



FCTUC DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

Estudo comparativo entre soluções metálicas e de rolaria de madeira de pequeno diâmetro para a produção de estruturas de suporte de painéis fotovoltaicos.

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil na Especialidade de Estruturas.

Autor

Tiago Miguel Balhau Pires

Orientador

João Henrique Jorge de Oliveira Negrão

Esta dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor, não tendo sofrido correcções após a defesa em provas públicas. O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC declina qualquer responsabilidade pelo uso da informação apresentada

Coimbra, 29 de julho, 2016

RESUMO

De acordo com a crescente exigência sustentável no panorama global é imperativo explorar materiais ecológicos com alto potencial para a construção. Assim, com este estudo pretende-se averiguar a viabilidade da utilização de rolaria de madeira de pequeno diâmetro de pinheiro bravo como estrutura de suporte de painéis solares. Sendo proveniente das operações de limpeza e desbaste de povoamentos florestais, este material enquadra-se nesta política. Para tal, questões como a evolução do conhecimento das características da madeira de secção circular ou a sua abundante disponibilidade em Portugal motivam a utilização deste material ainda pouco explorado.

Neste contexto, faz-se uma exposição geral do material no que concerne às suas propriedades mecânicas, durabilidade, preservação e sustentabilidade sendo também abordado o estado da arte enumerando vários exemplos de aplicação bem-sucedidos.

Dado que o estudo está ligado à energia fotovoltaica é feita uma exposição geral dos processos e equipamentos inerentes. Posto isto, é apresentado o caso de estudo que consiste num parque fotovoltaico realizado em França, cuja estrutura de suporte dos painéis solares foi feita em aço galvanizado e, de seguida é proposta uma solução de projeto semelhante com recurso à rolaria de madeira de pequeno diâmetro de pinheiro bravo com ligações metálicas.

Finalmente faz-se um comparativo de custo-benefício das duas soluções.

Palavras-chave: Madeira, secção circular, ligações metálicas, estruturas de suporte, painéis solares.

ABSTRACT

According to the increasing requirement in the global sustainable development it is imperative to explore ecological materials with high construction potential. This study aims to investigate the viability of small-diameter maritime pine roundwood as a support structure for solar panels. As this kind of wood is picked from the forest cleaning operations, it fits in this policy. The improvement of the knowledge related to the characteristics of pine Roundwood and its wide availability in Portugal are important factors that justify its use almost unexplored nowadays.

In this context, a global exhibition of this material has been made relating to its mechanical properties, durability, sustainability and preservation. Also, it is shown some projects made of roundwood listing some of the successful examples.

The study is connected to photovoltaic energy and because of that some processes and equipment are exposed. The case study consists in a photovoltaic park built in France with a support structure made of galvanized steel. A solution with a similar design is proposed in small-diameter roundwood maritime pine with metal connections.

Finally, it was made a cost-benefit study of the two solutions.

Key words: Wood, round section, steel connections, solar panels, support structure.

ÍNDICE

RESUMO.....	II
ABSTRACT.....	III
ÍNDICE	IV
LISTA DE FIGURAS.....	VI
LISTA DE TABELAS	VIII
ABREVIATURAS E SÍMBOLOS	IX
1 INTRODUÇÃO E CONTEXTUALIZAÇÃO	- 1 -
1.1 A MADEIRA	- 2 -
1.2 MADEIRA DE ROLARIA DE PINHO BRAVO.....	- 3 -
1.2.1 CARACTERIZAÇÃO.....	- 3 -
1.2.2 PROPRIEDADES MECÂNICAS.....	- 3 -
1.2.3 DURABILIDADE E PRESERVAÇÃO.....	- 6 -
1.2.4 SEGURANÇA E RESISTÊNCIA AO FOGO.....	- 9 -
1.2.5 SUSTENTABILIDADE	- 10 -
1.2.6 MÃO-DE-OBRA E EQUIPAMENTOS	- 10 -
1.2.7 MADEIRA DE SECÇÃO CIRCULAR VS MADEIRA SERRADA.....	- 11 -
2 ENERGIA FOTOVOLTAICA.....	- 12 -
2.1 O EFEITO FOTOVOLTAICO	- 16 -
2.2 FUNCIONAMENTO DO PAINEL SOLAR	- 17 -
2.2.1. CURVA CARACTERÍSTICA.....	- 18 -
2.2.2. HORA DE PICO SOLAR	- 19 -
2.3 FUNCIONAMENTO DE UM SISTEMA DE PAINÉIS SOLARES.....	- 19 -
2.4 EQUIPAMENTOS	- 21 -
3 SISTEMAS RETICULADOS EM ROLARIA DE MADEIRA	- 25 -
3.1 ESTADO DA ARTE.....	- 25 -
3.2 LIGAÇÕES.....	- 30 -
4 CASO DE ESTUDO EM AÇO.....	- 36 -

