

# **CONSIDERAÇÕES SOBRE ANÁLISE E DIMENSIONAMENTO DE ESTRUTURAS DE MADEIRA PARA HABITAÇÕES UNI E PLURIFAMILIARES**

**JOÃO FERNANDO SÁ LARANJEIRA**

*Relatório de Projecto submetido para satisfação parcial dos requisitos do grau de*  
**MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS**

---

*Orientador: Professor Doutor Rui Manuel Meneses Carneiro de Barros*

*JULHO DE 2009*

## **MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2008/2009**

*DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL*

*Tel. +351-22-508 1901*

*Fax +351-22-508 1446*

✉ [mipec@fe.up.pt](mailto:mipec@fe.up.pt)

*Editado por*

*FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO*

*Rua Dr. Roberto Frias*

*4200-465 PORTO*

*Portugal*

*Tel. +351-22-508 1400*

*Fax +351-22-508 1440*

✉ [feup@fe.up.pt](mailto:feup@fe.up.pt)

🌐 <http://www.fe.up.pt>

*Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2008/2009 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2009.*

*As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respectivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.*

*Este documento foi produzido a partir de versão electrónica fornecida pelo respectivo Autor.*

Aos meus pais

*Wood is universally beautiful to man  
and the most humanly intimate of all  
(building) materials.*

*Frank Lloyd Wright*



## **AGRADECIMENTOS**

A realização deste projecto contou a vários níveis com a colaboração considerada indispensável de algumas pessoas, uns de forma directa, outros de forma indirecta, que muito contribuíram para o resultado final e a quem o autor não pode deixar de manifestar o seu profundo e sincero agradecimento.

- Ao Prof. Dr. Rui Manuel Menezes Carneiro de Barros, orientador científico, um especial obrigado pela inteira disponibilidade, orientação, partilha de conhecimentos e sugestões durante a realização do projecto, assim como o interesse e entusiasmo que sempre demonstrou na sua orientação. Fico grato também pela cedência de bibliografia de extrema importância.
- Ao Prof. Dr. José Manuel Marques Amorim de Araújo Faria pela bibliografia disponibilizada.
- Ao colega e amigo Luís Rodrigues, pela disponibilidade e ajuda importante prestada.
- Aos meus amigos e colegas da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, em especial ao Fernando Pinto, Gonçalo Correia e Nuno Ferreira, agradeço o apoio, a troca de ideias, os esclarecimentos, as sugestões e a companhia que tornaram a realização deste trabalho mais interessante.
- Aos meus irmãos, em especial ao Luís pela preocupação, ajuda e incentivo.
- Aos meus pais, o maior agradecimento pelo apoio incondicional em todos os momentos e pelo investimento na minha educação e felicidade.



## RESUMO

Actualmente em Portugal, o betão assume-se como o principal material utilizado nas estruturas resistentes das habitações, isto num país com recursos naturais capazes de fornecer outros tipos de materiais com características aplicáveis à construção mas que são subaproveitados. Encontramos o melhor exemplo desse desperdício na madeira.

Reconhecendo a crescente importância da madeira no mercado habitacional, compreendeu-se a necessidade de uma abordagem à sua concepção e dimensionamento. A formação de técnicos competentes e consciencialização da população dos benefícios que esta solução lhes pode trazer, deve ter como base o exemplo de países com tradição e conhecimento, os quais desenvolveram a aplicação do material proveniente das árvores na construção, tornando-a competitiva nos dias que correm.

Neste contexto, este projecto tem o compromisso de dar a entender o funcionamento das várias concepções alternativas existentes para a realização de casas em madeira, assim como esclarecer todas as suas vantagens e inconvenientes. Alerta-se também para as patologias e manutenção típicas de uma estrutura neste material de modo a garantir a longevidade da habitação.

Apresentam-se ainda várias considerações sobre as propriedades físicas e mecânicas da madeira, assim como, uma síntese do dimensionamento aplicado a este tipo de estruturas assente principalmente no Eurocódigo 5.

A aplicação prática das considerações efectuadas é realizada num estudo caso, que corresponde ao dimensionamento dos elementos estruturais de madeira de uma habitação com dois pisos sujeita a todas as cargas de aplicação regulamentar.

O projecto culmina com uma breve conclusão, na qual se discutem ilações tiradas acerca da utilização das estruturas de madeira em Portugal aplicadas em habitações, tal como uma reflexão sobre a metodologia de cálculo comparativamente com estruturas construídas noutros materiais.

**PALAVRAS-CHAVE:** madeira, casas, vantagens e inconvenientes, dimensionamento, estudo caso



## **ABSTRACT**

Nowadays in Portugal concrete is assumed as the main material used in the resistant structures. The country has natural resources capable of providing other types of materials with competent properties to be used in construction, however being underused. Timber is the best example of such a waste.

With the timber's growing importance on habitation market it has been understood the need for a design and project dimensioning approach. On the basis of capable technicians training and population education and awareness for this construction solution should be the example of countries with tradition and knowledge which have developed timber's usage and practice on housing construction as a competitive material.

Within this context, the present project intends to explain the different streams of wood housing design and clarifying all its advantages and disadvantages. In order to assure housing long living, typical pathologies and maintenance procedures of this type of material are also focused.

Several considerations on wood's physical and mechanical properties are presented on this thesis, as well as a summary of the structural design applied to this type of structures mainly based in Eurocode 5.

The practical implementation of the comments and ideas described is done through a case study regarding structural wood elements design of a two floor house considering all regulation code loads application.

The project finishes with a brief conclusion on the main ideas about the use of wooden structures/housing in Portugal and a reflection on calculation methodologies of these structures when compared to other materials.

**KEYWORDS:** wood, houses, advantages and disadvantages, design, case study



## ÍNDICE GERAL

|                      |     |
|----------------------|-----|
| AGRADECIMENTOS ..... | III |
| RESUMO .....         | V   |
| ABSTRACT .....       | VII |

## 1 INTRODUÇÃO .....

|  |   |
|--|---|
|  | 1 |
|--|---|

|                                                |   |
|------------------------------------------------|---|
| 1.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS .....                | 1 |
| 1.2. OBJECTIVOS DO TRABALHO .....              | 2 |
| 1.3. ORGANIZAÇÃO ESTRUTURAL DO RELATÓRIO ..... | 3 |

## 2 CONTEXTUALIZAÇÃO E ENQUADRAMENTO DAS ESTRUTURAS DE MADEIRA .....

|  |   |
|--|---|
|  | 5 |
|--|---|

|                                                                                       |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.1. VANTAGENS E INCONVENIENTES DAS ESTRUTURAS DE MADEIRA .....                       | 5  |
| 2.2. COMPARAÇÃO DE ESTRUTURAS E HABITAÇÕES DE MADEIRA, ALVENARIA E BETÃO ARMADO ..... | 8  |
| 2.3. PATOLOGIAS E MANUTENÇÃO .....                                                    | 10 |
| 2.3.1. AGENTES FÍSICOS E QUÍMICOS .....                                               | 10 |
| 2.3.1.1. Agentes atmosféricos .....                                                   | 10 |
| 2.3.1.2. Condições de carga .....                                                     | 10 |
| 2.3.1.3. Formação da árvore .....                                                     | 10 |
| 2.3.1.4. Agentes químicos .....                                                       | 11 |
| 2.3.1.5. Acção do fogo .....                                                          | 11 |
| 2.3.2. AGENTES BIOLÓGICOS .....                                                       | 11 |
| 2.3.2.1. Carunchos .....                                                              | 12 |
| 2.3.2.2. Fungos de podridão .....                                                     | 13 |
| 2.3.2.3. Térmitas .....                                                               | 13 |
| 2.3.3. MANUTENÇÃO DAS ESTRUTURAS DE MADEIRA .....                                     | 14 |
| 2.4. PROBLEMÁTICA DO FOGO NAS ESTRUTURAS DE MADEIRA .....                             | 15 |

## 3 CASAS DE MADEIRA .....

|  |    |
|--|----|
|  | 17 |
|--|----|

|                               |    |
|-------------------------------|----|
| 3.1. CONCEPÇÃO .....          | 17 |
| 3.1.1. CASAS DE TRONCOS ..... | 17 |

|                                                                                                    |           |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.1.1.1. Fundações.....                                                                            | 19        |
| 3.1.1.2. Paredes .....                                                                             | 23        |
| 3.1.1.3. Divisórias .....                                                                          | 31        |
| 3.1.1.4. Pisos.....                                                                                | 32        |
| 3.1.1.5. Coberturas.....                                                                           | 33        |
| 3.1.2. CASAS DE ESTRUTURA PESADA (HEAVY FRAMING).....                                              | 36        |
| 3.1.2.1. Fundações.....                                                                            | 38        |
| 3.1.2.2. Sistema de Pórticos.....                                                                  | 38        |
| 3.1.2.3. Sistema contraventado com diagonais semelhante à gaiola pombalina .....                   | 41        |
| 3.1.2.4. Pavimentos.....                                                                           | 42        |
| 3.1.2.5. Coberturas.....                                                                           | 43        |
| 3.1.3. CASAS DE ESTRUTURA LIGEIRA (LIGHT FRAMING) .....                                            | 44        |
| 3.1.3.1. Fundações.....                                                                            | 47        |
| 3.1.3.2. Pavimentos.....                                                                           | 49        |
| 3.1.3.3. Paredes .....                                                                             | 50        |
| 3.1.3.4. Telhado.....                                                                              | 52        |
| <b>3.2. DIMENSIONAMENTO .....</b>                                                                  | <b>53</b> |
| 3.2.1. PROPRIEDADES FÍSICAS DA MADEIRA.....                                                        | 53        |
| 3.2.1.1. Peso volúmico .....                                                                       | 53        |
| 3.2.1.2. Água na madeira .....                                                                     | 54        |
| 3.2.1.3. Humidade .....                                                                            | 55        |
| 3.2.1.4. Densidade .....                                                                           | 55        |
| 3.2.1.5. Retractibilidade.....                                                                     | 55        |
| 3.2.1.6. Módulo de elasticidade.....                                                               | 56        |
| 3.2.2. PROPRIEDADES MECÂNICAS DA MADEIRA.....                                                      | 56        |
| 3.2.2.1. Duração das acções.....                                                                   | 57        |
| 3.2.2.2. Classes de serviço .....                                                                  | 57        |
| 3.2.2.3. Influência da duração da acção e da classe de serviço na resistência, $K_{mod}$ .....     | 57        |
| 3.2.2.4. Influência da duração da acção e da classe de serviço na deformabilidade, $k_{def}$ ..... | 58        |
| 3.2.2.5. Influência da secção da peça, $k_h$ .....                                                 | 58        |
| 3.2.3. ESTADOS LIMITES ÚLTIMOS .....                                                               | 59        |
| 3.2.3.1. Modelos de cálculo.....                                                                   | 59        |
| 3.2.3.2. Valores de cálculo das propriedades dos materiais, $X_d$ .....                            | 60        |
| 3.2.3.3. Flexão.....                                                                               | 60        |
| 3.2.3.4. Corte.....                                                                                | 63        |

|                                                                                              |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.2.3.5. Torção .....                                                                        | 64 |
| 3.2.3.6. Tração (paralela às fibras) .....                                                   | 64 |
| 3.2.3.7. Compressão perpendicular às fibras .....                                            | 64 |
| 3.2.3.8. Compressão paralela às fibras (com ou sem flexão).....                              | 65 |
| 3.2.4. ESTADOS LIMITES DE UTILIZAÇÃO.....                                                    | 66 |
| 3.2.4.1. Influência da duração da carga e da humidade.....                                   | 66 |
| 3.2.4.2. Influência da deformabilidade das ligações .....                                    | 67 |
| 3.2.4.3. Limitação das deformações .....                                                     | 67 |
| 3.2.4.4. Limitação das deformações – combinação de acções .....                              | 68 |
| 3.2.4.5. Limitação das vibrações.....                                                        | 69 |
| 3.2.5. LIGAÇÕES NAS ESTRUTURAS DE MADEIRA.....                                               | 70 |
| 3.2.5.1. Capacidade de transporte de carga lateral dos ligadores metálicos tipo cavilha..... | 72 |
| 3.2.5.2. Ligações com pregos .....                                                           | 75 |
| 3.2.5.3. Ligações com parafusos de porca .....                                               | 81 |
| 3.2.5.4. Ligações com cavilhas de aço .....                                                  | 83 |
| 3.2.5.5. Ligações com parafusos de enroscar .....                                            | 83 |

|                                                              |           |
|--------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>4 CASO DE ESTUDO, ESTRUTURA RESISTENTE E ACÇÕES .....</b> | <b>87</b> |
| <b>4.1. PROGRAMA DE ARQUITECTURA .....</b>                   | <b>87</b> |
| <b>4.2. DEFINIÇÃO DOS MATERIAIS .....</b>                    | <b>91</b> |
| 4.2.1. MATERIAL ESTRUTURAL.....                              | 91        |
| 4.2.2. PAVIMENTOS .....                                      | 92        |
| 4.2.3. PAREDES EXTERIORES .....                              | 92        |
| 5.2.3.PAREDES INTERIORES .....                               | 93        |
| 5.2.4.COBERTURAS .....                                       | 94        |
| <b>4.3. DEFINIÇÕES ESTRUTURAIS E REGULAMENTARES .....</b>    | <b>94</b> |
| 4.3.1. SOLUÇÃO ESTRUTURAL .....                              | 94        |
| 4.3.2. DISPOSIÇÕES REGULAMENTARES.....                       | 94        |
| <b>4.4. DEFINIÇÃO DAS ACÇÕES .....</b>                       | <b>95</b> |
| 4.4.1. ACÇÕES PERMANENTES .....                              | 95        |
| 4.4.2. ACÇÕES VARIÁVEIS.....                                 | 96        |
| 4.4.2.1. Sobrecargas de utilização.....                      | 96        |
| 4.4.2.2. Acção do vento.....                                 | 96        |
| 4.4.2.3. Acção dos sismos .....                              | 97        |

|                                  |    |
|----------------------------------|----|
| 4.4.3. COMBINAÇÃO DE ACÇÕES..... | 97 |
|----------------------------------|----|

## 5 DIMENSIONAMENTO DO CASO DE ESTUDO ..... 99

### 5.1. MÉTODO DE CÁLCULO UTILIZADO ..... 99

### 5.2. DIMENSIONAMENTO E VERIFICAÇÃO DE SEGURANÇA ..... 104

#### 5.2.1. DIMENSIONAMENTO E VERIFICAÇÃO DOS PAVIMENTOS..... 104

##### 5.2.1.1. Pavimentos com vão de 4,50 metros em madeira de castanho ..... 105

##### 5.2.1.2. Pavimentos com vão de 2,90 metros em madeira de castanho ..... 107

##### 5.2.1.3. Pavimentos com vão de 2,30 metros em madeira de castanho ..... 110

##### 5.2.1.4. Pavimentos com vão de 2,15 metros em madeira de castanho ..... 112

##### 5.2.1.5. Pavimentos da zona não habitável do sótão com vão máximo de 4,50 metros..... 115

#### 5.2.2. DIMENSIONAMENTO E VERIFICAÇÃO DA ESTRUTURA PRINCIPAL ..... 116

##### 5.2.2.1. Pilares principais ..... 118

##### 5.2.2.2. Vigas principais do primeiro e segundo piso (sótão) ..... 122

##### 5.2.2.3. Elementos dos mirantes da cobertura..... 148

##### 5.2.2.4. Madres e pernas da cobertura ..... 157

##### 5.2.2.5. Elementos secundários das asnas..... 168

##### 5.2.2.6. Contraventamentos ..... 171

#### 5.2.3. LIGAÇÕES..... 172

##### 5.2.3.1. Ligações das vigotas dos pavimentos às vigas de descarregamento ..... 172

##### 5.2.3.2. Ligação dos pilares à base ( $20 \times 20 \text{ cm}^2$ e $24 \times 26 \text{ cm}^2$ ) ..... 173

##### 5.2.3.3. Ligações das vigas horizontais ..... 174

##### 5.2.3.4. Ligações principais da cobertura..... 175

## 6 CONCLUSÕES ..... 179

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... 181

## 8 BIBLIOGRAFIA ..... 185

## ÍNDICE DE FIGURAS

|                                                                                                         |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <i>Fig.2.1 – Carunchos</i> .....                                                                        | 13 |
| <i>Fig.2.2 – Fungos de podridão</i> .....                                                               | 13 |
| <i>Fig.2.3 – Madeira atacada por térmitas</i> .....                                                     | 14 |
| <i>Fig.3.1 - Evolução dos primeiros abrigos em madeira</i> .....                                        | 17 |
| <i>Fig.3.2 – Modelo estrutural das habitações de troncos</i> .....                                      | 18 |
| <i>Fig.3.3 – Típica construção de habitações de troncos em Portugal</i> .....                           | 18 |
| <i>Fig.3.4 - Solução sem câmara de ventilação com laje em betão</i> .....                               | 19 |
| <i>Fig.3.5 - Solução com câmara-de-ar</i> .....                                                         | 20 |
| <i>Fig.3.6 - Solução com câmara-de-ar com recorte nas vigas de pavimento</i> .....                      | 21 |
| <i>Fig.3.7 - Solução com câmara-de-ar com as vigas a descarregar na face lateral do muro</i> .....      | 21 |
| <i>Fig.3.8 - Solução com câmara-de-ar com as vigas apoiadas em toda a largura do muro de suporte</i> .. | 22 |
| <i>Fig.3.9 – Modos de fixação da parede de troncos ao muro de arranque</i> .....                        | 22 |
| <i>Fig.3.10 – Diferentes secções e ligações das peças constituintes das paredes</i> .....               | 23 |
| <i>Fig.3.11 – Isolantes nos encaixes das peças constituintes das paredes</i> .....                      | 24 |
| <i>Fig.3.12 – Parede com ligadores de madeira tipo cavilha</i> .....                                    | 24 |
| <i>Fig.3.13 – Aberturas de grande desenvolvimento no meio de uma parede</i> .....                       | 25 |
| <i>Fig.3.14 - Aberturas de grande desenvolvimento entre a parede e a fundação</i> .....                 | 26 |
| <i>Fig.3.15 – Fixação das peças remate das paredes</i> .....                                            | 27 |
| <i>Fig.3.16 – Ligações de paredes mais comuns</i> .....                                                 | 27 |
| <i>Fig.3.17 – ligações entre paredes com isolante</i> .....                                             | 27 |
| <i>Fig.3.18 – Ligações menos comuns</i> .....                                                           | 28 |
| <i>Fig.3.19 – Tirantes metálicos para paredes</i> .....                                                 | 28 |
| <i>Fig.3.20 – Pré-corte nas peças para as aberturas</i> .....                                           | 29 |
| <i>Fig.3.21 – Pormenorização dos pré-aros</i> .....                                                     | 30 |
| <i>Fig.3.22 – Paredes de troncos com isolamento extra</i> .....                                         | 30 |
| <i>Fig.3.23 – Instalações eléctricas nas paredes de troncos</i> .....                                   | 31 |
| <i>Fig.3.24 – Paredes divisórias</i> .....                                                              | 31 |
| <i>Fig.3.25 – Ligação entre divisórias e tecto</i> .....                                                | 32 |
| <i>Fig.3.26 – Ligação entre divisórias e paredes principais</i> .....                                   | 32 |
| <i>Fig.3.27 – pavimento e ligação às paredes</i> .....                                                  | 33 |
| <i>Fig.3.28 – Cobertura realizada através da elevação das paredes extremas</i> .....                    | 34 |

|                                                                                          |           |
|------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <i>Fig.3.29 – Ligação das varas sobre a fileira.....</i>                                 | <i>34</i> |
| <i>Fig.3.30 – Ligação das varas à parede exterior.....</i>                               | <i>35</i> |
| <i>Fig.3.31 – Remate das varas sobre as paredes exteriores.....</i>                      | <i>35</i> |
| <i>Fig.3.32 – Asna pré-fabricada.....</i>                                                | <i>36</i> |
| <i>Fig.3.33 – sistema de pórticos.....</i>                                               | <i>37</i> |
| <i>Fig.3.34 – Sistema contraventado com diagonais semelhante à gaiola pombalina.....</i> | <i>37</i> |
| <i>Fig.3.35 – Pavimento do rés-do-chão no sistema de pórticos.....</i>                   | <i>39</i> |
| <i>Fig.3.36 – Ligações entre vigotas e dormentes.....</i>                                | <i>39</i> |
| <i>Fig.3.37 – Ligações entre pilares e dormentes e dimensões características.....</i>    | <i>40</i> |
| <i>Fig.3.38 – Montagem do sistema de pórticos.....</i>                                   | <i>40</i> |
| <i>Fig.3.39 – Detalhe do sistema contraventado com diagonais.....</i>                    | <i>41</i> |
| <i>Fig.3.40 – Pormenorização da ligação entre pavimento e paredes.....</i>               | <i>42</i> |
| <i>Fig.3.41 - Pavimentos.....</i>                                                        | <i>42</i> |
| <i>Fig.3.42 – Ligação entre pernas e dimensões características.....</i>                  | <i>43</i> |
| <i>Fig.3.43 – Ligação entre pernas e travessa.....</i>                                   | <i>43</i> |
| <i>Fig.3.44 – Ligação entre pernas e estribos e dimensões características.....</i>       | <i>44</i> |
| <i>Fig.3.45 – Sistema tipo balão.....</i>                                                | <i>45</i> |
| <i>Fig.3.46 – Sistema tipo plataforma.....</i>                                           | <i>46</i> |
| <i>Fig.3.47 – Resposta do sistema estrutural ligeiro à acção do vento.....</i>           | <i>47</i> |
| <i>Fig.3.48 – Fundações em madeira – solução 1.....</i>                                  | <i>48</i> |
| <i>Fig.3.49 - Fundações em madeira – solução 2.....</i>                                  | <i>48</i> |
| <i>Fig.3.50 – Fundação em madeira para cave.....</i>                                     | <i>49</i> |
| <i>Fig.3.51 – pavimentos das estruturas ligeiras.....</i>                                | <i>50</i> |
| <i>Fig.3.52 – Paredes das estruturas ligeiras.....</i>                                   | <i>51</i> |
| <i>Fig.3.53 – Paredes montadas no terreno.....</i>                                       | <i>51</i> |
| <i>Fig.3.54 – Paredes montadas no terreno em módulos.....</i>                            | <i>52</i> |
| <i>Fig.3.55 – Cobertura das estruturas ligeiras.....</i>                                 | <i>52</i> |
| <i>Fig.3.56 – Exemplo de curvas de retracção.....</i>                                    | <i>56</i> |
| <i>Fig.3.57 – Definição dos eixos duma barra de madeira.....</i>                         | <i>60</i> |
| <i>Fig.3.58 – Instabilidade por bambeamento.....</i>                                     | <i>61</i> |
| <i>Fig.3.59 – Componentes da tensão no esforço de corte.....</i>                         | <i>63</i> |
| <i>Fig.3.60 – Esforço de corte junto aos apoios.....</i>                                 | <i>63</i> |
| <i>Fig.3.61 – Compressão perpendicular às fibras.....</i>                                | <i>64</i> |

|                                                                                                       |            |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <i>Fig.3.62 – Componentes da flecha de uma barra simplesmente apoiada .....</i>                       | <i>68</i>  |
| <i>Fig.3.63 – Limitação das vibrações – relação entre a e b .....</i>                                 | <i>70</i>  |
| <i>Fig.3.64 – Forças inclinadas transmitidas por uma ligação .....</i>                                | <i>72</i>  |
| <i>Fig.3.65 – Modos de ruptura para ligações madeira - madeira .....</i>                              | <i>73</i>  |
| <i>Fig.3.66 - Modos de ruptura para ligações aço - madeira .....</i>                                  | <i>75</i>  |
| <i>Fig.3.67 – Definição de <math>t_1</math> e <math>t_2</math> para o corte simples e duplo .....</i> | <i>75</i>  |
| <i>Fig.3.68 – Sobreposição de pregos .....</i>                                                        | <i>76</i>  |
| <i>Fig.3.69 – Pregos desalinhados na direcção perpendicular à das fibras .....</i>                    | <i>77</i>  |
| <i>Fig.3.70 – Definição dos diferentes espaçamentos interiores e exteriores .....</i>                 | <i>79</i>  |
| <i>Fig.3.71 – Pregos colocados perpendicularmente às fibras e inclinados .....</i>                    | <i>80</i>  |
| <i>Fig.4.1 - Planta do rés-do-chão.....</i>                                                           | <i>88</i>  |
| <i>Fig.4.2 - Planta do primeiro piso .....</i>                                                        | <i>88</i>  |
| <i>Fig.4.3 - Planta do sótão .....</i>                                                                | <i>89</i>  |
| <i>Fig.4.4 - Vista geral de frente .....</i>                                                          | <i>89</i>  |
| <i>Fig.4.5 - Vista geral das traseiras.....</i>                                                       | <i>90</i>  |
| <i>Fig.4.6 - Alçado Oeste.....</i>                                                                    | <i>90</i>  |
| <i>Fig.4.7 - Alçado Este .....</i>                                                                    | <i>90</i>  |
| <i>Fig.4.8 - Alçado Sul .....</i>                                                                     | <i>91</i>  |
| <i>Fig.4.9 - Alçado Norte .....</i>                                                                   | <i>91</i>  |
| <i>Fig.5.1 – Modelação com ligações rígidas (vista geral).....</i>                                    | <i>100</i> |
| <i>Fig.5.2 - Modelação com ligações rígidas (vista lateral) .....</i>                                 | <i>100</i> |
| <i>Fig.5.3 - Modelação com ligações rígidas (vista frontal).....</i>                                  | <i>101</i> |
| <i>Fig.5.4 – Modelação com contraventamentos (vista geral) .....</i>                                  | <i>101</i> |
| <i>Fig.5.5 - Modelação com contraventamentos (vista lateral) .....</i>                                | <i>102</i> |
| <i>Fig.5.6 - Modelação com contraventamentos (vista frontal) .....</i>                                | <i>102</i> |
| <i>Fig.5.7 – Orientação das vigotas dos pavimentos do rés-do-chão.....</i>                            | <i>103</i> |
| <i>Fig.5.8 - Orientação das vigotas dos pavimentos do primeiro piso .....</i>                         | <i>103</i> |
| <i>Fig.5.9 - Orientação das vigotas dos pavimentos do sótão e zona não habitável.....</i>             | <i>104</i> |
| <i>Fig.5.10 – Planta dos pilares principais .....</i>                                                 | <i>118</i> |
| <i>Fig.5.11 – Planta das vigas do primeiro piso .....</i>                                             | <i>123</i> |
| <i>Fig.5.12 – Planta das vigas do piso do sótão .....</i>                                             | <i>123</i> |
| <i>Fig.5.13 – Mirantes da cobertura .....</i>                                                         | <i>148</i> |
| <i>Fig.5.14 – Planta das madres e pernas da cobertura .....</i>                                       | <i>157</i> |

|                                                                                 |            |
|---------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <i>Fig.5.15 – Vista das asnas principais .....</i>                              | <i>168</i> |
| <i>Fig.5.16 – Vista das semi-asnas .....</i>                                    | <i>168</i> |
| <i>Fig.5.17 – Contraventamentos .....</i>                                       | <i>171</i> |
| <i>Fig.5.18 – Ligador metálico para vigotas HU210-2 .....</i>                   | <i>172</i> |
| <i>Fig.5.19 – Ligador metálico para vigotas SAE380/64 .....</i>                 | <i>173</i> |
| <i>Fig.5.20 – Ligador metálico base .....</i>                                   | <i>173</i> |
| <i>Fig.5.21 – Ligação pilares com vigas transversais.....</i>                   | <i>174</i> |
| <i>Fig.5.22 – Ligação vigas longitudinais - vigas transversais .....</i>        | <i>174</i> |
| <i>Fig.5.23 – Ligação pernas das semi-asnas à fileira .....</i>                 | <i>175</i> |
| <i>Fig.5.24 – Ligação pernas ás vigas de apoio.....</i>                         | <i>176</i> |
| <i>Fig.5.25 – <math>l_{ef}</math> para o determinar secção do pendural.....</i> | <i>176</i> |

## ÍNDICE DE QUADROS

|                                                                                                     |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Quadro 2.1 – Vantagens e desvantagens das estruturas de madeira.....                                | 7  |
| Quadro 2.2 – Comparação das características da madeira maciça de outros materiais estruturais ..... | 8  |
| Quadro 2.3 – Comparação entre alguns sistemas construtivos .....                                    | 9  |
| Quadro 3.1 – Classes de resistência e valores característicos .....                                 | 54 |
| Quadro 3.2 - Comparação das tensões médias admissíveis em kPa .....                                 | 56 |
| Quadro 3.3 - Classes de duração das acções, EC5.....                                                | 57 |
| Quadro 3.4 - Classes de serviço, EC5.....                                                           | 57 |
| Quadro 3.5 - Factor de modificação ( $k_{mod}$ ), EC5.....                                          | 58 |
| Quadro 3.6 - Factor de modificação ( $k_{del}$ ), EC5 .....                                         | 58 |
| Quadro 3.7 - Factores parciais ( $\gamma_m$ ), EC5.....                                             | 60 |
| Quadro 3.8 – Comprimento efectivo das barras – $l_{ef}$ .....                                       | 61 |
| Quadro 3.9 - Comprimento efectivo das barras definido por $m$ .....                                 | 62 |
| Quadro 3.10 – Influência da deformabilidade das ligações .....                                      | 67 |
| Quadro 3.11 – Valores limite das flechas .....                                                      | 68 |
| Quadro 3.12 – Valores para $k_{ef}$ .....                                                           | 77 |
| Quadro 3.13 – Espaçamentos e distâncias mínimas para pregos .....                                   | 78 |
| Quadro 3.14 - Espaçamentos e distâncias mínimas para parafusos de porca .....                       | 82 |
| Quadro 3.15 - Espaçamentos e distâncias mínimas para cavilhas de aço .....                          | 83 |
| Quadro 3.16 - Espaçamentos e distâncias mínimas para parafusos de enroscar .....                    | 84 |
| Quadro 4.1 - Madeiras tipicamente usadas em Portugal e suas a características.....                  | 92 |
| Quadro 4.2 - Lamelados colados e características.....                                               | 92 |
| Quadro 4.3 - Materiais usados nos pavimentos.....                                                   | 92 |
| Quadro 4.4 - Soluções para paredes exteriores .....                                                 | 93 |
| Quadro 4.5 - Soluções para paredes interiores .....                                                 | 93 |
| Quadro 4.6 - Características da cobertura tradicional adoptada .....                                | 94 |
| Quadro 4.7 - Pesos próprios correspondentes às acções permanentes.....                              | 95 |
| Quadro 4.8 - Pesos próprios dos pavimentos.....                                                     | 95 |
| Quadro 4.9 - Sobrecargas regulamentares aplicadas .....                                             | 96 |
| Quadro 4.10 - Coeficientes de pressão dinâmica na cobertura.....                                    | 96 |
| Quadro 4.11 - Coeficientes parciais .....                                                           | 97 |
| Quadro 4.12 - Coeficientes $\psi$ .....                                                             | 97 |

|                                                                                                           |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Quadro 5.1 – Propriedades da madeira de castanho .....                                                    | 104 |
| Quadro 5.2 – Definições para o pavimento com vão de 4,50 m .....                                          | 105 |
| Quadro 5.3 – Esforços para ELU nas vigotas com vão de 4,50 m. ....                                        | 105 |
| Quadro 5.4 – Rigidez do pavimento com vão de 4,50 m .....                                                 | 107 |
| Quadro 5.5 – Definições para o pavimento com vão de 2,90 m .....                                          | 107 |
| Quadro 5.6 – Esforços para ELU nas vigotas com vão de 2,90 m. ....                                        | 108 |
| Quadro 5.7 – Rigidez do pavimento com vão de 2,90 m .....                                                 | 109 |
| Quadro 5.8 – Definições para o pavimento com vão de 2,30 m .....                                          | 110 |
| Quadro 5.9 – Esforços para ELU nas vigotas com vão de 2,30 m. ....                                        | 110 |
| Quadro 5.10 – Rigidez do pavimento com vão de 2,30 m .....                                                | 111 |
| Quadro 5.11 – Definições para o pavimento com vão de 2,15 m .....                                         | 112 |
| Quadro 5.12 – Esforços para ELU nas vigotas com vão de 2,15 m. ....                                       | 112 |
| Quadro 5.13 – Rigidez do pavimento com vão de 2,15 m .....                                                | 114 |
| Quadro 5.14 – Definições para os pavimentos da zona não habitável.....                                    | 115 |
| Quadro 5.15 – Esforços para ELU nas vigotas dos pavimentos da zona não habitável. ....                    | 115 |
| Quadro 5.16 – Propriedades do GL24h .....                                                                 | 117 |
| Quadro 5.17 – Forças internas mais condicionantes para os pilares 24x26 cm <sup>2</sup> .....             | 118 |
| Quadro 5.18 – Tensões criadas pelos esforços para os pilares 24x26 cm <sup>2</sup> .....                  | 119 |
| Quadro 5.19 – Factores e parâmetros considerados para os pilares de 24 x26 cm2 .....                      | 119 |
| Quadro 5.20 – Forças internas mais condicionantes para os pilares 20x20 cm2.....                          | 121 |
| Quadro 5.21 – Tensões criadas pelos esforços para os pilares 20x20 cm <sup>2</sup> .....                  | 121 |
| Quadro 5.22 – Factores e parâmetros considerados para os pilares de 20 x20 cm <sup>2</sup> .....          | 121 |
| Quadro 5.23 – Forças internas mais condicionantes para as vigas 20x32 cm <sup>2</sup> e l =5,50 m .....   | 124 |
| Quadro 5.24 – Tensões criadas pelos esforços para os as vigas 20x32 cm <sup>2</sup> e l =5,50 m .....     | 124 |
| Quadro 5.25 – Factores e parâmetros considerados para os as vigas 20x32 cm <sup>2</sup> e l =5,50 m ..... | 124 |
| Quadro 5.26 – Forças internas mais condicionantes para as vigas 20x37 cm <sup>2</sup> e l =5,50 m .....   | 125 |
| Quadro 5.27 – Tensões criadas pelos esforços para os as vigas 20x37 cm <sup>2</sup> e l =5,50 m .....     | 126 |
| Quadro 5.28 – Factores e parâmetros considerados para as vigas 20x37 cm <sup>2</sup> e l =5,50 m .....    | 126 |
| Quadro 5.29 – Forças internas mais condicionantes para as vigas 15x20 cm <sup>2</sup> e l =4,70 m .....   | 127 |
| Quadro 5.30 – Tensões criadas pelos esforços para as vigas 15x20 cm <sup>2</sup> e l =4,70 m .....        | 127 |
| Quadro 5.31 – Factores e parâmetros considerados para as vigas 15x20 cm <sup>2</sup> e l =4,70 m .....    | 128 |
| Quadro 5.32 – Forças internas mais condicionantes para as vigas 15x25 cm <sup>2</sup> e l =4,70 m .....   | 129 |
| Quadro 5.33 – Tensões criadas pelos esforços para as vigas 15x25 cm <sup>2</sup> e l =4,70 m .....        | 129 |

|                                                                                                        |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Quadro 5.34 – Factores e parâmetros considerados para as vigas 15x25 cm <sup>2</sup> e l =4,70 m.....  | 129 |
| Quadro 5.35 – Forças internas mais condicionantes para as vigas 15x20 cm <sup>2</sup> e l =2,30 m..... | 130 |
| Quadro 5.36 – Tensões criadas pelos esforços para as vigas 15x20 cm <sup>2</sup> e l =2,30 m.....      | 131 |
| Quadro 5.37 – Factores e parâmetros considerados para as vigas 15x20 cm <sup>2</sup> e l =2,30 m.....  | 131 |
| Quadro 5.38 – Forças internas mais condicionantes para as vigas 15x20 cm <sup>2</sup> e l =3,00 m..... | 132 |
| Quadro 5.39 – Tensões criadas pelos esforços para as vigas 15x20 cm <sup>2</sup> e l =3,00 m.....      | 132 |
| Quadro 5.40 – Factores e parâmetros considerados para as vigas 15x20 cm <sup>2</sup> e l =3,00 m.....  | 133 |
| Quadro 5.41 – Forças internas mais condicionantes para as vigas 12x15 cm <sup>2</sup> e l =4,70 m..... | 134 |
| Quadro 5.42 – Tensões criadas pelos esforços para as vigas 15x25 cm <sup>2</sup> e l =2,50 m.....      | 134 |
| Quadro 5.43 – Factores e parâmetros considerados para as vigas 12x15 cm <sup>2</sup> e l =4,70 m.....  | 134 |
| Quadro 5.44 – Forças internas mais condicionantes para as vigas 10x15 cm <sup>2</sup> e l =2,30 m..... | 135 |
| Quadro 5.45 – Tensões criadas pelos esforços para as vigas 10x15 cm <sup>2</sup> e l =2,30 m.....      | 136 |
| Quadro 5.46 – Factores e parâmetros considerados para as vigas 10x15 cm <sup>2</sup> e l =2,30 m.....  | 136 |
| Quadro 5.47 – Forças internas mais condicionantes para as vigas 10x15 cm <sup>2</sup> e l =3,0 m.....  | 137 |
| Quadro 5.48 – Tensões criadas pelos esforços para as vigas 10x15 cm <sup>2</sup> e l =3,0 m.....       | 137 |
| Quadro 5.49 – Factores e parâmetros considerados para as vigas 10x15 cm <sup>2</sup> e l =3,0 m.....   | 138 |
| Quadro 5.50 – Forças internas mais condicionantes para as vigas 15x25 cm <sup>2</sup> e l =5,50 m..... | 139 |
| Quadro 5.51 – Tensões criadas pelos esforços para as vigas 15x25 cm <sup>2</sup> e l =5,50 m.....      | 139 |
| Quadro 5.52 – Factores e parâmetros considerados para as vigas 15x25 cm <sup>2</sup> e l =5,50 m.....  | 139 |
| Quadro 5.53 – Forças internas mais condicionantes para as vigas 15x30 cm <sup>2</sup> e l =0,70 m..... | 141 |
| Quadro 5.54 – Tensões criadas pelos esforços para as vigas 15x30 cm <sup>2</sup> e l =0,70 m.....      | 141 |
| Quadro 5.55 – Factores e parâmetros considerados para as vigas 15x30 cm <sup>2</sup> e l =0,70 m.....  | 141 |
| Quadro 5.56 – Forças internas mais condicionantes para as vigas 10x15 cm <sup>2</sup> e l =4,70 m..... | 142 |
| Quadro 5.57 – Tensões criadas pelos esforços para as vigas 10x15 cm <sup>2</sup> e l =4,70 m.....      | 143 |
| Quadro 5.58 – Factores e parâmetros considerados para as vigas 10x15 cm <sup>2</sup> e l =4,70 m.....  | 143 |
| Quadro 5.59 – Forças internas mais condicionantes para as vigas 12x15 cm <sup>2</sup> e l =1,00 m..... | 144 |
| Quadro 5.60 – Tensões criadas pelos esforços para as vigas 12x15 cm <sup>2</sup> e l =1,00 m.....      | 144 |
| Quadro 5.61 – Factores e parâmetros considerados para as vigas 12x15 cm <sup>2</sup> e l =1,00 m.....  | 145 |
| Quadro 5.62 – Forças internas mais condicionantes para as vigas 12x15 cm <sup>2</sup> e l =1,67 m..... | 146 |
| Quadro 5.63 – Tensões criadas pelos esforços para as vigas 12x15 cm <sup>2</sup> e l =1,67 m.....      | 146 |
| Quadro 5.64 – Factores e parâmetros considerados para as vigas 12x15 cm <sup>2</sup> e l =1,67 m.....  | 146 |
| Quadro 5.65 – Forças internas mais condicionantes para as vigas 10x12 cm <sup>2</sup> e l =3,90 m..... | 148 |
| Quadro 5.66 – Tensões criadas pelos esforços para as vigas 10x12 cm <sup>2</sup> e l =3,90 m.....      | 149 |

|                                                                                                                           |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Quadro 5.67 – Factores e parâmetros considerados para as vigas $10 \times 12 \text{ cm}^2$ e $l = 3,90 \text{ m}$ .....   | 149 |
| Quadro 5.68 – Forças internas mais condicionantes para os pilares $12 \times 12 \text{ cm}^2$ .....                       | 150 |
| Quadro 5.69 – Tensões criadas pelos esforços para os pilares $12 \times 12 \text{ cm}^2$ .....                            | 150 |
| Quadro 5.70 – Factores e parâmetros considerados para os pilares de $24 \times 26 \text{ cm}^2$ .....                     | 151 |
| Quadro 5.71 – Forças internas mais condicionantes para as vigas $10 \times 15 \text{ cm}^2$ e $l = 2,50 \text{ m}$ .....  | 152 |
| Quadro 5.72 – Tensões criadas pelos esforços para as vigas $10 \times 15 \text{ cm}^2$ e $l = 2,50 \text{ m}$ .....       | 152 |
| Quadro 5.73 – Factores e parâmetros considerados para as vigas $10 \times 15 \text{ cm}^2$ e $l = 2,50 \text{ m}$ .....   | 152 |
| Quadro 5.74 – Forças internas mais condicionantes para as vigas $8 \times 10 \text{ cm}^2$ e $l = 2,50 \text{ m}$ .....   | 154 |
| Quadro 5.75 – Tensões criadas pelos esforços para as vigas $8 \times 10 \text{ cm}^2$ e $l = 2,50 \text{ m}$ .....        | 154 |
| Quadro 5.76 – Factores e parâmetros considerados para as vigas $8 \times 10 \text{ cm}^2$ e $l = 2,50 \text{ m}$ .....    | 154 |
| Quadro 5.77 – Forças internas mais condicionantes para as vigas $12 \times 15 \text{ cm}^2$ e $l = 4,25 \text{ m}$ .....  | 155 |
| Quadro 5.78 – Tensões criadas pelos esforços para as vigas $12 \times 15 \text{ cm}^2$ e $l = 4,25 \text{ m}$ .....       | 156 |
| Quadro 5.79 – Factores e parâmetros considerados para as vigas $12 \times 15 \text{ cm}^2$ e $l = 4,25 \text{ m}$ .....   | 156 |
| Quadro 5.80 – Forças internas mais condicionantes para as madres $15 \times 23 \text{ cm}^2$ e $l = 5,25 \text{ m}$ ..... | 158 |
| Quadro 5.81 – Tensões criadas pelos esforços para as madres $15 \times 23 \text{ cm}^2$ e $l = 5,25 \text{ m}$ .....      | 158 |
| Quadro 5.82 – Factores e parâmetros considerados para as madres $15 \times 23 \text{ cm}^2$ e $l = 5,25 \text{ m}$ .....  | 158 |
| Quadro 5.83 – Forças internas mais condicionantes para as madres $11 \times 17 \text{ cm}^2$ e $l = 3,50 \text{ m}$ ..... | 159 |
| Quadro 5.84 – Tensões criadas pelos esforços para as madres $11 \times 17 \text{ cm}^2$ e $l = 3,50 \text{ m}$ .....      | 160 |
| Quadro 5.85 – Factores e parâmetros considerados para as madres $11 \times 17 \text{ cm}^2$ e $l = 3,50 \text{ m}$ .....  | 160 |
| Quadro 5.86 – Forças internas mais condicionantes para as madres $15 \times 23 \text{ cm}^2$ e $l = 3,38 \text{ m}$ ..... | 161 |
| Quadro 5.87 – Tensões criadas pelos esforços para as madres $15 \times 23 \text{ cm}^2$ e $l = 3,38 \text{ m}$ .....      | 161 |
| Quadro 5.88 – Factores e parâmetros considerados para as madres $15 \times 23 \text{ cm}^2$ e $l = 3,38 \text{ m}$ .....  | 162 |
| Quadro 5.89 – Forças internas mais condicionantes para as pernas $15 \times 25 \text{ cm}^2$ e $l = 5,26 \text{ m}$ ..... | 163 |
| Quadro 5.90 – Tensões criadas pelos esforços para as pernas $15 \times 25 \text{ cm}^2$ e $l = 5,26 \text{ m}$ .....      | 163 |
| Quadro 5.91 – Factores e parâmetros considerados para as pernas $15 \times 25 \text{ cm}^2$ e $l = 5,26 \text{ m}$ .....  | 163 |
| Quadro 5.92 – Forças internas mais condicionantes para as madres $12 \times 15 \text{ cm}^2$ e $l = 1,96 \text{ m}$ ..... | 165 |
| Quadro 5.93 – Tensões criadas pelos esforços para as madres $12 \times 15 \text{ cm}^2$ e $l = 1,96 \text{ m}$ .....      | 165 |
| Quadro 5.94 – Factores e parâmetros considerados para as madres $12 \times 15 \text{ cm}^2$ e $l = 1,96 \text{ m}$ .....  | 165 |
| Quadro 5.95 – Forças internas mais condicionantes para a cumeeira $10 \times 15 \text{ cm}^2$ e $l = 3,0 \text{ m}$ ..... | 166 |
| Quadro 5.96 – Tensões criadas pelos esforços para a cumeeira $10 \times 15 \text{ cm}^2$ e $l = 3,0 \text{ m}$ .....      | 167 |
| Quadro 5.97 – Factores e parâmetros considerados para a cumeeira $10 \times 15 \text{ cm}^2$ e $l = 3,0 \text{ m}$ .....  | 167 |
| Quadro 5.98 – Forças internas mais condicionantes para os elementos verticais $8 \times 10 \text{ cm}^2$ .....            | 169 |
| Quadro 5.99 – Tensões criadas pelos esforços para os elementos verticais das $8 \times 10 \text{ cm}^2$ .....             | 169 |

|                                                                                                                   |            |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <i>Quadro 5.100 – Factores e parâmetros considerados para os elementos verticais das 8x10 cm<sup>2</sup> ....</i> | <i>169</i> |
| <i>Quadro 5.101 – Forças internas mais condicionantes para os elementos diagonais 8x10 cm<sup>2</sup> .....</i>   | <i>170</i> |
| <i>Quadro 5.102 – Tensões criadas pelos esforços para os elementos diagonais 8x10 cm<sup>2</sup> .....</i>        | <i>170</i> |
| <i>Quadro 5.103 – Factores e parâmetros considerados para os elementos diagonais 8x10 cm<sup>2</sup> .....</i>    | <i>170</i> |
| <i>Quadro 5.104 – Forças internas mais condicionantes para os elementos horizontais 8x10 cm<sup>2</sup> .....</i> | <i>170</i> |
| <i>Quadro 5.105 – Tensões criadas pelos esforços para os elementos horizontais 8x10 cm<sup>2</sup> .....</i>      | <i>170</i> |
| <i>Quadro 5.106 – Factores e parâmetros considerados para os elementos horizontais 8x10 cm<sup>2</sup> .....</i>  | <i>171</i> |
| <i>Quadro 5.107 – Forças internas mais condicionantes para os contraventamentos.....</i>                          | <i>171</i> |
| <i>Quadro 5.108 – Tensões criadas pelos esforços para os contraventamentos.....</i>                               | <i>172</i> |
| <i>Quadro 5.109 – Factores e parâmetros considerados para os contraventamentos.....</i>                           | <i>172</i> |
| <i>Quadro 5.110 – Características da ligação HU210-2 .....</i>                                                    | <i>173</i> |
| <i>Quadro 5.111 – Características da ligação SAE380/64 .....</i>                                                  | <i>173</i> |
| <i>Quadro 5.112 - Esforços máximos na base dos pilares .....</i>                                                  | <i>173</i> |
| <i>Quadro 5.113 – Características da ligação SAE380/64 .....</i>                                                  | <i>174</i> |
| <i>Quadro 5.114 – Características da ligação SAE620/150 .....</i>                                                 | <i>174</i> |
| <i>Quadro 5.115 - Características das ligações SAEL500/150 e SAE380/100 .....</i>                                 | <i>175</i> |



## SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

*EC0 – Eurocódigo 0*

*EC1 – Eurocódigo 1*

*EC5 – Eurocódigo 5*

*EC8 – Eurocódigo 8*

*RSA – regulamento de segurança e acções (para estruturas de edifícios e pontes)*

*PSF – ponto de saturação das fibras*

*$a_1$  – espaçamento dos pregos dentro de uma linha paralela ao fio*

*$a_2$  – espaçamento dos pregos dentro de uma linha perpendicular ao fio*

*$a_{3,c}$  – distância entre o prego e o topo não carregado*

*$a_{3,t}$  – distância entre o prego e o topo carregado*

*$a_{4,c}$  – distância entre o prego e o bordo não carregado*

*$a_{4,t}$  – distância entre o prego e o bordo carregado*

*$b$  – largura / largura do pavimento*

*$d$  – diâmetro*

*$d_h$  – diâmetro da cabeça do prego*

*$E_d$  – 5% módulo de elasticidade*

*$E_d$  – módulo de elasticidade de cálculo*

*$E_{mean}$  – valor médio do módulo de elasticidade*

*$E_{mean,fin}$  – valor médio final do módulo de elasticidade*

*$(EI)_l$  – rigidez do pavimento relativamente a um eixo que perpendicular às suas vigotas.*

*$f_1$  – frequência fundamental*

*$F_{90,Rd}$  – capacidade resistente de cálculo determinada a partir da capacidade resistente característica*

*$F_{90,Rk}$*

*$f_{ax,k}$  – resistência ao arranque da peça que recebe a ponta do prego*

*$F_{ax,Rk}$  – capacidade característica de resistência axial ao arranque de um ligador*

*$F_{ax,\alpha,Rk}$  – capacidade resistente característica ao arranque da ligação que faz um ângulo  $\alpha$  com o fio*

*$f_{ax,\alpha,Rk}$  – tensão característica de arranque quando a ligação faz um ângulo  $\alpha$  com o fio*

*$f_{c,0,d}$  – valor de cálculo da tensão de rotura de compressão paralela às fibras*

*$f_{c,90,d}$  – valor de cálculo da tensão de rotura de compressão perpendicular às fibras*

*$f_{h,0,k}$  – resistência característica ao esmagamento paralelo ao fio*

*$f_{head,k}$  – resistência ao atravessamento da cabeça do prego*

$f_{h,i,k}$  – resistência característica ao esmagamento localizado no elemento  $i$   
 $f_{m,k}$  – tensão característica de flexão  
 $f_{m,y,d}$  – valor de cálculo da tensão de rotura de flexão sobre o eixo principal  $y$   
 $f_{m,z,d}$  – valor de cálculo da tensão de rotura de flexão sobre o eixo principal  $z$   
 $f_{t,0,k}$  – valor característico da tensão de rotura à tracção paralela às fibras  
 $f_{t,90,k}$  – valor característico da tensão de rotura à tracção perpendicular às fibras  
 $f_{v,d}$  – valor de cálculo da tensão de rotura por corte  
 $F_{v,Ed,1}$  e  $F_{v,Ed,2}$  – forças de corte de cada lado da ligação  
 $F_{v,Rk}$  – capacidade característica resistente por plano de corte por ligador  
 $F_{v,ef,Rk}$  – capacidade característica resistente efectiva de uma fila de conectores paralela à direcção do fio da madeira  
 $f_u$  – tensão resistente do arame  
 $G_{mean}$  – valor médio do módulo de distorção  
 $G_{mean,fin}$  – valor médio final do módulo de distorção  
 $G_d$  – módulo de distorção de cálculo  
 $H$  – humidade  
 $HR$  – humidade relativa  
 $h$  – altura  
 $k_{crit}$  – coeficiente de bambeamento  
 $k_{def}$  – factor de deformabilidade  
 $k_{ef}$  – factor que tem em conta o espaçamento e a pré-furação  
 $k_h$  – factor de altura  
 $k_m$  – factor que introduz a influência da redistribuição da tensão de flexão numa secção  
 $k_{mod}$  – factor de modificação  
 $K_{ser}$  – valor médio do módulo de escorregamento  
 $K_{ser,fin}$  – valor médio final do módulo de escorregamento  
 $k_{shape}$  – factor que depende da forma da secção  
 $l$  – comprimento / vão  
 $l_{ef}$  – comprimento efectivo  
 $m$  – massa / massa do pavimento  
 $m_s$  – massa seca  
 $M_{y,Rk}$  – momento característico de cedência do ligador  
 $n$  – número de elementos por linha  
 $n_{ef}$  – número efectivo de elementos por linha

$n_{40}$  – número de modos de primeira ordem com frequência natural superior a 40Hz

$P_h$  – peso antes da secagem

$P_s$  – Peso após secagem

$T$  – temperatura

$t$  – comprimento que do prego que fica no elemento que recebe a cabeça

$t_i$  - espessura dos elementos de madeira

$t_{pen}$  – comprimento de penetração do prego ou da parte trabalhada deste no elemento que recebe a ponta

$u$  – velocidade de resposta ao impulso unitário

$u_{fin}$  – deformação final

$u_{fin,G}$  – deformação final devida à acção permanente,  $G$

$u_{fin,Q,1}$  – deformação final devida à acção variável base,  $Q_1$

$u_{fin,Q,i}$  – deformação final devida à acção variável,  $Q_i$

$u_{fin,G}$  – deformação instantânea devida à acção permanente,  $G$

$u_{fin,Q,1}$  – deformação instantânea devida à acção variável base,  $Q_1$

$u_{fin,Q,i}$  – deformação instantânea devida à acção variável,  $Q_i$

$v_w$  – volume saturado

$w$  – máxima deformação instantânea causada por uma força vertical estática concentrada aplicada num ponto qualquer do pavimento, tendo em conta a distribuição da carga

$w_c$  – contraflecha

$w_{inst}$  – flecha instantânea

$w_{creep}$  – flecha devida à fluência

$w_{net,fin}$  – flecha aparente

$X_d$  – valor de cálculo

$X_k$  – valor característico

$\alpha$  – ângulo entre a força e a direcção do fio.

$\beta$  – rácio entre a resistência ao esmagamento dos diferentes elementos ligados;

$\beta_c$  – factor de rectitude

$\gamma_m$  – factor parcial

$\zeta$  – coeficiente de amortecimento.

$\lambda$  – esbelteza

$\lambda_{rel,m}$  – esbelteza relativa

$\rho$  – densidade

$\rho_k$  – densidade característica da madeira / tensão resistente do arame

$\sigma_{c,d}$  – tensão actuante de cálculo de compressão

$\sigma_{m,d}$  – tensão actuante de cálculo de flexão

$\sigma_{m,crit}$  – tensão de flexão crítica

$\sigma_{m,y,d}$  – tensão actuante de cálculo de flexão sobre o eixo principal y

$\sigma_{m,z,d}$  – tensão actuante de cálculo de flexão sobre o eixo principal z

$\tau_d$  – tensão actuante de corte de cálculo

$\tau_{tor,d}$  – tensão actuante de corte por torção de cálculo

# 1

## INTRODUÇÃO

### 1.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

A madeira é um dos materiais estruturais mais antigos utilizados pelo homem na construção de edificações. Alguns dos edifícios mais antigos do mundo são construções de madeira. Templos japoneses do século VII, igrejas norueguesas do século XII e habitações da Idade Média, trazem até à actualidade a antiga ligação da civilização com os edifícios estruturados em madeira.

A percepção da utilidade das árvores em benefício do Homem remonta à pré-história. *“A lenda conta que, quando o homem abandonou a gruta, o seu refúgio de pedra, abandonou também a escuridão e o medo. Saiu e construiu a sua cabana de madeira, limpa e arejada.”*

[1]. A madeira estabelece assim um marco importante na evolução da espécie afirmando-se como o primeiro grande material de construção.

A evolução levou a um crescente conhecimento da madeira, como material de utilização técnica heterogénea e com possibilidades de construção infinitas. A capacidade de mobilidade sobre água conseguida pelos povos navegadores e construtores especializados de embarcações, tal como os portugueses, permitiu unir o Mundo numa esfera. Por outro lado, os povos da montanha viviam em perfeita harmonia com a natureza e a floresta, dado que era a própria que lhes oferecia a matéria-prima para as suas habitações. Com efeito, existiam laços entre a madeira e a população, o que teve resultados práticos no progresso e desenvolvimento de todo o tipo de estruturas construídas neste material.

A História arrastou a sabedoria do artesanato e as leis da tradição das construções em madeira. A experiência acumulada e os conhecimentos adquiridos são ímpares, relativamente a qualquer outra ciência ou tecnologia, pelo que são muitas vezes adaptados a outros materiais. *“Desde o antigo Egipto encontramos a ideia de estais presente nas embarcações usadas, mas é apenas no século XX que se constrói a primeira ponte estaiada moderna...”*[2]

A transparência do esqueleto resistente e sua montagem, assim como a precisão e detalhe na elaboração dos elementos, são reflexos da singularidade e diferenciação desta concepção estrutural. Aliás, faz dela eterna pois a autonomia das peças no conjunto torna-as substituíveis.

A eternidade das habitações em madeira não reside em esconder o envelhecimento e o desgaste causado pelo tempo pois, como matéria orgânica que é, a madeira tem um ciclo de vida. Reside sim na garantia de que o material se mantém vivo e em contínua transformação. *“...a madeira é um material ainda vivo. E comporta-se como tal. O risco que corremos é a sua morte”*

[1]. A certificação de que a madeira se mantém viva é uma garantia de longevidade da estrutura. Habita no cumprimento de uma conveniente, ligeira e frequente manutenção, eficaz e correcta resolução de focos de falecimento, tal como na utilização consciente e cuidada da construção.

*“Somente assim uma construção de madeira pode durar eternamente. Não teme nada, se constantemente vigiada. Abandoná-la, mesmo brevemente, pode-lhe ser fatal.”*

[1].

A fatalidade da madeira encerra-se em três predadores principais. A água, que altera propriedades físicas e destrói órgãos vitais de uma forma lenta e contínua. O fogo, que surge de forma repentina e devastadora podendo destruir toda a estrutura de madeira. Predadores biológicos, que vêm na madeira um habitat perfeito quando encontram nela as condições ideais para sua sobrevivência.

Uma casa em madeira encerra num só espaço qualidades e vantagens únicas que nenhuma outra concepção consegue reunir. A natureza orgânica deste material é transmitida à própria casa tornando-se parte do ambiente em que se insere. Variações de temperatura e humidade exteriores são sentidas no interior de forma suave e controlada.

Todavia, a sociedade deixou de parte toda a estima e interligação com a madeira, sem verdadeiros motivos racionais. A novidade transmitida por outros materiais tais como o aço e principalmente o betão, trouxe-lhes o domínio quase completo de todo o tipo de construções, mesmo quando não correspondiam à melhor solução. No entanto, o trabalho de investigação e desenvolvimento realizado nos últimos quarenta anos, apoiado na sabedoria e técnicas tradicionais, devolveram à madeira o papel que lhe era devido na construção civil. Os derivados da madeira e a pré-fabricação contribuíram de forma importante para esse regresso e ajudaram a que a madeira voltasse a desempenhar o papel fundamental em países desenvolvidos e com tradição na sua utilização. A madeira e derivados tornaram-se de novo competitivos em todos os aspectos incluindo o preço. Nos E.U.A., Canadá e países escandinavos, todos com elevados níveis de vida, mais de 90% dos edifícios construídos em cada ano são em madeira. No Japão a mesma taxa corresponde a mais de 50%.

A investigação e desenvolvimento foram acompanhados por comissões científicas que foram ajuizando normas e regras para a madeira e para os seus derivados à medida que estes foram surgindo. As normas descrevem ensaios, classificações, tratamentos, entre outros. As regras agrupam-se em regulamentos (no caso europeu, o Eurocódigo 5) que vieram definir métodos de cálculo e dimensionamento, de forma a uniformizar e garantir um nível de segurança equitativo para todas as estruturas de madeira.

Apesar da utilização de estrutura de madeira ter pouca tradição em Portugal (comparativamente com os países anteriormente referidos), com o advento do betão armado caíram em desuso completo. Outrora, a utilização da madeira nas construções tradicionais era basicamente a única solução apontada para coberturas e pavimentos. Contudo nunca foi além dessa aplicação, acabando mesmo por ser abandonada em detrimento de outros materiais.

Actualmente, é notória no mercado, a entrada de habitações totalmente construídas em madeira. Simultaneamente, a sociedade começa a ter percepção das vantagens desta solução. No entanto, continua a existir um estigma generalizado em relação às estruturas de madeira associando-as a mitos de insegurança e durabilidade. Assim, reveste-se de especial relevância, dar a perceber que as estruturas realizadas em madeira quando comparadas com outras soluções, são capazes de satisfazer de forma equivalente ou superior, todas as exigências de desempenho aplicáveis.

## **1.2. OBJECTIVOS DO TRABALHO**

A madeira encerra uma enorme aplicabilidade na construção civil, que lhe é reconhecida ao longo dos tempos. Cabe ao sector da construção a opção de aproveitar ou não o contributo estrutural que esta

pode oferecer. São identificados claramente todos os benefícios e condicionantes associados a essa escolha, pelo que é uma decisão que pode ser tomada com total fiabilidade. Contudo, não depende apenas do sector, dado que os utilizadores das estruturas também influenciam a evolução do mercado.

Encontram-se então na oferta e na procura, os principais responsáveis pela percentagem medíocre que as casas em madeira ocupam no parque habitacional português. Existe ainda uma mentalidade desvirtuosa sobre as casas neste material, que não é exclusiva de Portugal e se compara a outros países com grande disponibilidade de matéria-prima, sendo o Brasil exemplo disso. *"Conheço um bairro da periferia muito pobre onde todas as casas são de madeira, que pobreza! (...) Conheço uma casa fantástica de um cidadão muito rico (só pode ser professor!), linda, linda; as vigas, os pilares, o piso, o forro, os rodapés tudo em madeira, um luxo!"*[3], mostra claramente a visão que a população brasileira tem associada a este tipo de casas, em muito parecido ao que acontece no nosso país.

Há assim a necessidade de provar a viabilidade da aplicação da madeira na construção, particularmente de moradias tal como esclarecer ideias erradas formuladas na ignorância existente acerca deste material. Define-se assim uma das principais motivações e objectivos que levaram à realização deste trabalho. Torna-se necessário iniciar uma cultura de concepção destas habitações assente na exposição das suas vantagens, inconvenientes, durabilidade e segurança.

Associa-se assim a este trabalho a responsabilidade da reunião de conhecimento existente em países com maior desenvolvimento no ramo, bem como o desenvolvimento de uma aplicação prática exemplificativa do cálculo de uma estrutura resistente em madeira, de uma habitação modelo. Promoveu-se assim a aplicação de normas e regulamentos pouco estudados em Portugal e nas suas universidades.

### 1.3. ORGANIZAÇÃO ESTRUTURAL DO RELATÓRIO

O presente trabalho inicia-se com o corrente capítulo introdutório, no qual se faz um enquadramento histórico e evolutivo das estruturas de madeira e habitações suportadas pelas mesmas, assim como a relação destas com o Homem. São definidos pressupostos e motivações que determinaram os objectivos a cumprir na sua realização. O capítulo 1 culmina com a síntese organizacional do relatório.

O segundo capítulo, tem como propósito a contextualização das estruturas de madeira no que diz respeito a vantagens e inconvenientes destas em confronto com soluções estruturais noutros materiais usualmente utilizados, principalmente em Portugal. Compreende ainda uma breve descrição das patologias associadas à madeira e cuidados de manutenção para prevenir anomalias.

O capítulo 3 descreve a situação geral actual, no que diz respeito às habitações construídas em madeira. Inicialmente, são caracterizadas as várias concepções possíveis neste material acompanhadas de vários elementos gráficos esclarecedores. Numa segunda parte, são sintetizadas informações da carácter físico e mecânico da madeira, assim como, procedimentos e regras de cálculo definidos na regulamentação actual, o Eurocódigo 5.

No capítulo 4, introduz-se o caso de estudo de uma moradia. Define-se aqui o programa de arquitectura e a solução estrutural adoptada. São identificados materiais e acções de dimensionamento, segundo os regulamentos em vigor e a sua localização no território português.

No capítulo 5, são apresentadas as soluções adoptadas para cada elemento da estrutura, tal como cálculos efectuados na verificação da segurança da estrutura de madeira. Sugerem-se ainda ligações comerciais que asseguram estabilidade face aos esforços actuates.

O capítulo 6 sintetiza as principais ilações retiradas depois de cumpridos os objectivos traçados para cada um dos capítulos anteriores. Acrescentam-se sugestões para trabalhos complementares, de modo a que o presente trabalho passe a ser usado como um instrumento dentro de uma mala de ferramentas.

## 2

# CONTEXTUALIZAÇÃO E ENQUADRAMENTO DAS ESTRUTURAS DE MADEIRA

### 2.1. VANTAGENS E INCONVENIENTES DAS ESTRUTURAS DE MADEIRA

A madeira apresenta, como todos os diferentes materiais estruturais oferecidos hoje em dia pelo mercado, variadas vantagens e desvantagens desde a produção até à aplicação e gestão durante o tempo de utilização da estrutura.

Quando se vê crescer uma tomada de consciência e preocupação pelas questões ambientais e de preservação do planeta, a atenção pela minoração de estragos provocados pelo Homem recai em todos os sectores de actividade económica, incluído o da construção. O impacte ambiental dos materiais de construção torna-se cada vez mais um critério de escolha, tomando níveis de importância quase tão elevados como o preço e a qualidade. É na madeira que se encontra actualmente o único material de construção estrutural proveniente de uma fonte de regeneração contínua, a floresta, desde que sejam adoptadas regras para a sua utilização e reflorestação. Sublinha-se que a floresta labora sem concorrer com o homem no consumo de energia, na sua função de produção de matéria-prima. Por outro lado, a transformação dos produtos florestais para a construção é realizada com um consumo mínimo de energia, decorrente da sua facilidade de laboração e baixo peso específico [4].

Assim, encara-se como uma grande vantagem do uso da madeira na construção incluindo as estruturas o factor ambiental, justificando-se esta afirmação com o conhecimento do *International Institute for Environment and Development* que refere: “Especificando o uso da madeira em contratos públicos nacionais e locais pode ajudar a cumprir programas de combate às alterações climáticas. Incentivos à utilização de produtos de madeira podem ser usados como alternativa ecológica aos combustíveis fósseis, usados intensivamente. Substituindo um metro cúbico de madeira por um de outro material de construção (cimento, tijolos ou blocos) tem resultados significativos na média de 0,75 a 1 tonelada de CO<sub>2</sub> de poupança” [5].

Além disso, a madeira quando deixa de assegurar a função estrutural para a qual estava destinada não coloca nenhum perigo para o meio ambiente, pelo que pode ser reconvertida, reutilizada, ou degradada pela natureza. A origem da madeira correntemente congratulada nas habitações contempla ainda o facto de não ser tóxica, não libertar odores ou vapores de origem química e sendo portanto segura ao toque e manejo. O consumo de madeira na construção leva também ao aumento da procura, que quando aliada a políticas ecológicas, traz como consequência o impulsionar de toda a actividade de florestação.

No entanto, apesar de a questão ambiental ser uma das grandes vantagens da aplicação da madeira na construção e com crescente importância, este material oferece outras vantagens que o tornam competitivo quando comparado com os concorrentes actuais.

A madeira, como isolante térmico natural, pode reduzir a quantidade de energia necessária na climatização de espaços interiores ou mesmo torná-la desnecessária. A diminuição da energia consumida numa habitação é um meio ambiente mais agradável e natural trás melhores condições de habitabilidade, associadas também à capacidade isolante sonora que esta proporciona.

