Asna 1	
$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y} \times f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} + k_m \times \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} = \frac{4,96}{0,35 \times 15,23} + \frac{11,92}{19,65} + 0,7 \times \frac{2,78}{19,65} =$	$1,23 > 1 \rightarrow \text{NÃO VERIFICA!}$
$\frac{\tau_{y,d}}{k_{cr}} + \frac{\tau_{tor,y,d}}{k_{shape}} = \frac{-0,53}{0,67} + \frac{0,13}{1,05} =$	$\frac{-0,53}{1,38} = 0,66 < 1 \rightarrow \text{OK!}$
$\frac{\tau_{z,d}}{k_{cr}} + \frac{\tau_{tor,z,d}}{k_{shape}} = \frac{-0,25}{0,67} + \frac{0,13}{1,05} =$	$\frac{-0,25}{1,38} = 0,36 < 1 \rightarrow \text{OK}$

Tabela 7.23: Equações de verificação de segurança de acordo com EC5 para o elemento 5, Perna Direita da Asna 1

7.4.4.2 Verificação de segurança Asna 2

Para a mesma combinação que a Asna 1, neste caso trata-se da Perna Direita da Asna 2, Elemento 7:

Esforços em pontos característicos de seção

$$N = 209,07 \text{ kN}; M_y = 2,31 \text{ kNm}; M_z = 0,15 \text{ kNm}; V_y = -0,15 \text{ kN}; V_z = 0,06 \text{ kN}$$

Tensões em pontos característicos da seção transversal

$$\sigma_{c,0,d} = 10,67 \text{ MPa}; \sigma_{m,y,d} = 5,06 \text{ MPa}; \sigma_{m,z,d} = 0,32 \text{ MPa};$$

$$\tau_{y,d} = -0,01 \text{ MPa}; \tau_{z,d} = 0,00 \text{ MPa}; \tau_{tor,z,d} = \tau_{tor,y,d} = 0,07 \text{ MPa};$$

Relações de segurança para os seguintes esforços:

Elemento 7– Perna Direita Asna 2	
$L_y = 2,95$; $L_{fy} = 0,9 \times 2,95 = 2,66$	$L_y = 2,95$ $L_{fy} = 0,9 \times 2,95 = 2,66$
$\lambda_y = \frac{L_y}{i} = 65,80$	
$\lambda_{rel,y} = \frac{\lambda_y}{\pi} \times \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} = \frac{65,80}{\pi} \times \sqrt{\frac{22}{8000}} = 1,10$	
$k_y = k_z = 1,18$	
$k_{c,y} = k_{c,z} = 0,62$	

Tabela 7.24: Cálculos de parâmetros para a verificação de segurança em relação à encurvadura para o elemento 5 – Perna Direita da Asna 1

Então:

Elemento 7 – Perna Direita Asna 2	
$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y} \times f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \times \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} = \frac{10,67}{0,35 \times 15,23} + \frac{5,06}{19,65} + 0,7 \times \frac{0,32}{19,65} = 1,41 > 1 \rightarrow \text{NÃO VERIFICA!}$	

$$\frac{\tau_{y,d}}{k_{cr}} + \frac{\tau_{tor,y,d}}{k_{shape}} = 0,06 < 1 \rightarrow OK!$$

$$\frac{\tau_{z,d}}{k_{cr}} + \frac{\tau_{tor,z,d}}{k_{shape}} = 0,05 < 1 \rightarrow OK!$$

7.4.4.3 Verificação em relação aos estados limites de utilização

Em relação aos estados limites de utilização, o modelo estrutural caso 3 foi analisado de acordo com as combinações de ações descritas no subcapítulo 6.2.2, e o resultado do software Autodesk® Robot Structural Analysis Professional 2021™ para o grupo de elementos em madeira maciça D30, definido como Asna 1 e Asna 2 bem como para a estrutura global, ilustra-se na Figura 7.16:

Membro	Seção	Material	Proporc	Caso (uy)	Proporc	Caso (uz)
Grupo de código: 1 Asna 1						
4 Membro de madeira_2_4	Pernas	D30	0.60	1*2 + 1*1 + 1*5 + 1*	0.40	1*2 + 1*1 + 1*5 + 1*1 + 1*
Grupo de código: 2 Asna 2						
1 Membro de madeira_2_1	Linha Baixa	D30	0.08	1*2 + 1*1 + 1*5 + 1*	0.85	1*2 + 1*1 + 1*5 + 1*1 + 1*
Grupo de código: 3 Estrutura Global						
1 Membro de madeira_2_1	Linha Baixa	D30	0.08	1*2 + 1*1 + 1*5 + 1*	0.85	1*2 + 1*1 + 1*5 + 1*1 + 1*

Figura 7.16: Resultados da análise de verificação de segurança aos estados limites de utilização, modelo estrutural Caso 3

A combinação mais desfavorável para estes elementos de ambas a asna continua a ser a combinação 3, combinação característica (para estados irreversíveis) com a variável de base Vento 0°

Combinação 3: SLS: AVB: Vento 0°:

$$E_d = \sum_{j \geq 1} G_{k,j} + Q_{k,1} + \Psi_{0,i} \times Q_{k,i} = (PP_{estrutura} + PP_{revestimentos}) + W_{0^\circ} + 0,0 \times Sobrecarga_{categoria H}$$

Verificações com as deformações máximas para a perna esquerda da Asna 1 (elemento 4)

$u_{fin,y} = 0.5 \text{ cm} < u_{fin,max,y} = L/300.00 = 1.0 \text{ cm OK!}$

Caso de carga atuante: $(1+0.8) \cdot PP_{estrutura\ asnas} + (1+0.8) \cdot PP_{telhas} + (1+0.8) \cdot W_{0^\circ} + (1+0.8) \cdot PP_{painel\ sandwich} + (1+0.8) \cdot PP_{placa\ OSB} + (1+0.8) \cdot PP_{isolamento\ XPS}$

$u_{fin,z} = 0.3 \text{ cm} < u_{fin,max,z} = L/300.00 = 1.0 \text{ cm OK!}$

Caso de carga atuante: $(1+0.8) \cdot PP_{estrutura\ asnas} + (1+0.8) \cdot PP_{telhas} + (1+0.8) \cdot W_{0^\circ} + (1+0.8) \cdot PP_{painel\ sandwich} + (1+0.8) \cdot PP_{placa\ OSB} + (1+0.8) \cdot PP_{isolamento\ XPS}$

$u_{inst,y} = 0.4 \text{ cm} < u_{inst,max,y} = L/500.00 = 0.6 \text{ cm OK!}$

Caso de carga atuante: $PP_{estrutura\ asnas} + PP_{telhas} + W_{0^\circ} + PP_{painel\ sandwich} + PP_{placa\ OSB} + PP_{isolamento\ XPS}$

$u_{inst,z} = 0.2 \text{ cm} < u_{inst,max,z} = L/500.00 = 0.6 \text{ cm OK!}$

Caso de carga atuante: $PP_{estrutura\ asnas} + PP_{telhas} + W_{0^\circ} + PP_{painel\ sandwich} + PP_{placa\ OSB} + PP_{isolamento\ XPS}$

Verificações com as deformações máximas para Linha Baixa da Asna 2 (elemento 1)

$u_{fin,y} = 0.1 \text{ cm} < u_{fin,max,y} = L/300.00 = 1.8 \text{ cm OK!}$

Caso de carga atuante: $(1+0.8) \cdot PP_{estrutura\ asnas} + (1+0.8) \cdot PP_{telhas} + (1+0.8) \cdot W_{0^\circ} + (1+0.8) \cdot PP_{painel\ sandwich} + (1+0.8) \cdot PP_{placa\ OSB} + (1+0.8) \cdot PP_{isolamento\ XPS}$

$u_{fin,z} = 1.3 \text{ cm} < u_{fin,max,z} = L/300.00 = 1.8 \text{ cm OK!}$

Caso de carga atuante: $(1+0.8) \cdot PP_{estrutura\ asnas} + (1+0.8) \cdot PP_{telhas} + (1+0.8) \cdot W_{0^\circ} + (1+0.8) \cdot PP_{painel\ sandwich} + (1+0.8) \cdot PP_{placa\ OSB} + (1+0.8) \cdot PP_{isolamento\ XPS}$

$u_{inst,y} = 0.1 \text{ cm} < u_{inst,max,y} = L/500.00 = 1.1 \text{ cm OK!}$

Caso de carga atuante: $PP_{estrutura\ asnas} + PP_{telhas} + W_{0^\circ} + PP_{painel\ sandwich} + PP_{placa\ OSB} + PP_{isolamento\ XPS}$

$u_{inst,z} = 0.9 \text{ cm} < u_{inst,max,z} = L/500.00 = 1.1 \text{ cm OK!}$

Caso de carga atuante: $PP_{estrutura\ asnas} + PP_{telhas} + W_{0^\circ} + PP_{painel\ sandwich} + PP_{placa\ OSB} + PP_{isolamento\ XPS}$

7.5 Modelo estrutural - Caso 4

Por último, apresenta-se o modelo estrutural Caso 4, a solução alternativa à intervenção prevista – Caso 2, e à intervenção efetiva na cobertura do edifício em estudo – Caso 3.

Após análise dos restantes casos, pode-se concluir que o reforço estrutural é necessário, principalmente na ligação perna-linha, a mais solicitada relativamente a todos os esforços, com destaque para o esforço axial na linha, e flexão composta com compressão sujeita a encurvadura nas pernas.

Tanto o Caso 0 como o Caso 1 apresentam deficiências no projeto, pois estes modelos são constituídos por elementos de seção insuficiente, e não cumprem com a legislação em vigor.

O Caso 2, a substituição integral de uma nova cobertura, com maior capacidade portante, é uma solução muito intrusiva que altera o funcionamento da estrutura original, mas implica a redistribuição de esforços em todo o edifício.

Uma vez que é necessário proceder ao destelhamento integral, sendo que o telhado se encontra em situação de deterioração irreversível, o Caso 4, solução alternativa de reabilitação, menos intrusiva, embora também com a adição de uma nova asna a meio distância entre as asnas existentes, reduzindo o seu espaçamento para 1,275 m, vai também causar uma redistribuição dos esforços na estrutura.

Esta solução estrutural tem como principal objetivo aumentar a resistência da estrutura existente,

reduzindo os esforços em determinados elementos. A madeira a utilizar é da mesma espécie da existente e com características mecânicas idênticas, mas tratada e devidamente seca.

Tem como vantagem a legibilidade e economia da intervenção, e como desvantagens a alteração do funcionamento da estrutura existente e a alteração da estética.

A solução poderá também passar por introduzir elementos de contraventamento, por exemplo, madres entre as asnas de cobertura, o que irá aumentar o peso próprio, podendo não contribuir para um bom desempenho estrutural e não verificar a segurança de acordo com as normas.

7.5.1 Geometria do modelo e parâmetros de seção

A nova asna, designada Asna 3, tem exatamente a mesma configuração e elementos com a mesma seção transversal das existentes, tal como indica a Tabela 7.25.

Elemento	Dimensões
Linha Baixa Asna 3	0,16m × 0,16m
Linha Alta Asna 3	Seção circular com $\Phi=12$ cm
Pernas Asna 3	Seção quadrada com 14 cm de lado

Tabela 7.25: Nova Asna 3, introduzida entre as Asnas 1 e 2, com as mesmas seções transversais

A Figura 7.17 representa a nova configuração geométrica da estrutura de cobertura do edifício em estudo:

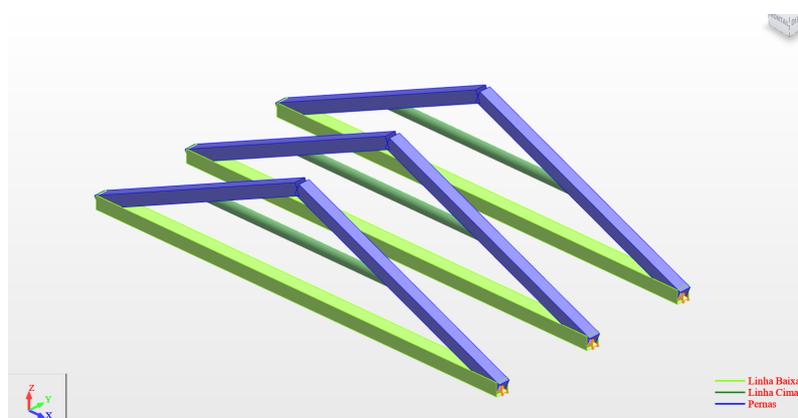


Figura 7.17: Representação gráfica do modelo 4 com as várias seções transversais distinguidas por cores através do software Autodesk® Robot Structural Analysis Professional 2021TM

As condições de apoio foram repetidas para a Asna3, ou seja, o modelo possui um apoio simples impedindo apenas o deslocamento vertical, e um triplo, com restrição total de deslocamentos em qualquer direção.

7.5.2 Cargas

No sentido de impedir deformações excessivas, para além de introduzir peças de madeira maciça com secagem inicial adequada, coloca-se também isolamento térmico na cobertura, como mencionado nas ações permanentes da secção 6.1.1, e como ilustra a Tabela 7.26:

Caso	Tipo de carga	Lista									
2.Peso Próprio	peso próprio	1 2 4para12	Toda a estru	-Z	Fator=1,00	Normal	MEMO:				
1.Peso Próprio Telha	(EF) uniforme	29para44	PX=0,0	PY=0,0	PZ=-0,71	global	não projetado	absoluta	Limites	MEMO:	
4.Sobrecarga	(EF) uniforme	29para44	PX=0,0	PY=0,0	PZ=-0,40	global	não projetado	absoluta	Limites	MEMO:	
17.PP OSB	(EF) uniforme	29para44	PX=0,0	PY=0,0	PZ=-0,14	global	não projetado	absoluta	Limites	MEMO:	
5.Vento_0	(EF) uniforme	34	PX=0,0	PY=0,0	PZ=-3,54	local	não projetado	absoluta	Limites	MEMO:	
5.Vento_0	(EF) uniforme	36	PX=0,0	PY=0,0	PZ=-3,30	local	não projetado	absoluta	Limites	MEMO:	
5.Vento_0	(EF) uniforme	33 35	PX=0,0	PY=0,0	PZ=-3,23	local	não projetado	absoluta	Limites	MEMO:	
5.Vento_0	(EF) uniforme	30para32 37	PX=0,0	PY=0,0	PZ=-2,45	local	não projetado	absoluta	Limites	MEMO:	
5.Vento_0	(EF) uniforme	43	PX=0,0	PY=0,0	PZ=-2,45	local	não projetado	absoluta	Limites	MEMO:	
5.Vento_0	(EF) uniforme	39 40	PX=0,0	PY=0,0	PZ=-2,45	local	não projetado	absoluta	Limites	MEMO:	
5.Vento_90	(EF) uniforme	29	PX=0,0	PY=0,0	PZ=1,36	local	não projetado	absoluta	Limites	MEMO:	
6.Vento_90	(EF) uniforme	37	PX=0,0	PY=0,0	PZ=1,60	local	não projetado	absoluta	Limites	MEMO:	
6.Vento_90	(EF) uniforme	43 44	PX=0,0	PY=0,0	PZ=2,48	local	não projetado	absoluta	Limites	MEMO:	
6.Vento_90	(EF) uniforme	30para36 38g	PX=0,0	PY=0,0	PZ=2,48	local	não projetado	absoluta	Limites	MEMO:	
5.Vento_0	(EF) uniforme	29 37	PX=0,0	PY=0,0	PZ=-2,45	local	não projetado	absoluta	Limites	MEMO:	
38.PP STEICO UNIVERSAL	(EF) uniforme	29para44	PX=0,0	PY=0,0	PZ=-0,06	global	não projetado	absoluta	Limites	MEMO:	
37.PP STEICOFLEX	(EF) uniforme	29para44	PX=0,0	PY=0,0	PZ=-0,05	global	não projetado	absoluta	Limites	MEMO:	
39.PP Isolamento XPS	(EF) uniforme	29para44	PX=0,0	PY=0,0	PZ=-0,02	global	não projetado	absoluta	Limites	MEMO:	

Tabela 7.26: Tabela de cargas do modelo estrutural do Caso 4, no Autodesk® Robot Structural Analysis Professional 2021™

As ações permanentes utilizadas para esta primeira análise do modelo Caso 4, foram:

- Peso Próprio: Telhas, ripas e varas = $0,71 \text{ kN/m}^2$;
- Peso Próprio: Placa rígida de espuma de poliestireno extrudido (XPS) com espessura de 6,0 cm = $0,35 \times 0,06 = 0,021 \text{ kN/m}^2$;
- Peso Próprio da Placa OSB 3 250x125x22mm = $6,4 \times 0,022 = 0,12 \text{ kN/m}^2$, com as características técnicas representadas na Figura 6.2:
- O esquema para a solução de revestimentos em painéis sustentáveis está representado na Figura 7.18

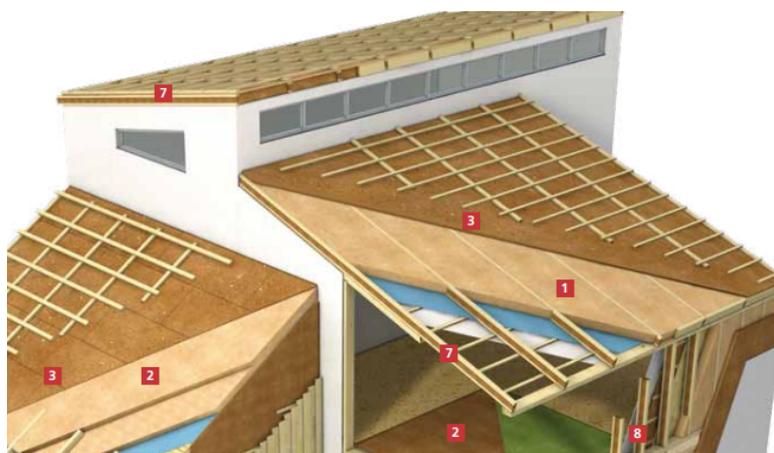


Figura 7.18: Esquema conceptual dos produtos Steico, adaptado de (Steico Natural building products)

Nesta figura:

- 1: STEICOFLEX - Isolamento térmico flexível; com boa resistência à compressão; com facilidade em expandir adaptando-se aos componentes adjacentes; prevenção de pontes térmicas; ajuda na regulação do clima interno; material ecologicamente sustentável e reciclável; Manuseamento fácil – Funciona como isolamento em cavidades de coberturas; Peso Próprio: $0,5 \times 0,10 = 0,05 \text{ kN/m}^2$
- 3: STEICO Universal – Pannel rígido de revestimento para telhado inclinado feito de fibras naturais de madeira, excelente proteção contra aquecimento no verão; redução em pontes térmicas; produto ecológico sustentável e reciclável. Peso Próprio: $2,7 \times 0,03 = 0,08 \text{ kN/m}^2$

As combinações de ações, as mesmas dos outros modelos caso, construídas manualmente no Autodesk® Robot Structural Analysis Professional 2021™, ver secção 6.2.