4.1	LOCALIZAÇÃO	- 37 -
4.2	CARACTERÍSTICAS	- 37 -
4.3	DIMENSIONAMENTO DA SOLUÇÃO EM AÇO.....	- 37 -
4.3.1	AÇÕES.....	- 38 -
4.3.1.1	VENTO	- 39 -
4.3.2	COMBINAÇÕES DE AÇÕES	- 43 -
4.3.3.	SECÇÕES UTILIZADAS.....	- 44 -
4.3.4.	ANÁLISE E DIMENSIONAMENTO	- 45 -
4.4	CUSTOS.....	- 52 -
5	PROPOSTA EM ROLARIA DE MADEIRA	- 54 -
5.1	DIMENSIONAMENTO.....	- 54 -
5.1.1	DADOS RELATIVOS A MATERIAIS	- 54 -
5.1.2	QUANTIFICAÇÃO DAS AÇÕES E COMBINAÇÕES.....	- 55 -
5.1.3	MODELO DE CÁLCULO	- 56 -
5.1.4	DIMENSIONAMENTO DOS ELEMENTOS DE MADEIRA	- 56 -
5.1.4.1	VERIFICAÇÃO DA SEGURANÇA AOS ELU	- 58 -
5.1.4.2	VERIFICAÇÃO DA SEGURANÇA AOS ELS	- 63 -
5.1.5	LIGAÇÕES.....	- 64 -
5.1.6	FUNDAÇÕES.....	- 66 -
5.2	DISCUSSÃO E JUSTIFICAÇÃO DO DIMENSIONAMENTO	- 67 -
5.3	ESTUDO COMPARATIVO COM AS SOLUÇÕES EM AÇO	- 67 -
6	CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	- 68 -
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	- 69 -

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1- Curvas tensão-extensão para madeira solicitada em tração e compressão (Negrão, 2009).....	- 4 -
Figura 1.2 - Comportamento viscoelástico sob carga constante (Melo & Menezzi, 2010)	- 6 -
Figura 1.3 - Viga de madeira suporta dois perfis metálicos após incêndio (Dias, 2007).....	- 9 -
Figura 2.1 - Ciclo de energia (www.portal-energia.com).....	- 12 -
Figura 2.2 - Irradiação solar na Europa (Solargis, 2011).....	- 14 -
Figura 2.3 - Esquema elétrico representativo de duas células ligadas em série (Pinho, 2014).....	- 17 -
Figura 2.4 - Esquema elétrico representativo de duas células ligadas em paralelo (Pinho, 2014).....	- 18 -
Figura 2.5 - Curva característica da célula fotovoltaica (Pinho, 2014).....	- 18 -
Figura 2.6 - Hora de pico solar (www.calculationsolar.com).....	- 19 -
Figura 2.7 - Esquema representativo de um sistema fotovoltaico ligado à rede (SMA).....	- 20 -
Figura 2.8 - Esquema de sistema de inversores	- 23 -
Figura 3.1 - Primeiras estruturas em Rolaria de Madeira (Mateus, 1961).....	- 25 -
Figura 3.2 - Exemplo de aplicação da rolaria de madeira a rails de proteção (Morgado 2012)	- 26 -
Figura 3.3 - Exemplo de aplicação da rolaria de madeira a parques infantis (Morgado 2012)	- 26 -
Figura 3.4 - Cravamento de uma estaca de madeira (Miná, 2005)	- 27 -
Figura 3.5 - a) Edifício (Ranta-Maunus, 1999) b) Edifício (Beaudette Consulting Engineers Inc, 2001) c) www.sampac.com.br d) ateliernobody.tumblr.com.....	- 27 -
Figura 3.6- Edifícios em que são usadas treliças planas de Pratt (Engineers, 2010)	- 28 -
Figura 3.7 - Cobertura (Malo e Ellingsbo, 2010) e Cobertura de uma bancada (Engineers, 2010).....	- 28 -
Figura 3.8 - Exemplos de torres construídas com recurso a rolaria de madeira (Calil 2010).	- 29 -
Figura 3.9 - Estabilização de taludes (Verde, 2010; Flach e Frenette, 2000)	- 30 -
Figura 3.10 - Exemplos de pontes em madeira de rolaria (Morgado 2012)	- 30 -
Figura 3.11 - Exemplos de ligações madeira – madeira (Calil et al 2003).....	- 31 -
Figura 3.12 - Exemplos de ligações com cavilha de madeira (Calil et al 2003).....	- 31 -
Figura 3.13 - Exemplos de ligações com varões colados (Calil et al 2003)	- 32 -
Figura 3.14 - Placa de encabeçamento tipo macho (Hamm e Schnuriger, 2002)	- 33 -