No caso da durabilidade, as estruturas realizadas com este material natural, concorrem de igual modo ou até mesmo com vantagem sobre outras opções estruturais, principalmente com o betão armado. Quando existe um conhecimento profundo da espécie arbórea que corresponde ao corte e tratamento de secagem correctos, aliados posteriormente à informação íntegra das suas características, dimensionamento bem conseguido e manutenção sistemática, a durabilidade das propriedades da madeira como função estrutural podem ser prolongadas por séculos. Exemplos de durabilidade são, por exemplo, os pavimentos dos edifícios históricos da cidade do Porto, que datam mais de 100 anos, e que apesar de não se encontrarem num estado de conservação perfeito devido à falta de manutenção, apresentam ainda boas condições de estabilidade estrutural, em geral.

A trabalhabilidade da madeira é superior à de praticamente todos os restantes materiais de construção, pelo que se tratando de uma matéria-prima muito versátil, pode ser usada de forma muito variada cumprindo as regulamentações em vigor para as aplicações pretendidas. Existe ainda uma panóplia de ligações e emendas, utilizando outros materiais ou não, de facilidade de execução elevada.

A função estrutural da madeira já é desempenhada por esta desde a natureza enquanto árvore. Depois de serrada funciona como elemento moldado de fácil inter-ligação com outros elementos. Os regulamentos actuais garante a estabilidade das estruturas tal como as idealizadas noutros materiais, e a problemática do fogo é ultrapassada por secções que garantem equilíbrio durante um período de tempo suficiente, até porque o mesmo problema se coloca com as estruturas metálicas que, perante o fogo, sofrem deformações consideráveis e com o betão armado que perde características estruturais a altas temperaturas.

As propriedades físico-mecânicas da madeira torna-a capaz de responder tanto a esforços de compressão como de tracção, correspondendo a uma capacidade resistente elevada principalmente quando analisada em conjunto com a sua massa volúmica. Comparativamente, pode apresentar a mesma resistência à compressão que um betão de resistência média e resistência à flexão e corte de cerca de dez vezes superior também à do betão. Traz também vantagens em relação a alguns materiais na resistência a choques bruscos os quais podem sofrer danos consideráveis.

A madeira oferece também uma grande versatilidade de uso, podendo ser reutilizada noutras estruturas com as mesmas dimensões ou transformada em peças de dimensões inferiores. A versatilidade das habitações com estrutura de madeira é também relevante, pelo que existe uma maior facilidade de alterar ou converter as estruturas resistentes destas ou proceder a ampliações de forma eficaz e sem transtornos.

No entanto, a madeira tem também características negativas ou falta delas que obviamente lhe retiram a virtude de material idílico. A heterogeneidade e anisotropia do material tornam o funcionamento da madeira direccionada relativamente às fibras com resistências, elasticidades e expansibilidades dependentes da secção ou direcção da peça em análise. A sensibilidade a variações de humidade torna-se assim correspondente a variações de dimensões não proporcionais e que pode originar uma maior ou menor abertura de fendas, dependendo da espécie arbórea.

A vulnerabilidade a agentes externos, biológicos ou atmosféricos, que enfraquecem a madeira fazendo-a perder secção e propriedades resistentes, a par da combustibilidade são factores que promovem a diminuição da procura da madeira como solução. Alia-se a isto a limitação de dimensões

das peças que tem obrigatoriamente que seguir o perfil alongado transmitido pelos toros de onde são extraídas e a tendência para os elementos em flexão adquirirem deformadas excessivas por fluência devido a cargas de longa duração ou permanentes.

As desvantagens da aplicação da madeira estruturalmente fizeram mesmo com que fosse ultrapassada pelo aço e pelo betão na grande parte das estruturas mesmo as mais ligeiras e a não adopção sequer desta concepção em países, até então sem tradição na sua utilização. No entanto, a madeira apenas adquiriu reconhecimento como material moderno de construção, com condições para atender às exigências de técnicas construtivas recentemente promovidas, quando os processos de aperfeiçoamento na produção de peças em derivados da madeira foram desenvolvidos e permitiram anular as características negativas que a madeira apresenta no seu estado natural.

A secagem artificial controlada veio resolver problemas de degradação das propriedades e surgimento de tensões internas resultantes de alterações de humidade. O aparecimento de novas técnicas e produtos de manutenção resolveu em grande parte as desvantagens criadas pelos agentes externos, reduzindo assim a deterioração e aumentando a durabilidade. Quanto à restrição dimensional, a solução passou pela produção de lamelados colados de madeira que trouxeram uma liberdade enorme, quanto a secções, comprimentos e formas. Do mesmo modo os derivados da madeira tais como laminados, contraplacados e aglomerados vieram resolver parte das limitações colocadas pela anisotropia e heterogeneidade.

Dadas as vantagens enunciadas e soluções geradas para parte dos inconvenientes, a madeira constitui actualmente uma óptima opção para muitas das estruturas hoje em dia construídas noutros materiais menos proveitosos mas que estão sistematizados e enraizados na maior parte dos mercados da construção. Apenas nos países com cultura vincada nesta concepção como os E.U.A., Canadá ou países escandinavos são aproveitadas todas as regalias fornecidas pela madeira e os quais podem servir de exemplo para uma política construtiva económica e ambientalmente sustentável. O Quadro 2.1 faz uma síntese das vantagens e inconvenientes da madeira aplicada na idealização de estruturas.

Quadro 2.1 – Vantagens e desvantagens das estruturas de madeira [6]

| <i>Vantagens</i>                                                                      | <i>Inconvenientes</i>                                                |
|---------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| - <i>Abundância na natureza</i>                                                       | - <i>Variações dimensionais originadas pela humidade</i>             |
| - <i>Elevada resistência em relação à baixa densidade</i>                             | - <i>Consequente tendência para fender</i>                           |
| - <i>Facilidade de trabalho e de ligação das peças entre si</i>                       | - <i>Combustibilidade, quando em elementos de pequenas dimensões</i> |
| - <i>Bom isolante térmico</i>                                                         | - <i>Ataque por agentes biológicos</i>                               |
| - <i>Amortecedor de ondas sonoras</i>                                                 | - <i>Degradação pelos agentes atmosféricos</i>                       |
| - <i>Regulador higratérmico do ambiente</i>                                           | - <i>Baixa durabilidade quando em situações de secagem/molha</i>     |
| - <i>Baixo índice de emissividade radioactiva</i>                                     | - <i>Alguma deformação por fluência ao longo do tempo</i>            |
| - <i>Estabilidade comportamental ao fogo, quando em elementos de médias dimensões</i> |                                                                      |
| - <i>Inalterabilidade perante ambientes químicos</i>                                  |                                                                      |

## 2.2. COMPARAÇÃO DE ESTRUTURAS E HABITAÇÕES DE MADEIRA, ALVENARIA E BETÃO ARMADO

Hoje em dia o mercado oferece uma diversidade considerável de soluções estruturais assentes em variados materiais e que concorrem entre si de forma mais ou menos equilibrada dependendo da tipologia e caracterização da estrutura assim como uso previsto. À medida que aumenta o grau de complexidade e o conjunto de cargas a suportar, a panóplia de soluções diminui. No entanto, para o caso das habitações, as opções podem todas entrar na averiguação da melhor opção para aquele determinado caso, tendo em conta também todos os condicionalismos associados à construção além do material estrutural.

De uma forma sintética e resumida apura-se no Quadro 2.2 uma comparação de características intrínsecas à madeira e a outros materiais, tais como o betão armado, o aço e alumínio. No Quadro 2.3 é sumariado um conjunto de sistemas construtivos detalhados por parâmetros que os caracterizam e diferenciam.

Quadro 2.2 – Comparação das características da madeira maciça de outros materiais estruturais [6]

| Condutibilidade térmica (W/m °C)                                                                         |                | Massa volúmica (kg/m <sup>3</sup> )                                                                                |                |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|
| Madeira resinosa                                                                                         | 0,18           | Madeira resinosa                                                                                                   | 650            |
| Betão armado                                                                                             | 1,5            | Betão armado                                                                                                       | 2.500          |
| Aço                                                                                                      | 52             | Aço                                                                                                                | 7850           |
| Alumínio                                                                                                 | 230            | Alumínio                                                                                                           | 2.700          |
| Relação entre a Energia necessária para a produção de uma tonelada de matéria relativamente à da madeira |                | Relação entre o peso dos principais materiais estruturais e o da madeira maciça, para a mesma resistência mecânica |                |
| Betão                                                                                                    | 4 vezes mais   | Aço                                                                                                                | 1,5 vezes mais |
| Aço                                                                                                      | 60 vezes mais  | Betão Pré-esforçado                                                                                                | 3,5 vezes mais |
| Alumínio                                                                                                 | 250 vezes mais | Betão                                                                                                              | 5 vezes mais   |

Quadro 2.3 – Comparação entre alguns sistemas construtivos (adaptado de [7])

|                                                       | Madeira                                                                                                                                                                              | Aço                                                                                                                                                        | Alvenaria Estrutural                                                                                                                   | Betão armado                                                                                                                                             | Betão pré-fabricado                                                                                                                | Betão pré-esforçado                                                                                                               |
|-------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <i>Principais tipologias e limitações estruturais</i> | Estruturas de cobertura<br><br>Grande flexibilidade<br><br>Susceptibilidade a incêndios<br><br>Necessita de tratamentos<br><br>Habitações de lazer ou correntes (dependendo do país) | Grande flexibilidade<br><br>Optimização da construção<br><br>Edifícios altos<br><br>Edifícios comerciais e industriais<br><br>Susceptibilidade a incêndios | Edifícios de média altura<br><br>Vãos de 5 ou 6 metros<br><br>Projecto modular<br><br>Necessidade de integração com outros subsistemas | Uso em qualquer tipo de estrutura<br><br>Grande flexibilidade                                                                                            | Maior uso em edifícios comerciais e industriais - Vãos de até 10 metros<br><br>Alturas de até 25 metros<br><br>Baixa flexibilidade | Obras de grande porte para quando se deseja vencer grandes vãos<br><br>Edifícios comerciais e pontes<br><br>Grande flexibilidade  |
| <i>Emprego em Portugal</i>                            | Pouca tradição<br><br>Disponibilidade variável<br><br>Baixo desenvolvimento sectorial                                                                                                | Pouca tradição<br><br>Baixo desenvolvimento sectorial                                                                                                      | Intensa utilização anterior ao advento do betão<br><br>Utilização praticamente inexistente na actualidade                              | Grande aceitação e uso intensivo a partir dos anos 40<br><br>Grande responsável pelo abandono das técnicas tradicionais e utilização de outros materiais | Associado a construções industriais e comerciais<br><br>Baixa flexibilidade arquitectónica                                         | Emprego a partir de Inicialmente apenas era utilizado em obras especiais (pontes)<br><br>Hoje em dia tem um uso mais generalizado |
| <i>Aspectos relacionados com a mão-de-obra</i>        | Mão-de-obra especializada para produção e montagem                                                                                                                                   | Mão-de-obra especializada para produção e montagem                                                                                                         | Mão-de-obra especializada                                                                                                              | Grande parte da mão-de-obra é não especializada                                                                                                          | Grande parte da mão-de-obra é não especializada                                                                                    | Mão-de-obra especializada                                                                                                         |
| <i>Equipamentos utilizados</i>                        | Ferramentas manuais<br><br>Equipamentos para elevação de pequeno porte                                                                                                               | Equipamentos pesados para montagem (gruas/ guindastes, maquinas de soldar)                                                                                 | Equipamentos tradicionais                                                                                                              | Equipamentos tradicionais                                                                                                                                | Equipamentos de transporte e elevação de grande porte                                                                              | Macacos de pré-esforço e equipamentos de injeção                                                                                  |
| <i>Organização do estaleiro</i>                       | Problemas de exposição às intempéries<br><br>Grande área para preparação do material                                                                                                 | Número reduzido de materiais facilita a organização<br><br>Estaleiro organizado e limpo                                                                    | Grande área para preparação do material                                                                                                | Grande quantidade de materiais envolvidos                                                                                                                | Estaleiro limpo e organizado<br><br>Transporte optimizado                                                                          | Grande quantidade de materiais envolvidos                                                                                         |
| <i>Prazo/ Duração</i>                                 | Curto prazo montagem                                                                                                                                                                 | Prazo de montagem curto                                                                                                                                    | Longo prazo                                                                                                                            | Médio prazo                                                                                                                                              | Curto prazo de montagem                                                                                                            | Médio prazo                                                                                                                       |

## 2.3. PATOLOGIAS E MANUTENÇÃO

*“O tempo por si só (idade), não produz depreciação das características da madeira. Embora seja comum encontrar peças de madeira em serviço com maior ou menor grau de deterioração, são igualmente conhecidos numerosos exemplos de estruturas ou artefactos de madeira em bom estado, apesar de contarem várias centenas ou mesmo milhares de anos, em consequência de uma exposição a condições ambientais particulares que não favoreceram a sua deterioração.”[8].*

Com efeito, a degradação de elementos de madeira surge como resultado da acção de agentes físicos, químicos, mecânicos ou biológicos aos quais este material é sujeito ao longo da sua vida. Procede-se aqui a uma pequena síntese das principais patologias associadas às estruturas de madeira, sugerindo-se a consulta de bibliografia mais específica para maior aprofundamento no conhecimento do tema.

### 2.3.1. AGENTES FÍSICOS E QUÍMICOS

A degradação físico-química é devida essencialmente aos agentes atmosféricos (sol e chuva), condições de carga, formação da árvore, agentes químicos e acção do fogo.

#### 2.3.1.1. Agentes atmosféricos

A acção da água da chuva na madeira leva a que esta tenha variações bruscas de humidade na superfície exposta, o que origina tensões que provocam a abertura de fendas e diminuição da capacidade resistente associada. A secagem repentina faz com que se gerem tensões de tracção pois a contracção repentina da madeira impede que a água do seu interior seja expulsa.

O efeito das radiações solares pode ser distinto. Os raios ultravioletas, através do efeito de fotodegradação, provocam a descoloração da madeira e o aparecimento nesta de uma tonalidade acinzentada, acentuando-se quando conjugada com a água da chuva, dando o aspecto de madeira “velha”. Além disso, a acção destruidora dos raios UV sobre a lenhina levam à separação da membrana exterior das paredes celulares surgindo um aspecto de desfibramento superficial na madeira. Os raios infravermelhos aliados a ciclos sucessivos de humidade e temperatura originam contracções e dilatações que levam ao aparecimento de fendas na superfície da madeira.

#### 2.3.1.2. Condições de carga

Elementos estruturais sujeitos a esforços muito elevados (próximos da respectiva tensão de rotura) durante um longo espaço temporal, poderão ter sofrido danos internos capazes de reduzir a sua capacidade de carga. A introdução de esforços inadequados devidos a modificações intencionais (adaptações, alteração de áreas) ou acidentais (cedência de apoios, etc) do funcionamento estrutural é também uma frequente causa de danos. A humidade elevada associada à acção das cargas amplia os fenómenos de fluência da madeira provocando grandes deformações, podendo este relacionamento tornar-se perigoso para a estrutura [8].

#### 2.3.1.3. Formação da árvore

A má formação da árvore devida às condições ambientais também pode ter efeitos secundários na madeira:

- O crescimento irregular pode ter como consequência o desvio das fibras implicando diminuição da resistência;
- As épocas de frio intenso podem provocar a inexistência do cerne;
- Os resíduos de destilação de resina propiciam ocos entre os anéis fazendo com que haja diminuição da consistência da madeira;
- Fibras entrelaçadas ou torcidas favorecem o empenamento, dificultam o trabalho e a protecção da madeira;
- A desintegração de dois ou mais anéis tem como consequência a diminuição da inércia;
- A existência de nós pode reduzir a secção útil da peça de madeira e distorcer a direcção das fibras fazendo com que haja diminuição da resistência;
- A formação de fendas internas provoca a diminuição da secção útil.

#### 3.2.1.4. Agentes químicos

O efeito de produtos químicos sobre a madeira tem como primeira consequência a alteração da coloração sendo a madeira das folhosas mais susceptível a adquirir nova tonalidade. Ambientes ácidos destroem as cadeias de carbono originando um aspecto fibroso da madeira e por sua vez os ambientes alcalinos destroem a lenhina e as hemiceluloses perdendo-se consistência e resistência. Grande parte das madeiras tem um carácter ácido devido à predominância do ácido acético. Esta acidez não é problemática a não ser que a madeira esteja húmida ou sujeita a ciclos de molha e seca que levam à criação de mais ácido por processo de hidrólise emergindo manchas de cor negra azulada resultantes do processo químico [9].

#### 3.2.1.5. Acção do fogo

A madeira, como material resistente ao fogo, vê a sua deterioração perante a acção este directamente ligada ao tempo de exposição. A rápida combustão inicial da camada superficial forma uma capa carbonizada sobre uma outra onde acontece a pirólise da madeira. Este “revestimento” decorrente da acção do fogo protege e retarda a propagação da carbonização na zona interior da secção visto que a capa carbonizada é cerca de seis vezes mais isolante do que a madeira. A velocidade de propagação da acção do fogo, denominada de velocidade de carbonização encerra uma relação linear entre profundidade carbonizada e tempo de exposição ao fogo. Esta resposta da madeira depende de variadas características intrínsecas à espécie, sendo que em média, no caso das espécies resinosas a velocidade é cerca de 0,67 mm/min e nas folhosas cerca de 0,54 mm/min [10]. Além da degradação imposta pelo fogo, outras podem vir associadas. A elevada humidade deixada pela extinção do incêndio ou causada pela entrada de água da chuva por zonas que perderam a estanquidade, cria condições para a propagação de agentes biológicos de degradação quando a reabilitação da estrutura é tardia.

#### 2.3.2. AGENTES BIOLÓGICOS

A durabilidade natural é uma propriedade intrínseca de cada espécie de madeira, o que corresponde também à maior ou menor susceptibilidade ao ataque de agentes biológicos. A catalogação das espécies com interesse comercial na Europa, segundo durabilidade natural e processos de tratamento é registada na norma NP EN 350-2. No entanto, mesmo para uma espécie que tenha associado um elevado risco de ataque por um determinado agente biológico, isso só acontecerá se naturalmente existirem condições para tal, isto é, temperatura ambiente, ar e humidade favoráveis ao

desenvolvimento desse mesmo agente. Foram definidas então na norma NP EN 335 [11] classes de risco biológico em função das condições da aplicação da madeira:

- Classe 1: Elementos protegidos da intempérie, não expostos à humidade ( $H \leq 20\%$ );
- Classe 2: Elementos debaixo de coberturas, protegidos da intempérie com humidade ambiental por vezes elevada ( $H > 20\%$ );
- Classe 3: Elementos a descoberto e que não estão em contacto com o solo, com humidade frequente ( $H > 20\%$ );
- Classe 4: Elementos em contacto com o solo ou com água doce ( $H > 20\%$ );
- Classe 5: Elementos em contacto permanente em água salgada ( $H > 20\%$ )

As diferentes classes de risco determinam exigências específicas quanto à durabilidade natural das madeiras a utilizar ou quanto ao eventual tratamento preservador a aplicar. Informação sobre este assunto pode ser encontrada nas normas europeias EN335-2 e EN460 [8].

### 2.3.2.1. Carunchos

Os carunchos são insectos de ciclo larvar, que atacam a madeira geralmente seca, embora possam ter razoável tolerância em relação a valores elevados de humidade. A eclosão dos ovos postos pela fêmea adulta em fendas ou nos poros da madeira dá origem a larvas que penetram na madeira abrindo galerias e quando atingem o grau adulto saem para o exterior dando origem ao orifício de saída com dimensões e forma (circular ou elíptica) características.

Em Portugal o agente característico é o caruncho grande (*Hylotrupes bajulus*) que ataca apenas madeiras resinosas e normalmente apenas o borne. De entre os carunchos pequenos destaca-se o Anobium, que ataca indiferentemente o borne de Folhosas e de Resinosas.

A manifestação do ataque por carunchos é denotada pela existência de orifícios de saída dos insectos adultos e pela presença de “serrim” na superfície da madeira, podendo surgir também empolamentos causados pela pressão de “serrim” no caso da presença de carunchos grandes. O som característico do roer das larvas é também um sinal de infestação.

A consequência da presença deste agente biológico é essencialmente a redução da secção geralmente na camada exterior do borne e correspondente perda resistência. A seriedade do ataque depende obviamente do caruncho em causa, visto que a quantidade de alimento ingerido (dimensão das galerias) varia consoante o insecto específico assim como da disponibilidade de alimento disponível dado que condiciona a progressão do ataque, podendo levá-lo também à extinção caso se esgote a madeira susceptível de ser consumida.

O tratamento da madeira infestada por carunchos, passa por sustentar a progressão do ataque no interior dos elementos e impedir o regresso destes (postura de ovos pelos insectos adultos nesses e noutros elementos ainda virgens). Os tratamentos mais usuais nos edifícios passam pela aplicação de produtos superficiais podendo ser complementados por produtos de preservação injectáveis no seu interior [8].



Fig.2.1 – Carunchos [12]

#### 2.3.2.2. Fungos de podridão

Os fungos de podridão desenvolvem-se em madeira com teor em água superior a 20%, sendo o limite máximo relacionado com as necessidades mínimas de oxigénio livre para cada fungo específico. Assim o apodrecimento da madeira está associado a pontos críticos de presença sistemática de água ou infiltrações.

A alimentação destes fungos passa pelas paredes celulares da madeira, que como é destruída facilita a identificação da sua presença através de perda de peso e de resistência da madeira, tal como alterações típicas de coloração e aspecto.

Quando à resistência mecânica da madeira afectada, será prudente desprezá-la, o que implica a substituição ou reforço dos elementos afectados. A eliminação definitiva das fontes de humedificação (quando tal é possível) poderá ser suficiente para promover a secagem da madeira e a certa altura suster a progressão do ataque pelos fungos. No entanto, há situações particulares em que não é possível garantir com segurança a eliminação completa e definitiva das fontes de humedificação. Nestes casos é essencial adoptar medidas correctivas específicas, que passam pela limpeza e pelo tratamento preservador curativo e preventivo da madeira [8].



Fig.2.2 – Fungos de podridão [12]

#### 2.3.2.3. Térmitas

As térmitas subterrâneas (*Reticulitermes lucifugos*) são insectos sociais que vivem em geral no solo, em colónias numerosas compostas por reprodutores, soldados e obreiras. A madeira húmida com aproximadamente 20% de teor em água e próxima ou em contacto com o solo são preferenciais e utilizadas como alimento e abrigo.

A identificação de um ataque por térmitas é tardia e acontece pela detecção de galerias feitas com terra na face dos elementos atacados, e no interior ao abrigo da luz e em ambiente húmido essencial para a sua sobrevivência. Uma outra manifestação da sua presença acontece a quando da época de acasalamento, que corresponde á saída de centenas de insectos adultos alados por frinchas ou juntas da madeira voando em direcção à luz. Posteriormente perdem as asas e acasalam potenciando assim a propagação da infestação.

A consequência deste agente biológico é grave dada a detecção tardia e a quantidade de madeira devastada, pelo que torna a resistência da peça diminuta. A contabilização dessa resistência reduzida deve ser ainda afectada de uma possível progressão do ataque dependente da viabilidade de erradicação rápida do problema. Essa erradicação passa normalmente pelo tratamento das madeiras afectadas no local, substituição, introdução de barreiras físicas ou químicas. Podem ser aplicados também procedimentos alternativos como por exemplo o tratamento anti-termico em autoclave industrial [8].



Fig.2.3 – Madeira atacada por térmitas [12]

### 2.3.3. MANUTENÇÃO DAS ESTRUTURAS DE MADEIRA

Certos tipos de madeira são naturalmente duras e de tal forma resistentes que não exigem manutenção. No entanto, a maioria da madeira requer tratamento para protegê-la de insectos e humidade e assegurar uma maior longevidade. Alguns países do norte, como os da Escandinávia, habitualmente não tratam a sua madeira pois os insectos mais ameaçadores não conseguem suportar as condições atmosféricas locais. Nas zonas da Europa com um clima mais temperado, como Portugal, torna-se necessário o tratamento da madeira com fungicidas e insecticidas [13].

Todavia, a melhor manutenção assenta principalmente na prevenção. “A *detecção e rápida eliminação de todas as potenciais causas de degradação, normalmente associadas a manifestações de humidade constitui a principal acção de manutenção preventiva a assegurar.*”[14]. Assim, é fundamental prever a realização de campanhas de inspecção periódicas para avaliar o estado de conservação da madeira aplicada, com função estrutural ou não estrutural, e levar a cabo prontamente as acções de manutenção necessárias. Devem ser procurados indícios de má conservação dos elementos de madeira, frequentemente traduzidos por deformações acentuadas ou sintomas diversos associados a humidificação frequente ou continuada dos materiais da construção.

As medidas preventivas passam essencialmente por: [15]

- Inspecção constante das intersecções da cobertura com as paredes;
- Limpeza assídua do telhado e algerozes;

- Verificação do estado de conservação dos vedantes das janelas e portas para evitar infiltrações;
- Assegurar que a drenagem da água da chuva é realizada na direcção contrária às paredes e fundação da casa;
- Remover vegetação que nasça junto das paredes ou se agarre a estas, ou caso existam canteiros encostados à parede, verificar periodicamente a impermeabilização deste, e evitar encharcar constantemente a parede aquando da rega;
- Revistar a cobertura através do sótão, procurando manchas de humidade na madeira, ou se for o caso, elementos metálicos enferrujados;
- Instalar ventiladores nas casas de banho e lavandaria;
- Ter especial atenção às zonas molhadas da habitação, ou seja, casas de banho e cozinha, verificando se não existe fugas nas tubagens e se os vedantes se encontram em bom estado de conservação;
- Se for o caso, inspeccionar a cave e procurar focos de infiltrações de água ou presença de algum agente de degradação biológica;
- Para as casas nas quais a fundação construída noutro material não se eleve acima do terreno cerca de 20 cm, deve proteger-se a faixa de madeira em contacto com o solo com material impermeabilizante.

Para zonas costeiras, a resistência das construções em madeira ao sol e maresia é sempre condicionada pelo estado da última protecção. Neste caso, a manutenção mais solicitada no nosso país consiste na lavagem das paredes à mangueira com água e, após secagem, a aplicação de duas demãos de velatura ou outros produtos para o efeito. Esta operação é necessária, em média, cada 3 anos para paredes expostas a sul e cada 4 anos para as restantes, podendo ser efectuada por qualquer pessoa não especializada. As paredes interiores não necessitam de qualquer tipo de manutenção. [16]

## 2.4. PROBLEMÁTICA DO FOGO NAS ESTRUTURAS DE MADEIRA

Contrariamente à ideia difundida, a madeira oferece uma excelente resistência ao fogo. As principais razões para isso são a sua má condutividade térmica, o seu teor de água e a capa carbonizada que se forma, criando rapidamente uma camada isolante que trava a combustão. Sendo a madeira um mau condutor de calor, a temperatura interna cresce mais lentamente, não comprometendo imediatamente a zona central dos elementos. Deste modo, podem manter-se em serviço em condições que o aço, por exemplo, já teria entrado em colapso mesmo não sendo inflamável. Assim, num incêndio, uma estrutura de madeira perde mais lentamente a sua capacidade resistente que uma estrutura de aço ou de betão armado. A madeira transmite 10 vezes mais lentamente o calor que o betão e 250 vezes menos que o aço. Outra característica importante no comportamento da madeira face ao fogo é o facto de não apresentar distorção quando submetida a altas temperaturas, tal como ocorre com o aço, dificultando assim o colapso da estrutura.

Tal como acontece em qualquer construção, as casas com estrutura resistente de madeira estão sujeitos a uma série de normas e a um dos mais importantes regulamentos de segurança à acção do fogo, o Eurocódigo 5 – Parte 2. Para as habitações privadas, as regras legais impõem que a casa deverá manter a sua estrutura estável durante pelo menos 15 minutos após o início de um incêndio para que permita a saída do seu interior com segurança dos habitantes. *“Um facto interessante são as regras impostas aos Bombeiros que estão autorizadas a entrar em edifícios com telhados de estrutura de madeira por períodos mais longos do que nos edifícios construídos em outros materiais.”* [13].



# 3

## CASAS EM MADEIRA

### 3.1. CONCEPÇÃO

As casas de madeira encontram-se actualmente em Portugal num domínio francamente atrasado em relação às grandes potências da madeira tais como EUA, Canadá e países escandinavos. O tipo de estruturas idealizadas neste material consegue ser de tal forma variado que pode ostentar o carisma de uma obra de arte de grande qualidade, passar por uma estrutura mais ligeira até à simples pré-fabricação e construção modular de habitações.

O conteúdo do subcapítulo 3.1., incluído a classificação das diferentes concepções assim como as figuras nele retratadas e adaptadas, baseia-se essencialmente na referência [17].

#### 3.1.1. CASAS DE TRONCOS

A possibilidade de erigir um local com condições habitáveis foi o segundo grande contributo que a madeira deu à humanidade depois do fogo. Inicialmente esses locais correspondiam a simples abrigos rudimentares, muitas das vezes para pastores se abrigarem das intempéries, ou então a simples triangulação de varas formando um cone constituindo o típico abrigo de tribos. Mais tarde a perspectiva de habitação em material lenhoso cresceu, isto quando se começou a definir uma singela estrutura de varas atadas em malha dando origem a uma área coberta quadrada (Fig.3.1). Toda a superfície exterior seria coberta por colmo ou outro material natural que oferecesse alguma impermeabilidade à chuva e estanquidade ao vento. Como se sabe, muitas destas estruturas ainda são o lar de tribos primitivas que perduram até aos dias de hoje.

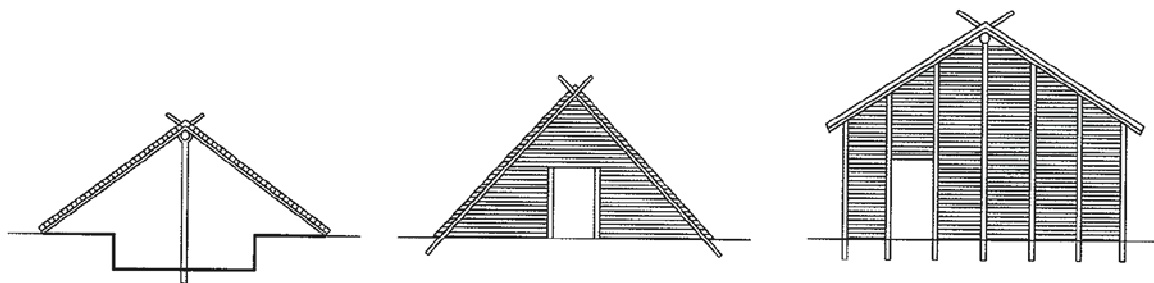


Fig.3.1 - Evolução dos primeiros abrigos em madeira

A evolução da sociedade, a necessidade de melhores condições de habitabilidade, salubridade e de qualidade de vida, aliadas ao desenvolvimento da engenharia e arquitectura originaram o aparecimento das casas de troncos, casas de estrutura pesada e casas de estrutura ligeira.

As primeiras estruturas com forma habitacional e com efectivas condições para viver arquitectadas por troncos surgem na Polónia e Turquia por altura da Idade da Pedra para alojar saunas e celeiros, tratando-se de cabanas suportadas por postes semi-enterrados. O aperfeiçoamento do sistema estrutural levou à criação de edifícios permanentes que permitiu fixar aldeias e cidades.

Os anos foram passando e este tipo de habitações veio a tornar-se típica de países boreais com climas frios e grandes bosques e florestas tais como E.U.A., Canadá, Países Escandinavos, regiões alpinas e Rússia, facto natural dado que normalmente as habitações eram construídas com os materiais locais e as mais adaptadas às condições ambientais envolventes. Isto não quer dizer que não fossem construídas em locais bem diferentes sendo que correspondiam a uma distinção social de superioridade.

No século XX este sistema habitacional deixou de ser praticado devido ao ser carácter artesanal e rústico. No entanto tem-se assistido a um renascer desta técnica construtiva nos últimos anos em muito devido ao progresso das tecnologias de construção e conservação, assim como a possibilidade de pré-fabricação e consequente industrialização torna esta solução mais competitiva. Portugal tem registado um aumento sustentado do mercado das habitações de madeira, principalmente através deste modelo estrutural (Fig.3.2 e Fig.3.3).

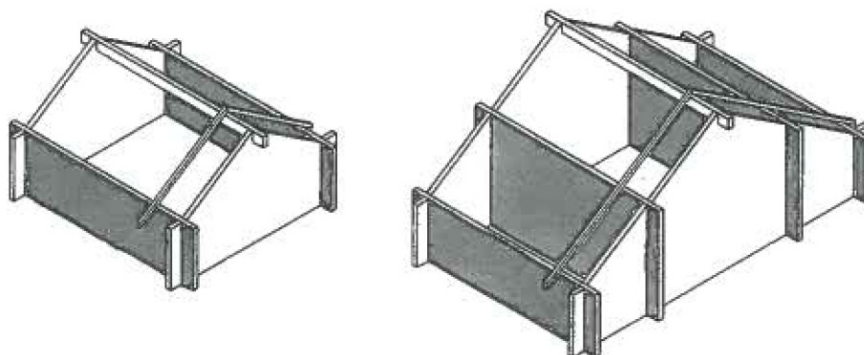


Fig.3.2 – Modelo estrutural das habitações de troncos



Fig.3.3 – Típica construção de habitações de troncos em Portugal (Fonte: [www.finlusa.pt](http://www.finlusa.pt))

### 3.1.1.1. Fundações

As Fundações das casas de troncos são em tudo semelhantes às das casas tradicionais de alvenaria, consistindo em sapatas corridas por baixo das paredes de troncos. As principais diferenças são:

- A largura da sapata é normalmente mais reduzida devido à necessidade de suportar menores cargas sendo normalmente a largura mínima fixada que impera;
- A largura do muro de arranque da parede também é normalmente menor que a da construção tradicional devido à espessura reduzida da parede de madeira (10 a 20 cm);
- As exigências de nível e dimensões do muro de arranque são mais rigorosas pois são condições necessárias ao ajuste adequado das juntas e ligação entre paredes;
- A ligação entre a fundação e a parede deve efectuar-se por uma correcta ancoragem e uma impermeabilização que evite a transmissão de humidade às peças de madeira.

As soluções para as fundações e primeiro piso diferem, dependendo da existência ou não de cave. Quando existe cave, as opções são idênticas à das construções tradicionais de alvenaria tendo por base muros de betão armado. Para a situação de inexistência de cave as escolhas passam essencialmente por:

- Solução sem câmara de ventilação com laje em betão (Fig.3.4).

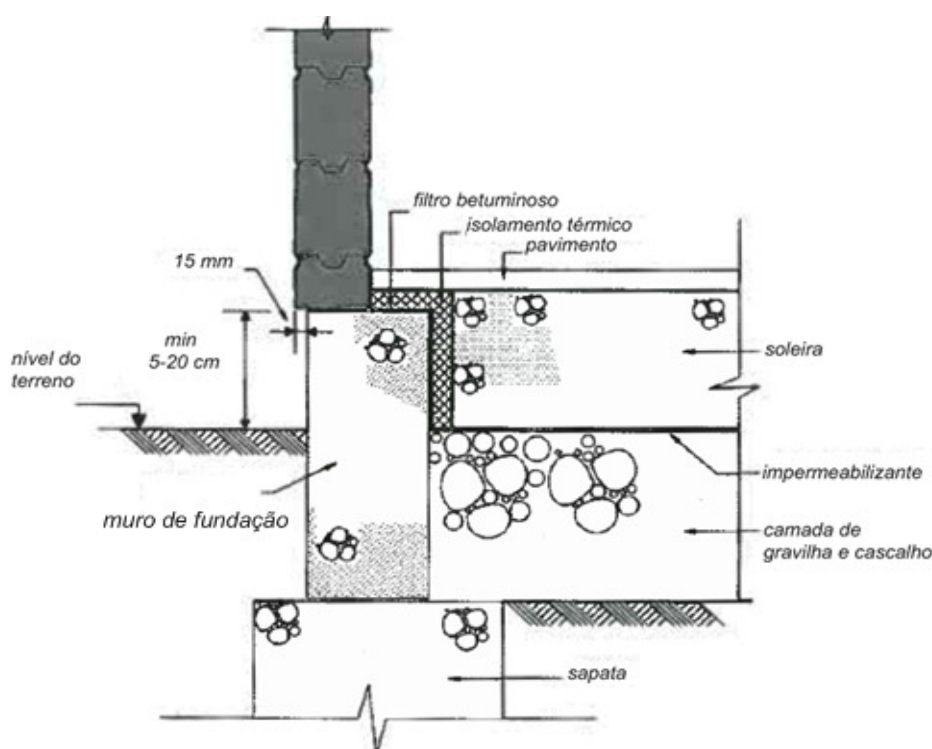


Fig.3.4 - Solução sem câmara de ventilação com laje em betão

O primeiro piso fica em contacto directo com o terreno. Para evitar a ascensão de humidade coloca-se uma camada de cascalho com no mínimo 15 cm de espessura, sendo aconselhável entre 25 a 30 cm. Além de evitar a circulação de água por capilaridade, esta camada serve também para alojar condutas de saneamento. Assegura-se a estanquidade por uma tela impermeabilizante sobre a qual se constitui a laje de betão com espessura mínima de 10 cm e recomendável de 15 a 20 cm. O muro de arranque

deve situar-se entre 15 a 20 cm acima do nível do terreno com o objectivo de proteger a primeira peça de madeira da parede dos salpicos da chuva e outras humidades. A junção do muro de arranque com a laje deve ser dotada de um isolante térmico com a finalidade de acautelar a ponte térmica. A impermeabilização é realizada através de uma tela betuminosa envolvendo o rumo de arranque na face superior e interior. Para uma maior eficiência de impermeabilização pode também tratar-se a primeira peça da parede com substâncias químicas;

- Solução com câmara-de-ar (Fig.3.5).

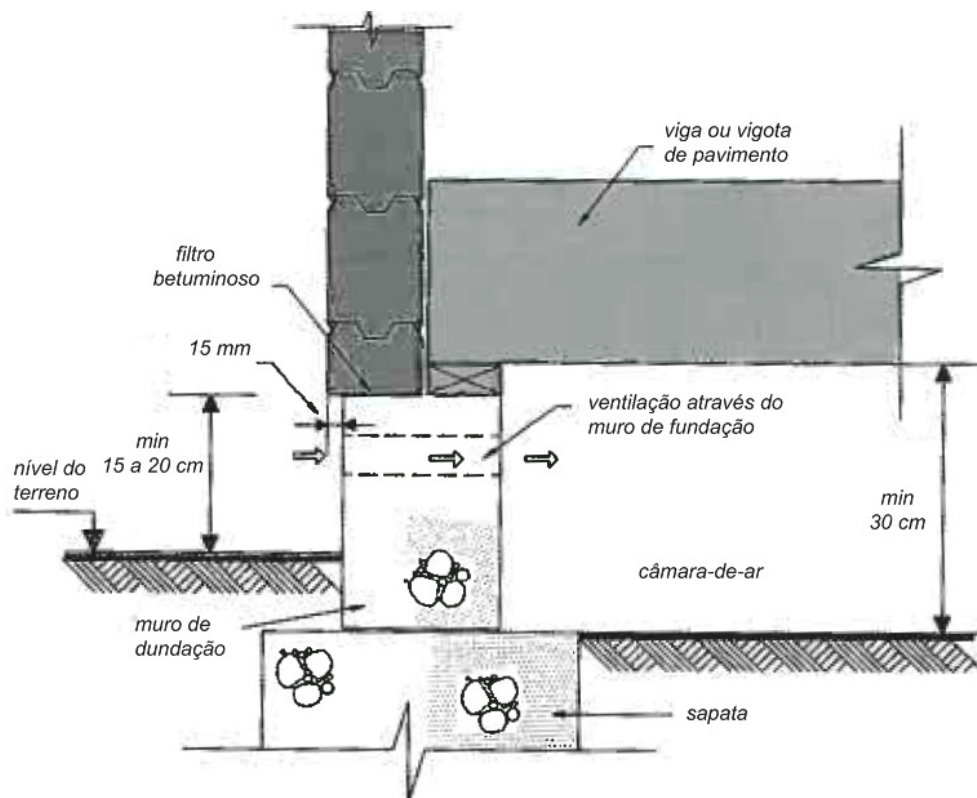


Fig.3.5 - Solução com câmara-de-ar

Nesta solução o piso fica elevado do terreno criando-se assim uma câmara-de-ar ventilada a fim de evitar condensações e acumulação de humidade. Este espaço deverá ter no mínimo 30 cm de altura e as aberturas para ventilação no muro de arranque  $15 \text{ cm}^2$  por metro linear. As referidas aberturas devem dispor-se suficientemente elevadas relativamente ao terreno para impedir a entrada de água e protegidas com rede para travar a entrada de animais e objectos. O piso pode ser materializado em betão ou madeira apoiando nos muros de arranque, podendo ser necessário constituir muros interiores quando se tratam de grandes vãos. Para o caso da utilização de madeira, a estrutura é formada por vigas que assentam sobre os muros de arranque, existindo no entanto várias hipóteses de efectuar a ligação mas todas elas tendo em comum o facto de se utilizar uma peça longitudinal de madeira intermediária que faz o interface entre as vigas e o muro de arranque (dormente). Assim, as vigas podem apoiar directamente na peça de madeira horizontal (Fig.3.5) ou também colocarem-se as peças na vertical em relação ao topo retalhando as vigas para criar o entalhe certo (Fig.3.6).

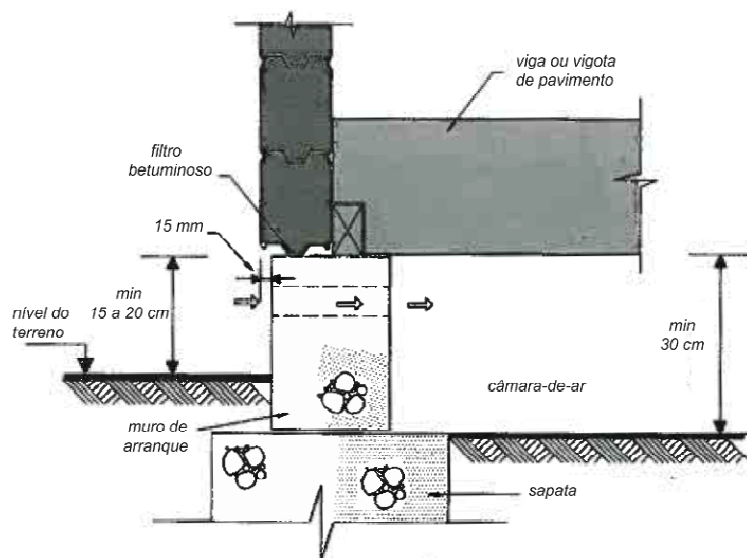


Fig.3.6 - Solução com câmara-de-ar com recorte nas vigas de pavimento

Outras soluções alternativas, passam por amarrar a peça de descarregamento das vigas na face interior do muro (Fig.3.7) ou ocupar todo o muro de arranque com o apoio das vigas, de forma à parede ter que assentar no piso e não directamente na fundação (Fig.3.8). Esta última solução alarga a ventilação da câmara-de-ar mas desprotege as vigas, pelo que devem ser tomadas precauções de resguardo colocando uma viga de cabeceira colocada na perpendicular. As vigas têm normalmente espaçamentos entre 40 e 60 cm. Deve ser controlada a humidade da madeira não devendo ultrapassar os 15%, e as peças em contacto com betão devem ser tratadas com um grau de protecção elevado.

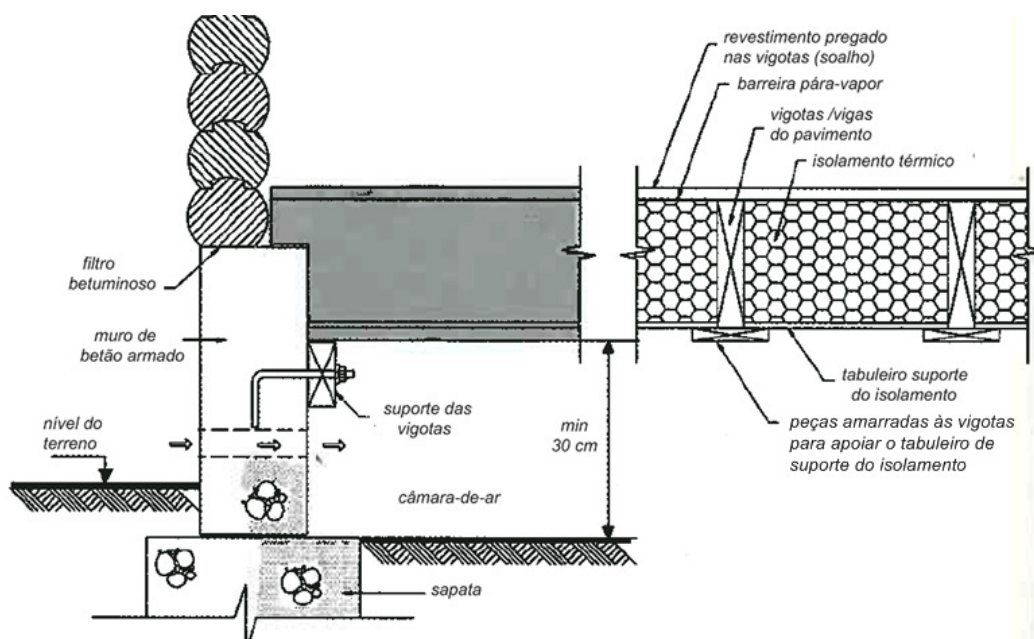


Fig.3.7 - Solução com câmara-de-ar com as vigas a descarregar na face lateral do muro

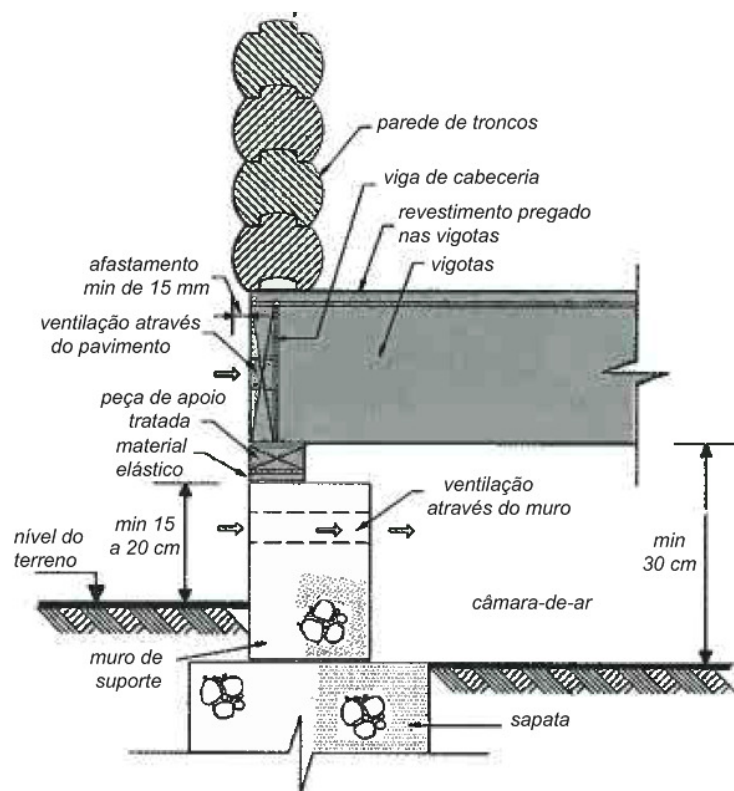


Fig.3.8 - Solução com câmara-de-ar com as vigas apoiadas em toda a largura do muro de suporte

A ligação da parede de troncos ao muro de arranque tem implica também alguns cuidados. A parede deve ficar saliente da face exterior do muro de arranque cerca de 1,5 cm para facilitar a drenagem. A amarração da parede é materializada pela fixação da última peça, podendo ser inteira ou em meia peça dependendo da parede, de três modos (Fig.3.9):

- Varões de aço cravados no muro de arranque e roscados na extremidade oposta onde se encaixa a peça de madeira e se fixa através de porcas com devido entalhe;
- Ligadores metálicos em "L" que se fixam a pequenos varões chumbados no betão e roscados na extremidade por porcas e que se aparafusam à peça de madeira;
- Varões de aço roscados envoltos no muro de arranque, e dotados de um sistema de porcas e anilhas que permite o ajuste da altura e nível da parede.

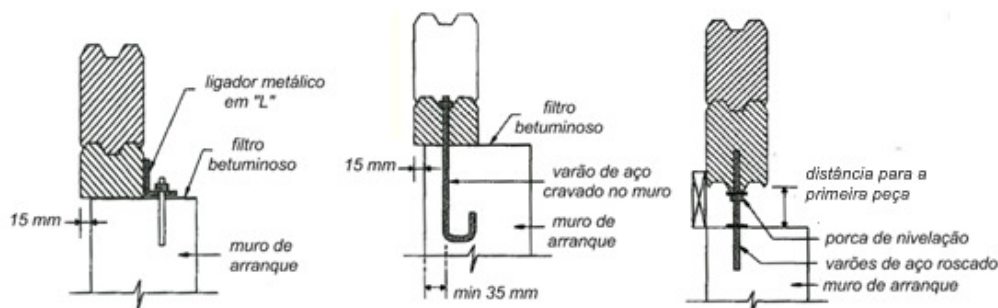


Fig.3.9 – Modos de fixação da parede de troncos ao muro de arranque

### 3.1.1.2. Paredes

A construção por troncos ou pranchas de madeira tem um funcionamento estrutural que se assemelha à dos muros de alvenaria. Este é também o sistema estrutural que permite a maior rusticidade da habitação, dado que permite que a face exterior e/ou interior seja deixada com a textura desejada não existindo necessidade de revestimentos adicionais. Ainda de frisar que, tradicionalmente, os elementos que constituem as paredes se dispõem na horizontal mas também é possível a disposição vertical.

Na posição clássica, ou seja, elementos na horizontal, a madeira fica a trabalhar perpendicularmente a direcção das fibras, pelo que as propriedades mecânicas nesta direcção são 20 a 30 vezes menores que na direcção longitudinal e por isso se aproveitam apenas cerca de 5% da capacidade resistente disponível. Além disso, esta disposição obriga às devidas precauções com a retracção da madeira, o que implica que a parede fique de certo modo desligada de outras estruturas da habitação e das esquadrias da madeira ou então de elementos formados por outros materiais como betão ou pedra.

Os elementos lenhosos horizontais das paredes exteriores inicialmente eram simples troncos que, devido à ligeira forma cónica, levavam a dificuldades no alinhamento superior das paredes e tinham uma pequena superfície de contacto entre peças que dificultava a estanquidade (muitas vezes as juntas eram tapadas com musgos e outros produtos naturais). Posteriormente começaram-se a trabalhar as juntas frisando-se nestas um corte em forma de “V” invertido, que permitia uma maior superfície de contacto. Mais tarde vieram a adoptar-se encaixes macho-fêmea entre peças, fazendo-se a ligação de uma forma forçada (Fig.3.10).

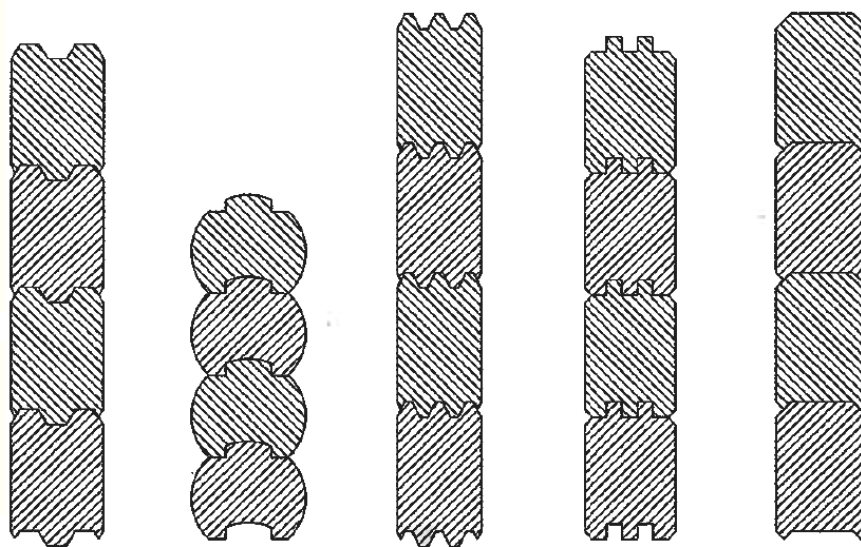


Fig.3.10 – Diferentes secções e ligações das peças constituintes das paredes

A estanquidade das juntas pode ainda ser adjuvada por isolantes colocados no interior dos encaixes pelo que há necessidade de existir uma ligeira folga para alojá-los (Fig.3.11). Os primeiros materiais utilizados eram naturais, normalmente extraídos das próprias árvores, os quais continuam a ser usados na actualidade. Hoje em dia juntam-se a estes materiais naturais, isolantes tais como filtros betuminosos, fibra mineral e vidro de alta densidade entre outros.

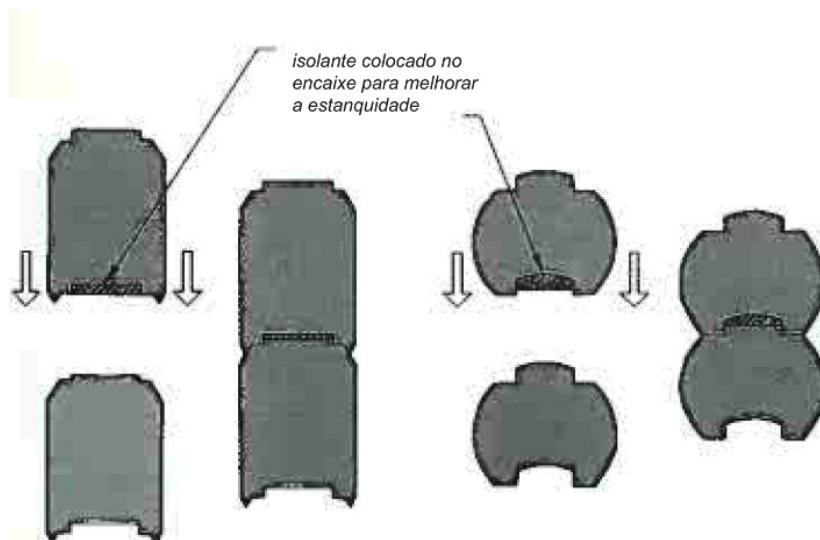


Fig.3.11 – Isolantes nos encaixes das peças constituintes das paredes

É comum, em alguns casos, a utilização de ligadores sob a forma de cavilhas com diâmetro de cerca de 3 cm e 25 cm de comprimento, normalmente de uma madeira dura e que se introduzem em furos previamente cortados (Fig.3.12).

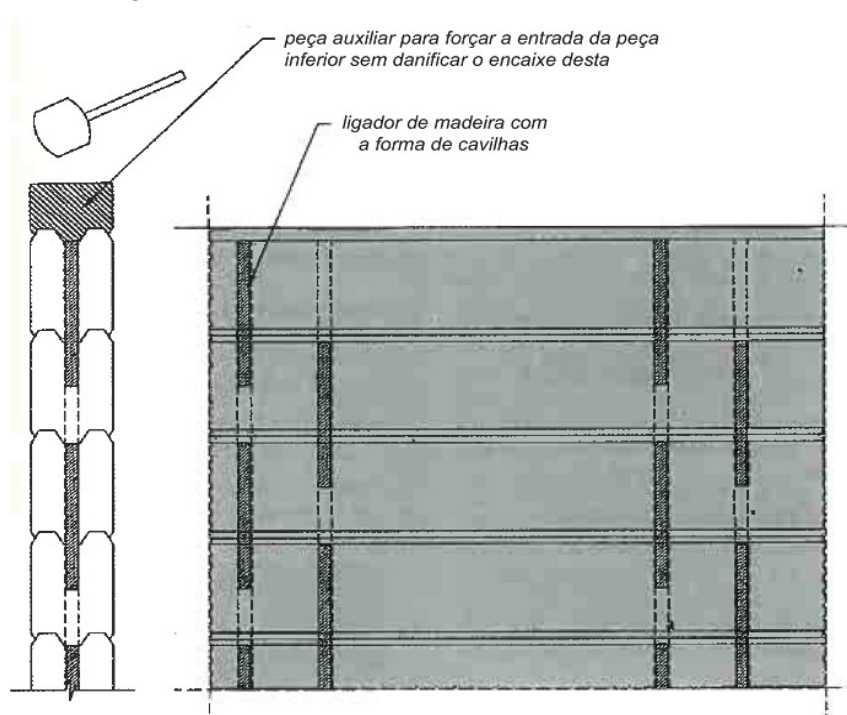


Fig.3.12 – Parede com ligadores de madeira tipo cavilha

Quanto às faces das peças que constituem as paredes, também sofreram alterações, pelo que o aspecto rústico transmitido pelos troncos passou a ter alternativas através da decapagem e polimento da superfície ou então a transformação em faces lisas e aparelhadas, formando secções quadrangulares. Estes vários aspectos podem-se conjugar, como por exemplo, pode-se ter um aspecto rústico pelo exterior e liso pelo interior. De igual modo as paredes duplas são uma realidade neste tipo de

estruturas de madeira sendo que as paredes são constituídas por dois panos, sendo o interior menos espesso e com isolamento entre eles, o que melhora ainda mais capacidade de isolamento da parede.

As dimensões seccionais correntes das peças circulares entre diâmetros são de 110, 120, 130, 140, 150, 170, 190, 210, 220 e 230 mm, enquanto as larguras de secções rectangulares são de 70, 95, 120 e 145 mm. Relativamente aos comprimentos das peças, estes poderão variar entre pequenos de 1,2 a 1,5 metros a maiores e superiores a 3 metros. Esta variedade de dimensões tem obviamente em reflexo vários aspectos desde a própria arquitectura da habitação, como a possibilidade de realizar emendas em locais apropriados e a própria espécie arbórea utilizada. A pré-fabricação contempla, neste sistema construtivo, a numeração de todas as peças que correspondem em detalhe às peças figuradas no projecto.

A madeira que constitui as paredes tem assim funções estruturais, de impermeabilização, de isolamento térmico e acústico e naturalmente de revestimento. As madeiras mais usadas são o *Hemlock*, *Cedro vermelho do ocidente* e o *Cedro branco* nos E.U.A. e Canadá, o *Abeto* e o *Pinho Silvestre* na Europa.

Para criar grandes vãos livres no desenvolvimento de uma parede, por exemplo para aberturas ou janelas de grande desenvolvimento, são utilizados pequenos pilares. Esses pilares devem dispor de um folga de 2 cm por metro linear de pilar para secções quadradas e 3 cm para secções redondas. Além disso, para controlar os assentamentos e retracções da madeira, deve colocar-se um perno/fuso roscado de metal que permita um ajuste de altura no mínimo de 7 cm na base do pilar (Fig.3.13). Quando a abertura está projectada para a base da parede, entre esta e a fundação, o funcionamento é semelhante mas com maior margem de ajuste da altura (Fig.3.14).

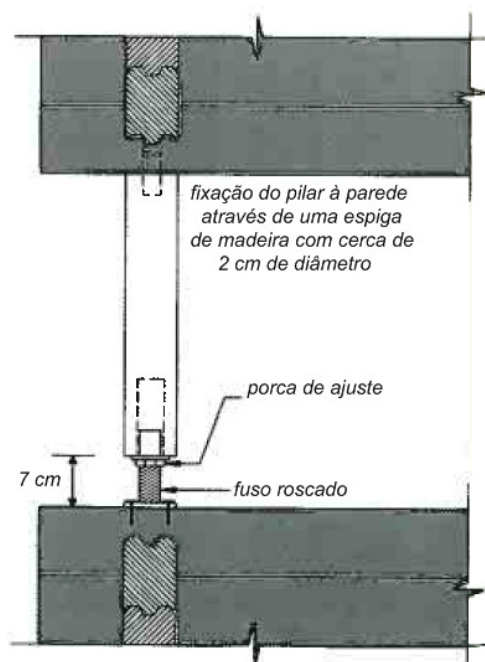


Fig.3.13 – Aberturas de grande desenvolvimento no meio de uma parede

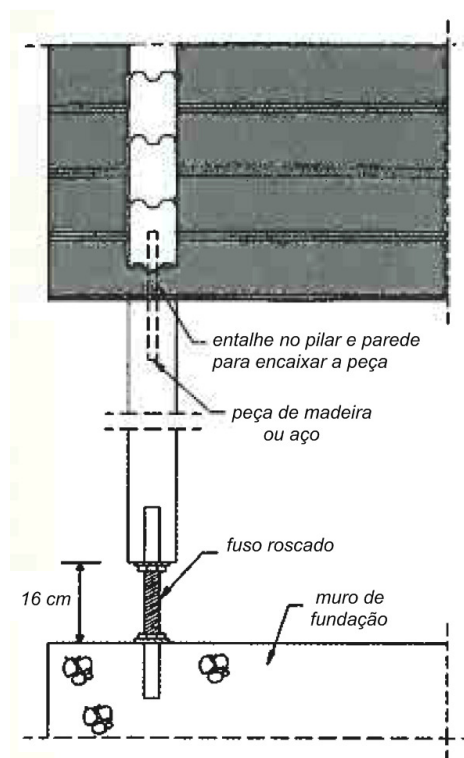


Fig.3.14 - Aberturas de grande desenvolvimento entre a parede e a fundação

A montagem das paredes é fácil e rápida quando conduzida com a melhor preparação e acompanhamento. A partir da terceira peça linear deve começar-se a verificar o nível e o prumo destas. É também depois da terceira linha de madeira que se começam a colocar as cavilhas, de modo a transmitir de imediato maior estabilidade. Deve ter-se em atenção que as peças encaixam perfeitamente e totalmente, utilizando uma ferramenta adequada para bater sobre a madeira mas por intermédio de uma outra peça preparada para não danificar o encaixe, por exemplo tal como se faz na colocação de soalhos (Fig.3.12). O último elemento do muro, que tanto pode ser inteiro como apenas uma porção dependendo da altura total pretendida, une-se à imediatamente inferior por parafusos (Fig.3.15). Do mesmo modo, nas paredes com limite superior com corte inclinado deve fixar-se cada peça à inferior através de um prego com pré-furação na peça superior assim como um pequeno recorte, de forma a criar um pequeno patamar horizontal (Fig.3.15).

O encontro de duas paredes confere o equilíbrio entre elas e às restantes estruturas da habitação. Estas ligações tanto se podem fazer com o prolongamento das peças como sem ele. O seu prolongamento é a mais tradicional e notória característica nas casas de troncos. Existem variadíssimos tipos de ligações que correspondem a diferentes entalhes nas peças, pelo que, na Fig.3.16, estão representados os mais comuns. Também nestes locais se podem colocar isolantes entre os encaixes tal como entre as peças que formam a parede (Fig.3.17). Existem também outras alternativas menos usadas tais como as ilustradas na Fig.3.18.

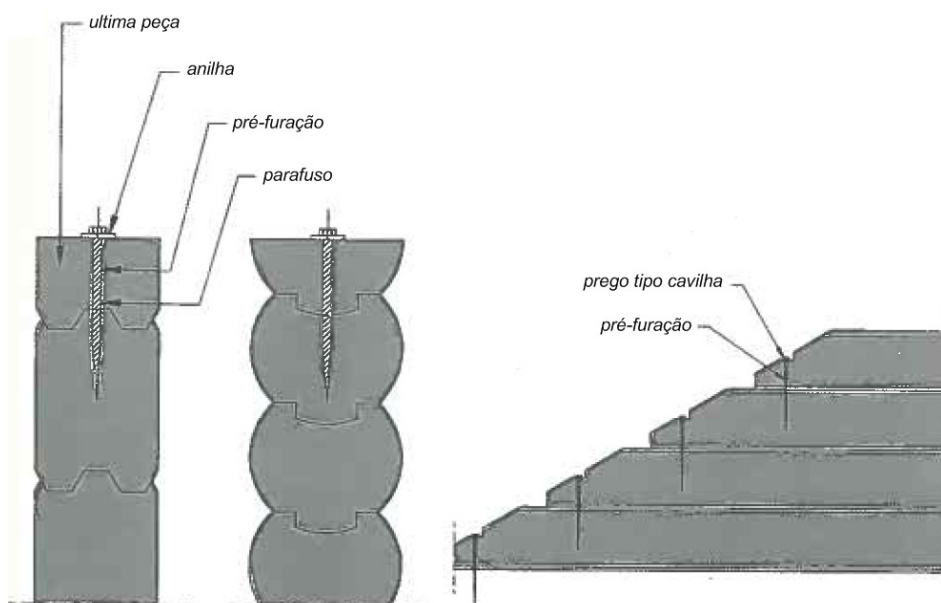


Fig.3.15 – Fixação das peças remate das paredes

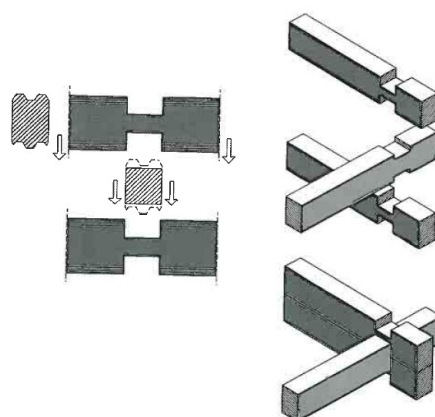


Fig.3.16 – Ligações de paredes mais comuns

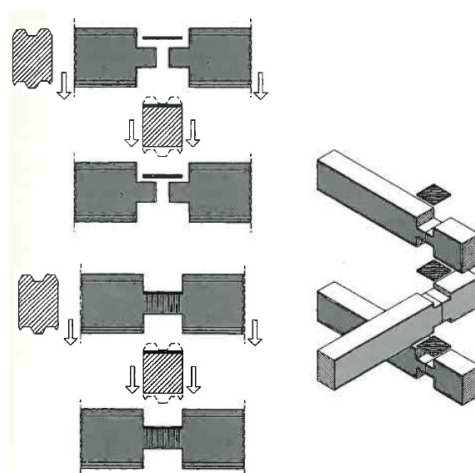


Fig.3.17 – ligações entre paredes com isolante

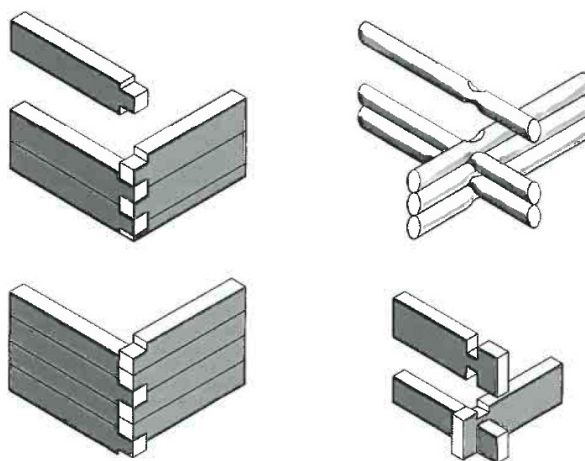


Fig.3.18 – Ligações menos comuns

Por vezes são usados tirantes metálicos nos prolongamentos de topo das paredes de forma a conferir à partida maior resistência e antecipar o carregamento futuro, isto através da transmissão de um tensionamento nos tirantes proporcionado por um sistema de porcas e anilhas (Fig.3.19). Podem também colocar-se noutras zonas da parede, junto a janelas e portas principalmente. Estes acessórios permitem ainda acertar o nível da parede por ajustes adequados nos tirantes certos durante a construção e controlar os assentamentos e retrações da madeira que devem ser verificados pelo menos após o primeiro ano depois da conclusão da obra.