7.5.3 Esforços

A Figura D.21 do Anexo D, apresenta o diagrama de Esforço Axial nas 3 asnas do modelo caso 4, para a combinação 3 dos ELU, tendo por ação variável de base o Vento 0°(compressão).

Esforço Transverso

A Figura D.22 e Figura D.23 do Anexo D, apresentam os diagramas de Esforço Transverso, na direção Y e Z, nas 3 asnas do modelo caso 4, para a combinação 3 dos ELU, tendo por ação variável de base o Vento 0°(compressão).

Momento Fletor

A Figura D.24 e Figura D.25 do Anexo D, apresentam os diagramas de Esforço Transverso, na direção Y e Z, nas 3 asnas do modelo caso 4, para a combinação 3 dos ELU, tendo por ação variável de base o Vento 0°(compressão).

Destes diagramas e tabelas de esforços, pode-se concluir que:

- A Asna 2 continua a ter o maior esforço axial, mas a Asna 3 tem o maior esforço de corte e momento fletor;
- O elemento Perna Esquerda da Asna 2 continua a ser o mais solicitado.

7.5.4 Verificações de Segurança

Na análise no Autodesk® Robot Structural Analysis Professional 2021™, obtiveram-se os resultados representados para os elementos das 3 Asnas na Figura 7.19.

Resultado	Id	Material	Tip	Compr	Peso	Cross (ref)	Propried	Cross (ref)	Propried	Cross (ref)	Propried	Cross (ref)	Propried
1	Membro da madeira_2_1	Conha Base	030	105.22	105.22	0.05	12 SL_S_Veredit	0.15	1/2 * 111 * 117 * 11	0.55	1/2 * 111 * 117 * 11	0.33	Comb3 (1-2+5-7-2)
2	Membro da madeira_2_2	Conha Base	030	105.22	105.22	0.05	14 SL_S_Veredit	0.07	1/2 * 111 * 117 * 11	0.32	1/2 * 111 * 117 * 11	0.32	Comb3 (1-2+5-7-2)
3	Membro da madeira_2_4	Perna	030	65.80	65.80	0.07	12 SL_S_Veredit	0.43	1/2 * 111 * 117 * 11	0.21	1/2 * 111 * 117 * 11	0.21	Comb3 (1-2+5-7-2)
4	Membro da madeira_2_4	Perna	030	65.80	65.80	0.04	12 SL_S_Veredit	0.28	1/2 * 111 * 117 * 11	0.08	1/2 * 111 * 117 * 11	0.08	Comb3 (1-2+7-4+2)
5	Membro da madeira_2_6	Perna	030	65.80	65.80	0.04	12 SL_S_Veredit	0.08	1/2 * 111 * 117 * 11	0.48	1/2 * 111 * 117 * 11	0.28	Comb3 (1-2+5-7-2)
6	Membro da madeira_2_7	Perna	030	65.80	65.80	0.05	12 SL_S_Veredit	0.17	1/2 * 111 * 117 * 11	0.25	1/2 * 111 * 117 * 11	0.33	Comb3 (1-2+5-7-2)
7	Membro da madeira_2_8	Conha Cima	030	81.00	81.00	0.05	12 SL_S_Veredit	0.02	1/2 * 111 * 117 * 11	0.11	1/2 * 111 * 117 * 11	0.21	Comb3 (1-2+5-7-2)
8	Membro da madeira_2_9	Conha Cima	030	81.00	81.00	0.13	12 SL_S_Veredit	0.05	1/2 * 111 * 117 * 11	0.32	1/2 * 111 * 117 * 11	0.21	Comb3 (1-2+5-7-2)
9	Membro da madeira_2_10	Conha Cima	030	81.00	81.00	0.13	12 SL_S_Veredit	0.05	1/2 * 111 * 117 * 11	0.32	1/2 * 111 * 117 * 11	0.21	Comb3 (1-2+5-7-2)
10	Membro da madeira_2_11	Conha Cima	030	81.00	81.00	0.13	12 SL_S_Veredit	0.05	1/2 * 111 * 117 * 11	0.32	1/2 * 111 * 117 * 11	0.21	Comb3 (1-2+5-7-2)
11	Membro da madeira_2_41	Conha Base	030	105.22	105.22	0.09	12 SL_S_Veredit	0.02	1/2 * 111 * 117 * 11	0.33	1/2 * 111 * 117 * 11	0.21	Comb3 (1-2+5-7-2)
12	Membro da madeira_2_41	Conha Base	030	105.22	105.22	0.04	12 SL_S_Veredit	0.42	1/2 * 111 * 117 * 11	0.21	1/2 * 111 * 117 * 11	0.21	Comb3 (1-2+5-7-2)
13	Membro da madeira_2_48	Perna	030	65.80	65.80	1.06	12 SL_S_Veredit	0.42	1/2 * 111 * 117 * 11	0.15	1/2 * 111 * 117 * 11	0.31	Comb3 (1-2+5-7-2)
14	Membro da madeira_2_49	Conha Cima	030	81.00	81.00	0.03	12 SL_S_Veredit	0.15	1/2 * 111 * 117 * 11	0.04	1/2 * 111 * 117 * 11	0.24	Comb3 (1-2+5-7-2)

Figura 7.19: Resultados do Autodesk® Robot Structural Analysis Professional 2021™ para o modelo Caso 4

Constata-se que este modelo também não é seguro, e o problema reflete-se novamente nos elementos Perna, da Asna 2 e Asna 3. Posto isto, a solução pensada consiste em mudar a seção apenas nos elementos Perna do modelo com duas asnas, otimizando a seção com o aumento da sua altura para 16cm, ver Tabela 7.27.

A Figura 7.20 ilustra a verificação de segurança através dos resultados output do Autodesk® Robot Structural Analysis Professional 2021™, para o modelo com os dos novos elementos.

Todos os elementos constituintes do sistema das duas asnas, que se analisa caso a caso, cumpram com os requisitos impostos para os Estados Limites Últimos, sendo mais uma vez a combinação mais desfavorável a que tem como variável de base o Vento 0° (compressão).

Elemento	Dimensões
Linha Baixa Asna 1 e 2	0,16m × 0,16m
Linha Alta Asna 1 e 2	Seção circular com $\Phi=12$ cm
Pernas Asna 1 e 2	0,14 m x 0,16 m
Cumeeira	Seção circular com $\Phi=16$ cm
Madres	Seção circular com $\Phi=16$ cm
Rincões	Seção circular com $\Phi=16$ cm
Varas	$8 \times 8 \text{ cm}^2$ espaçadas de 0,30 metros

Tabela 7.27: Mudança de altura de seção para os elementos Pernas das Asnas 1 e 2

Membro	Seção	Material	Lay	Laz	Relação	Caso	Pi
1 Membro de mad	Linha Baixa	D30	105.22	105.22	0.60	12 ULS_Vento0	
2 Membro de mad	Linha Baixa	D30	105.22	105.22	0.37	14 ULS_Vento90	
4 Membro de mad	Pernas	D30	57.57	65.80	0.80	12 ULS_Vento0	
5	Pernas	D30	57.57	65.80	0.83	12 ULS_Vento0	
6 Membro de mad	Pernas	D30	57.57	65.80	0.99	12 ULS_Vento0	
7 Membro de mad	Pernas	D30	57.57	65.80	0.88	12 ULS_Vento0	
9 Membro de mad	Linha Cima	D30	81.00	81.00	0.84	12 ULS_Vento0	
10 Membro de ma	Linha Cima	D30	81.00	81.00	0.29	12 ULS_Vento0	

Figura 7.20: Verificação de segurança aos ELU para os elementos da Asna 1 e 2 do modelo Caso 4

Combinação1: ULS–AVB:Vento 0°:

$$E_d = \gamma_{Gj,sup} \times G_{kj,sup} + \gamma_{Q,1} \times Q_{k,1} + \gamma_{Q,1} \times \Psi_{0,i} \times Q_{k,i} \leftrightarrow 1,35 \times (PP_{estrutura} + PP_{revestimentos}) + 1,5 \times W_{0^\circ} + 1,5 \times 0 \times Sobrecarga_{categoria\ H}$$

Para o elemento Linha Baixa da Asna 1, a combinação com efeito mais desfavorável é a com a ação variável de base o Vento na direção 90°(sucção):

Combinação2: ULS–AVB:Vento 90°:

$$E_d = \gamma_{Gj,inf} \times G_{kj,inf} + \gamma_{Q,1} \times Q_{k,1} + \gamma_{Q,1} \times \Psi_{0,i} \times Q_{k,i} \leftrightarrow 1,0 \times (PP_{estrutura} + PP_{revestimentos}) + 1,5 \times W_{90^\circ} + 0,0 \times 0 \times Sobrecarga_{categoria\ H}$$

Linha Baixa – Asna 2

Elemento sujeito à flexão combinada com esforço axial de tração deve cumprir as seguintes condições, ver secção 6.10.2

Esforços em pontos característicos de seção

$$N = -137,03 \text{ kN}; M_y = 1,78 \text{ kNm}; M_z = 0,28 \text{ kNm}; V_y = 0,11 \text{ kN}; V_z = 0,07 \text{ kN}$$

Tensões em pontos característicos da seção transversal

$$\sigma_{t,0,d} = -5,35 \text{ MPa}; \sigma_{m,y,d} = -2,61 \text{ MPa}; \sigma_{m,z,d} = -0,41 \text{ MPa}$$

$$\tau_{y,d} = 0,01 \text{ MPa}; \tau_{z,d} = 0,00 \text{ MPa}$$

$$\tau_{tor,y,d} = 0,12 \text{ MPa}; \tau_{tor,z,d} = 0,12 \text{ MPa}$$

Relações de segurança para os esforços:

Então:

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \times \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \Leftrightarrow \frac{-5,35}{11,77} + \frac{-2,61}{19,38} + 0,7 \times \frac{-0,41}{19,38} = 0,60 < 1 \rightarrow OK!$$

$$\frac{\frac{\tau_{z,d}}{k_{cr}} + \frac{\tau_{tor,d}}{k_{shape}}}{f_{vd}} = \frac{\tau_{y,d}}{k_{cr}} + \frac{\tau_{tor,d}}{k_{shape}} = \frac{0,01}{0,67} + \frac{0,12}{1,15} = 0,09 < 1 \rightarrow OK!$$

Verificação SLS – Linha Baixa Asna 2

u fin,y = 0.1 cm < u fin,max,y = L/300.00 = 1.8 cm OK!

Caso de carga atuante: (1+0.8)*PP_{estrutura} + (1+0.8)* PP_{telhas+ripado+varas} + (1+0.8)* PP_{placa OSB} + (1+0.8)* W_{0°} + (1+0.8)* PP_{Placa XPS}

u fin,z = 0.8 cm < u fin,max,z = L/300.00 = 1.8 cm OK!

Caso de carga atuante: (1+0.8)*PP_{estrutura} + (1+0.8)* PP_{telhas+ripado+varas} + (1+0.8)* PP_{placa OSB} + (1+0.8)* W_{0°} + (1+0.8)* PP_{Placa XPS}

u inst,y = 0.1 cm < u inst,max,y = L/500.00 = 1.1 cm OK!

Caso de carga atuante: PP_{estrutura} + PP_{telhas+ripado+varas} + PP_{placa OSB} + W_{0°} + PP_{Placa XPS}

u inst,z = 0.6 cm < u inst,max,z = L/500.00 = 1.1 cm OK!

Caso de carga atuante: PP_{estrutura} + PP_{telhas+ripado+varas} + PP_{placa OSB} + W_{0°} + PP_{Placa XPS}

Linha Baixa – Asna 1

Para a combinação 2, a ação variável de base o Vento com efeito de sucção, origina elemento sujeito a flexão composta com compressão, devendo cumprir as seguintes condições, ver secção 6.10.3.

Esforços em pontos característicos de secção

$$N = 29,89 \text{ kN}; M_y = -1,19 \text{ kNm}; M_z = -0,16 \text{ kNm}; V_y = -0,03 \text{ kN}; V_z = 0,63 \text{ kN}$$

Tensões em pontos característicos da secção transversal

$$\sigma_{c,0,d} = 1,17 \text{ MPa}; \sigma_{m,y,d} = 1,75 \text{ MPa}; \sigma_{m,z,d} = 0,23 \text{ MPa}$$

$$\tau_{y,d} = -0,00 \text{ MPa}; \tau_{z,d} = 0,04 \text{ MPa}$$

$$\tau_{tor,y,d} = 0,00 \text{ MPa}; \tau_{tor,z,d} = 0,00 \text{ MPa}$$

Relações de segurança para os seguintes esforços:

Então:

$$\left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \times \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \Leftrightarrow \left(\frac{1,17}{15,23} \right)^2 + \frac{1,75}{19,38} + 0,7 \times \frac{0,23}{19,38} = 0,10 < 1 \rightarrow OK!$$

L_y	$L_{ef,y}$	$i = \sqrt{\frac{I_y}{A}}$	$\lambda_y = \frac{L_y}{i}$	$\lambda_{rel,y}$	k_y	$k_{c,y}$
5,40 m	4,86 m	0,046	105,22	1,76	2,19	0,29

Tabela 7.28: Parâmetros de instabilidade em relação à encurvadura para o elemento Linha baixa Asna 1

Então:

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y} \times f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \times \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} = \frac{1,17}{0,29 \times 15,23} + \frac{1,75}{19,38} + 0,7 \times \frac{0,23}{19,38} = 0,37 < 1 \rightarrow OK!$$

$$\frac{\tau_{y,d} + \tau_{tor,d}}{k_{cr} + k_{shape}} = \frac{0,00}{0,67} + \frac{0,00}{1,05} = 0,00 < 1 \rightarrow OK! \quad \frac{\tau_{z,d} + \tau_{tor,d}}{k_{cr} + k_{shape}} = \frac{0,04}{0,67} + \frac{0,00}{1,05} = 0,04 < 1 \rightarrow OK!$$

Verificação SLS – Linha Baixa 1

Em relação aos Estados Limites de Serviço, para a Linha Baixa – Asna 1 também verifica

$u_{fin,y} = 0.1 \text{ cm} < u_{fin,max,y} = L/300.00 = 1.8 \text{ cm}$ OK!

Caso de carga atuante: $(1+0.8) \cdot PP_{estrutura} + (1+0.8) \cdot PP_{telhas+ripado+varas} + (1+0.8) \cdot PP_{placa OSB} + (1+0.8) \cdot W_{0^\circ} + (1+0.8) \cdot PP_{placa XPS}$

$u_{fin,z} = 0.5 \text{ cm} < u_{fin,max,z} = L/300.00 = 1.8 \text{ cm}$ OK!

Caso de carga atuante: $(1+0.8) \cdot PP_{estrutura} + (1+0.8) \cdot PP_{telhas+ripado+varas} + (1+0.8) \cdot PP_{placa OSB} + (1+0.8) \cdot W_{0^\circ} + (1+0.8) \cdot PP_{placa XPS}$

$u_{inst,y} = 0.1 \text{ cm} < u_{inst,max,y} = L/500.00 = 1.1 \text{ cm}$ OK!

Caso de carga atuante: $PP_{estrutura} + PP_{telhas+ripado+varas} + PP_{placa OSB} + W_{0^\circ} + PP_{placa XPS}$

$u_{inst,z} = 0.4 \text{ cm} < u_{inst,max,z} = L/500.00 = 1.1 \text{ cm}$ OK!

Caso de carga atuante: $PP_{estrutura} + PP_{telhas+ripado+varas} + PP_{placa OSB} + W_{0^\circ} + PP_{placa XPS}$

Perna Esquerda – Asna 1 – Elemento 4

Propriedades de seção da Perna Esquerda (Elemento 4) da Asna 1:

$$A_x = 224,00 \text{ cm}^2; A_y = 149,33 \text{ cm}^2; A_z = 149,33 \text{ cm}^2;$$

$$I_x = 6567,3 \text{ cm}^4; I_y = 4778,67 \text{ cm}^4; I_z = 3658,67 \text{ cm}^4;$$

$$W_y = 597,33 \text{ cm}^3; W_z = 522,67 \text{ cm}^3;$$

$$h_t = 16,00 \text{ cm}; b_f = 14,00 \text{ cm}; t_f = 7,00 \text{ cm}; t_w = 7,00 \text{ cm}$$

Esforços em pontos característicos de seção

$$N = 19,73 \text{ kN}; M_y = -0,89 \text{ kNm}; M_z = -0,47 \text{ kNm}; V_y = -2,14 \text{ kN}; V_z = 0,02 \text{ kN}$$

Tensões em pontos característicos da seção transversal

$$\sigma_{c,0,d} = 0,88 \text{ MPa}; \sigma_{m,y,d} = 1,49 \text{ MPa}; \sigma_{m,z,d} = 0,89 \text{ MPa}$$

$$\tau_{y,d} = -0,14 \text{ MPa}; \tau_{z,d} = 0,60 \text{ MPa}$$

$$\tau_{tor,y,d} = 0,20 \text{ MPa}; \tau_{tor,z,d} = 0,21 \text{ MPa}$$

Relações de segurança para os seguintes esforços:

As pernas estão sujeitas a flexão composta com compressão, sendo necessário avaliar o risco de bambeamento, de acordo com as verificações de segurança da secção 6.12.

Sendo que:

l_{ef} – comprimento efetivo do elemento, dependendo das condições de apoio e a configuração de carga, de acordo com a Tabela 6.1 do EC5; $l_{ef} = 0,9 \times l = 2,66 \text{ m}$ Então:

$$\sigma_{m,crit} = \frac{0,78 \times b^2}{h \times l_{ef}} \times E_{0,05} = \frac{0,78 \times 0,14^2}{0,14 \times 1,30} \times 8000 = 277,93 \text{ MPa} \quad (7.7)$$

Para o cálculo da esbelteza relativa para elementos sujeitos a flexão utiliza-se a seguinte expressão:

$$\lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{f_{m,k}}{\sigma_{m,crit}}} = \sqrt{\frac{28}{277,93}} = 0,35 \quad (7.8)$$

E segundo o ponto 4 da subsecção 6.3.3 do EC5, o cálculo do k_{crit} é determinado pela expressão:

$$k_{crit} = \begin{cases} 1 & \text{para } \lambda_{rel,m} \leq 0,75 \\ 1,56 - 0,75 \times \lambda_{rel,m} & \text{para } 0,75 < \lambda_{rel,m} \leq 1,4 \\ \frac{1}{\lambda_{rel,m}^2} & \text{para } 1,4 < \lambda_{rel,m} \end{cases}$$

Logo, para este elemento Perna Direita, o $k_{crit} = 1,0$

As tensões atuantes devem satisfazer a seguinte expressão:

$$\begin{aligned} \sigma_{m,y,d} &\leq k_{crit} \times f_{m,y,d} \equiv 1,49 \leq 1,0 \times 19,38 \rightarrow OK! \\ \sigma_{m,z,d} &\leq k_{crit} \times f_{m,z,d} \equiv 0,89 \leq 1,0 \times 19,65 \rightarrow OK! \end{aligned}$$

Relativamente à verificação de segurança à encurvadura, ver secção 6.10.