Figura 3.15 - Exemplos de ligações de chapas metálicas externas (Calil et al 2003).....	- 33 -
Figura 3.16 - Exemplos de ligações de chapa central (Calil et al 2003).....	- 34 -
Figura 3.17 - Exemplos de ligações de sistemas de ancoragem (Calil et al 2003)	- 35 -
Figura 3.18 - Exemplos de fundações de pilares em rolaria de madeira (Calil et al 2003)	- 35 -
Figura 4.1 - Localização do Parque fotovoltaico;.....	- 37 -
Figura 4.2 - Esquema de uma estufa tipo: a) Perspetiva b) Corte c) Planta (parcial).	- 37 -
Figura 4.3 - Modelo da estrutura tipo (solução em aço).	- 38 -
Figura 4.4 - Esquema de assentamento dos painéis entre dois pórticos	- 39 -
Figura 4.5 - Esquema de cálculo de $C_{p,net}$, (NF EN 1991 1-4, 7.6).....	- 41 -
Figura 4.6 - Centro de ação das forças atuantes do vento, (NF EN 1991 1-4, Tab. 7.16)	- 42 -
Figura 4.7 - Momento fletor(M_y) e esforço axial(F_x) no pórtico de aço.	- 45 -
Figura 4.8 - Secção transversal da viga - RHS 160x80x4	- 45 -
Figura 4.9 - Secção transversal da madre - LSF C 140x50x2	- 47 -
Figura 4.10 – Diagrama de momento fletor (M_y) das madres.....	- 48 -
Figura 4.11 – Secções transversais dos pilares HFSHS 80x80x4; HFSHS 100x100x4	- 49 -
Figura 4.12 – Secção transversal do contraventamento vertical.....	- 51 -
Figura 4.13 – Secção transversal do contraventamento horizontal.....	- 51 -
Figura 5.1 - Modelo em madeira de rolaria	- 56 -
Figura 5.2 - Diagramas de momento fletor (M_y) esforço axial do pórtico (F_x).....	- 58 -
Figura 5.3 – Secção transversal da viga	- 58 -
Figura 5.4 - Diagrama de momento fletor (M_y) das madres	- 59 -
Figura 5.5 – Secção transversal da madre	- 59 -
Figura 5.6 - Diagrama de esforço axial (N_d).....	- 61 -
Figura 5.7 – Secção transversal dos pilares	- 61 -
Figura 5.8 – Secção transversal do contraventamento vertical.....	- 62 -
Figura 5.9 – Secção transversal do contraventamento horizontal.....	- 63 -
Figura 5.10 - Componentes da deformação e sua relação segundo EC5	- 64 -
Figura 5.11 – Esquemas da ligação madre-viga nos pórticos intermédios e de extremidade	- 66 -
Figura 5.12 – Esquemas da solução em Rolaria de Madeira	- 66 -

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 - Propriedades mecânicas da madeira de rolaria de Pinho bravo (Morgado, 2012).....	- 5 -
Tabela 1.2 - Empresas que efetuam tratamento de preservação de madeira em Portugal (Sousa Paulo, 2011). -	8 -
Tabela 2.1 - Produção de energias renováveis em Portugal (DGEG).....	15 -
Tabela 2.2 - Contributo das energias renováveis no consumo de energia em Portugal (DGEG)	16 -
Tabela 4.1 - Parâmetros para o cálculo da Velocidade de referência do vento	40 -
Tabela 4.2 - Determinação da pressão dinâmica de pico.....	41 -
Tabela 4.3 - Coeficientes de pressão, $C_{p,net}$	41 -
Tabela 4.4 - Valores da pressão actuante do vento, W_e	42 -
Tabela 4.5 - Coeficientes de força global, c_f	42 -
Tabela 4.6 - Força global do Vento para o caso de estudo- F_w	43 -
Tabela 4.7 - Secções utilizadas na solução em aço.....	44 -
Tabela 4.8 - Preços da solução em aço	53 -
Tabela 5.1 - Secções utilizadas em madeira de rolaria	56 -
Tabela 5.2 - Deformações máximas admissíveis segundo EC5.	64 -
Tabela 6.1 - Preços da solução em madeira.....	68 -

ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

DGEG - Direção geral de energia e geologia

E_{mean} - Valor médio do módulo de elasticidade de uma amostra

E_0 - Módulo de elasticidade na direção do fio

$E_{0,05}$ - Valor característico do módulo de elasticidade de uma amostra

E_{90} - Módulo de elasticidade na direção perpendicular ao fio

$E_{c,0}$ - Módulo de elasticidade em compressão na direção do fio

$E_{c,90}$ - Módulo de elasticidade em compressão na direção perpendicular ao fio