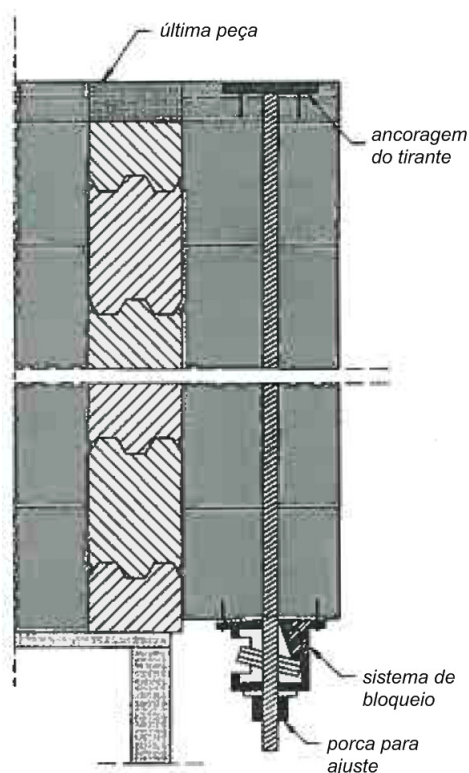


Fig.3.19 – Tirantes metálicos para paredes

Os assentamentos nas paredes de troncos podem ser mais ou menos significativos dependendo de várias condicionantes. A espessura da parede, secção da peça, espécie de madeira e condições ambientais exteriores e interiores são dominantes. Assim, para uma habitação em clima boreal, o assentamento numa parede de troncos exterior pode variar entre 1 cm e 5 cm por metro linear em altura de parede e entre 1 cm e 10 cm nas paredes interiores. No entanto, em outros climas, como por exemplo o clima Mediterrâneo, estes intervalos podem inverter-se havendo mais assentamento nas paredes exteriores.

As aberturas nas paredes de troncos necessitam de vários cuidados em consequência dos assentamentos anteriormente referidos e por se tornarem pontos vulneráveis a infiltrações. Normalmente na pré-fabricação as peças já vêm cortadas e os cortes transversais que ficam expostos nas aberturas, como janelas ou portas, são impermeabilizados (Fig.3.20).

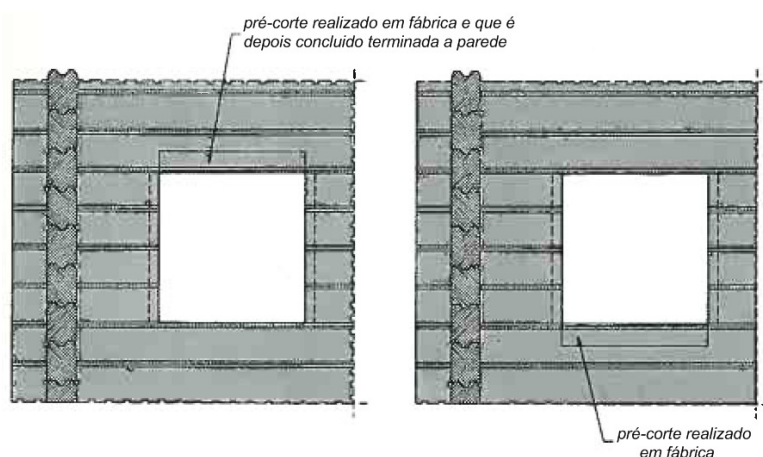


Fig.3.20 – Pré-corte nas peças para as aberturas

Além disso, as aberturas são preparadas para receber um pré-aro fazendo-se um entalhe nos topos que funciona como um encaixe macho-fêmea (Fig.3.21). Procura-se normalmente que as aberturas tenham a altura correspondente a um certo número de peças completas para evitar recortes. Os pré-aros encaixam na ranhura da parede mas com o cuidado de se deixar folga de pelo menos 2 cm por cada metro de altura de abertura para permitir naturalmente o assentamento da parede, do mesmo modo que também não se deve fixar o pré-aro na parede, para permitir os movimentos desta.

Tal como em todas as estruturas habitáveis, é necessário certificar a impermeabilização das paredes de troncos de madeira, acautelar infiltrações e proteger os locais mais vulneráveis a chuvas e ascensão de humidade. Assim, a primeira peça da parede deve ficar distanciada do terreno de pelo menos 15 a 20 cm sendo que algumas regras indicam 30 a 40 cm e tal como outros pormenores já foram detalhados na descrição das fundações (ver Fig.3.5 a Fig.3.8). Outras prevenções passam pela colocação de caleiras que protegem a parede da chuva oblíqua e pela definição do desenho das paredes e juntas que facilitem o escoamento da água e evitem a acumulação nas juntas. As secções de corte perpendiculares à direcção das fibras nas esquinas são também pontos preocupantes podendo assegurar-se à partida um aumento da secção, colocação de peças de protecção ou então a sua impermeabilização. As fendas normalmente não são problemáticas pois não chegam a metade da secção, dependendo obviamente da localização da peça no toro quando se tratam de peças de perfil quadrangular. Uma peça que não pertença à zona central do toro tem fendilhação menos profunda e melhor comportamento isolante.

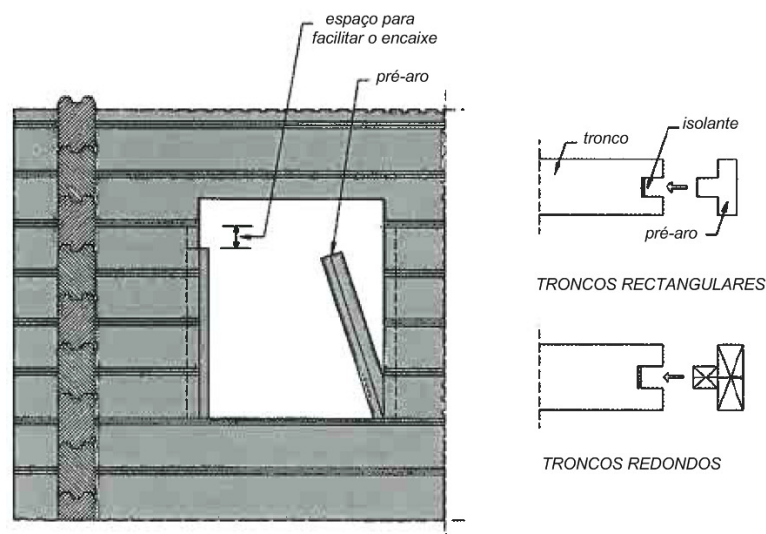


Fig.3.21 – Pormenorização dos pré-aeros

O isolamento térmico das paredes de troncos pode ser realizado apenas pela capacidade isolante da própria madeira. No entanto, para maiores exigências, pode-se acrescentar no pano interior um isolante térmico que obriga à montagem de uma armação simples de suporte (em madeira ou outro) e para reter o isolante e servir de apoio ao revestimento interior (Fig.3.22). Esta solução de parede de duplicação interior pode ser acrescida ainda de uma barreira pára-vapor. De realçar também que a armação de suporte deve fixar-se ao muro de troncos de modo a permitir o livre movimento na direcção vertical tal como uma folga na parte superior que pode ser preenchida por isolante elástico. Quando realizado em madeira, os elementos verticais da armação normalmente ficam separados entre 40 a 60 cm apoiando num dormente e amarrados às peças que constituem o pano exterior através de ligadores metálicos deslizantes.

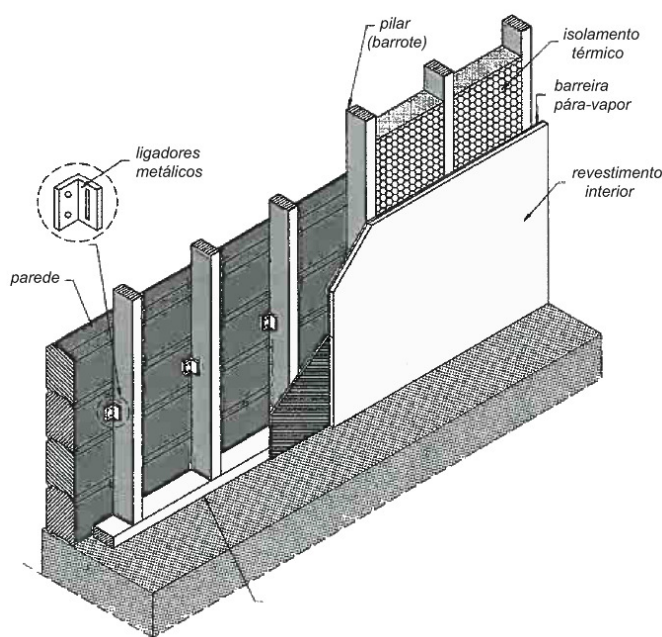


Fig.3.22 – Paredes de troncos com isolamento extra

As instalações eléctricas neste tipo de paredes têm que ser planeadas. Devem fazer-se furações nas peças antes de proceder à montagem das mesmas para poder conduzir os cabos às tomadas e interruptores, concebendo também cavidades para estes. O problema não se coloca nas paredes que têm isolamento térmico extra sendo que, nas situações correntes, a instalação eléctrica se realiza no espaço da armação de suporte (Fig.3.23 à esquerda).

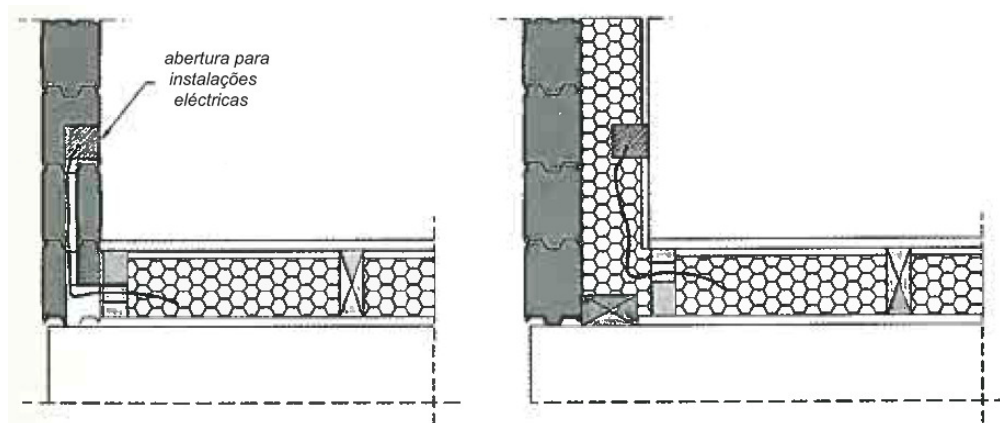


Fig.3.23 – Instalações eléctricas nas paredes de troncos

### 3.1.1.3. Divisórias

As paredes divisórias consistem, de um modo geral, numa armação de esbeltas peças de madeira que asseguram o suporte aos revestimentos e opcionalmente ao isolamento. Assim, a armação corresponde à interligação de elementos verticais (barrotes) e elementos horizontais (testeiro superior, testeiro inferior e lintéis das aberturas), sendo o espaçamento habitual entre barrotes de 60 cm. Pode haver necessidade de acrescentar elementos de apoio para a fixação de instalações eléctricas e hidráulicas (Fig.3.24).

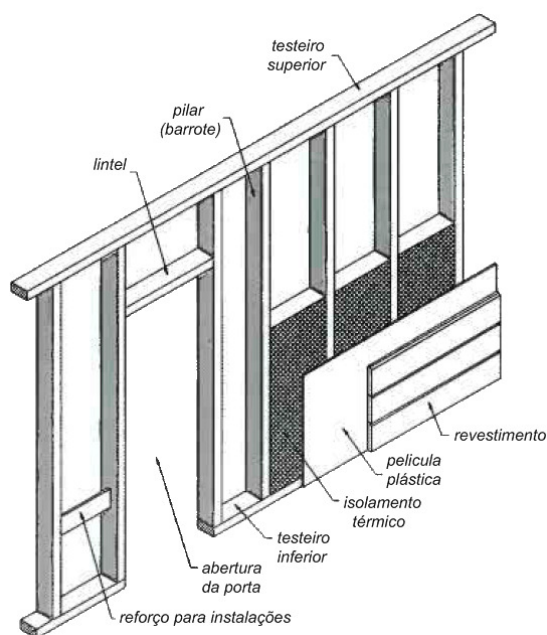


Fig.3.24 – Paredes divisórias

As ligações das divisórias à restante estrutura da casa têm vários condicionantes de forma a possibilitar o livre movimento das paredes de troncos e consequentemente dos pisos. Deve concluir-se primeiro o revestimento de tecto antes de avançar para as divisórias e o testeiro superior deve ficar afastado cerca de 5 cm para permitir assentamentos. A ligação é materializada por pernos de aço, espaçados cerca de 1 metro, soldados a uma anilha que fica agarrada entre as vigas do piso superior. Estes pernos encaixam em furações feitas no testeiro superior, sendo a folga opcionalmente preenchida por um isolante elástico e escondido por um remate que apenas fica ligado ao revestimento do tecto (Fig.3.25).

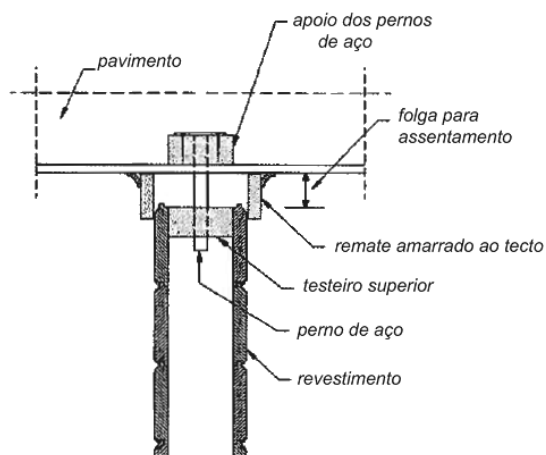


Fig.3.25 – Ligação entre divisórias e tecto

Quanto à ligação parede divisória – parede de troncos, existem três formas mais comuns de fazer a ligação livre de movimento vertical. A ligação através de um pré-aro que encaixa na parede principal, a ligação conseguida apenas com o entalhe do revestimento da divisória, ou então encaixe dos barrote extremos da parede secundária na parede de troncos (Fig.3.26).

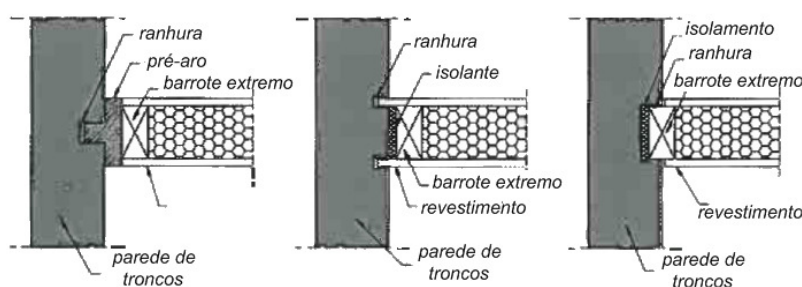


Fig.3.26 – Ligação entre divisórias e paredes principais

#### 3.1.1.4. Pisos

Os pisos são constituídos por vigas ou vigotas apoiadas nas paredes de troncos ou vigas de troncos e, quando necessário, travadas por tarugos. O pavimento superior aplicado é normalmente soalho de madeira, preferencialmente com uniões machedas. Para este tipo de habitações, em que as paredes têm a total responsabilidade de suporte vertical, os vãos situam-se entre os 3 e os 6 metros e o espaçamento de vigas do piso estabelecem-se normalmente entre os 30 a 60 cm (Fig.3.27).

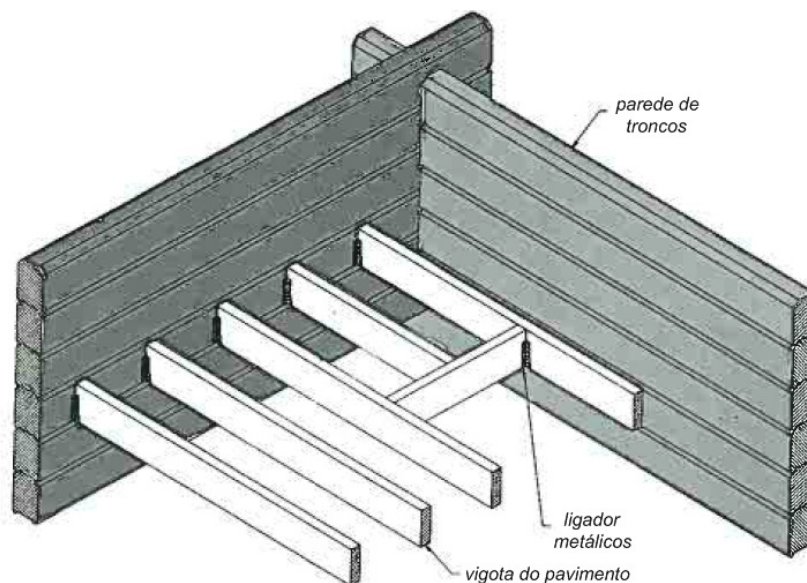


Fig.3.27 – pavimento e ligação às paredes

A ligação do piso à parede é feita através da fixação das vigas que o constituem à parede. Esta junção é concretizada por ligadores metálicos que são aparafusados à respectiva viga e à parede de suporte (Fig.3.27). Também existe a possibilidade de simplesmente apoiar as vigas no topo da parede nas situações em que a altura da parede corresponde à altura do piso. Neste caso, o método adoptado é descrito nas casas de estrutura ligeira.

As aberturas que necessitem de ter maior dimensão que a distância entre vigas, implicam a interrupção de uma ou mais vigas e a utilização de uma peça de madeira perpendicular às vigas que descarregue a carga das vigas cortadas nas vizinhas. As diversas ligações decorrentes da abertura são feitas através de ligadores metálicos.

O isolamento térmico apenas é necessário nos pisos extremos, ou seja no imediatamente encostado ao solo, assim como ao superior, quando não existir isolamento nas vertentes da cobertura. O isolamento é feito entre as vigas, sob o revestimento de pavimento e sobre o revestimento de tecto. O isolamento acústico, quando necessário, é aplicado nos mesmos moldes do térmico.

#### 3.1.1.5. Coberturas

As coberturas das habitações de troncos são normalmente coberturas a duas águas. As vertentes podem ser formadas pela elevação de duas paredes opostas nas quais apoiam a cumeeira/fileira e restantes madres e depois cruzadas com vigotas, similares às varas no sistema de asnas (Fig.3.28), ou então através de asnas usualmente pré-fabricadas.

Na primeira solução, antes de avançar com a construção da cobertura propriamente dita, mais exactamente a colocação das vigotas, deve sempre verificar-se a horizontalidade e linearidade das paredes onde estas apoiam para que não sejam ultrapassadas diferenças de 2 cm. Se for ultrapassada a margem fixada deve recorrer-se aos tirantes metálicos, anteriormente citados, para proceder às devidas correcções. Quando existem mais que dois apoios para cada vigota (parede, madre e fileira por exemplo), deve também corrigir-se o alinhamento, se este ultrapassar um desnível de 1 cm entre paredes consecutivas. Neste caso o acerto deve passar por fazer um rebaixamento nos apoios e não nas vigotas.

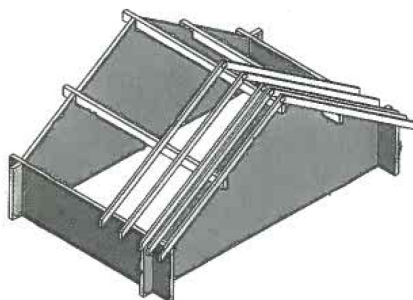


Fig.3.28 – Cobertura realizada através da elevação das paredes extremas

As vigotas têm normalmente uma disposição de espaçamento que varia entre 40 e 60 cm e são normalmente fixadas sobre a fileira por placas metálicas fixas (Fig.3.29) e à parede exterior por placas metálicas deslizantes (Fig.3.30), para evitar esforços que seriam introduzidos pelos assentamentos das paredes. Quando uma vigota se localiza na proximidade de uma parede exterior paralela a esta deve duplicar-se colocando uma de cada lado e aplicar isolante na zona no interface.

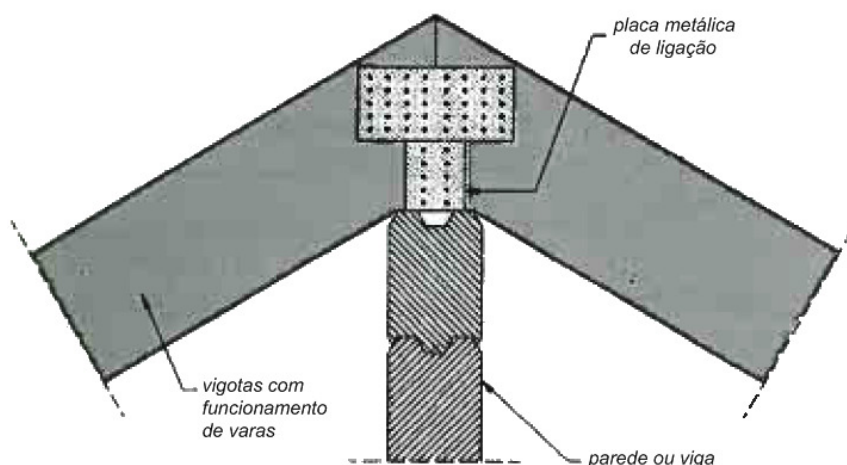


Fig.3.29 – Ligação das varas sobre a fileira

Para as aberturas, o par ou pares interrompidos são ligados aos vizinhos através de uma vigota transversal e unidos por ligadores metálicos tal como se faz nos pavimentos. Aberturas para chaminés devem ser tratadas com especial cuidado deixando folga suficiente e com isolante de forma a esta não ficar em contacto com madeira. O espaçamento entre vigotas, sobre as paredes exteriores, deve ser tapado com tábuas de madeira mas deixando uma folga no mínimo de 2 cm para ventilar a madeira da cobertura e protegida com rede mosquiteira (Fig.3.31).

Nas coberturas onde se utilizam, como elementos estruturais, as asnas, estas têm sido construídas principalmente através da pré-fabricação. São feitas com peças de madeira normalmente de pequena dimensão e por isso mais rendilhadas que a asna tradicional. As ligações das asnas são usualmente feitas por conectores metálicos dentados e por ligação à restante estrutura da casa por ligadores metálicos normais (Fig.3.32). Consegue-se atingir vãos até vinte metros em habitações sem sótão. Em coberturas de geometria mais complicada ou mesmo por opção do projectista é também frequente utilizar a asna tradicional.

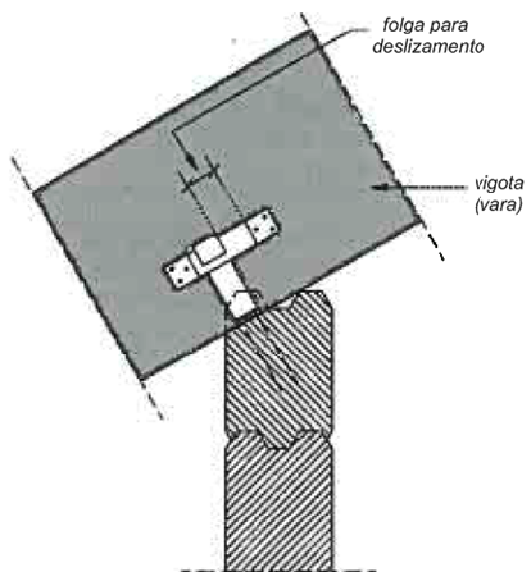


Fig.3.30 – Ligação das varas à parede exterior

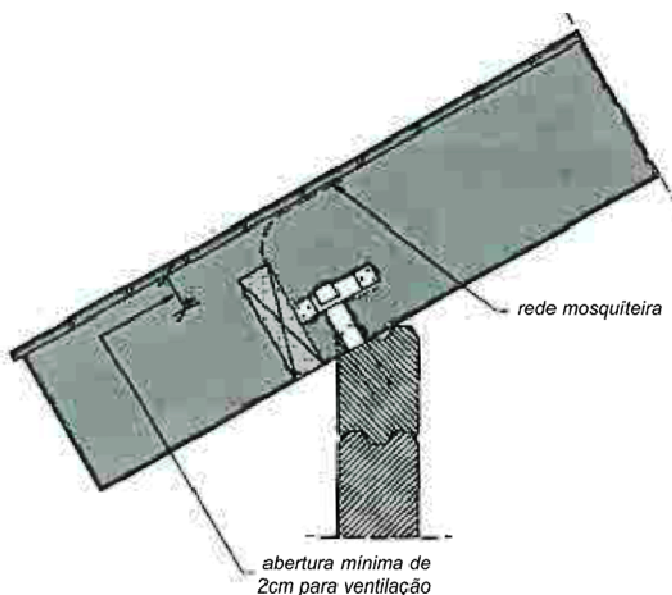


Fig.3.31 – Remate das varas sobre as paredes exteriores

O tapamento da cobertura pode ser realizado com tábuas de madeira ou outro material. Para o caso da madeira, o tapamento deve prolongar-se um pouco além das varas para servir de goteira e deixar uma folga entre o revestimento de telha ou outro, para ventilação. Sob o tapamento colocam-se anteriormente todas as protecções, ou seja, caixa-de-ar no mínimo de 5 cm, barreira impermeável respirante, isolamento térmico, barreira pára-vapor e revestimento interior (madeira ligada por sistema macho-fêmea). Dependendo do sistema estrutural usado a localização da protecção varia. Para o sistema de vigotas, deve ser aplicada entre o espaçamento destas e segundo a vertente do telhado. Já no sistema de asnas, toda a protecção é aplicada junto à linha e por isso na horizontal, sendo que a caixa-de-ar é toda a cavidade formada pela altura das asnas. Para habitações com sótão o método terá que ser adaptado no caso das asnas havendo necessidade de isolar também as paredes de topo pelo mesmo processo das restantes paredes exteriores já citado.

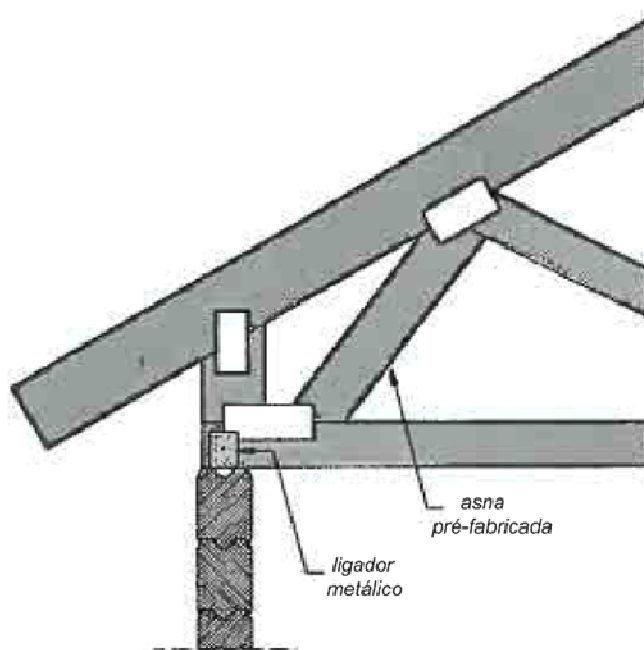


Fig.3.32 – Asna pré-fabricada

### 3.1.2. CASAS DE ESTRUTURA PESADA (HEAVY FRAMING)

O sistema construtivo de estrutura pesada nasceu na Europa na Idade Média e foi depois levado para as zonas do mundo com tradição na construção em madeira. É um sistema mais sofisticado que a construção em troncos dado que tem perfeitamente definida a estrutura de suporte, podendo assim atingir maiores dimensões em altura e formar mais pisos além do rés-do-chão e sótão.

As casas de estrutura pesada têm então características diferenciadoras que passam por:

- A concepção pode ser composta por pórticos de madeira ou por uma estrutura mista de madeira e outro material;
- Solução com peso próprio mais elevado;
- A estrutura é independente dos restantes elementos da casa, funcionando como um esqueleto e onde os esforços principais actuam na direcção paralela às fibras;
- Conseguem-se atingir vãos maiores e na conjugação com outros materiais alturas até seis pisos;
- São criados espaços com maior aproveitamento na cobertura para sótão;
- Existe já um bom nível de pré-fabricação de elementos para este sistema estrutural que o coloca de novo com competitividade;
- As peças são desmontáveis o que torna uma alteração futura na habitação mais facilitada.

Dentro do próprio método de projecto existem variantes que incluem o sistema de pórticos, o sistema contraventado com diagonais semelhante à gaiola pombalina e o sistema de nós rígidos. O primeiro (Fig.3.33) é formado por um sistema de pórticos autoportantes e independentes dos restantes elementos da casa, sendo a rigidez conseguida por elementos diagonais nos cantos e uma peça transversal a ligar os pórticos que funciona como estribo. O sistema contraventado com diagonais (Fig.3.34) é caracterizado por uma armação forte com elementos verticais portantes, horizontais e diagonais. Distingue-se do sistema de pórticos principalmente pelos pés direitos inferiores e pelas diagonais que atravessam toda a altura da parede funcionando esta como um muro. O sistema de nós

rígidos é semelhante ao de pórticos com a particularidade de a rigidez ser criada na ligação sem necessidade de diagonal de canto, ou seja, de triangulações.

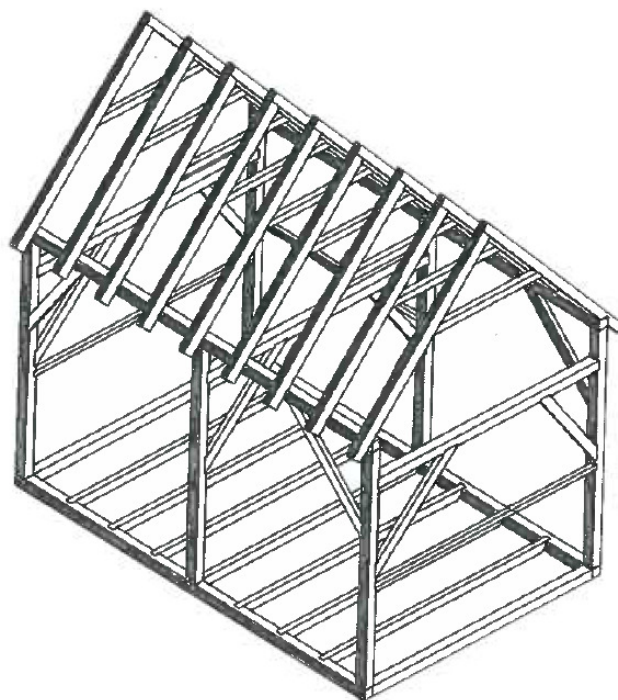


Fig.3.33 – sistema de pórticos

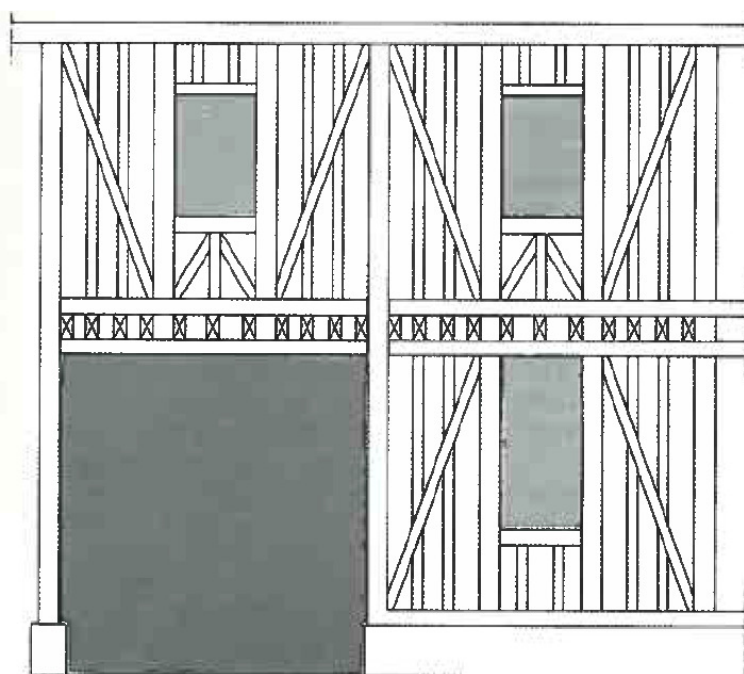


Fig.3.34 – Sistema contraventado com diagonais semelhante à gaiola pombalina

Este método de construção pesado também tem como característica a utilização de ligações pelo simples encaixe de madeira através de uma geometria que consegue transmitir os esforços de uma peça a outra transformando-os em solicitações de corte e compressão. Quanto mais perfeita e ajustada for a ligação conferindo maior área de contacto e menor deformação, maior rigidez pode ser atingida. Também se podem adicionar cavilhas de madeira mais dura que elevam ainda mais a rigidez da ligação. Para cada tipo de esforço, deve escolher-se o tipo de encaixe mais adequado. Hoje em dia os ligadores metálicos de chapas ou parafusos e porcas são correntemente mais usados dada a maior facilidade de concepção e aplicação e assim maior rentabilidade. As ferramentas e máquinas modernas têm dado uma renovada competitividade e qualidade às ligações por encaixe sendo o seu dimensionamento praticamente realizado sem cálculo dado a quantidade de soluções tipo que a experiência criou.

A humidade da madeira nesta solução construtiva é um factor importante pois a secção das peças é elevada tornando-se complicado controlá-la. Normalmente é necessário cerca de um ano de secagem para atingir a humidade pretendida quando realizada ao ar livre. Do mesmo modo, a abertura de fendas coloca problemas e com especial cuidado para as aberturas mais comuns na zona dos cortes para os encaixes.

#### *3.1.2.1. Fundações*

As fundações das habitações de estrutura pesada são constituídas por sapatas corridas onde se utiliza uma peça de madeira como base horizontal (dormente) para o arranque da estrutura, ou então sapatas isoladas para o caso de pilares independentes. Antigamente, o material usado era a alvenaria de pedra sem qualquer argamassa de ligação para permitir o arejamento da base e opor-se à subida de humidade por capilaridade. Como é óbvio a alvenaria veio a ser substituída pelo betão como material para as fundações.

As condições impostas para as fundações nas casas de estrutura pesada são semelhantes às do sistema estrutural de troncos. O elemento em betão deve elevar-se do terreno cerca de 15 a 20 cm para prevenir a ascensão de humidade e salpicos de água até à madeira possibilitando também ganhar altura para os isolamentos e caixa-de-ar sob o pavimento do rés-do-chão. Sobre o muro de betão é colocado uma peça de madeira com cerca de 20 cm de lado funcionando como dormente que serve de base para os elementos verticais que elevam a estrutura e para as vigotas do primeiro pavimento. Entre o dormente e o muro de betão deve aplicar-se uma tela impermeável e ligar os dois com elementos metálicos, sendo também usual proteger o dormente com protecção de impregnação.

#### *3.1.2.2. Sistema de Pórticos*

O sistema de pórticos arranca então com o primeiro pavimento, constituído por vigotas que assentam em dois dormentes perpendiculares que por sua vez são travados por outros dois dormentes paralelos às vigotas (Fig.3.35). As ligações entre dormentes são realizadas em caixa e espiga e as ligações dormentes - vigotas à meia madeira. Pode também reduzir-se a altura das vigotas nas extremidades de forma aos entalhes nos dormentes não reduzirem demasiado a secção (Fig.3.36). Quanto à protecção nas madeiras e isolamentos devem ser semelhantes às das casas de troncos para os pavimentos de rés-do-chão.

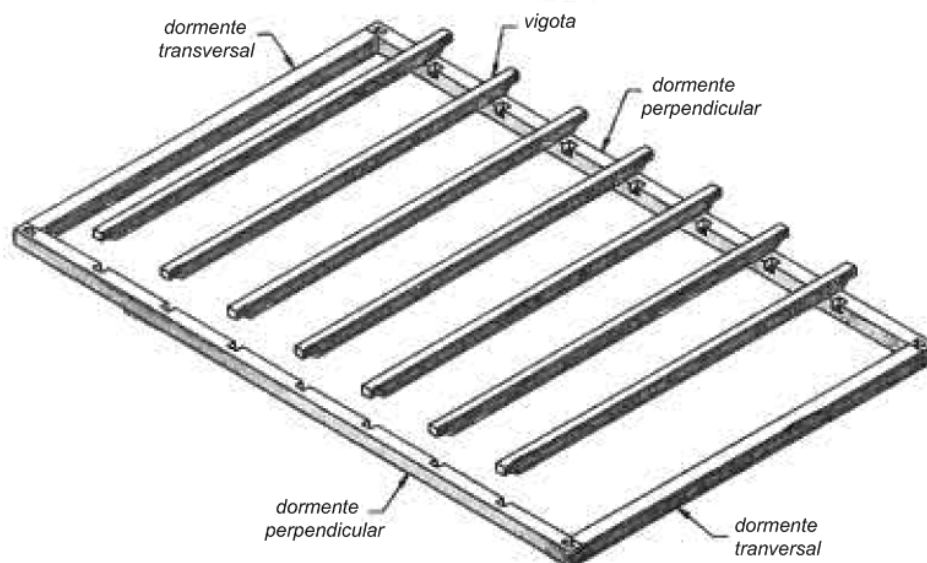


Fig.3.35 – Pavimento do rés-do-chão no sistema de pórticos

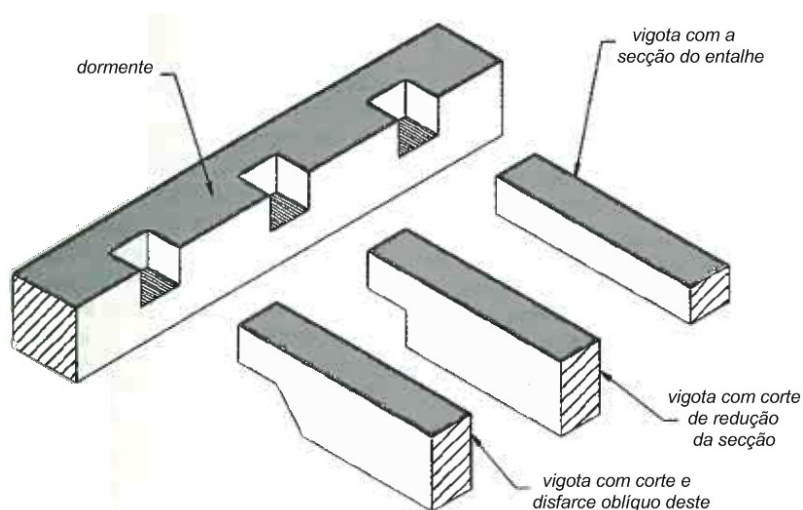


Fig.3.36 – Ligações entre vigotas e dormentes

Para os pórticos propriamente ditos, os pilares são preparados com caixas para receber as espigas da viga, diagonais e estribos. Os pilares ligam-se por espigas aos dormentes preparados com caixas. Em todas estas ligações são usadas cavilhas geralmente de uma madeira dura (Fig.3.37). As ligações devem ser ensaiadas na obra ou oficina, antes da montagem final.

A montagem dos pórticos é realizada em duas fases. A primeira consiste em montar todos os pórticos que funcionam na mesma direcção ligando viga, pilares e diagonais, trabalho que se pode realizar até mesmo no solo. Levantados e fixados aos dormentes, os pórticos ficam prontos a receber as vigas que os ligam, ou seja os estribos, e diagonais para formar os pórticos perpendiculares. A estrutura fica assim contraventada em ambas as direcções. Quando o pé direito é elevado, podem colocar-se ainda travessas nos pórticos, abaixo das diagonais, para reduzir o comprimento de encurvadura dos pilares (Fig.3.38).

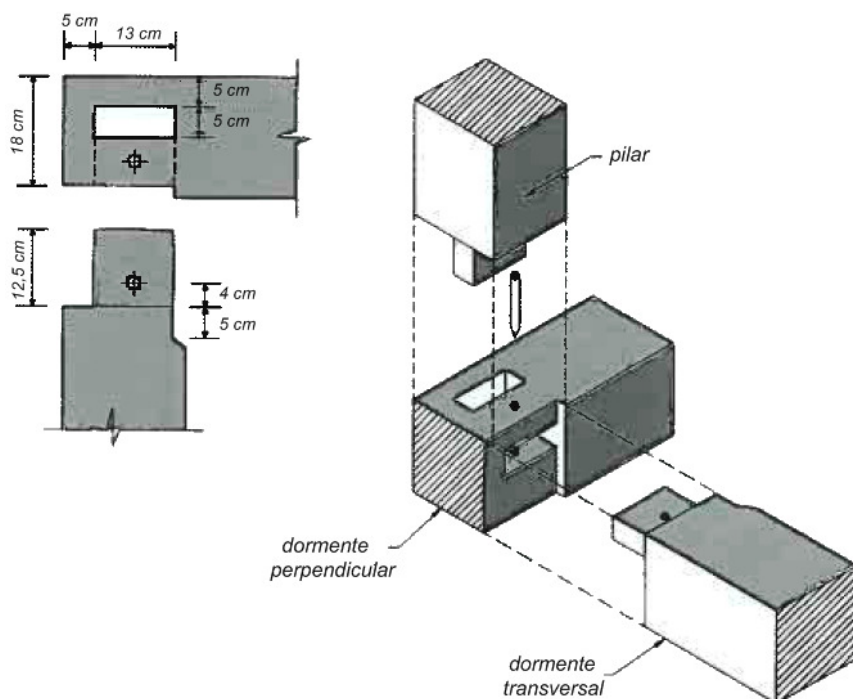


Fig.3.37 – Ligações entre pilares e dormentes e dimensões características

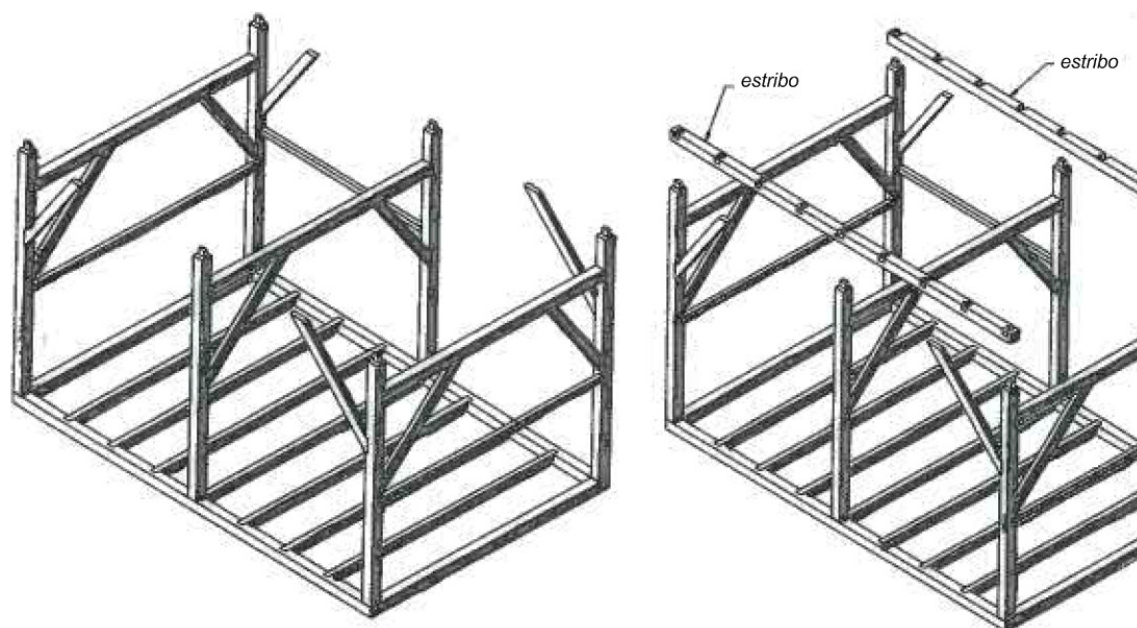


Fig.3.38 – Montagem do sistema de pórticos

Em habitações correntes, o dimensionamento de todas as peças é ultrapassado pela experiência e rotina abrindo assim portas para a pré-fabricação. Pode haver necessidade de verificar secções críticas como entalhes e ligações que reduzam demasiado a secção das peças. Para estruturas singulares e de porte maior é necessário realizar um cálculo estrutural idealizando um sistema de barras espacial ou, mais simplificada, em vários sistemas planos.

### 3.1.2.3. Sistema contraventado com diagonais semelhante à gaiola pombalina

Esta alternativa na construção de estrutura pesada contraventada com diagonais é caracterizada por paredes constituídas por elementos fortes com separações reduzidas. Estruturalmente funciona como um muro de carga onde a madeira trabalha na direcção paralela às fibras e é contraventado através de elementos colocados na diagonal (Fig.3.39).

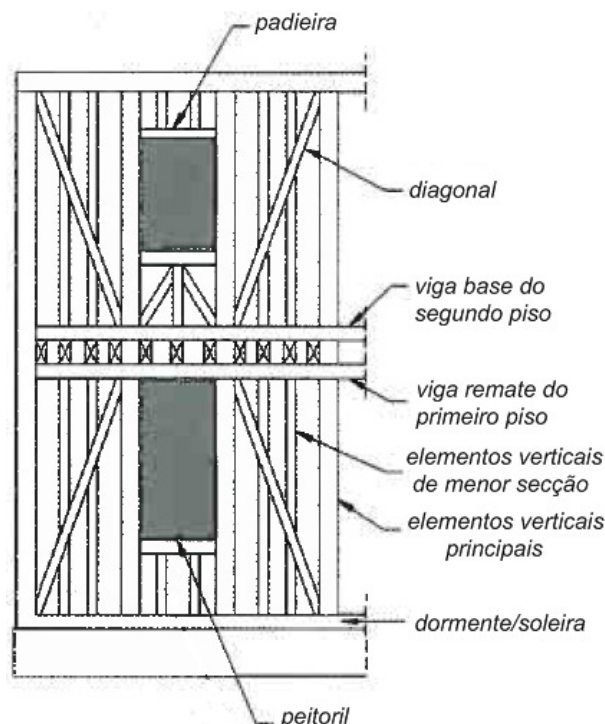


Fig.3.39 – Detalhe do sistema contraventado com diagonais

Tal como no sistema de pórticos todas as uniões de peças se realizam normalmente por ligação de caixa e espiga. No entanto, neste sistema construtivo as ligações são menos complexas dado que são menos solicitadas. Para habitações com dois e três pisos a estrutura torna-se mais emaranhada. A construção assenta assim numa soleira de madeira sobre a fundação da qual se erigem elementos de maior secção formando o pé direito. Entre estes colocam-se peças verticais de menor secção e uma outra peça diagonal de travamento entre elas. Os elementos verticais são rematados por uma viga que serve também de apoio às vigotas do pavimento do primeiro piso (Fig.3.39). Sobre as vigotas fixa-se uma outra viga que serve de apoio à nova parede e assim sucessivamente até concluir com uma viga remate que servirá de apoio á cobertura. (Fig.3.40). Em paredes de habitações de menor dimensão as paredes podem ser executadas de forma mais simples e até mesmo algumas das ligações podem ser realizadas à meia madeira.

O tapamento das paredes é efectuado enchendo as aberturas entre os elementos principais com materiais cerâmicos ou vegetais com argila por exemplo. É daqui que se identificam grandes semelhanças com a gaiola pombalina usada em Portugal.

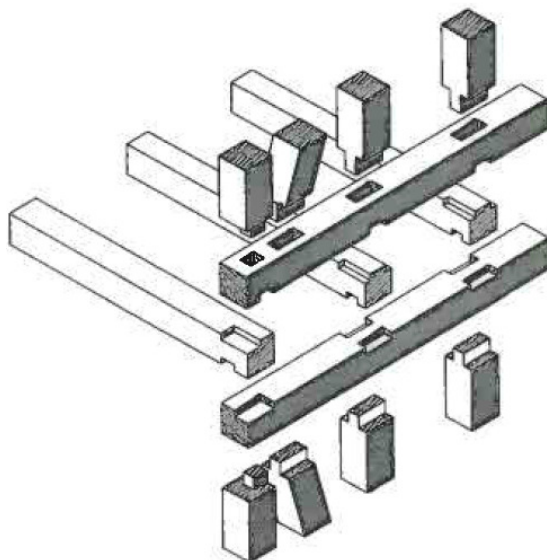


Fig.3.40 – Pormenorização da ligação entre pavimento e paredes

#### 3.1.2.4. Pavimentos

Os pavimentos nas casas de estrutura pesada são de concepção semelhante para os sistemas de pórticos e contraventado com diagonais, tal como não diferem muito dos pavimentos das casas de troncos. São compostos pelas vigotas que apoiam em estribos, vigas ou dormentes dependendo da localização, com espaçamentos entre 40 a 60 cm (Fig.3.41). O pavimento completa-se com soalho de madeira ou sistema de placas, e sempre que necessário terá que se providenciar isolamentos térmico e acústico tal como nas habitações de troncos.

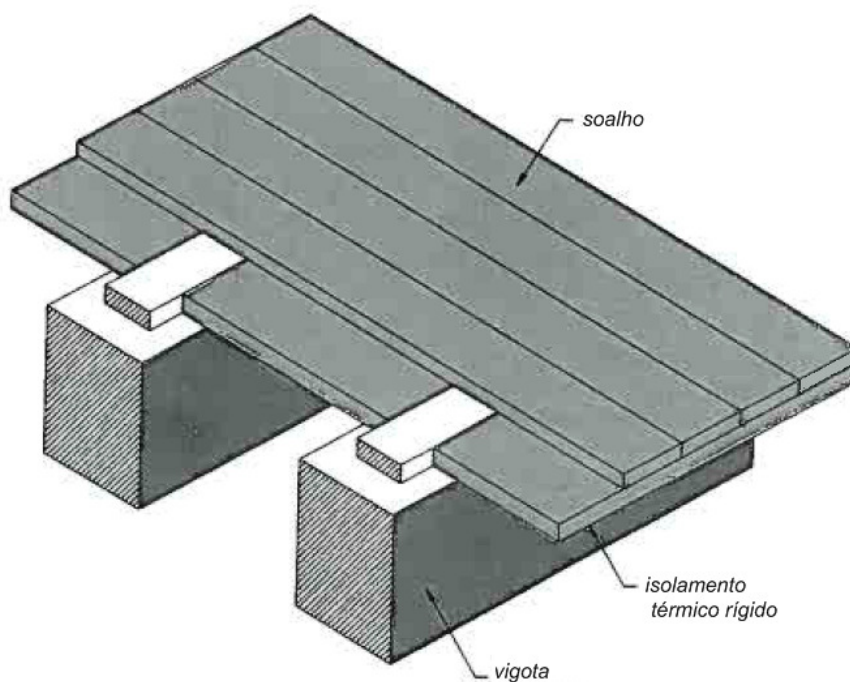


Fig.3.41 - Pavimentos

### 3.1.2.5. Coberturas

As coberturas passam normalmente por três opções de concepção. A primeira passa por uma espécie de asna simplificada só com pernas e linha sem pendural, a segunda pelas pernas ligadas por uma travessa, ou seja, espécie de linha subida que funciona também á tracção. A terceira na aplicação da asna tradicional principalmente quando é necessário vencer maiores vãos.

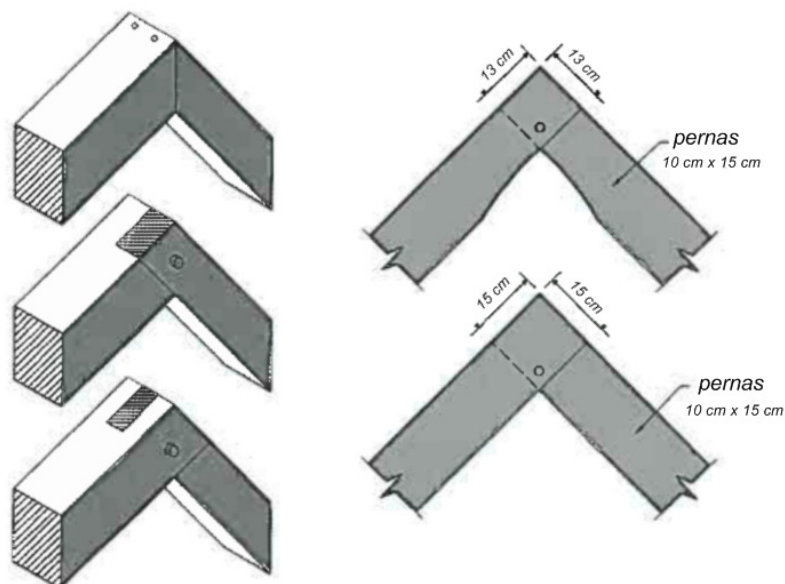


Fig.3.42 – Ligação entre pernas e dimensões características

A ligação entre pernas pode ser simplesmente à meia madeira com cavilhas ou de maior complexidade dependendo dos esforços a resistir, podendo ainda juntar-se cola à ligação (Fig.3.42). A ligação entre as pernas e a travessa é feita com um pequeno entalhe na perna e depois ligação de caixa e espiga e com apenas uma cavilha grande diâmetro para permitir rotações. (Fig.3.43). A ligação entre as pernas e a linha é realizada da forma tradicional. No caso da ligação directamente entre pernas e estribos a ligação é efectuada segundo ilustrada na (Fig.3.44).

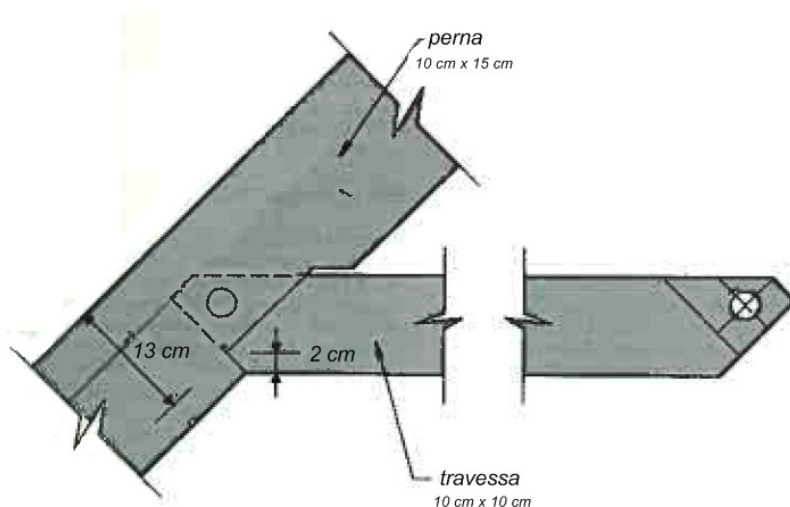


Fig.3.43 – Ligação entre pernas e travessa

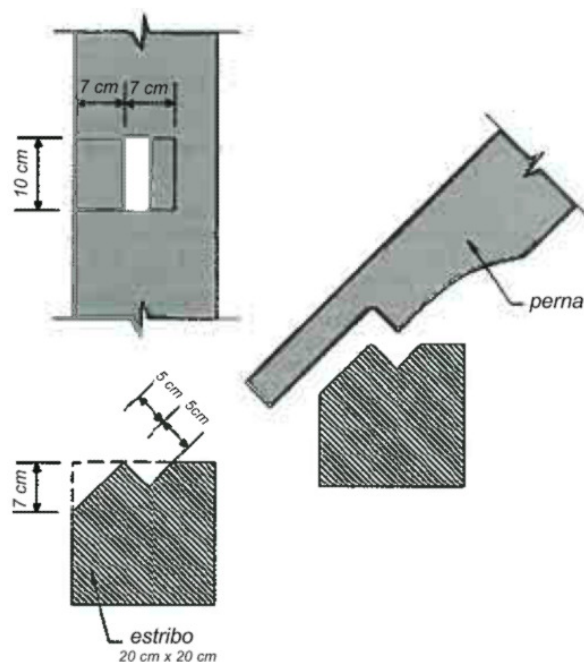


Fig.3.44 – Ligação entre pernas e estribos e dimensões características

Quanto aos revestimentos, isolamentos e impermeabilização, as opções de aplicação são também as mesmas referenciadas na descrição das coberturas para as habitações de troncos.

### 3.1.3. CASAS DE ESTRUTURA LIGEIRA (LIGHT FRAMING)

Este sistema estrutural denominado de ligeiro para a concepção de habitações foi a última a surgir. Apareceu nos E.U.A. no século XIX devido à disponibilidade de produtos industriais normalizados e a elevada necessidade de habitação na altura no Oeste na época da sua colonização.

Trata-se de um novo sistema estrutural que sucede à estrutura pesada e que tem na ortogonalidade entre as paredes portantes a principal resistência às acções de solicitação. As paredes trabalham entre si garantindo que o contraventamento de umas corresponde ao suporte para as outras. As principais características que distinguem esta solução das anteriormente descritas são:

- São criadas estruturas planas para as paredes, pavimentos e coberturas que depois de unidas formam uma estrutura espacial;
- Utiliza-se um elevado número de elementos com menor secção, pelo que as cargas são mais distribuídas;
- Os elementos podem ser normalizados e certificados impulsionando a pré-fabricação e por isso o ajuste de qualidade e preço;
- As peças necessitam de pouca preparação mecânica e permitem também aí redução de custos;
- As ligações são simples, não exigindo juntas e cortes especiais, sendo suficiente utilizar pregos ou agramos, pelo que é dispensável empregar muitos carpinteiros especializados;
- O tempo de construção é mais curto que o da construção tradicional graças à pré-fabricação e tempo de secagem dos elementos que são de menor dimensão, permitindo menor dependência das condições climáticas na construção da habitação;

- O isolamento e impermeabilização são um processo mais fácil que na construção tradicional por o rendilhado da estrutura cria bastantes aberturas para colocar os materiais de protecção;
- A sua durabilidade é similar às outras estruturas resistentes desde que, tal como em todas as estruturas de madeira seja feito um projecto bem conseguido e uma manutenção regular;
- As habitações que têm por base uma estrutura ligeira são flexíveis e extensíveis sendo fácil fazer adaptações e alargamentos;
- Requer um elevado número de pormenores construtivos e detalhes especiais assim como um controlo rigoroso do nível de humidade da madeira devido à grande complexidade estrutural que para uma pequena variação leva à introdução de esforços em peças de pequena secção;
- Exige maior planificação para a montagem e maior controlo no estaleiro para a recepção, protecção e armazenagem.

Existem dois tipos de concepção para as habitações de estrutura ligeira. As do tipo balão (*balloon frame*) e do tipo plataforma (*platform system*). As características distintivas do tipo balão são (Fig.3.45):

- É o sistema original marcado pelo facto dos pilares das paredes exteriores serem contínuos segundo a altura total da habitação e as vigotas dos pavimentos se fixarem directamente aos pilares;
- A execução é mais complicada e é menos favorável à pré-fabricação que a estrutura tipo plataforma, apresentando maior facilidade à propagação do fogo devido à maior continuidade das peças;
- A união à fundação é feita directamente por apoio da parede num dormite e a construção da habitação é complexa pois é necessário armar-se toda a estrutura simultaneamente;
- Os pilares contínuos tornam mais complicado assegurar a estabilidade suficiente ao conjunto já que não conta com o contraventamento oferecido pelo tapamento resistente utilizado nas estruturas do tipo plataforma.

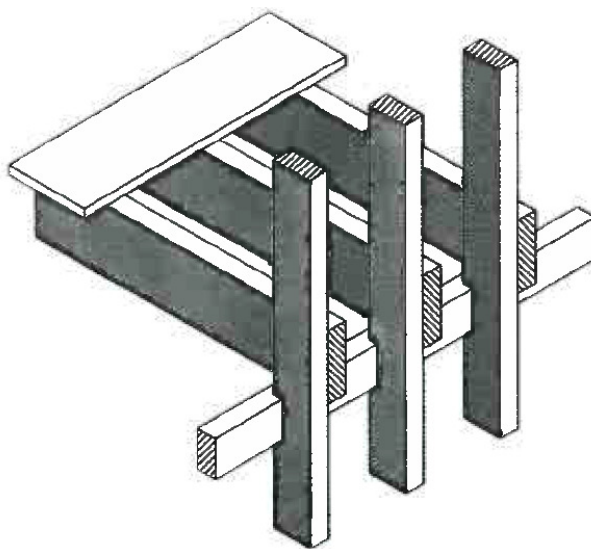


Fig.3.45 – Sistema tipo balão

O sistema estrutural do tipo plataforma singulariza-se por (Fig.3.46):

- É um sistema que tem origem no tipo balão mas que consiste na utilização de plataformas bem definidas para servir de paredes e pavimentos;
- As plataformas são criadas com o cruzamento de pilares ou vigas e travessas com um tapamento resistente;
- Melhor aptidão para a pré-fabricação e menor facilidade de propagação do fogo principalmente por haver maior estanquidade entre pisos;
- A ligação à fundação é realizada por intermédio do pavimento de rés-do-chão com um dormente intermédio;
- A montagem da habitação é mais facilitada visto que se vão elevando as plataformas das paredes e pavimentos sucessivamente e ligando-se entre si.

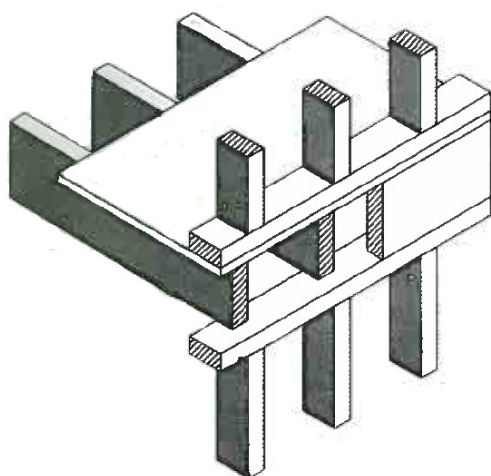


Fig.3.46 – Sistema tipo plataforma

Nas estruturas ligeiras todos os elementos têm funções mais bem definidas e específicas que nas restantes soluções estruturais. A armação de pilares vigas e asnas constituem a estrutura principal resistente. O tapamento das fachadas, pavimentos e coberturas estabelecem a estrutura resistente secundária. O revestimento final obviamente não tem função estrutural e apenas tem por objectivo dar o acabamento e protecção pretendidos à habitação.

A combinação da estrutura principal de resistência com a secundária promove a resposta rigidez necessária às acções de solicitação horizontal e vertical. As acções verticais são absorvidas pelos pavimentos e asnas e transmitidas por estes às paredes. Por sua vez os pilares das paredes conduzem as cargas para a fundação ajudadas pela estrutura secundária de tapamento que evita a flambagem dos pilares.

As acções horizontais do vento são absorvidas pelas paredes perpendiculares à direcção deste e transmitidas às cabeças dos pilares e fundações. As acções na cabeça dos pilares são transmitidas à plataforma do pavimento que por funcionamento de diagrama as transfere para as paredes laterais. As paredes laterais encarregam-se de levar as forças até à fundação por actuação novamente da estrutura resistente principal e secundária. (Fig.3.47). A fundação tem que ser projectada com o objectivo de que todos estes esforços provenientes das paredes, verticais e horizontais, sejam transmitidos com segurança à sapata e que por sua vez a sapata os descarregue no solo sem os assentamentos ultrapassar

os limites regulamentares. Isto é a base de uma boa fundação para qualquer construção além de que no caso das habitações madeiras e como já foi frisado anteriormente, é necessário minimizar o contacto com água ou humidade. Faz-se aqui distinção entre fundações para casas com cave e sem cave.

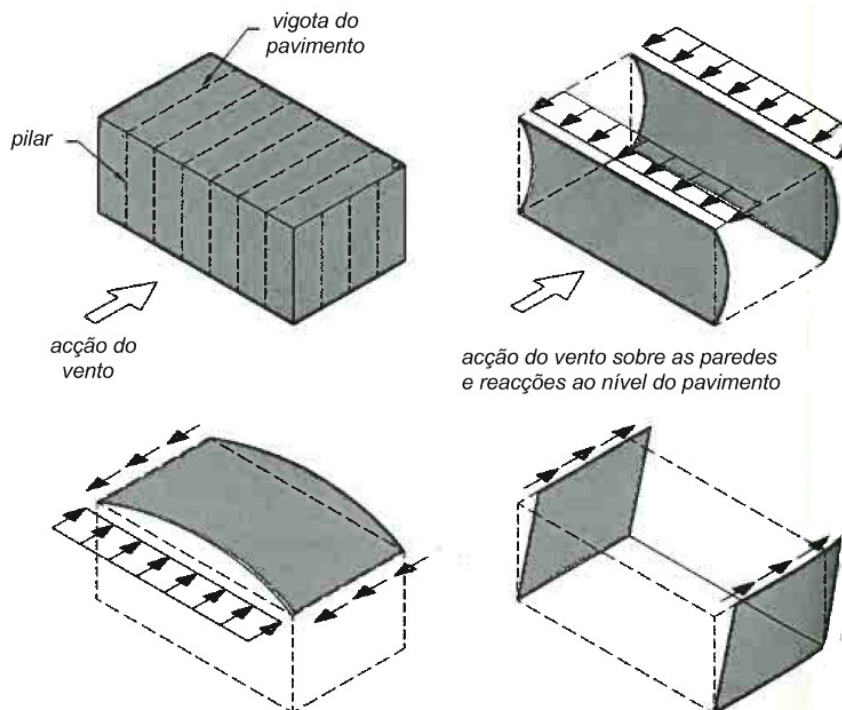


Fig.3.47 – Resposta do sistema estrutural ligeiro à acção do vento

### 3.1.3.1. Fundações

As fundações para habitações sem cave são também neste caso semelhantes às construções tradicionais, consistindo fundamentalmente em sapatas corridas e um muro de betão, alvenaria de pedra ou tijolo a partir do qual arranca a dita estrutura de madeira. As particularidades deste tipo de fundações para as estruturas ligeiras são em tudo semelhantes às utilizadas nas estruturas de troncos.

No entanto neste tipo de habitações também são aplicadas fundações onde substituem o muro de interligação entre a sapata e a estrutura por madeira especialmente tratada. Isto acontece principalmente nos países com temperaturas muito baixas em que foram desenvolvidas técnicas de pré-fabricação e aplicação da madeira tratada para contornar os problemas que o betão apresenta nesses climas.

O sistema de fundação arranca sobre uma camada de gravilha/cascalho nivelada onde assenta a sapata em madeira tratada seguida de um dormente também em madeira tratada. A profundidade da fundação tem em conta a capacidade resistente do solo e o nível de geada que deverá ficar acima desta. O dormente serve de apoio a pilares de madeira também tratada que se elevam até à altura definida para o pavimento de rés-do-chão. A face exterior é protegida por placas de contraplacado até no mínimo uma profundidade de 50 cm (Fig.3.48). Uma alternativa passa por os pilares que se apoiam na sapata serem contínuos e avançarem na estrutura para pelo menos o primeiro pé direito, necessitando-se neste caso de fixar um apoio horizontal nos pilares para suportar as vigotas do pavimento de rés-do-chão (Fig.3.49). O espaço interior define uma caixa-de-ar que deve ser devidamente ventilado e protegido

da humidade com uma manta impermeável. Os pilares e sapatas de madeira necessitam de ser tratados com produtos hidrófugos tal como o contraplacado pelo menos face exterior e as juntas devem ser seladas.