Em que:

Perna Esquerda – Asna 1	
$L_y = 2,95$; $L_{fy} = 0,9 \times 2,95 = 2,66$ m	$L_z = 2,95 L_{fz} = 0,9 \times 2,95 = 2,66$ m
$i_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}} = 0,046$	$i_z = \sqrt{\frac{I_z}{A}} = 0,040$
$\lambda_y = \frac{L_y}{i_y} = 57,57$	$\lambda_z = \frac{L_z}{i_z} = 65,80$
$\lambda_{rel,y} = \frac{\lambda_y}{\pi} \times \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} = \frac{57,67}{\pi} \times \sqrt{\frac{22}{8000}} = 0,96$	$\lambda_{rel,z} = \frac{\lambda_z}{\pi} \times \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} = \frac{44,92}{\pi} \times \sqrt{\frac{22}{8000}} = 1,10$
$k_y = 1,03$	$k_z = 1,18$
$k_{c,y} = 0,72$	$k_{c,z} = 0,62$

Tabela 7.29: Verificação de segurança à encurvadura para a Perna Direita – Elemento 4 da Asna 1

Então:

Perna Esquerda – Asna 1	
$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y} \times f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} + k_m \times \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} = \frac{0,88}{0,72 \times 15,23} + 0,7 \times \frac{0,89}{19,38} + \frac{1,49}{19,65} = 0,19 < 1 \rightarrow OK!$	
$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} \times f_{c,0,d}} + \left(\frac{\sigma_{m,y,d}}{k_{crit} \times f_{m,y,d}} \right)^2 = \frac{0,38}{0,62 \times 15,23} + \left(\frac{1,49}{1,0 \times 19,38} \right)^2 = 0,10 < 1 \rightarrow OK!$	
$\frac{\tau_{y,d}}{k_{cr}} + \frac{\tau_{tor,y,d}}{k_{shape}} = \frac{-0,14}{0,67} + \frac{0,20}{1,00} = 0,29 < 1 \rightarrow OK!$	
$\frac{\tau_{z,d}}{k_{cr}} + \frac{\tau_{tor,z,d}}{k_{shape}} = \frac{0,60}{0,67} + \frac{0,21}{1,01} = 0,80 < 1 \rightarrow OK!$	

Tabela 7.30: Equações de verificação de segurança de acordo com EC5 para Perna Esquerda da Asna 1

Verificação SLS – Perna Esquerda Elemento 4

<p>Em relação aos estados limites de serviço os deslocamentos limites são</p> <p>$u_{fin,y} = 0.3 \text{ cm} < u_{fin,max,y} = L/300.00 = 1.0 \text{ cm OK!}$</p> <p>Caso de carga atuante: $(1+0.8)*PP_{estrutura} + (1+0.8)* PP_{telhas+ripado+varas} + (1+0.8)* PP_{placa OSB} + (1+0*0.8)* W_{0^\circ} + (1+0.8)* PP_{Placa XPS}$</p> <p>$u_{fin,z} = 0.2 \text{ cm} < u_{fin,max,z} = L/300.00 = 1.0 \text{ cm} \rightarrow OK!$</p> <p>Caso de carga atuante: $(1+0.8)*PP_{estrutura} + (1+0.8)* PP_{telhas+ripado+varas} + (1+0.8)* PP_{placa OSB} + (1+0*0.8)* W_{0^\circ} + (1+0.8)* PP_{Placa XPS}$</p> <p>$u_{inst,y} = 0.2 \text{ cm} < u_{inst,max,y} = L/500.00 = 0.6 \text{ cm} \rightarrow OK!$</p> <p>Caso de carga atuante: $PP_{estrutura} + PP_{telhas+ripado+varas} + PP_{Placa XPS} + PP_{placa OSB} + W_{0^\circ}$</p> <p>$u_{inst,z} = 0.2 \text{ cm} < u_{inst,max,z} = L/500.00 = 0.6 \text{ cm OK!}$</p>
--

Perna Direita – Asna 1 – Elemento 5

Esforços em pontos característicos de seção

$$N = 70,49 \text{ kN}; M_y = -0,96 \text{ kNm}; M_z = 4,50 \text{ kNm}; V_y = -5,73 \text{ kN}; V_z = -2,37 \text{ kN}$$

Tensões em pontos característicos da seção transversal

$$\sigma_{c,0,d} = 3,15 \text{ MPa}; \sigma_{m,y,d} = 1,61 \text{ MPa}; \sigma_{m,z,d} = 8,61 \text{ MPa}$$

$$\tau_{y,d} = -0,38 \text{ MPa}; \tau_{z,d} = -0,16 \text{ MPa};$$

$$\tau_{tor,y,d} = 0,10 \text{ MPa}; \tau_{tor,z,d} = 0,11 \text{ MPa}$$

Relações de segurança para os seguintes esforços:

Verificação de segurança em relação ao fenómeno de bambeamento, descrito 6.12.

$\sigma_{m,crit} = 277,93 \text{ MPa}$	$\lambda_{rel,m} = 0,35$	$k_{crit} = 1,0$
--	--------------------------	------------------

Tabela 7.31: Parâmetros adicionais para o efeito de bambeamento para a Perna Direita Elemento 5

Então:

As tensões atuantes devem satisfazer a seguinte expressão:

$$\sigma_{m,y,d} \leq k_{crit} \times f_{m,y,d} \equiv 1,61 \leq 1,0 \times 19,38 \rightarrow OK!$$

$$\sigma_{m,z,d} \leq k_{crit} \times f_{m,z,d} \equiv 8,61 \leq 1,0 \times 19,65 \rightarrow OK!$$

Para a encurvadura dos elementos sujeitos a flexão composta com compressão os parâmetros adicionais são os mesmos da Perna Esquerda, ver Tabela 7.32.

Perna Esquerda – Asna 1	
$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y} \times f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} + k_m \times \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} = \frac{3,15}{0,72 \times 15,23} + 0,7 \times \frac{1,61}{19,38} + \frac{8,61}{19,65} = 0,83 < 1 \rightarrow OK!$	
$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} \times f_{c,0,d}} + \left(\frac{\sigma_{m,y,d}}{k_{crit} \times f_{m,y,d}} \right)^2 = \frac{3,15}{0,62 \times 15,23} + \left(\frac{1,61}{1,0 \times 19,38} \right)^2 = 0,34 < 1 \rightarrow OK!$	
$\frac{\tau_{y,d}}{k_{cr}} + \frac{\tau_{tor,y,d}}{k_{shape}} = \frac{-0,38}{0,67} + \frac{0,10}{1,00} = 0,48 < 1 \rightarrow OK!$	
$\frac{\tau_{z,d}}{k_{cr}} + \frac{\tau_{tor,z,d}}{k_{shape}} = \frac{-0,16}{0,67} + \frac{0,11}{1,01} = 0,24 < 1 \rightarrow OK!$	

Tabela 7.32: Equações de verificação de segurança de acordo com EC5 para Perna Direita Asna 1 – Elemento 5

Verificação SLS – Perna Direita Elemento 5

Em relação aos estados limites de serviço os deslocamentos limites são
<p>$u_{fin,y} = 0,2 \text{ cm} < u_{fin,max,y} = L/300,00 = 1,0 \text{ cm OK!}$</p> <p>Caso de carga atuante: $(1+0,8) \times PP_{estrutura} + (1+0,8) \times PP_{telhas+ripado+varas} + (1+0,8) \times PP_{placa OSB} + (1+0 \times 0,8) \times W_0^\circ + (1+0,8) \times PP_{Placa XPS}$</p>
<p>$u_{fin,z} = 0,1 \text{ cm} < u_{fin,max,z} = L/300,00 = 1,0 \text{ cm OK!}$</p> <p>Caso de carga atuante: $(1+0,8) \times PP_{estrutura} + (1+0,8) \times PP_{telhas+ripado+varas} + (1+0,8) \times PP_{placa OSB} + (1+0 \times 0,8) \times W_0^\circ + (1+0,8) \times PP_{Placa XPS}$</p>
<p>$u_{inst,y} = 0,2 \text{ cm} < u_{inst,max,y} = L/500,00 = 0,6 \text{ cm OK!}$</p> <p>Caso de carga atuante: $PP_{estrutura} + PP_{telhas+ripado+varas} + PP_{placa OSB} + W_0^\circ + PP_{Placa XPS}$</p>
<p>$u_{inst,z} = 0,1 \text{ cm} < u_{inst,max,z} = L/500,00 = 0,6 \text{ cm OK!}$</p> <p>Caso de carga atuante: $PP_{estrutura} + PP_{telhas+ripado+varas} + PP_{placa OSB} + 0,6 \times W_0^\circ + PP_{Placa XPS}$</p>

Perna Esquerda – Asna 2 – Elemento 6

Esforços em pontos característicos de seção

$$N = 106,09 \text{ kN}; M_y = 2,21 \text{ kNm}; M_z = 3,62 \text{ kNm}; V_y = -2,74 \text{ kN}; V_z = -2,08 \text{ kN}$$

Tensões em pontos característicos da seção transversal

$$\sigma_{c,0,d} = 4,74 \text{ MPa}; \sigma_{m,y,d} = 3,69 \text{ MPa}; \sigma_{m,z,d} = 6,92 \text{ MPa}$$

$$\tau_{y,d} = -0,18 \text{ MPa}; \tau_{z,d} = -0,14 \text{ MPa};$$

$$\tau_{tor,y,d} = 0,12 \text{ MPa}; \tau_{tor,z,d} = 0,12 \text{ MPa}$$

Relações de segurança para os seguintes esforços:

Verificação de segurança em relação ao fenómeno de bambeamento:

$\sigma_{m,crit} = 277,93 \text{ MPa}$	$\lambda_{rel,m} = 0,35$	$k_{crit} = 1,0$
--	--------------------------	------------------

Tabela 7.33: Parâmetros adicionais para o efeito de bambeamento para a Perna Esquerda Elemento 6

Então:

As tensões atuantes devem satisfazer a seguinte expressão:

$$\sigma_{m,y,d} \leq k_{crit} \times f_{m,y,d} \equiv 3,69 \leq 1,0 \times 19,38 \rightarrow OK!$$

$$\sigma_{m,z,d} \leq k_{crit} \times f_{m,z,d} \equiv 6,92 \leq 1,0 \times 19,65 \rightarrow OK!$$

Para a encurvadura dos elementos sujeitos a flexão composta com compressão os parâmetros adicionais são os mesmos da Perna Esquerda, ver Tabela 7.34.

Perna Esquerda – Asna 1	
$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y} \times f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} + k_m \times \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} = \frac{4,74}{0,72 \times 15,23} + 0,7 \times \frac{3,69}{19,38} + \frac{6,92}{19,65} = 0,99 < 1 \rightarrow OK!$	
$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} \times f_{c,0,d}} + \left(\frac{\sigma_{m,y,d}}{k_{crit} \times f_{m,y,d}} \right)^2 = \frac{4,74}{0,62 \times 15,23} + \left(\frac{3,69}{1,0 \times 19,38} \right)^2 = 0,54 < 1 \rightarrow OK!$	
$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} \times f_{c,0,d}} + \left(\frac{\sigma_{m,z,d}}{k_{crit} \times f_{m,z,d}} \right)^2 = \frac{4,74}{0,62 \times 15,23} + \left(\frac{6,92}{1,0 \times 19,65} \right)^2 = 0,63 < 1 \rightarrow OK!$	
$\frac{\tau_{y,d}}{k_{cr}} + \frac{\tau_{tor,y,d}}{k_{shape}} = \frac{-0,18}{0,67} + \frac{0,11}{1,00} = 0,28 < 1 \rightarrow OK!$	
$\frac{\tau_{z,d}}{k_{cr}} + \frac{\tau_{tor,z,d}}{k_{shape}} = \frac{-0,14}{0,67} + \frac{0,12}{1,01} = 0,23 < 1 \rightarrow OK!$	

Tabela 7.34: Equações de verificação de segurança de acordo com EC5 para Perna Esquerda Asna 2– Elemento 6

Verificação SLS – Perna Esquerda Asna 2 Elemento 6

Em relação aos estados limites de serviço os deslocamentos limites são
<p>u_{fin,y} = 0.4 cm < u_{fin,max,y} = L/300.00 = 1.0 cm OK!</p> <p>Caso de carga atuante: (1+0.8)*PP_{estrutura} + (1+0.8)* PP_{telhas+ripado+varas} + (1+0.8)* PP_{placa OSB} + (1+0.8)* W_{0°} + (1+0.8)* PP_{Placa XPS}</p> <p>u_{fin,z} = 0.4 cm < u_{fin,max,z} = L/300.00 = 1.0 cm OK!</p> <p>Caso de carga atuante: (1+0.8)*PP_{estrutura} + (1+0.8)* PP_{telhas+ripado+varas} + (1+0.8)* PP_{placa OSB} + (1+0.8)* W_{0°} + (1+0.8)* PP_{Placa XPS}</p> <p>u_{inst,y} = 0.3 cm < u_{inst,max,y} = L/500.00 = 0.6 cm OK!</p> <p>Caso de carga atuante: PP_{estrutura} + PP_{telhas+ripado+varas} + PP_{placa OSB} + W_{0°} + PP_{Placa XPS}</p> <p>u_{inst,z} = 0.3 cm < u_{inst,max,z} = L/500.00 = 0.6 cm OK!</p> <p>Caso de carga atuante: PP_{estrutura} + PP_{telhas+ripado+varas} + PP_{placa OSB} + W_{0°} + PP_{Placa XPS}</p>

Perna Direita – Asna 2 – Elemento 7

Esforços em pontos característicos de seção

$$N = 105,56 \text{ kN}; M_y = 2,20 \text{ kNm}; M_z = 3,60 \text{ kNm}; V_y = -2,73 \text{ kN}; V_z = -2,07 \text{ kN}$$

Tensões em pontos característicos da seção transversal

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N_{Ed}}{A} = 4,36 \text{ MPa}; \sigma_{m,y,d} = \frac{M_{y,d}}{W_y} = 3,22 \text{ MPa}; \sigma_{m,z,d} = \frac{M_{z,d}}{W_z} = 5,97 \text{ MPa}$$

$$\tau_{y,d} = \frac{V_{Ed} \times S_y}{I_y \times b} = -0,28 \text{ MPa}; \tau_{z,d} = \frac{V_{Ed} \times S_z}{I_z \times b} = 0,27 \text{ MPa}$$

$$\tau_{tor,y,d} = 0,33 \text{ MPa}; \tau_{tor,z,d} = 0,35 \text{ MPa}$$

Relações de segurança para os seguintes esforços:

Verificação de segurança em relação ao fenómeno de bambeamento, ver secção 6.12.

As tensões atuantes devem satisfazer as seguinte expressão:

$$\sigma_{m,y,d} \leq k_{crit} \times f_{m,y,d} \equiv 3,22 \leq 1,0 \times 19,38 \rightarrow OK!$$

$$\sigma_{m,z,d} \leq k_{crit} \times f_{m,z,d} \equiv 5,97 \leq 1,0 \times 19,65 \rightarrow OK!$$

Para a encurvadura dos elementos à flexão composta com compressão os parâmetros adicionais são os mesmos da Perna Esquerda, ver Tabela 7.35

Então:

Perna Esquerda – Asna 1	
$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y} \times f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} + k_m \times \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} = \frac{4,36}{0,72 \times 15,23} + 0,7 \times \frac{3,22}{19,38} + \frac{5,97}{19,65} = 0,88 < 1 \rightarrow OK!$	
$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} \times f_{c,0,d}} + \left(\frac{\sigma_{m,y,d}}{k_{crit} \times f_{m,y,d}} \right)^2 = \frac{4,36}{0,62 \times 15,23} + \left(\frac{3,22}{1,0 \times 19,38} \right)^2 = 0,49 < 1 \rightarrow OK!$	
$\frac{\tau_{y,d}}{k_{cr}} + \frac{\tau_{tor,y,d}}{k_{shape}} = \frac{-0,28}{0,67} + \frac{0,33}{1,00} = 0,53 < 1 \rightarrow OK!$	
$\frac{\tau_{z,d}}{k_{cr}} + \frac{\tau_{tor,z,d}}{k_{shape}} = \frac{-0,27}{0,67} + \frac{0,35}{1,01} = 0,53 < 1 \rightarrow OK!$	

Tabela 7.35: Equações de verificação de segurança de acordo com EC5 para Perna Direita Asna2

Verificação SLS – Perna Esquerda Asna 2 Elemento 6

Em relação aos estados limites de serviço os deslocamentos limites são
u fin,y = 0.1 cm < u fin,max,y = L/300.00 = 1.0 cm OK!
Caso de carga atuante: (1+0.8)*PP _{estrutura} + (1+0.8)* PP _{telhas+ripado+varas} + (1+0.8)* PP _{placa OSB} + (1+0*0.8)* W _{0°} + (1+0.8)* PP _{Placa XPS}
u fin,z = 0.2 cm < u fin,max,z = L/300.00 = 1.0 cm OK!
Caso de carga atuante: (1+0.8)*PP _{estrutura} + (1+0.8)* PP _{telhas+ripado+varas} + (1+0.8)* PP _{placa OSB} + (1+0*0.8)* W _{0°} + (1+0.8)* PP _{Placa XPS}
u inst,y = 0.1 cm < u inst,max,y = L/500.00 = 0.6 cm OK!
Caso de carga atuante: PP _{estrutura} + PP _{telhas+ripado+varas} + PP _{placa OSB} + W _{0°} + PP _{Placa XPS}
u inst,z = 0.2 cm < u inst,max,z = L/500.00 = 0.6 cm OK!
Caso de carga atuante: PP _{estrutura} + PP _{telhas+ripado+varas} + PP _{placa OSB} + W _{0°} + PP _{Placa XPS}

Linha Cima (Alta) – Asna 2:

Propriedades de seção da Linha Alta Asna 2:

$$A_x = 113,10 \text{ cm}^2; A_y = 67,86 \text{ cm}^2; A_z = 67,86 \text{ cm}^2;$$

$$I_x = 2035,80 \text{ cm}^4; I_y = 1017,88 \text{ cm}^4; I_z = 1017,88 \text{ cm}^4;$$

$$W_y = 169,65 \text{ cm}^3; W_z = 169,65 \text{ cm}^3;$$

$$h_t = 12,00 \text{ cm}; b_f = 12,00 \text{ cm};$$

$$t_f = 6,00 \text{ cm}; t_w = 6,00 \text{ cm}$$

Esforços em pontos característicos de seção

$$N = 50,79 \text{ kN}; M_y = 0,33 \text{ kNm}; M_z = -0,31 \text{ kNm}; V_y = -0,12 \text{ kN}; V_z = -0,15 \text{ kN}$$

Tensões em pontos característicos da seção transversal

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N_{Ed}}{A} = 4,49 \text{ MPa}; \sigma_{m,y,d} = \frac{M_{y,d}}{W_y} = 1,95 \text{ MPa}; \sigma_{m,z,d} = \frac{M_{z,d}}{W_z} = 1,85 \text{ MPa}$$

$$\tau_{y,d} = \frac{V_{Ed} \times S_y}{I_y \times b} = -0,02 \text{ MPa}; \tau_{z,d} = \frac{V_{Ed} \times S_z}{I_z \times b} = -0,02 \text{ MPa}$$

$$\tau_{tor,y,d} = 0,06 \text{ MPa}; \tau_{tor,z,d} = 0,06 \text{ MPa}$$

Relações de segurança para os seguintes esforços:

Verificação de segurança à flexão composta com esforço à compressão, ver secção 6.10.3.