EC0 - Eurocódigo 0

EC1 - Eurocódigo 1

EC3 - Eurocódigo 3

EC5 - Eurocódigo 5

F_z - Esforço transversal

M - Momento Fletor

G - Módulo de Distorção

W - Ação do vento

NP - Norma Portuguesa

NF - Norma Francesa

N - Esforço Axial

EN - Norma Europeia

CEN - Comité Europeu de Normalização

REN - Redes energéticas nacionais

W_p - Watt-pico

Q_p - Pressão dinâmica de pico

V_m - Velocidade média do vento

$f_{t,0}$ - Resistência à tração paralela às fibras

$f_{c,0}$ - Resistência à compressão paralela às fibras

$f_{c,0,k}$ - Valor característico da resistência à compressão paralela às fibras

$f_{t,90}$ - Resistência à tração perpendicular às fibras

$f_{c,90}$ - Resistência à compressão perpendicular às fibras

f_m - Resistência à flexão

$f_{m,k}$ - Valor característico da resistência à flexão

f_v - Resistência ao corte

c_f - Coeficientes de força global

Ψ_i - Coeficiente de redução

ν - Coeficiente de Poisson em regime elástico

ρ - Massa volúmica

ρ_k - Valor característico da massa volúmica

ρ_{mean} - Valor médio da massa volúmica

1 INTRODUÇÃO E CONTEXTUALIZAÇÃO

No contexto da realização de um estágio profissional na empresa Jayme da Costa cuja principal área de negócios são as energias renováveis nomeadamente as energias solar, eólica e hídrica, surgiu a possibilidade de explorar estas áreas mais propriamente ao nível do sector da análise e dimensionamento estrutural tendo em conta a necessidade de otimizar o desempenho bem como de obter a melhor relação desempenho-custo possível. Dada a construção em larga escala, isto é, a construção de vastos parques em que módulos estruturais de suporte dos painéis fotovoltaicos são repetidos ao longo da área de vários hectares, é imposta a necessidade de otimização da estrutura a vários níveis - desempenho estrutural, transporte, ambiental, resistência às intempéries, disponibilidade de recursos, etc.

A madeira, um material menosprezado na construção em detrimento do aço ou betão armado, tem vindo a recuperar alguma importância enquanto material estrutural, para o que tem concorrido o desenvolvimento de documentação técnica e normalização (nomeadamente Eurocódigo 5 e normas conexas), uma maior divulgação das suas características físicas e mecânicas e a visibilidade proporcionada por obras de grande relevância realizadas com êxito. As crescentes exigências de sustentabilidade, a evolução no conhecimento das características da madeira e sua aplicabilidade e, no caso particular de Portugal, o potencial de valorização de recursos florestais endógenos, constituem fatores de motivação para o seu uso pela indústria de construção, que vê cada vez mais com bons olhos a utilização deste material natural e que apresenta vantagens a vários níveis.

Nesta linha, suscitou-se a possibilidade da utilização de madeira de rolaria de pinheiro bravo (*Pinus Pinaster Ait.*) em substituição do aço que, apesar de apresentar um excelente comportamento estrutural, acarreta algumas desvantagens como o seu peso, que dificulta o transporte e o encarece, e o impacto ambiental causado pela sua produção, bem como o próprio manuseio em obra. A madeira rolaria de pinheiro bravo seria proveniente das operações de limpeza e desbaste de povoamentos florestais. Normalmente, este material tem baixo valor de mercado, nomeadamente quando destinado à produção de papel ou energia, pelo que outros usos como a aplicação estrutural contribuiriam para a sua valorização.

Uma vez que já foram efetuados estudos sobre as características mecânicas dos vários tipos de madeira de rolaria mais comuns em Portugal, estão reunidas as condições para

averiguar se este material constitui uma boa alternativa no âmbito daquilo que são as possibilidades enquanto solução estrutural ao nível nacional e internacional.

Em suma, apesar das inúmeras vantagens desta matéria-prima, a sua utilização como material estrutural deve ser cuidada, exigindo o domínio da estrutura interna dos diferentes tipos assim como das diferentes abordagens de análise e dimensionamento dos elementos constituintes da estrutura. Desta forma, será possível garantir a segurança e durabilidade deste tipo de construções.

OBJECTIVO

O objeto deste estudo é perceber se a solução de dimensionamento em madeira de rolaria de pinheiro bravo de pequeno diâmetro com ligações metálicas trará uma relação custo-benefício melhor em comparação com a solução usada atualmente para a construção de estruturas de suporte dos painéis fotovoltaicos, o aço galvanizado, tendo em conta os aspetos práticos de montagem, transporte, disponibilidade de matéria-prima, etc. Este estudo será baseado em estudos recentemente realizados sobre as características mecânicas dos vários tipos deste material, em normalização europeia, essencialmente o Eurocódigo 5 e normas conexas, que regula o dimensionamento em madeira, ou ainda, em certas situações não contempladas, através da análise e discussão das metodologias utilizadas devidamente suportadas, sublinhando eventuais lacunas da normalização no que diz respeito a este tipo de madeira ou à madeira em geral. No que respeita ao dimensionamento em aço será seguido o Eurocódigo 3 e normas complementares.