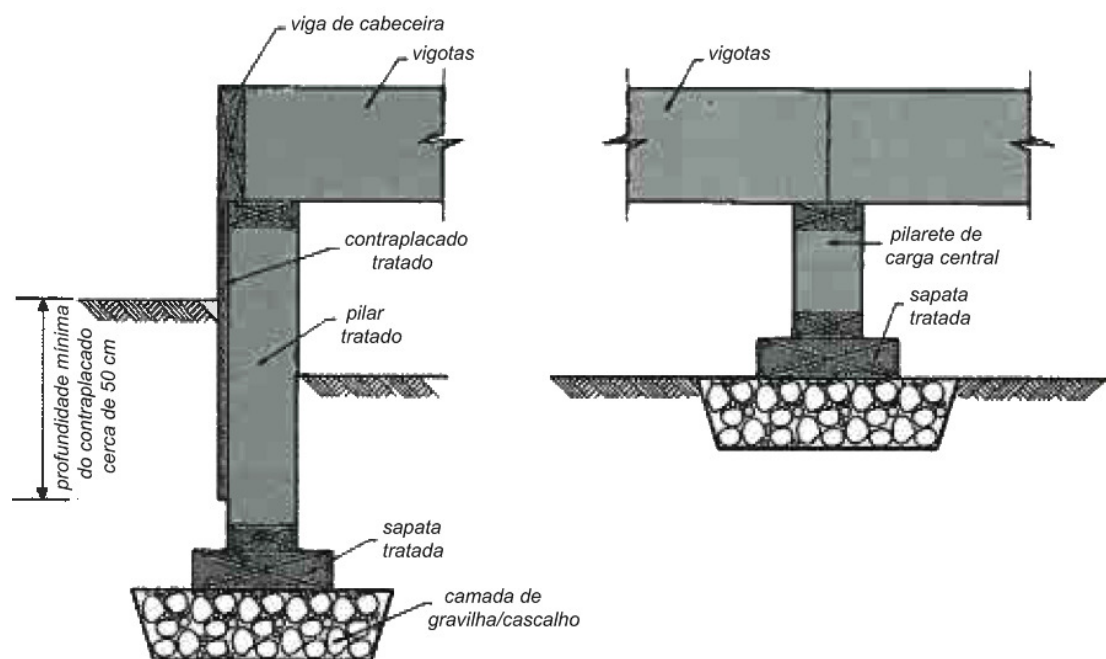


Fig.3.48 – Fundações em madeira – solução 1

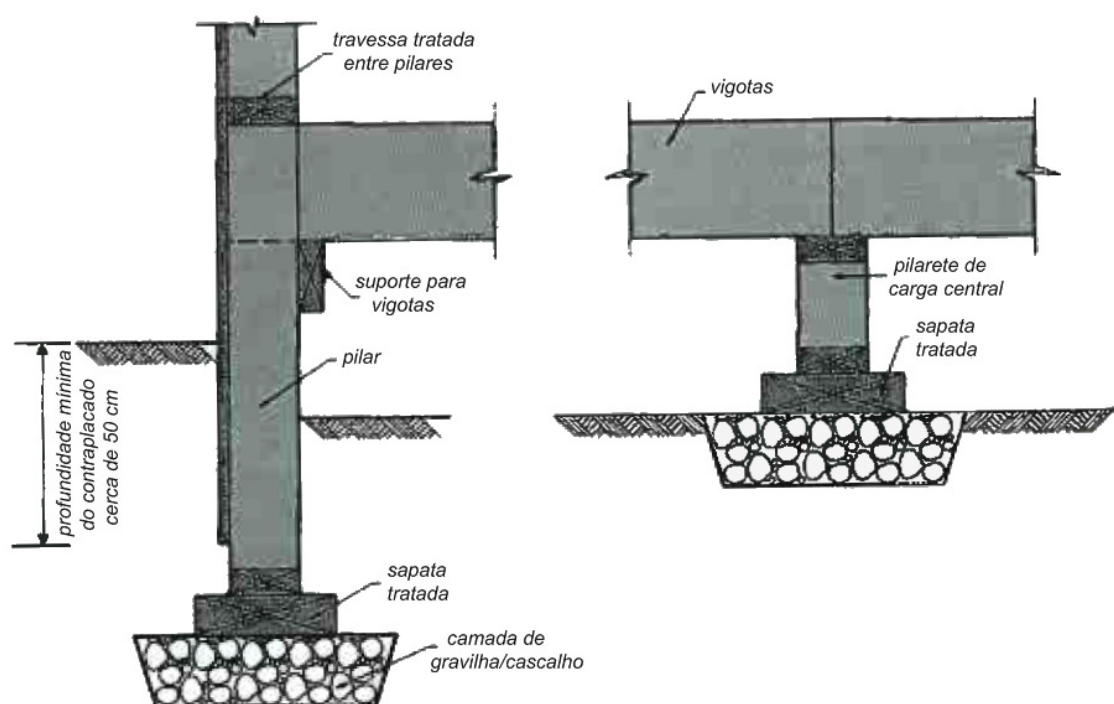


Fig.3.49 - Fundações em madeira – solução 2

Para as habitações com cave, as fundações continuam a respeitar as semelhanças com as usadas nas construções com outros materiais. Fundações com sapatas de betão e parede em betão armado ou alvenaria do qual arranca depois a estrutura de madeira acaba sem dúvida por ser a forma mais simples e eficaz de proceder e por isso a mais aplicada. Faz apenas sentido então descrever, tal como nas habitações sem cave, a solução menos comum e que é utilizada também madeira na fundação.

A opção de usar madeira tratada na fundação é comum nos países frios pelas razões já referidas. No entanto, além da sua construção não necessitar de secagem também é vantagem nas habitações com cave a maior facilidade de aplicação de impermeabilização, isolamento térmico e colocação das variadas condutas existentes nas caves das habitações. Igualmente é vantajoso a possibilidade de pré-fabricação de módulos e ligação à restante estrutura resistente. Obviamente as madeiras aplicadas abaixo do nível do terreno têm que ter tratamento com produtos hidrófugos e um sistema de drenagem na face exterior da parede (Fig.3.50). É similarmente possível conceber fundações em madeira tratada para suportar paredes de dois panos em que o interior corresponde as paredes típicas das habitações de estrutura leve sendo o exterior em alvenaria de tijolo.

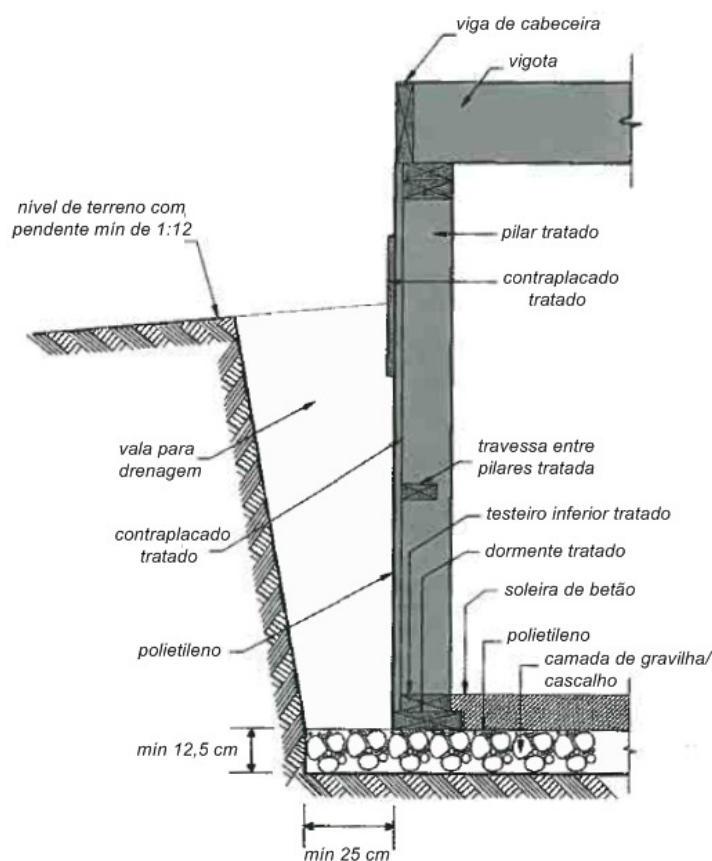


Fig.3.50 – Fundação em madeira para cave

### 3.1.3.2. Pavimentos

Os pavimentos são formados pelas tradicionais vigotas que se apoiam nas paredes ou vigas e pela cobertura normalmente em soalho (Fig.3.51). Actualmente as vigotas de madeira tradicionais de secção rectangular têm sido substituídas por vigotas em "I", muitas das vezes com banzos em madeira maciça ou lamelados colados e a alma noutra material mais barato e menos resistente. Estas vigotas

têm a vantagem de serem mais leves e ao menos tempo atingirem vãos maiores. O espaçamento entre elas é comum variar entre os 40 e 60 cm. Para a cobertura do pavimento funcionar com diafragma deve, além de pregada às vigotas, colocar cobre - juntas na direcção perpendicular às vigotas. Igualmente pode ser solução a junta entre placas ou tábuas em macho-fêmea e colada. Se alguma destas condições for garantida não é necessário acrescentar contraventamentos à estrutura do pavimento apesar de isso ser proveitoso para a estabilização das vigotas principalmente na fase construtiva. Os pormenores de isolamento, impermeabilização e outros detalhes são em tudo análogos aos pavimentos já relatados anteriormente.

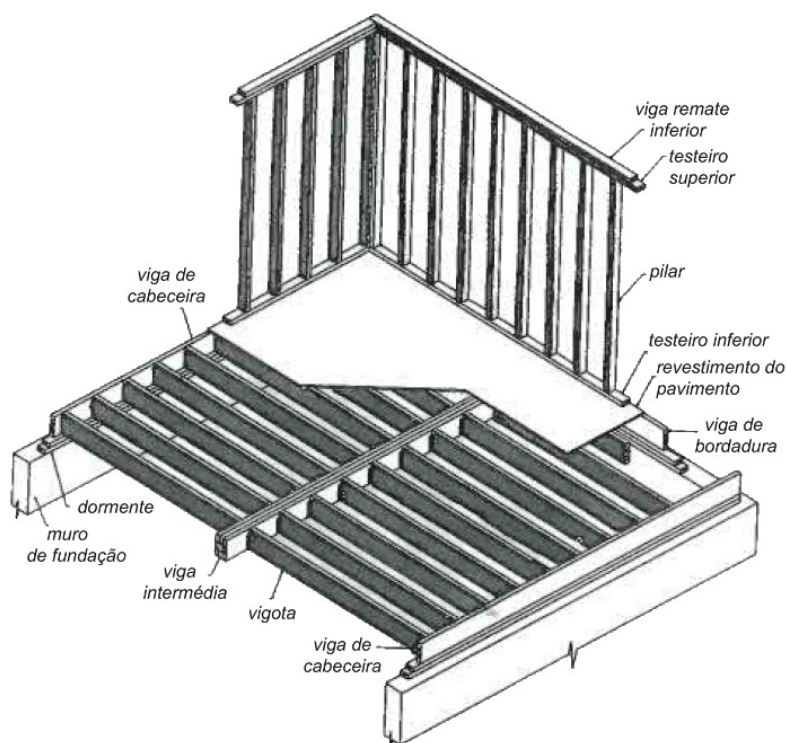


Fig.3.51 – pavimentos das estruturas ligeiras

### 3.1.3.3. Paredes

As paredes são constituídas por peças horizontais e verticais. As verticais correspondem aos pilares e aduelas e as horizontais aos testeiros superior e inferior e aos lintéis (Fig.3.52). Nas paredes exteriores é aplicado um tapamento na face exterior e um revestimento na face interior enquanto as interiores são apenas revestidas de ambos os lados. O tapamento na face exterior serve também de suporte para os isolamentos.

Nas estruturas ligeiras do tipo balão, os pilares têm altura correspondente ao total da habitação, pelo que a armação das paredes começa logo na erecção dos pilares e fixação ao dormente da fundação. Depois, para cada pavimento, é ligada lateralmente cada vigota a um pilar, colocada uma peça horizontal sob as ligações para reforço e são colocadas travessas entre pilares para dar maior rigidez à parede. No caso das estruturas tipo plataforma, as paredes são montadas no terreno ligando entre si os pilares extremos e testeiros, e só depois conduzidos à sua posição com a ajuda de uma diagonal provisória (Fig.3.53). Posteriormente já interligada às restantes paredes e pavimentos, são colocados os tapamentos, revestimentos e isolamentos. É possível fazer esse trabalho ainda no solo, dotando logo

a armação de tapamento e algumas vezes de isolamento e revestimentos. Normalmente nesse caso as paredes são divididas em módulos e depois unidas por uns segundos testeiros superior e inferior (Fig.3.54). Deve ter-se em conta aqui a variação de tamanho do tapamento e deixar folgas entre chapas de 2 a 3 mm. Sobre estas paredes é colocada a plataforma do piso sobre a qual se levantam as paredes para o piso seguinte.

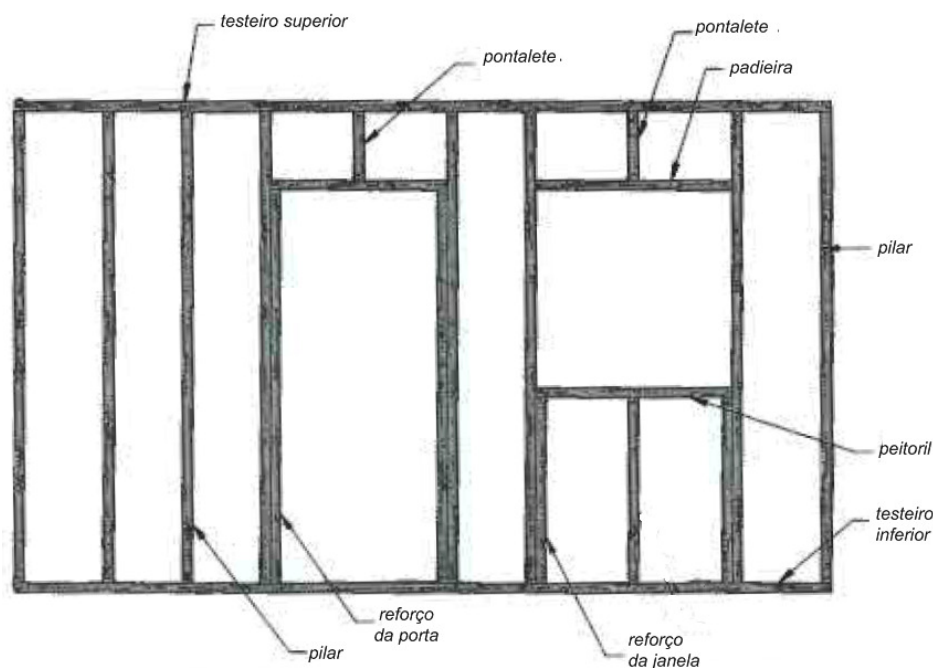


Fig.3.52 – Paredes das estruturas ligeiras

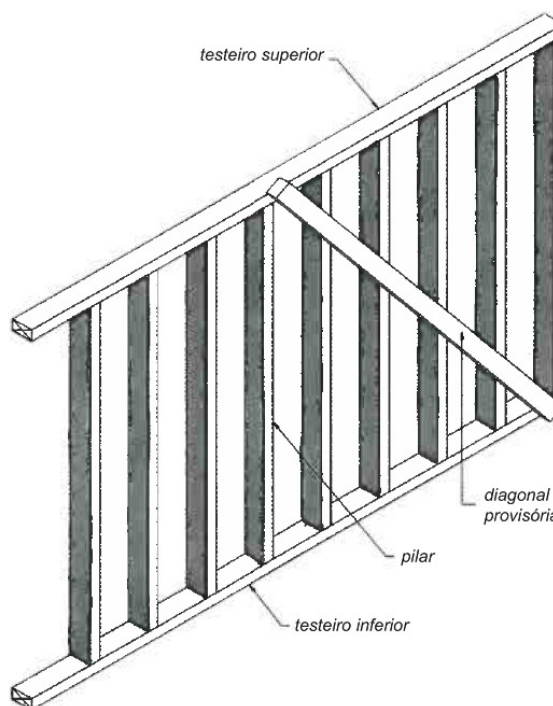


Fig.3.53 – Paredes montadas no terreno

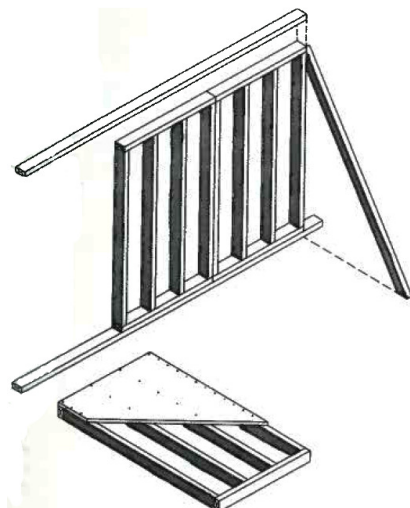


Fig.3.54 – Paredes montadas no terreno em módulos

#### 3.1.3.4. Telhado

As coberturas neste sistema construtivo ligeiro são muito semelhantes as dos sistemas anteriormente descritos e por isso apenas será ilustrado na figura (Fig.3.55). De referir que as asnas pré-fabricadas são opção mais utilizada pois garante maior fiabilidade, rapidez de execução e economia de matéria.

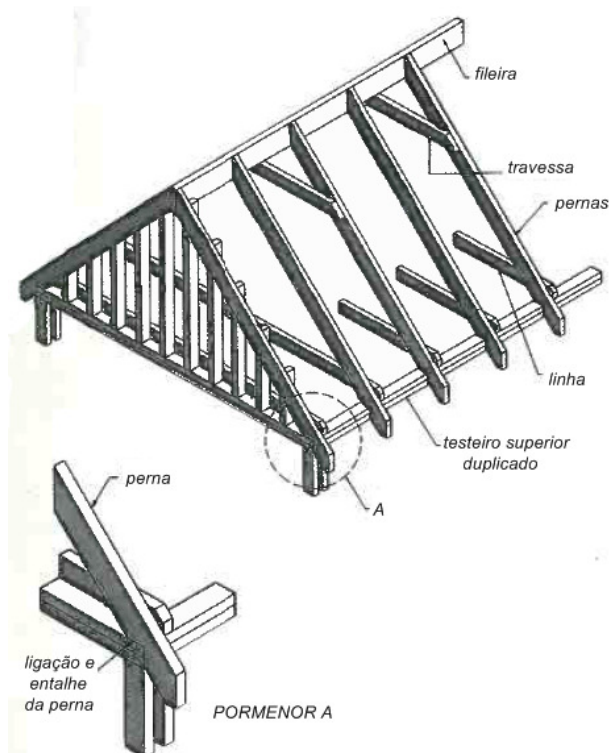


Fig.3.55 – Cobertura das estruturas ligeiras

### 3.2. DIMENSIONAMENTO

A capacidade resistente da madeira é difícil de avaliar na medida em que não se tem controlo sobre a sua qualidade e crescimento. A resistência é função de vários parâmetros incluindo a humidade, densidade, duração da aplicação da carga, dimensões da peça e características aleatórias como o grão, o veio, as fissuras e os nós [18].

Este problema, que cria dificuldades na utilização da madeira com função estrutural na construção, veio a ser contornado pela normalização e certificação. A Directiva dos Produtos da Construção (DPC), publicada em 1989, e a primeira versão do Eurocódigo 5 (EC 5), publicado em 1994 na versão pré-norma (ENV), vieram garantir um enquadramento para um crescimento sustentado da utilização de produtos de madeira na construção. Desta directiva resultaram diversos mandatos da Comissão Europeia (CE) ao Comité Europeu de Normalização (CEN), sob os quais o CEN aceitou elaborar um conjunto alargado de normas europeias, cobrindo diversos produtos, dando suporte à elaboração de normas harmonizadas e consequentemente à implementação efectiva da DPC através da marcação CE dos produtos da construção [19].

O trabalho do CEN relativamente à madeira permitiu que se organizasse um conjunto de cerca 11 normas de suporte à definição e especificação de produto em 1990 chegando hoje em dia a cerca de 30. O EC 5 veio por sua vez colmatar a falha que existia em Portugal relativamente a regulamentos de dimensionamento para estruturas de madeira, podendo a partir daí competir ao mesmo nível com os materiais mais usados como o betão e o aço. De arrasto veio a necessidade de desenvolver normas de suporte para produtos derivados da madeira.

No entanto, o EC 5 não respondia à questão de quais as madeiras aptas para uso estrutural e qual a resistência mecânica respectiva. Para resolver esse entrave, visto que grande parte dos projectistas têm um enorme desconhecimento acerca do comportamento da madeira, foi criada a nível europeu uma abordagem que garante a utilização correcta do material lenhoso. Foram então criados documentos sob a forma de normas que auxiliam a aplicação da madeira em estruturas. A norma europeia EN338 (Quadro 3.1) aplica o conceito de classes de resistência, tal como acontece no caso do betão estrutural, enquanto a norma EN 1912 estabelece a correspondência entre as classes de resistência e as classes de qualidade.

#### 3.2.1. PROPRIEDADES FÍSICAS DA MADEIRA

A madeira é obviamente um material não homogéneo e com diversificadas variações além de que existem diferentes espécies com propriedades específicas. É necessário conhecer todas as propriedades físicas para que a madeira seja aplicada correctamente e com maior rentabilidade.

##### 3.2.1.1. Massa volúmica

É a razão entre a quantidade de massa por unidade de volume. Algumas espécies são naturalmente mais pesadas que outras, mesmo apresentando dimensões iguais. Geralmente, espécies mais pesadas, apresentam características mais duradouras. Os índices de massa específica variam de espécie para espécie e dependem de uma série de factores estruturais bem como dos compostos orgânicos e inorgânicos presentes no lenho. À medida que o peso específico aumenta, elevam-se proporcionalmente a resistência mecânica e a durabilidade e, em sentido contrário, diminui a permeabilidade a soluções de protecção e a trabalhabilidade [21].

Quadro 3.1 – Classes de resistência e valores característicos [20]

|                                               |               | Poplar and softwood species                                                                                                                                                                                                                    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      | Hardwood species |      |      |      |      |      |
|-----------------------------------------------|---------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------------------|------|------|------|------|------|
|                                               |               | C14                                                                                                                                                                                                                                            | C16  | C18  | C20  | C22  | C24  | C27  | C30  | C35  | C40  | C45  | C50  | D30              | D35  | D40  | D50  | D60  | D70  |
| Strength properties (in N/mm <sup>2</sup> )   |               |                                                                                                                                                                                                                                                |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |                  |      |      |      |      |      |
| Bending                                       | $f_{m,k}$     | 14                                                                                                                                                                                                                                             | 16   | 18   | 20   | 22   | 24   | 27   | 30   | 35   | 40   | 45   | 50   | 30               | 35   | 40   | 50   | 60   | 70   |
| Tension parallel                              | $f_{t,0,k}$   | 8                                                                                                                                                                                                                                              | 10   | 11   | 12   | 13   | 14   | 16   | 18   | 21   | 24   | 27   | 30   | 18               | 21   | 24   | 30   | 36   | 42   |
| Tension perpendicular                         | $f_{t,90,k}$  | 0,4                                                                                                                                                                                                                                            | 0,5  | 0,5  | 0,5  | 0,5  | 0,5  | 0,6  | 0,6  | 0,6  | 0,6  | 0,6  | 0,6  | 0,6              | 0,6  | 0,6  | 0,6  | 0,6  | 0,6  |
| Compression parallel                          | $f_{c,0,k}$   | 16                                                                                                                                                                                                                                             | 17   | 18   | 19   | 20   | 21   | 22   | 23   | 25   | 26   | 27   | 29   | 23               | 25   | 26   | 29   | 32   | 34   |
| Compression perpendicular                     | $f_{c,90,k}$  | 2,0                                                                                                                                                                                                                                            | 2,2  | 2,2  | 2,3  | 2,4  | 2,5  | 2,6  | 2,7  | 2,8  | 2,9  | 3,1  | 3,2  | 8,0              | 8,4  | 8,8  | 9,7  | 10,5 | 13,5 |
| Shear                                         | $f_{v,k}$     | 1,7                                                                                                                                                                                                                                            | 1,8  | 2,0  | 2,2  | 2,4  | 2,5  | 2,8  | 3,0  | 3,4  | 3,8  | 3,8  | 3,8  | 3,0              | 3,4  | 3,8  | 4,6  | 5,3  | 6,0  |
| Stiffness properties (in kN/mm <sup>2</sup> ) |               |                                                                                                                                                                                                                                                |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |                  |      |      |      |      |      |
| Mean modulus of elasticity parallel           | $E_{0,mean}$  | 7                                                                                                                                                                                                                                              | 8    | 9    | 9,5  | 10   | 11   | 11,5 | 12   | 13   | 14   | 15   | 16   | 10               | 10   | 11   | 14   | 17   | 20   |
| 5% modulus of elasticity parallel             | $E_{0,05}$    | 4,7                                                                                                                                                                                                                                            | 5,4  | 6,0  | 6,4  | 6,7  | 7,4  | 7,7  | 8,0  | 8,7  | 9,4  | 10,0 | 10,7 | 8,0              | 8,7  | 9,4  | 11,8 | 14,3 | 16,8 |
| Mean modulus of elasticity perpendicular      | $E_{90,mean}$ | 0,23                                                                                                                                                                                                                                           | 0,27 | 0,30 | 0,32 | 0,33 | 0,37 | 0,38 | 0,40 | 0,43 | 0,47 | 0,50 | 0,53 | 0,64             | 0,69 | 0,75 | 0,93 | 1,13 | 1,33 |
| Mean shear modulus                            | $G_{mean}$    | 0,44                                                                                                                                                                                                                                           | 0,5  | 0,56 | 0,59 | 0,63 | 0,69 | 0,72 | 0,75 | 0,81 | 0,88 | 0,94 | 1,00 | 0,60             | 0,65 | 0,70 | 0,88 | 1,06 | 1,25 |
| Density (in kg/m <sup>3</sup> )               |               |                                                                                                                                                                                                                                                |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |                  |      |      |      |      |      |
| Density                                       | $\rho_k$      | 290                                                                                                                                                                                                                                            | 310  | 320  | 330  | 340  | 350  | 370  | 380  | 400  | 420  | 440  | 460  | 530              | 560  | 590  | 650  | 700  | 900  |
| Mean density                                  | $\rho_{mean}$ | 350                                                                                                                                                                                                                                            | 370  | 380  | 390  | 410  | 420  | 450  | 460  | 480  | 500  | 520  | 550  | 640              | 670  | 700  | 780  | 840  | 1080 |
| NOTE                                          |               | a Values given above for tension strength, compression strength, shear strength, 5% modulus of elasticity, mean modulus of elasticity perpendicular to grain and mean shear modulus, have been calculated using the equations given in annex A |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |                  |      |      |      |      |      |
|                                               |               | b The tabulated properties are compatible with timber at a moisture content consistent with a temperature of 20°C and a relative humidity of 65%                                                                                               |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |                  |      |      |      |      |      |
|                                               |               | c Timber conforming to classes C45 and C50 may not be readily available.                                                                                                                                                                       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |                  |      |      |      |      |      |

### 3.2.1.2. Água na madeira

A água, sendo um elemento fundamental à sobrevivência de todos os vegetais incluindo as árvores, pode encontrar-se sobre três formas na vida destas:

- A água de constituição que não pode ser eliminada e não ser pela destruição da madeira também; quando a madeira apenas contém água de constituição define-se por anidra;
- Água de embebição é a água contida nas paredes das células e que tem grande influência sobre as propriedades físico-mecânicas; uma expansão considerável destas paredes devido à absorção de água pode gerar uma alteração notável na peça de madeira; de facto, por exemplo para a compressão, pode-se verificar uma variação de 4 a 5%, e para a resistência à flexão, uma variação de 2 a 4% quando a humidade varia de 1% (água de embebição) [22]; as paredes das células vão absorvendo água até se encontrarem completamente saturadas; significa então que se atingiu o Ponto de Saturação das Fibras (PSF); para a maioria das espécies lenhosas o PSF localiza-se entre 25 e 30%;
- Água livre é aquela que é absorvida para além de ser atingido o PSF; esta água vai ocupar os vazios capilares das células mas sem provocar alterações nas dimensões da peça em causa.

### 3.2.1.3. Humidade

A humidade da madeira define-se pela quantidade de água presente na sua constituição, e é calculada através do peso de um provete de madeira, antes e após secagem (Exp. 3.1), ou através de métodos expeditos que permitem uma leitura instantânea, embora pouco rigorosa, como o humidímetro de agulha ou contacto.

$$H(\%) = \frac{P_h - P_s}{P_s} \times 100 \quad (3.1)$$

Do ponto de vista de utilização, conforme o seu teor de água, as madeiras classificam-se em:

- Madeira verde – humidade acima do PSF;
- Madeira comercialmente seca – humidade inferior a 20%;
- Madeira seca ao ar livre – humidade entre 14 e 18%;
- Madeira dissecada – humidade entre 0 e 14%, que normalmente só é conseguida através de secagem artificial;
- Madeira anidra – humidade igual a 0%. [22]

### 3.2.1.4. Densidade

A madeira normalmente é caracterizada por duas densidades, ou seja, a densidade básica que é definida pelo quociente entre a massa seca e pelo volume saturado (Exp. 3.2) e pela densidade aparente que corresponde ao mesmo quociente mas para quando a madeira possui humidade de 12%. Esta é a densidade padrão de referência.

$$\rho(\%) = \frac{m_s}{V_w} \quad (3.2)$$

### 3.2.1.5. Retractibilidade

A retractsibilidade corresponde à propriedade da madeira variar as dimensões com a variação da humidade. A anisotropia do material confere um comportamento físico e mecânico distinto, dependendo da direcção em análise relativamente à direcção das fibras. Assim, a madeira tem maior retractsibilidade na direcção tangencial, seguida pela radial que corresponde a cerca de 50 a 60% da tangencial. A menos significativa é a retractsibilidade longitudinal ou axial que representa apenas entre 2 a 4% da radial [23]. Define-se o coeficiente unitário de retracção volumétrica numa dada direcção como sendo a variação de dimensão da peça nessa direcção quando a humidade varia 1% entre 0% e o PSF (Fig.3.56).

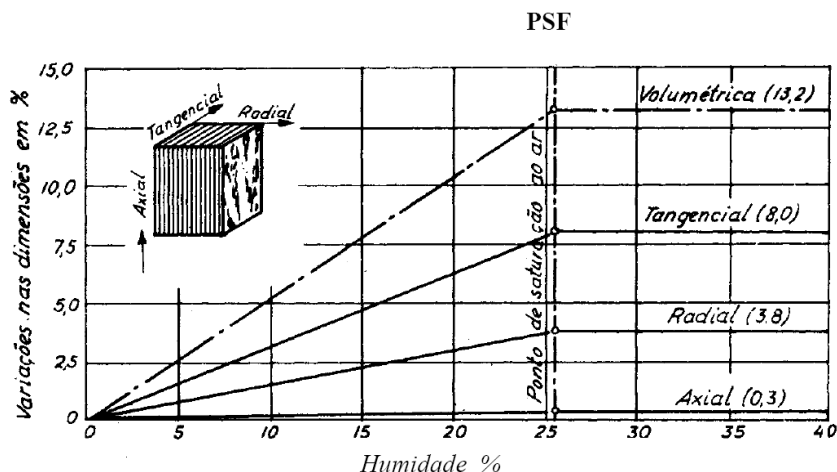


Fig.3.56 – Exemplo de curvas de retração [22]

### 3.2.1.6. Módulo de elasticidade

Da mesma forma que para a retração, também a elasticidade depende da direcção a observar relativamente à direcção das fibras. O valor básico refere-se ao módulo de elasticidade longitudinal na compressão paralela as fibras. Posteriormente são definidos os outros valores dos módulos de elasticidade da madeira.

### 3.2.2. PROPRIEDADES MECÂNICAS DA MADEIRA

As possibilidades estruturais da madeira só se podem conhecer após uma análise das características mecânicas do material, e após comparação com as características comuns dos outros materiais estruturais. No entanto, e como já foram referidas, são bastantes as dificuldades em definir estas características devido ao facto do material ser não homogéneo, apresentar defeitos muito variáveis de peça para peça, e ainda serem influenciados por humidade e condições de ensaio.

Quadro 3.2 - Comparação das tensões médias admissíveis em kPa [23]

| Material | Flexão | Tracção  |               | Compressão |               | Corte | Módulo de elasticidade |
|----------|--------|----------|---------------|------------|---------------|-------|------------------------|
|          |        | Paralela | Perpendicular | Paralela   | Perpendicular |       |                        |
| Madeira  | 12     | 12       | 0,15          | 11         | 2,8           | 1,2   | 11000                  |
| Betão    | 8      | 6        |               | 8          |               | 0,6   | 20000                  |
| Aço      | 170    | 170      |               | 170        |               | 100   | 210000                 |

Seguem-se os aspectos principais do cálculo estrutural de elementos em madeira e lamelados colados assente em todas as particularidade que o material lenhoso detém, informação que poderá ser aprofundada na consulta do Eurocódigo 5 [24], de onde a matéria foi retirada.

### 3.2.2.1. Duração das acções

A duração do carregamento a que uma determinada peça de madeira ou seu derivado está sujeita tem influência no seu desempenho de rigidez e resistência tal como o teor de humidade. Como é óbvio, dependendo das características da acção, esta influenciará de forma diferente o comportamento da peça e na verificação dos estados limites último e de serviço pelo que a norma EN1995 define classes de duração das acções (Quadro 3.3), sendo que as acções climáticas são qualificadas por cada país.

Quadro 3.3 - Classes de duração das acções, EC5

| Classe de duração da acção | Ordem de grandeza do valor acumulado da duração da acção característica | Exemplos                                |
|----------------------------|-------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|
| <i>Permanente</i>          | <i>&gt;10 anos</i>                                                      | <i>Peso próprio</i>                     |
| <i>Longa duração</i>       | <i>6 meses a 10 anos</i>                                                | <i>Mobiliário, produtos armazenados</i> |
| <i>Média duração</i>       | <i>1 semana a 6 meses</i>                                               | <i>Sobrecargas de pessoas, neve</i>     |
| <i>Curta duração</i>       | <i>&lt;1 semana</i>                                                     | <i>Neve, vento</i>                      |
| <i>Instantânea</i>         | <i>-</i>                                                                | <i>Vento, acções acidentais</i>         |

### 3.2.2.2. Classes de serviço

As classes de serviços pretendem traduzir a influência do meio ambiente em que a estrutura de madeira ou derivados se insere na resistência do material. São estipulados valores de temperatura e humidade relativa e duração da permanência dessas condições ao longo de um ano, fazendo-se correspondência a cada classe (Quadro 3.4).

Quadro 3.4 - Classes de serviço, EC5

| Classe de serviço | Condições ambientais                                               | Exemplo                                                          |
|-------------------|--------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| 1                 | $T \approx 20^{\circ}\text{C}$ , $HR > 65\%$ em poucas semanas/ano | Estruturas interiores em geral                                   |
| 2                 | $T \approx 20^{\circ}\text{C}$ , $HR > 85\%$ em poucas semanas/ano | estruturas exteriores cobertas                                   |
| 3                 | $HR > HR_{\text{classe 2}}$                                        | estruturas em ambientes muito húmidos (interiores ou exteriores) |

### 3.2.2.3. Influência da duração da acção e da classe de serviço na resistência, $K_{\text{mod}}$

A forma como o material estrutural e neste caso a resistência, quer da madeira ou outro derivado, é afectada pela duração da acção num determinado contexto ambiental é traduzida pelo factor de modificação ( $k_{\text{mod}}$ ), tal como mostra o Quadro 3.5 para o caso da madeira maciça e dos lamelados colados. Para o caso das combinações que sejam compostas por cargas de diferentes classes de duração, deve ser utilizado o  $k_{\text{mod}}$  que corresponda à acção de menor duração [23].

Quadro 3.5 - Factor de modificação ( $k_{mod}$ ), EC5

| Material                     | Standard   | Classe de serviço | Classe de duração da carga |               |               |               |             |
|------------------------------|------------|-------------------|----------------------------|---------------|---------------|---------------|-------------|
|                              |            |                   | Permanente                 | Longa duração | Média duração | Curta duração | Instantânea |
| Madeira maciça               | EN 14081-1 | 1                 | 0,60                       | 0,70          | 0,80          | 0,90          | 1,10        |
|                              |            | 2                 | 0,60                       | 0,70          | 0,80          | 0,90          | 1,10        |
|                              |            | 3                 | 0,50                       | 0,55          | 0,65          | 0,70          | 0,90        |
| Lamelados colados de madeira | EN 14080   | 1                 | 0,60                       | 0,70          | 0,80          | 0,90          | 1,10        |
|                              |            | 2                 | 0,60                       | 0,70          | 0,80          | 0,90          | 1,10        |
|                              |            | 3                 | 0,50                       | 0,55          | 0,65          | 0,70          | 0,90        |

3.2.2.4. Influência da duração da acção e da classe de serviço na deformabilidade,  $k_{def}$ 

Da mesma forma que a resistência é reduzida pelos factores duração da carga e ambiente, também a deformabilidade sofre modificações que são representadas pelo factor de deformabilidade ( $k_{def}$ ) no Quadro 3.6 para o caso do material estrutural usado ser a madeira ou lamelados colados. Ainda a frisar que no caso de a madeira ser montada com o teor em humidade perto do PSF e que a secagem se proceda já durante o carregamento, o valor de  $k_{def}$  deve ser acrescido de 1,0.

Quadro 3.6 - Factor de modificação ( $k_{def}$ ), EC5

| Material          | Standard   | Classe de serviço |      |      |
|-------------------|------------|-------------------|------|------|
|                   |            | 1                 | 2    | 3    |
| Madeira maciça    | EN 14081-1 | 0,60              | 0,80 | 2,00 |
| Lamelados Colados | EN 14080   | 0,60              | 0,80 | 2,00 |

3.2.2.5. Influência da secção da peça,  $k_h$ 

Para ter em atenção as dimensões efectivas das peças, as características mecânicas dos elementos em madeiras com densidades inferiores a  $700 \text{ kg/m}^3$  e secção rectangular, têm como referência a grandeza de 150 mm para a dimensão que se situa na direcção do carregamento actuante. Quando essa dimensão é inferior, os valores  $f_{m,k}$  e  $f_{t,0,k}$  devem ser inflacionados pelo factor  $k_h$ , definido no EC 5, tal como se encontra na expressão 3.3.

$$k_h = \min \left\{ \frac{150^{0,2}}{h}, 1,3 \right\} \quad (3.3)$$

No caso dos derivados da madeira, mais concretamente os elementos em lamelados colados com secção rectangular, a referência são 600 mm, e os valores característicos  $f_{m,k}$  e  $f_{t,0,k}$  são também afectados de  $k_h$ , mas que neste caso toma os valores que o EC 5 define pela expressão 3.4.

$$k_h = \min \left\{ \frac{600^{0,1}}{h}, 1,1 \right\} \quad (3.4)$$

### 3.2.3. ESTADOS LIMITES ÚLTIMOS

#### 3.2.3.1. Modelos de cálculo

Em geral, os esforços devem ser calculados através de uma análise linear elástica e deve ser considerada a deformabilidade das ligações. Se as ligações garantirem ductilidade, podem ser utilizados métodos de análise elasto-plástica características de rigidez a utilizar na análise estrutural [24]:

- Para uma análise linear elástica de primeira ordem de uma estrutura, cuja distribuição interna de forças não é afectada pela distribuição da rigidez na estrutura (por exemplo todos os membros têm semelhantes propriedades dependentes do tempo), devem ser utilizados valores médios;
- Para uma análise linear elástica de primeira ordem de uma estrutura, cuja distribuição interna de forças é afectada pela distribuição da rigidez na estrutura (por exemplo, membros compósitos contendo materiais com propriedades dependentes do tempo diferentes), os valores médios finais devem ser ajustados à carga que causa a maior tensão em relação à resistência;
- Para uma análise linear elástica de segunda ordem, os valores de cálculo não devem ser adaptados à duração do carregamento.

O cálculo das tensões instaladas numa secção transversal, para efeitos de verificação de segurança em relação aos ELU, deve ser feito com uma relação tensão-extensão linear. Deve ser considerada a redução da secção transversal em consequência de furações, excepto nos seguintes casos:

- No caso de pregos ou parafusos com diâmetro  $\leq 6$  mm, aplicados sem pré-furação;
- No caso de furos, preenchidos, localizados na zona comprimida da secção.

Para este efeito, furos com afastamento longitudinal inferior a metade do mínimo afastamento transversal devem ser considerados com ocorrendo na mesma secção [25].

Nos estados limites últimos, onde a distribuição de forças e momentos é afectada pela distribuição da rigidez na estrutura, os valores médios finais do módulo de elasticidade,  $E_{mean,fin}$ , módulo de distorção,  $G_{mean,fin}$ , e módulo de escorregamento,  $K_{ser,fin}$ , devem ser calculados a partir dos seguintes expressões [24]:

$$E_{mean,fin} = \frac{E_{mean}}{(1+\psi_2 \cdot k_{def})} \quad (3.5)$$

$$G_{mean,fin} = \frac{G_{mean}}{(1+\psi_2 \cdot k_{def})} \quad (3.6)$$

$$K_{ser,fin} = \frac{K_{mean}}{(1+\psi_2 \cdot k_{def})}. \quad (3.7)$$

### 3.2.3.2. Valores de cálculo das propriedades dos materiais, $X_d$

O valor de cálculo  $X_d$  de uma determinada propriedade resistente deve ser calculado pela expressão 3.8 em que  $X_k$  é o valor característico resistente e  $\gamma_m$  é factor parcial que tem em conta o tipo de material [24]:

$$X_d = k_{mod} \times \frac{X_k}{\gamma_m} \quad (3.8)$$

Quadro 3.7 - Factores parciais ( $\gamma_m$ ), EC5

| Material          | $\gamma_m$ |
|-------------------|------------|
| Madeira maciça    | 1,3        |
| Lamelados Colados | 1,25       |

De igual modo, os módulos de elasticidade e distorção de cálculo devem ser afectados dos factores parciais [24]:

$$E_d = \frac{E_{mean}}{\gamma_m} \quad (3.9)$$

$$G_d = \frac{G_{mean}}{\gamma_m} \quad (3.10)$$

### 3.2.3.3. Flexão

Para peças sujeitas a esforços de flexão, a verificação da segurança é garantida quando satisfeitas as expressões 3.11 e 3.12, em que  $k_m$  corresponde a 0,7 no caso de secções rectangulares e 1,0 para outras secções, quer o material usado seja madeira ou lamelados colados [24]:

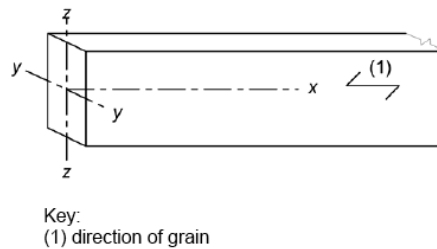


Fig.3.57 – Definição dos eixos numa barra de madeira

$$\frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (3.11)$$

$$\frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} \leq 1 \quad (3.12)$$

Neste tipo de esforços, a instabilidade por flexão chamada de bambeamento é uma realidade tal como nas estruturas metálicas. O bambeamento tem tendência de ocorrer quando existe momento flector actuante sobre o eixo forte da peça, sozinho ou em associação com outro esforço. Um momento flector actuante sobre o eixo mais fraco da peça não causa instabilidade, da mesma forma que a instabilidade pode ser contornada pelo travamento do banzo comprimido da peça e pelo impedimento de rotação por torção nos apoios.

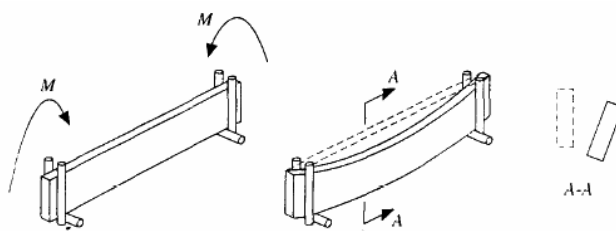


Fig.3.58 – Instabilidade por bambeamento

A verificação tem por base o cálculo do coeficiente de bambeamento,  $k_{crit}$ . Trata-se de um coeficiente redutor da capacidade resistente, em consequência do fenómeno de bambeamento. O coeficiente de bambeamento,  $k_{crit}$  é calculado com base no valor da “tensão crítica de instabilidade por bambeamento”,  $\sigma_{m,crit}$ . Este valor é calculado através da teoria da elasticidade, considerando o valor característico do módulo de elasticidade. Para secções rectangulares pode ser adoptado [25]:

$$\sigma_{m,d} = \frac{0,78b^2}{h \cdot l_{ef}} E_{0,05} \quad (3.13)$$

Quadro 3.8 – Comprimento efectivo das barras –  $l_{ef}$

| Tipo de viga         | Tipo de carregamento                   | $l_{ef}/l^a$ |
|----------------------|----------------------------------------|--------------|
| 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          |

<sup>a</sup> A relação entre o comprimento efectivo  $l_{ef}$  e o vão  $l$  é válida para uma viga com apoios impedidos relativamente à torção e carregada no centro de gravidade. Se a carga é aplicada na face comprimida da viga,  $l_{ef}$  deverá ser aumentado de  $2h$  e poderá ser reduzido de  $0,5h$  para uma carga aplicada na face traccionada da viga.

Quadro 3.9 - Comprimento efectivo das barras definido por  $m$

| Beam & Loads | Actual bending moment | $m$  | Equivalent uniform moment |
|--------------|-----------------------|------|---------------------------|
|              |                       | 1,00 |                           |
|              |                       | 0,57 |                           |
|              |                       | 0,43 |                           |
|              |                       | 0,74 |                           |
|              |                       | 0,88 |                           |
|              |                       | 0,96 |                           |
|              |                       | 0,69 |                           |
|              |                       | 0,59 |                           |
|              |                       | 0,39 |                           |

A esbelteza relativa é calculada a partir de:

$$\lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{f_{m,k}}{\sigma_{m,crit}}} \quad (3.14)$$

Para vigas com um desvio lateral inicial de rectitude dentro dos limites definidos no anexo 10 do EC5,  $k_{crit}$  define-se por:

$$k_{crit} = \begin{cases} 1 & \lambda_{rel,m} \leq 0,75 \\ 1,56 - 0,75\lambda_{rel,m} & 0,75 < \lambda_{rel,m} \leq 1,4 \\ \frac{1}{\lambda_{rel,m}^2} & 1,4 < \lambda_{rel,m} \end{cases} \quad (3.15)$$

A verificação da segurança ao bambeamento depende dos esforços actuantes no elemento. Assim, quando apenas existe um momento flector actuante no eixo mais forte, a verificação passa pela condição da expressão 3.16, mas no caso de existir também uma força de compressão actuante deve

confirma-se pela expressão 3.17. Caso exista também momento actuante no eixo menos forte também deve ser adicionado à condição.

$$\sigma_{m,d} = k_{crit} \cdot f_{m,d} \quad (3.16)$$

$$\left( \frac{\sigma_{m,d}}{k_{crit} \cdot f_{m,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{c,d}}{k_{c,z} \cdot f_{c,0,d}} \leq 1 \quad (3.17)$$

#### 3.2.3.4. Corte

Neste caso, para um esforço de corte em que uma componente da tensão actue na direcção paralela às fibras (Fig.3.59,a), ou quando duas componentes da tensão de corte actuem ambas na direcção perpendicular (Fig.3.59,b), a segurança verifica-se quando:

$$\tau_d \leq f_{v,d} \quad (3.18)$$

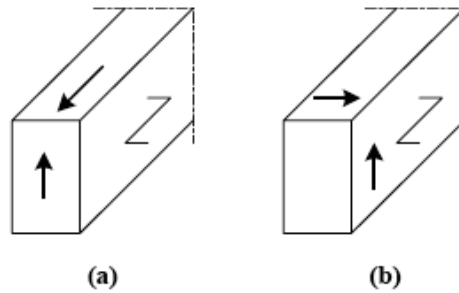


Fig.3.59 – Componentes da tensão no esforço de corte

Junto aos apoios, a contribuição para o total da força de cisalhamento de uma acção carga concentrada na face superior do elemento e dentro de uma distância  $h$  ou  $h_{ef}$  partir da borda do apoio pode ser ignorada (Fig.3.60). No caso de existirem entalhes nos apoios, esta situação apenas se aplica quando o entalhe é na face oposta à do apoio.

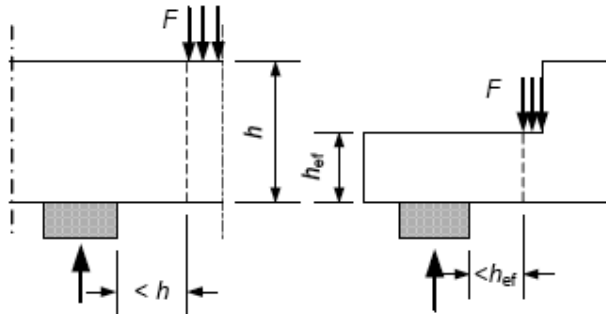


Fig.3.60 – Esforço de corte junto aos apoios

### 3.2.3.5. Torção

No caso da torção deve ser satisfeita a seguinte condição para garantir a segurança:

$$\tau_{tor,d} \leq k_{shape} \cdot f_{v,d} \quad (3.19)$$

$$k_{shape} = \begin{cases} 1,2 & \text{secções circulares} \\ \min \left\{ 1 + 0,15 \frac{h}{b} \right. & \text{secções rectangulares} \\ 2,0 & \end{cases} \quad (3.20)$$

### 3.2.3.6. Tracção (paralela às fibras)

Para a situação de uma peça de madeira ou derivado estar sujeita a um esforço de tracção na direcção paralela fio do material, deve ser respeitada a condição:

$$\sigma_{t,0,d} \leq f_{t,0,d} \quad (3.21)$$

### 3.2.3.7. Compressão perpendicular às fibras

No caso de uma peça de madeira ou derivado estar sujeita a um esforço de compressão na direcção perpendicular ao fio do material a segurança é garantida quando:

$$\sigma_{c,90,d} = k_{c,90} \cdot f_{c,0,d} \quad (3.22)$$

$$k_{c,90} = \frac{l_{ef}}{l} \quad (3.23)$$

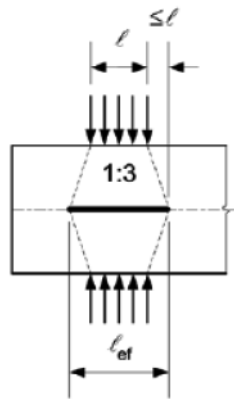


Fig.3.61 – Compressão perpendicular às fibras

### 3.2.3.8. Compressão paralela às fibras (com ou sem flexão)

Para os elementos sujeitos a esforços de compressão na direcção paralela às fibras considera-se duas situações. Quando o elemento não tem tendência a gerar fenómenos de encurvadura nem flexão, a verificação limita-se à expressão 3.24.

$$\sigma_{c,0,d} \leq f_{c,0,d} \quad (3.24)$$

Na situação inversa, em que a encurvadura é necessariamente considerada, a verificação de segurança passa obrigatoriamente pelo cálculo dos coeficientes de encurvadura  $K_{c,y}$  (para encurvadura em torno de y) e  $K_{c,z}$  (para encurvadura em torno de z). Estes coeficientes redutores afectam a capacidade resistente traduzindo assim a instabilidade de resulta do fenómeno de encurvadura. A rigidez deve ser calculada com o módulo de elasticidade característico,  $E_{0,05}$ . Os coeficientes de esbelteza relativa são calculados pelas expressões 3.25 e 3.26.

$$\lambda_{rel,y} = \frac{\lambda_y}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} \quad (3.25)$$

$$\lambda_{rel,z} = \frac{\lambda_z}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} \quad (3.26)$$

Quando  $\lambda_{rel,y} \leq 0,3$  e  $\lambda_{rel,z} \leq 0,3$ , a segurança está garantida se as tensões respeitarem as seguintes condições:

$$\left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}}\right)^2 + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (3.27)$$

$$\left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}}\right)^2 + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (3.28)$$

Para os restantes coeficientes de esbelteza relativa, as tensões são afectadas pelo efeito de deformação e neste caso as condições a verificar para satisfazer a segurança são:

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y} \cdot f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (3.29)$$

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} \cdot f_{c,0,d}} + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (3.30)$$

$$k_{c,y} = \frac{1}{k_y + \sqrt{k_y^2 - k_{rel,y}^2}} \quad (3.31)$$

$$k_{c,z} = \frac{1}{k_z + \sqrt{k_z^2 - k_{rel,z}^2}} \quad (3.32)$$

$$k_y = 0,5 \times (1 + \beta_c \times (\lambda_{rel,y} - 0,3) + \lambda_{rel,y}^2) \quad (3.33)$$

$$k_z = 0,5 \times (1 + \beta_c \times (\lambda_{rel,z} - 0,3) + \lambda_{rel,z}^2) \quad (3.34)$$

$B_c$  é um factor aplicado aos elementos que cumprem os limites de rectitude definidos na secção 10 do EC 5.

$$\beta_c = \begin{cases} 0,2 & \text{madeira maciça} \\ 0,1 & \text{lamelados colados} \end{cases}$$

No caso de uma combinação que corresponda a introdução no elemento de momento flector sobre o eixo forte da secção e de força de compressão, as tensões devem satisfazer a expressão 3.35.

$$\left( \frac{\sigma_{m,d}}{k_{crit} \cdot f_{m,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{c,d}}{k_{c,z} \cdot f_{c,0,d}} \leq 1 \quad (3.35)$$

### 3.2.4. ESTADOS LIMITES DE UTILIZAÇÃO

#### 3.2.4.1. Influência da duração da carga e da humidade

Para os estados limites de serviço, se a estrutura é constituída por elementos com diferentes propriedades dependentes do tempo, o valor médio final do módulo de elasticidade,  $E_{mean,fin}$ , módulo de distorção,  $G_{mean,fin}$ , e módulo de deslizamento nas ligações,  $K_{ser,fin}$ , que são utilizados para calcular a deformação final, devem ser considerados a partir das seguintes expressões:

$$E_{mean,fin} = \frac{E_{mean}}{(1+k_{def})} \quad (3.36)$$

$$G_{mean,fin} = \frac{G_{mean}}{(1+k_{def})} \quad (3.37)$$

$$K_{ser,fin} = \frac{K_{mean}}{(1+k_{def})} \quad (3.38)$$

### 3.2.4.2. Influência da deformabilidade das ligações

No caso de se utilizarem ligações do tipo cavilha, o módulo de deslizamento,  $K_{ser}$  por plano de corte nas ligações quando sujeitas a cargas de serviço deve ser fixado segunda o Quadro 3.10, com  $\rho_m$  em  $\text{kg/m}^3$  e  $d$  ou  $d_c$  em mm e definidos na EN 13271.

Quadro 3.10 – Valores de  $K_{ser}$  para os ligadores (em N/mm) no caso de ligações madeira-madeira e madeira-placas de derivados de madeira

| Tipo de ligador                                                            | $K_{ser}$                 |
|----------------------------------------------------------------------------|---------------------------|
| <i>Cavilhas</i>                                                            |                           |
| Parafusos de porca com folga ou ajustados <sup>a</sup>                     | $\rho_m^{1,5} d/23$       |
| Parafusos de enroscar                                                      |                           |
| Pregos (com pré-furação)                                                   |                           |
| Pregos (sem pré-furação)                                                   | $\rho_m^{1,5} d^{0,8}/30$ |
| Agrafos                                                                    | $\rho_m^{1,5} d^{0,8}/80$ |
| Ligadores em anel do tipo A, de acordo com a EN 912                        |                           |
| Ligadores em placa circular do tipo B, de acordo com a EN 912              | $\rho_m d_c/2$            |
| Ligadores em placa denteada:                                               |                           |
| – Ligadores dos tipos C1 a C9, de acordo com a EN 912                      | $1,5 \rho_m d_c/4$        |
| – Ligadores dos tipos C10 a C11, de acordo com a EN 912                    | $\rho_m d_c/2$            |
| <sup>a</sup> A folga deverá ser acrescentada, separadamente, à deformação. |                           |

Sempre que existir numa ligação materiais diferentes (madeiras ou derivados) com densidades  $\rho_{m,1}$  e  $\rho_{m,2}$ , deve ser utilizado no quadro anterior um  $\rho_m$  correspondente ao resultado da expressão 3.39.

$$\rho_m = \sqrt{\rho_{m,1} \cdot \rho_{m,2}} \quad (3.39)$$

Quando a ligações entre madeira e aço ou madeira e betão,  $K_{ser}$  deve ser baseado no  $\rho_m$  do elemento de madeira podendo ser multiplicado por 2,0.

### 3.2.4.3. Limitação das deformações

As deformações numa estrutura resultantes do efeito das cargas (axiais, corte, flexão e deslizamento das ligações) assim como a humidade devem permanecer dentro dos limites apropriados com o objectivo de não danificar revestimentos, pisos e tectos, divisórias e acabamentos, e além disso conservar um nível visível de segurança elevado.

As flechas num barra são divididas em diferentes componentes resultantes de uma determinada combinação de acções, tal como é descrito na Fig.3.62:

- $w_c$  - contraflecha;
- $w_{inst}$  - flecha instantânea;
- $w_{creep}$  - flecha devida à fluência;
- $w_{fin}$  - flecha final;
- $w_{net,fin}$  - flecha aparente;
- $w_{net,fin} = w_{inst} + w_{creep} - w_c = w_{fin} - w_c$ . (3.40)

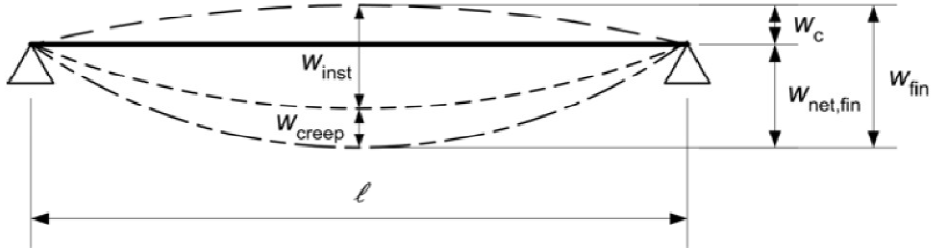


Fig.3.62 – Componentes da flecha de uma barra simplesmente apoiada

O intervalo de valores limites recomendados para cada componente da flecha das barras com comprimento  $l$  é dado no Quadro 3.11, dependendo do grau de deformação que se considera aceitável. A especificação Nacional dos limites pode ser consultada no Anexo Nacional respectivo.

Quadro 3.11 – Valores limite das flechas

|                               | $w_{inst}$        | $w_{net,fin}$     | $w_{fin}$         |
|-------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| <i>Barras com dois apoios</i> | $l/300$ a $l/500$ | $l/250$ a $l/350$ | $l/150$ a $l/300$ |
| <i>Barras em consola</i>      | $l/250$ a $l/250$ | $l/125$ a $l/175$ | $l/75$ a $l/150$  |

#### 3.2.4.4. Limitação das deformações – combinação de acções

A deformação instantânea,  $u_{inst}$ , calcula-se com base na combinação característica de acções de acordo com o EC 0, e usando valores médios dos correspondentes módulos de elasticidade, distorção e deslizamento das ligações.

A deformação final,  $u_{fin}$ , deve ser calculada a partir da combinação quase permanente de acções, de acordo com o EC 0.

No caso de a estrutura ter elementos com diferentes comportamentos de fluência, a deformação final deve ser calculada com os valores médios adequados dos módulos de elasticidade, distorção e deslizamento das ligações.

Para estruturas compostas por elementos, componentes e ligações com o mesmo comportamento e fluência, na hipótese de uma relação linear entre as acções e as correspondentes deformações, podem-se adoptar as seguintes simplificações para determinar a deformação final:

$$u_{fin} = u_{fin,G} + u_{fin,Q1} + u_{fin,Qi} \quad (3.41)$$

$$u_{fin,G} = u_{inst,G} \times (1 + k_{def}) \quad (3.42) \quad \text{devido à acção permanente, G}$$

$$u_{fin,Q,1} = u_{inst,Q,1} \times (1 + \psi_{2,1} \cdot k_{def}) \quad (3.43) \quad \text{devido à sobrecarga principal, Q}_1$$

$$u_{fin,Q,i} = u_{inst,Q,i} \times (\psi_{0,i} + \psi_{2,i} \cdot k_{def}) \quad (3.44) \quad \text{devido às acções secundárias, Q}_i (i>1)$$

Onde  $u_{inst,G}$ ,  $u_{inst,Q,1}$ ,  $u_{inst,Q,i}$  são deformações instantâneas por acções de G, Q<sub>1</sub> e Q<sub>i</sub>

#### 3.2.4.5. Limitação das vibrações

Deve ser assegurado que as acções actantes numa estrutura, ou elemento estrutural, não provocam vibrações que comprometam o funcionamento da construção ou o conforto dos utilizadores. A EN 1995 apresenta um procedimento para verificação do desempenho da estrutura em termos de vibrações. O procedimento apresentado é válido para pavimentos de edifícios, com configuração rectangular em planta, simplesmente apoiados no contorno. A verificação deve ser efectuada considerando a estrutura submetida à acção das cargas permanentes apenas. O primeiro passo desse procedimento consiste no cálculo da frequência fundamental de vibração vertical. No cálculo, deve ser considerado o módulo de elasticidade médio da madeira, e o efeito das acções permanentes apenas. [25] A frequência fundamental toma o valor:

$$f_1 = \frac{\pi}{2l^2} \sqrt{\frac{(EI)_l}{m}} \quad (3.45)$$

- $m$  – massa por unidade de área em kg/m<sup>2</sup>;
- $l$  – vão do pavimento;
- $(EI)_l$  – rigidez do pavimento relativamente a um eixo que perpendicular às suas vigotas.

Pavimento residenciais em que  $f_1 \geq 8\text{Hz}$ , a verificação de segurança em relação à vibração deve ser feita através de uma “análise especial” do desempenho do pavimento em termos de vibrações. Caso contrário ( $f_1 < 8\text{Hz}$ ), a verificação deve ser efectuada de acordo com o procedimento apresentado segundo Eurocódigo 5, no qual são impostas duas condições para cumprir a limitação de vibração:

$$\frac{w}{F} \leq a \quad \text{mm/kN} \quad (3.46)$$

$$v \leq b^{(f_1 \cdot \zeta - 1)} \quad \text{m/(Ns}^2\text{)} \quad (3.47)$$

- $w$  – corresponde à máxima deformação instantânea causada por uma força vertical estática concentrada aplicada num ponto qualquer do pavimento, tendo em conta a distribuição da carga;

- $v$  – velocidade de resposta ao impulso unitário, isto é, o valor inicial máximo de velocidade vertical de vibração (m/s) causada por um impulso unitário de 1Ns aplicado no ponto do pavimento que provoca a maior resposta. Valores acima de 40Hz podem ser excluídos;
- $\zeta$  – coeficiente de amortecimento.

O intervalo recomendado de limitação de valores de  $a$  e  $b$  assim como a relação entre eles é dada na Fig.3.63. A especificação Nacional dos limites pode ser consultada no Anexo Nacional respectivo.

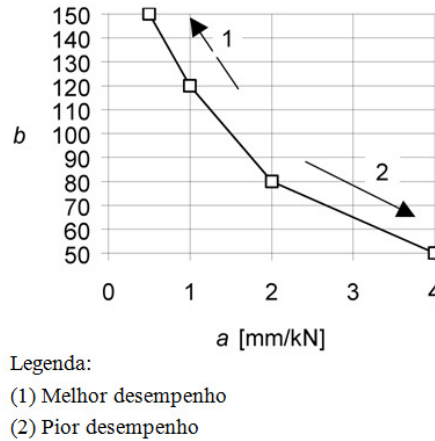


Fig.3.63 – Limitação das vibrações – relação entre  $a$  e  $b$

Para um pavimento rectangular com dimensões  $b \times l$ , simplesmente apoiado nos contornos, a velocidade de resposta ao impulso unitário pode ser aproximada pela expressão 3.48.

$$v = \frac{4 \times (0,4 + 0,6 \times n_{40})}{m \cdot b \cdot l + 200} \quad (3.48)$$

- $v$  – velocidade de resposta ao impulso unitário;
- $n_{40}$  – número de modos de primeira ordem com frequência natural superior a 40Hz;
- $b$  – largura do pavimento em metros;
- $l$  – vão do pavimento em metros;
- $m$  – massa do pavimento em  $\text{kg/m}^2$ .

O valor de  $n_{40}$  pode ser calculado seguindo a expressão 3.49, na qual,  $(EI)_b$  é a rigidez do pavimento relativamente a um eixo que paralelo às suas vigotas e onde  $(EI)_b < (EI)_l$ .

$$n_{40} = \left\{ \left( \left( \frac{40}{f_1} \right)^2 - 1 \right) \left( \frac{b}{l} \right)^4 \frac{(EI)_l}{(EI)_b} \right\}^{0,25} \quad (3.49)$$

### 3.2.5. LIGAÇÕES NAS ESTRUTURAS DE MADEIRA

As ligações representam um importante ponto no dimensionamento das estruturas de madeira, pois praticamente toda estrutura de madeira apresenta elementos a serem interligados. As ligações são geralmente o ponto mais fraco de uma estrutura de madeira. Sujeitas a esforços e tensões localizadas,

constituem zonas críticas que exigem uma atenção cuidada, de modo a não ser colocada em causa a estabilidade global da estrutura. Os materiais constituintes de uma ligação em madeira são a madeira maciça, os derivados de madeira e o aço [27].

O EC5 regula vários tipos de ligações e as que não estão entre as regras ditadas por este, devem ter a capacidade de carga e rigidez da ligação determinadas por testes de acordo com as normas EN 1075, EN 1380, EN 1381, EN 26891 e EN 28970.

A disposição e dimensão dos elementos numa ligação assim como os espaçamentos entre eles e entre eles e os limites das peças devem ser escolhidos de modo a que a resistência e rigidez esperada possam ser obtidas. Deve ser tido em conta que a capacidade de transporte de carga de uma ligação com vários conectores do mesmo tipo e dimensão podem ser inferiores ao somatório das capacidades individuais de transporte de carga para cada conector individualmente.

Para uma fila de elementos de fixação paralela à direcção das fibras da madeira, a capacidade característica de transporte de carga efectiva paralela a essa linha,  $F_{v,ef,Rk}$ , de ser considerada segundo:

$$F_{v,ef,Rk} = n_{ef} \cdot F_{v,Rk} \quad (3.50)$$

Onde:

- $F_{v,ef,Rk}$  – capacidade característica resistente efectiva de uma fila de conectores paralela à direcção do fio da madeira;
- $n_{ef}$  – número efectivo de conectores na linha;
- $F_{v,Rk}$  - capacidade característica resistente de cada conector da linha paralela.

Para uma força actuando segundo uma direcção que faz um ângulo com a direcção da linha de conectores, deve verificar-se que a força componente paralela à linha é inferior ou igual à capacidade de transporte de carga calculado segundo a expressão 3.50.