Então:

$$\left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \times \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \leftrightarrow \left(\frac{4,49}{15,23} \right)^2 + \frac{1,95}{20,27} + 0,7 \times \frac{1,85}{20,27} = 0,18 < 1 \rightarrow OK!$$

Em relação à encurvadura o elemento deve cumprir a expressão dada na secção 6.10:

$L_y=L_z$	$L_{ef,y} = L_{ef,z}$	$i_z = i_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}}$	$\lambda_y = \lambda_z = \frac{L_y}{i}$	$\lambda_{rel,y} = \lambda_{rel,z}$	k_y	$k_{c,y} = k_{c,z}$
2,70 m	2,43 m	0,031	81	1,30	1,52	0,45

Tabela 7.36: Parâmetros de instabilidade em relação à encurvadura para o elemento Linha baixa Asna 1

A expressão para verificar a segurança à encurvadura, ver secção 6.10, é:

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y} \times f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \times \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} = \frac{4,49}{0,45 \times 15,23} + \frac{1,95}{20,27} + 0,7 \times \frac{1,85}{20,27} = 0,84 < 1 \rightarrow OK!$$

$$\frac{\frac{\tau_{y,d}}{k_{cr}} + \frac{\tau_{tor,d}}{k_{shape}}}{f_{vd}} = \frac{0,02}{0,67} + \frac{0,06}{1,05} = 0,05 < 1 \rightarrow OK! \quad \frac{\frac{\tau_{z,d}}{k_{cr}} + \frac{\tau_{tor,d}}{k_{shape}}}{f_{vd}} = \frac{0,02}{0,67} + \frac{0,06}{1,05} = 0,05 < 1 \rightarrow OK!$$

Linha Cima (Alta) Asna 1:

Esforços em pontos característicos de secção

$$N = 14,95 \text{ kN}; M_y = 0,21 \text{ kNm}; M_z = -0,14 \text{ kNm}; V_y = -0,12 \text{ kN}; V_z = -0,13 \text{ kN}$$

Tensões em pontos característicos da secção transversal

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N_{Ed}}{A} = 1,32 \text{ MPa}; \sigma_{m,y,d} = \frac{M_{y,d}}{W_y} = 1,21 \text{ MPa}; \sigma_{m,z,d} = \frac{M_{z,d}}{W_z} = 0,85 \text{ MPa}$$

$$\tau_{y,d} = \frac{V_{Ed} \times S_y}{I_y \times b} = -0,02 \text{ MPa}; \tau_{z,d} = \frac{V_{Ed} \times S_z}{I_z \times b} = -0,02 \text{ MPa}$$

$$\tau_{tor,y,d} = 0,00 \text{ MPa}; \tau_{tor,z,d} = 0,00 \text{ MPa}$$

Relações de segurança para os seguintes esforços:

Verificação de segurança à flexão composta com esforço à compressão, ver secção 6.10.

Então:

$$\left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \times \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \Leftrightarrow \left(\frac{1,32}{15,23} \right)^2 + \frac{1,21}{20,27} + 0,7 \times \frac{0,85}{20,27} = 0,10 < 1 \rightarrow OK!$$

Em relação à encurvadura o elemento deve cumprir a expressão dada na secção 6.10:

$L_y=L_z$	$L_{ef,y} = L_{ef,z}$	$i_z = i_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}}$	$\lambda_y = \lambda_z = \frac{L_y}{i}$	$\lambda_{rel,y} = \lambda_{rel,z}$	k_y	$k_{c,y} = k_{c,z}$
2,70 m	2,43 m	0,031	81	1,30	1,52	0,45

Tabela 7.37: Parâmetros de instabilidade em relação à encurvadura para o elemento Linha baixa Asna 1

A expressão para verificar a segurança à encurvadura, ver secção 6.10, é:

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y} \times f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \times \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} = \frac{1,32}{0,45 \times 15,23} + \frac{1,21}{20,27} + 0,7 \times \frac{0,85}{20,27} = 0,29 < 1 \rightarrow OK!$$

$$\frac{\frac{\tau_{y,d}}{k_{cr}} + \frac{\tau_{tor,d}}{k_{shape}}}{f_{vd}} = 0,01 < 1 \rightarrow OK! \quad \frac{\frac{\tau_{z,d}}{k_{cr}} + \frac{\tau_{tor,d}}{k_{shape}}}{f_{vd}} = 0,01 < 1 \rightarrow OK!$$

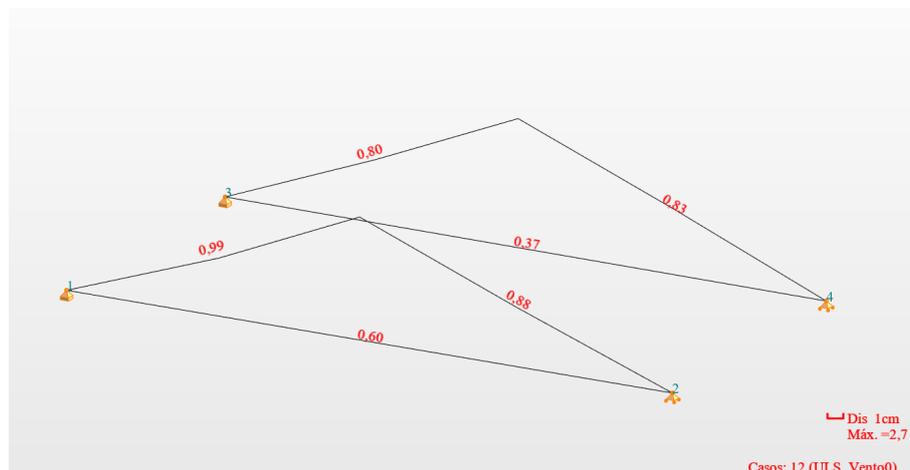


Figura 7.21: Representação do coeficiente de segurança em todas as barras, bem como a representação de encurvadura do modelo Caso 4, construído através do software Autodesk® Robot Structural Analysis Professional 2021TM

A Figura 7.21 representa o resultado da verificação de segurança dos elementos de acordo com o EC5, ou seja, a taxa de eficiência dos elementos em análise.

Após este modelo Caso 4, observa-se que a ligação Perna-Linha da Asna 2 é a mais solicitada e a Perna Esquerda da Asna 2 é a que tem pior relação de segurança (maior coeficiente).

7.5.5 Ligação Perna- Linha

Os requisitos de verificação de segurança estrutural devem ser convenientemente garantidos pela ligação, Almeida (2012):

- Resistência – a ligação deve assegurar a transmissão de esforços entre os elementos que se pretende ligar. Devem ser avaliados todos os esforços que se desenvolvem nos elementos a ligar e deve-se assegurar um caminho para a sua transmissão na ligação, verificando a resistência mecânica de todos os componentes (peças a ligar, chapas metálicas e ligadores). Os esforços de corte também devem ser considerados;
- Deformação – a deformação ou deslizamento das ligações deve ser tida em consideração. Fenómenos de fluência, folgas, atritos e erros de fabrico afetos aos materiais que constituem as ligações condicionam o comportamento das estruturas.

A ligação adotada é ilustrada na Figura 7.22:

Existem três tipos de ligações distintos: ligações tradicionais, ligações com ligadores tipo cavilha e outros tipos de ligações. Para este caso foi adotado a solução de ligação tradicional, uma vez que os esforços maiores só atuam numa direção, e a inversão do sentido das forças assume um aspeto menos relevante. Além disso, ainda é a ligação mais económica e mais fiel à encontrada no edifício em estudo.

Nas ligações tradicionais as forças transmitem-se através de contacto entre os elementos de madeira, e faz-se a sua verificação considerando os esforços envolvidos e as resistências mecânicas. (Dias et al.,2009)

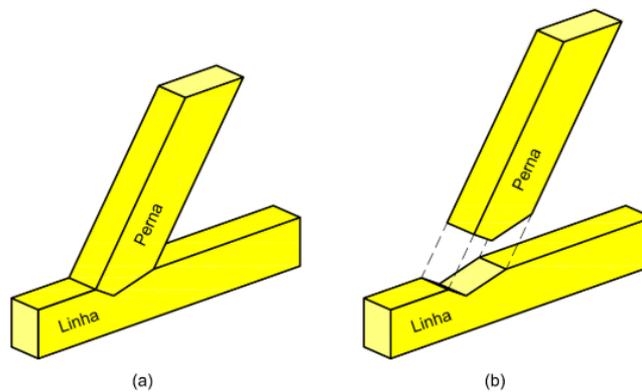


Figura 7.22: Ligação entalhada entre a perna e a linha das asnas, adaptado de Almeida (2012)

Neste caso específico, trata-se de uma ligação tradicional por entalhes e o procedimento de verificação de segurança ao esmagamento consiste na definição dos caminhos de transmissão de tensões entre as peças envolvidas. Para isso é necessário decompor as forças em componentes perpendiculares às superfícies dos entalhes, com a determinação das tensões de compressão atuantes a um ângulo com o fio do elemento em madeira, $\sigma_{c,\alpha,d}$, ver secção 6.13.

$$\sigma_{c,\alpha,d} \leq \frac{f_{c,0,d}}{k_{c,90} \times f_{c,90,d}} \times \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha \quad \sigma_{c,\alpha,d} \leq \frac{f_{c,0,d}}{k_{c,90} \times f_{c,90,d}} \times \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha \quad (7.9)$$

Em que:

$k_{c,90}=1,0$, segundo a nota (2) da secção 6.1.5. do EC5.

Torna-se necessário verificar a segurança relativamente ao esmagamento da ligação através da seguinte expressão:

$$\sigma_{c,\alpha,d} \leq \frac{f_{c,0,d}}{\frac{f_{c,0,d}}{f_{c,90,d}} \times \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha} \quad (7.10)$$

Em que:

$f_{c,0,d}$ - valor de resistência à compressão paralela às fibras dos elementos de madeira;

Calculado através de :

Para a combinação de ações com a variável vento, $k_{mod} = 0,90$

$$f_{c,0,d} = \frac{0,90 \times 22}{1,3} = 15,23 \text{ MPa} \quad (7.11)$$

$f_{c,90,d}$ - valor de resistência à compressão na direção perpendicular às fibras dos elementos de madeira;

Calculado através de:

$$f_{c,90,d} = \frac{0,9 \times 3,8}{1,3} = 2,63 \text{ MPa} \quad (7.12)$$

Para determinação da profundidade mínima do entalhe, $t_{v,a}$, e do comprimento em frente ao

entalhe, l_v , é necessário determinar o ângulo ε , dado por:

$$\beta + 2 \times \varepsilon = 180^\circ \leftrightarrow \varepsilon = 90^\circ - \frac{\beta}{2} = 78,02^\circ \quad (7.13)$$

A Figura 7.23 numera os nós e as barras das duas asnas em análise do modelo Caso 4:

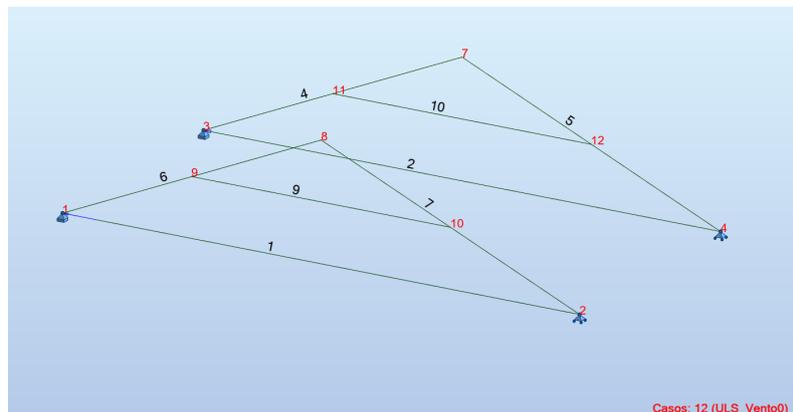


Figura 7.23: Representação geométrica e numéricas dos nós e elementos barra do modelo Caso 4, retirado do software Autodesk® Robot Structural Analysis Professional 2021TM

A Tabela 7.38 reúne as forças nos nós e elementos barra das asnas do modelo Caso 4, para a combinação mais desfavorável em relação aos estados limites últimos, a combinação com a AVB: Vento na direção 0° :

Ligação da Perna Esquerda da Asna 2 com Linha Baixa Asna 2– Elemento barra 6; Nó nº 1:

Então:

$$\sin \varepsilon = \frac{N_a}{N} \leftrightarrow N_a = N \times \sin \varepsilon = 107,21 \times \sin 78,02 = 107,21 \times 0,98 = 105,06 \text{ MPa} \quad (7.14)$$

Então o valor da profundidade do entalhe na direção paralela ao plano do entalhe é dado por:

$$\sin \varepsilon = \frac{t_{v,a}}{t_{v,e,a}} \leftrightarrow t_{v,e,a} = \frac{t_{v,a}}{\sin \varepsilon} \quad (7.15)$$

Em que:

$t_{v,a}$ - valor da profundidade do entalhe no dente anterior;

$t_{v,e,a}$ - valor da profundidade do entalhe praticado no dente anterior na direção paralela ao plano do entalhe, tal como se pode ver na Figura 7.24:

Barra/Nó/Caso	FX (kN)	FY (kN)	FZ (kN)	MX (kNm)	MY (kNm)	MZ (kNm)
1/ 1/ 12 (C)	-137,74	0,11	0,37	-0,10	1,49	0,43
1/ 2/ 12 (C)	-137,74	0,11	-0,83	-0,10	0,25	-0,17
2/ 3/ 12 (C)	-72,08	0,09	0,36	-0,06	0,89	0,49
2/ 4/ 12 (C)	-72,08	0,09	-0,83	-0,06	-0,37	0,00
4/ 3/ 12 (C)	19,86	-2,15	9,05	-0,14	-0,89	-0,47
4/ 7/ 12 (C)	5,94	3,26	-3,08	-0,07	-0,83	-2,18
5/ 7/ 12 (C)	70,00	-5,73	1,75	0,07	-0,67	-3,96
5/ 4/ 12 (C)	81,12	-0,09	-5,05	0,05	0,37	0,02
6/ 1/ 12 (C)	107,21	-2,74	11,41	-0,08	-1,49	-0,44
6/ 8/ 12 (C)	55,48	2,17	-5,58	-0,34	-2,40	-1,11
7/ 8/ 12 (C)	98,20	-4,24	4,12	0,24	-1,93	-3,14
7/ 2/ 12 (C)	154,02	-0,11	-7,39	0,02	-0,25	0,20
8/ 7/ 12 (C)	-68,07	1,49	0,17	0,00	4,62	2,20
8/ 8/ 12 (C)	-68,07	2,18	-13,89	0,00	-12,87	-2,48
9/ 9/ 12 (C)	51,02	-0,12	-0,15	-0,02	0,33	-0,31
9/ 10/ 12 (C)	51,02	-0,12	-0,15	-0,02	-0,08	0,01
10/ 11/ 12 (C)	15,00	-0,12	-0,13	0,00	0,21	-0,15
10/ 12/ 12 (C)	15,00	-0,12	-0,13	0,00	-0,14	0,18
11/ 9/ 12 (C)	65,53	4,32	12,54	0,03	-9,00	2,93
11/ 11/ 12 (C)	65,53	-1,88	-5,24	0,03	0,30	-0,19
12/ 10/ 12 (C)	65,85	0,36	11,50	-0,02	-9,58	2,42
12/ 12/ 12 (C)	65,85	4,78	-2,29	-0,02	2,17	-4,14
15/ 13/ 12 (C)	3,35	0,00	12,91	-0,00	0,00	0,00
15/ 8/ 12 (C)	-82,10	-0,76	-8,25	-0,50	-7,13	1,40
16/ 14/ 12 (C)	68,48	0,09	13,70	0,00	-0,00	0,00
16/ 8/ 12 (C)	-17,71	0,69	-6,81	0,54	-6,15	-0,71
17/ 7/ 12 (C)	-88,70	-0,69	-2,70	0,04	1,51	-1,07
17/ 15/ 12 (C)	1,25	0,00	-3,62	0,00	0,00	-0,00
18/ 7/ 12 (C)	-7,20	0,24	-2,57	-0,04	1,55	0,46
18/ 16/ 12 (C)	83,61	-0,44	-4,56	0,00	-0,00	-0,00
19/ 10/ 12 (C)	70,10	0,47	7,16	-0,38	-8,82	0,34
19/ 17/ 12 (C)	70,10	-2,15	-1,09	-0,38	-2,53	1,71
20/ 12/ 12 (C)	60,09	1,36	-4,85	-0,44	1,20	0,24
20/ 18/ 12 (C)	60,09	2,26	-7,77	-0,44	-5,69	-1,73
21/ 9/ 12 (C)	70,32	-0,78	7,58	0,34	-10,13	-1,11
21/ 19/ 12 (C)	70,32	1,79	-0,55	0,34	-2,48	-1,65
22/ 11/ 12 (C)	60,23	-0,26	-4,73	0,50	1,24	-0,01
22/ 20/ 12 (C)	60,23	-1,36	-8,08	0,50	-5,73	0,86
27/ 17/ 12 (C)	51,47	3,20	11,68	0,01	-3,10	1,48
27/ 19/ 12 (C)	51,47	-2,61	-11,83	0,01	-3,30	0,68
28/ 18/ 12 (C)	69,71	-3,13	7,96	0,00	-6,41	-1,38
28/ 20/ 12 (C)	69,71	2,99	-7,74	0,00	-6,12	-1,19

Tabela 7.38: Resultado das Forças e Momentos resultantes do modelo Caso 4, construído pelo software Autodesk® Robot Structural Analysis Professional 2021TM