1.1 A MADEIRA

A madeira é um material bastante complexo ao nível da sua estrutura micro e macroscópica, sendo importante conhecê-lo bem para o poder utilizar corretamente em construção. Com o intuito de melhor compreender o comportamento da madeira como material, refira-se a importância do teor em água. Estando este elemento presente sob 3 formas distintas – a água livre, que é eliminada após o abate, a água de impregnação que está relacionada com o fenómeno de higroscopicidade, é a parcela mais sensível na análise da variação do teor em água e massa volúmica. A higroscopicidade consiste na adaptação da madeira à higrometria do ambiente em que esta se insere fazendo variar as suas propriedades físicas e mecânicas. Daí que seja importante aplicar madeira que tenha um teor em água próximo da humidade de equilíbrio higroscópico de forma a evitar variações de volume. O teor em água ótimo é de 12%, sendo

que só utilizando valores próximos deste poderemos evitar problemas de retratibilidade volumétrica.

Por outro lado, a madeira apresenta um valor de massa volúmica baixo quando comparada a outros materiais com a mesma ordem de grandeza de resistência mecânica e módulo de elasticidade o que resulta num grande potencial de utilização como material de uso estrutural.

1.2 MADEIRA DE ROLARIA DE PINHO BRAVO

1.2.1 CARACTERIZAÇÃO

As peças de madeira de rolaria como material de construção apresentam várias vantagens de entre as quais a sua resistência, baixo peso, reduzido consumo primário de energia de produção, sustentabilidade, a sua boa relação resistência-peso facilita o manuseio em obra, torna as estruturas mais esbeltas e reduz os esforços nas fundações. Em relação à mão de obra, o emprego deste material aumenta a rapidez de execução e não impõe utilização de mão-de-obra altamente qualificada, nomeadamente se houver uma preparação adequada das peças e ligações em fábrica. Além disso, a disseminação das áreas de crescimento por grande parte do país assegura a disponibilidade próxima das obras, o que se traduz em redução de custos de transporte e de impacte ambiental. A este respeito, e para os desenvolvimentos futuros, será interessante proceder-se ao estudo de uma solução semelhante utilizando rolaria de eucalipto.

Como vantagens, apresenta-se a melhoria da estabilidade e das características mecânicas, já que o material é deixado na sua forma natural mantendo-se portanto as fibras longitudinais. Resulta que apresentam maior resistência media, maior rigidez e menor variação em comparação com as peças de madeira serrada.

A principal desvantagem prende-se com o facto de, devido a características geométricas variáveis, se tornar difícil obter peças retilíneas – Variabilidade dimensional. No entanto, sendo a aplicação em vista constituída por estruturas de pequeno porte e elementos de comprimentos pequenos a médios, este inconveniente poderá ser ultrapassado com uma oferta adequada em quantidade de matéria-prima.

1.2.2 PROPRIEDADES MECÂNICAS

Para se perceber o comportamento mecânico da madeira deve ter-se em conta a organização da sua estrutura anatómica, isto é, a concentração e o arranjo do seu tecido celular partindo mesmo da análise a nível químico. Assim, não pode ser analisada a resistência

mecânica global de um elemento estrutural, mas sim compreender-se o tipo de sollicitação. Considerando simplificada que a madeira tem comportamento mecânico transversal isotrópico, existem de grosso modo dois tipos de sollicitações diferentes: na direção paralela e perpendicular às fibras. Como ordem de grandeza, a resistência à tração paralela às fibras em madeira limpa é cerca de 50 vezes superior à mesma sollicitação na direção perpendicular, devido ao facto de se verificar uma aproximação das fibras longitudinais da madeira quando sollicitadas à tração paralela, o que se traduz numa maior coesão. Contrariamente, a compressão na direção longitudinal faz com que se verifique uma separação e tendência para a instabilização das fibras, o que resulta numa resistência inferior em 40% face à sollicitação em tração (Negrão 2009).

Neste contexto, as propriedades mais relevantes são a tração e compressão na direção paralela ($f_{t,0}$ e $f_{c,0}$) e perpendicular às fibras ($f_{t,90}$ e $f_{c,90}$), a flexão (f_m) e o corte (f_v). Em relação ao comportamento da madeira em tração, pode ser considerado próximo do elástico linear sendo praticamente linear até à rotura (frágil no caso) que, para as madeiras resinosas correntes, ocorre para valores da ordem dos 80-90 N/mm². Os valores de resistência à tração na direção paralela e perpendicular às fibras são de difícil determinação experimental pelo que é frequente obter-se o primeiro a partir do valor da resistência à flexão e por sua vez, o segundo através da massa volúmica (EN 338, expressão 4).