Para planos de corte das conexões múltiplos, a resistência de cisalhamento de cada plano de corte deve ser determinada pelo pressuposto de que cada plano de cisalhamento faz parte de uma série de três membros de conexão.

Quando uma força actua numa ligação que faz um ângulo com a direcção das fibras, (Fig.3.64), deve-se ter em conta a possibilidade de fractura da madeira devido à tensão causada pela força componente,  $F_{Ed} \times \sin\alpha$ , perpendicular ao veio. Essa possibilidade é tida em conta quando a seguinte condição é satisfeita:

$$F_{v,Ed} \leq F_{90,Rd} \quad (3.51)$$

$$F_{v,Ed} = \max \left\{ \frac{F_{v,Ed,1}}{F_{v,Ed,2}} \right\} \quad (3.52)$$

Onde:

- $F_{90,Rd}$  – capacidade resistente de cálculo, determinada a partir da capacidade resistente característica  $F_{90,Rk}$ ;
- $F_{v,Ed,1}, F_{v,Ed,2}$  – são as forças de corte de cada lado da ligação.

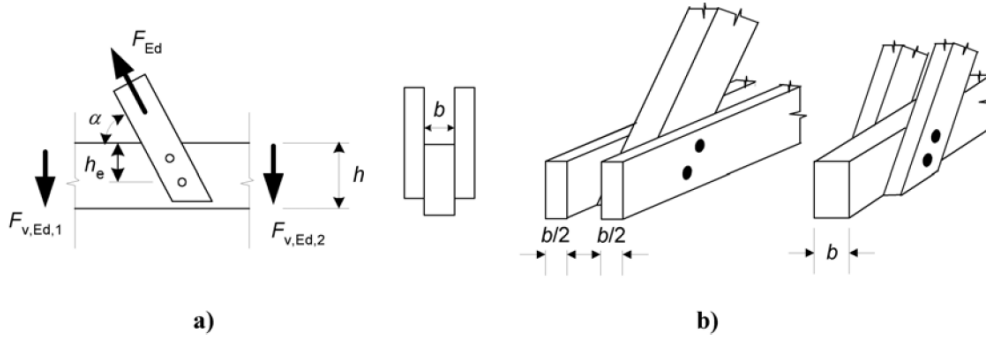


Fig.3.64 – Forças inclinadas transmitidas por uma ligação

A capacidade de carga característica de uma ligação deve ser reduzida se a ligação estiver sujeita a alternância de as forças internas devido a acções de longo ou médio prazo.

O efeito sobre a resistência da ligação de uma acção longo prazo ou a médio prazo a uma alternância entre uma força de tracção,  $F_{t,Ed}$ , e uma força de compressão,  $F_{c,Ed}$ , deve ter tido em conta verificando a ligação para resistir a uma força de  $F_{t,Ed} + 0,5 F_{c,Ed}$  e  $F_{c,Ed} + 0,5 F_{t,Ed}$ .

Segue-se uma curta exposição de algumas considerações sobre diferentes tipos de ligação, cuja abordagem mais exaustiva das ligações descritas completa análise das não descritas se remete para a consulta do EC5 – secção 8.

### 3.2.5.1. Capacidade de transporte de carga lateral dos ligadores metálicos tipo cavilha

Para a determinação da capacidade de transporte de carga característica dos ligadores de metal tipo cavilha deve ter-se em consideração os contributos da elasticidade, resistência ao esmagamento localizado e a resistência ao arranque.

#### ▪ Ligações madeira - madeira

A capacidade de carga característica de pregos, agrafos, parafusos, cavilhas e parafusos de enroscar por plano de corte e por ligador, deve ser tomado como o valor mínimo encontrado entre as seguintes expressões apoiadas na Fig.3.65.

Para ligadores com um plano de corte:

$$F_{v,Rk} = m \begin{cases} f_{h,1,k} t_1 d & (a) \\ f_{h,2,k} t_2 d & (b) \\ \frac{f_{h,1,k} t_1 d}{1+\beta} \left[ \sqrt{\beta + 2\beta^2 \left[ 1 + \frac{t_2}{t_1} + \left( \frac{t_2}{t_1} \right)^2 \right] + \beta^3 \left( \frac{t_2}{t_1} \right)^2} - \beta \left( 1 + \frac{t_2}{t_1} \right) \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} & (c) \\ 1,05 \frac{f_{h,1,k} t_1 d}{2+\beta} \left[ \sqrt{2\beta(1+\beta) + \frac{4\beta(2+\beta)M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} d \cdot t_1^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} & (d) \\ 1,05 \frac{f_{h,1,k} t_1 d}{1+2\beta} \left[ \sqrt{2\beta^2(1+\beta) + \frac{4\beta(2+\beta)M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} d \cdot t_2^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} & (e) \\ 1,15 \sqrt{\frac{2\beta}{1+\beta}} \times \sqrt{2M_{y,Rk} \cdot f_{h,1,k} d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} & (f) \end{cases} \quad (3.53)$$

Para ligadores com dois planos de corte

$$F_{v,Rk} = \min \begin{cases} f_{h,1,k} t_1 d & (g) \\ 0,5 f_{h,2,k} t_2 d & (h) \\ 1,05 \frac{f_{h,1,k} t_1 d}{2+\beta} \left[ \sqrt{2\beta(1+\beta) + \frac{4\beta(2+\beta)M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} d t_1^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} & (j) \\ 1,15 \sqrt{\frac{2\beta}{1+\beta}} \times \sqrt{2M_{y,Rk} \cdot f_{h,1,k} d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} & (k) \end{cases} \quad (3.54)$$

Onde:

- $F_{v,Rk}$  - capacidade característica resistente por plano de corte por ligador;
- $t_i$  - corresponde à espessura dos elementos de madeira;
- $f_{h,i,k}$  - resistência característica ao esmagamento localizado no elemento  $i$ ;
- $d$  - diâmetro do ligador;
- $M_{y,Rk}$  - momento característico de cedência do ligador;
- $\beta$  - rácio entre a resistência ao esmagamento dos diferentes elementos ligados;
- $F_{ax,Rk}$  - capacidade característica de resistência axial ao arranque de um ligador.

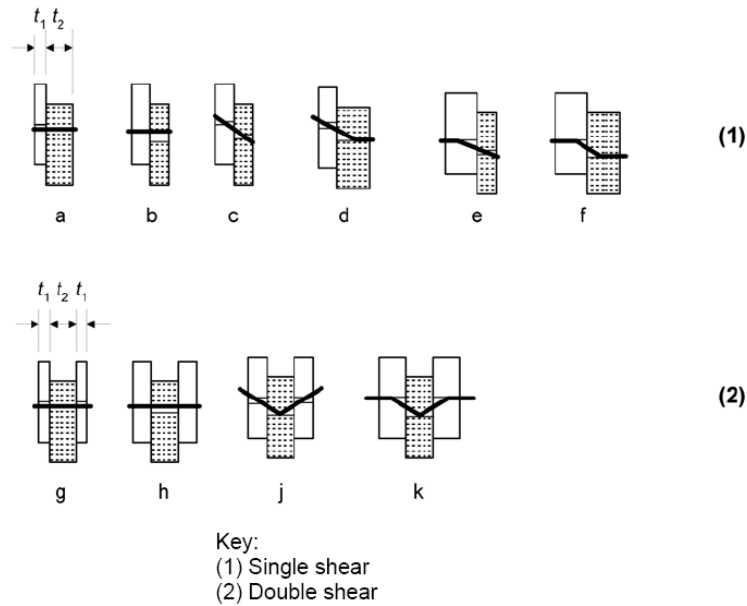


Fig.3.65 – Modos de ruptura para ligações madeira - madeira

#### ▪ Ligações aço - madeira

A capacidade característica de transporte de carga de uma ligação aço-madeira depende da espessura das chapas de aço. Chapas de aço de espessura inferior ou igual a  $0,5d$  são classificados como chapas de aço fino e placas de espessura igual ou superior a  $d$  com o intervalo de tolerância no diâmetro da furação inferior a  $0,1d$  são classificadas como chapas grossas. A capacidade característica de

transporte de carga para ligações com chapa de aço com espessura definida entre fina e grossa deve ser calculada por interpolação linear entre os valores limite das placas fina e grossa.

A capacidade de carga característica de pregos, agrafos, parafusos, cavilhas e parafusos de enroscar por plano de corte e por ligador, deve ser tomado como o valor mínimo encontrado entre as seguintes expressões apoiadas na Fig.3.66 cujos parâmetros correspondem aos anteriormente detalhados.

Para placas de aço finas em corte simples:

$$F_{v,Rk} = \min \begin{cases} f_{h,k} t_1 d & (a) \\ 1,15 \sqrt{2 M_{y,Rk} \cdot f_{h,k} d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} & (b) \end{cases} \quad (3.55)$$

Para placas de aço grossas em corte simples:

$$F_{v,Rk} = \min \begin{cases} f_{h,k} t_1 d \left[ \sqrt{2 + \frac{4 M_{y,Rk}}{f_{h,k} d \cdot t_1^2}} - 1 \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} & (c) \\ 2,3 \sqrt{2 M_{y,Rk} \cdot f_{h,k} d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} & (d) \\ f_{h,k} t_1 d & (e) \end{cases} \quad (3.56)$$

Para placas de aço de qualquer espessura no centro do elemento com os conectores sujeitos a corte duplo:

$$F_{v,Rk} = \min \begin{cases} f_{h,k} t_1 d & (f) \\ f_{h,1,k} t_1 d \left[ \sqrt{2 + \frac{4 M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} d \cdot t_1^2}} - 1 \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} & (g) \\ 2,3 \sqrt{2 M_{y,Rk} \cdot f_{h,1,k} d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} & (h) \end{cases} \quad (3.57)$$

Para placas de aço de finas nas faces do elemento com os ligadores sujeitos a corte duplo:

$$F_{v,Rk} = \min \begin{cases} 0,5 f_{h,2,k} t_2 d & (j) \\ 1,15 \sqrt{2 M_{y,Rk} \cdot f_{h,2,k} d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} & (k) \end{cases} \quad (3.58)$$

Para placas de aço de grossas nas faces do elemento com os ligadores sujeitos a corte duplo:

$$F_{v,Rk} = \min \begin{cases} 0,5 f_{h,2,k} t_2 d & (l) \\ 2,3 \sqrt{M_{y,Rk} \cdot f_{h,2,k} d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} & (m) \end{cases} \quad (3.59)$$

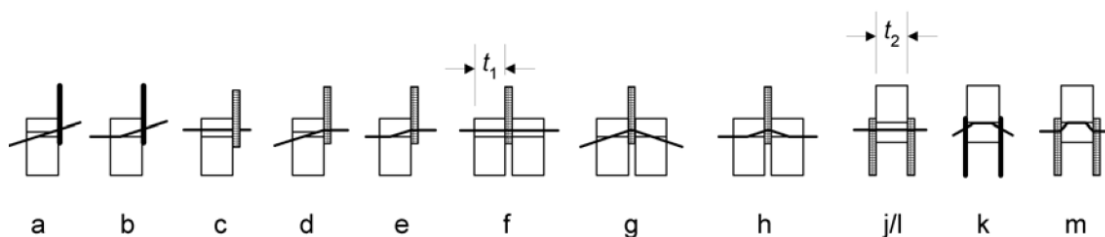


Fig.3.66 - Modos de ruptura para ligações aço - madeira

### 3.2.5.2. Ligações com pregos

As ligações com pregos são as mais vulgarmente utilizadas na construção em madeiras principalmente em estruturas ligeiras, existindo diferentes comprimentos, tipo secção transversal e tratamentos da superfície.

O tipo de prego mais comum é o prego liso de aço feito a partir de arame tem uma haste de secção transversal circular e é cortado a partir de uma bobina de fio com resistência mínima à tracção de  $600 \text{ N/mm}^2$ . Há disponibilidade de uma gama standard de diâmetros, com um máximo de 8 mm podendo ser simples ou tratada contra a corrosão, como por exemplo, galvanização. A cabeça do prego é normalmente forjada numa circunferência plana de cerca de duas vezes o diâmetro do varão, mas existindo também pregos com cabeças pequenas para estas sejam impulsionadas e niveladas pela superfície da madeira [26].

#### ▪ Pregos carregados lateralmente

Para as ligações pregadas é importante definir inicialmente a profundidade que os pregos atingem, sendo esquematizado na Fig.3.67 dois diferentes tipos de ligações, corte simples e duplo.

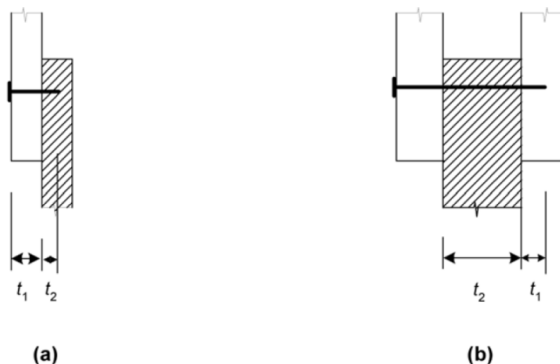


Fig.3.67 – Definição de  $t_1$  e  $t_2$  para o corte simples e duplo

Deve proceder-se a uma pré-furação quando:

- A densidade característica da madeira for maior que  $500 \text{ kg/m}^3$ ;
- O Diâmetro dos pregos for maior que 8 mm.

Para pregos com secção quadrada ou com ranhuras, o diâmetro,  $d$ , deve ser considerado igual à dimensão lateral. Os pregos produzidos a partir de arame com resistência mínima à ruptura de  $600 \text{ N/mm}^2$ , devem seguir os seguintes valores de momento de cedência característicos:

$$M_{y,Rk} = \begin{cases} 0,3 f_u \cdot d^{2,6} & \text{pregos redondos} \\ 0,45 f_u \cdot d^{2,6} & \text{pregos quadrados ou com ranhuras} \end{cases} \quad (3.60)$$

Onde:

- $M_{y,Rk}$  – momento característico de cedência em N.mm;
- $d$  – diâmetro dos pregos como definido na EN 14592, em mm;
- $f_u$  – tensão resistente do arame em N/mm<sup>2</sup>

No caso de pregos com diâmetros superiores a 8 mm, a resistência ao esmagamento localizado difere com a utilização ou não de pré-furação.

Sem utilização de pré-furação:

$$f_{h,k} = 0,082 \rho_k d^{-0,3} \quad N / mm^2 \quad (3.61)$$

Com utilização de pré-furação:

$$f_{h,k} = 0,082(1 - 0,01d) \rho_k \quad N / mm^2 \quad (3.62)$$

Onde:

- $\rho_k$  – tensão resistente do arame em N/mm<sup>2</sup>;
- $d$  – diâmetro dos pregos em mm.

Os pregos com mais de 8 mm de diâmetro assumem uma resistência ao esmagamento semelhante à dos parafusos.

Quando a ligação se realiza com três elementos, os pregos podem sobrepor-se desde que  $t-t_2$  (Fig.3.68) seja maior que  $4d$ .

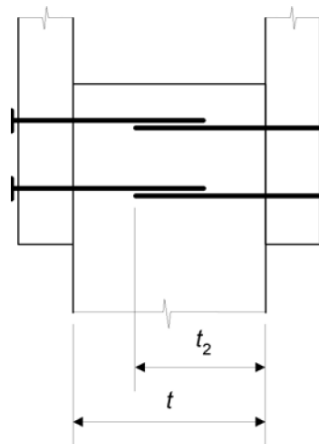


Fig.3.68 – Sobreposição de pregos

Para uma linha de  $n$  pregos paralelos ao veio da madeira, a menos que estejam desalinhados de pelo menos  $1d$  na direcção perpendicular (Fig.3.69), a capacidade de carga transportada paralela ao fio deve ser calculada tendo em atenção o número efectivo de pregos  $n_{ef}$ :

$$n_{ef} = n^{k_{ef}} \quad (3.63)$$

Onde:

- $n_{ef}$  – número efectivo de pregos por linha;
- $n$  – número de pregos por linha;

$k_{ef}$  – factor que tem em conta o espaçamento e a pré-furação (

- Quadro 3.12).

Quadro 3.12 – Valores para  $k_{ef}$

| Espaçamento <sup>a</sup> | $k_{ef}$        |                 |
|--------------------------|-----------------|-----------------|
|                          | Sem pré-furação | Com pré-furação |
| $a_1 \geq 14d$           | 1,0             | 1,0             |
| $a_1 = 10d$              | 0,85            | 0,85            |
| $a_1 = 7d$               | 0,7             | 0,7             |
| $a_1 = 4d$               | -               | 0,5             |

<sup>a</sup> Para espaçamentos intermédios, permite-se uma interpolação linear de  $k_{ef}$ .

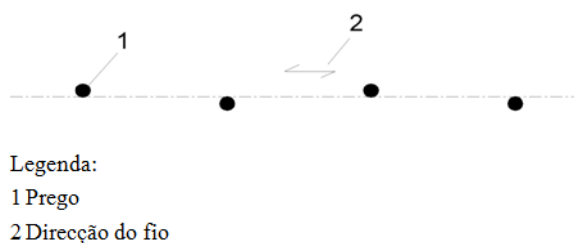


Fig.3.69 – Pregos desalinhados na direcção perpendicular à das fibras

#### ▪ Pregos para ligação madeira - madeira

Nas ligações madeira - madeira, a penetração na peça que recebe a ponta deve ser de pelo menos  $8d$  para os pregos lisos, podem reduzir-se para  $6d$  nos outros tipos de pregos. Além disso, os pregos colocados no topo de um elemento, ou seja, a direcção da penetração paralela à direcção das fibras, devem ser considerados como não capazes de transmitir forças laterais.

As distâncias mínimas entre pregos e entre pregos e margens são definidas no com referência à onde:

- $a_1$  – espaçamento dos pregos dentro de uma linha paralela ao fio;
- $a_2$  – espaçamento dos pregos dentro de uma linha perpendicular ao fio;

- $a_{3,c}$  – distância entre o prego e o topo não carregado;
- $a_{3,t}$  – distância entre o prego e o topo carregado;
- $a_{4,c}$  – distância entre o prego e o bordo não carregado;
- $a_{4,t}$  – distância entre o prego e o bordo carregado;
- $\alpha$  – ângulo entre a força e a direcção do fio.

Quadro 3.13 – Espaçamentos e distâncias mínimas para pregos

| Espaçamento ou distância (ver Figura 8.7)        | Ângulo $\alpha$                        | Espaçamento ou distância mínimos                 |                                                       |                                                 |
|--------------------------------------------------|----------------------------------------|--------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
|                                                  |                                        | sem pré-furação                                  |                                                       | com pré-furação                                 |
|                                                  |                                        | $\rho_k \leq 420 \text{ kg/m}^3$                 | $420 \text{ kg/m}^3 < \rho_k \leq 500 \text{ kg/m}^3$ |                                                 |
| Espaçamento $a_1$ (paralelo ao fio)              | $0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$   | $d < 5 \text{ mm:}$<br>$(5+5 \cos \alpha ) d$    | $(7+8 \cos \alpha ) d$                                | $(4+ \cos \alpha ) d$                           |
|                                                  |                                        | $d \geq 5 \text{ mm:}$<br>$(5+7 \cos \alpha ) d$ |                                                       |                                                 |
| Espaçamento $a_2$ (perpendicular ao fio)         | $0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$   | $5d$                                             | $7d$                                                  | $(3+ \sin \alpha ) d$                           |
| Distância $a_{3,t}$ (extremidade solicitada)     | $-90^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$  | $(10+5 \cos \alpha) d$                           | $(15+5 \cos \alpha) d$                                | $(7+5 \cos \alpha) d$                           |
| Distância $a_{3,c}$ (extremidade não solicitada) | $90^\circ \leq \alpha \leq 270^\circ$  | $10d$                                            | $15d$                                                 | $7d$                                            |
| Distância $a_{4,t}$ (bordo solicitado)           | $0^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$   | $d < 5 \text{ mm:}$<br>$(5+2 \sin \alpha) d$     | $d < 5 \text{ mm:}$<br>$(7+2 \sin \alpha) d$          | $d < 5 \text{ mm:}$<br>$(3+2 \sin \alpha) d$    |
|                                                  |                                        | $d \geq 5 \text{ mm:}$<br>$(5+5 \sin \alpha) d$  | $d \geq 5 \text{ mm:}$<br>$(7+5 \sin \alpha) d$       | $d \geq 5 \text{ mm:}$<br>$(3+4 \sin \alpha) d$ |
| Distância $a_{4,c}$ (bordo não solicitado)       | $180^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$ | $5d$                                             | $7d$                                                  | $3d$                                            |

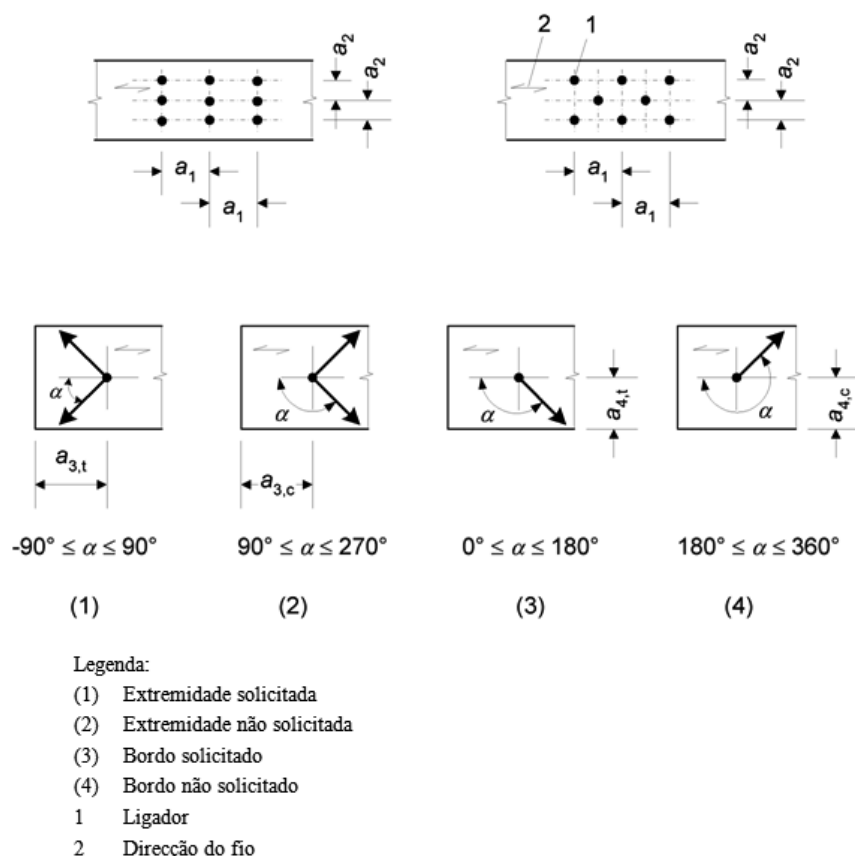


Fig.3.70 – Definição dos diferentes espaçamentos interiores e exteriores

Deve proceder-se à pré-furação na madeira quando o elemento de madeira tiver uma espessura inferior a:

$$t = \max \left\{ \begin{array}{l} 7d \\ (13d - 30) \frac{\rho_k}{200} \end{array} \right. \quad (3.64)$$

▪ Pregos para ligação aço – madeira

As distâncias mínimas entre os pregos e os extremos da peça de madeira corresponde aos do Quadro 3.13. Para os espaçamentos entre pregos, os valores correspondem os do Quadro 3.13 multiplicados por 0,7.

▪ Pregos carregados axialmente

Os pregos lisos não devem ser usados para resistir a cargas axiais permanentes ou de longa duração. No caso de pregos trabalhados (roscados p. e.), apenas se considera a parte do prego não lisa como resistente.

A resistência característica ao arranque dos pregos,  $F_{ax,Rk}$ , para pregos colocados perpendicularmente às fibras ou inclinados (Fig.3.71) deve ser considerada:

Para pregos não lisos:

$$F_{ax,Rk} = \begin{cases} f_{ax,k} \cdot d \cdot t_{pen} & (a) \\ f_{head,k} \cdot d_h^2 & (b) \end{cases} \quad (3.65)$$

Para pregos lisos:

$$F_{ax,Rk} = \begin{cases} f_{ax,k} \cdot d \cdot t_{pen} & (a) \\ f_{ax,k} \cdot d \cdot t + f_{head,k} \cdot d_h^2 & (b) \end{cases} \quad (3.66)$$

Onde:

- $f_{ax,k}$  – resistência ao arranque da peça que recebe a ponta do prego;
- $f_{head,k}$  – resistência ao atravessamento da cabeça do prego;
- $d$  – diâmetro do prego;
- $t_{pen}$  – comprimento de penetração do prego ou da parte trabalhada deste no elemento que recebe a ponta;
- $t$  – comprimento que do prego que fica no elemento que recebe a cabeça;
- $d_h$  – diâmetro da cabeça do prego.

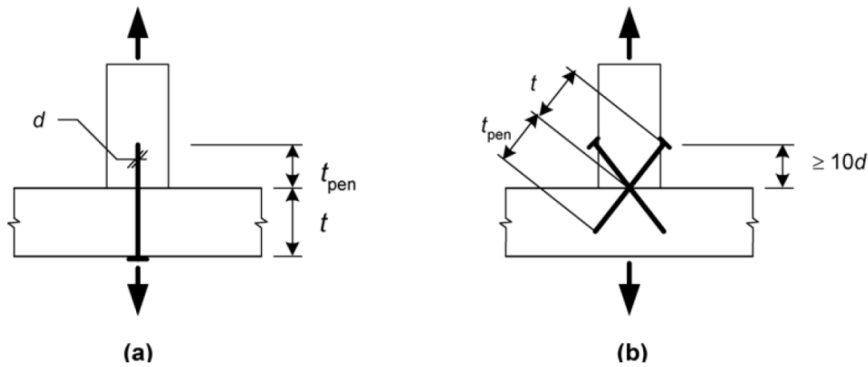


Fig.3.71 – Pregos colocados perpendicularmente às fibras e inclinados

As resistências características,  $f_{ax,k}$  e  $f_{head,k}$ , devem ser determinadas segundo as normas EN1382, EN1383, e EN14358. Para pregos lisos mas com um comprimento de penetração na peça que recebe a ponta superior a  $12d$ , deve considerar-se:

$$f_{ax,k} = 20 \times 10^{-6} \rho_k^2 \quad (3.67)$$

$$f_{head,k} = 70 \times 10^{-6} \rho_k^2 \quad (3.68)$$

▪ *Combinação de cargas axiais e laterais nos pregos*

Para ligações sujeitas a uma combinação de cargas axiais ( $F_{ax,Ed}$ ) e laterais ( $F_{v,Ed}$ ), devem ser cumpridas as seguintes condições.

Para pregos lisos:

$$\frac{F_{ax,Ed}}{F_{ax,Rd}} + \frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} \leq 1 \quad (3.69)$$

Para outros tipos de pregos definidos na EN14592:

$$\left( \frac{F_{ax,Ed}}{F_{ax,Rd}} \right)^2 + \left( \frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} \right)^2 \leq 1 \quad (3.70)$$

### 3.2.5.3. Ligações com parafusos de porca

▪ *Parafusos carregados lateralmente*

Considera-se para os parafusos de porca um momento característico de cedência de:

$$M_{y,Rk} = 0,3 \cdot f_{u,k} \cdot d^{2,6} \quad (3.71)$$

Onde:

- $M_{y,Rk}$  – momento característico de cedência em N.mm;
- $f_{u,k}$  – tensão resistente característica em  $N/mm^2$ ;
- $d_h$  – diâmetro do parafuso de porca em mm.

No caso de parafusos com mais de 3 cm de diâmetro, devem ser usados os valores das expressões 3.72 e 3.73 para a resistência ao esmagamento localizado na madeira e LVL, com determinado ângulo com o fio da madeira.

$$f_{h,\alpha,k} = \frac{f_{h,0,k}}{k_{90} \cdot \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha} \quad (3.72)$$

$$f_{h,0,k} = 0,082(1 - 0,01d)\rho_k \quad (3.73)$$

Onde:

- $f_{h,0,k}$  – resistência característica ao esmagamento paralelo ao fio em  $N/mm^2$ ;
- $\rho_k$  – densidade característica da madeira;
- $\alpha$  – ângulo que a direcção da carga faz com o fio da madeira

$$\begin{aligned}
 & - d - \text{diâmetro do parafuso de porca em mm.} \\
 & - k_{90} = \begin{cases} 1,35 + 0,015d & \text{madeiras macias} \\ 1,30 + 0,015d & \text{LVL} \\ 0,90 + 0,015d & \text{Madeiras duras} \end{cases} \quad (3.74)
 \end{aligned}$$

O espaçamento mínimo entre parafusos e entre os parafusos e os bordos da peça de madeira são definidos no apoiado pela Fig.3.70.

Quadro 3.14 - Espaços e distâncias mínimas para parafusos de porca

| Espaço e distâncias<br>(ver Fig.3.70)  | Ângulo                                 | Espaço ou distância<br>mínimas     |
|----------------------------------------|----------------------------------------|------------------------------------|
| $a_1$ (paralelo ao fio)                | $0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$   | $(4 +  \cos \alpha ) d$            |
| $a_2$ (perpendicular ao fio)           | $0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$   | $4 d$                              |
| $a_{3,t}$ (extremidade solicitada)     | $-90^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$  | $\max (7 d; 80 \text{ mm})$        |
| $a_{3,c}$ (extremidade não solicitada) | $90^\circ \leq \alpha < 150^\circ$     | $\max [(1 + 6 \sin \alpha) d; 4d]$ |
|                                        | $150^\circ \leq \alpha < 210^\circ$    | $4 d$                              |
|                                        | $210^\circ \leq \alpha \leq 270^\circ$ | $\max [(1 + 6 \sin \alpha) d; 4d]$ |
| $a_{4,t}$ (bordo solicitado)           | $0^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$   | $\max [(2 + 2 \sin \alpha) d; 3d]$ |
| $a_{4,c}$ (bordo não solicitado)       | $180^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$ | $3 d$                              |

Para uma linha de parafusos paralela ao fio da madeira, a capacidade de transporte de carga deve ser calculada como anteriormente referido, através do número de parafusos efectivo,  $n_{ef}$ , que se define por:

$$n_{ef} = \min \left\{ \begin{matrix} n \\ n^{0,94} \sqrt{\frac{a_1}{13d}} \end{matrix} \right. \quad (3.75)$$

Onde:

- $a_1$  – espaço entre parafusos na direcção do fio;
- $n$  – número de parafusos na linha;
- $d$  – diâmetro do parafuso de porca em mm.

No caso de linhas de parafusos perpendiculares à direcção das fibras,  $n = n_{ef}$ , e para direcções intermédias entre paralela e perpendicular, pode-se fazer uma interpolação linear entre os dois extremos.

Para ligações aço – madeira com parafusos de porca são aplicadas as mesmas considerações que para as ligações com cavilhas metálicas.

▪ *Parafusos carregados axialmente*

A capacidade de suporte de carga axial e capacidade retirada de um parafuso deve ser tomada como o menor valor de.

- A capacidade de resistência à tracção do parafuso;
- A capacidade de suporte de carga quer das anilhas ou da chapa de aço utilizada para as ligações aço – madeira.

A capacidade de carga das anilhas deve ser determinada assumindo uma tensão característica de compressão na área de contacto de  $3,0 f_{c,90,k}$ .

A capacidade de carga de cada parafuso numa placa de aço não deve exceder a capacidade de uma arruela circular com um diâmetro correspondente ao mínimo de:

- $12t$ , onde  $t$  é a chapa de espessura;
- $4d$ , onde  $d$  é o parafuso de diâmetro.

3.2.5.4. *Ligações com cavilhas de aço*

As considerações tomadas anteriormente para os parafusos carregados lateralmente correspondem às considerações seguidas para as cavilhas de aço à excepção dos espaçamentos mínimos entre cavilhas e entre os cavilhas e os bordos da peça de madeira, que são definidos no Quadro 3.15.

Quadro 3.15 - Espaçamentos e distâncias mínimas para cavilhas de aço

| <i>Espaçamento e distâncias<br/>(ver Fig.3.70)</i> | <i>Ângulo</i>                          | <i>Espaçamento ou distância<br/>mínimos</i> |
|----------------------------------------------------|----------------------------------------|---------------------------------------------|
| $a_1$ (paralelo ao fio)                            | $0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$   | $(3 + 2   \cos \alpha   ) d$                |
| $a_2$ (perpendicular ao fio)                       | $0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$   | $3 d$                                       |
| $a_{3,t}$ (extremidade solicitada)                 | $-90^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$  | $\max (7 d; 80 \text{ mm})$                 |
| $a_{3,c}$ (extremidade não solicitada)             | $90^\circ \leq \alpha < 150^\circ$     | $\max(a_{3,t}   \sin \alpha   ) d; 3d)$     |
|                                                    | $150^\circ \leq \alpha < 210^\circ$    | $3 d$                                       |
|                                                    | $210^\circ \leq \alpha \leq 270^\circ$ | $\max(a_{3,t}   \sin \alpha   ) d; 3d)$     |
| $a_{4,t}$ (bordo solicitado)                       | $0^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$   | $\max([2 + 2 \sin \alpha] d; 3d)$           |
| $a_{4,c}$ (bordo não solicitado)                   | $180^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$ | $3 d$                                       |

3.2.5.5. *Ligações com parafusos de enroscar*

▪ *Parafusos carregados lateralmente*

Nos parafusos de enroscar deve ser tido em conta o efeito da parte roscada do parafuso na determinação da capacidade de transporte de carga, utilizando um diâmetro efectivo,  $d_{ef}$ .

Para parafusos com parte da espiga lisa e em que o diâmetro da zona roscada é igual ao da zona lisa, aplica-se o anteriormente referido para a capacidade de transporte de carga lateral dos ligadores metálicos tipo cavilha, desde que:

- O diâmetro efectivo,  $d_{ef}$ , é considerado o diâmetro da zona lisa da espiga;
- A zona lisa da espiga penetra no elemento que recebe a ponta do parafuso, não mais que  $4d$ .

No caso de não se cumprirem estas condições, a capacidade de transporte de carga dos parafusos deve ser calculada com o diâmetro efectivo,  $d_{ef}$ , igual a 1,1 vezes o diâmetro da zona roscada.

Para parafusos com espiga de parte lisa com diâmetro superior a 6 mm aplicam-se as regras citadas para os parafusos com porca carregados lateralmente, e para diâmetros inferiores a 6 mm aplicam-se o definido para os pregos carregados lateralmente.

▪ *Parafusos carregados axialmente*

Na avaliação da capacidade de transporte de carga de ligações com parafusos axialmente carregados devem ser verificados os seguintes modos de ruptura:

- A resistência ao arranque da parte roscada do parafuso;
- Para os parafusos utilizados em combinação com chapas de aço, a capacidade de carga da cabeça do parafuso deve ser maior que a resistência à ruptura do parafuso;
- Resistência ao atravessamento da cabeça do prego;
- A tensão de resistência do parafuso;
- Para os parafusos utilizados em conjunto com placas de aço, a falha ao longo da circunferência de um grupo de parafusos.

O espaçamento mínimo e distância mínima aos bordos são definidos no Quadro 3.16.

Quadro 3.16 - Espaçamentos e distâncias mínimas para parafusos de enroscar

| Parafusos                                             | Espaçamento mínimo | Distância mínima ao bordo |
|-------------------------------------------------------|--------------------|---------------------------|
| <i>Introduzidos em ângulo recto em relação ao fio</i> | $4d$               | $4d$                      |
| <i>Introduzido na extremidade do elemento</i>         | $4d$               | $2,5d$                    |

A penetração da parte roscada na peça que recebe a ponta do parafuso deve ser de pelo menos  $6d$ .

A capacidade resistente característica ao arranque de ligações com parafusos de enroscar solicitados axialmente deve ser tomada como:

$$F_{ax,\alpha,Rk} = n_{ef} (\pi \cdot d \cdot l_{ef})^{0,8} f_{ax,\alpha,k} \quad (3.75)$$

Onde:

- $F_{ax,\alpha,Rk}$  – capacidade resistente característica ao arranque da ligação que faz um ângulo  $\alpha$  com o fio;

- $n_{ef}$  – número efectivo de parafusos;
- $d$  – diâmetro exterior medido na parte roscada;
- $l_{ef}$  – comprimento de penetração da parte roscada na peça que recebe a ponta descontado de um diâmetro do parafuso;
- $f_{ax,\alpha,Rk}$  – tensão característica de arranque quando a ligação faz um ângulo  $\alpha$  com o fio.

A tensão característica de arranque quando a ligação faz um ângulo  $\alpha$  com o fio deve ser considerada como:

$$f_{ax,\alpha,k} = \frac{f_{ax,k}}{\sin^2 \alpha + 1,5 \cos^2 \alpha} \quad (3.78)$$

$$f_{ax,k} = 3,6 \times 10^{-3} \rho_k^{1,5} \quad (3.79)$$

Os modos de ruptura do aço ou da madeira em redor do parafuso são frágeis, ou seja existe pouca deformação e uma capacidade de redistribuição de esforços muito pequena.

Para uma ligação com um grupo de parafusos carregado por uma força componente paralela à espiga, o número efectivo de parafusos é dado por:

$$n_{ef} = n^{0,9} \quad (3.80)$$

▪ *Combinação de cargas axiais e laterais nos parafusos de enroscar*

Para ligações com parafusos roscados submetidos a uma combinação de carga axial e carga lateral, deve-se verificar a condição dada pela expressão 3.70.



# 4

## CASO DE ESTUDO, ESTRUTURA RESISTENTE E ACÇÕES

O caso de estudo apresentado refere-se a uma habitação unifamiliar com estrutura resistente de madeira e localização na freguesia de Foz do Arelho, concelho Caldas da Rainha, distrito de Leiria. Tem como principal objectivo aplicar as considerações sobre dimensionamento e concepção referenciadas anteriormente. A estrutura de madeira idealizada terá que suportar todas as cargas associadas a uma habitação, tais como peso próprio, sobrecargas, acção do vento e acção sísmica. Não foram consideradas neste estudo a acção do fogo, assim como a influência da variação da temperatura e humidade na estrutura dado a extensão do projecto, e por se ter considerado que a localização não impõe à habitação grandes flutuações das condições meteorológicas.

### 4.1. PROGRAMA DE ARQUITECTURA

A habitação planeada corresponde à tipologia de uma moradia T4 com rés-do-chão sem cave, primeiro piso e sótão. Como primeira caracterização da habitação, optou-se por uma arquitectura tradicional das casas de madeira. Estipulou-se também como objectivo, que a definição da planta teria que proporcionar a inclusão de uma estrutura resistente duplamente simétrica com a finalidade de fazer com que a posição do centro de rigidez e centro de massa coincidissem. Deste modo são eliminados os efeitos de torção que seriam provocados pelas acções horizontais à estrutura em função da distância entre os dois centros supracitados. Tomando este pressuposto, fixou-se a localização da caixa de escadas no centro da moradia para criar um núcleo de rigidez. Dada a envergadura da habitação e cargas a si alocadas, optou-se então por uma estrutura resistente pesada com ligações por elementos metálicos semi-rígidas e contraventamentos protagonizados por diagonais de canto em pontos-chave.

Como habitação tradicional, destinou-se o rés-do-chão às divisões comuns a todos os seus habitantes e o primeiro piso aos quartos. Assim sendo, no rés-do-chão localizam-se a cozinha, despensa, sala de jantar, sala de estar, escritório, casa de banho, lavandaria e garagem. No primeiro piso situam-se os quatro quartos todos servidos de casa de banho particular e dois corredores de acesso a varandas comuns. O piso formado pelo desvão da cobertura definido como sótão terá um uso não definido, cujo poderá ser aproveitado pelo proprietário para uma variada gama de opções, dadas as dimensões da cobertura e sobrando ainda zonas não habitáveis com possível uso para arrumos. Nas Fig.4.1, Fig.4.2 e Fig.4.3, é detalhada a planta de cada piso com um mobiliário e instalações meramente exemplificativas tendo em vista a justificação das dimensões das divisórias.

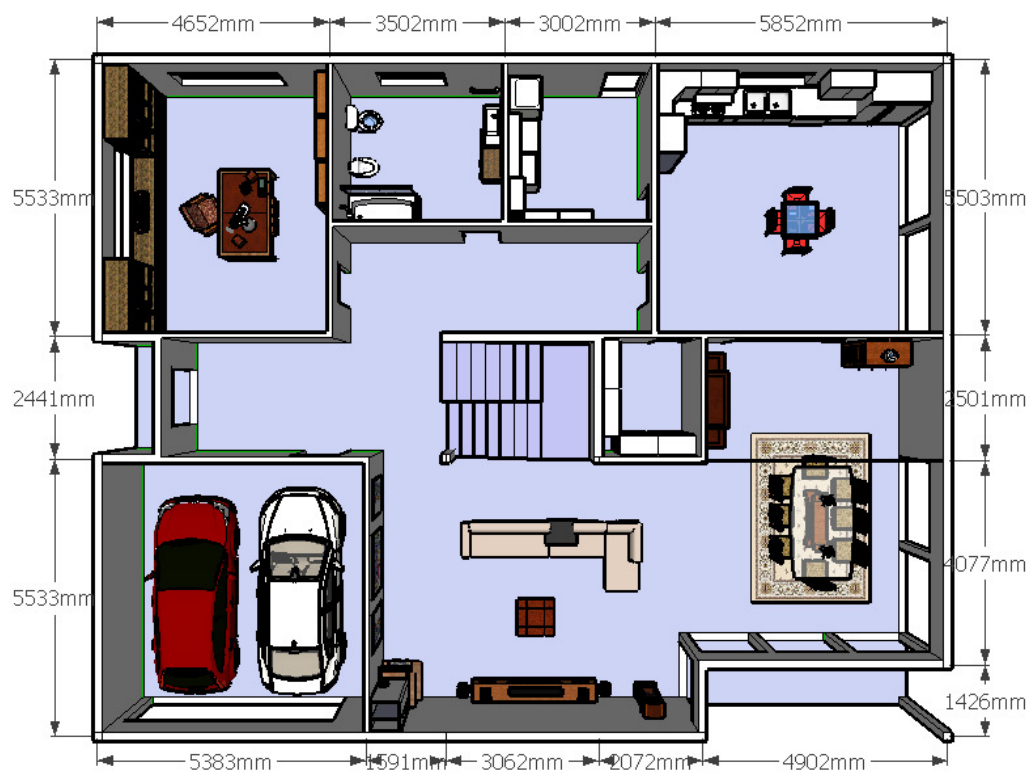


Fig.4.1 - Planta do rés-do-chão

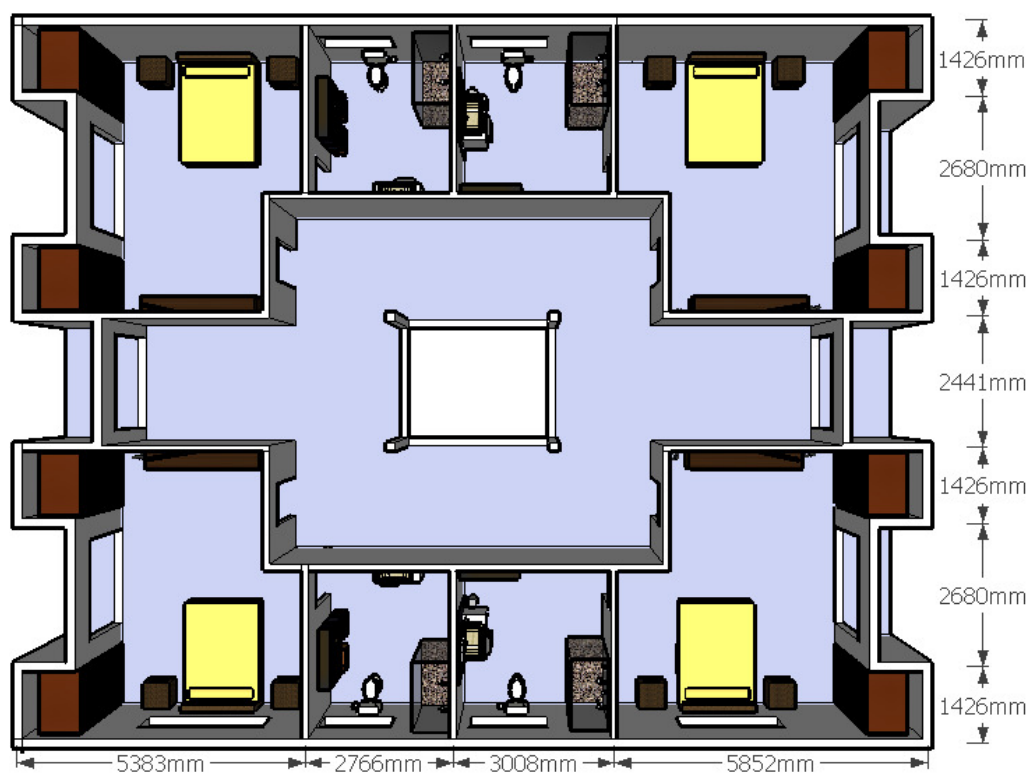


Fig.4.2 - Planta do primeiro piso

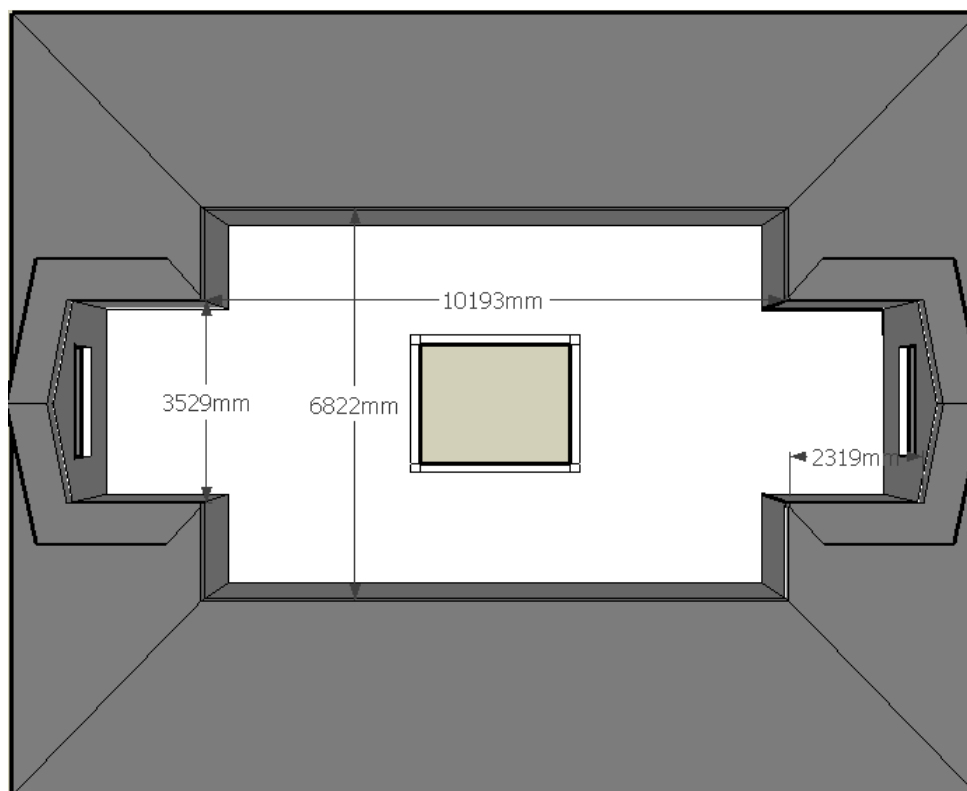


Fig.4.3 - Planta do sótão

Foram definidos para pés direitos livres cerca de 2,70m para o piso de rés-do-chão e 2,60m para o primeiro piso. A cobertura com uma inclinação aproximadamente de 55% permite ter um pé direito mínimo no sótão de cerca de 1,90m. O aspecto geral da habitação é representado nas Fig.4.4 e Fig.4.5 e nas Fig.4.6 a Fig.4.9 todos os alçados.

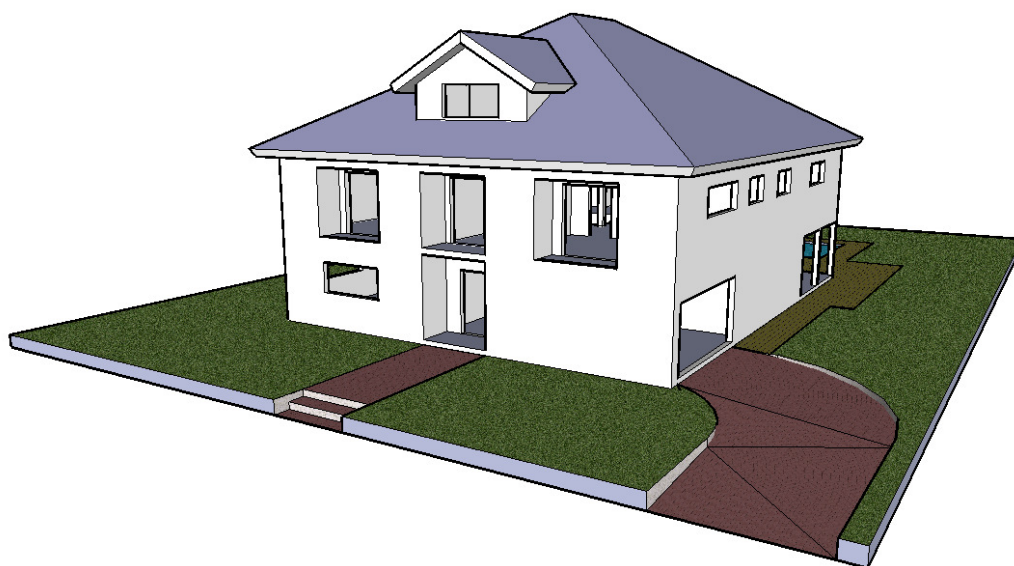


Fig.4.4 - Vista geral de frente

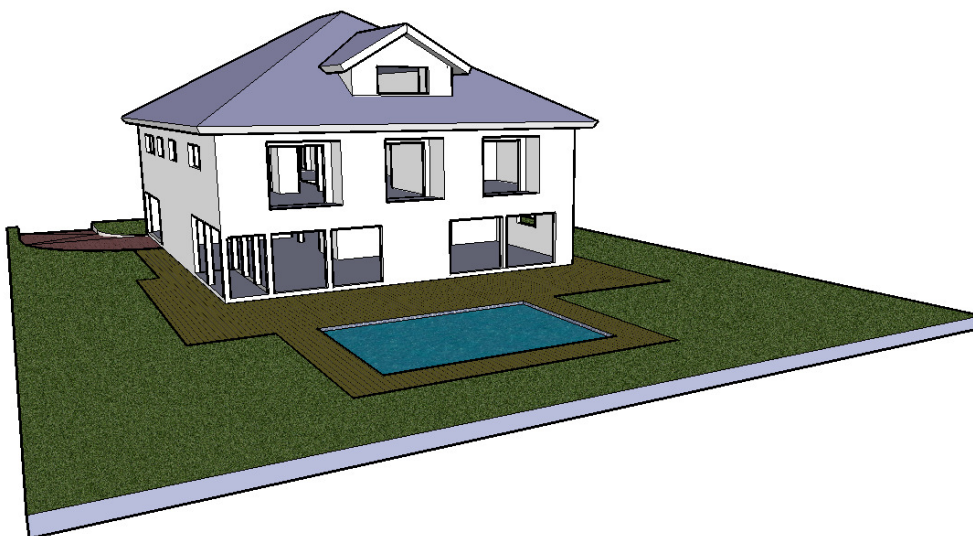


Fig.4.5 - Vista geral das traseiras



Fig.4.6 - Alçado Oeste



Fig.4.7 - Alçado Este

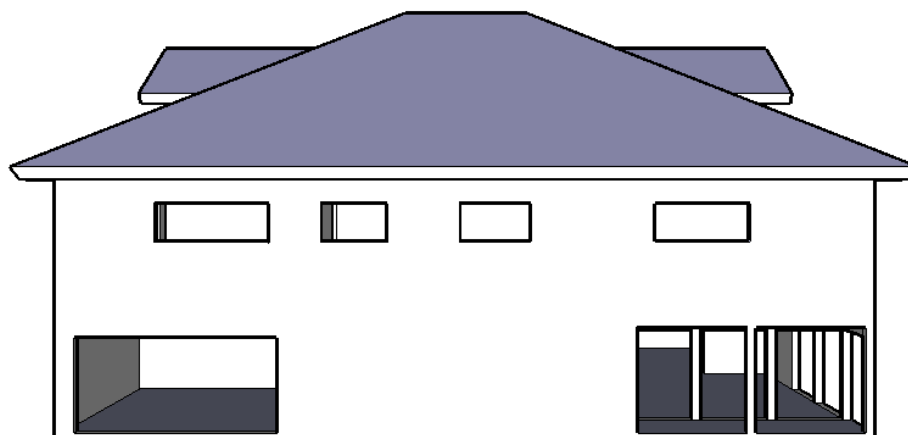


Fig.4.8 - Alçado Sul

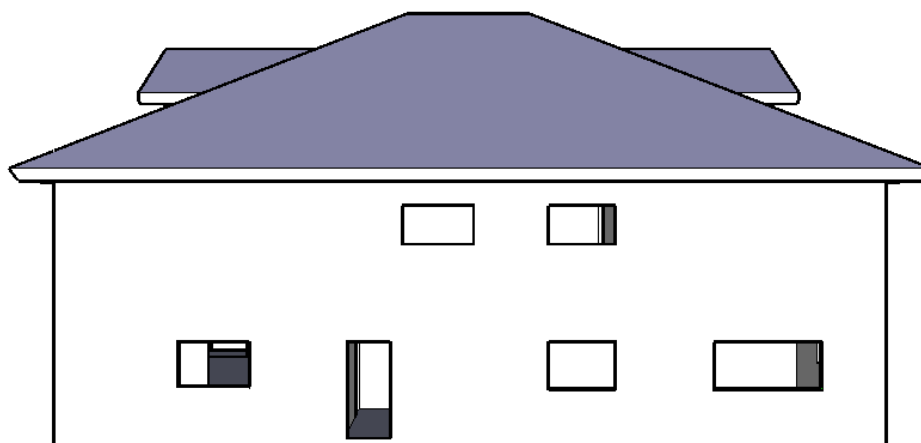


Fig.4.9 - Alçado Norte

## 4.2. DEFINIÇÃO DOS MATERIAIS

Os materiais usados no projecto foram escolhidos consultando os produtos e sistemas existentes no mercado mais característicos neste tipo de construção. O critério de escolha passou pela ponderação entre preço, massa e facilidade de montagem. As capacidades térmicas e acústicas, principalmente para o caso das paredes, foram menos preponderantes dado que foram escolhidas opções com eficiências pouco distintas e além disso, essa escolha não se insere no âmbito principal deste trabalho.

### 4.2.1. MATERIAL ESTRUTURAL

A escolha do material para a estrutura resistente teve como principal factor de decisão o tipo de concepção e as cargas envolvidas assim como o custo do material. Entre as madeiras maciças tradicionalmente usadas em Portugal e os lamelados colados, dado que a concepção passa por uma estrutura pesada com ligações por elementos metálicos e tendo em conta as características apresentadas nos Quadro 4.1 e Quadro 4.2, a escolha caiu nos lamelados colados G24h. Para um preço menor consegue-se uma boa resistência, uma massa pequena e um eficaz controlo do material.

Quadro 4.1 - Madeiras tipicamente usadas em Portugal e suas características [25]

| Madeira   | R.flexão (MPa) | E <sub>0,m</sub> (GPa) | M.vol (Kg/m <sup>3</sup> ) | Classe | Custo indicativo €/m <sup>3</sup> |
|-----------|----------------|------------------------|----------------------------|--------|-----------------------------------|
| Castanho  | 97             | 10                     | 540                        | D30    | 960                               |
| Carvalho  | 122            | 11                     | 800                        | D40    | 1100                              |
| Eucalipto | 137            | 12                     | 765                        | D40    | 450                               |
| Choupo    | 80             | 11                     | 450                        | C24    | 700                               |
| Pinho     | 18             | 12                     | 460                        | C18    | 500                               |

Quadro 4.2 - Lamelados colados e características [28]

| Tipo  | R.flexão (MPa) | E <sub>0,m</sub> (GPa) | M.vol (Kg/m <sup>3</sup> ) | Custo indicativo €/m <sup>3</sup> |
|-------|----------------|------------------------|----------------------------|-----------------------------------|
| GL24h | 24             | 11,6                   | 380                        | 750 a 1000                        |
| GL28h | 28             | 12,6                   | 410                        |                                   |
| GL32h | 32             | 13,7                   | 430                        |                                   |
| GL36h | 36             | 14,7                   | 450                        |                                   |

#### 4.2.2. PAVIMENTOS

Para o material a usar nos pavimentos colocaram-se os mesmos pressupostos considerados para a estrutura resistente principal, tal como as opções sobre os materiais (Quadro 4.1 e Quadro 4.2). No entanto, para este caso, a escolha não foi a mesma, pois as cargas actuantes são relativamente inferiores e não há solicitações de compressão paralelas às fibras relevantes nas vigotas, pelo que se optou pela madeira de castanho maciça tanto para as vigotas como para o soalho. As características do pavimento dependem obviamente do vão e das cargas a suportar que condicionam a secção e espaçamento das vigotas, pelo que é utilizado um soalho com 3 cm de espessura, isolamento e um revestimento inferior em madeira com 2 cm nos pavimentos térreos (Quadro 4.3).

Quadro 4.3 - Materiais usados nos pavimentos

| Materiais                       | Densidade (kg/m <sup>3</sup> ) | Espessura (m) | Massa (kg/m <sup>2</sup> ) |
|---------------------------------|--------------------------------|---------------|----------------------------|
| Barreira pára-vapor             | -                              | -             | Incluída no floormate      |
| Floormate [30]                  | 45                             | 0,05          | 2,25                       |
| Revestimento inferior (madeira) | 540                            | 0,02          | 10,80                      |

#### 4.2.3. PAREDES EXTERIORES

A concepção das paredes exteriores foi escolhida entre as referenciadas no Quadro 4.4 que reflectem algumas opções hoje em dia usadas na construção de casas de madeira. Para a habitação do caso de estudo seleccionou-se a solução de madeira dado o reduzido peso próprio e custo.

Quadro 4.4 - Soluções para paredes exteriores

| Tipo                | Peso<br>(kg/m <sup>2</sup> ) | Espessura | Custo<br>Indicativo<br>(€/m <sup>2</sup> ) | Pormenorização                                                                                                                                                                                                                                       | Fonte                         |
|---------------------|------------------------------|-----------|--------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|
| Madeira             | 50                           | 15,5      | 65                                         | Barrotes de 5x8 cm com isolamento no interior e caixa de ar de 4 cm, placa de gesso cartonado pelo interior e exterior composto por placa de Barreira pára-vapor + MDF Hidrófugo + caixa de ar de 2 cm e revestimento de forro com 2 cm de espessura | [17] + gerador de preços Cype |
| Solução Knauf       | 60                           | 18,5      | 162                                        | Placa exterior Aquapanel Maxi Outdoor com barreira impermeável separada da placa intermédia por perfis metálicos e uma outra placa interior com lâ rocha nas caixas-de-ar e rebocos com rede de fibra de vidro                                       | [31] + gerador de preços Cype |
| Parede tripla       | 50                           | 16        | N/D                                        | Parede de dois panos - revestimento exterior + caixa-de-ar + sanduíche de película pára-vapor, isolamento e revestimento interior                                                                                                                    | [32]                          |
| Alvenaria de tijolo | 240                          | 25        | 70                                         | Parede de um pano de 11 cm e outro de 7 cm com isolamento térmico na face interior + rebocos/revestimentos                                                                                                                                           | [33] + gerador de preços Cype |

## 5.2.3.PAREDES INTERIORES

No caso das paredes interiores, houve um procedimento análogo ao das paredes exteriores. Neste caso, dadas as opções do Quadro 4.5, escolheu-se aplicar a concepção apresentada pela Pladur, mais precisamente a solução *Qualidade* e a solução *Qualidade WC* para as zonas húmidas.

Quadro 4.5 - Soluções para paredes interiores

| Tipo                  | Peso<br>(kg/m <sup>2</sup> ) | Espessura<br>(cm) | Custo<br>Indicativo<br>(€/m <sup>2</sup> ) | Pormenorização                                                                                          | Fonte                           |
|-----------------------|------------------------------|-------------------|--------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|
| PLADUR - Standard     | 30                           | 7,5               | 35                                         | Duas placas de gesso de 1,5 cm + caixa-de-ar com isolamento de lá de vidro                              | [34] + gerador de preços Cype   |
| PLADUR - Qualidade    | 50                           | 10,5              | 45                                         | Duas placas de gesso de 1,5 cm/face + caixa-de-ar com isolamento de lá de vidro                         | [34] + gerador de preços Cype   |
| PLADUR - Qualidade WC | 50                           | 10,5              | 60                                         | Duas placas de gesso resistentes à água de 1,5 cm /face + caixa-de-ar com isolamento de lá de vidro     | [34] + gerador de preços Cype   |
| Madeira               | 35                           | 12                | 25                                         | Montantes de 4x8 cm espaçados 50 cm + isolamento em lâ de vidro + revestimento em MDF hidrófugo de 19mm | Cálculo + gerador de preço Cype |
| Alvenaria de tijolo   | 125                          | 16                | 30                                         | Painéis de tijolo revestidos a gesso com 6 cm + isolamento acústico de 4 cm                             | [33] + gerador de preços Cype   |

#### 5.2.4. COBERTURAS

A escolha da concepção da cobertura incluiu a análise de várias possíveis alternativas como para os outros elementos principais. A envergadura da habitação e área a cobrir levou a que, para uma estrutura em madeira, a solução passe pela concepção da cobertura na forma tradicional (Quadro 4.6).

Quadro 4.6 - Características da cobertura tradicional adoptada

| Tipo                  | Pormenor                                                                            | Peso (Kg/m <sup>2</sup> ) | Espessura (cm) | Custo Indicativo (€/m <sup>2</sup> ) | Fonte                         |
|-----------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|----------------|--------------------------------------|-------------------------------|
| Cobertura Tradicional | Telha lusa + ripa + vara + isolamento + película pára-vapor + revestimento interior | 80                        | 25 a 30        | 80                                   | [35] + gerador de preços Cype |

### 4.3. DEFINIÇÕES ESTRUTURAIS E REGULAMENTARES

#### 4.3.1. SOLUÇÃO ESTRUTURAL

Adoptou-se, como anteriormente citado, uma concepção baseada no conceito de estrutura pesada tradicional. Definiram-se pórticos concordantes com a arquitectura pretendida, da mesma forma que se idealizou uma solução para a cobertura de desenho tradicional. As ligações são protagonizadas por elementos metálicos com características específicas para tal. As acções verticais nos pisos são absorvidas pelos pavimentos, que funcionam numa direcção segundo as vigotas, as quais descarregam nas vigas principais da estrutura. Todos os pavimentos têm uma concepção em madeira com excepção do pavimento da garagem que tem uma solução em betão armado, tal como as fundações sobre as quais apoiam os pilares e os pavimentos do rés-do-chão. Os elementos em betão armado não são alvo de dimensionamento, dado este não se identificar com o propósito do presente trabalho.

O contraventamento da estrutura é representado por ligações pilar-viga rígidas, através de elementos de madeira diagonais. Os pórticos que conferem o contraventamento são os correspondentes à envolvente das escadas e pórticos imediatamente adjacentes na direcção longitudinal. São também realizadas ligações rígidas nos quatro pilares de canto. Os pilares que pertencem à estrutura de contraventamento têm ligações encastradas na base e os restantes apoios rotulados.

#### 4.3.2. DISPOSIÇÕES REGULAMENTARES

Efectuaram-se, para verificação de segurança aos diferentes estados limites, as combinações de acções das que têm actuação simultânea e que originem na estrutura os efeitos mais desfavoráveis. As combinações utilizadas podem ser consultadas em anexo. A verificação da segurança foi sempre delimitada pelas restrições regulamentares, integrando preocupações de segurança estrita, ou seja, estabilidade às acções regulamentares assim como aspectos de durabilidade e conforto.

No dimensionamento da estrutura teve-se em consideração a seguinte documentação:

- R.S.A. – Regulamento de Segurança e Acções em Estruturas de Edifícios e Pontes;
- Eurocódigo 0 – Bases de Projecto de Estruturas;
- Eurocódigo 1 – Acções em Estruturas;

- Eurocódigo 5 – Projecto de Estruturas de Madeira;
- Eurocódigo 8 – Projecto de Estruturas para resistência aos Sismos;
- NP 4305 (2003) – Madeira Estrutural. Classes de Resistência;
- EN 1194 (1999) – Estruturas de Madeira. Madeira Lamelada Colada. Classes de Resistência e Determinação de Valores Característicos.

#### 4.4. DEFINIÇÃO DAS ACÇÕES

Quantificaram-se as acções através dos seus valores característicos de acordo com o indicado na regulamentação e atendendo à localização da construção e ao tipo de utilização.

##### 4.4.1. ACÇÕES PERMANENTES

As acções permanentes para o cálculo da estrutura principal de madeira incluíram o peso próprio dos elementos estruturais, dos pavimentos e cobertura, bem como o peso das divisórias nas áreas onde existem e o peso das paredes exteriores. O peso dos pavimentos foi determinado após o cálculo destes, chegando-se a pesos distintos dependendo do vão e da localização. Considerou-se que as caixilharias têm aproximadamente a mesma massa que as paredes exteriores dado que, ao contrario das paredes de alvenaria, as paredes de madeira são leves e por isso não muito divergentes do peso em causa. As paredes divisórias e paredes exteriores que estão apoiadas sobre pavimentos, dado o peso reduzido (1,25 kN/m), foram consideradas como paredes móveis. Como regulamentado, o peso próprio das paredes foi assim repartido na área de pavimento afectado, acrescentando à sobrecarga deste 0,8 kN/m<sup>2</sup>.

Quadro 4.7 - Pesos próprios correspondentes às acções permanentes

| Elemento           | Peso próprio | Unidades          |
|--------------------|--------------|-------------------|
| GL24h              | 3,8          | kN/m <sup>3</sup> |
| Castanho           | 5,4          | kN/m <sup>3</sup> |
| Paredes exteriores | 1,3          | kN/m              |
| Cobertura          | 0,8          | kN/m <sup>2</sup> |

Quadro 4.8 - Pesos próprios dos pavimentos

| Pavimento             | Peso próprio | Unidades          |
|-----------------------|--------------|-------------------|
| Térreo 5,40x4,50      | 0,42         | kN/m <sup>2</sup> |
| Intermédio 5,40x4,50  | 0,42         | kN/m <sup>2</sup> |
| Superior 3,7x4,50     | 0,42         | kN/m <sup>2</sup> |
| Restantes térreos     | 0,36         | kN/m <sup>2</sup> |
| Restantes intermédios | 0,36         | kN/m <sup>2</sup> |
| Sótão não habitável   | 0,21         | kN/m <sup>2</sup> |

#### 4.4.2. ACÇÕES VARIÁVEIS

As acções variáveis consideradas neste estudo de caso e estabelecidas de acordo com os critérios regulamentares em função da sua possibilidade de ocorrência, são:

- Sobrecargas de utilização;
- Acção do vento;
- Acção dos sismos.