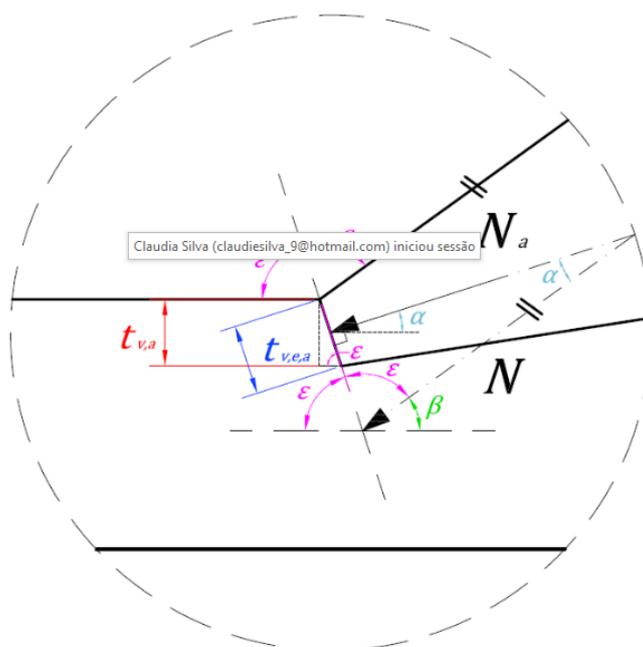


Figura 7.24: Ligação entalhada com dente simples aplicado na parte anterior da linha, adaptado de (Almeida, 2012)

$\sigma_{c,\alpha,d}$ - valor da tensão atuante à compressão relativamente a um ângulo α , e calcula-se através de:

$$\sigma_{c,\alpha,d} = \frac{N_a}{A} = \frac{N \times \sin \varepsilon}{b \times \frac{t_{v,a}}{\sin \varepsilon}} = \frac{N \times \sin \varepsilon^2}{b \times t_{v,a}} \quad (7.16)$$

Dimensionamento da Ligação:

Para determinar a profundidade mínima do entalhe aplicado no dente anterior, $t_{v,a}$ a condição de segurança tem de ser cumprida:

$$\sigma_{c,\alpha,d} \leq \frac{f_{c,0,d}}{\frac{f_{c,0,d}}{f_{c,90,d}} \times \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha} = 12,52 \text{ MPa} \quad (7.17)$$

Em que:

O valor de ângulo α é dado por:

$$\varepsilon + \alpha + 90^\circ = 180^\circ \leftrightarrow \alpha = \frac{\beta}{2} = \frac{23,96}{2} = 11,98^\circ \quad (7.18)$$

Então:

$$\sigma_{c,\alpha,d} \leq \frac{f_{c,0,d}}{\frac{f_{c,0,d}}{f_{c,90,d}} \times \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha} \leftrightarrow \frac{N \times \sin \varepsilon^2}{b \times t_{v,a}} \leq \frac{f_{c,0,d}}{\frac{f_{c,0,d}}{f_{c,90,d}} \times \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha} \leftrightarrow \quad (7.19)$$

$$\leftrightarrow t_{v,a} \geq \frac{N \times \sin \varepsilon^2}{b \times \frac{f_{c,0,d}}{f_{c,90,d}} \times \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha} = \frac{107,21 \times \sin^2 78,02^\circ}{0,14 \times \frac{15,23}{2,63} \times \sin^2 11,98^\circ + \cos^2 11,98^\circ} \geq 58,71 \text{ mm} \quad (7.20)$$

O deslizamento da madeira para a frente do entalhe é provocado pela componente horizontal da força N. Como tal, deve-se calcular um comprimento mínimo de madeira que o impeça.

Após a transmissão por contacto dos dois elementos, perna e linha, a componente horizontal do esforço de compressão na perna inverte o sinal e fica em tração na linha. Sendo através de tensões tangenciais que se dá o modo de rotura por corte paralelo às fibras, como tal, deve-se verificar tendo como comparação a componente horizontal da compressão $N \times \cos \beta$ da perna igual à tração na linha, na zona entre o topo da linha e o início do entalhe.

A tensão de corte atuante, τ_d , é dado por:

$$\tau_d = \frac{N_h}{A} = \frac{N \times \cos \beta}{b \times l_v} \quad (7.21)$$

Em que:

$$\tau_d \leq f_{v,d} \leftrightarrow \frac{N \times \cos \beta}{b \times l_v} \leq 1,38 \text{ MPa} \leftrightarrow l_v \geq \frac{107,21 \times 10^{-3} \times \cos 23,9^\circ}{0,14} \geq 0,70 \text{ m} \quad (7.22)$$

Ligação da Perna Direita da Asna 2 com Linha Baixa da Asna 2 – Elemento barra 7, nó nº 2:

$$\sin \varepsilon = \frac{N_a}{N} \leftrightarrow N_a = N \times \sin \varepsilon = 154,02 \times \sin 78,02^\circ = 154,02 \times 0,98 = 150,94 \text{ MPa} \quad (7.23)$$

Então, a profundidade mínima do entalhe é dada por:

$$t_{v,a} \geq \frac{N \times \sin^2 \varepsilon}{b \times \frac{f_{c,0,d}}{f_{c,90,d}} \times \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha} \geq 82,66 \text{ mm} \quad (7.24)$$

$$l_v \geq \frac{154,94 \times 10^{-3} \times \cos 23,9^\circ}{0,14} \geq 1,011 \text{ m} \quad (7.25)$$

Ligação da Perna Esquerda da Asna 1 com Linha Baixa Asna 1 – Elemento barra 7, nó nº 2:

Então, a profundidade mínima do entalhe é dada por:

$$t_{v,a} \geq \frac{N \times \sin^2 \varepsilon}{b \times \frac{f_{c,0,d}}{f_{c,90,d}} \times \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha} \geq 10,66 \text{ mm} \quad (7.26)$$

E, o comprimento mínimo à frente do entalhe é dado por:

$$l_v \geq \frac{19,46 \times 10^{-3} \times \cos 23,9^\circ}{0,14} \geq 0,13 \text{ m} \quad (7.27)$$

Ligação da Perna Direita da Asna 1 com Linha Baixa Asna 1 – Elemento barra 7, nó nº 2:

Então, a profundidade mínima do entalhe é dada por:

$$t_{v,a} \geq \frac{N \times \sin^2 \varepsilon}{b \times \frac{f_{c,0,d}}{f_{c,90,d}} \times \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha} \geq 44,42 \text{ mm} \quad (7.28)$$

E, o comprimento mínimo à frente do entalhe é dado por:

$$l_v \geq \frac{81,12 \times 10^{-3} \times \cos 23,9^\circ}{0,14} \geq 0,529 \text{ m} \quad (7.29)$$

Adição de argamassa nos entalhes, ou injeção de cola epoxídica, e, seguidamente, acrescentar um selante também epoxídico, para evitar que os produtos de colagem escoem (e não para melhorar a integridade estrutural da ligação).

Deve-se ter em conta a localização do apoio no sentido de evitar excentricidades, sendo o ideal que a direção da reação de apoio intercete os eixos da perna e da linha. Sugere-se a introdução de cachorros que se prologam sob a linha, permitindo distribuir melhor a reação de apoio e diminuir a flexão da linha. (Dias et al., 2009)

8 Análise Comparativa

8.1 Introdução

A avaliação de segurança de todos os modelos caso, permite limitar a análise comparativa aos modelos Caso 2 e 4, uma vez que só estes cumprem os requisitos de segurança impostos pelas normas europeias em vigor. Além disso, ter-se-á uma especial atenção nas recomendações relativas à preservação do património do ICOMOS.

Esta secção apresenta uma análise comparativa com critérios descritos de seguida, para duas soluções de reforço estrutural para o sistema de cobertura em asna de madeira do edifício descrito neste trabalho.

Após leitura de técnicas de intervenção comumente utilizadas neste sistema tradicional de asnas em madeira em edifícios antigos da cidade do Porto, apresenta-se a análise comparativa relativamente a alguns critérios, de acordo com a regulamentação atual.

A análise comparativa irá assentar na comparação da solução prevista em projeto e a solução proposta neste trabalho para o reforço estrutura de cobertura.

A primeira solução (solução 1), consiste na substituição integral dos elementos estruturais constituintes do sistema de asnas da cobertura existente.

A segunda solução (solução 2) consiste em substituir apenas os elementos Perna, aumentando a sua altura de 14 cm para 16 cm.

Os critérios de verificação dos estados limites últimos e de serviço foram descritos no capítulo 6, dando-se agora ênfase aos critérios de análise comparativa descritos seguidamente.

Os critérios que se destacam estão ligados às funções estruturais da restante estrutura, ou seja, à segurança global do edifício, as ligações, o seu custo, o seu tempo e modo de execução e reversibilidade e sustentabilidade, que são critérios associados ao Decreto-Lei 95/2019, que estabelece o regime aplicável à reabilitação de edifícios.

8.2 Compatibilidade com a Restante Estrutura

Uma vez que a maioria das intervenções em estruturas existentes introduz novos elementos, é necessário aferir se existe compatibilidade com a estrutura existente, com os materiais, por si só, também mais antigos. O que leva a que estes critério seja determinante numa análise comparativa de soluções apresentadas.

O efeito da substituição integral da cobertura é impactante no comportamento funcional e por vezes desfavorável no sistema estrutural existente. Por exemplo, no eventual acréscimo de peso próprio (e, eventualmente, das sobrecargas). A opção de uma solução mais leve, com elementos ligadores nos sistemas de asna de madeira, revela-se mais favorável, segundo este critério.

Compatibilidade com restante estrutura	Vantagens	Desvantagens
Solução 1	<ul style="list-style-type: none"> - Melhoramento do funcionamento estrutural na íntegra; - Maior segurança tanto a nível dos estados limites últimos como estados limites de utilização, permite maiores esforços a longo prazo; - Total ausência de flecha nas linhas, por efeito de fadiga, retomando as condições iniciais na íntegra; 	<ul style="list-style-type: none"> - Mais impactante não só no acréscimo de novos elementos estruturais, como escoras, frechal perimetral, pendural, que acresce no peso próprio bem como nos esforços introduzidos nas paredes laterais, frontal e tardo que suportam a cobertura; - impossibilidade de manter a estrutura em serviço durante a intervenção;
Solução 2	<ul style="list-style-type: none"> - Melhoria parcial do funcionamento estrutural, nos elementos mais solicitados, neste caso as pernas; - mais leve, pois prevê a introdução de quatro elementos novos (pernas, e não a totalidade do sistema de asnas; - menos intrusivo; - introduz menos ações permanentes. 	<ul style="list-style-type: none"> - Necessidade de verificação das condições de apoio, cálculo da rigidez das ligações Perna-Linha existentes, nomeadamente no dimensionamento do comprimento mínimo que deve existir à frente do entalhe para prevenir deslizamento.

Tabela 8.1: Comparação de soluções de acordo com o critério equilíbrio com a restante estrutura

8.3 Ligações às Paredes

As ligações têm um papel fundamental no assegurar da rigidez global da estrutura. Portanto, é essencial uma boa análise do melhor modo de ligação em cada solução apresentada. Uma deficiente entrega da linha da asna e das pernas na parede de alvenaria em pedra, pode ser prejudicial também para a própria parede, pois a transmissão de cargas verticais às paredes fica enfraquecida, com consequências na estabilidade do sistema estrutura global. É pois essencial analisar as ligações dos elementos do sistema de asnas em madeira com as paredes estruturais em alvenaria de pedra, neste caso específico. Deve-se averiguar a excentricidade das cargas transmitidas

às paredes, pois estas podem aumentar o esforço de flexão introduzidos nas paredes.

Ligação às paredes	Vantagens	Desvantagens
Solução 1	<ul style="list-style-type: none"> - Uniformidade de entrega da linha da asna e das pernas às paredes de alvenaria; - Com a introdução do frechal perimetral, maior distribuição de cargas, vantajoso para a estabilidade; - aumento da rigidez da ligação às paredes; - menor deslocamento horizontal, na presença de sismos, por exemplo, com incremento de rigidez e integridade da estrutura em sistema de asnas; 	<ul style="list-style-type: none"> - Alteração do estado global de esforços na estrutura. - Requer abertura em paredes de alvenaria, ou alargamento das aberturas existentes;
Solução 2	<ul style="list-style-type: none"> - Dispensa de verificação na entrega da linha da asna na parede de alvenaria. - menos intrusão na alteração do estado global de esforços da estrutura; - menor desproporção entre a rigidez dos elementos do sistema de asnas e os elementos de alvenaria em pedra. 	<ul style="list-style-type: none"> - Especial atenção na ligação perna-linha, pois na introdução de pernas novas, deve-se averiguar a excentricidade das cargas transmitidas às paredes, que fazem de apoio.

Tabela 8.2: Comparação de soluções de acordo com o critério ligação às paredes

8.4 Custo

O custo é um critério selecionado para a análise comparativa de modo a assegurar a praticabilidade da teoria, revelando-se em fase de construção, ser o critério que pesará numa análise a posteriori do projeto de execução de um caso de estudo. Por parte do dono de obra e do empreiteiro geral de construção, em fase de construção, é sempre dada uma grande importância à solução mais económica.

Custo	Vantagens	Desvantagens
Solução 1	<ul style="list-style-type: none"> - menor custo dos revestimentos de cobertura, com o mesmo mapa de quantidades, menor custo do isolamento térmico na cobertura; - menor custo do reforço da linha-perna; 	<ul style="list-style-type: none"> - maior quantidade de elementos em madeira maciça, logo maior custo dos elementos estruturais; - maior custo da mão de obra, nomeadamente abertura de rasgos nas paredes em alvenaria; - custos associados à demolição da estrutura existente; - mais custos indirectos, custos associados a transporte a vazadouro dos escombros resultantes da demolição;
Solução 2	<ul style="list-style-type: none"> - menor custo com a abertura de negativos nas paredes de alvenaria de pedra; - menor custo na mesma área de cobertura relativamente a introdução de elementos novos; - menor custo da demolição integral da estrutura de cobertura; - menos custos indirectos; 	<ul style="list-style-type: none"> - maior custo dos revestimentos para melhoramento de comportamento térmico e ventilação para evitar pontes térmicas; - maior custo de mão de obra associado ao reforço da ligação perna-linha;

Tabela 8.3: Comparação de soluções de acordo com o critério Custo

8.5 Tempo e Modo de Execução

Para uma análise económica, o tempo de execução está sempre inerente, pois com um tempo de execução menor com as mesmas características e semelhantes custos globais, terá no final custos menores. Do ponto de vista prático de obra, para o empreiteiro ou dono de obra, este fator é um dos fatores principais a ter em conta. A localização do estaleiro e sua acessibilidade ao edifício é relevante, sendo que muitas vezes é necessário ocupar vias públicas, e isso também influencia o tempo de execução de obra. (Almeida, 2009)

Relativamente ao modo de execução, torna-se importante minimizar o transtorno da comodidade da população. (Almeida, 2009)

Tempo e Modo de Execução	Vantagens	Desvantagens
Solução 1	<ul style="list-style-type: none"> - Sistemas de asnas passíveis de ser pré-montados em fase produção; 	<ul style="list-style-type: none"> - Trabalhos associados à demolição da estrutura existente aumentam o tempo de execução; - Logística associada à montagem e desmontagem de estaleiro; - Dependência da condições atmosféricas - Mais transporte a vazadouros; - Reparação e/ou reconstrução de prejuízos (improvisos) potenciais resultantes das demolições das estruturas existentes; - Maior atenção aos trabalhos de proteção de segurança no caso das demolições das estruturas existentes; - Mais trabalhos associados às limpezas de escombros; - Introdução de escoramentos associados aos trabalhos de demolição, para assegurar a segurança da estrutura global; - Maior necessidade de meios como cordas, roldanas, guinchos e outros; - Introdução de vedação e barreiras amovíveis junto das extremidades de descarga e um sinal de perigo;
Solução 2	<ul style="list-style-type: none"> - Menor necessidade de meios como cordas, roldanas, guinchos e outros; - Menos trabalhos de limpeza; 	<ul style="list-style-type: none"> - Introdução de vedação e barreiras amovíveis junto das extremidades de descarga e um sinal de perigo; - Montagem dos elementos Perna “<i>in situ</i>”, que traduz num aumento de grau de complexidade de modo de execução; - Introdução de escoramentos associados aos trabalhos de demolição, para assegurar a segurança da estrutura global;

Tabela 8.4: Comparação de soluções de acordo com o critério Tempo e Modo de Execução

8.6 Reversibilidade e Sustentabilidade

Como foi referido no capítulo 2, na ponderação relativamente à solução a escolher, deve considerar-se a reversibilidade, pois qualquer intervenção deve ser cuidada tendo em conta o grau de intrusão, devendo as soluções ser o menos intrusivas possível. Às vezes torna-se difícil pela ausência de conhecimento do funcionamento estrutural, tanto pelo grau de complexidade como pela falta de condições de acesso para uma correta análise das condições em que se encontra o sistema estrutural do edifício. (Almeida, 2009)

Contudo, deve-se optar por soluções com níveis de alterações minimalistas, respeitando os princípios de conservação de património existente. Reforçando com o facto de quantas mais alterações se introduzir maior será a dificuldade na assertividade do funcionamento da estrutura e das suas alterações introduzidas., materiais, ações, etc. (Almeida, 2009)

Apesar de se admitir que não há soluções totalmente reversíveis, uma vez que se torna impos-

sível voltar ao estado inicial do sistema estrutural de um edifício, o objetivo será sempre maximizar o seu grau de reversibilidade nas soluções apresentadas, dando preferência a técnicas que possibilitem a remoção de novos elementos introduzidos, para situações onde as soluções de intervenção se mostrem inadequadas e ineficazes, ou mesmo em final de tempo útil de vida dos elementos introduzidos, sem que haja danos provocados ao sistema global da estrutura, com essa remoção dos elementos. (Almeida, 2009)

Reversibilidade e Sustentabilidade	Vantagens	Desvantagens
Solução 1	<ul style="list-style-type: none"> - Eliminação da encurvadura da Linha, por flecha, com a introdução de elementos novos, que tornam possível o regresso das condições iniciais após colocação em obra, relativamente aos estados limites de serviço; - Madeira da mesma espécie; 	<ul style="list-style-type: none"> - Solução mais intrusiva que a solução 2, uma vez que há remoção total da estrutura existente e substituição integral; - Mais intrusivo na entrega das paredes, que requer maior atenção à transmissão de cargas verticais nas paredes, exige verificação de segurança às paredes verticais de alvenaria em pedra; - Introdução de elementos como frechal perimetral que altera a transmissão de cargas e causa uma maior intrusão; - Maior perda de valor histórico, pela substituição integral;
Solução 2	<ul style="list-style-type: none"> - Madeira da mesma espécie favorece homogeneidade; - Menos elementos substituídos, logo mais sustentável; - Utilização do mesmo tipo de ligação tradicional; - Maior respeito pela estrutura existente - Maior legibilidade da intervenção; 	<ul style="list-style-type: none"> - Possibilidade de excentricidade introduzida nas zonas de entrega em paredes, que provoca um maior grau de intrusão;

Tabela 8.5: Comparação de soluções de acordo com o critério Reversibilidade e Sustentabilidade

9 Conclusões e Desenvolvimentos Futuros

9.1 Conclusões

Este trabalho iniciou-se com uma revisão bibliográfica do trabalho efetuado no âmbito da reabilitação de edifícios antigos, seguiu-se o levantamento do edifício selecionado como caso de estudo, de uma forma geral, e em particular da estrutura de cobertura.