Por outro lado, em compressão, na direção paralela às fibras, a madeira tem comportamento aproximadamente elástico linear seguido de cedência com alguma capacidade de deformação plástica, resultante do esmagamento das fibras. A rotura ocorre para valores entre 40-50 N/mm² para madeiras resinosas comuns (Negrão, 2009). Contudo, na direção perpendicular às fibras, a madeira assume valores bem mais baixos mas capacidades de deformação plástica mais elevadas, sendo que para efeitos de dimensionamento é admitido comportamento elasto-plástico para este tipo de sollicitação (ver Figura 1.1).

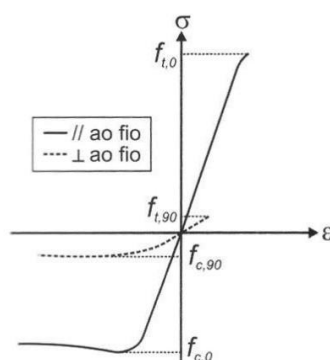


Figura 1.1- Curvas tensão-extensão para madeira sollicitada em tração e compressão (Negrão, 2009)

Em relação às características mecânicas tomar-se-ão como base os resultados obtidos no trabalho de (Morgado, 2012) no qual foram estudadas duas amostras de toros de pinheiro bravo em Portugal, uma recolhida na região Norte e outra na região Centro. Foi tida em conta a classificação da norma EN 338 (CEN, 2003) porque, embora esta norma tenha sido concebida para madeira de secção retangular, nota-se que as amostras estudadas se comportam de forma semelhante às da classe C30, segundo o mesmo autor.

Também, no decorrer da comparação com a madeira serrada, verificou-se que, em termos de resistência à flexão e módulo de elasticidade, a madeira de secção circular é semelhante à madeira de secção retangular da classe de qualidade EE segundo a NP4305 (IPQ, 1995), o que está em linha com o afirmado no parágrafo anterior, uma vez que esta classe de qualidade corresponde sensivelmente à classe de resistência C35 segundo a EN338 (ver tabela 1.1).

Por outro lado, deve ter-se em conta a eventual necessidade de torneamento já que, se este se verificar e de acordo com este estudo, a resistência à flexão vê-se reduzida em 35% e a resistência à compressão em 12%, sendo pouco significativas as diferenças em termos de módulo de elasticidade.

	$f_{m,k}$ (MPa)	$f_{c,0,k}$ (MPa)	$E_{0,mean}$ (GPa)	$E_{0,05}$ (GPa)	ρ_{mean} (Kg/m ³)	ρ_k (Kg/m ³)
Madeira serrada (Classe EE)	35	24,7	14	9,38	610	490
Madeira serrada (Classe E)	18	18	12	8	580	460
Amostra de toros	38,6	24,6	13,6	9,1	528,8	444,6
Amostra de madeira limpa	55,7	28,1	10,8	7,2	543,2	445,7

Tabela 1.1 - Propriedades mecânicas da madeira de rolaria de Pinho bravo (Morgado, 2012)

Outra característica comportamental da madeira da qual se torna pertinente falar é a Fluência, que consiste na variação da deformação ao longo do tempo perante a ação de uma carga que se mantém constante. Como a madeira é um material viscoelástico, a sua deformação depende do histórico do carregamento, ou seja, com a atuação de uma carga constante aplicada num intervalo de tempo, a madeira apresenta deformação elástica mas também um acréscimo de deformação ao longo do tempo e, mesmo se o carregamento for retirado não será totalmente recuperada a deformação, mantendo-se uma deformação residual variável (ver Figura 1.2).

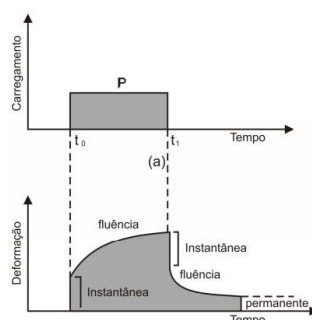


Figura 1.2 - Comportamento viscoelástico sob carga constante (Melo & Menezzi, 2010)

1.2.3 DURABILIDADE E PRESERVAÇÃO

A madeira com o devido tratamento tem uma durabilidade bastante grande. No que respeita à tratabilidade e durabilidade natural da madeira pode seguir-se a norma (EN350-2, 1994) que classifica as diferentes espécies quanto à classe de risco da utilização, e a norma (EN335-1, 2006), que define as classes de uso da madeira nos diferentes ambientes.