##### 4.4.2.1. Sobrecargas de utilização

Consideraram-se as seguintes sobrecargas regulamentares do anexo nacional referente ao EC1 pormenorizadas no Quadro 4.9 e que dizem respeito a habitações da categoria A. As sobrecargas foram introduzidas no modelo de cálculo através de áreas de influência que corresponderam a cargas distribuídas nas vigas de suporte.

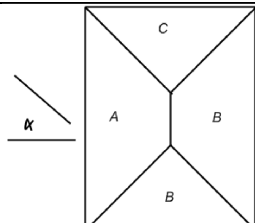
Quadro 4.9 - Sobrecargas regulamentares aplicadas

| Elemento                    | $q_k$ (kN/m <sup>2</sup> ) |
|-----------------------------|----------------------------|
| Pavimentos                  | 2,0                        |
| Cobertura                   | 0,4                        |
| Zona não habitável do sótão | 0,4                        |

##### 4.4.2.2. Acção do vento

Admitiu-se que a habitação, de acordo com o R.S.A., se localiza na zona B, com rugosidade aerodinâmica do solo do tipo II, à qual corresponde a uma pressão dinâmica do vento de 1,08 kN/m<sup>2</sup>. A introdução desta acção para a estrutura realizou-se através de áreas de influência, que por sua vez determinaram a quantidade de pressão de vento que seria encaminhada para cada elemento principal, sob a forma de carga distribuída. Não foram consideradas pressões interiores pela inexistência de grandes aberturas permanentes. Para a cobertura foi feita uma adaptação das coberturas de duas vertentes definidas no R.S.A. para cobertura de quatro vertentes, cujos coeficientes de pressão são representados no Quadro 4.10.

Quadro 4.10 - Coeficientes de pressão dinâmica na cobertura

|  | Acções globais sobre as superfícies |      |      |      |      |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|------|------|------|------|
|                                                                                     | Direcção do vento, $\alpha$ (graus) | A    | B    | C    | D    |
|                                                                                     | 0                                   | 0    | -0,4 | -0,6 | -0,6 |
|                                                                                     | 90                                  | -0,7 | -0,7 | 0    | -0,4 |

#### 4.4.2.3. Acção dos sismos

Admitiu-se que a habitação, de acordo com o R.S.A., se localiza na zona B, fundada num terreno de natureza tipo I. O coeficiente de comportamento adoptado foi de 2,5. As forças sísmicas foram geradas automaticamente pelo programa de cálculo e segundo regulamentado no EC8, utilizando o método de análise dinâmica (análise modal espectral), para uma situação de sismo próximo e sismo afastado.

#### 4.4.3. COMBINAÇÃO DE ACÇÕES

Os valores de cálculo para os esforços actuantes e respectiva verificação de segurança foram obtidos considerando as regras de combinação que se seguem, definidas no EC0 (para coeficientes  $\gamma$  e  $\psi_i$ , ver Quadro 4.11 e Quadro 4.11).

Combinação fundamental:

$$E_d = \sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} + \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i} \quad (4.1)$$

Combinação para acção sísmica:

$$E_d = \sum_{j \geq 1} G_{k,j} + A_{Ed} + \sum_{i \geq 1} \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i} \quad (4.2)$$

Combinação característica:

$$E_d = \sum_{j \geq 1} G_{k,j} + Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i} \quad (4.3)$$

Combinação quase permanente:

$$E_d = \sum_{j \geq 1} G_{k,j} + \sum_{i \geq 1} \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i} \quad (4.4)$$

Quadro 4.11 - Coeficientes parciais

| $\gamma_{G,sup}$ | $\gamma_{G,inf}$ | $\gamma_{Q,1}$ | $\gamma_{Q,i}$ |
|------------------|------------------|----------------|----------------|
| 1,35             | 1                | 1,5            | 1,5            |

Quadro 4.12 - Coeficientes  $\psi$

| Sobrecarga |     | Vento    |     |
|------------|-----|----------|-----|
| $\psi_0$   | 0,7 | $\psi_0$ | 0,4 |
| $\psi_1$   | 0,5 | $\psi_1$ | 0,2 |
| $\psi_2$   | 0,3 | $\psi_2$ | 0   |



# 5

## DIMENSIONAMENTO DO CASO DE ESTUDO

### 5.1. MÉTODO DE CÁLCULO UTILIZADO

A análise do comportamento estrutural global foi efectuada com base num modelo complexo tridimensional, recorrendo ao programa de cálculo automático “ROBOT”, da “Autodesk”, que efectua o cálculo dos esforços mediante métodos matriciais de cálculo tridimensional. Utiliza o método dos deslocamentos com a possibilidade de considerar seis graus de liberdade, que permite, mediante a resolução de um sistema de equações, determinar os deslocamentos dos nós pela actuação de um conjunto de acções, para posteriormente determinar os esforços interiores nas barras em função dos deslocamentos obtidos. Paralelamente ao modelo computacional de cálculo automático foram utilizadas folhas de cálculo no programa da “MICROSOFT «EXCEL» ” desenvolvidas em projectos da antiga disciplina de Tecnologias da Construção com Madeira em 2002 com vista à verificação da estabilidade de elementos dos pavimentos e alguns elementos da estrutura principal.

Para todos os estados de carga realizou-se um cálculo estático, excepto quando se consideraram as acções dinâmicas de sismo cujo cálculo passou a ser realizado segundo a análise modal espectral com vista à obtenção de esforços e deslocamentos.

Dada a dificuldade em estimar a rigidez global de estrutura devido à dificuldade em caracterizar a rigidez das diferentes ligações entre os elementos estruturais através das ligações metálicas, procedeu-se a uma modelação dos pórticos com ligações rígidas (Fig.5.1, Fig.5.2 e Fig.5.3) definida como modelação 1, e uma outra com ligações rotuladas nos pórticos e elementos de contraventamento diagonais nas ligações rígidas (Fig.5.4, Fig.5.5 e Fig.5.6) definida como modelação 2. Os elementos foram verificados para a combinação que impôs esforços mais condicionantes.

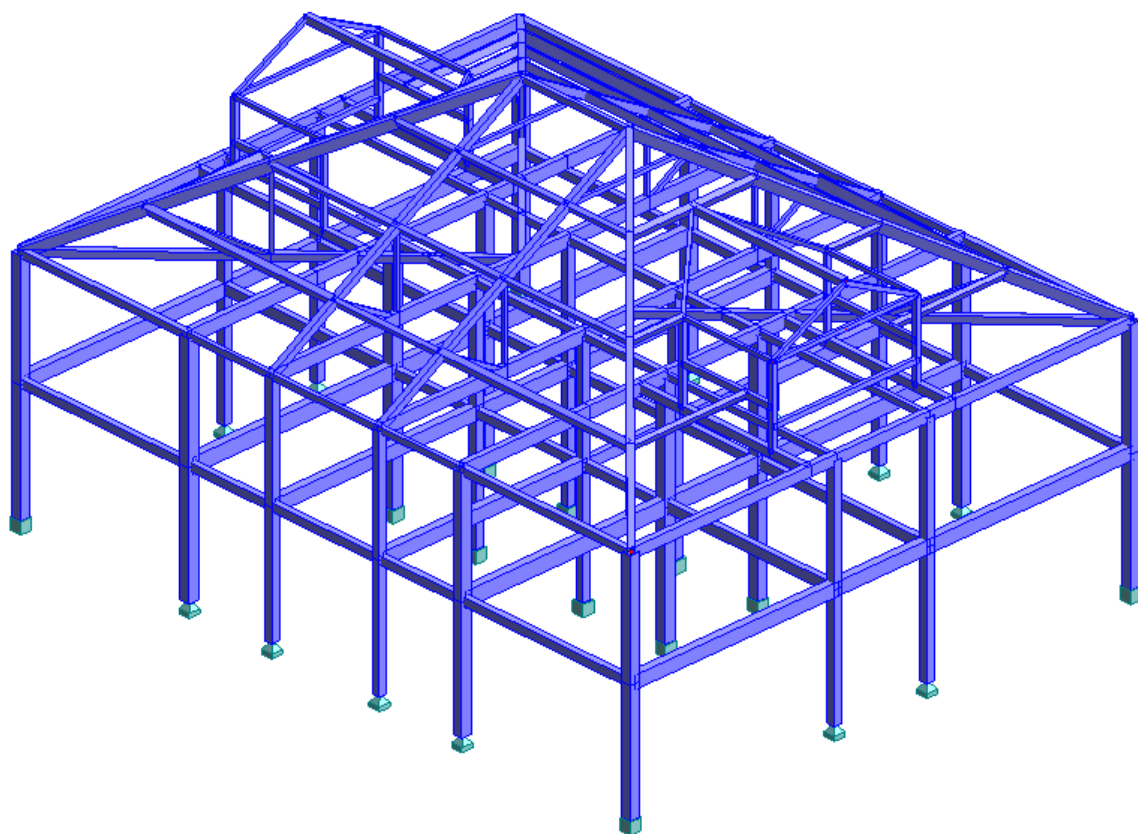


Fig.5.1 – Modelação com ligações rígidas (vista geral)

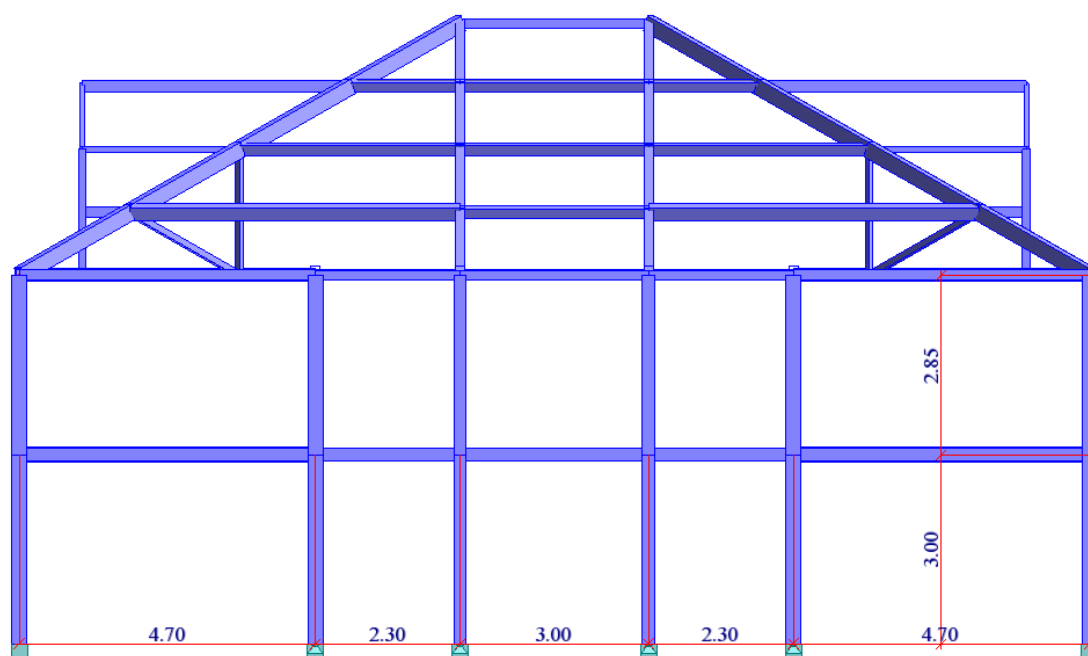


Fig.5.2 - Modelação com ligações rígidas (vista lateral)

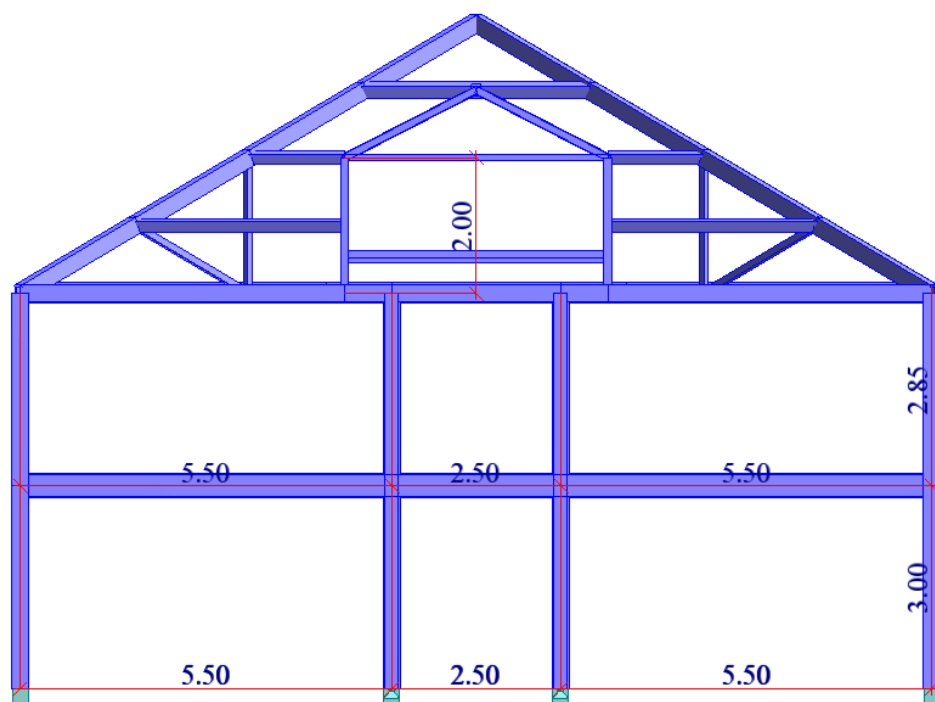


Fig.5.3 - Modelação com ligações rígidas (vista frontal)

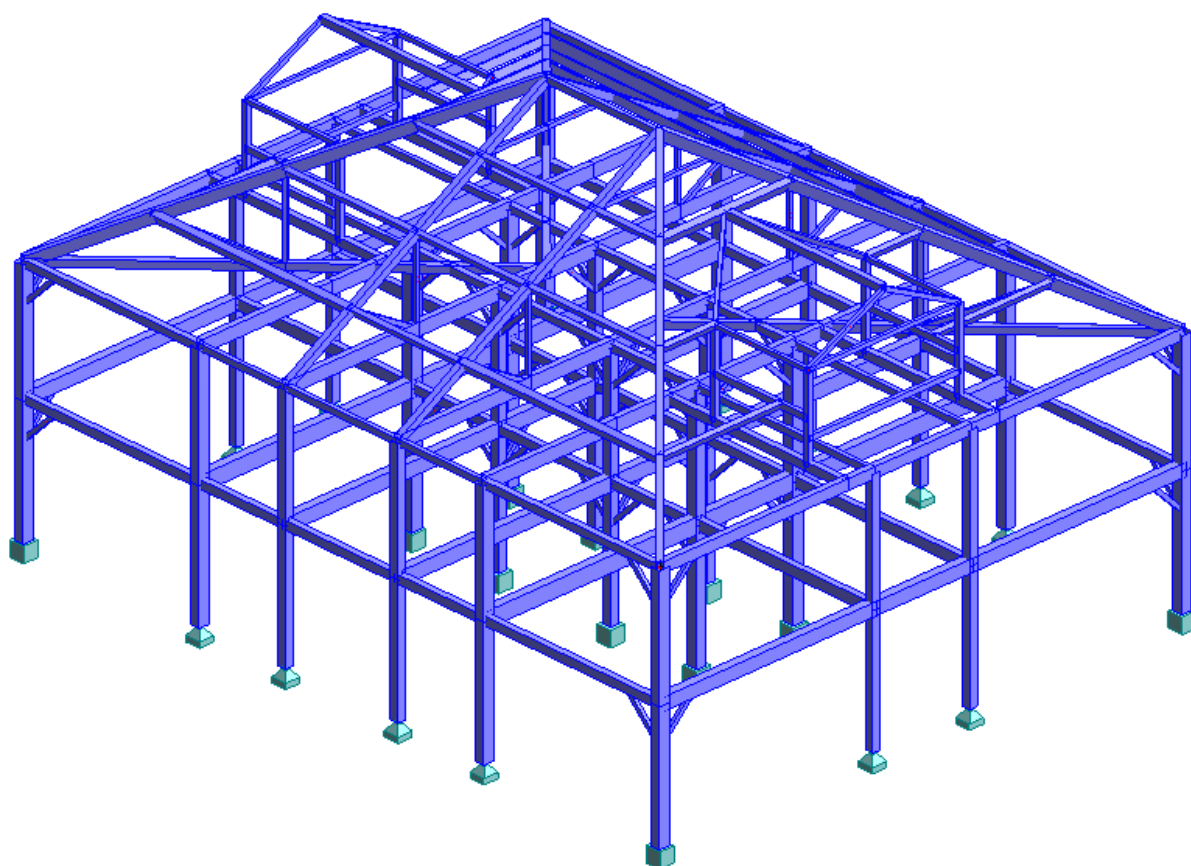


Fig.5.4 – Modelação com contraventamentos (vista geral)

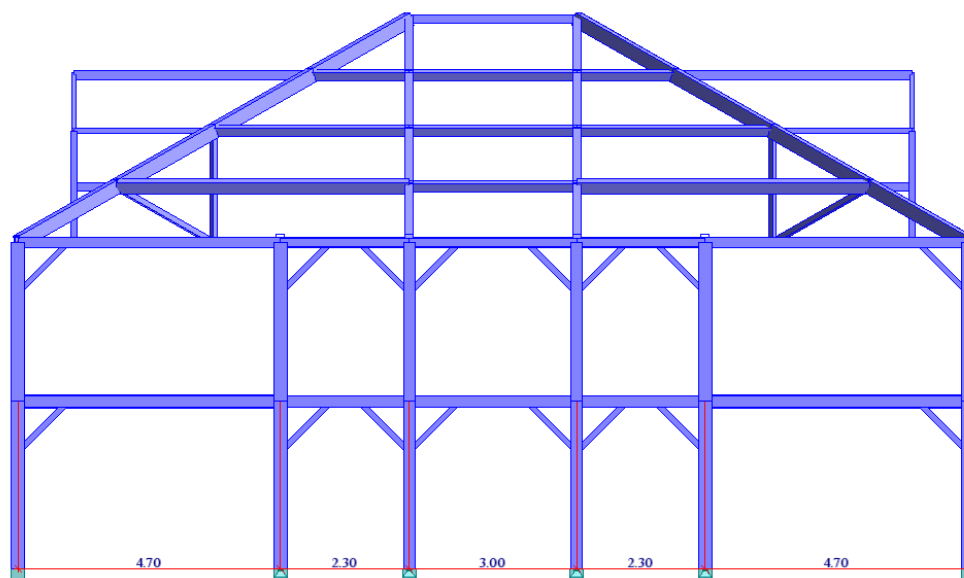


Fig.5.5 - Modelação com contraventamentos (vista lateral)

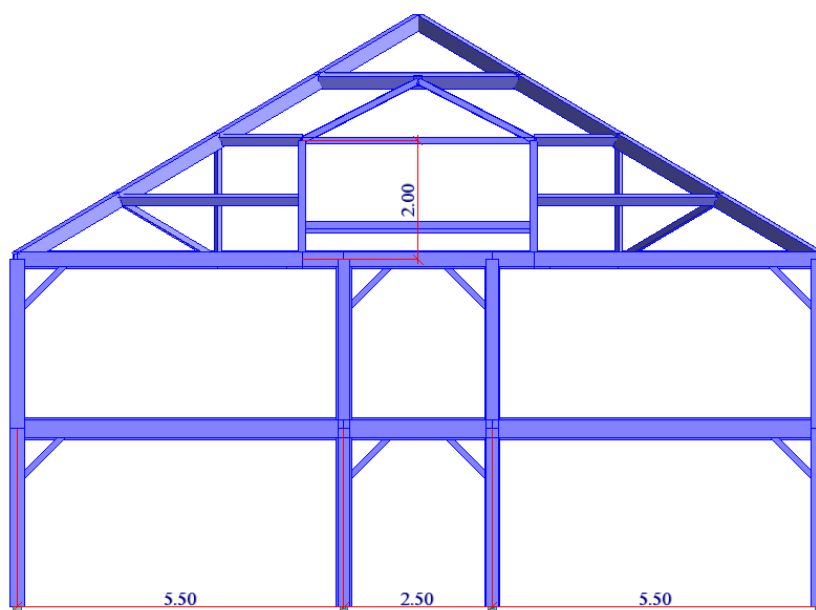


Fig.5.6 - Modelação com contraventamentos (vista frontal)

Para os pavimentos foi usado um método de cálculo simplificado, tendo sido considerados como funcionando numa direcção com as vigotas simplesmente apoiadas nas vigas estruturais principais. Não foi considerado o travamento do soalho no banzo comprimido das vigotas em consequência de possíveis substituições do mesmo. As Fig.5.7, Fig.5.8 e Fig.5.9 representam a orientação das vigotas para todos os pavimentos adoptada. Para as dimensões gerais dos pavimentos foram descontadas as vigas de apoio e bordadura. O limite imposto à deformação foi o de exigência normal, ou seja para a flecha instantânea  $1/300$  e para a flecha final  $1/150$ . Para a verificação ao estado limite de vibração considerou-se um amortecimento de 1% recomendado pelo EC5.

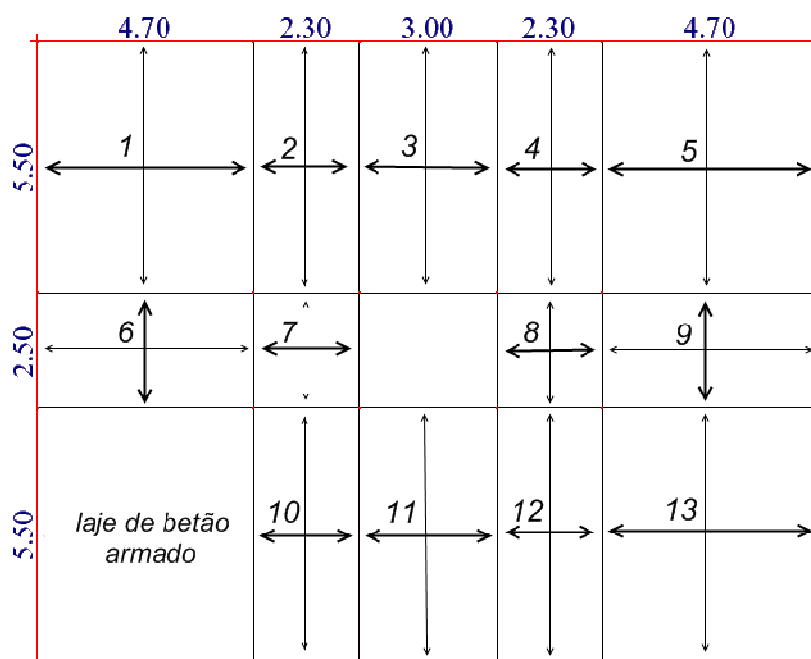


Fig.5.7 – Orientação das vigotas dos pavimentos do rés-do-chão

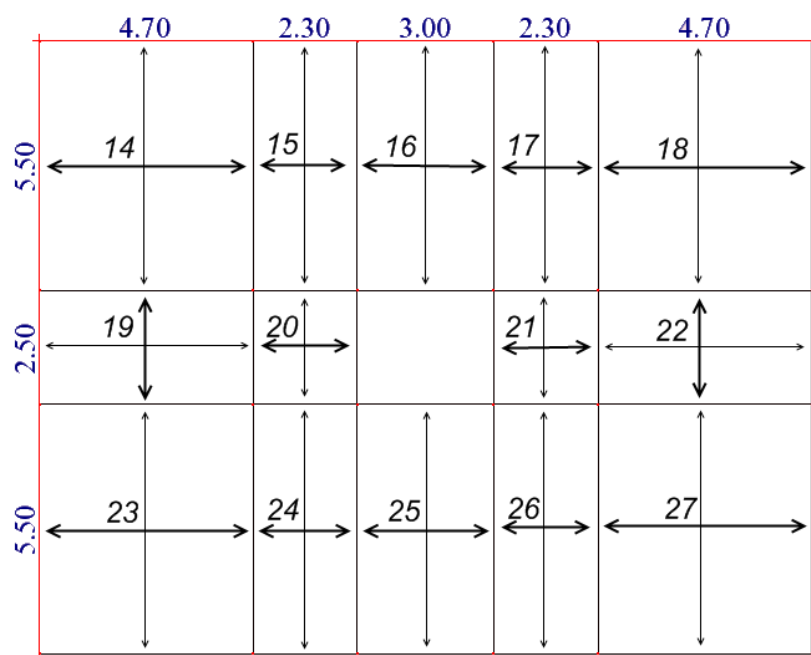


Fig.5.8 - Orientação das vigotas dos pavimentos do primeiro piso

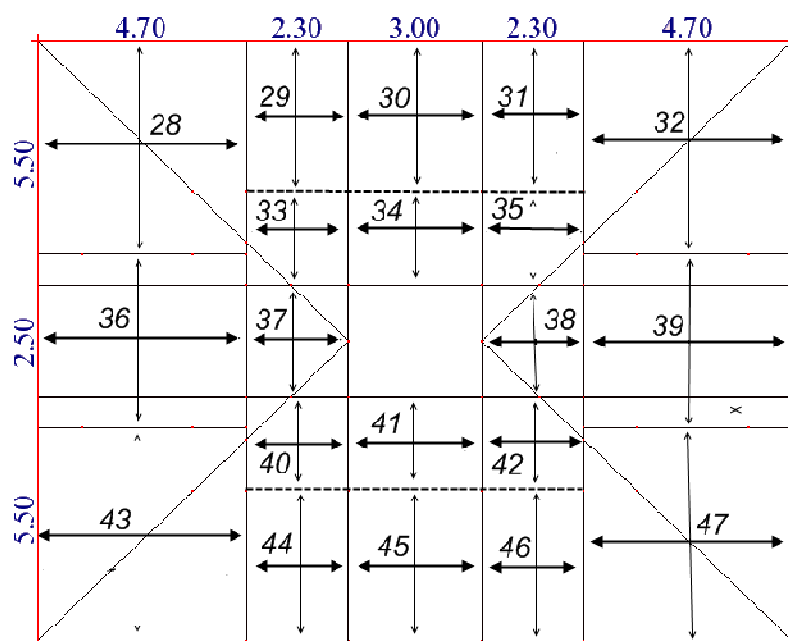


Fig.5.9 - Orientação das vigotas dos pavimentos do sótão e zona não habitável

## 5.2. DIMENSIONAMENTO E VERIFICAÇÃO DE SEGURANÇA

### 5.2.1. DIMENSIONAMENTO E VERIFICAÇÃO DOS PAVIMENTOS

As estruturas de madeira que constituem os pavimentos foram calculadas e verificadas com base nas disposições do EC5. Consideraram-se as propriedades que constam no Quadro 5.1 para o material usado, a madeira de castanho maciça.

Quadro 5.1 – Propriedades da madeira de castanho

| Castanho (D30)                        |              |       |     |
|---------------------------------------|--------------|-------|-----|
| Coeficiente de segurança              | $\gamma_m$   | 1,3   |     |
| Flexão                                | $f_{m,0,k}$  | 30    | MPa |
| Tensão de tracção paralela            | $f_{t,0,k}$  | 18    | MPa |
| Tensão de compressão paralela         | $f_{c,0,k}$  | 23    | MPa |
| Corte                                 | $f_{v,k}$    | 3     | MPa |
| Tensão de tracção perpendicular       | $f_{t,90,k}$ | 0,6   | MPa |
| Tensão de compressão perpendicular    | $f_{c,90,k}$ | 8     | MPa |
| Módulo de elasticidade médio paralelo | $E_{0,mean}$ | 10000 | MPa |
| 5% Módulo de elasticidade paralelo    | $E_{0,05}$   | 8000  | MPa |
| Módulo de distorção médio             | $G_{mean}$   | 600   | MPa |

Para os pavimentos, foram admitidas classe de serviço 1 e duração das cargas média, o que correspondeu a utilizar um  $k_{mod} = 0,8$  e  $k_{def} = 0,6$ . O cálculo da flexão no estado limite último cumpriu a verificação à instabilidade elástica pois não se considerou o travamento do banzo comprimido das vigotas pelo soalho.

#### 5.2.1.1. Pavimentos com vão de 4,50 metros em madeira de castanho

Os pavimentos dimensionados, tendo em conta o vão de 4,50 m, foram os pavimentos 1, 5, 13, 14, 18, 23, 27, 38 e 39.

Quadro 5.2 – Definições para o pavimento com vão de 4,50 m

| Definição                      | Valor       | Unidades          |
|--------------------------------|-------------|-------------------|
| Vão das vigotas                | 4,5         | m                 |
| Secção das vigotas             | 0,08 x 0,26 | m <sup>2</sup>    |
| Espaçamento das vigotas        | 0,9         | m                 |
| Soalho em castanho             | 0,03        | m                 |
| Comprimento efectivo, $l_{ef}$ | 4,5         | m                 |
| $m$                            | 0,9         |                   |
| $k_h$                          | 1,0         |                   |
| Peso próprio                   | 0,42        | kN/m <sup>2</sup> |
| Peso próprio por vigota, $p$   | 0,38        | kN/m              |
| Sobrecarga (2,0 + 0,8)         | 2,8         | kN/m <sup>2</sup> |
| Sobrecarga por vigota, $q$     | 2,52        | kN/m              |
| Isolamento + revestimento      | 0,13        | kN/m <sup>2</sup> |

Verificação ao ELU (flexão):

Quadro 5.3 – Esforços para ELU nas vigotas com vão de 4,50 m.

| Esforço  | Valor | Unidades |
|----------|-------|----------|
| $p_{sd}$ | 4,29  | kN/m     |
| $M_{sd}$ | 10,85 | kN.m     |
| $V_{sd}$ | 9,65  | kN       |

$$\sigma_{m,d} = \frac{M_{sd}}{I_y} \times y = 12,04 \text{ MPa}$$

$$f_{m,d} = \frac{f_{m,k}}{\gamma_m} \times k_{mod} = 18,46 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{m,crit} = \frac{0,78 \times b^2}{h \times l_{ef}} \times E_{0,05} = 33,61 \text{ MPa}$$

$$\lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{f_{m,k}}{\sigma_{m,crit}}} = 0,96$$

$$k_{crit} = 1,56 - 0,75 \times \lambda_{rel,m} = 0,84$$

$$f_{m,d,crit} = k_{crit} \times f_{m,d} = 15,51 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{m,d} \leq f_{m,d,crit} \Leftrightarrow 12,04 \leq 15,51 \text{ OK}$$

Verificação ao ELU (corte):

$$f_{v,d} = \frac{f_{v,k}}{\gamma_m} \times k_{mod} = 1,85 \text{ MPa}$$

$$\tau_d = \frac{3 \times V_{sd}}{2 \times b \times h} = 0,69 \text{ MPa}$$

$$\tau_d \leq f_{v,d} \Leftrightarrow 0,69 \leq 1,85 \text{ OK}$$

Verificação ao ELS (deformação):

$$u_{inst,G} = \frac{5 \times p \times l^4}{384 \times E \times I} = 0,002 \text{ m}$$

$$u_{inst,Q} = \frac{5 \times q \times l^4}{384 \times E \times I} = 0,011 \text{ m}$$

$$u_{inst,t} = u_{inst,G} + u_{inst,Q} \leq \frac{l}{300} \Leftrightarrow 0,013 \leq 0,015 \text{ m OK}$$

$$u_{fin,G} = u_{inst,G} \times (1 + k_{def}) = 0,003 \text{ m}$$

$$u_{fin,Q} = u_{inst,Q} \times (1 + \psi_2 \times k_{def}) = 0,0014 \text{ m}$$

$$u_{fin,t} = u_{fin,G} + u_{fin,Q} \leq \frac{l}{150} \Leftrightarrow 0,016 \leq 0,030 \text{ m OK}$$

Verificação ao ELS (vibração):

Quadro 5.4 – Rigidez do pavimento com vão de 4,50 m

| Rigidez  | Valor  | Unidades |
|----------|--------|----------|
| $(EI)_l$ | 1301,9 | kPa/m    |
| $(EI)_b$ | 22,5   | kPa/m    |

$$f_1 = \frac{\pi}{2 \times l^2} \times \sqrt{\frac{(EI)_l}{m}} = 13,82 \text{ Hz}$$

$$n_{40} = \left\{ \left( \left( \frac{40}{f_1} \right)^2 - 1 \right) \left( \frac{b}{l} \right)^4 \frac{(EI)_l}{(EI)_b} \right\}^{0,25} = 5,5$$

$$v \left( \frac{m}{Ns^2} \right) < b^{(f_1 \zeta - 1)} \Leftrightarrow \frac{4 \times (0,4 + 0,6 \times n_{40})}{mbl + 200} < 100^{(f_1 \zeta - 1)} \Leftrightarrow 0,012 < 0,019 \text{ OK}$$

$$\frac{w}{F} < a \Leftrightarrow 1,46 < 1,5 \text{ OK}$$

#### 5.2.1.2. Pavimentos com vão de 2,90 metros em madeira de castanho

Os pavimentos dimensionados, tendo em conta o vão de 2,90 m, foram os pavimentos 3, 11, 16, 25, 34 e 41.

Quadro 5.5 – Definições para o pavimento com vão de 2,90 m

| Definição                      | Valor       | Unidades          |
|--------------------------------|-------------|-------------------|
| Vão das vigotas                | 2,9         | m                 |
| Secção das vigotas             | 0,07 x 0,18 | m <sup>2</sup>    |
| Espaçamento das vigotas        | 0,9         | m                 |
| Soalho em castanho             | 0,03        | m                 |
| Comprimento efectivo, $l_{ef}$ | 2,9         | m                 |
| $m$                            | 0,9         |                   |
| $k_h$                          | 1,0         |                   |
| Peso próprio                   | 0,37        | kN/m <sup>2</sup> |
| Peso próprio por vigota, $p$   | 0,31        | kN/m              |
| Sobrecarga (2,0 + 0,8)         | 2,8         | kN/m <sup>2</sup> |
| Sobrecarga por vigota, $q$     | 2,52        | kN/m              |
| Isolamento + revestimento      | 0,13        | kN/m <sup>2</sup> |

Verificação ao ELU (flexão):

Quadro 5.6 – Esforços para ELU nas vigotas com vão de 2,90 m.

| Esforço  | Valor | Unidades |
|----------|-------|----------|
| $p_{sd}$ | 4,23  | kN/m     |
| $M_{sd}$ | 4,44  | kN.m     |
| $V_{sd}$ | 6,13  | kN       |

$$\sigma_{m,d} = \frac{M_{sd}}{I_y} \times y = 11,75 \text{ MPa}$$

$$f_{m,d} = \frac{f_{m,k}}{\gamma_m} \times k_{mod} = 18,46 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{m,crit} = \frac{0,78 \times b^2}{h \times l_{ef}} \times E_{0,05} = 58,57 \text{ MPa}$$

$$\lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{f_{m,k}}{\sigma_{m,crit}}} = 0,72$$

$$k_{crit} = 1$$

$$f_{m,d,crit} = k_{crit} \times f_{m,d} = 18,46 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{m,d} \leq f_{m,d,crit} \Leftrightarrow 11,75 \leq 18,46 \text{ OK}$$

Verificação ao ELU (corte):

$$f_{v,d} = \frac{f_{v,k}}{\gamma_m} \times k_{mod} = 1,85 \text{ MPa}$$

$$\tau_d = \frac{3 \times V_{sd}}{2 \times b \times h} = 0,73 \text{ MPa}$$

$$\tau_d \leq f_{v,d} \Leftrightarrow 0,73 \leq 1,85 \text{ OK}$$

Verificação ao ELS (deformação):

$$u_{inst,G} = \frac{5 \times p \times l^4}{384 \times E \times I} = 0,001 \text{ m}$$

$$u_{inst,Q} = \frac{5 \times q \times l^4}{384 \times E \times I} = 0,007 \text{ m}$$

$$u_{inst,t} = u_{inst,G} + u_{inst,Q} \leq \frac{l}{300} \Leftrightarrow 0,008 \leq 0,097 \text{ m OK}$$

$$u_{fin,G} = u_{inst,G} \times (1 + k_{def}) = 0,001 \text{ m}$$

$$u_{fin,Q} = u_{inst,Q} \times (1 + \psi_2 \times k_{def}) = 0,008 \text{ m}$$

$$u_{fin,t} = u_{fin,G} + u_{fin,Q} \leq \frac{l}{150} \Leftrightarrow 0,009 \leq 0,019 \text{ m OK}$$

Verificação ao ELS (vibração):

Quadro 5.7 – Rigidez do pavimento com vão de 2,90 m

| Rigidez  | Valor | Unidades |
|----------|-------|----------|
| $(EI)_l$ | 387   | kPa/m    |
| $(EI)_b$ | 22,5  | kPa/m    |

$$f_1 = \frac{\pi}{2 \times l^2} \times \sqrt{\frac{(EI)_l}{m}} = 18,88 \text{ Hz}$$

$$n_{40} = \left\{ \left( \left( \frac{40}{f_1} \right)^2 - 1 \right) \left( \frac{b}{l} \right)^4 \frac{(EI)_l}{(EI)_b} \right\}^{0,25} = 5,2$$

$$v \left( \frac{m}{Ns^2} \right) < b^{(f_1 \zeta - 1)} \Leftrightarrow \frac{4 \times (0,4 + 0,6 \times n_{40})}{mbl + 200} < 100^{(f_1 \zeta - 1)} \Leftrightarrow 0,018 < 0,024 \text{ OK}$$

$$\frac{w}{F} < a \Leftrightarrow 1,34 < 1,5 \text{ OK}$$

### 5.2.1.3. Pavimentos com vão de 2,30 metros em madeira de castanho

Os pavimentos dimensionados, tendo em conta vão o vão de 2,30 m, foram os pavimentos 6, 9, 19 e 22.

Quadro 5.8 – Definições para o pavimento com vão de 2,30 m

| Definição                      | Valor       | Unidades          |
|--------------------------------|-------------|-------------------|
| Vão das vigotas                | 2,3         | m                 |
| Secção das vigotas             | 0,07 x 0,15 | m <sup>2</sup>    |
| Espaçamento das vigotas        | 0,9         | m                 |
| Soalho em castanho             | 0,03        | m                 |
| Comprimento efectivo, $l_{ef}$ | 2,3         | m                 |
| $m$                            | 0,9         |                   |
| $k_h$                          | 1,0         |                   |
| Peso próprio                   | 0,36        | kN/m <sup>2</sup> |
| Peso próprio por vigota, $p$   | 0,32        | kN/m              |
| Sobrecarga (2,0 + 0,8)         | 2,8         | kN/m <sup>2</sup> |
| Sobrecarga por vigota, $q$     | 2,52        | kN/m              |
| Isolamento + revestimento      | 0,13        | kN/m <sup>2</sup> |

Verificação ao ELU (flexão):

Quadro 5.9 – Esforços para ELU nas vigotas com vão de 2,30 m.

| Esforço  | Valor | Unidades |
|----------|-------|----------|
| $p_{sd}$ | 4,21  | kN/m     |
| $M_{sd}$ | 2,79  | kN.m     |
| $V_{sd}$ | 4,84  | kN       |

$$\sigma_{m,d} = \frac{M_{sd}}{I_y} \times y = 10,63 \text{ MPa}$$

$$f_{m,d} = \frac{f_{m,k}}{\gamma_m} \times k_{mod} = 18,46 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{m,crit} = \frac{0,78 \times b^2}{h \times l_{ef}} \times E_{0,05} = 88,63 \text{ MPa}$$

$$\lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{f_{m,k}}{\sigma_{m,crit}}} = 0,58$$

$$k_{crit} = 1$$

$$f_{m,d,crit} = k_{crit} \times f_{m,d} = 18,46 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{m,d} \leq f_{m,d,crit} \Leftrightarrow 10,63 \leq 18,46 \text{ OK}$$

Verificação ao ELU (corte):

$$f_{v,d} = \frac{f_{v,k}}{\gamma_m} \times k_{mod} = 1,85 \text{ MPa}$$

$$\tau_d = \frac{3 \times V_{sd}}{2 \times b \times h} = 0,69 \text{ MPa}$$

$$\tau_d \leq f_{v,d} \Leftrightarrow 0,69 \leq 1,85 \text{ OK}$$

Verificação ao ELS (deformação):

$$u_{inst,G} = \frac{5 \times p \times l^4}{384 \times E \times I} = 0,001 \text{ m}$$

$$u_{inst,Q} = \frac{5 \times q \times l^4}{384 \times E \times I} = 0,005 \text{ m}$$

$$u_{inst,t} = u_{inst,G} + u_{inst,Q} \leq \frac{l}{300} \Leftrightarrow 0,005 \leq 0,077 \text{ m OK}$$

$$u_{fin,G} = u_{inst,G} \times (1 + k_{def}) = 0,001 \text{ m}$$

$$u_{fin,Q} = u_{inst,Q} \times (1 + \psi_2 \times k_{def}) = 0,006 \text{ m}$$

$$u_{fin,t} = u_{fin,G} + u_{fin,Q} \leq \frac{l}{150} \Leftrightarrow 0,006 \leq 0,015 \text{ m OK}$$

Verificação ao ELS (vibração):

Quadro 5.10 – Rigidez do pavimento com vão de 2,30 m

| Rigidez  | Valor | Unidades |
|----------|-------|----------|
| $(EI)_l$ | 218,8 | kPa/m    |
| $(EI)_b$ | 22,5  | kPa/m    |

$$f_1 = \frac{\pi}{2 \times l^2} \times \sqrt{\frac{(EI)_l}{m}} = 23,15 \text{ Hz}$$

$$n_{40} = \left\{ \left( \left( \frac{40}{f_1} \right)^2 - 1 \right) \left( \frac{b}{l} \right)^4 \frac{(EI)_l}{(EI)_b} \right\}^{0,25} = 4,1$$

$$v \left( \frac{m}{Ns^2} \right) < b^{(f_1 \zeta - 1)} \Leftrightarrow \frac{4 \times (0,4 + 0,6 \times n_{40})}{mbl + 200} < 100^{(f_1 \zeta - 1)} \Leftrightarrow 0,020 < 0,029 \text{ OK}$$

$$\frac{w}{F} < a \Leftrightarrow 1,16 < 1,5 \text{ OK}$$

#### 5.2.1.4. Pavimentos com vão de 2,15 metros em madeira de castanho

Os pavimentos dimensionados, tendo em conta o vão de 2,15 m, foram os pavimentos 2, 4, 7, 8, 10, 12, 15, 17, 20, 21, 24, 26, 33, 35, 37, 38, 40 e 42.

Quadro 5.11 – Definições para o pavimento com vão de 2,15 m

| Definição                      | Valor       | Unidades          |
|--------------------------------|-------------|-------------------|
| Vão das vigotas                | 2,15        | m                 |
| Secção das vigotas             | 0,07 x 0,13 | m <sup>2</sup>    |
| Espaçamento das vigotas        | 0,9         | m                 |
| Soalho em castanho             | 0,03        | m                 |
| Comprimento efectivo, $l_{ef}$ | 2,15        | m                 |
| $m$                            | 0,9         |                   |
| $k_h$                          | 1,03        |                   |
| Peso próprio                   | 0,35        | kN/m <sup>2</sup> |
| Peso próprio por vigota, $p$   | 0,31        | kN/m              |
| Sobrecarga (2,0 + 0,8)         | 2,8         | kN/m <sup>2</sup> |
| Sobrecarga por vigota, $q$     | 2,52        | kN/m              |
| Isolamento + revestimento      | 0,13        | kN/m <sup>2</sup> |

Verificação ao ELU (flexão):

Quadro 5.12 – Esforços para ELU nas vigotas com vão de 2,15 m.

| Esforço  | Valor | Unidades |
|----------|-------|----------|
| $p_{sd}$ | 4,20  | kN/m     |
| $M_{sd}$ | 2,43  | kN.m     |
| $V_{sd}$ | 4,52  | kN       |

$$\sigma_{m,d} = \frac{M_{sd}}{I_y} \times y = 12,32 \text{ MPa}$$

$$f_{m,d} = \frac{f_{m,k}}{\gamma_m} \times k_{mod} \times k_h = 19,0 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{m,crit} = \frac{0,78 \times b^2}{h \times l_{ef}} \times E_{0,05} = 109,4 \text{ MPa}$$

$$\lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{f_{m,k}}{\sigma_{m,crit}}} = 0,52$$

$$k_{crit} = 1$$

$$f_{m,d,crit} = k_{crit} \times f_{m,d} = 19,0 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{m,d} \leq f_{m,d,crit} \Leftrightarrow 12,32 \leq 19,0 \text{ OK}$$

Verificação ao ELU (corte):

$$f_{v,d} = \frac{f_{v,k}}{\gamma_m} \times k_{mod} = 1,85 \text{ MPa}$$

$$\tau_d = \frac{3 \times V_{sd}}{2 \times b \times h} = 0,75 \text{ MPa}$$

$$\tau_d \leq f_{v,d} \Leftrightarrow 0,75 \leq 1,85 \text{ OK}$$

Verificação ao ELS (deformação):

$$u_{inst,G} = \frac{5 \times p \times l^4}{384 \times E \times I} = 0,001 \text{ m}$$

$$u_{inst,Q} = \frac{5 \times q \times l^4}{384 \times E \times I} = 0,005 \text{ m}$$

$$u_{inst,t} = u_{inst,G} + u_{inst,Q} \leq \frac{l}{300} \Leftrightarrow 0,006 \leq 0,072 \text{ m OK}$$

$$u_{fin,G} = u_{inst,G} \times (1 + k_{def}) = 0,001 \text{ m}$$

$$u_{fin,Q} = u_{inst,Q} \times (1 + \psi_2 \times k_{def}) = 0,006 \text{ m}$$

$$u_{fin,t} = u_{fin,G} + u_{fin,Q} \leq \frac{l}{150} \Leftrightarrow 0,008 \leq 0,014 \text{ m OK}$$

Verificação ao ELS (vibração):

Quadro 5.13 – Rigidez do pavimento com vão de 2,15 m

| Rigidez  | Valor | Unidades |
|----------|-------|----------|
| $(EI)_l$ | 218,8 | kPa/m    |
| $(EI)_b$ | 22,5  | kPa/m    |

$$f_1 = \frac{\pi}{2 \times l^2} \times \sqrt{\frac{(EI)_l}{m}} = 21,68 \text{ Hz}$$

$$n_{40} = \left\{ \left( \left( \frac{40}{f_1} \right)^2 - 1 \right) \left( \frac{b}{l} \right)^4 \frac{(EI)_l}{(EI)_b} \right\}^{0,25} = 5$$

$$v \left( \frac{m}{Ns^2} \right) < b^{(f_1 \zeta - 1)} \Leftrightarrow \frac{4 \times (0,4 + 0,6 \times n_{40})}{mbl + 200} < 100^{(f_1 \zeta - 1)} \Leftrightarrow 0,022 < 0,027 \text{ OK}$$

$$\frac{w}{F} < a \Leftrightarrow 1,45 < 1,5 \text{ OK}$$

### 5.2.1.5. Pavimentos da zona não habitável do sótão com vão máximo de 4,50 metros

Os pavimentos dimensionados, tendo em conta o vão de 4,50 m, foram os pavimentos 28, 32, 43 e 47. Para os restantes pavimentos 29, 30, 31, 44, 45 e 46 foi adoptada a mesma solução.

Quadro 5.14 – Definições para os pavimentos da zona não habitável

| Definição                      | Valor       | Unidades          |
|--------------------------------|-------------|-------------------|
| Vão das vigotas                | 4,50        | m                 |
| Secção das vigotas             | 0,05 x 0,13 | m <sup>2</sup>    |
| Espaçamento das vigotas        | 0,9         | m                 |
| Soalho em castanho             | 0,02        | m                 |
| Comprimento efectivo, $l_{ef}$ | 4,37        | m                 |
| $m$                            | 0,9         |                   |
| $k_h$                          | 1,0         |                   |
| Peso próprio                   | 0,31        | kN/m <sup>2</sup> |
| Peso próprio por vigota, $p$   | 0,19        | kN/m              |
| Sobrecarga                     | 0,4         | kN/m <sup>2</sup> |
| Sobrecarga por vigota, $q$     | 0,24        | kN/m              |
| Isolamento + revestimento      | 0,13        | kN/m <sup>2</sup> |

Verificação ao ELU (flexão):

Quadro 5.15 – Esforços para ELU nas vigotas dos pavimentos da zona não habitável.

| Esforço  | Valor | Unidades |
|----------|-------|----------|
| $p_{sd}$ | 0,61  | kN/m     |
| $M_{sd}$ | 1,55  | kN.m     |
| $V_{sd}$ | 1,38  | kN       |

$$\sigma_{m,d} = \frac{M_{sd}}{I_y} \times y = 7,27 \text{ MPa}$$

$$f_{m,d} = \frac{f_{m,k}}{\gamma_m} \times k_{mod} = 18,46 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{m,crit} = \frac{0,78 \times b^2}{h \times l_{ef}} \times E_{0,05} = 22,3 \text{ MPa}$$

$$\lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{f_{m,k}}{\sigma_{m,crit}}} = 1,16$$

$$k_{crit} = 1,56 - 0,75 \times \lambda_{rel,m} = 0,69$$

$$f_{m,d,crit} = k_{crit} \times f_{m,d} = 12,7 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{m,d} \leq f_{m,d,crit} \Leftrightarrow 7,27 \leq 12,7 \text{ OK}$$

Verificação ao ELU (corte):

$$f_{v,d} = \frac{f_{v,k}}{\gamma_m} \times k_{mod} = 1,85 \text{ MPa}$$

$$\tau_d = \frac{3 \times V_{sd}}{2 \times b \times h} = 0,26 \text{ MPa}$$

$$\tau_d \leq f_{v,d} \Leftrightarrow 0,26 \leq 1,85 \text{ OK}$$

Verificação ao ELS (deformação):

$$u_{inst,G} = \frac{5 \times p \times l^4}{384 \times E \times I} = 0,006 \text{ m}$$

$$u_{inst,Q} = \frac{5 \times q \times l^4}{384 \times E \times I} = 0,008 \text{ m}$$

$$u_{inst,t} = u_{inst,G} + u_{inst,Q} \leq \frac{l}{300} \Leftrightarrow 0,013 \leq 0,015 \text{ m OK}$$

$$u_{fin,G} = u_{inst,G} \times (1 + k_{def}) = 0,009 \text{ m}$$

$$u_{fin,Q} = u_{inst,Q} \times (1 + \psi_2 \times k_{def}) = 0,009 \text{ m}$$

$$u_{fin,t} = u_{fin,G} + u_{fin,Q} \leq \frac{l}{150} \Leftrightarrow 0,018 \leq 0,030 \text{ m OK}$$

A verificação ao ELS (vibração) não foi considerada dado tratar-se de zonas não habitáveis.

#### 5.2.2. DIMENSIONAMENTO E VERIFICAÇÃO DA ESTRUTURA PRINCIPAL

A estrutura de madeira principal, que constitui o esqueleto resistente da habitação, foi calculada e verificada com base nas disposições do EC5. Os elementos foram analisados na secção onde se verifica a combinação de esforços mais crítica. O sinal negativo (-) corresponde a esforços de tracção. As combinações de acções utilizadas e referenciadas nos seguintes pontos podem ser consultadas em

anexo. Consideraram-se as propriedades que constam no Quadro 5.16 para o material usado, a madeira lamelada colada GL24h.

Quadro 5.16 – Propriedades do GL24h

| GL24h                                        |              |       |     |
|----------------------------------------------|--------------|-------|-----|
| <i>Coefficiente de segurança</i>             | $\gamma_m$   | 1,25  |     |
| <i>Flexão</i>                                | $f_{m,0,k}$  | 24    | MPa |
| <i>Tensão de tracção paralela</i>            | $f_{t,0,k}$  | 16,5  | MPa |
| <i>Tensão de compressão paralela</i>         | $f_{c,0,k}$  | 24    | MPa |
| <i>Corte</i>                                 | $f_{v,k}$    | 2,7   | MPa |
| <i>Tensão de tracção perpendicular</i>       | $f_{t,90,k}$ | 0,4   | MPa |
| <i>Tensão de compressão perpendicular</i>    | $f_{c,90,k}$ | 2,7   | MPa |
| <i>Módulo de elasticidade médio paralelo</i> | $E_{0,mean}$ | 11600 | MPa |
| <i>5% Módulo de elasticidade paralelo</i>    | $E_{0,05}$   | 9400  | MPa |
| <i>Módulo de distorção médio</i>             | $G_{mean}$   | 720   | MPa |

Para a determinação dos esforços máximos de dimensionamento foram analisadas ambas as modelações estruturais supracitadas e todas as combinações possíveis através do programa de cálculo e comparação directa para cada elemento. Dada a dupla simetria da habitação, e por consequência da estrutura, apenas houve necessidade de verificar menos de um quarto da totalidade da estrutura, visto também que, por semelhança de esforços actuantes, existem elementos com secções e comprimentos iguais. Considerou-se a classe de serviço 1 para toda a estrutura e a duração das cargas foi estabelecida, dependendo da combinação em causa.

As tensões introduzidas nos elementos pelos esforços actuantes foram determinadas segundo as expressões seguintes:

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N}{A} \quad (5.1)$$

$$\sigma_{m,y,d} = \frac{M_y}{I_y} \times \frac{z}{2} \quad (5.2)$$

$$\sigma_{m,z,d} = \frac{M_z}{I_z} \times \frac{y}{2} \quad (5.3)$$

$$\tau_{y,d} = \frac{3 \times T_y}{2 \times b \times h} \quad (5.4)$$

$$\tau_{z,d} = \frac{3 \times T_z}{2 \times b \times h} \quad (5.5)$$

### 5.2.2.1. Pilares principais

Os pilares principais são descontínuos com uma altura no primeiro piso de 3 metros e no segundo de 2,85 metros completando uma altura total desde a base até à cobertura de 5,85 metros (3 + 2,85 m). Foi conservada a mesma secção no desenvolvimento completo dos pilares, e na Fig.5.10 é representada uma planta de todos os pilares, secções e apoios modelados, tendo em atenção os eixos de simetria.

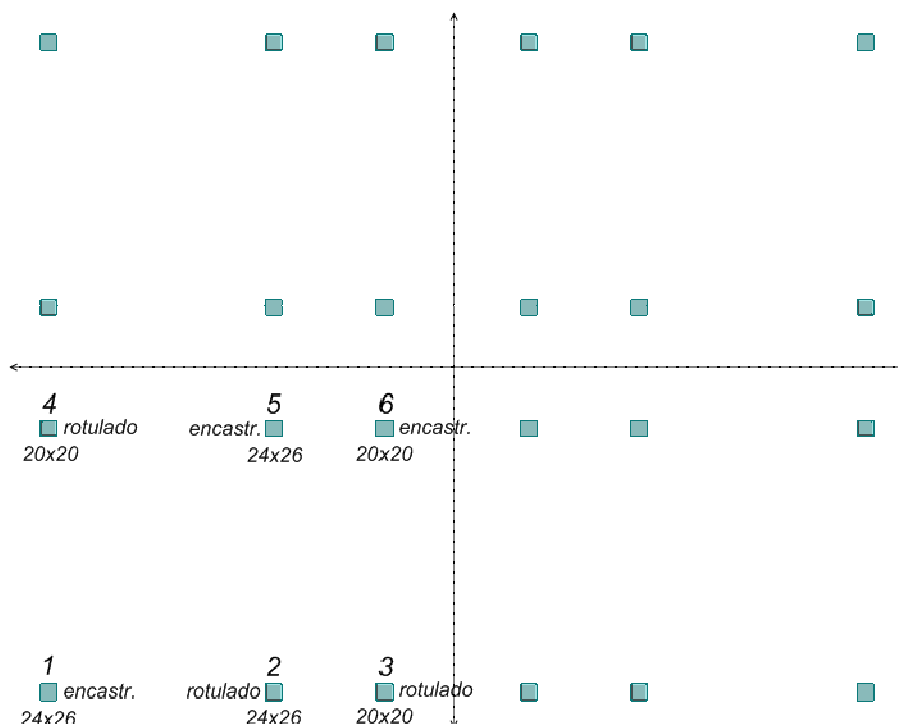


Fig.5.10 – Planta dos pilares principais

Os pilares 1, 2 e 5 são apresentados com verificação conjunta dada a semelhança de esforços actuantes e por isso com a mesma secção, acontecendo o mesmo com os pilares 3, 4 e 6.

- Pilares 1, 2 e 5 (24x26 cm<sup>2</sup>)

#### Estado limite último

A solicitação mais condicionante para os elementos deste grupo corresponde à combinação 6 na modelação 1 para o pilar 5 do primeiro piso (l = 3 m).

Quadro 5.17 – Forças internas mais condicionantes para os pilares 24x26 cm<sup>2</sup>

| Forças internas |                          | Valor  | Unidades |
|-----------------|--------------------------|--------|----------|
| $N$             | Força axial              | 94,36  | kN       |
| $M_y$           | Momento em torno de y    | 30,68  | kN.m     |
| $M_z$           | Momento em torno de z    | -1,95  | kN.m     |
| $T_y$           | Força de corte segundo y | -0,98  | kN       |
| $T_z$           | Força de corte segundo z | -20,26 | kN       |

Quadro 5.18 – Tensões criadas pelos esforços para os pilares 24x26 cm<sup>2</sup>

| Tensões introduzido pelos esforços |                                                | Valor | Unidades |
|------------------------------------|------------------------------------------------|-------|----------|
| $\sigma_{c,0,d}$                   | Tensão Normal de compressão                    | 1.51  | MPa      |
| $\sigma_{m,y,d}$                   | Tensão na borda normal superior devido a $M_y$ | 11.35 | MPa      |
| $\sigma_{m,z,d}$                   | Tensão na borda direita devido a $M_y$         | 0.78  | MPa      |
| $\tau_{y,d}$                       | Tensão tangencial segundo y                    | -0.02 | MPa      |
| $\tau_{z,d}$                       | Tensão tangencial segundo z                    | -0.49 | MPa      |

Quadro 5.19 – Factores e parâmetros considerados para os pilares de 24 x26 cm<sup>2</sup>

| Factor/parâmetro | Valor |
|------------------|-------|
| $k_{h,y}$        | 1.15  |
| $k_{h,z}$        | 1.15  |
| $k_{mod}$        | 0.90  |
| $k_m$            | 0.70  |
| $K_{ls}$         | 1.00  |

$$f_{c,0,d} = \frac{f_{c,k}}{\gamma_m} \times k_{mod} = 17,28 \text{ MPa}$$

$$f_{m,y,d} = \frac{f_{m,0,k}}{\gamma_m} \times k_{mod} \times k_h = 19,87 \text{ MPa} = f_{m,z,d}$$

$$f_{v,d} = \frac{f_{v,k}}{\gamma_m} \times k_{mod} = 1,94 \text{ MPa}$$

$$\lambda_y = \frac{l_y}{\sqrt{\frac{(b \times h^3)}{12}}} = 39,97$$

$$\lambda_z = \frac{l_z}{\sqrt{\frac{(b \times h^3)}{12}}} = 43,30$$

$$\lambda_{rel,y} = \frac{\lambda_y}{\pi} \times \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} = 0,64$$

$$\lambda_{rel,z} = \frac{\lambda_z}{\pi} \times \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} = 0,70$$

$$\sigma_{c,crit,y} = \frac{\pi^2 \times E_{0,05}}{\lambda_y^2} = 58,07$$

$$\sigma_{c,crit,z} = \frac{\pi^2 \times E_{0,05}}{\lambda_z^2} = 49,48$$

$$k_y = 0,5 \times (1 + \beta_c \times (\lambda_{rel,y} - 0,3) + \lambda_{rel,y}^2) = 0,71$$

$$k_z = 0,5 \times (1 + \beta_c \times (\lambda_{rel,z} - 0,3) + \lambda_{rel,z}^2) = 0,75$$

$$k_{c,y} = \frac{1}{k_y + \sqrt{k_y^2 - k_{rel,y}^2}} = 0,98$$

$$k_{c,z} = \frac{1}{k_z + \sqrt{k_z^2 - k_{rel,z}^2}} = 0,96$$

$$\tau_{y,d} \leq f_{v,d} \Leftrightarrow 0,02 \leq 1,94 \quad OK$$

$$\tau_{z,d} \leq f_{v,d} \Leftrightarrow 0,49 \leq 1,94 \quad OK$$

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y} \cdot f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \Leftrightarrow 0,69 \leq 1 \quad OK$$

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} \cdot f_{c,0,d}} + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \Leftrightarrow 0,53 \leq 1 \quad OK$$

#### Estado limite de serviço (deformação)

$$v_x \leq v_{máx,x} = \left( \frac{l}{150} \right) \Leftrightarrow 0 \leq 2 \text{ cm} \quad OK$$

$$v_y \leq v_{máx,y} = \left( \frac{l}{150} \right) \Leftrightarrow 0 \leq 2 \text{ cm} \quad OK$$

- Pilares 3, 4 e 6 (secção 20x20 cm<sup>2</sup>)

### Estado limite último

A solicitação mais condicionante para os elementos deste grupo corresponde à combinação 5 na modelação 1 para o pilar 3 do segundo piso (l = 2,85 m).

Quadro 5.20 – Forças internas mais condicionantes para os pilares 20x20 cm<sup>2</sup>

| Forças internas |                          | Valor | Unidades |
|-----------------|--------------------------|-------|----------|
| N               | Força axial              | 47,64 | kN       |
| M <sub>y</sub>  | Momento em torno de y    | 13,39 | kN.m     |
| M <sub>z</sub>  | Momento em torno de z    | -0,68 | kN.m     |
| T <sub>y</sub>  | Força de corte segundo y | 0,5   | kN       |
| T <sub>z</sub>  | Força de corte segundo z | 9,04  | kN       |

Quadro 5.21 – Tensões criadas pelos esforços para os pilares 20x20 cm<sup>2</sup>

| Tensões introduzido pelos esforços |                                                         | Valor | Unidades |
|------------------------------------|---------------------------------------------------------|-------|----------|
| $\sigma_{c,0,d}$                   | Tensão Normal de compressão                             | 1,19  | MPa      |
| $\sigma_{m,y,d}$                   | Tensão na borda normal superior devido a M <sub>y</sub> | 10,05 | MPa      |
| $\sigma_{m,z,d}$                   | Tensão na borda direita devido a M <sub>y</sub>         | 0,51  | MPa      |
| $\tau_{y,d}$                       | Tensão tangencial segundo y                             | 0,02  | MPa      |
| $\tau_{z,d}$                       | Tensão tangencial segundo z                             | 0,34  | MPa      |

Quadro 5.22 – Factores e parâmetros considerados para os pilares de 20 x20 cm<sup>2</sup>

| Factor/parâmetro | Valor |
|------------------|-------|
| k <sub>h,y</sub> | 1,15  |
| k <sub>h,z</sub> | 1,15  |
| k <sub>mod</sub> | 0,7   |
| k <sub>m</sub>   | 0,7   |
| K <sub>ls</sub>  | 1.00  |

$$f_{c,0,d} = \frac{f_{c,k}}{\gamma_m} \times k_{mod} = 13,44 \text{ MPa}$$

$$f_{m,y,d} = \frac{f_{m,0,k}}{\gamma_m} \times k_{mod} \times k_h = 15,46 \text{ MPa} = f_{m,z,d}$$

$$f_{v,d} = \frac{f_{v,k}}{\gamma_m} \times k_{mod} = 1,51 \text{ MPa}$$

$$\lambda_y = \lambda_z = \frac{l_y}{\sqrt{\frac{b \times h^3}{12}}} = 49,36$$

$$\lambda_{rel,y} = \lambda_{rel,z} = \frac{\lambda_y}{\pi} \times \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} = 0,79$$

$$\sigma_{c,crit,y} = \sigma_{c,crit,z} = \frac{\pi^2 \times E_{0,05}}{\lambda_y^2} = 38,07$$

$$k_y = k_z = 0,5 \times (1 + \beta_c \times (\lambda_{rel,y} - 0,3) + \lambda_{rel,y}^2) = 0,71$$

$$k_{c,y} = k_{c,z} = \frac{1}{k_y + \sqrt{k_y^2 - k_{rel,y}^2}} = 0,98$$

$$\tau_{y,d} \leq f_{v,d} \Leftrightarrow 0,02 \leq 1,51 \quad OK$$

$$\tau_{z,d} \leq f_{v,d} \Leftrightarrow 0,34 \leq 1,51 \quad OK$$

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y} \cdot f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \Leftrightarrow 0,77 \leq 1 \quad OK$$

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} \cdot f_{c,0,d}} + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \Leftrightarrow 0,58 \leq 1 \quad OK$$

#### Estado limite de serviço (deformação)

$$v_x \leq v_{máx,x} = \left( \frac{l}{150} \right) \Leftrightarrow 0 \leq 1,9 \text{ cm} \quad OK$$

$$v_y \leq v_{máx,y} = \left( \frac{l}{150} \right) \Leftrightarrow 0 \leq 1,9 \text{ cm} \quad OK$$

#### 5.2.2.2. Vigas principais do primeiro e segundo piso (sótão)

Nas Fig.5.11 e Fig.5.12 são representadas plantas de todas as vigas principais, assim como as linhas das asnas de cobertura, linhas das semi-asnas e todas as secções tendo em atenção os eixos de simetria. Definiu-se como limitação de deformação para as vigas  $l/200$ . As vigas onde descarregam os pavimentos térreos têm a mesma secção das vigas onde descarregam os pavimentos do primeiro piso, no entanto apoiam directamente na fundação.