Após abordar as metodologias de inspeção e diagnóstico, identificar as anomalias do edifício em estudo, e tomar conhecimento da inviabilidade do tratamento dos escassos resultados de ensaios “*in situ*” para correlacionar com as propriedades mecânicas, tais como, a massa volúmica e o módulo de elasticidade, assumiu-se uma redução de 30% nas seções transversais dos elementos constituintes das duas asnas de madeira analisadas e modeladas, como ponto de partida para análise estrutural de acordo com o EC5, do modelo para o caso correspondente às condições existentes com influência da presença de anomalias.

Foram estudados cinco casos de modelação estrutural com auxílio do Autodesk™ Robot Structural Analysis^R, entre casos existentes em condições ideais, casos existentes com a consideração de deformações impostas devido à fluência da madeira, e casos propostos tanto pela equipa do NCREP como pela autora desta dissertação, como solução de reforço de cobertura em sistema de asnas de madeira.

Concluiu-se que os elementos sujeitos a maiores esforços são as pernas das asnas, e, neste caso específico, da asna mais perto da parede de fachada, sendo a sua ligação perna-linha a ligação mais solicitada. São elementos sujeitos a flexão composta com compressão agravada pela encurvadura. Embora em peças de seção quadrada seja nulo o efeito de bambeamento o que dispensa a verificação da segurança, a encurvadura devido à flexão-torsão foi verificada tanto no caso proposto pela equipa NCREP como na última solução proposta pela autora.

Concluiu-se que apenas a mudança de revestimentos na cobertura, tal como forro, varas e ripado, não será uma boa solução de reforço. Pese embora melhore o funcionamento do edifício do ponto de vista da física das construções, com a introdução de isolamento térmico no painel sandwich e com propriedades de impermeabilização, estruturalmente não resolve as patologias diagnosticadas. Pelo contrário, aumenta o peso próprio da estrutura e não cumpre com as verificações aos estados limites últimos e estados limites de serviço.

Após uma análise comparativa dos critérios estipulados, chegou-se ao desenlace que a solução mais económica consiste em substituir apenas os elementos perna, aumentando a altura da seção retangular de 14 cm para 16 cm. Apesar da dificuldade de quantificar o nível de intrusão e reversibilidade, também deste ponto de vista se revela a melhor solução. Ainda do ponto de vista de gestão de obra, o tempo e o modo de execução, esta é a solução mais vantajosa, pois não implica uma logística associada a trabalhos de estaleiro e trabalhos de demolição que a solução proposta pelo NCREP assume, com a substituição integral da estrutura de cobertura, e apresenta também como vantagem a reposição das condições ideais das peças de madeira mais solicitadas.

Esta solução de reforço, com a substituição dos elementos pernas por uma seção retangular, como maior altura, do mesmo material, mas devidamente seca antes de colocada, e com o dimensionamento da ligação com os modos de rotura associados aos novos esforços devido ao aumento da capacidade portante da estrutura, devem ser acompanhados de um bom plano de manutenção e monitorização do resto da estrutura adjacente, porque só assim se garante a conservação desta estrutura de cobertura a longo prazo.

9.2 Desenvolvimentos futuros

Para este caso de estudo, as vertentes de exploração para trabalhos futuros são de um leque largo de possibilidades, nomeadamente a análise de ação sísmica, que não foi tida em conta nesta dissertação. Embora a ação sísmica não deva ser determinante para esta cobertura, auto-portante, seria interessante avaliar o efeito das várias soluções sobre a estrutura de alvenaria. A avaliação da influência da consideração de espécie em Carvalho, uma vez que suscitava dúvidas após visitas técnicas revela-se como um ponto de interesse para desenvolvimentos de trabalhos futuros. Não obstante ao fato de verificar a existência da necessidade eminente de se proceder à execução de ensaios de inspeção e diagnóstico na zona das ligações de asnas e entrega de apoios às paredes de alvenaria em pedra, para uma análise mais assertiva dos parâmetros que correlacionam com as características mecânicas, nomeadamente a massa volúmica e o módulo de elasticidade.

Outro ponto interessante seria avaliar outras soluções de reforço estrutural, tal como aplicação do pré-esforço para contrariar a flecha resultante do efeito de fluência nas linhas baixas das asnas ou a colocação de chapas metálicas aparafusadas em ambas as faces do elemento de madeira, que apesar de ser uma solução esteticamente discutível, é um dos recursos mais eficaz e comumente utilizado nas entregas de apoio às paredes.

Outra solução passa pela colocação de empalmes, novos elementos metálicos ou de madeira unidos através de braçadeiras metálicas, pregos ou cavilhas. Esta solução é menos intrusiva do que substituir material deteriorado. Esta opção tem como desvantagens a impossibilidade do acompanhamento da evolução da degradação dos elementos deteriorados, uma vez que ficam tapados pelos empalmes de elementos de madeira sã e a heterogeneidade da estrutura global resultante.

Outra solução seria rigidificar as ligações através da aplicação de *gussets* de placas de derivados de madeira, como LVL ou contraplacado colados aos elementos de madeira.

Outro trabalho poderá passar pela análise do comportamento ao fogo: em geral, nos edifícios antigos não existiam, originalmente, compartimentos corta-fogo, caminhos de evacuação, etc. Como tal, origina mais trabalho de desenvolvimento para o futuro, principalmente em edifícios localizados no centro histórico das cidades com importância patrimonial.

Referências

- ALFREDO DIAS - **Apontamentos de apoio à disciplina «Estruturas de Madeira»**. Coimbra : Faculdade de Ciências e Tecnologia Universidade de Coimbra, 2012
- ALMEIDA, Filipe André Leitão - **A Madeira como Material Estrutural – Projeto da Estrutura de um Edifício**. Dissertação de Mestrado, FEUP, Universidade do Porto 2012
- ALMEIDA, João Filipe Da Cunha Doutel De - **Estudo De Soluções Estruturais para a reabilitação de edifícios em alvenaria de pedra**. Dissertação de Mestrado, FEUP, Universidade do Porto, 2009
- APPLETON, João - **Reabilitação de Edifícios Antigos**. Edição: 11 EDITORA ORION Lisboa, 2011
- BASTOS, João Miguel Silva - **Asnas Tradicionais de Madeira: Caracterização e Reforço**. Dissertação de Mestrado Universidade de Aveiro, 2011
- BRANCO, Jorge; Cruz Paulo; Piazza Maurizio - Asnas de Madeira, A importância da rigidez das ligações. Em **4^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas**. Lisboa : LNEC; Ordem dos Engenheiros, 2006
- BRANCO, Jorge M. - Reforço de elementos existentes de madeira. Em **Seminário Intervir em construções existentes de madeira**, Universidade do Minho, Guimarães, 2014
- BRANCO, Jorge; SANTOS, Ana; CRUZ, Paulo - Asnas Tradicionais de Madeira: Comportamento e Reforço com Materiais Compósitos. **Revista Portuguesa nº3 de Engenharia de Estruturas**, pág. 5-18. Universidade do Minho, Guimarães, 2008
- BRITES, Ricardo - **«Avaliação de Segurança das Estruturas Antigas de Madeira»**. Dissertação de Doutoramento Universidade do Minho, Guimarães, 2011
- CARNEIRO, Francisco Fortuna Oliveira Dias - **Reforço De Vigas De Madeira Com Elementos De Aço Em Obras De Reabilitação**. Dissertação de Mestrado, FEUP, Universidade do Porto, 2012
- COSTA, A. G. *et al.* - Metodologias de intervenção no património edificado. Em **2º Seminário - A Intervenção no Património. Práticas de Conservação e Reabilitação**, FEUP, 2005
- CRUZ HELENA - Inspeção, avaliação e conservação de estruturas de madeira. Em **1ª Jornadas de Materiais na construção**, Lisboa, 2011
- DIAS, Luís Filipe Sousa Da Costa - **A Sustentabilidade na Reabilitação do Património Edificado**. Dissertação de Mestrado, Universidade Nova de Lisboa, 2012
- DIAS, Tiago Ilharco De Moura Pinho - **Pavimentos de madeira em edifícios antigos . Diagnóstico e intervenção estrutural**. Dissertação de Mestrado, FEUP, Universidade do Porto, 2008
- CEN (European Committee for Standardization)- EUROPEAN STANDARD Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-1: General -Common rules and rules for buildings **EN 1995-1-1:2004+A1**

EMANUEL ANDRÉ SOARES CORREIA - **Análise e Dimensionamento de Estruturas de Madeira**. Dissertação de Mestrado, FEUP, Universidade do Porto, 2009

ERFI - **Painel Sandwich Poliuretano Cobertura** [Consult. 31 out. 2021]. Disponível em :<http://www.erfi.pt>>.

FAGULHA, JOÃO; VENTOSA, Margarida; Santos Ricardo - **Reabilitação e conservação do património arquitectónico**. Ordem dos Engenheiros de Lisboa : Getbliss, 2016.

FARIA, J. Amorim - Reabilitação de Coberturas em Madeira em Edifícios Históricos . Em FEUP (Ed.) - **A Intervenção no Património. Práticas de Conservação e Reabilitação**. Porto, 2002

FARIA, José Pedro Soares Machado - **Ánálise de Elementos Estruturais de Madeira - Avaliação e Intervenção no Pavimento de um caso de estudo**. Dissertação de Mestrado, FEUP, Universidade do Porto, 2016

FEIO, Artur; LOURENÇO, Paulo B. - Possibilidades e aplicações de ensaios não destrutivos. **Encontro sobre a Madeira e suas Aplicações Nobres: «Bem utilizar a madeira»**. 2005.

FREITAS, Vasco Peixoto De - **Manual de Apoio ao Projecto de Reabilitação de Edifícios Antigos**. OERN, 2012.

ICOMOS - **Recomendações Para a Análise, Conservação E Restauro Estrutural Do Património Arquitectónico**, 2004

INE; LNEC - **O Parque Habitacional e a sua Reabilitação - Análise e Evolução 2001-2011**, 2013.

JULAR MADEIRAS - **Jular | Madeiras, Casas Modulares, Pavimentos, Decks, Estruturas, Revestimentos e Placas**: <https://www.jular.pt>>.

JULAR MADEIRAS - Painel Sandwich em Madeira. www.jular.pt :www.jular.pt>.

JÚLIO, Eduardo Santos - **Guia FNRE - Fundo Nacional de Reabilitação do Edificado**. 1ª Edição EDITORA FUNDIESTAMO, SA, 2020

JÚNIOR, Jeronimo Araújo Botelho - **Avaliação não destrutiva da capacidade resistente de estruturas de madeira de edifícios antigos**. Dissertação de Mestrado, FEUP, Universidade do Porto, 2006

LLADRÓ, CAPUZ; BARRA, DIEZ; BOTELHO, J.; FARIA, J. - «Avaliação da Capacidade Resistente de Estruturas de Madeira com recurso a ensaios in-situ.» Em FEUP (Ed.) - **«PATORREB 2006, 2º Encontro sobre Patologia e Reabilitação dos Edifícios. FEUP»**. FEUP, Universidade do Porto, 2006

LOPES, Miguel Alberto Camareira - **«Tipificação de soluções de reabilitação de estruturas de madeira em coberturas de edifícios antigos»**. Dissertação de Mestrado, FEUP, Universidade do Porto, 2009

LUZIO, Márcio Alexandre Marques - **«Verificação da segurança da estrutura de madeira de uma moradia - Estudo de caso»**. Dissertação de Mestrado, FEUP, Universidade do Porto, 2011 [Consult. 30 out. 2021]. Disponível em :<http://www.fe.up.pt>>.

MACHADO, José Saporiti; CRUZ, Helena; PALMA, Pedro; DIAS, Alfredo - **Avaliação, Conservação e Reforço de Estruturas de Madeira** . Verlag Dashofer Portugal, Lisboa.

MEDIEVAL, Pousada *et al.* - **A madeira em estruturas antigas: diagnóstico e metodologias de intervenção estrutural . A madeira em estruturas antigas: diagnóstico e metodologias de intervenção estrutural . Pousada Medieval da Gralheira – Caso de Estudo**. Dissertação de Mestrado, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, 2014

Melucco, Alessandra; De Naeyer, André *et al.* - **Carta de Cracóvia, Princípios para a Conservação e o Restauro do Património Construído**. Polónia. 2000

NCREP - **Memória Descritiva e Condições Técnicas**. Porto, 2020

NCREP - **Resumo da Inspeção e Proposta de Intervenção**. Porto, 2020

LNEC - **Norma Portuguesa - Eurocódigo - Bases para o projeto de estruturas. NP EN 1990 2009** , IPQ, 2009

LNEC - **Norma Portuguesa - Eurocódigo 1: Ações em Estruturas - Parte 1-1: Ações Gerais. NP EN 1991-1-1 2009**,IPQ, 2009

OLIVEIRA, Ernesto Veiga De; GALHANO, Fernando - **Arquitetura tradicional portuguesa**. Etnográfica Press, 1992

PAVÃO, Ricardo Costa - **Catálogo de técnicas de diagnóstico em edifícios antigos** . Dissertação de Mestrado IST, Universidade de Lisboa, 2016

Padrão, José Avelino Loureiro Moreira- **Técnicas de Inspeção e Diagnóstico em Estruturas**. Dissertação de Mestrado, FEUP, Universidade do Porto, 2004

PEREIRA, Ana Catarina Teixeira - **Metodologia de diagnóstico de anomalias em edifícios residenciais com o envolvimento dos seus utilizadores**. Dissertação de Mestrado Instituto Superior Técnico de Lisboa, 2017

SEGURADO, João Emílio Dos Santos - **Trabalhos de Carpintaria Civil**.

Bibliotheca de Paris:Livr.Aillaud; Lisboa : Livr. Bertrand; Rio de Janeiro: Livr. Francisco Alves, 1942

SOTECNISOL Roofmate Dados Técnicos.

Disponível em:<https://www.oportaldaconstrucao.com>

SRU, Porto Vivo - **Memória Descritiva Reabilitação de Edifício de Habitação e Comércio**. Porto, 2020

STEICO - "We care about your well being."**STEICO**. Disponível em :<https://www.steico.com/en/>>.

KRONO FRANCE. Disponível em :www.jular.pt>.

TEIXEIRA, Joaquim José Lopes (FAUP); PÓVOAS, Rui F. (FAUP) - Proposta de metodologia de intervenção para a reabilitação do património urbano edificado. As casas burguesas do Porto - Coberturas.Em **Encontro Nacional sobre Conservação e Reabilitação de Estruturas**. Porto, 2010

VITOR FREITAS; J.C. LANZINHA;; J. CASTRO GOMES - Reabilitação de Edifícios Metodologias de Diagnóstico e Intervenção. **Revista Materiais de Construção** 43–48 (2009)

Anexos

A Peças Desenhadas

A.1 Planta Intervenção Cobertura Modelo Caso 2

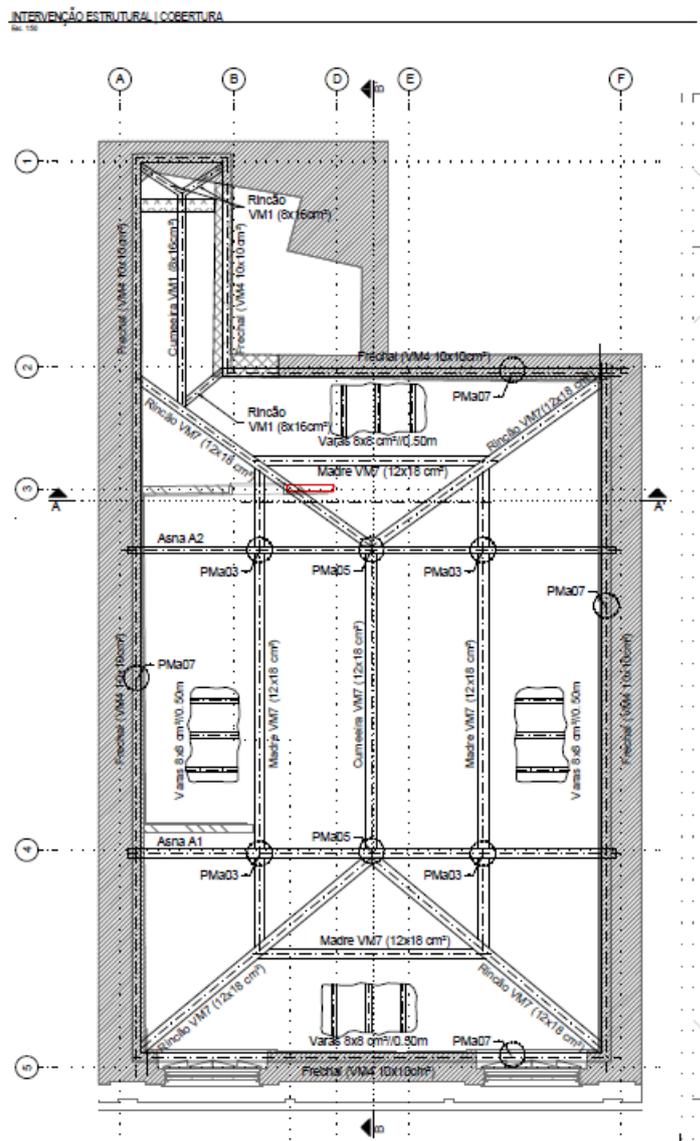


Figura A.1: Planta de Intervenção estrutural em cobertura, proposta pela equipa NCREP, Caso 2 de modelação estrutural