Hoje em dia já existem várias alternativas para o aumento da resistência ao ataque dos agentes xilófagos, como fungos e insetos, que são uma das razões para a degradação dos elementos estruturais de madeira. Como exemplo da capacidade da madeira resistir com o passar dos tempos são os achados arqueológicos como peças antigas de madeira em sarcófagos, embarcações, esculturas, armas, utensílios domésticos, instrumentos musicais e elementos de construção. O caso de Quioto no Japão mostra que a questão da durabilidade pode, com os devidos cuidados na escolha e tratamento da madeira, ser ultrapassada. Aí podem ser observados/visitados os seus templos seculares construídos com estruturas de madeira.

Os ambientes húmidos têm de receber uma atenção especial no que respeita à durabilidade porque uma estrutura não ventilada ou em permanente contacto com a humidade excessiva está mais suscetível à degradação. Contrariamente, em ambientes secos há menor risco de degradação (Negrão & Faria, 2009), já que nestes casos praticamente não há ação de fungos mas existe o problema das térmitas da madeira e alguns tipos de caruncho.

Segundo Calil (2006), o projetista pode garantir a durabilidade tendo atenção a três fatores importantes. Então, em primeiro lugar, um melhor detalhamento de projeto irá resultar num projeto mais eficiente por exemplo com o cuidado de prever a proteção da chuva e dos raios solares tanto quanto possível, prever uma drenagem eficiente das águas assim como a secagem das áreas húmidas.

A madeira de pinheiro bravo é considerada de baixa durabilidade natural. No entanto, apresenta uma alta permeabilidade às soluções de preservação que lhe conferem um desempenho adequado, resultando numa vida útil de no mínimo 50 anos dependendo do processo de tratamento escolhido, Calil (2006).

No que diz respeito a este tema, existem duas causas principais que afetam a durabilidade. Os agentes bióticos como insetos e fungos e os agentes abióticos que englobam os condicionantes físicos, mecânicos, químicos e climáticos. Os agentes bióticos necessitam de algumas condições para sobreviverem como a temperatura, a presença de oxigénio, um ambiente húmido e uma fonte de alimento que seria a própria madeira.

O apodrecimento devido aos fungos é um problema bastante comum, pois sendo a madeira um material higroscópico, a eventual humidade elevada garante as condições ideais para a proliferação destes organismos. Como sintomas deste problema, tem-se a perda de resistência, o amolecimento, a desintegração e a descoloração. Nos locais em que a humidade não ultrapasse os 20%, não existirá deterioração da madeira enquanto noutras situações terão de ser previstas formas de tratamento adequado de forma a ter-se um bom comportamento. A aplicação que se pretende deverá necessariamente usar madeira tratada, porque se trata de classe de uso 4 (exposição aberta aos elementos e contato com o solo).

A infestação de insetos constitui outro dos entraves à durabilidade se não for devidamente prevenido com tratamento, pois várias espécies de insetos usam a madeira como abrigo ou como fonte de alimentação. Em relação a estes agentes, a humidade não é tão determinante mas o risco de infestação é grande pelo que deverá ser previsto um tratamento inseticida e termiticida adequado.

No que respeita aos agentes abióticos, estes para além de destrutivos, podem ainda destruir a camada de preservação e expor a madeira não tratada ao ataque dos agentes bióticos. Assim, a luz ultravioleta por exemplo, degrada a superfície da madeira normalmente numa pequena espessura, não tendo grande influência à exceção das zonas que são afetadas de forma contínua onde poderá causar uma diminuição da secção de madeira.

A corrosão, normalmente negligenciada, também constitui uma ameaça mais forte à durabilidade das ligações metálicas, que serão usadas no caso presente. Esta pode ser significativa em algumas situações como por exemplo em ambientes marinhos em que a água salgada pode acelerar a degradação aquando da interação da humidade da madeira com o aço da ligação metálica e degrada as células da madeira. Este efeito pode ser minimizado com o uso de ligações galvanizadas ou não ferrosas. Dado que terá de ser usada madeira tratada, a proteção das ligações metálicas terá de ser feita cuidadosamente, nomeadamente com o nível adequado de galvanização, (quadro 4.1 do EC5-1-1).

A degradação química é outra das formas de agentes abióticos, a presença de ácidos ou bases pode causar dano à madeira pois atacam a celulose e hemicelulose, deixando a madeira esbranquiçada e causando perda de resistência. Também o movimento de nós e distorções pode constituir um problema de durabilidade, como no caso de ligações montadas em elementos de rolaria verde e deixados a secar, o que pode resultar em retração, fissuras ou distorções.