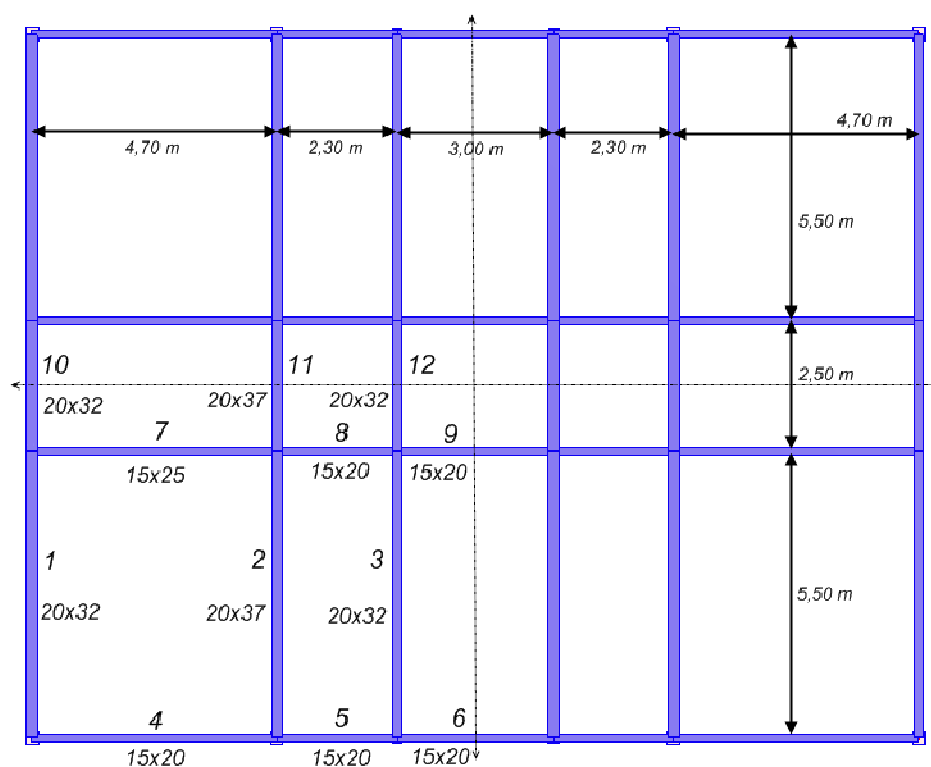


Fig.5.11 – Planta das vigas do primeiro piso

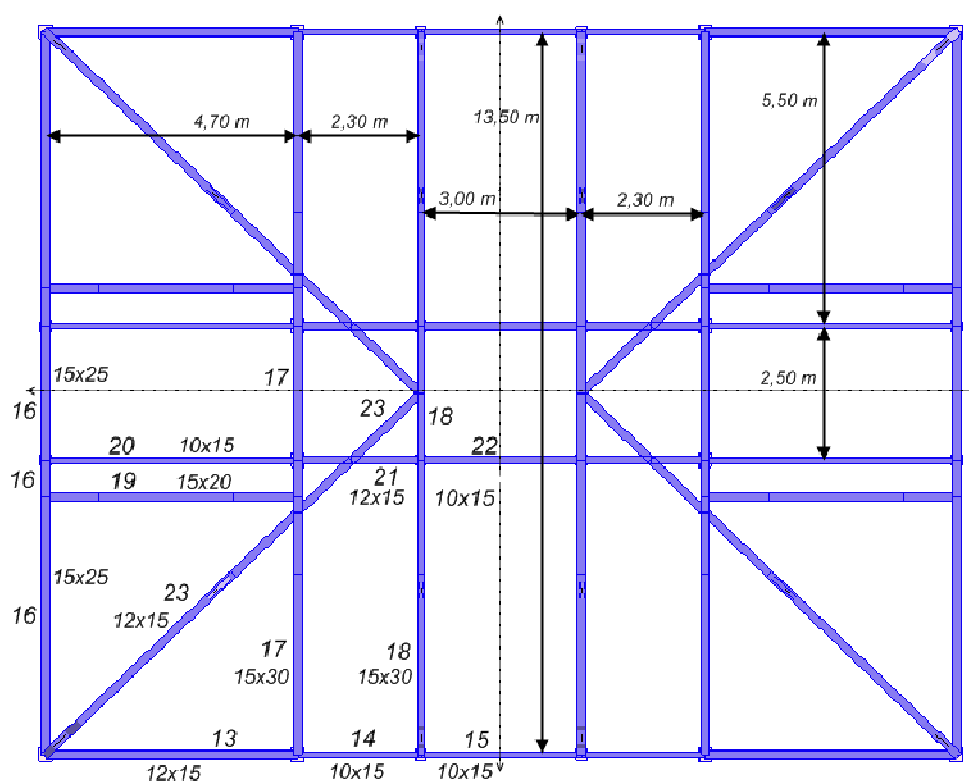


Fig.5.12 – Planta das vigas do piso do sótão

- Vigas 1, 3, 10 e 12 (20x32 cm<sup>2</sup>)

### Estado limite último

A solicitação mais condicionante para os elementos deste grupo corresponde à combinação 5 na modelação 2 para a viga 3 (l = 5,50m).

Quadro 5.23 – Forças internas mais condicionantes para as vigas 20x32 cm<sup>2</sup> e l = 5,50 m

| Forças internas |                          | Valor | Unidades |
|-----------------|--------------------------|-------|----------|
| $N$             | Força axial              | -0,12 | kN       |
| $M_y$           | Momento em torno de y    | 48,04 | kN.m     |
| $M_z$           | Momento em torno de z    | 0,00  | kN.m     |
| $T_y$           | Força de corte segundo y | 0,00  | kN       |
| $T_z$           | Força de corte segundo z | 1,82  | kN       |

Quadro 5.24 – Tensões criadas pelos esforços para os as vigas 20x32 cm<sup>2</sup> e l = 5,50 m

| Tensões introduzido pelos esforços |                                                | Valor  | Unidades |
|------------------------------------|------------------------------------------------|--------|----------|
| $\sigma_{t,0,d}$                   | Tensão Normal de tracção                       | 0,00   | MPa      |
| $\sigma_{m,y,d}$                   | Tensão na borda normal inferior devido a $M_y$ | -14,07 | MPa      |
| $\sigma_{m,z,d}$                   | Tensão na borda direita devido a $M_z$         | 0,0    | MPa      |
| $\tau_{y,d}$                       | Tensão tangencial segundo y                    | 0,0    | MPa      |
| $\tau_{z,d}$                       | Tensão tangencial segundo z                    | 0,04   | MPa      |

Quadro 5.25 – Factores e parâmetros considerados para os as vigas 20x32 cm<sup>2</sup> e l = 5,50 m

| Factor/parâmetro | Valor |
|------------------|-------|
| $k_h$            | 1,15  |
| $k_{h,y}$        | 1,13  |
| $k_{h,z}$        | 1,15  |
| $k_{mod}$        | 0,70  |
| $k_m$            | 0,70  |
| $K_{is}$         | 1,00  |

$$f_{t,0,d} = \frac{f_{t,k}}{\gamma_m} \times k_{mod} \times k_h = 10,63 \text{ MPa}$$

$$f_{m,y,d} = \frac{f_{m,0,k}}{\gamma_m} \times k_{mod} \times k_h = 15,24 \text{ MPa}$$

$$f_{v,d} = \frac{f_{v,k}}{\gamma_m} \times k_{mod} = 1,51 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{m,crit} = \frac{0,78 \times b^2}{h \times l_{ef}} \times E_{0,05} = 166,78 \text{ MPa}$$

$$\lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{f_{m,k}}{\sigma_{m,crit}}} = 0,38$$

$$k_{crit} = 1,0$$

$$\tau_{z,d} \leq f_{v,d} \Leftrightarrow 0,0 \leq 1,51 \text{ OK}$$

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \Leftrightarrow 0,92 \leq 1 \text{ OK}$$

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{k_{crit} \cdot f_{t,0,d}} \leq 1 \Leftrightarrow 0,92 \leq 1 \text{ OK}$$

#### Estado limite de serviço (deformação)

$$u_{fin,z} \leq u_{fin,máx,z} = \left( \frac{l}{200} \right) \Leftrightarrow 2,5 \leq 2,8 \text{ cm OK}$$

- Vigas 2 e 11 (20x37 cm<sup>2</sup>)

#### Estado limite último

A solicitação mais condicionante para os elementos deste grupo corresponde à combinação 5 na modelação 2 para a viga 2 (l = 5,50m).

Quadro 5.26 – Forças internas mais condicionantes para as vigas 20x37 cm<sup>2</sup> e l = 5,50 m

|                | Forças internas          | Valor | Unidades |
|----------------|--------------------------|-------|----------|
| N              | Força axial              | -0,04 | kN       |
| M <sub>y</sub> | Momento em torno de y    | 63,97 | kN.m     |
| M <sub>z</sub> | Momento em torno de z    | 0,00  | kN.m     |
| T <sub>y</sub> | Força de corte segundo y | 0,00  | kN       |
| T <sub>z</sub> | Força de corte segundo z | 2,42  | kN       |

Quadro 5.27 – Tensões criadas pelos esforços para os as vigas 20x37 cm<sup>2</sup> e l =5,50 m

| Tensões introduzido pelos esforços |                                                | Valor  | Unidades |
|------------------------------------|------------------------------------------------|--------|----------|
| $\sigma_{t,0,d}$                   | Tensão Normal de Tracção                       | 0,00   | MPa      |
| $\sigma_{m,y,d}$                   | Tensão na borda normal inferior devido a $M_y$ | -14,02 | MPa      |
| $\sigma_{m,z,d}$                   | Tensão na borda direita devido a $M_z$         | 0,0    | MPa      |
| $\tau_{y,d}$                       | Tensão tangencial segundo y                    | 0,0    | MPa      |
| $\tau_{z,d}$                       | Tensão tangencial segundo z                    | 0,05   | MPa      |

Quadro 5.28 – Factores e parâmetros considerados para as vigas 20x37 cm<sup>2</sup> e l =5,50 m

| Factor/parâmetro | Valor |
|------------------|-------|
| $k_h$            | 1,15  |
| $k_{h,y}$        | 1,10  |
| $k_{h,z}$        | 1,15  |
| $k_{mod}$        | 0,70  |
| $k_m$            | 0,70  |
| $K_{ls}$         | 1,00  |

$$f_{t,0,d} = \frac{f_{t,k}}{\gamma_m} \times k_{mod} \times k_h = 10,63 \text{ MPa}$$

$$f_{m,y,d} = \frac{f_{m,0,k}}{\gamma_m} \times k_{mod} \times k_h = 14,80 \text{ MPa}$$

$$f_{v,d} = \frac{f_{v,k}}{\gamma_m} \times k_{mod} = 1,51 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{m,crit} = \frac{0,78 \times b^2}{h \times l_{ef}} \times E_{0,05} = 139,59 \text{ MPa}$$

$$\lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{f_{m,k}}{\sigma_{m,crit}}} = 0,41$$

$$k_{crit} = 1,0$$

$$\tau_{z,d} \leq f_{v,d} \Leftrightarrow 0,0 \leq 1,51 \text{ OK}$$

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \Leftrightarrow 0,95 \leq 1 \quad OK$$

$$\frac{\sigma_{m,y,d}}{k_{crit} \cdot f_{m,y,d}} \leq 1 \Leftrightarrow 0,95 \leq 1 \quad OK$$

### Estado limite de serviço (deformação)

$$u_{fin,z} \leq u_{fin,máx,z} = \left( \frac{l}{200} \right) \Leftrightarrow 2,1 \leq 2,8 \text{ cm} \quad OK$$

- Vigas 4 e 19 (15x20 cm<sup>2</sup> e l = 4,70 m)

### Estado limite último

A solicitação mais condicionante para os elementos deste grupo corresponde à combinação 5 na modelação 2 para a viga 19.

Quadro 5.29 – Forças internas mais condicionantes para as vigas 15x20 cm<sup>2</sup> e l = 4,70 m

|                | Forças internas          | Valor | Unidades |
|----------------|--------------------------|-------|----------|
| N              | Força axial              | 0,72  | kN       |
| M <sub>y</sub> | Momento em torno de y    | 11,96 | kN.m     |
| M <sub>z</sub> | Momento em torno de z    | -0,13 | kN.m     |
| T <sub>y</sub> | Força de corte segundo y | 0,13  | kN       |
| T <sub>z</sub> | Força de corte segundo z | 11,89 | kN       |

Quadro 5.30 – Tensões criadas pelos esforços para as vigas 15x20 cm<sup>2</sup> e l = 4,70 m

|                    | Tensões introduzido pelos esforços                      | Valor | Unidades |
|--------------------|---------------------------------------------------------|-------|----------|
| σ <sub>c,0,d</sub> | Tensão Normal de compressão                             | 0,02  | MPa      |
| σ <sub>m,y,d</sub> | Tensão na borda normal superior devido a M <sub>y</sub> | 11,96 | MPa      |
| σ <sub>m,z,d</sub> | Tensão na borda direita devido a M <sub>z</sub>         | 0,17  | MPa      |
| τ <sub>y,d</sub>   | Tensão tangencial segundo y                             | 0,01  | MPa      |
| τ <sub>z,d</sub>   | Tensão tangencial segundo z                             | 0,59  | MPa      |

Quadro 5.31 – Factores e parâmetros considerados para as vigas 15x20 cm<sup>2</sup> e l = 4,70 m

| Factor/parâmetro | Valor |
|------------------|-------|
| $k_h$            | 1,15  |
| $k_{h,y}$        | 1,15  |
| $k_{h,z}$        | 1,15  |
| $k_{mod}$        | 0,70  |
| $k_m$            | 0,70  |
| $K_{ls}$         | 1,00  |

$$f_{c,0,d} = \frac{f_{c,k}}{\gamma_m} \times k_{mod} = 13,44 \text{ MPa}$$

$$f_{m,y,d} = \frac{f_{m,0,k}}{\gamma_m} \times k_{mod} \times k_h = 15,46 \text{ MPa} = f_{m,z,d}$$

$$f_{v,d} = \frac{f_{v,k}}{\gamma_m} \times k_{mod} = 1,51 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{m,crit} = \frac{0,78 \times b^2}{h \times l_{ef}} \times E_{0,05} = 193,37 \text{ MPa}$$

$$\lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{f_{m,k}}{\sigma_{m,crit}}} = 0,35$$

$$k_{crit} = 1,0$$

$$\tau_{z,d} \leq f_{v,d} \Leftrightarrow 0,35 \leq 1,51 \text{ OK}$$

$$\left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}}\right)^2 + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \Leftrightarrow 0,78 \leq 1 \text{ OK}$$

$$\frac{\sigma_{m,y,d}}{k_{crit} \cdot f_{m,y,d}} \leq 1 \Leftrightarrow 0,77 \leq 1 \text{ OK}$$

#### Estado limite de serviço (deformação)

$$u_{fin,z} \leq u_{fin,máx,z} = \left(\frac{l}{200}\right) \Leftrightarrow 2,2 \leq 2,4 \text{ cm OK}$$

- Viga 7 (15x25 cm<sup>2</sup> e l = 4,70 m)

### Estado limite último

A solicitação mais condicionante para os elementos deste grupo corresponde à combinação 5 na modelação 2.

Quadro 5.32 – Forças internas mais condicionantes para as vigas 15x25 cm<sup>2</sup> e l =4,70 m

| Forças internas |                          | Valor | Unidades |
|-----------------|--------------------------|-------|----------|
| $N$             | Força axial              | -0,02 | kN       |
| $M_y$           | Momento em torno de y    | 16,69 | kN.m     |
| $M_z$           | Momento em torno de z    | 0,00  | kN.m     |
| $T_y$           | Força de corte segundo y | 0,00  | kN       |
| $T_z$           | Força de corte segundo z | -0,23 | kN       |

Quadro 5.33 – Tensões criadas pelos esforços para as vigas 15x25 cm<sup>2</sup> e l =4,70 m

| Tensões introduzido pelos esforços |                                                | Valor  | Unidades |
|------------------------------------|------------------------------------------------|--------|----------|
| $\sigma_{t,0,d}$                   | Tensão Normal de tracção                       | -0,00  | MPa      |
| $\sigma_{m,y,d}$                   | Tensão na borda normal inferior devido a $M_y$ | -10,68 | MPa      |
| $\sigma_{m,z,d}$                   | Tensão na borda direita devido a $M_z$         | 0,0    | MPa      |
| $\tau_{y,d}$                       | Tensão tangencial segundo y                    | 0,0    | MPa      |
| $\tau_{z,d}$                       | Tensão tangencial segundo z                    | -0,01  | MPa      |

Quadro 5.34 – Factores e parâmetros considerados para as vigas 15x25 cm<sup>2</sup> e l =4,70 m

| Factor/parâmetro | Valor |
|------------------|-------|
| $k_h$            | 1,15  |
| $k_{h,y}$        | 1,15  |
| $k_{h,z}$        | 1,15  |
| $k_{mod}$        | 0,70  |
| $k_m$            | 0,70  |
| $K_{ls}$         | 1,00  |

$$f_{t,0,d} = \frac{f_{t,k}}{\gamma_m} \times k_{mod} \times k_h = 10,63 \text{ MPa}$$

$$f_{m,y,d} = \frac{f_{m,0,k}}{\gamma_m} \times k_{mod} \times k_h = 15,46 \text{ MPa} = f_{m,z,d}$$

$$f_{v,d} = \frac{f_{v,k}}{\gamma_m} \times k_{mod} = 1,51 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{m,crit} = \frac{0,78 \times b^2}{h \times l_{ef}} \times E_{0,05} = 138,89 \text{ MPa}$$

$$\lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{f_{m,k}}{\sigma_{m,crit}}} = 0,42$$

$$k_{crit} = 1,0$$

$$\tau_{z,d} \leq f_{v,d} \Leftrightarrow 0,42 \leq 1,51 \text{ OK}$$

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \Leftrightarrow 0,69 \leq 1 \text{ OK}$$

$$\frac{\sigma_{m,y,d}}{k_{crit} \cdot f_{m,y,d}} \leq 1 \Leftrightarrow 0,69 \leq 1 \text{ OK}$$

#### Estado limite de serviço (deformação)

$$u_{fin,z} \leq u_{fin,máx,z} = \left( \frac{l}{200} \right) \Leftrightarrow 1,7 \leq 2,4 \text{ cm OK}$$

- Vigas 5 e 8 (15x20 cm<sup>2</sup> e l = 2,30 m)

#### Estado limite último

A solicitação mais condicionante para os elementos deste grupo corresponde à combinação 8 na modelação 1 para a viga 8.

Quadro 5.35 – Forças internas mais condicionantes para as vigas 15x20 cm<sup>2</sup> e l = 2,30 m

|                | Forças internas          | Valor | Unidades |
|----------------|--------------------------|-------|----------|
| N              | Força axial              | 5,62  | kN       |
| M <sub>y</sub> | Momento em torno de y    | -7,76 | kN.m     |
| M <sub>z</sub> | Momento em torno de z    | 0,04  | kN.m     |
| T <sub>y</sub> | Força de corte segundo y | 0,01  | kN       |
| T <sub>z</sub> | Força de corte segundo z | 10,67 | kN       |

Quadro 5.36 – Tensões criadas pelos esforços para as vigas 15x20 cm<sup>2</sup> e l = 2,30 m

| Tensões introduzido pelos esforços |                                                | Valor | Unidades |
|------------------------------------|------------------------------------------------|-------|----------|
| $\sigma_{c,0,d}$                   | Tensão Normal de compressão                    | 0,19  | MPa      |
| $\sigma_{m,y,d}$                   | Tensão na borda normal inferior devido a $M_y$ | 7,76  | MPa      |
| $\sigma_{m,z,d}$                   | Tensão na borda esquerda devido a $M_z$        | 0,06  | MPa      |
| $\tau_{y,d}$                       | Tensão tangencial segundo y                    | 0,00  | MPa      |
| $\tau_{z,d}$                       | Tensão tangencial segundo z                    | 0,53  | MPa      |

Quadro 5.37 – Factores e parâmetros considerados para as vigas 15x20 cm<sup>2</sup> e l = 2,30 m

| Factor/parâmetro | Valor |
|------------------|-------|
| $k_h$            | 1,15  |
| $k_{h,y}$        | 1,15  |
| $k_{h,z}$        | 1,15  |
| $k_{mod}$        | 0,90  |
| $k_m$            | 0,70  |
| $K_{ls}$         | 1,00  |

$$f_{c,0,d} = \frac{f_{c,k}}{\gamma_m} \times k_{mod} = 17,28 \text{ MPa}$$

$$f_{m,y,d} = \frac{f_{m,0,k}}{\gamma_m} \times k_{mod} \times k_h = 19,87 \text{ MPa} = f_{m,z,d}$$

$$f_{v,d} = \frac{f_{v,k}}{\gamma_m} \times k_{mod} = 1,94 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{m,crit} = \frac{0,78 \times b^2}{h \times l_{ef}} \times E_{0,05} = 395,15 \text{ MPa}$$

$$\lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{f_{m,k}}{\sigma_{m,crit}}} = 0,25$$

$$k_{crit} = 1,0$$

$$\tau_{z,d} \leq f_{v,d} \Leftrightarrow 0,27 \leq 1,94 \text{ OK}$$

$$\left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}}\right)^2 + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \Leftrightarrow 0,39 \leq 1 \quad OK$$

$$\frac{\sigma_{m,y,d}}{k_{crit} \cdot f_{m,y,d}} \leq 1 \Leftrightarrow 0,39 \leq 1 \quad OK$$

### Estado limite de serviço (deformação)

$$u_{fin,z} \leq u_{fin,máx,z} = \left(\frac{l}{200}\right) \Leftrightarrow 0,0 \leq 1,1 \text{ cm} \quad OK$$

- Vigas 6 e 9 (15x20 cm<sup>2</sup> e l = 3,00 m)

### Estado limite último

A solicitação mais condicionante para os elementos deste grupo corresponde à combinação 8 na modelação 1 para a viga 9.

Quadro 5.38 – Forças internas mais condicionantes para as vigas 15x20 cm<sup>2</sup> e l = 3,00 m

|                | Forças internas          | Valor | Unidades |
|----------------|--------------------------|-------|----------|
| N              | Força axial              | 6,63  | kN       |
| M <sub>y</sub> | Momento em torno de y    | -6,63 | kN.m     |
| M <sub>z</sub> | Momento em torno de z    | -0,03 | kN.m     |
| T <sub>y</sub> | Força de corte segundo y | -0,00 | kN       |
| T <sub>z</sub> | Força de corte segundo z | 10,61 | kN       |

Quadro 5.39 – Tensões criadas pelos esforços para as vigas 15x20 cm<sup>2</sup> e l = 3,00 m

|                    | Tensões introduzido pelos esforços                      | Valor | Unidades |
|--------------------|---------------------------------------------------------|-------|----------|
| σ <sub>c,0,d</sub> | Tensão Normal de compressão                             | 0,22  | MPa      |
| σ <sub>m,y,d</sub> | Tensão na borda normal inferior devido a M <sub>y</sub> | 6,63  | MPa      |
| σ <sub>m,z,d</sub> | Tensão na borda direita devido a M <sub>z</sub>         | 0,04  | MPa      |
| τ <sub>y,d</sub>   | Tensão tangencial segundo y                             | -0,00 | MPa      |
| τ <sub>z,d</sub>   | Tensão tangencial segundo z                             | 0,53  | MPa      |

Quadro 5.40 – Factores e parâmetros considerados para as vigas 15x20 cm<sup>2</sup> e l=3,00 m

| Factor/parâmetro | Valor |
|------------------|-------|
| $k_h$            | 1,15  |
| $k_{h,y}$        | 1,15  |
| $k_{h,z}$        | 1,15  |
| $k_{mod}$        | 0,90  |
| $k_m$            | 0,70  |
| $K_{ls}$         | 1,00  |

$$f_{c,0,d} = \frac{f_{c,k}}{\gamma_m} \times k_{mod} = 17,28 \text{ MPa}$$

$$f_{m,y,d} = \frac{f_{m,0,k}}{\gamma_m} \times k_{mod} \times k_h = 19,87 \text{ MPa} = f_{m,z,d}$$

$$f_{v,d} = \frac{f_{v,k}}{\gamma_m} \times k_{mod} = 1,94 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{m,crit} = \frac{0,78 \times b^2}{h \times l_{ef}} \times E_{0,05} = 302,95 \text{ MPa}$$

$$\lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{f_{m,k}}{\sigma_{m,crit}}} = 0,28$$

$$k_{crit} = 1,0$$

$$\tau_{z,d} \leq f_{v,d} \Leftrightarrow 0,27 \leq 1,94 \text{ OK}$$

$$\left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}}\right)^2 + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \Leftrightarrow 0,34 \leq 1 \text{ OK}$$

$$\frac{\sigma_{m,y,d}}{k_{crit} \cdot f_{m,y,d}} \leq 1 \Leftrightarrow 0,33 \leq 1 \text{ OK}$$

#### Estado limite de serviço (deformação)

$$u_{fin,z} \leq u_{fin,máx,z} = \left(\frac{l}{200}\right) \Leftrightarrow 0,1 \leq 1,5 \text{ cm OK}$$

- Viga 13 (12x15 cm<sup>2</sup> e l = 4,70 m)

### Estado limite último

A solicitação mais condicionante para os elementos deste grupo corresponde à combinação 6 na modelação 2.

Quadro 5.41 – Forças internas mais condicionantes para as vigas 12x15 cm<sup>2</sup> e l = 4,70 m

| Forças internas |                          | Valor  | Unidades |
|-----------------|--------------------------|--------|----------|
| $N$             | Força axial              | -19,81 | kN       |
| $M_y$           | Momento em torno de y    | 1,76   | kN.m     |
| $M_z$           | Momento em torno de z    | -4,05  | kN.m     |
| $T_y$           | Força de corte segundo y | 0,53   | kN       |
| $T_z$           | Força de corte segundo z | -0,72  | kN       |

Quadro 5.42 – Tensões criadas pelos esforços para as vigas 15x25 cm<sup>2</sup> e l = 2,50 m

| Tensões introduzido pelos esforços |                                                | Valor | Unidades |
|------------------------------------|------------------------------------------------|-------|----------|
| $\sigma_{t,0,d}$                   | Tensão Normal de tracção                       | -0,78 | MPa      |
| $\sigma_{m,y,d}$                   | Tensão na borda normal inferior devido a $M_y$ | -2,43 | MPa      |
| $\sigma_{m,z,d}$                   | Tensão na borda esquerda devido a $M_z$        | -6,35 | MPa      |
| $\tau_{y,d}$                       | Tensão tangencial segundo y                    | 0,03  | MPa      |
| $\tau_{z,d}$                       | Tensão tangencial segundo z                    | -0,04 | MPa      |

Quadro 5.43 – Factores e parâmetros considerados para as vigas 12x15 cm<sup>2</sup> e l = 4,70 m

| Factor/parâmetro | Valor |
|------------------|-------|
| $k_h$            | 1,15  |
| $k_{h,y}$        | 1,15  |
| $k_{h,z}$        | 1,15  |
| $k_{mod}$        | 0,90  |
| $k_m$            | 0,70  |
| $K_{is}$         | 1,00  |

$$f_{t,0,d} = \frac{f_{t,k}}{\gamma_m} \times k_{mod} \times k_h = 13,66 \text{ MPa}$$

$$f_{m,y,d} = \frac{f_{m,0,k}}{\gamma_m} \times k_{mod} \times k_h = 19,87 \text{ MPa} = f_{m,z,d}$$

$$f_{v,d} = \frac{f_{v,k}}{\gamma_m} \times k_{mod} = 1,94 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{m,crit} = \frac{0,78 \times b^2}{h \times l_{ef}} \times E_{0,05} = 293,4 \text{ MPa}$$

$$\lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{f_{m,k}}{\sigma_{m,crit}}} = 0,29$$

$$k_{crit} = 1,0$$

$$\tau_{z,d} \leq f_{v,d} \Leftrightarrow 0,04 \leq 1,94 \text{ OK}$$

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \Leftrightarrow 0,46 \leq 1 \text{ OK}$$

$$\frac{\sigma_{m,y,d}}{k_{crit} \cdot f_{m,y,d}} \leq 1 \Leftrightarrow 0,12 \leq 1 \text{ OK}$$

#### Estado limite de serviço (deformação)

$$u_{fin,y} \leq u_{fin,máx,y} = \left( \frac{l}{200} \right) \Leftrightarrow 1,3 \leq 2,4 \text{ cm OK}$$

$$u_{fin,z} \leq u_{fin,máx,z} = \left( \frac{l}{200} \right) \Leftrightarrow 0,4 \leq 2,4 \text{ cm OK}$$

- Viga 14 (10x15 cm<sup>2</sup> e l = 2,30 m)

#### Estado limite último

A solicitação mais condicionante para os elementos deste grupo corresponde à combinação 6 na modelação 2.

Quadro 5.44 – Forças internas mais condicionantes para as vigas 10x15 cm<sup>2</sup> e l = 2,30 m

|                | Forças internas          | Valor  | Unidades |
|----------------|--------------------------|--------|----------|
| N              | Força axial              | -19,62 | kN       |
| M <sub>y</sub> | Momento em torno de y    | 1,02   | kN.m     |
| M <sub>z</sub> | Momento em torno de z    | -0,99  | kN.m     |
| T <sub>y</sub> | Força de corte segundo y | -0,05  | kN       |
| T <sub>z</sub> | Força de corte segundo z | -0,06  | kN       |

Quadro 5.45 – Tensões criadas pelos esforços para as vigas 10x15 cm<sup>2</sup> e l = 2,30 m

| Tensões introduzido pelos esforços |                                                | Valor | Unidades |
|------------------------------------|------------------------------------------------|-------|----------|
| $\sigma_{t,0,d}$                   | Tensão Normal de tracção                       | -1.31 | MPa      |
| $\sigma_{m,y,d}$                   | Tensão na borda normal inferior devido a $M_y$ | -2.72 | MPa      |
| $\sigma_{m,z,d}$                   | Tensão na borda esquerda devido a $M_z$        | -3.96 | MPa      |
| $\tau_{y,d}$                       | Tensão tangencial segundo y                    | -0.01 | MPa      |
| $\tau_{z,d}$                       | Tensão tangencial segundo z                    | -0.01 | MPa      |

Quadro 5.46 – Factores e parâmetros considerados para as vigas 10x15 cm<sup>2</sup> e l = 2,30 m

| Factor/parâmetro | Valor |
|------------------|-------|
| $k_h$            | 1,15  |
| $k_{h,y}$        | 1,15  |
| $k_{h,z}$        | 1,15  |
| $k_{mod}$        | 0,90  |
| $k_m$            | 0,70  |
| $K_{ls}$         | 1,00  |

$$f_{t,0,d} = \frac{f_{t,k}}{\gamma_m} \times k_{mod} \times k_h = 13,66 \text{ MPa}$$

$$f_{m,y,d} = \frac{f_{m,0,k}}{\gamma_m} \times k_{mod} \times k_h = 19,87 \text{ MPa} = f_{m,z,d}$$

$$f_{v,d} = \frac{f_{v,k}}{\gamma_m} \times k_{mod} = 1,94 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{m,crit} = \frac{0,78 \times b^2}{h \times l_{ef}} \times E_{0,05} = 217,89 \text{ MPa}$$

$$\lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{f_{m,k}}{\sigma_{m,crit}}} = 0,33$$

$$k_{crit} = 1,0$$

$$\tau_{z,d} \leq f_{v,d} \Leftrightarrow 0,01 \leq 1,94 \text{ OK}$$

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \Leftrightarrow 0,39 \leq 1 \quad OK$$

$$\frac{\sigma_{m,y,d}}{k_{crit} \cdot f_{m,y,d}} \leq 1 \Leftrightarrow 0,14 \leq 1 \quad OK$$

### Estado limite de serviço (deformação)

$$u_{fin,y} \leq u_{fin,máx,y} = \left( \frac{l}{200} \right) \Leftrightarrow 0,2 \leq 1,1 \text{ cm} \quad OK$$

$$u_{fin,z} \leq u_{fin,máx,z} = \left( \frac{l}{200} \right) \Leftrightarrow 0,3 \leq 1,1 \text{ cm} \quad OK$$

- Vigas 15 e 22 (10x15 cm<sup>2</sup> e l = 3,00 m)

### Estado limite último

A solicitação mais condicionante para os elementos deste grupo corresponde à combinação 6 na modelação 2. para as vigas 15.

Quadro 5.47 – Forças internas mais condicionantes para as vigas 10x15 cm<sup>2</sup> e l = 3,0 m

|                | Forças internas          | Valor  | Unidades |
|----------------|--------------------------|--------|----------|
| N              | Força axial              | -19,51 | kN       |
| M <sub>y</sub> | Momento em torno de y    | 1,73   | kN.m     |
| M <sub>z</sub> | Momento em torno de z    | -1,68  | kN.m     |
| T <sub>y</sub> | Força de corte segundo y | -0,11  | kN       |
| T <sub>z</sub> | Força de corte segundo z | -0,11  | kN       |

Quadro 5.48 – Tensões criadas pelos esforços para as vigas 10x15 cm<sup>2</sup> e l = 3,0 m

|                    | Tensões introduzido pelos esforços                      | Valor | Unidades |
|--------------------|---------------------------------------------------------|-------|----------|
| σ <sub>t,0,d</sub> | Tensão Normal de tracção                                | -1.30 | MPa      |
| σ <sub>m,y,d</sub> | Tensão na borda normal inferior devido a M <sub>y</sub> | -4.63 | MPa      |
| σ <sub>m,z,d</sub> | Tensão na borda esquerda devido a M <sub>z</sub>        | -6.73 | MPa      |
| τ <sub>y,d</sub>   | Tensão tangencial segundo y                             | -0.01 | MPa      |
| τ <sub>z,d</sub>   | Tensão tangencial segundo z                             | -0.01 | MPa      |

Quadro 5.49 – Factores e parâmetros considerados para as vigas 10x15 cm<sup>2</sup> e l=3,0 m

| Factor/parâmetro | Valor |
|------------------|-------|
| $k_h$            | 1,15  |
| $k_{h,y}$        | 1,15  |
| $k_{h,z}$        | 1,15  |
| $k_{mod}$        | 0,90  |
| $k_m$            | 0,70  |
| $K_{ls}$         | 1,00  |

$$f_{t,0,d} = \frac{f_{t,k}}{\gamma_m} \times k_{mod} \times k_h = 13,66 \text{ MPa}$$

$$f_{m,y,d} = \frac{f_{m,0,k}}{\gamma_m} \times k_{mod} \times k_h = 19,87 \text{ MPa} = f_{m,z,d}$$

$$f_{v,d} = \frac{f_{v,k}}{\gamma_m} \times k_{mod} = 1,94 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{m,crit} = \frac{0,78 \times b^2}{h \times l_{ef}} \times E_{0,05} = 167,05 \text{ MPa}$$

$$\lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{f_{m,k}}{\sigma_{m,crit}}} = 0,38$$

$$k_{crit} = 1,0$$

$$\tau_{z,d} \leq f_{v,d} \Leftrightarrow 0,01 \leq 1,94 \text{ OK}$$

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \Leftrightarrow 0,60 \leq 1 \text{ OK}$$

$$\frac{\sigma_{m,y,d}}{k_{crit} \cdot f_{m,y,d}} \leq 1 \Leftrightarrow 0,23 \leq 1 \text{ OK}$$

**Estado limite de serviço (deformação)**

$$u_{fin,y} \leq u_{fin,máx,y} = \left( \frac{l}{200} \right) \Leftrightarrow 0,8 \leq 1,5 \text{ cm OK}$$

$$u_{fin,z} \leq u_{fin,máx,z} = \left( \frac{l}{200} \right) \Leftrightarrow 0,5 \leq 1,5 \text{ cm OK}$$

- Viga 16 (15x25 cm<sup>2</sup> e l = 13,50 m = 2 x 5,50 m + 2,5 m)

**Estado limite último**

A solicitação mais condicionante para os elementos deste grupo corresponde à combinação 5 na modelação 1 no segmento 5,50m.

Quadro 5.50 – Forças internas mais condicionantes para as vigas 15x25 cm<sup>2</sup> e l = 5,50 m

| Forças internas      |                          | Valor  | Unidades |
|----------------------|--------------------------|--------|----------|
| <i>N</i>             | Força axial              | -11,49 | kN       |
| <i>M<sub>y</sub></i> | Momento em torno de y    | -14,82 | kN.m     |
| <i>M<sub>z</sub></i> | Momento em torno de z    | 0,39   | kN.m     |
| <i>T<sub>y</sub></i> | Força de corte segundo y | 1,24   | kN       |
| <i>T<sub>z</sub></i> | Força de corte segundo z | 22,23  | kN       |

Quadro 5.51 – Tensões criadas pelos esforços para as vigas 15x25 cm<sup>2</sup> e l = 5,50 m

| Tensões introduzido pelos esforços |                                                               | Valor | Unidades |
|------------------------------------|---------------------------------------------------------------|-------|----------|
| $\sigma_{t,0,d}$                   | Tensão Normal de tracção                                      | -0,31 | MPa      |
| $\sigma_{m,y,d}$                   | Tensão na borda normal inferior devido a <i>M<sub>y</sub></i> | -9,49 | MPa      |
| $\sigma_{m,z,d}$                   | Tensão na borda esquerda devido a <i>M<sub>z</sub></i>        | -0,42 | MPa      |
| $\tau_{y,d}$                       | Tensão tangencial segundo y                                   | 0,05  | MPa      |
| $\tau_{z,d}$                       | Tensão tangencial segundo z                                   | 0,89  | MPa      |

Quadro 5.52 – Factores e parâmetros considerados para as vigas 15x25 cm<sup>2</sup> e l = 5,50 m

| Factor/parâmetro       | Valor |
|------------------------|-------|
| <i>k<sub>h</sub></i>   | 1,15  |
| <i>k<sub>h,y</sub></i> | 1,15  |
| <i>k<sub>h,z</sub></i> | 1,15  |
| <i>k<sub>mod</sub></i> | 0,70  |
| <i>k<sub>m</sub></i>   | 0,70  |
| <i>K<sub>ls</sub></i>  | 1,00  |

$$f_{t,0,d} = \frac{f_{t,k}}{\gamma_m} \times k_{mod} \times k_h = 10,63 MPa$$

$$f_{m,y,d} = \frac{f_{m,0,k}}{\gamma_m} \times k_{mod} \times k_h = 15,46 MPa = f_{m,z,d}$$

$$f_{v,d} = \frac{f_{v,k}}{\gamma_m} \times k_{mod} = 1,51 MPa$$

$$\sigma_{m,crit} = \frac{0,78 \times b^2}{h \times l_{ef}} \times E_{0,05} = 118,69 MPa$$

$$\lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{f_{m,k}}{\sigma_{m,crit}}} = 0,45$$

$$k_{crit} = 1,0$$

$$\tau_{z,d} \leq f_{v,d} \Leftrightarrow 0,89 \leq 1,51 \quad OK$$

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \Leftrightarrow 0,66 \leq 1 \quad OK$$

$$\frac{\sigma_{m,y,d}}{k_{crit} \cdot f_{m,y,d}} \leq 1 \Leftrightarrow 0,61 \leq 1 \quad OK$$

#### Estado limite de serviço (deformação)

$$u_{fin,y} \leq u_{fin,máx,y} = \left( \frac{l}{200} \right) \Leftrightarrow 0,3 \leq 2,8 \text{ cm} \quad OK$$

$$u_{fin,z} \leq u_{fin,máx,z} = \left( \frac{l}{200} \right) \Leftrightarrow 0,6 \leq 2,8 \text{ cm} \quad OK$$

- Vigas 17 e 18 (15x30 cm<sup>2</sup> e l = 13,50 m = 2x3,38 m + 2x1,16 m + 2x0,27 m + 2x0,70 + 2,50 m ou 2x3,38 m + 2x2,13 m + 2x2,15m)

#### Estado limite último

A solicitação mais condicionante para os elementos deste grupo corresponde à combinação 5 na modelação 2 no segmento 0,7 m.

Quadro 5.53 – Forças internas mais condicionantes para as vigas 15x30 cm<sup>2</sup> e l=0,70 m

|                | Forças internas          | Valor  | Unidades |
|----------------|--------------------------|--------|----------|
| N              | Força axial              | -0,97  | kN       |
| M <sub>y</sub> | Momento em torno de y    | -27,46 | kN.m     |
| M <sub>z</sub> | Momento em torno de z    | -0,30  | kN.m     |
| T <sub>y</sub> | Força de corte segundo y | 0,54   | kN       |
| T <sub>z</sub> | Força de corte segundo z | -44,71 | kN       |

Quadro 5.54 – Tensões criadas pelos esforços para as vigas 15x30 cm<sup>2</sup> e l=0,70 m

|                  | Tensões introduzido pelos esforços                      | Valor  | Unidades |
|------------------|---------------------------------------------------------|--------|----------|
| $\sigma_{t,0,d}$ | Tensão Normal de tracção                                | -0,02  | MPa      |
| $\sigma_{m,y,d}$ | Tensão na borda normal inferior devido a M <sub>y</sub> | -12,21 | MPa      |
| $\sigma_{m,z,d}$ | Tensão na borda esquerda devido a M <sub>z</sub>        | -0,27  | MPa      |
| $\tau_{y,d}$     | Tensão tangencial segundo y                             | 0,02   | MPa      |
| $\tau_{z,d}$     | Tensão tangencial segundo z                             | -1,49  | MPa      |

Quadro 5.55 – Factores e parâmetros considerados para as vigas 15x30 cm<sup>2</sup> e l=0,70 m

| Factor/parâmetro | Valor |
|------------------|-------|
| k <sub>h</sub>   | 1,15  |
| k <sub>h,y</sub> | 1,15  |
| k <sub>h,z</sub> | 1,15  |
| k <sub>mod</sub> | 0,70  |
| k <sub>m</sub>   | 0,70  |
| K <sub>ls</sub>  | 1,00  |

$$f_{t,0,d} = \frac{f_{t,k}}{\gamma_m} \times k_{mod} \times k_h = 10,63 \text{ MPa}$$

$$f_{m,y,d} = \frac{f_{m,0,k}}{\gamma_m} \times k_{mod} \times k_h = 15,46 \text{ MPa} = f_{m,z,d}$$

$$f_{v,d} = \frac{f_{v,k}}{\gamma_m} \times k_{mod} = 1,51 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{m,crit} = \frac{0,78 \times b^2}{h \times l_{ef}} \times E_{0,05} = 1506,69 \text{ MPa}$$

$$\lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{f_{m,k}}{\sigma_{m,crit}}} = 0,13$$

$$k_{crit} = 1,0$$

$$\tau_{z,d} \leq f_{v,d} \Leftrightarrow 1,49 \leq 1,51 \quad OK$$

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \Leftrightarrow 0,80 \leq 1 \quad OK$$

$$\frac{\sigma_{m,y,d}}{k_{crit} \cdot f_{m,y,d}} \leq 1 \Leftrightarrow 0,79 \leq 1 \quad OK$$

#### Estado limite de serviço (deformação)

$$u_{fin,y} \leq u_{fin,máx,y} = \left(\frac{l}{200}\right) \Leftrightarrow 0,1 \leq 2,8 \text{ cm} \quad OK$$

$$u_{fin,z} \leq u_{fin,máx,z} = \left(\frac{l}{200}\right) \Leftrightarrow 0,5 \leq 2,8 \text{ cm} \quad OK$$

- Viga 20 (10x15 cm<sup>2</sup> e l = 4,70 m)

#### Estado limite último

A solicitação mais condicionante para os elementos deste grupo corresponde à combinação 5 na modelação 1.

Quadro 5.56 – Forças internas mais condicionantes para as vigas 10x15 cm<sup>2</sup> e l = 4,70 m

| Forças internas |                          | Valor | Unidades |
|-----------------|--------------------------|-------|----------|
| N               | Força axial              | -0,27 | kN       |
| M <sub>y</sub>  | Momento em torno de y    | -0,52 | kN.m     |
| M <sub>z</sub>  | Momento em torno de z    | -0,06 | kN.m     |
| T <sub>y</sub>  | Força de corte segundo y | -0,02 | kN       |
| T <sub>z</sub>  | Força de corte segundo z | 0,33  | kN       |

Quadro 5.57 – Tensões criadas pelos esforços para as vigas 10x15 cm<sup>2</sup> e l=4,70 m

| Tensões introduzido pelos esforços |                                                | Valor | Unidades |
|------------------------------------|------------------------------------------------|-------|----------|
| $\sigma_{t,0,d}$                   | Tensão Normal de tracção                       | -0,02 | MPa      |
| $\sigma_{m,y,d}$                   | Tensão na borda normal superior devido a $M_y$ | -1,39 | MPa      |
| $\sigma_{m,z,d}$                   | Tensão na borda esquerda devido a $M_z$        | -0,22 | MPa      |
| $\tau_{y,d}$                       | Tensão tangencial segundo y                    | -0,00 | MPa      |
| $\tau_{z,d}$                       | Tensão tangencial segundo z                    | 0,03  | MPa      |

Quadro 5.58 – Factores e parâmetros considerados para as vigas 10x15 cm<sup>2</sup> e l=4,70 m

| Factor/parâmetro | Valor |
|------------------|-------|
| $k_h$            | 1,15  |
| $k_{h,y}$        | 1,15  |
| $k_{h,z}$        | 1,15  |
| $k_{mod}$        | 0,90  |
| $k_m$            | 0,70  |
| $K_{ls}$         | 1,00  |

$$f_{t,0,d} = \frac{f_{t,k}}{\gamma_m} \times k_{mod} \times k_h = 13,66 \text{ MPa}$$

$$f_{m,y,d} = \frac{f_{m,0,k}}{\gamma_m} \times k_{mod} \times k_h = 19,87 \text{ MPa} = f_{m,z,d}$$

$$f_{v,d} = \frac{f_{v,k}}{\gamma_m} \times k_{mod} = 1,94 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{m,crit} = \frac{0,78 \times b^2}{h \times l_{ef}} \times E_{0,05} = 106,63 \text{ MPa}$$

$$\lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{f_{m,k}}{\sigma_{m,crit}}} = 0,47$$

$$k_{crit} = 1,0$$

$$\tau_{z,d} \leq f_{v,d} \Leftrightarrow 0,03 \leq 1,94 \text{ OK}$$

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \Leftrightarrow 0,08 \leq 1 \quad OK$$

$$\frac{\sigma_{m,y,d}}{k_{crit} \cdot f_{m,y,d}} \leq 1 \Leftrightarrow 0,07 \leq 1 \quad OK$$

### Estado limite de serviço (deformação)

$$u_{fin,y} \leq u_{fin,máx,y} = \left( \frac{l}{200} \right) \Leftrightarrow 0,0 \leq 2,3 \text{ cm} \quad OK$$

$$u_{fin,z} \leq u_{fin,máx,z} = \left( \frac{l}{200} \right) \Leftrightarrow 0,2 \leq 2,3 \text{ cm} \quad OK$$

- Viga 21 (12x15 cm<sup>2</sup> e l = 2,30 m = 1 m + 1,3 m)

### Estado limite último

A solicitação mais condicionante para os elementos deste grupo corresponde à combinação 9 na modelação 2.no segmento de 1 m.

Quadro 5.59 – Forças internas mais condicionantes para as vigas 12x15 cm<sup>2</sup> e l = 1,00 m

|                | Forças internas          | Valor | Unidades |
|----------------|--------------------------|-------|----------|
| N              | Força axial              | 2,23  | kN       |
| M <sub>y</sub> | Momento em torno de y    | -1,34 | kN.m     |
| M <sub>z</sub> | Momento em torno de z    | 0,67  | kN.m     |
| T <sub>y</sub> | Força de corte segundo y | -0,75 | kN       |
| T <sub>z</sub> | Força de corte segundo z | 6,96  | kN       |

Quadro 5.60 – Tensões criadas pelos esforços para as vigas 12x15 cm<sup>2</sup> e l = 1,00 m

|                    | Tensões introduzido pelos esforços                      | Valor | Unidades |
|--------------------|---------------------------------------------------------|-------|----------|
| σ <sub>c,0,d</sub> | Tensão Normal de compressão                             | 0,09  | MPa      |
| σ <sub>m,y,d</sub> | Tensão na borda normal inferior devido a M <sub>y</sub> | 1,86  | MPa      |
| σ <sub>m,z,d</sub> | Tensão na borda esquerda devido a M <sub>z</sub>        | 1,05  | MPa      |
| τ <sub>y,d</sub>   | Tensão tangencial segundo y                             | -0,04 | MPa      |
| τ <sub>z,d</sub>   | Tensão tangencial segundo z                             | 0,41  | MPa      |

Quadro 5.61 – Factores e parâmetros considerados para as vigas 12x15 cm<sup>2</sup> e l=1,00 m

| Factor/parâmetro | Valor |
|------------------|-------|
| $k_h$            | 1,15  |
| $k_{h,y}$        | 1,15  |
| $k_{h,z}$        | 1,15  |
| $k_{mod}$        | 0,90  |
| $k_m$            | 0,70  |
| $K_{ls}$         | 1,00  |

$$f_{c,0,d} = \frac{f_{c,k}}{\gamma_m} \times k_{mod} = 17,28 \text{ MPa}$$

$$f_{m,y,d} = \frac{f_{m,0,k}}{\gamma_m} \times k_{mod} \times k_h = 19,87 \text{ MPa} = f_{m,z,d}$$

$$f_{v,d} = \frac{f_{v,k}}{\gamma_m} \times k_{mod} = 1,94 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{m,crit} = \frac{0,78 \times b^2}{h \times l_{ef}} \times E_{0,05} = 1373,89 \text{ MPa}$$

$$\lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{f_{m,k}}{\sigma_{m,crit}}} = 0,13$$

$$k_{crit} = 1,0$$

$$\tau_{z,d} \leq f_{v,d} \Leftrightarrow 0,41 \leq 1,94 \text{ OK}$$

$$\left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}}\right)^2 + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \Leftrightarrow 0,13 \leq 1 \text{ OK}$$

$$\frac{\sigma_{m,y,d}}{k_{crit} \cdot f_{m,y,d}} \leq 1 \Leftrightarrow 0,09 \leq 1 \text{ OK}$$

#### Estado limite de serviço (deformação)

$$u_{fin,z} \leq u_{fin,máx,z} = \left(\frac{l}{200}\right) \Leftrightarrow 0,0 \leq 1,2 \text{ cm OK}$$

- Viga 23 ( $12 \times 15 \text{ cm}^2$  e  $l = 10,90 \text{ m} = 4,86 \text{ m} + 1,67 \text{ m} + 1,39 \text{ m} + 1,8 \text{ m}$ )

### Estado limite último

A solicitação mais condicionante para os elementos deste grupo corresponde à combinação 5 na modelação 2.º segmento de 1,67 m.

Quadro 5.62 – Forças internas mais condicionantes para as vigas  $12 \times 15 \text{ cm}^2$  e  $l = 1,67 \text{ m}$

| Forças internas |                          | Valor | Unidades |
|-----------------|--------------------------|-------|----------|
| $N$             | Força axial              | -6,57 | kN       |
| $M_y$           | Momento em torno de y    | -7,76 | kN.m     |
| $M_z$           | Momento em torno de z    | 0,12  | kN.m     |
| $T_y$           | Força de corte segundo y | -0,02 | kN       |
| $T_z$           | Força de corte segundo z | -8,57 | kN       |

Quadro 5.63 – Tensões criadas pelos esforços para as vigas  $12 \times 15 \text{ cm}^2$  e  $l = 1,67 \text{ m}$

| Tensões introduzido pelos esforços |                                                | Valor  | Unidades |
|------------------------------------|------------------------------------------------|--------|----------|
| $\sigma_{t,0,d}$                   | Tensão Normal de tracção                       | -0.26  | MPa      |
| $\sigma_{m,y,d}$                   | Tensão na borda normal superior devido a $M_y$ | -10.75 | MPa      |
| $\sigma_{m,z,d}$                   | Tensão na borda esquerda devido a $M_z$        | -0.19  | MPa      |
| $\tau_{y,d}$                       | Tensão tangencial segundo y                    | -0,00  | MPa      |
| $\tau_{z,d}$                       | Tensão tangencial segundo z                    | -0.50  | MPa      |

Quadro 5.64 – Factores e parâmetros considerados para as vigas  $12 \times 15 \text{ cm}^2$  e  $l = 1,67 \text{ m}$

| Factor/parâmetro | Valor |
|------------------|-------|
| $k_h$            | 1,15  |
| $k_{h,y}$        | 1,15  |
| $k_{h,z}$        | 1,15  |
| $k_{mod}$        | 0,70  |
| $k_m$            | 0,70  |
| $K_{ls}$         | 1,00  |

$$f_{t,0,d} = \frac{f_{t,k}}{\gamma_m} \times k_{mod} \times k_h = 10,63 \text{ MPa}$$

$$f_{m,y,d} = \frac{f_{m,0,k}}{\gamma_m} \times k_{mod} \times k_h = 15,46 MPa = f_{m,z,d}$$

$$f_{v,d} = \frac{f_{v,k}}{\gamma_m} \times k_{mod} = 1,51 MPa$$

$$\sigma_{m,crit} = \frac{0,78 \times b^2}{h \times l_{ef}} \times E_{0,05} = 827,19 MPa$$

$$\lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{f_{m,k}}{\sigma_{m,crit}}} = 0,17$$

$$k_{crit} = 1,0$$

$$\tau_{z,d} \leq f_{v,d} \Leftrightarrow 0,50 \leq 1,51 \quad OK$$

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \Leftrightarrow 0,73 \leq 1 \quad OK$$

$$\frac{\sigma_{m,y,d}}{k_{crit} \cdot f_{m,y,d}} \leq 1 \Leftrightarrow 0,70 \leq 1 \quad OK$$

#### Estado limite de serviço (deformação)

$$u_{fin,y} \leq u_{fin,máx,y} = \left( \frac{l}{200} \right) \Leftrightarrow 1,0 \leq 3,2 \text{ cm} \quad OK$$

$$u_{fin,z} \leq u_{fin,máx,z} = \left( \frac{l}{200} \right) \Leftrightarrow 1,2 \leq 3,2 \text{ cm} \quad OK$$

### 5.2.2.3. Elementos dos mirantes da cobertura

Na Fig.5.12 é representada uma vista e numeração dos elementos constituintes dos mirantes, tendo em atenção à simetria destes. Definiu-se como limitação de deformação para as vigas  $l/200$ .

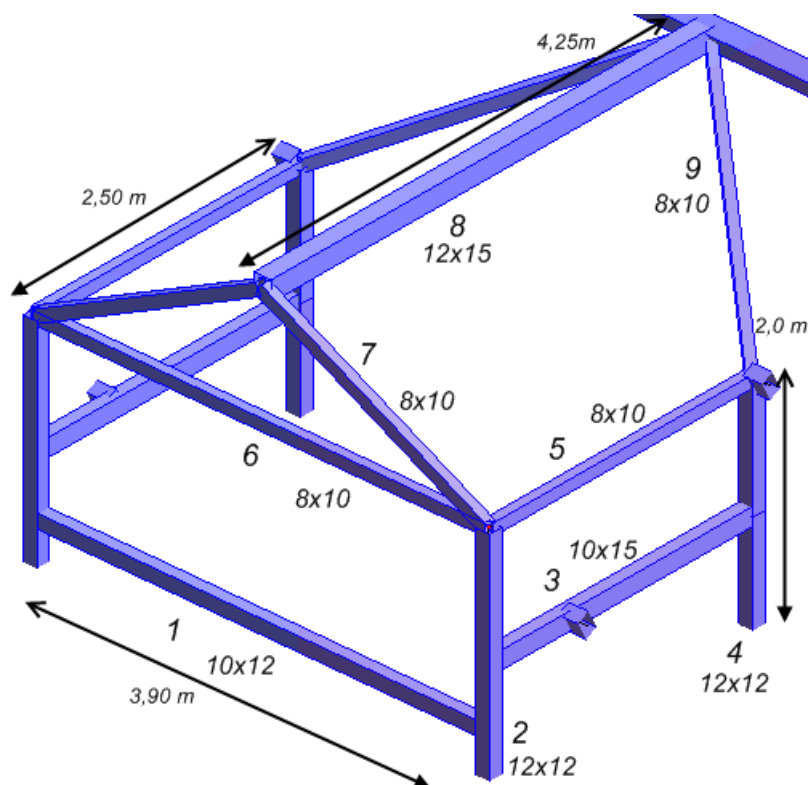


Fig.5.13 – Mirantes da cobertura

- Elemento viga 1 ( $10 \times 12 \text{ cm}^2$  e  $l = 3,90 \text{ m}$ )

#### Estado limite último

A solicitação mais condicionante para os elementos deste grupo corresponde à combinação 8 na modelação 1.

Quadro 5.65 – Forças internas mais condicionantes para as vigas  $10 \times 12 \text{ cm}^2$  e  $l = 3,90 \text{ m}$

| Forças internas |                          | Valor | Unidades |
|-----------------|--------------------------|-------|----------|
| $N$             | Força axial              | 0.81  | kN       |
| $M_y$           | Momento em torno de y    | 1.68  | kN.m     |
| $M_z$           | Momento em torno de z    | 1.51  | kN.m     |
| $T_y$           | Força de corte segundo y | 0,00  | kN       |
| $T_z$           | Força de corte segundo z | 0,00  | kN       |

Quadro 5.66 – Tensões criadas pelos esforços para as vigas 10x12 cm<sup>2</sup> e l=3,90 m

| Tensões introduzido pelos esforços |                                                | Valor | Unidades |
|------------------------------------|------------------------------------------------|-------|----------|
| $\sigma_{c,0,d}$                   | Tensão Normal de compressão                    | 0,07  | MPa      |
| $\sigma_{m,y,d}$                   | Tensão na borda normal inferior devido a $M_y$ | 7,00  | MPa      |
| $\sigma_{m,z,d}$                   | Tensão na borda esquerda devido a $M_z$        | 7,56  | MPa      |
| $\tau_{y,d}$                       | Tensão tangencial segundo y                    | 0,00  | MPa      |
| $\tau_{z,d}$                       | Tensão tangencial segundo z                    | 0,00  | MPa      |

Quadro 5.67 – Factores e parâmetros considerados para as vigas 10x12 cm<sup>2</sup> e l=3,90 m

| Factor/parâmetro | Valor |
|------------------|-------|
| $k_h$            | 1,15  |
| $k_{h,y}$        | 1,15  |
| $k_{h,z}$        | 1,15  |
| $k_{mod}$        | 0,90  |
| $k_m$            | 0,70  |
| $K_{ls}$         | 1,00  |

$$f_{c,0,d} = \frac{f_{c,k}}{\gamma_m} \times k_{mod} = 17,28 \text{ MPa}$$

$$f_{m,y,d} = \frac{f_{m,0,k}}{\gamma_m} \times k_{mod} \times k_h = 19,87 \text{ MPa} = f_{m,z,d}$$

$$f_{v,d} = \frac{f_{v,k}}{\gamma_m} \times k_{mod} = 1,94 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{m,crit} = \frac{0,78 \times b^2}{h \times l_{ef}} \times E_{0,05} = 196,01 \text{ MPa}$$

$$\lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{f_{m,k}}{\sigma_{m,crit}}} = 0,35$$

$$k_{crit} = 1,0$$

$$\left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}}\right)^2 + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \Leftrightarrow 0,63 \leq 1 \quad OK$$

$$\frac{\sigma_{m,y,d}}{k_{crit} \cdot f_{m,y,d}} \leq 1 \Leftrightarrow 0,35 \leq 1 \quad OK$$

### Estado limite de serviço (deformação)

$$u_{fin,y} \leq u_{fin,máx,y} = \left( \frac{l}{200} \right) \Leftrightarrow 0,8 \leq 2,0 \text{ cm} \quad OK$$

$$u_{fin,z} \leq u_{fin,máx,z} = \left( \frac{l}{200} \right) \Leftrightarrow 1,6 \leq 2,0 \text{ cm} \quad OK$$

- Elementos Pilar 2 e 4 (12x12 cm<sup>2</sup>)

### Estado limite último

A solicitação mais condicionante para os elementos deste grupo corresponde à combinação 6 na modelação 1 para o pilar 2.

Quadro 5.68 – Forças internas mais condicionantes para os pilares 12x12 cm<sup>2</sup>

| Forças internas      |                          | Valor | Unidades |
|----------------------|--------------------------|-------|----------|
| <i>N</i>             | Força axial              | 6,85  | kN       |
| <i>M<sub>y</sub></i> | Momento em torno de y    | 1,87  | kN.m     |
| <i>M<sub>z</sub></i> | Momento em torno de z    | -1,36 | kN.m     |
| <i>T<sub>y</sub></i> | Força de corte segundo y | 1,88  | kN       |
| <i>T<sub>z</sub></i> | Força de corte segundo z | 1,29  | kN       |

Quadro 5.69 – Tensões criadas pelos esforços para os pilares 12x12 cm<sup>2</sup>

| Tensões introduzido pelos esforços |                                                               | Valor | Unidades |
|------------------------------------|---------------------------------------------------------------|-------|----------|
| $\sigma_{c,0,d}$                   | Tensão Normal de compressão                                   | 0,48  | MPa      |
| $\sigma_{m,y,d}$                   | Tensão na borda normal superior devido a <i>M<sub>y</sub></i> | 6,50  | MPa      |
| $\sigma_{m,z,d}$                   | Tensão na borda direita devido a <i>M<sub>y</sub></i>         | 4,73  | MPa      |
| $\tau_{y,d}$                       | Tensão tangencial segundo y                                   | 0,20  | MPa      |
| $\tau_{z,d}$                       | Tensão tangencial segundo z                                   | 0,13  | MPa      |

Quadro 5.70 – Factores e parâmetros considerados para os pilares de 24 x26 cm<sup>2</sup>

| Factor/parâmetro | Valor |
|------------------|-------|
| $k_{h,y}$        | 1.15  |
| $k_{h,z}$        | 1.15  |
| $k_{mod}$        | 0.70  |
| $k_m$            | 0.70  |
| $K_{ls}$         | 1.00  |

$$f_{c,0,d} = \frac{f_{c,k}}{\gamma_m} \times k_{mod} = 13,44 \text{ MPa}$$

$$f_{m,y,d} = \frac{f_{m,0,k}}{\gamma_m} \times k_{mod} \times k_h = 15,46 \text{ MPa} = f_{m,z,d}$$

$$f_{v,d} = \frac{f_{v,k}}{\gamma_m} \times k_{mod} = 1,51 \text{ MPa}$$

$$\lambda_y = \frac{l_y}{\sqrt{\frac{b \times h^3}{12}}} = 57,74 = \lambda_z$$

$$\lambda_{rel,y} = \frac{\lambda_y}{\pi} \times \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} = 0,93 = \lambda_{rel,z}$$

$$\sigma_{c,crit,y} = \frac{\pi^2 \times E_{0,05}}{\lambda_y^2} = 58,07 = \sigma_{c,crit,z}$$

$$k_y = 0,5 \times (1 + \beta_c \times (\lambda_{rel,y} - 0,3) + \lambda_{rel,y}^2) = 0,95 = k_z$$

$$k_{c,y} = \frac{1}{k_y + \sqrt{k_y^2 - k_{rel,y}^2}} = 0,86 = k_{c,z}$$

$$\tau_{y,d} \leq f_{v,d} \Leftrightarrow 0,20 \leq 1,94 \text{ OK}$$

$$\tau_{z,d} \leq f_{v,d} \Leftrightarrow 0,23 \leq 1,94 \text{ OK}$$

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y} \cdot f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \Leftrightarrow 0,68 \leq 1 \text{ OK}$$

- Elementos viga 3 (10x15 cm<sup>2</sup> e l = 2,50 m)

### Estado limite último

A solicitação mais condicionante para os elementos deste grupo corresponde à combinação 5 na modelação 2.

Quadro 5.71 – Forças internas mais condicionantes para as vigas 10x15 cm<sup>2</sup> e l =2,50 m

| Forças internas |                          | Valor | Unidades |
|-----------------|--------------------------|-------|----------|
| $N$             | Força axial              | -0,06 | kN       |
| $M_y$           | Momento em torno de y    | 2,82  | kN.m     |
| $M_z$           | Momento em torno de z    | 1,22  | kN.m     |
| $T_y$           | Força de corte segundo y | -0,70 | kN       |
| $T_z$           | Força de corte segundo z | 1,54  | kN       |

Quadro 5.72 – Tensões criadas pelos esforços para as vigas 10x15 cm<sup>2</sup> e l =2,50 m

| Tensões introduzido pelos esforços |                                                | Valor | Unidades |
|------------------------------------|------------------------------------------------|-------|----------|
| $\sigma_{t,0,d}$                   | Tensão Normal de tracção                       | -0,00 | MPa      |
| $\sigma_{m,y,d}$                   | Tensão na borda normal superior devido a $M_y$ | -7,52 | MPa      |
| $\sigma_{m,z,d}$                   | Tensão na borda esquerda devido a $M_z$        | -4,87 | MPa      |
| $\tau_{y,d}$                       | Tensão tangencial segundo y                    | -0,07 | MPa      |
| $\tau_{z,d}$                       | Tensão tangencial segundo z                    | 0,15  | MPa      |

Quadro 5.73 – Factores e parâmetros considerados para as vigas 10x15 cm<sup>2</sup> e l =2,50 m

| Factor/parâmetro | Valor |
|------------------|-------|
| $k_h$            | 1,15  |
| $k_{h,y}$        | 1,15  |
| $k_{h,z}$        | 1,15  |
| $k_{mod}$        | 0,70  |
| $k_m$            | 0,70  |
| $K_{ls}$         | 1,00  |

$$f_{t,0,d} = \frac{f_{t,k}}{\gamma_m} \times k_{mod} \times k_h = 10,63 \text{ MPa}$$

$$f_{m,y,d} = \frac{f_{m,0,k}}{\gamma_m} \times k_{mod} \times k_h = 15,46 \text{ MPa} = f_{m,z,d}$$

$$f_{v,d} = \frac{f_{v,k}}{\gamma_m} \times k_{mod} = 1,51 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{m,crit} = \frac{0,78 \times b^2}{h \times l_{ef}} \times E_{0,05} = 200,46 \text{ MPa}$$

$$\lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{f_{m,k}}{\sigma_{m,crit}}} = 0,35$$

$$k_{crit} = 1,0$$

$$\tau_{z,d} \leq f_{v,d} \Leftrightarrow 0,15 \leq 1,51 \text{ OK}$$

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \Leftrightarrow 0,71 \leq 1 \text{ OK}$$

$$\frac{\sigma_{m,y,d}}{k_{crit} \cdot f_{m,y,d}} \leq 1 \Leftrightarrow 0,49 \leq 1 \text{ OK}$$

#### Estado limite de serviço (deformação)

$$u_{fin,y} \leq u_{fin,máx,y} = \left( \frac{l}{200} \right) \Leftrightarrow 0,3 \leq 1,3 \text{ cm OK}$$

$$u_{fin,z} \leq u_{fin,máx,z} = \left( \frac{l}{200} \right) \Leftrightarrow 0,4 \leq 1,3 \text{ cm OK}$$

- Elementos viga 5, 6, 7 e 9 (8x10 cm<sup>2</sup>)

#### Estado limite último

A solicitação mais condicionante para os elementos deste grupo corresponde à combinação 5 na modelação 2 para os elementos 5 (l = 2,50 m).

Quadro 5.74 – Forças internas mais condicionantes para as vigas 8x10 cm<sup>2</sup> e l =2,50 m

| Forças internas |                          | Valor | Unidades |
|-----------------|--------------------------|-------|----------|
| N               | Força axial              | 1,50  | kN       |
| M <sub>y</sub>  | Momento em torno de y    | -1,81 | kN.m     |
| M <sub>z</sub>  | Momento em torno de z    | 0,20  | kN.m     |
| T <sub>y</sub>  | Força de corte segundo y | -0,17 | kN       |
| T <sub>z</sub>  | Força de corte segundo z | -3,09 | kN       |

Quadro 5.75 – Tensões criadas pelos esforços para as vigas 8x10 cm<sup>2</sup> e l =2,50 m

| Tensões introduzido pelos esforços |                                                         | Valor | Unidades |
|------------------------------------|---------------------------------------------------------|-------|----------|
| σ <sub>c,0,d</sub>                 | Tensão Normal de compressão                             | 0,19  | MPa      |
| σ <sub>m,y,d</sub>                 | Tensão na borda normal inferior devido a M <sub>y</sub> | 13,54 | MPa      |
| σ <sub>m,z,d</sub>                 | Tensão na borda esquerda devido a M <sub>z</sub>        | 1,86  | MPa      |
| τ <sub>y,d</sub>                   | Tensão tangencial segundo y                             | -0,03 | MPa      |
| τ <sub>z,d</sub>                   | Tensão tangencial segundo z                             | -0,58 | MPa      |

Quadro 5.76 – Factores e parâmetros considerados para as vigas 8x10 cm<sup>2</sup> e l =2,50 m

| Factor/parâmetro | Valor |
|------------------|-------|
| k <sub>h</sub>   | 1,15  |
| k <sub>h,y</sub> | 1,15  |
| k <sub>h,z</sub> | 1,15  |
| k <sub>mod</sub> | 0,70  |
| k <sub>m</sub>   | 0,70  |
| K <sub>Is</sub>  | 1,00  |

$$f_{c,0,d} = \frac{f_{c,k}}{\gamma_m} \times k_{mod} = 13,4 \text{ MPa}$$

$$f_{m,y,d} = \frac{f_{m,0,k}}{\gamma_m} \times k_{mod} \times k_h = 15,46 \text{ MPa} = f_{m,z,d}$$

$$f_{v,d} = \frac{f_{v,k}}{\gamma_m} \times k_{mod} = 1,51 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{m,crit} = \frac{0,78 \times b^2}{h \times l_{ef}} \times E_{0,05} = 201,08 \text{ MPa}$$

$$\lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{f_{m,k}}{\sigma_{m,crit}}} = 0,33$$

$$k_{crit} = 1,0$$

$$\tau_{z,d} \leq f_{v,d} \Leftrightarrow 0,50 \leq 1,51 \text{ OK}$$

$$\left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}}\right)^2 + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \Leftrightarrow 0,98 \leq 1 \text{ OK}$$

$$\frac{\sigma_{m,y,d}}{k_{crit} \cdot f_{m,y,d}} \leq 1 \Leftrightarrow 0,88 \leq 1 \text{ OK}$$

#### Estado limite de serviço (deformação)

$$u_{fin,y} \leq u_{fin,m\acute{a}x,y} = \left(\frac{l}{200}\right) \Leftrightarrow 0,6 \leq 1,2 \text{ cm OK}$$

$$u_{fin,z} \leq u_{fin,m\acute{a}x,z} = \left(\frac{l}{200}\right) \Leftrightarrow 0,3 \leq 1,2 \text{ cm OK}$$

- Elemento viga / cumeeira (12x15 cm<sup>2</sup> e l = 4,25m)

#### Estado limite último

A solicitação mais condicionante para os elementos deste grupo corresponde à combinação 5 na modelação 2.