A.2 Alçado de Asna A1 e A2, Modelo Caso 2

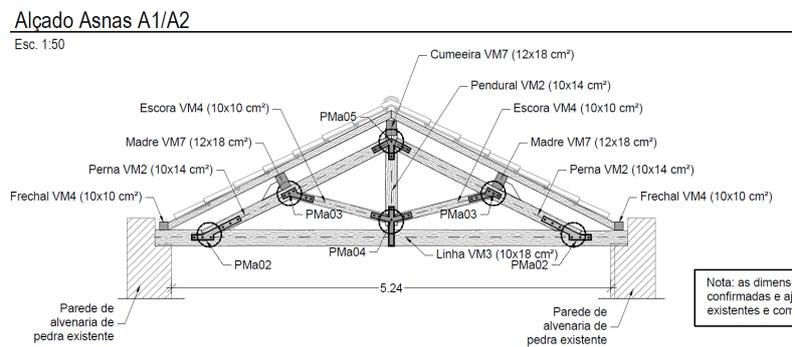


Figura A.2: Corte estrutural sobre o sistema de asnas, Modelo Caso 2 de modelação estrutural, fornecido pela equipa NCREP

B Mapeamento de Danos Estruturais em Cobertura

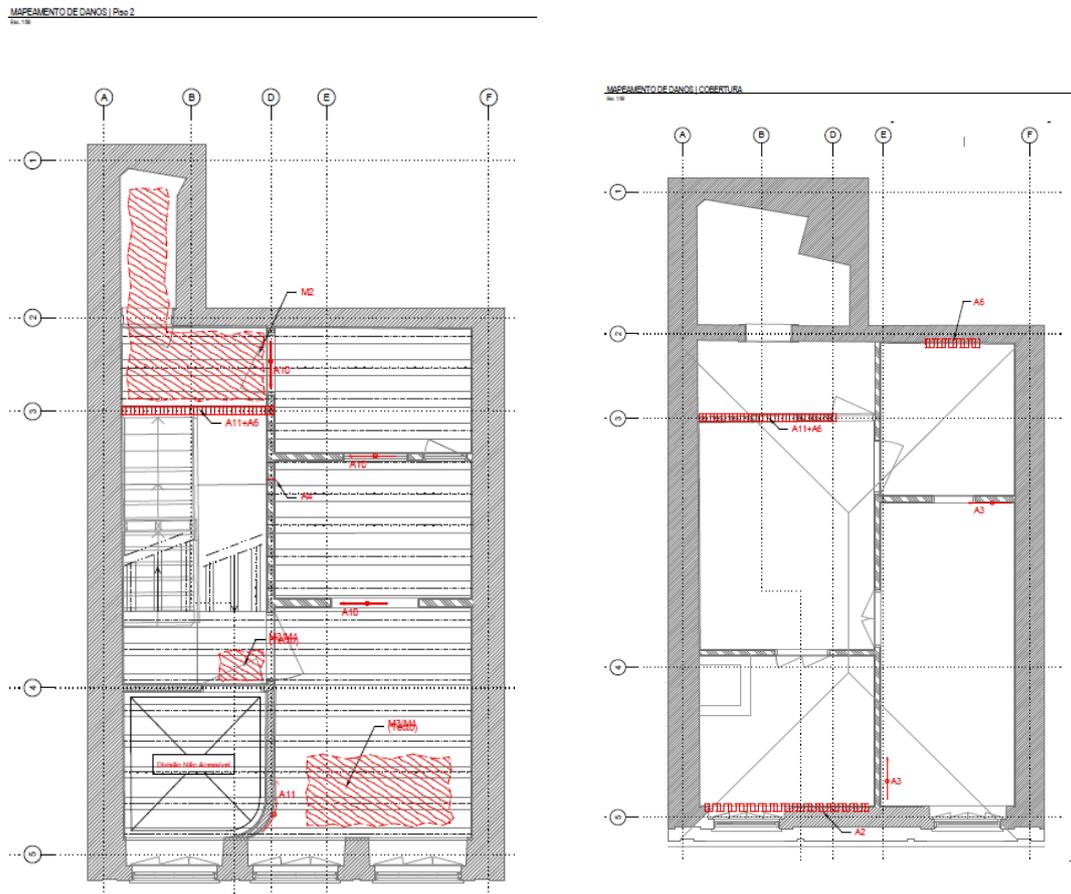


Figura B.1: Esquerda: Mapeamento de danos Piso 2, fornecido por NCREP (2020). Direita: Mapeamento de danos em cobertura, fornecido pela equipa NCREP(2020)

DANOS ESTRUTURAIS	
ELEMENTOS EM MADEIRA 	
Deformação significativa 	M1
Pavimento em betonilha sem impermeabilização adequada	M2
Queda do estuque	M3
Manchas de humidade	M4
Degradação por ataque de fungos	M5
Fissuração do tecto	M6
ELEMENTOS EM ALVENARIA OU TABIQUE 	
Ataque de caruncho em parede de tabique	A1
Humidade	A2
Fissuração diagonal 	A3
Fissuração vertical	A4
Separação de paredes ortogonais	A5
Degradação por ataque de fungos	A6
Deformação significativa	A7
Inclinação da padieira 	A10
Colapso Parcial	A11
Degradação de reboco	A12

Nota:  sentido descendente

Figura B.2: Legenda de Danos Estruturais, fornecido por NCREP (2020)

C Fotografias



Figura C.1: Fotografia da rua Sá Noronha, dando destaque à fachada do edifício em estudo, fornecida por NCREP (2020)



Figura C.2: Fotografia de fachada em fase de demolições, fornecido por NCREP(2020)

D Diagramas de esforços

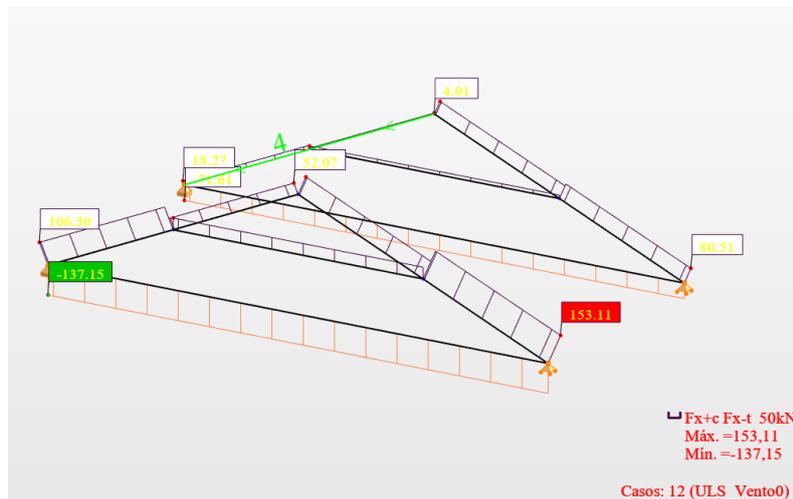


Figura D.1: Diagrama do Esforço Axial da combinação 1 do Caso 0 dos modelos estruturais, construído através do software Autodesk® Robot Structural Analysis Professional 2021™

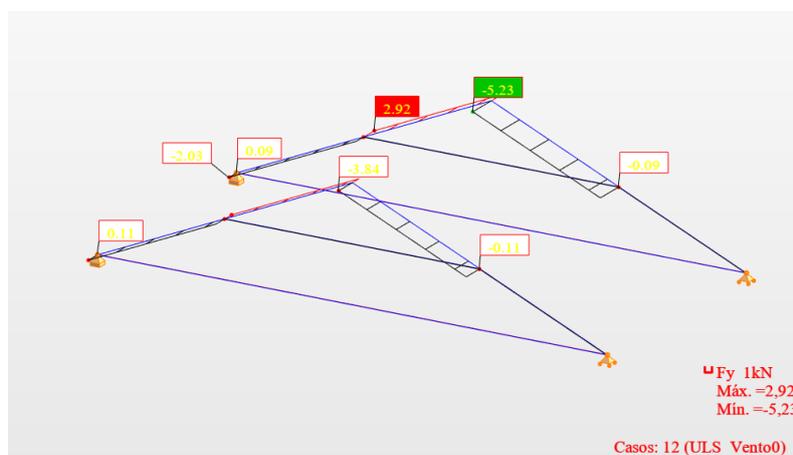


Figura D.2: Diagrama do Esforço Transverso, F_y para Combinação 1 do Caso 0 dos modelos estruturais, construído através do software Autodesk® Robot Structural Analysis Professional 2021™

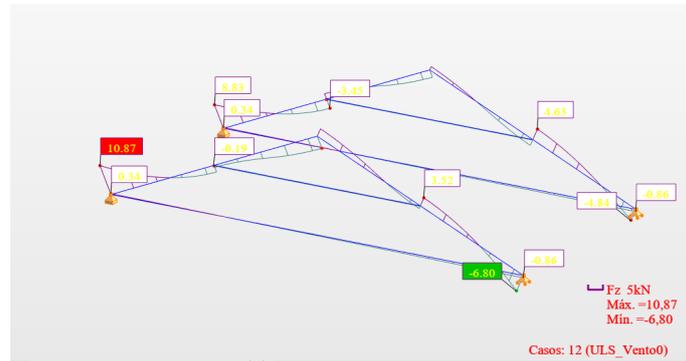


Figura D.3: Diagrama do Esforço Transverso, F_z , para Combinação 1 do Caso 0 dos modelos estruturais, construído através do software Autodesk® Robot Structural Analysis Professional 2021™

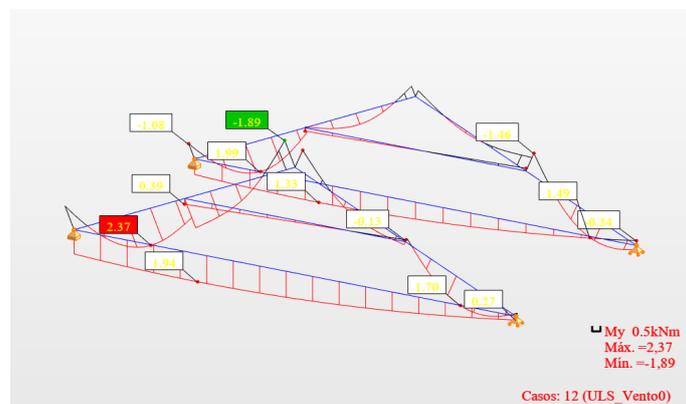


Figura D.4: Diagrama do Momento Fletor, M_y , para Combinação 1 do Caso 0 dos modelos estruturais, construído através do software Autodesk® Robot Structural Analysis Professional 2021™

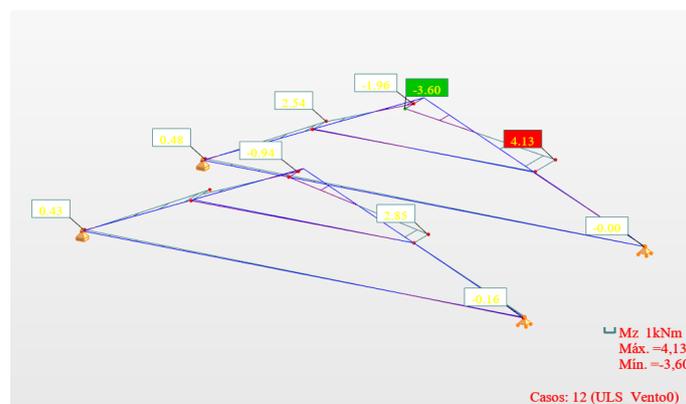


Figura D.5: Diagrama do Momento Fletor, M_z , para Combinação 1 do Caso 0 dos modelos estruturais, construído através do software Autodesk® Robot Structural Analysis Professional 2021™

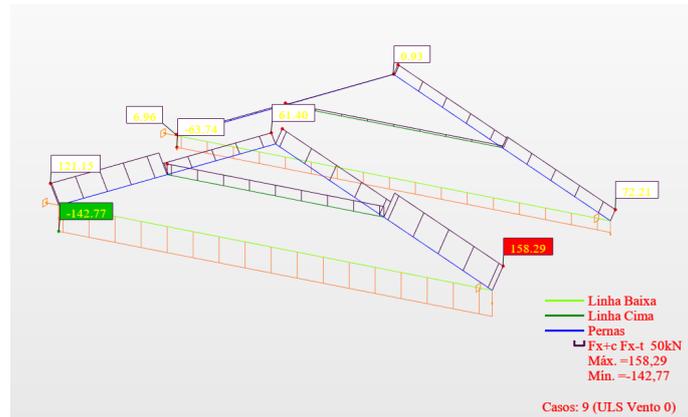


Figura D.6: Diagrama do Esforço Axial da combinação 1 do Caso 1 dos modelos estruturais, construído através do software Autodesk® Robot Structural Analysis Professional 2021TM

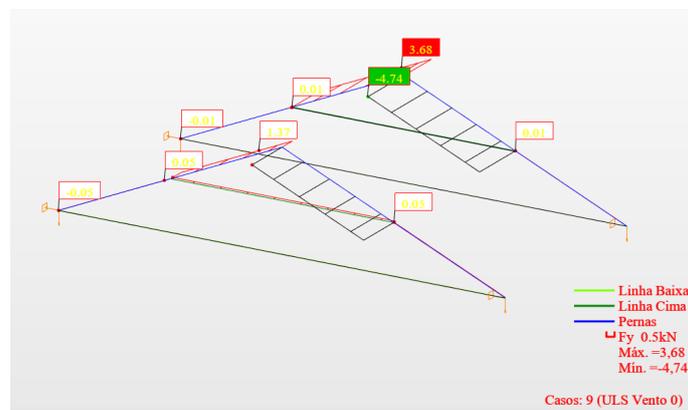


Figura D.7: Diagrama do Esforço Transverso, F_y para Combinação 1 do Caso 1 dos modelos estruturais, construído através do software Autodesk® Robot Structural Analysis Professional 2021TM

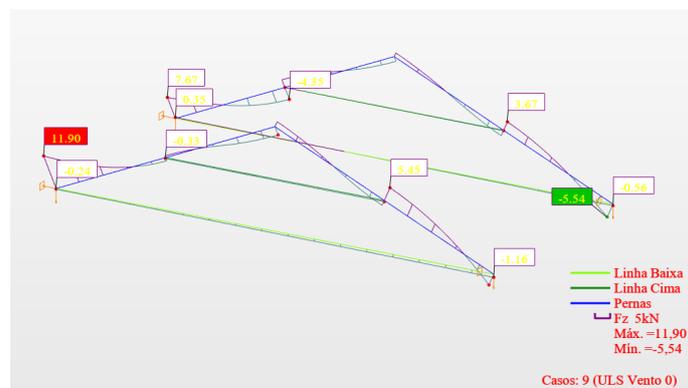


Figura D.8: Diagrama do Esforço Transverso, F_z para Combinação 1 do Caso 1 dos modelos estruturais, construído através do software Autodesk® Robot Structural Analysis Professional 2021TM

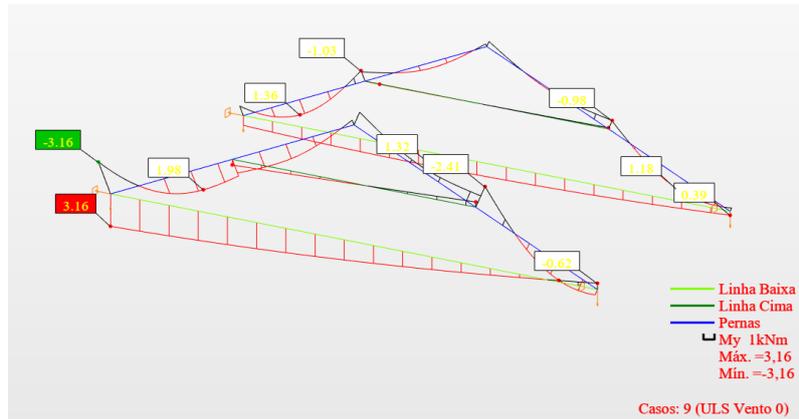


Figura D.9: Diagrama de Momento Fletor, M_y para Combinação 1 do Caso 1 dos modelos estruturais, construído através do software Autodesk® Robot Structural Analysis Professional 2021TM

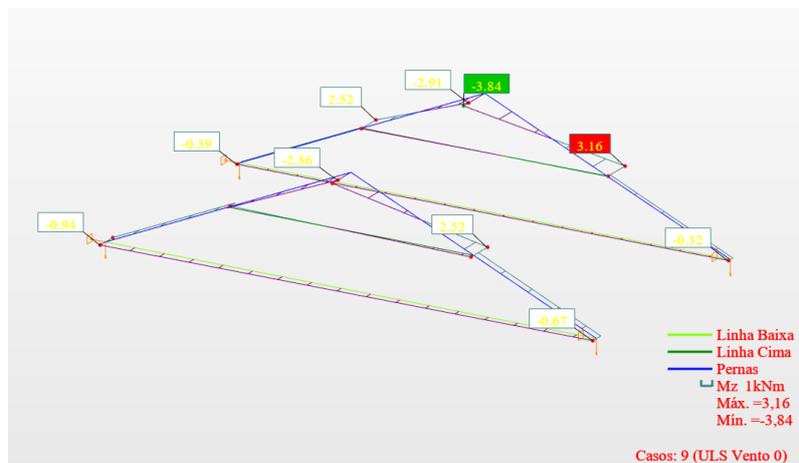


Figura D.10: Diagrama de Momento Fletor, M_z para Combinação 1 do Caso 1 dos modelos estruturais, construído através do software Autodesk® Robot Structural Analysis Professional 2021TM

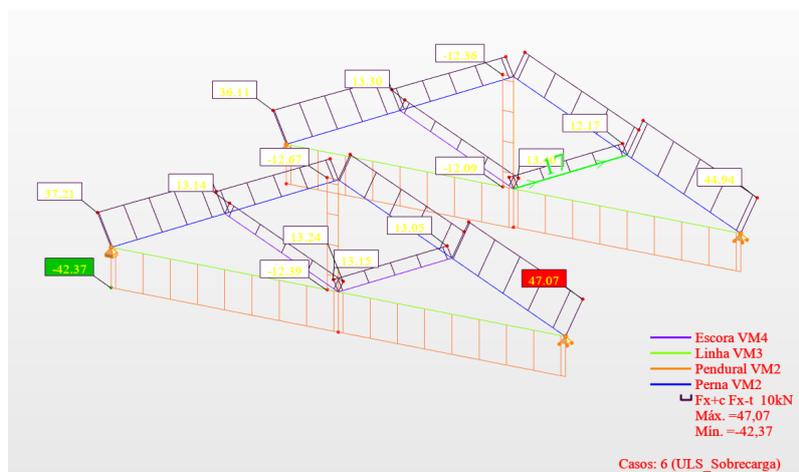


Figura D.11: Diagrama do Esforço Axial da combinação 3 do Caso 2 dos modelos estruturais, construído através do software Autodesk® Robot Structural Analysis Professional 2021TM