Quadro 5.77 – Forças internas mais condicionantes para as vigas 12x15 cm<sup>2</sup> e l = 4,25 m

|       | Forças internas          | Valor | Unidades |
|-------|--------------------------|-------|----------|
| $N$   | Força axial              | -0,00 | kN       |
| $M_y$ | Momento em torno de y    | 8,63  | kN.m     |
| $M_z$ | Momento em torno de z    | 0,00  | kN.m     |
| $T_y$ | Força de corte segundo y | 0,00  | kN       |
| $T_z$ | Força de corte segundo z | -0,14 | kN       |

Quadro 5.78 – Tensões criadas pelos esforços para as vigas 12x15 cm<sup>2</sup> e l =4,25 m

| Tensões introduzido pelos esforços |                                                | Valor  | Unidades |
|------------------------------------|------------------------------------------------|--------|----------|
| $\sigma_{t,0,d}$                   | Tensão Normal de tracção                       | -0,00  | MPa      |
| $\sigma_{m,y,d}$                   | Tensão na borda normal superior devido a $M_y$ | -11,95 | MPa      |
| $\sigma_{m,z,d}$                   | Tensão na borda esquerda devido a $M_z$        | -0,00  | MPa      |
| $\tau_{y,d}$                       | Tensão tangencial segundo y                    | 0,00   | MPa      |
| $\tau_{z,d}$                       | Tensão tangencial segundo z                    | -0,01  | MPa      |

Quadro 5.79 – Factores e parâmetros considerados para as vigas 12x15 cm<sup>2</sup> e l =4,25 m

| Factor/parâmetro | Valor |
|------------------|-------|
| $k_h$            | 1,15  |
| $k_{h,y}$        | 1,15  |
| $k_{h,z}$        | 1,15  |
| $k_{mod}$        | 0,70  |
| $k_m$            | 0,70  |
| $K_{ls}$         | 1,00  |

$$f_{t,0,d} = \frac{f_{t,k}}{\gamma_m} \times k_{mod} \times k_h = 10,63 \text{ MPa}$$

$$f_{m,y,d} = \frac{f_{m,0,k}}{\gamma_m} \times k_{mod} \times k_h = 15,46 \text{ MPa} = f_{m,z,d}$$

$$f_{v,d} = \frac{f_{v,k}}{\gamma_m} \times k_{mod} = 1,51 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{m,crit} = \frac{0,78 \times b^2}{h \times l_{ef}} \times E_{0,05} = 324,46 \text{ MPa}$$

$$\lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{f_{m,k}}{\sigma_{m,crit}}} = 0,27$$

$$k_{crit} = 1,0$$

$$\tau_{z,d} \leq f_{v,d} \Leftrightarrow 0,01 \leq 1,51 \text{ OK}$$

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \Leftrightarrow 0,77 \leq 1 \quad OK$$

$$\frac{\sigma_{m,y,d}}{k_{crit} \cdot f_{m,y,d}} \leq 1 \Leftrightarrow 0,77 \leq 1 \quad OK$$

#### Estado limite de serviço (deformação)

$$u_{fin,y} \leq u_{fin,máx,y} = \left( \frac{l}{200} \right) \Leftrightarrow 0,2 \leq 2,1 \text{ cm} \quad OK$$

$$u_{fin,z} \leq u_{fin,máx,z} = \left( \frac{l}{200} \right) \Leftrightarrow 2,1 \leq 2,1 \text{ cm} \quad OK$$

#### 5.2.2.4. Madres e pernas da cobertura

Na Fig.5.14 é representada uma planta de todas as madres, tal como das pernas das asnas da cobertura tendo em atenção aos eixos de simetria. Definiu-se como limitação de deformação para as vigas  $l/200$ .

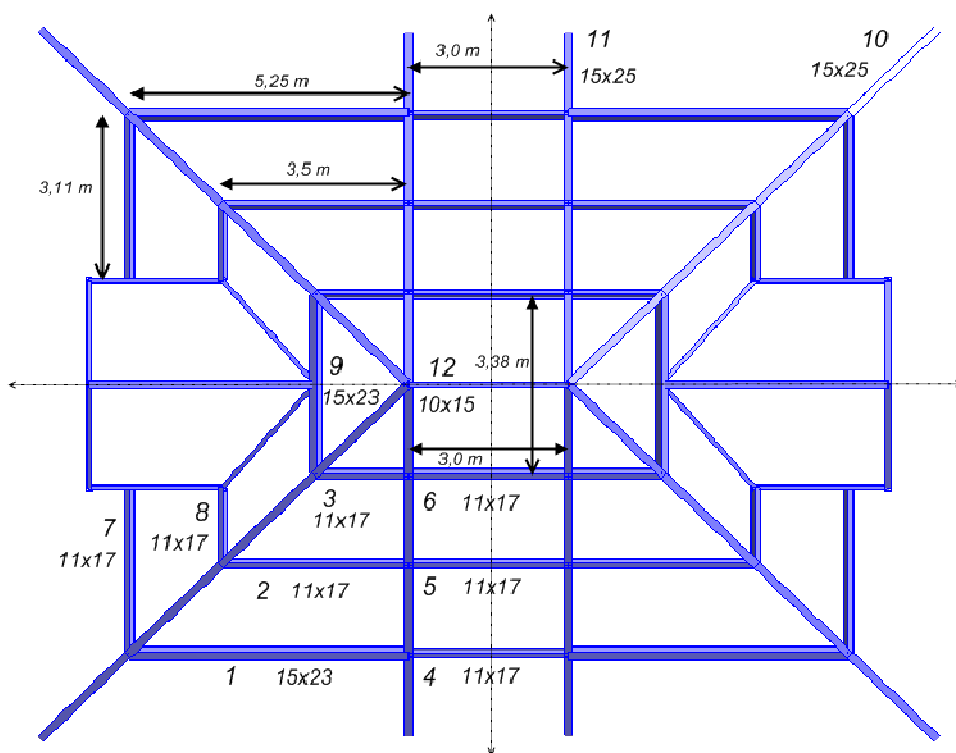


Fig.5.14 – Planta das madres e pernas da cobertura

- Madres 1 (15x23 cm<sup>2</sup> e l = 5,25 m)

### Estado limite último

A solicitação mais condicionante para os elementos deste grupo corresponde à combinação 5 de igual modo na modelação 1 e 2.

Quadro 5.80 – Forças internas mais condicionantes para as madres 15x23 cm<sup>2</sup> e l=5,25 m

| Forças internas |                          | Valor | Unidades |
|-----------------|--------------------------|-------|----------|
| $N$             | Força axial              | 1,21  | kN       |
| $M_y$           | Momento em torno de y    | 10,65 | kN.m     |
| $M_z$           | Momento em torno de z    | -5,43 | kN.m     |
| $T_y$           | Força de corte segundo y | -0,00 | kN       |
| $T_z$           | Força de corte segundo z | -0,00 | kN       |

Quadro 5.81 – Tensões criadas pelos esforços para as madres 15x23 cm<sup>2</sup> e l=5,25 m

| Tensões introduzido pelos esforços |                                                | Valor | Unidades |
|------------------------------------|------------------------------------------------|-------|----------|
| $\sigma_{c,0,d}$                   | Tensão Normal de compressão                    | 0,03  | MPa      |
| $\sigma_{m,y,d}$                   | Tensão na borda normal inferior devido a $M_y$ | 8,05  | MPa      |
| $\sigma_{m,z,d}$                   | Tensão na borda esquerda devido a $M_z$        | 6,29  | MPa      |
| $\tau_{y,d}$                       | Tensão tangencial segundo y                    | -0,00 | MPa      |
| $\tau_{z,d}$                       | Tensão tangencial segundo z                    | -0,00 | MPa      |

Quadro 5.82 – Factores e parâmetros considerados para as madres 15x23 cm<sup>2</sup> e l=5,25 m

| Factor/parâmetro | Valor |
|------------------|-------|
| $k_h$            | 1,15  |
| $k_{h,y}$        | 1,15  |
| $k_{h,z}$        | 1,15  |
| $k_{mod}$        | 0,70  |
| $k_m$            | 0,70  |
| $K_{ls}$         | 1,00  |

$$f_{c,0,d} = \frac{f_{c,k}}{\gamma_m} \times k_{mod} = 13,44 \text{ MPa}$$

$$f_{m,y,d} = \frac{f_{m,0,k}}{\gamma_m} \times k_{mod} \times k_h = 15,46 \text{ MPa} = f_{m,z,d}$$

$$f_{v,d} = \frac{f_{v,k}}{\gamma_m} \times k_{mod} = 1,51 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{m,crit} = \frac{0,78 \times b^2}{h \times l_{ef}} \times E_{0,05} = 138,81 \text{ MPa}$$

$$\lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{f_{m,k}}{\sigma_{m,crit}}} = 0,42$$

$$k_{crit} = 1,0$$

$$\tau_{z,d} \leq f_{v,d} \Leftrightarrow 0,00 \leq 1,51 \text{ OK}$$

$$\left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}}\right)^2 + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \Leftrightarrow 0,81 \leq 1 \text{ OK}$$

$$\frac{\sigma_{m,y,d}}{k_{crit} \cdot f_{m,y,d}} \leq 1 \Leftrightarrow 0,52 \leq 1 \text{ OK}$$

#### Estado limite de serviço (deformação)

$$u_{fin,y} \leq u_{fin,máx,y} = \left(\frac{l}{200}\right) \Leftrightarrow 2,3 \leq 2,6 \text{ cm OK}$$

$$u_{fin,z} \leq u_{fin,máx,z} = \left(\frac{l}{200}\right) \Leftrightarrow 1,4 \leq 2,6 \text{ cm OK}$$

- Madres 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 (11x17 cm<sup>2</sup>)

#### Estado limite último

A solicitação mais condicionante para os elementos deste grupo corresponde à combinação 5 de igual modo na modelação 1 e 2 nas madres 2 com l = 3,50 m.

Quadro 5.83 – Forças internas mais condicionantes para as madres 11x17 cm<sup>2</sup> e l=3,50 m

|                | Forças internas          | Valor | Unidades |
|----------------|--------------------------|-------|----------|
| N              | Força axial              | 4,13  | kN       |
| M <sub>y</sub> | Momento em torno de y    | 4,62  | kN.m     |
| M <sub>z</sub> | Momento em torno de z    | 2,36  | kN.m     |
| T <sub>y</sub> | Força de corte segundo y | -0,00 | kN       |
| T <sub>z</sub> | Força de corte segundo z | -0,00 | kN       |

Quadro 5.84 – Tensões criadas pelos esforços para as madres 11x17 cm<sup>2</sup> e l=3,50 m

| Tensões introduzido pelos esforços |                                                | Valor | Unidades |
|------------------------------------|------------------------------------------------|-------|----------|
| $\sigma_{c,0,d}$                   | Tensão Normal de compressão                    | 0,22  | MPa      |
| $\sigma_{m,y,d}$                   | Tensão na borda normal inferior devido a $M_y$ | 8,73  | MPa      |
| $\sigma_{m,z,d}$                   | Tensão na borda esquerda devido a $M_z$        | 6,87  | MPa      |
| $\tau_{y,d}$                       | Tensão tangencial segundo y                    | -0,00 | MPa      |
| $\tau_{z,d}$                       | Tensão tangencial segundo z                    | -0,00 | MPa      |

Quadro 5.85 – Factores e parâmetros considerados para as madres 11x17 cm<sup>2</sup> e l=3,50 m

| Factor/parâmetro | Valor |
|------------------|-------|
| $k_h$            | 1,15  |
| $k_{h,y}$        | 1,15  |
| $k_{h,z}$        | 1,15  |
| $k_{mod}$        | 0,70  |
| $k_m$            | 0,70  |
| $K_{ls}$         | 1,00  |

$$f_{c,0,d} = \frac{f_{c,k}}{\gamma_m} \times k_{mod} = 13,4 \text{ MPa}$$

$$f_{m,y,d} = \frac{f_{m,0,k}}{\gamma_m} \times k_{mod} \times k_h = 15,46 \text{ MPa} = f_{m,z,d}$$

$$f_{v,d} = \frac{f_{v,k}}{\gamma_m} \times k_{mod} = 1,51 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{m,crit} = \frac{0,78 \times b^2}{h \times l_{ef}} \times E_{0,05} = 151,03 \text{ MPa}$$

$$\lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{f_{m,k}}{\sigma_{m,crit}}} = 0,40$$

$$k_{crit} = 1,0$$

$$\tau_{z,d} \leq f_{v,d} \Leftrightarrow 0,00 \leq 1,51 \text{ OK}$$

$$\left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}}\right)^2 + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \Leftrightarrow 0,88 \leq 1 \quad OK$$

$$\frac{\sigma_{m,y,d}}{k_{crit} \cdot f_{m,y,d}} \leq 1 \Leftrightarrow 0,56 \leq 1 \quad OK$$

#### Estado limite de serviço (deformação)

$$u_{fin,y} \leq u_{fin,máx,y} = \left(\frac{l}{200}\right) \Leftrightarrow 1,5 \leq 1,8 \text{ cm} \quad OK$$

$$u_{fin,z} \leq u_{fin,máx,z} = \left(\frac{l}{200}\right) \Leftrightarrow 1,0 \leq 1,8 \text{ cm} \quad OK$$

- Madre 9 (15x23 cm<sup>2</sup> e l=3,38 m)

#### Estado limite último

A solicitação mais condicionante para os elementos deste grupo corresponde à combinação 5 para a modelação 2.

Quadro 5.86 – Forças internas mais condicionantes para as madres 15x23 cm<sup>2</sup> e l=3,38 m

| Forças internas |                          | Valor | Unidades |
|-----------------|--------------------------|-------|----------|
| N               | Força axial              | 43,19 | kN       |
| M <sub>y</sub>  | Momento em torno de y    | 10,62 | kN.m     |
| M <sub>z</sub>  | Momento em torno de z    | -5,88 | kN.m     |
| T <sub>y</sub>  | Força de corte segundo y | -2,16 | kN       |
| T <sub>z</sub>  | Força de corte segundo z | -3,68 | kN       |

Quadro 5.87 – Tensões criadas pelos esforços para as madres 15x23 cm<sup>2</sup> e l=3,38 m

| Tensões introduzido pelos esforços |                                                         | Valor | Unidades |
|------------------------------------|---------------------------------------------------------|-------|----------|
| σ <sub>c,0,d</sub>                 | Tensão Normal de compressão                             | 1,25  | MPa      |
| σ <sub>m,y,d</sub>                 | Tensão na borda normal inferior devido a M <sub>y</sub> | 8,03  | MPa      |
| σ <sub>m,z,d</sub>                 | Tensão na borda esquerda devido a M <sub>z</sub>        | 6,82  | MPa      |
| τ <sub>y,d</sub>                   | Tensão tangencial segundo y                             | -0,09 | MPa      |
| τ <sub>z,d</sub>                   | Tensão tangencial segundo z                             | -0,16 | MPa      |

Quadro 5.88 – Factores e parâmetros considerados para as madres 15x23 cm<sup>2</sup> e l=3,38 m

| Factor/parâmetro | Valor |
|------------------|-------|
| $k_h$            | 1,15  |
| $k_{h,y}$        | 1,15  |
| $k_{h,z}$        | 1,15  |
| $k_{mod}$        | 0,70  |
| $k_m$            | 0,70  |
| $K_{ls}$         | 1,00  |

$$f_{c,0,d} = \frac{f_{c,k}}{\gamma_m} \times k_{mod} = 13,44 \text{ MPa}$$

$$f_{m,y,d} = \frac{f_{m,0,k}}{\gamma_m} \times k_{mod} \times k_h = 15,46 \text{ MPa} = f_{m,z,d}$$

$$f_{v,d} = \frac{f_{v,k}}{\gamma_m} \times k_{mod} = 1,51 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{m,crit} = \frac{0,78 \times b^2}{h \times l_{ef}} \times E_{0,05} = 215,92 \text{ MPa}$$

$$\lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{f_{m,k}}{\sigma_{m,crit}}} = 0,33$$

$$k_{crit} = 1,0$$

$$\tau_{z,d} \leq f_{v,d} \Leftrightarrow 0,16 \leq 1,51 \text{ OK}$$

$$\left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}}\right)^2 + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \Leftrightarrow 0,84 \leq 1 \text{ OK}$$

$$\frac{\sigma_{m,y,d}}{k_{crit} \cdot f_{m,y,d}} \leq 1 \Leftrightarrow 0,52 \leq 1 \text{ OK}$$

#### Estado limite de serviço (deformação)

$$u_{fin,y} \leq u_{fin,máx,y} = \left(\frac{l}{200}\right) \Leftrightarrow 0,9 \leq 1,7 \text{ cm OK}$$

$$u_{fin,z} \leq u_{fin,m\acute{a}x,z} = \left( \frac{l}{200} \right) \Leftrightarrow 0,6 \leq 1,7 \text{ cm OK}$$

- Perna da semi-asna (15x25 cm<sup>2</sup> e l=10,52 m = 5,26 m + 2x2,63 m)

### Estado limite último

A solicitação mais condicionante para os elementos deste grupo corresponde à combinação 5 para a modelação 2 no elemento com 5,26 m.

Quadro 5.89 – Forças internas mais condicionantes para as pernas 15x25 cm<sup>2</sup> e l=5,26 m

| Forças internas |                          | Valor | Unidades |
|-----------------|--------------------------|-------|----------|
| N               | Força axial              | 37,81 | kN       |
| M <sub>y</sub>  | Momento em torno de y    | 11,62 | kN.m     |
| M <sub>z</sub>  | Momento em torno de z    | 2,03  | kN.m     |
| T <sub>y</sub>  | Força de corte segundo y | 1,41  | kN       |
| T <sub>z</sub>  | Força de corte segundo z | -7,53 | kN       |

Quadro 5.90 – Tensões criadas pelos esforços para as pernas 15x25 cm<sup>2</sup> e l=5,26 m

| Tensões introduzido pelos esforços |                                                         | Valor | Unidades |
|------------------------------------|---------------------------------------------------------|-------|----------|
| σ <sub>c,0,d</sub>                 | Tensão Normal de compressão                             | 1,01  | MPa      |
| σ <sub>m,y,d</sub>                 | Tensão na borda normal inferior devido a M <sub>y</sub> | 7,44  | MPa      |
| σ <sub>m,z,d</sub>                 | Tensão na borda esquerda devido a M <sub>z</sub>        | 2,17  | MPa      |
| τ <sub>y,d</sub>                   | Tensão tangencial segundo y                             | 0,06  | MPa      |
| τ <sub>z,d</sub>                   | Tensão tangencial segundo z                             | -0,30 | MPa      |

Quadro 5.91 – Factores e parâmetros considerados para as pernas 15x25 cm<sup>2</sup> e l=5,26 m

| Factor/parâmetro | Valor |
|------------------|-------|
| k <sub>h</sub>   | 1,15  |
| k <sub>h,y</sub> | 1,15  |
| k <sub>h,z</sub> | 1,15  |
| k <sub>mod</sub> | 0,70  |
| k <sub>m</sub>   | 0,70  |
| K <sub>ls</sub>  | 1,00  |

$$f_{c,0,d} = \frac{f_{c,k}}{\gamma_m} \times k_{mod} = 13,44 \text{ MPa}$$

$$f_{m,y,d} = \frac{f_{m,0,k}}{\gamma_m} \times k_{mod} \times k_h = 15,46 \text{ MPa} = f_{m,z,d}$$

$$f_{v,d} = \frac{f_{v,k}}{\gamma_m} \times k_{mod} = 1,51 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{m,crit} = \frac{0,78 \times b^2}{h \times l_{ef}} \times E_{0,05} = 124,16 \text{ MPa}$$

$$\lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{f_{m,k}}{\sigma_{m,crit}}} = 0,44$$

$$k_{crit} = 1,0$$

$$\tau_{z,d} \leq f_{v,d} \Leftrightarrow 0,30 \leq 1,51 \text{ OK}$$

$$\left( \frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \Leftrightarrow 0,58 \leq 1 \text{ OK}$$

$$\frac{\sigma_{m,y,d}}{k_{crit} \cdot f_{m,y,d}} \leq 1 \Leftrightarrow 0,48 \leq 1 \text{ OK}$$

### Estado limite de serviço (deformação)

$$u_{fin,y} \leq u_{fin,máx,y} = \left( \frac{l}{200} \right) \Leftrightarrow 0,3 \leq 2,6 \text{ cm OK}$$

$$u_{fin,z} \leq u_{fin,máx,z} = \left( \frac{l}{200} \right) \Leftrightarrow 0,6 \leq 2,6 \text{ cm OK}$$

- Perna das asnas (12x15 cm<sup>2</sup> e l=7,84 m = 4x1,96 m)

### Estado limite último

A solicitação mais condicionante para os elementos deste grupo corresponde à combinação 5 para a modelação 2.

Quadro 5.92 – Forças internas mais condicionantes para as madres 12x15 cm<sup>2</sup> e l=1,96 m

| Forças internas |                          | Valor | Unidades |
|-----------------|--------------------------|-------|----------|
| $N$             | Força axial              | 41,19 | kN       |
| $M_y$           | Momento em torno de y    | 6,40  | kN.m     |
| $M_z$           | Momento em torno de z    | 0,16  | kN.m     |
| $T_y$           | Força de corte segundo y | 0,17  | kN       |
| $T_z$           | Força de corte segundo z | -5,63 | kN       |

Quadro 5.93 – Tensões criadas pelos esforços para as madres 12x15 cm<sup>2</sup> e l=1,96 m

| Tensões introduzido pelos esforços |                                                | Valor | Unidades |
|------------------------------------|------------------------------------------------|-------|----------|
| $\sigma_{c,0,d}$                   | Tensão Normal de compressão                    | 1,62  | MPa      |
| $\sigma_{m,y,d}$                   | Tensão na borda normal inferior devido a $M_y$ | 8,86  | MPa      |
| $\sigma_{m,z,d}$                   | Tensão na borda esquerda devido a $M_z$        | 0,25  | MPa      |
| $\tau_{y,d}$                       | Tensão tangencial segundo y                    | 0,01  | MPa      |
| $\tau_{z,d}$                       | Tensão tangencial segundo z                    | -0,33 | MPa      |

Quadro 5.94 – Factores e parâmetros considerados para as madres 12x15 cm<sup>2</sup> e l=1,96 m

| Factor/parâmetro | Valor |
|------------------|-------|
| $k_h$            | 1,15  |
| $k_{h,y}$        | 1,15  |
| $k_{h,z}$        | 1,15  |
| $k_{mod}$        | 0,70  |
| $k_m$            | 0,70  |
| $K_{ls}$         | 1,00  |

$$f_{c,0,d} = \frac{f_{c,k}}{\gamma_m} \times k_{mod} = 13,44 \text{ MPa}$$

$$f_{m,y,d} = \frac{f_{m,0,k}}{\gamma_m} \times k_{mod} \times k_h = 15,46 \text{ MPa} = f_{m,z,d}$$

$$f_{v,d} = \frac{f_{v,k}}{\gamma_m} \times k_{mod} = 1,51 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{m,crit} = \frac{0,78 \times b^2}{h \times l_{ef}} \times E_{0,05} = 703,0 \text{ MPa}$$

$$\lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{f_{m,k}}{\sigma_{m,crit}}} = 0,18$$

$$k_{crit} = 1,0$$

$$\tau_{z,d} \leq f_{v,d} \Leftrightarrow 0,33 \leq 1,51 \quad OK$$

$$\left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}}\right)^2 + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \Leftrightarrow 0,60 \leq 1 \quad OK$$

$$\frac{\sigma_{m,y,d}}{k_{crit} \cdot f_{m,y,d}} \leq 1 \Leftrightarrow 0,57 \leq 1 \quad OK$$

#### Estado limite de serviço (deformação)

$$u_{fin,y} \leq u_{fin,máx,y} = \left(\frac{l}{200}\right) \Leftrightarrow 0,0 \leq 1,0 \text{ cm} \quad OK$$

$$u_{fin,z} \leq u_{fin,máx,z} = \left(\frac{l}{200}\right) \Leftrightarrow 0,1 \leq 1,0 \text{ cm} \quad OK$$

- Cumeeira (10x15 cm<sup>2</sup> e l=3,0 m)

#### Estado limite último

A solicitação mais condicionante para a cumeeira corresponde à combinação 5 para a modelação 2.

Quadro 5.95 – Forças internas mais condicionantes para a cumeeira 10x15 cm<sup>2</sup> e l=3,0 m

|                | Forças internas          | Valor  | Unidades |
|----------------|--------------------------|--------|----------|
| N              | Força axial              | -30,36 | kN       |
| M <sub>y</sub> | Momento em torno de y    | 3,78   | kN.m     |
| M <sub>z</sub> | Momento em torno de z    | -0,24  | kN.m     |
| T <sub>y</sub> | Força de corte segundo y | 0,00   | kN       |
| T <sub>z</sub> | Força de corte segundo z | -0,00  | kN       |

Quadro 5.96 – Tensões criadas pelos esforços para a cumeeira 10x15 cm<sup>2</sup> e l=3,0 m

| Tensões introduzido pelos esforços |                                                | Valor  | Unidades |
|------------------------------------|------------------------------------------------|--------|----------|
| $\sigma_{t,0,d}$                   | Tensão Normal de tracção                       | -2,02  | MPa      |
| $\sigma_{m,y,d}$                   | Tensão na borda normal superior devido a $M_y$ | -10,08 | MPa      |
| $\sigma_{m,z,d}$                   | Tensão na borda esquerda devido a $M_z$        | -0,02  | MPa      |
| $\tau_{y,d}$                       | Tensão tangencial segundo y                    | 0,00   | MPa      |
| $\tau_{z,d}$                       | Tensão tangencial segundo z                    | -0,00  | MPa      |

Quadro 5.97 – Factores e parâmetros considerados para a cumeeira 10x15 cm<sup>2</sup> e l=3,0 m

| Factor/parâmetro | Valor |
|------------------|-------|
| $k_h$            | 1,15  |
| $k_{h,y}$        | 1,15  |
| $k_{h,z}$        | 1,15  |
| $k_{mod}$        | 0,70  |
| $k_m$            | 0,70  |
| $K_{ls}$         | 1,00  |

$$f_{t,0,d} = \frac{f_{t,k}}{\gamma_m} \times k_{mod} \times k_h = 10,63 MPa$$

$$f_{m,y,d} = \frac{f_{m,0,k}}{\gamma_m} \times k_{mod} \times k_h = 15,46 MPa = f_{m,z,d}$$

$$f_{v,d} = \frac{f_{v,k}}{\gamma_m} \times k_{mod} = 1,51 MPa$$

$$\sigma_{m,crit} = \frac{0,78 \times b^2}{h \times l_{ef}} \times E_{0,05} = 167,05 MPa$$

$$\lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{f_{m,k}}{\sigma_{m,crit}}} = 0,38$$

$$k_{crit} = 1,0$$

$$\tau_{z,d} \leq f_{v,d} \Leftrightarrow 0,00 \leq 1,51 \quad OK$$

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \Leftrightarrow 0,84 \leq 1 \quad OK$$

$$\frac{\sigma_{m,y,d}}{k_{crit} \cdot f_{m,y,d}} \leq 1 \Leftrightarrow 0,65 \leq 1 \quad OK$$

### Estado limite de serviço (deformação)

$$u_{fin,y} \leq u_{fin,máx,y} = \left( \frac{l}{200} \right) \Leftrightarrow 0,1 \leq 1,5 \text{ cm} \quad OK$$

$$u_{fin,z} \leq u_{fin,máx,z} = \left( \frac{l}{200} \right) \Leftrightarrow 1,0 \leq 1,5 \text{ cm} \quad OK$$

#### 5.2.2.5. Elementos secundários das asnas

Nas Fig.5.15 e Fig.5.16 estão representadas vistas das asnas e semi-asnas com enfoque para os elementos secundários destas.

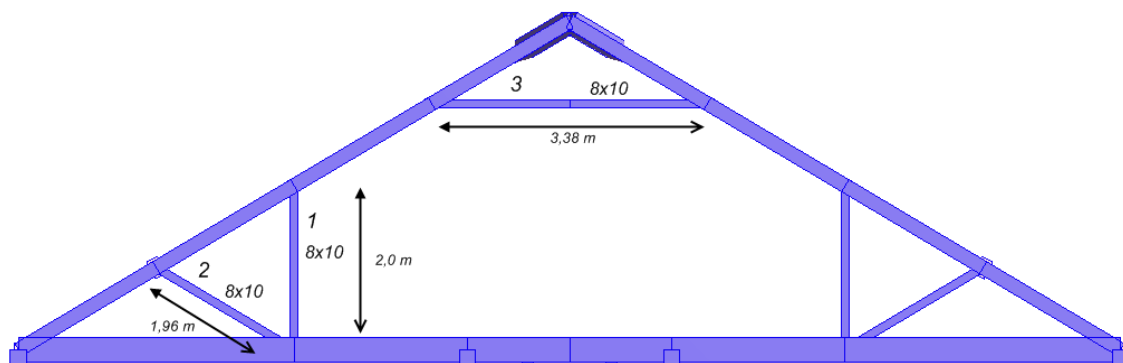


Fig.5.15 – Vista das asnas principais

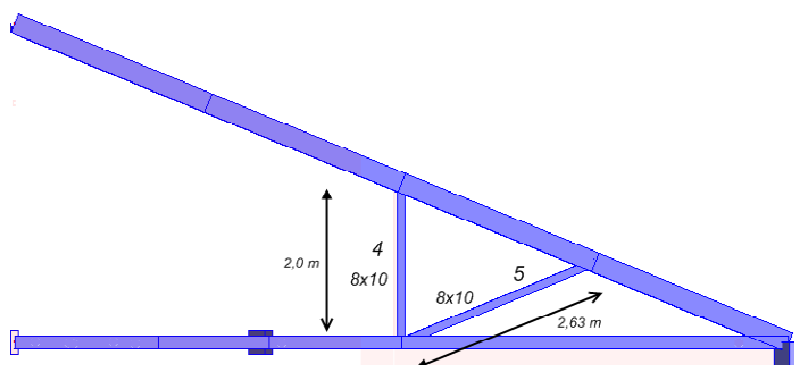


Fig.5.16 – Vista das semi-asnas

- Elementos verticais 1 e 4 (8x10 cm<sup>2</sup> e l=2,0 m)

#### Estado limite último

A solicitação mais condicionante para os elementos secundários verticais corresponde à combinação 8 para a modelação 1. nos elementos 1.

Quadro 5.98 – Forças internas mais condicionantes para os elementos verticais 8x10 cm<sup>2</sup>

| Forças internas |             | Valor | Unidades |
|-----------------|-------------|-------|----------|
| N               | Força axial | 6,39  | kN       |

Quadro 5.99 – Tensões criadas pelos esforços para os elementos verticais das 8x10 cm<sup>2</sup>

| Tensões introduzido pelos esforços |                             | Valor | Unidades |
|------------------------------------|-----------------------------|-------|----------|
| $\sigma_{c,0,d}$                   | Tensão Normal de compressão | 0,80  | MPa      |

Quadro 5.100 – Factores e parâmetros considerados para os elementos verticais das 8x10 cm<sup>2</sup>

| Factor/parâmetro | Valor |
|------------------|-------|
| $k_h$            | 1,15  |
| $k_{h,y}$        | 1,15  |
| $k_{h,z}$        | 1,15  |
| $k_{mod}$        | 0,90  |
| $k_m$            | 0,70  |
| $K_{ls}$         | 1,00  |

$$f_{c,0,d} = \frac{f_{c,k}}{\gamma_m} \times k_{mod} = 17,27 \text{ MPa}$$

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} \leq 1 \Leftrightarrow 0,05 \leq 17,27 \quad OK$$

- Elementos diagonais 2 e 5 (8x10 cm<sup>2</sup>)

#### Estado limite último

A solicitação mais condicionante para os elementos secundários diagonais corresponde à combinação 5 para a modelação 2 nos elementos 2.

Quadro 5.101 – Forças internas mais condicionantes para os elementos diagonais 8x10 cm<sup>2</sup>

|   | Forças internas | Valor | Unidades |
|---|-----------------|-------|----------|
| N | Força axial     | 19,09 | kN       |

Quadro 5.102 – Tensões criadas pelos esforços para os elementos diagonais 8x10 cm<sup>2</sup>

|                  | Tensões introduzido pelos esforços | Valor | Unidades |
|------------------|------------------------------------|-------|----------|
| $\sigma_{c,0,d}$ | Tensão Normal de compressão        | 2,39  | MPa      |

Quadro 5.103 – Factores e parâmetros considerados para os elementos diagonais 8x10 cm<sup>2</sup>

| Factor/parâmetro | Valor |
|------------------|-------|
| $k_h$            | 1,15  |
| $k_{h,y}$        | 1,15  |
| $k_{h,z}$        | 1,15  |
| $k_{mod}$        | 0,70  |
| $k_m$            | 0,70  |
| $K_{ls}$         | 1,00  |

$$f_{c,0,d} = \frac{f_{c,k}}{\gamma_m} \times k_{mod} = 13,44 \text{ MPa}$$

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} \leq 1 \Leftrightarrow 0,18 \leq 13,44 \quad OK$$

- Elementos horizontais 3 (8x10 cm<sup>2</sup> e l = 3,38 m = 2 x 1,96 m)

### Estado limite último

A solicitação mais condicionante para os elementos secundários diagonais corresponde à combinação 5 para a modelação 2.

Quadro 5.104 – Forças internas mais condicionantes para os elementos horizontais 8x10 cm<sup>2</sup>

|   | Forças internas | Valor | Unidades |
|---|-----------------|-------|----------|
| N | Força axial     | 28,60 | kN       |

Quadro 5.105 – Tensões criadas pelos esforços para os elementos horizontais 8x10 cm<sup>2</sup>

|                  | Tensões introduzido pelos esforços | Valor | Unidades |
|------------------|------------------------------------|-------|----------|
| $\sigma_{c,0,d}$ | Tensão Normal de compressão        | 3,57  | MPa      |

Quadro 5.106 – Factores e parâmetros considerados para os elementos horizontais 8x10 cm<sup>2</sup>

| Factor/parâmetro | Valor |
|------------------|-------|
| $k_h$            | 1,15  |
| $k_{h,y}$        | 1,15  |
| $k_{h,z}$        | 1,15  |
| $k_{mod}$        | 0,70  |
| $k_m$            | 0,70  |
| $K_{ls}$         | 1,00  |

$$f_{c,0,d} = \frac{f_{c,k}}{\gamma_m} \times k_{mod} = 13,44 \text{ MPa}$$

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} \leq 1 \Leftrightarrow 0,27 \leq 13,44 \quad OK$$

#### 5.2.2.6. Contraventamentos

Na Fig.5.17 estão representados os contraventamentos utilizados, todos eles com dimensão e secção semelhante em ambas as direcções.

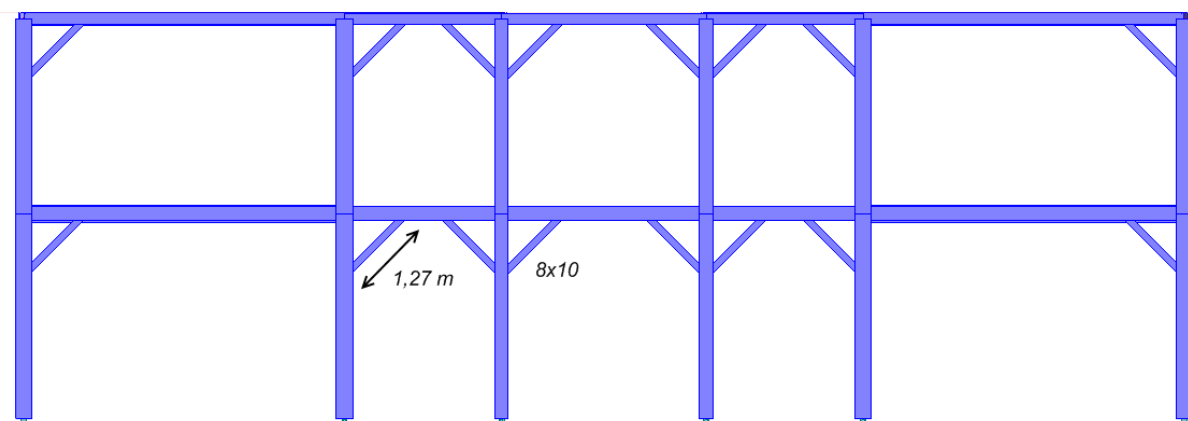


Fig.5.17 – Contraventamentos

#### Estado limite último

A solicitação mais condicionante para os contraventamentos corresponde à combinação 5.

Quadro 5.107 – Forças internas mais condicionantes para os contraventamentos

|   | Forças internas | Valor | Unidades |
|---|-----------------|-------|----------|
| N | Força axial     | 78,16 | kN       |

Quadro 5.108 – Tensões criadas pelos esforços para os contraventamentos

| Tensões introduzido pelos esforços |                             | Valor | Unidades |
|------------------------------------|-----------------------------|-------|----------|
| $\sigma_{c,0,d}$                   | Tensão Normal de compressão | 9,77  | MPa      |

Quadro 5.109 – Factores e parâmetros considerados para os contraventamentos

| Factor/parâmetro | Valor |
|------------------|-------|
| $k_h$            | 1,15  |
| $k_{h,y}$        | 1,15  |
| $k_{h,z}$        | 1,15  |
| $k_{mod}$        | 0,70  |
| $k_m$            | 0,70  |
| $K_{ls}$         | 1,00  |

$$f_{c,0,d} = \frac{f_{c,k}}{\gamma_m} \times k_{mod} = 13,44 \text{ MPa}$$

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} \leq 1 \Leftrightarrow 0,73 \leq 13,44 \quad OK$$

### 5.2.3. LIGAÇÕES

As ligações são materializadas em elementos metálicos comerciais. Foi consultado o catálogo da *Simpson Strong-tie*, e sugerem-se as seguintes ligações principais para satisfazer as condições de carga com segurança. As ligações das diagonais de contraventamento e da cobertura são feitas com ligações madeira - madeira macho-fêmea e aplicação de uma cavilha metálica. As ligações dos elementos constituintes dos mirantes são efectuadas com elementos metálicos correntes.

#### 5.2.3.1. Ligações das vigotas dos pavimentos às vigas de descarregamento

- Vigotas com secção 8x26 cm<sup>2</sup> esforço de corte máximo de 9,65 kN.

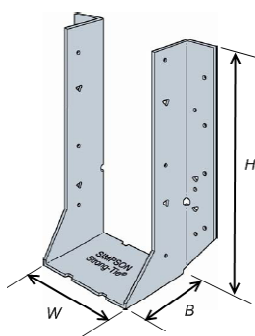


Fig.5.18 – Ligador metálico para vigotas HU210-2

Quadro 5.110 – Características da ligação HU210-2

| Modelo  | H (mm) | W (mm) | B (mm) | Tipo de conector (viga de suporte) | Quant. | Tipo de conector (viga suportada) | Quant. |
|---------|--------|--------|--------|------------------------------------|--------|-----------------------------------|--------|
| HU210-2 | 224    | 79     | 63     | SS - 4.00 x 90 (prego)             | 18     | SS - 3.75 x 75 (prego)            | 10     |

- Vigotas com secção 7x18 cm<sup>2</sup>, 7x15 cm<sup>2</sup> e 7x13 cm<sup>2</sup> com esforço de corte máximo de 6,13 kN.

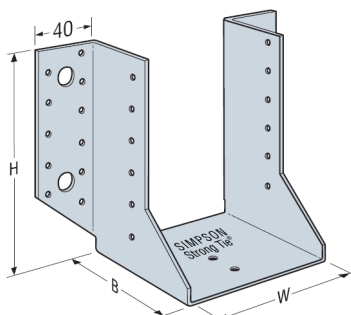


Fig.5.19 – Ligador metálico para vigotas SAE380/64

Quadro 5.111 – Características da ligação SAE380/64

| Modelo    | H (mm) | W (mm) | B (mm) | Tipo de conector (viga de suporte) | Quant. | Tipo de conector (viga suportada) | Quant. |
|-----------|--------|--------|--------|------------------------------------|--------|-----------------------------------|--------|
| SAE380/64 | 159    | 64     | 85     | SS - 3.75 x 30 (prego)             | 22     | SS - 3.75 x 30 (prego)            | 12     |

### 5.2.3.2. Ligação dos pilares à base (20 x 20 cm<sup>2</sup> e 24 x 26 cm<sup>2</sup>)

Quadro 5.112 - Esforços máximos na base dos pilares

| Vsd (kN) | Hx (kN) | Hy (kN) |
|----------|---------|---------|
| 95,78    | 5,69    | 0,81    |

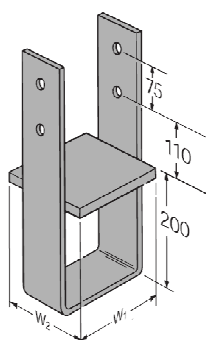


Fig.5.20 – Ligador metálico base

Quadro 5.113 – Características da ligação SAE380/64

| Modelo | $W_1$ (mm) | $W_2$ (mm) | Tipo de conector (viga de suporte) | Quant. |
|--------|------------|------------|------------------------------------|--------|
| CB200  | 200        | 200        | Cavilha de 12 mm                   | 2      |
| CB250  | 250        | 250        | Cavilha de 12 mm                   | 2      |

### 5.2.3.3. Ligações das vigas horizontais

- Ligação pilares - vigas transversais (13,50 m)

Para esta ligação aplica-se um ligador A35 nas quatro arestas dos pilares com 12 pregos de haste torcida 3,75 mm x 30 mm.

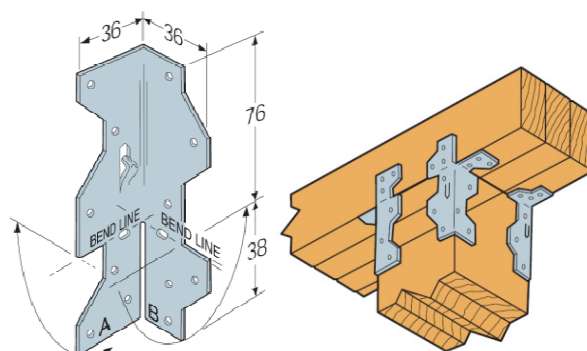


Fig.5.21 – Ligação pilares com vigas transversais

- Ligação vigas longitudinais - vigas transversais

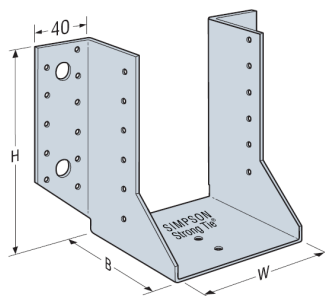


Fig.5.22 – Ligação vigas longitudinais - vigas transversais

Quadro 5.114 – Características da ligação SAE620/150

| Viga                     | Modelo     | H (mm) | W (mm) | B (mm) | Tipo de conector (viga suporte) | Quant. | Tipo de conector (viga suportada) | Quant. |
|--------------------------|------------|--------|--------|--------|---------------------------------|--------|-----------------------------------|--------|
| 15x25<br>cm <sup>2</sup> | SAE620/150 | 235    | 150    | 75     | M12                             | 8      | prego haste torcida 3.75x30       | 22     |

Quadro 5.115 - Características das ligações SAEL500/150 e SAE380/100

| Viga                                | Modelo      | H<br>(mm) | W<br>(mm) | B<br>(mm) | Tipo de<br>conector<br>(viga suporte) | Quant | Tipo de<br>conector (viga<br>suportada) | Quant. |
|-------------------------------------|-------------|-----------|-----------|-----------|---------------------------------------|-------|-----------------------------------------|--------|
| 15x20<br>cm <sup>2</sup>            | SAEL500/150 | 175       | 150       | 78        | prego haste<br>torcida<br>3.75x30     | 32    | prego haste<br>torcida 3.75x30          | 16     |
| 12x15 e<br>10x15<br>cm <sup>2</sup> | SAE380/100  | 140       | 100       | 85        | prego haste<br>torcida<br>3.75x30     | 22    | prego haste<br>torcida 3.75x30          | 12     |

#### 5.2.3.4. Ligações principais da cobertura

- Ligação pernas das semi-asnas à fileira

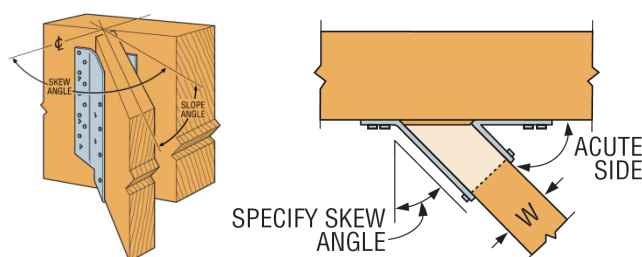


Fig.5.23 – Ligação pernas das semi-asnas à fileira

A ligação usada é a SAE600/150 que é caracterizada no Quadro 5.114.

- Ligação das madres às pernas das semi-asnas

Para as madres de secção 15x23 cm<sup>2</sup> é usada a ligação SAE600/150 (Fig.5.23 e Quadro 5.114) e para as madres de secção 11x17 cm<sup>2</sup> é usada a ligação SAE380/100 (Fig.5.22 e Quadro 5.115).

- Ligação das madres às pernas das asnas

A ligação das pernas das asnas é feita por intermédio de um elemento triangular no mesmo material estrutural solidarizado à perna e à madre através de pregos. Se houver necessidade de união das madres esta deverá ser feita na zona de momentos nulos e não sobre as pernas das asnas.

- Ligação das pernas às vigas de apoio

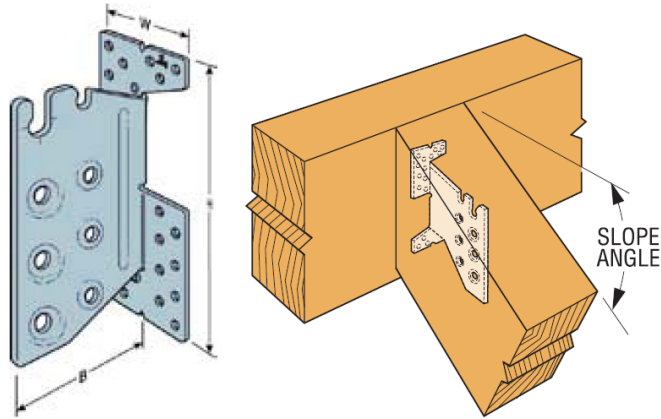


Fig.5.24 – Ligação pernas às vigas de apoio

| Modelo | H<br>(mm) | W<br>(mm) | B<br>(mm) | Tipo de conector (viga<br>suporte) | Quant. | Tipo de conector (viga<br>suportada) | Quant. |
|--------|-----------|-----------|-----------|------------------------------------|--------|--------------------------------------|--------|
| TU24   | 60        | 214       | 108       | Parafusos de<br>enroscar 4,1x32 mm | 26     | Cavilhas de aço<br>12mm              | 5      |

- Ligação das pernas das asnas principais à fileira

A ligação das pernas à fileira neste caso é feita através de um pendural. A força de compressão máxima a que este pode estar sujeito é de 8,15 kN transmitida por cada uma das pernas. Determinou-se para o pendural uma secção de 12x15 cm<sup>2</sup> para a zona que recebe as pernas. Para compressões perpendiculares ao fio:

$$\sigma_{c,90,d} \leq k_{c,90} f_{c,90,d} \quad (5.6)$$

$$k_{c,90} = \left(2,38 - \frac{l}{250}\right) \left(\frac{l_{ef}}{l}\right)^{0,5} \quad (5.7)$$

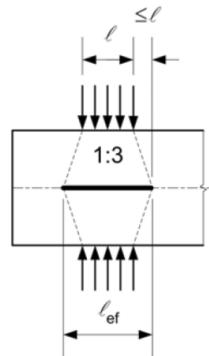


Fig.5.25 –  $l_{ef}$  para o determinar secção do pendural

$$l_{ef} = 230 + 2 \times 25 = 280 \text{ mm}$$

$$k_{c,90} = \left(2,38 - \frac{230}{250}\right) \left(\frac{280}{230}\right)^{0,5} = 1,61$$

$$\sigma_{c,90,d} = \frac{F}{A} = \frac{2 \times 8,15}{0,23 \times 0,12} = 0,59 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{c,90,d} \leq k_{c,90} f_{c,90,d} \Leftrightarrow 0,59 \leq 1,61 * \frac{2,7}{1,25} \Leftrightarrow 0,59 \leq 3,48 \quad OK$$



## 6 CONCLUSÕES

Os principais objectivos delineados para este projecto passaram pelo estudo e compreensão da actual concepção e dimensionamento das estruturas de madeira aplicadas à construção de habitações.

Verificou-se então que, qualquer uma das concepções, quer das casas de troncos, quer das casas de estrutura ligeira ou pesada, podem concorrer de forma equilibrada com outros sistemas que utilizem materiais diferentes. A pré-fabricação é uma realidade muito forte aplicada às casas de madeira, que traz inúmeras vantagens de economia de tempo e custos, além de facilitar a sua montagem. O material, além de natural e com impacto ambiental muito reduzido, tem grandes garantias de eficácia e segurança, dado o controlo e catalogação rigorosa a que é submetido.

Para habitações reduzidas, o dimensionamento pode passar muitas das vezes pela consulta de tabelas de dimensionamento de elementos individuais, das quais se obtém a secção correcta para determinados esforços actuantes, condições de apoio e vão.

O cálculo não se torna mais complicado para estruturas maiores, como foi comprovado neste projecto. O dimensionamento de estruturas de madeira assemelha-se em muito ao cálculo de estruturas metálicas. Os modos de instabilidade e verificações de serviço são praticamente análogos nas duas soluções, mas são bem distintas no comportamento e características dos materiais. A heterogeneidade/homogeneidade, peso próprio, resistência e elasticidade são particularidades que colocam a madeira e o aço em cantos opostos. Além disso, as ligações entre elementos são bem díspares. Nas estruturas metálicas, estas são normalmente concretizadas por meio de soldadura ou por ligações aparafusadas, enquanto para a madeira existe uma grande gama de soluções, que passam pelas ligações tradicionais à utilização de pregos, cavilhas, parafusos ou chapas metálicas. A grande dificuldade prende-se, como foi óbvio neste projecto, com a determinação da rigidez da ligação e consequente transmissão de esforços. No entanto, as semelhanças na metodologia de cálculo e verificação de segurança, levam a que a maior parte dos programas de cálculo de estruturas tenham ambas as opções de material associadas e sejam analisadas e verificadas de uma forma muito similar.

Comparativamente às estruturas de betão armado, não há praticamente semelhanças identificadas. A junção dos dois materiais, aço e betão, complica em muito o comportamento dos elementos da estrutura, dificultando assim a definição das características do conjunto e consequentemente o seu cálculo. Além disso, assegurar a manutenção da coexistência dos dois materiais não é fácil. Já no caso da madeira, os mesmos problemas não se colocam pois, apesar de a madeira ter um funcionamento direccionado, a secção dos elementos é homogénea. Acrescenta-se ainda a vantagem da sua origem, pois como material natural que é, a madeira tem um comportamento controlado e pouco variável, quando acompanhado de uma manutenção acertada.

A afinidade com as estruturas metálicas e a dicotomia em relação ao betão armado acaba por ser penalizadora para as estruturas de madeira em Portugal. O domínio do betão deixa também as

estruturas metálicas fora de uma utilização regular, apesar de mesmo assim ter uma representação na construção civil bem superior à madeira. Assim, também não existe experiência e formação em quantidade no aço que possa ser transferida para a madeira, de modo a encurtar o caminho na preparação de profissionais qualificados em quantidade na área da madeira. É necessário então investir na formação e conhecimento e criar bibliografia nacional actual, dado que a sua inexistência foi exemplificada nas dificuldades sentidas na realização deste projecto.

Este relatório serve assim de apoio e consulta para os que queiram investir na formação e cultura das estruturas de madeira. Pode ainda acabar com preconceitos associados à madeira e esclarecer as vantagens da sua aplicação em habitações. Pretende-se também que este seja um trabalho de continuidade. Propõe-se então para trabalhos futuros, temas que foram abordados de uma forma muito superficial, ou deixados de fora pelo alongar do relatório ou falta de tempo, dado que a falta de formação no domínio das estruturas de madeira ao longo do curso de engenharia civil correspondeu também a uma das maiores dificuldades na execução deste projecto. Sugerem-se assim temas que englobem a discussão aprofundada da problemática do fogo, a mobilidade das casas de madeira ou um estudo económico comparativo entre habitações com estrutura de madeira e soluções com materiais diferentes.

# 7

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Braghieri, N., *Casas de Madeira*, Editorial Gustavo Gili. SA, 2005
- [2] Moreira, S., *Ponte Pedonal Espiada com tabuleiro de Madeira Modular Pré-esforçado*, Relatório de projecto para obtenção do grau de mestre em Engenharia Civil – Especialização em Estruturas, orientador científico: Prof. R. Carneiro de Barros, FEUP, 2008
- [3] Gesualdo, F., *Estruturas de Madeira. Notas de aula*, Faculdade de Engenharia Civil da UFU, Minas Gerais, Brasil, 2003
- [4] LNEC, *Construção Industrializada de Madeira*, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 1976
- [5] FPAC, *Canadian Wood. Renewable by Nature. Sustainable by Design*, Canadian Wood Council, Forest Products Association of Canada, 2008
- [6] Henriques, M., *Sistemas estruturais em madeira lamelada colada*, Instituto Superior Técnico de Lisboa, (sem disponibilidade do ano)
- [7] TCE I, *Tabela Comparativa entre alguns Sistemas Estruturais*, Tecnologia da Construção de Edifícios I, PCC. USP, 2007
- [8] Cruz, H., *Patologia, Avaliação e Conservação de Estruturas de Madeira*, II Curso Livre Internacional do Património, Associação Portuguesa dos Municípios com centro histórico; Fórum UNESCO Portugal, Santarém, Fevereiro/Março de 2001
- [9] Rodrigues, R., *Construções Antigas de Madeira. Experiência de Obra e Reforço Estrutural*, Dissertação de Mestrado em Materiais e Reabilitação de Construções, orientador científico: Prof. R. Carneiro de Barros, U.Minho, 2004
- [10] Arriaga, F., *Intervencion em Estruturas de Madera*, AITIM, Madrid, 2002

- [11] LNEC, NP EN 355, Lisboa, 1994
- [12] Cruz, H., *Patologia e Reabilitação de Estruturas de Madeira. Inspeção a Linguagem das Anomalias*, LNEC, 2006
- [13] <http://www.boisdarbreconstruction.com> (15/06/2009)
- [14] Faria J. A., *Patologias das Construções com Madeira – Sugestões de Intervenção*, (Freitas, V. P., Gómez, C. D., Helene, P., Abrantes, V.), FEUP, PATORREB 2009, Porto, 2009
- [15] APA, *Ten-point protection plan*, APA – The Engineered Wood Association, Form N° E210, Tacoma, E.U.A., 2004
- [16] <http://www.imowood.pt> (16/06/2009)
- [17] Sánchez, J., Martitegui, F., Martitegui, C., Alvarez, M., Sánchez, F. e Nevado, M., *Casas de Madera*, Asociación de investigación técnica de las industrias de la madera y corcho. AITIM, 1995
- [18] Kermani, A., *Structural Timber Design*, Blackwell Science, Edinburg, 1999
- [19] Cruz, H., *Estruturas de madeira lamelada colada em Portugal. Instrumentos para garantir a qualidade*, Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas, Série II, nº1, Julho de 2007, LNEC
- [20] CEN., *EN 338 Structural Timber – Strength classes – Assignment of visual grades and species*, Office for Official Publications of the European Communities, Brussels, Belgium, 2003
- [21] <http://www.conhecendoamadeira.com> (25/05/2009)
- [22] Coutinho, J. S., *Materiais de Construção I, Madeiras*, FEUP, Porto, 1999
- [23] Alvarez, M., Martitegui, F., *Estructuras de Madera - diseño y cálculo*, Asociación de investigación técnica de las industrias de la madera y corcho. AITIM, 1996
- [24] CEN., *Eurocode 5: Design of timber structures - Parte 1.1: General – Common rules and rules for buildings. BS EN 1995-1-1*, BSI, 2006

- [25] Sousa, C., *Construções em Madeira: Elementos de apoio às aulas teórico-práticas*, FEUP, Porto, 2006/07
- [26] Blass, H., Aune, P., et al, *Timber Engineering STEP 1*, 1ªEdição, Centrum Hout, Holanda, 1995
- [27] Lopes, G.M., Carvalho, R.C., Barros, R.C., *Verificação das Ligações entre Lamelas de Cobertura Cilíndrica Lamelar de Madeira segundo o EC5*, Congresso Luso-Moçambicano de Engenharia, Maputo, 2-4/09/2008
- [28] Carvalho, A., *Madeiras Portuguesas* (2 volumes), Direcção Geral das Florestas, 1997
- [29] IPQ, *NP EN 1194: Estruturas de madeira. Madeira lamelada colada. Classes de resistência e determinação dos valores característicos*, Lisboa, 2002
- [30] SOTECNISOL, *Isolamento térmico e acústico. Floormate*, Sotecnisol Materiais, Lisboa, Portugal
- [31] <http://www.knauf.com> (10/05/09)
- [32] <http://www.carmel.pt> (20/04/09)
- [33] Ramalho, F., *Paredes Divisórias. Painéis Pré-fabricados de Tijolo Revestido a Gesso*, Construlink Press, N°14, Abril 2003
- [34] URALITA, *Soluções Pladur para uma casa nova*, Grupo Uralita, Espanha, 2008
- [35] Farinha, J. S. B., Reis, A. C., *Tabelas Técnicas*, Edições Técnicas E.T.L. Lda., Lisboa, 2007



## 8 BIBLIOGRAFIA

O seguinte conjunto de elementos bibliográficos foi utilizado de um modo geral como consulta para a execução do presente trabalho.

Barros, R.C., Rodrigues, R., *Reabilitação da Estrutura de Cobertura da Nave da Sé de Aveiro*, Projecto da cobertura em madeira segundo EC5, Prof. Rui Carneiro de Barros & Eng. Romana Rodrigues, ASS - Antero Santos & Santos, Outubro e Novembro de 2007

Faherty, K., Williamson, T., *Wood Engineering and Construction handbook*, 3ª edição, McGraw-Hill handbooks, USA, 1997

Lopes, G.M., Carvalho, N.R.F., Mata, R.C., Barros, R.C., Teixeira, F.F., Mariz, M.C.G., *Modelo Estrutural Simplificado para a Análise de Coberturas Cilíndricas Lamelares em Madeira*, Congresso Luso-Moçambicano de Engenharia, Maputo, 2-4/09/2008

Lopes, G.M., Carvalho, R.C., Barros, R.C., *Dimensionamento das Lamelas de Cobertura Cilíndrica Lamelar de Madeira segundo o EC5*, Congresso Luso-Moçambicano de Engenharia, Maputo, 2-4/09/2008

Natterer, J., Herzog, T., Volz, M., *Construire en bois 2*, 2ª edição, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne, Suíça, 1998

Pfeil, W., *Estruturas de Madeira*, 5ª Edição, Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., Rio de Janeiro, Brasil, 1994

Blass, H., Aune, P., et al, *Timber Engineering STEP 2*, 1ª Edição, Centrum Hout, Holanda, 1995

<http://www.portaldamadeira.blogspot.com>

<http://www.estruturasdemadeira.blogspot.com/>



## ANEXOS

Definição das combinações de acções:

| <b>Acções</b> |              |       |    |           |       |    |
|---------------|--------------|-------|----|-----------|-------|----|
| 1             | Peso Próprio | perm. | 8  | modal     | modal |    |
| 2             | paredes ext. | perm. | 9  | Sismo X 1 | EC 8  | S1 |
| 3             | pavimento    | perm. | 10 | Sismo Y 1 | EC 8  | S1 |
| 4             | sobrecarga   | sobr. | 11 | Sismo Z 1 | EC 8  | S1 |
| 5             | cobertura    | perm. | 12 | Sismo X 2 | EC 8  | S2 |
| 6             | vento > face | vento | 13 | Sismo Y 2 | EC 8  | S2 |
| 7             | vento < face | vento | 14 | Sismo Z 2 | EC 8  | S2 |

| <b>Vento</b> |          |          |
|--------------|----------|----------|
| $\psi_0$     | $\psi_1$ | $\psi_2$ |
| 0,4          | 0,2      | 0        |

| <b>Sobrecarga</b> |          |          |
|-------------------|----------|----------|
| $\psi_0$          | $\psi_1$ | $\psi_2$ |
| 0,7               | 0,5      | 0,3      |

|                  |                  |                |                |
|------------------|------------------|----------------|----------------|
| $\gamma_{G,sup}$ | $\gamma_{G,inf}$ | $\gamma_{Q,i}$ | $\gamma_{Q,1}$ |
| 1,35             | 1                | 1,5            | 1,5            |
| 0 nos casos fav. |                  |                |                |

| <b>Abreviaturas usadas</b> |                |
|----------------------------|----------------|
| Comb.                      | Combinação     |
| C.C.                       | Caso de carga  |
| C.M.                       | Coeficiente de |

| Comb. | Tipo | Base | C. C. | C.M. | C. C. | C.M. | C. C. | C.M. | C. C. | C.M. | C. C. | C.M. | C. C. | C.M. | C. C. | C.M. | C. C. | C.M. | C. C. | C.M. | C. C. | C.M. | C. C. | C.M. | C. C. | C.M. |    |   |
|-------|------|------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|------|----|---|
| 1     | ULS  | 4    | 1     | 1,35 | 2     | 1,35 | 3     | 1,35 | 4     | 1,5  | 5     | 1,35 | 6     | 0,6  | 7     | 0    | 9     | 0    | 10    | 0    | 11    | 0    | 12    | 0    | 13    | 0    | 14 | 0 |
| 2     | ULS  | 4    | 1     | 1,35 | 2     | 1,35 | 3     | 1,35 | 4     | 1,5  | 5     | 1,35 | 6     | 0    | 7     | 0,6  | 9     | 0    | 10    | 0    | 11    | 0    | 12    | 0    | 13    | 0    | 14 | 0 |
| 3     | ULS  | 4    | 1     | 1    | 2     | 1    | 3     | 1    | 4     | 0    | 5     | 1    | 6     | 0,6  | 7     | 0    | 9     | 0    | 10    | 0    | 11    | 0    | 12    | 0    | 13    | 0    | 14 | 0 |
| 4     | ULS  | 4    | 1     | 1    | 2     | 1    | 3     | 1    | 4     | 0    | 5     | 1    | 6     | 0    | 7     | 0,6  | 9     | 0    | 10    | 0    | 11    | 0    | 12    | 0    | 13    | 0    | 14 | 0 |
| 5     | ULS  | 4    | 1     | 1,35 | 2     | 1,35 | 3     | 1,35 | 4     | 1,5  | 5     | 1,35 | 6     | 0    | 7     | 0    | 9     | 0    | 10    | 0    | 11    | 0    | 12    | 0    | 13    | 0    | 14 | 0 |
| 6     | ULS  | 6    | 1     | 1,35 | 2     | 1,35 | 3     | 1,35 | 4     | 1,05 | 5     | 1,35 | 6     | 1,5  | 7     | 0    | 9     | 0    | 10    | 0    | 11    | 0    | 12    | 0    | 13    | 0    | 14 | 0 |
| 7     | ULS  | 6    | 1     | 1    | 2     | 1    | 3     | 1    | 4     | 0    | 5     | 1    | 6     | 1,5  | 7     | 0    | 9     | 0    | 10    | 0    | 11    | 0    | 12    | 0    | 13    | 0    | 14 | 0 |
| 8     | ULS  | 7    | 1     | 1,35 | 2     | 1,35 | 3     | 1,35 | 4     | 1,5  | 5     | 1,35 | 6     | 0    | 7     | 1,5  | 9     | 0    | 10    | 0    | 11    | 0    | 12    | 0    | 13    | 0    | 14 | 0 |
| 9     | ULS  | 7    | 1     | 1    | 2     | 1    | 3     | 1    | 4     | 0    | 5     | 1    | 6     | 0    | 7     | 1,5  | 9     | 0    | 10    | 0    | 11    | 0    | 12    | 0    | 13    | 0    | 14 | 0 |
| 10    | ULS  | S1   | 1     | 1    | 2     | 1    | 3     | 1    | 4     | 0,3  | 5     | 1    | 6     | 0    | 7     | 0    | 9     | 1    | 10    | 1    | 11    | 1    | 12    | 0    | 13    | 0    | 14 | 0 |
| 11    | ULS  | S2   | 1     | 1    | 2     | 1    | 3     | 1    | 4     | 0,3  | 5     | 1    | 6     | 0    | 7     | 0    | 9     | 0    | 10    | 0    | 11    | 0    | 12    | 1    | 13    | 1    | 14 | 1 |
| 12    | SLS  | 4    | 1     | 1    | 2     | 1    | 3     | 1    | 4     | 1    | 5     | 1    | 6     | 0,4  | 7     | 0,4  | 9     | 0    | 10    | 0    | 11    | 0    | 12    | 0    | 13    | 0    | 14 | 0 |
| 13    | SLS  | 6    | 1     | 1    | 2     | 1    | 3     | 1    | 4     | 0,7  | 5     | 1    | 6     | 1    | 7     | 0,4  | 9     | 0    | 10    | 0    | 11    | 0    | 12    | 0    | 13    | 0    | 14 | 0 |
| 14    | SLS  | 7    | 1     | 1    | 2     | 1    | 3     | 1    | 4     | 0,7  | 5     | 1    | 6     | 0,4  | 7     | 1    | 9     | 0    | 10    | 0    | 11    | 0    | 12    | 0    | 13    | 0    | 14 | 0 |