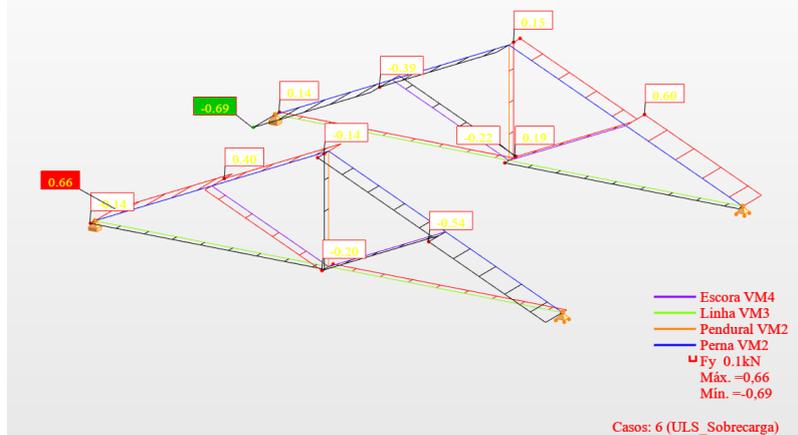


Figura D.12: Diagrama do Esforço Transverso, F_y para Combinação 3 do Caso 2 dos modelos estruturais, construído através do software Autodesk® Robot Structural Analysis Professional 2021TM

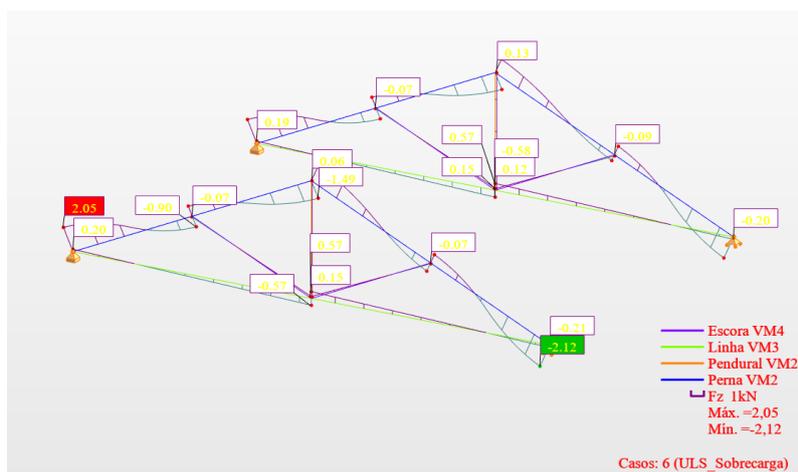


Figura D.13: Diagrama do Esforço Transverso, F_z para Combinação 3 do Caso 2 dos modelos estruturais, construído através do software Autodesk® Robot Structural Analysis Professional 2021TM

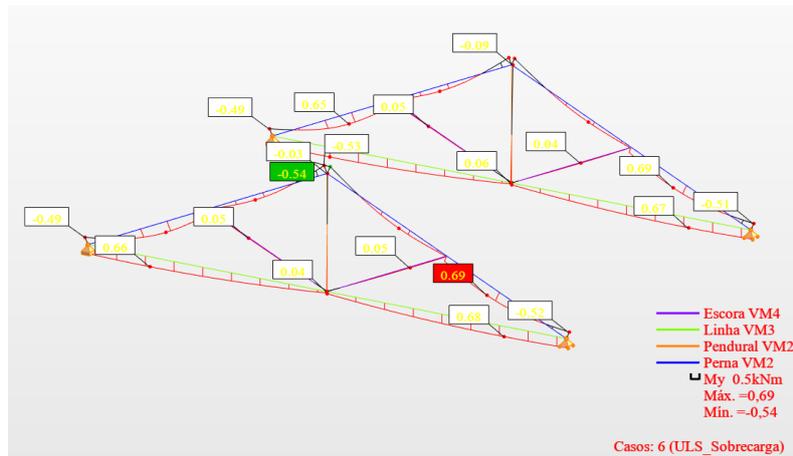


Figura D.14: Diagrama de Momento Fletor, M_y para Combinação 3 do Caso 2 dos modelos estruturais, construído através do software Autodesk® Robot Structural Analysis Professional 2021TM

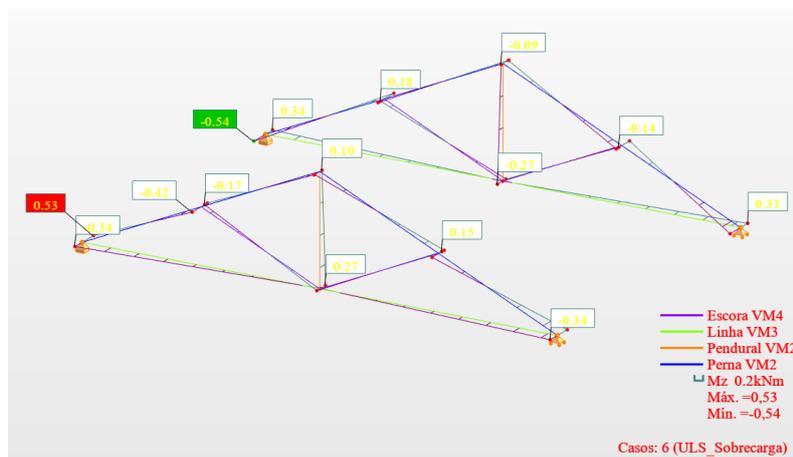


Figura D.15: Diagrama de Momento Fletor, M_z para Combinação 3 do Caso 2 dos modelos estruturais, construído através do software Autodesk® Robot Structural Analysis Professional 2021TM

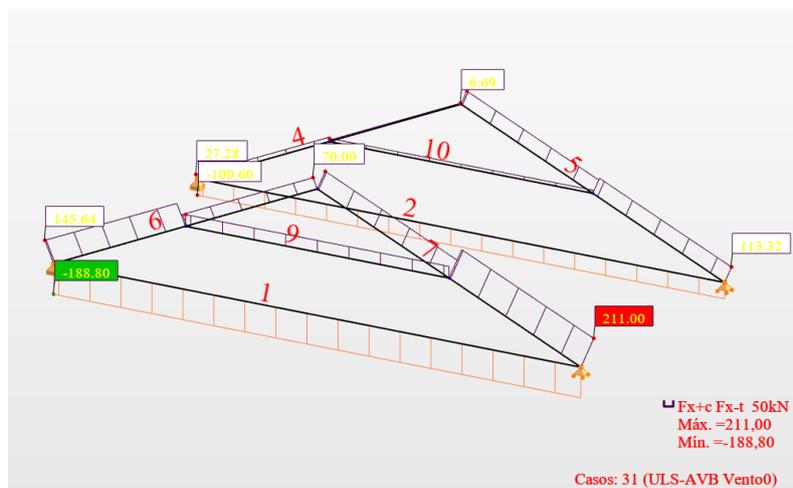


Figura D.16: Diagrama do Esforço Axial da combinação 1 do Caso 3 dos modelos estruturais, construído através do software Autodesk® Robot Structural Analysis Professional 2021TM

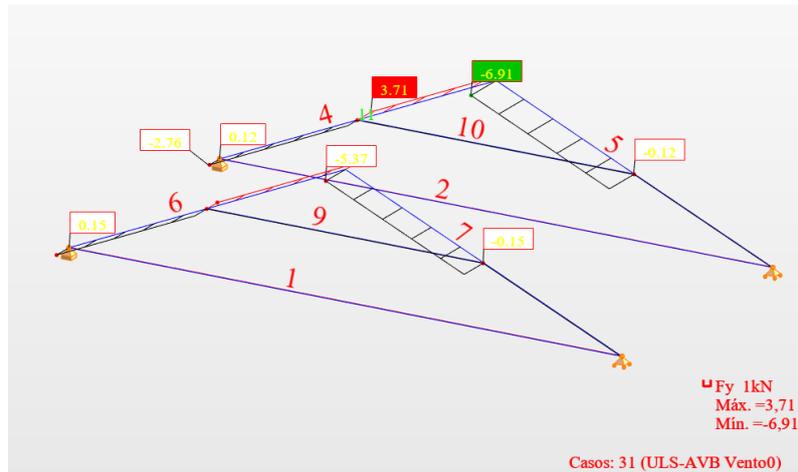


Figura D.17: Diagrama do Esforço Transverso, F_y para Combinação 1 do Caso 3 dos modelos estruturais, construído através do software Autodesk® Robot Structural Analysis Professional 2021TM

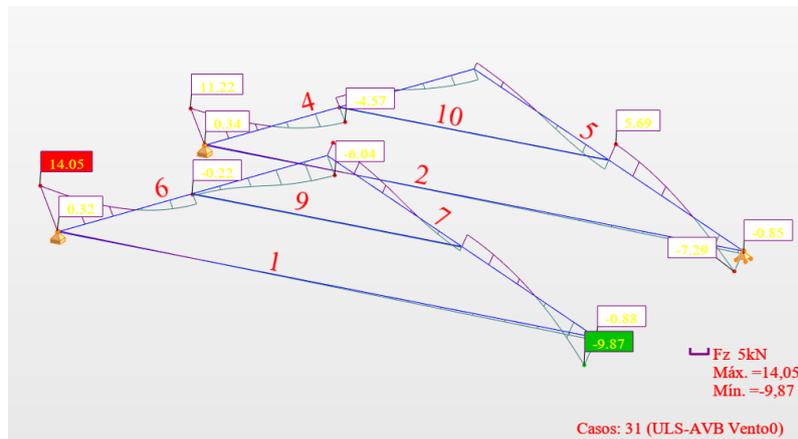


Figura D.18: Diagrama do Esforço Transverso, F_z para Combinação 1 do Caso 3 dos modelos estruturais, construído através do software Autodesk® Robot Structural Analysis Professional 2021TM

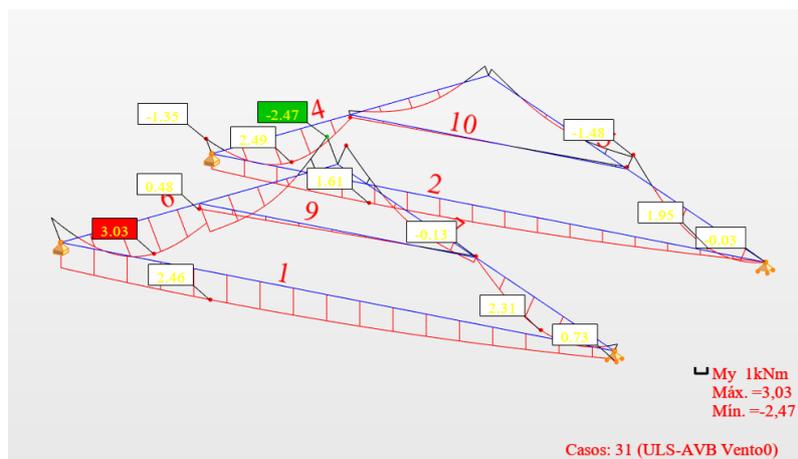


Figura D.19: Diagrama de Momento Fletor, M_y para Combinação 1 do Caso 3 dos modelos estruturais, construído através do software Autodesk® Robot Structural Analysis Professional 2021TM

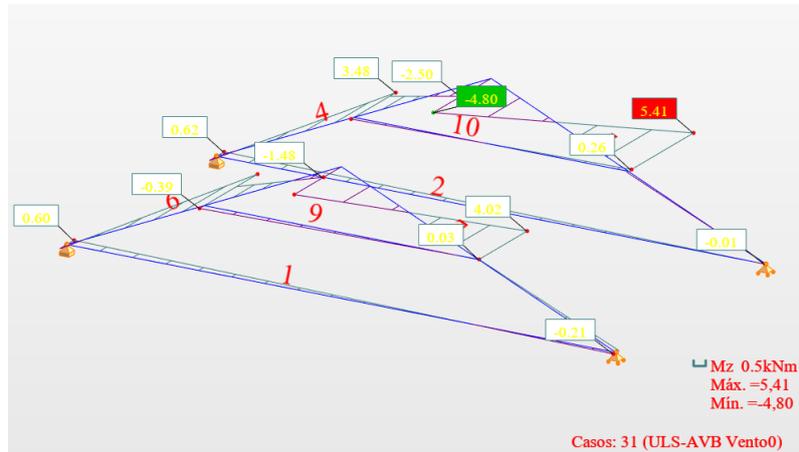


Figura D.20: Diagrama de Momento Fletor, M_z para Combinação 1 do Caso 3 dos modelos estruturais, construído através do software Autodesk[®] Robot Structural Analysis Professional 2021TM

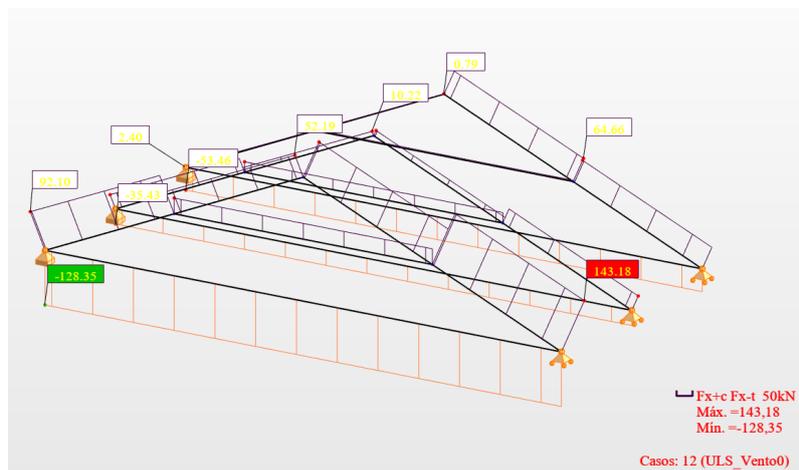


Figura D.21: Diagrama de Esforço Axial da combinação 3 do Caso 4, no Autodesk[®] Robot Structural Analysis Professional 2021TM

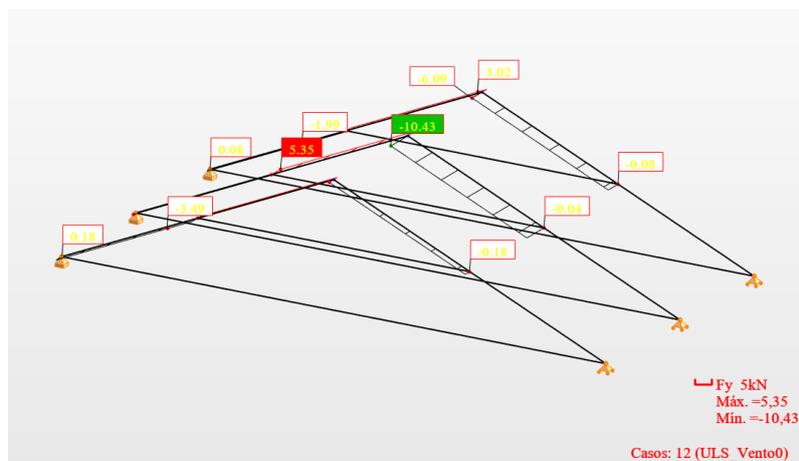


Figura D.22: Diagrama do Esforço Transverso, F_y para Combinação 3 do Caso 4 dos modelos estruturais, construído através do software Autodesk[®] Robot Structural Analysis Professional 2021TM

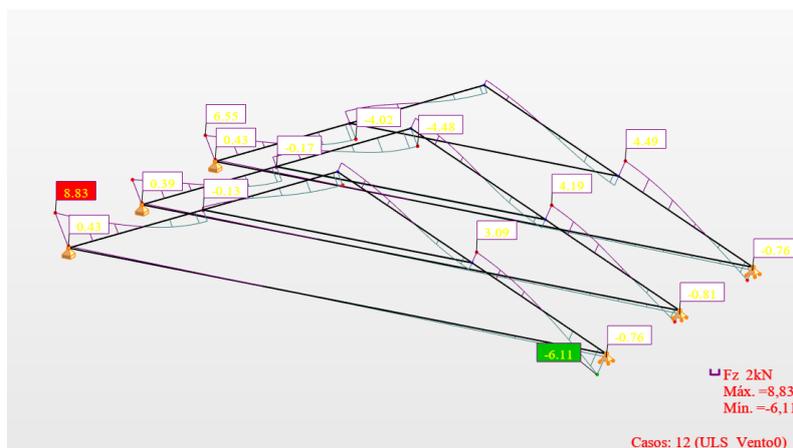


Figura D.23: Diagrama do Esforço Transverso, F_z , para Combinação 3 do Caso 4 dos modelos estruturais, construído através do software Autodesk[®] Robot Structural Analysis Professional 2021TM

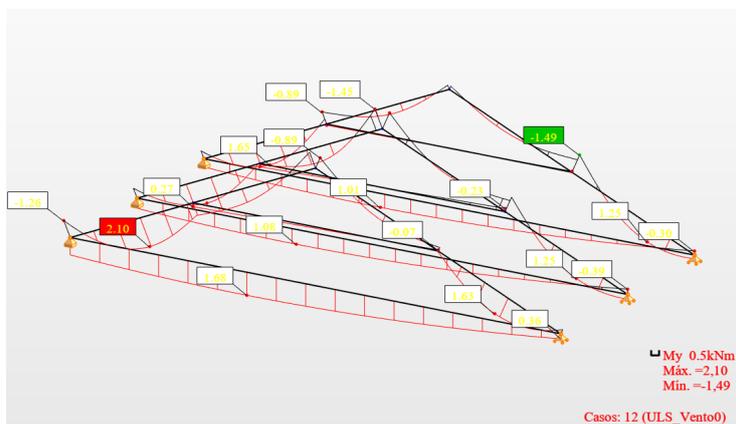


Figura D.24: Diagrama do Momento Fletor, M_y , para Combinação 3 do Caso 4 dos modelos estruturais, construído através do software Autodesk[®] Robot Structural Analysis Professional 2021TM

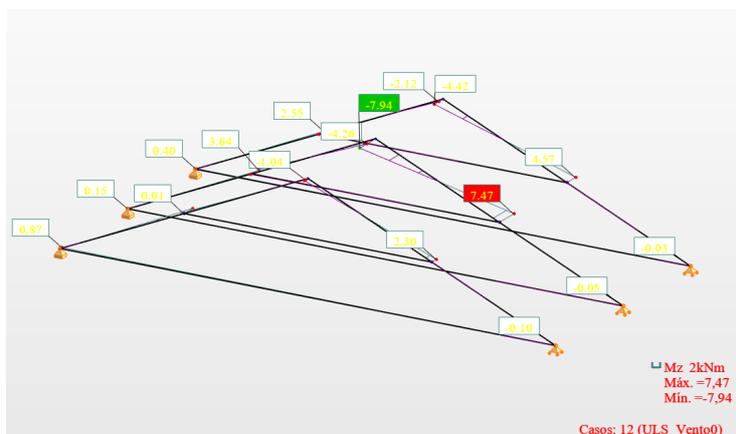


Figura D.25: Diagrama do Momento Fletor, M_z , para Combinação 3 do Caso 4 dos modelos estruturais, construído através do software Autodesk[®] Robot Structural Analysis Professional 2021