Em Portugal, o início da preservação das madeiras é relativamente recente (início do séc. XX) com as travessas das linhas férreas e os postes de telefone e telégrafo. Os primeiros produtos eram aplicados por pincelagem e só em 1952 surgiu a utilização da impregnação por vácuo utilizando sais – autoclave – existindo atualmente várias empresas (ver tabela 1.2) a fazê-lo com a utilização do produto Tanalith. A autoclave consiste em submeter o produto preservador a pressões que chegam a atingir por vezes mais de 1,5 Mpa de forma a fazer penetrar o líquido nos elementos de madeira.

Empresas	Localização
Artur Campos, Lda	Vila do Conde
Carmo, Lda	Oliveira de Frades
	Pegões
	Almeirim
Cortima	Mondim de Basto
CTMT- Centro Técnico de madeiras tratadas	Leiria
David Calaveiras - Madeiras tratadas, Lda	Lousã - Coimbra
Madeiras Afonso, Lda	Monte Redondo - Leiria
Martins & Catrau - Industrias de Madeiras Tratadas, Lda	Meca - Lisboa - Alenquer
MTL - Madeiras tratadas, Lda	Monte Redondo - Leiria
	Castelo de Vide
Pinhal Nova - Madeiras tratadas, Lda	Proença-a-Nova
Premad - Preservação Madeiras, S.A.	Alcácer do Sal
Soprem - Norte - Construções e comercio de madeiras , Lda	Vila Nova de Famalicão
Tecnocarril - Soc. De Serv. Industriais e ferroviários, Lda	Entroncamento
Toscca - equipamentos em madeira, Lda	Oliveira de Frades

Tabela 1.2 - Empresas que efetuam tratamento de preservação de madeira em Portugal (Sousa Paulo, 2011).

1.2.4 SEGURANÇA E RESISTÊNCIA AO FOGO

Contrariamente àquela que pode ser a primeira apreciação do utilizador comum, a madeira apresenta uma boa resistência ao fogo pois, quando sujeita a altas temperaturas, não perde as suas funções estruturais ao contrário do aço e do betão armado que, caso não tenha o recobrimento adequado, entram em cedência. Para além disso este material não sofre de oxidação ao contrário do metal. Segundo Negrão e Faria (2009), para os mesmos casos de projeto, a madeira apresenta melhor resistência ao fogo do que as estruturas metálicas e outros materiais, isto se as estruturas de madeira estiverem corretamente dimensionadas.

Na figura 1.3 pode observar-se uma situação que espelha bem as características de resistência da madeira como material estrutural, pois vê-se como se deformou completamente a estrutura de aço enquanto a viga de madeira continua a sustentar o seu peso bem como as vigas de aço, curiosamente. Também se pode observar a dimensão dos pregos que leva a concluir que a secção foi gradualmente consumida uma vez que a madeira é um material combustível.

Como se sabe, a madeira é um material combustível, ao contrário do aço e do betão. Tal como os demais combustíveis sólidos, a madeira, em condições normais, não se queima diretamente: primeiro decompõe-se em gases que, expostos ao calor, convertem-se em chamas que, por sua vez, aquecem a madeira ainda não atingida e promovem a libertação de mais gases inflamáveis, alimentando a combustão.

As peças robustas de madeira, quando expostas ao fogo, formam uma camada superficial de carvão, que age como uma espécie de isolante (6 vezes mais isolante que a própria madeira, Negrão, 2009), impedindo a rápida saída de gases inflamáveis e a propagação de calor para o interior da secção, resultando num aquecimento e degradação do material a uma velocidade menor e, assim, colaborando favoravelmente para melhorar a capacidade de sustentação das cargas da edificação.

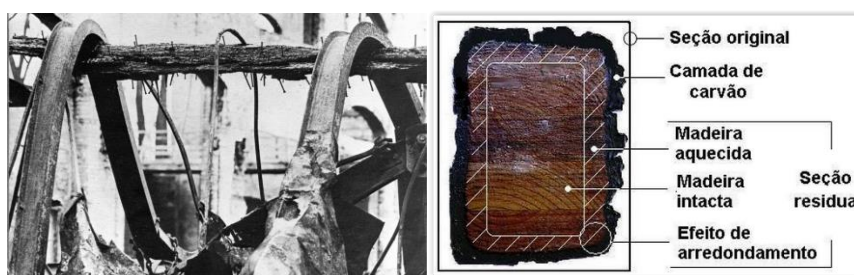


Figura 1.3 - Viga de madeira suporta dois perfis metálicos após incêndio (Dias, 2007)

1.2.5 SUSTENTABILIDADE

A madeira de secção circular é um material renovável, reciclável, ecológico e biodegradável ao contrário de outros materiais de construção como o aço ou o betão. Para além disso, é um dos produtos que requer menor energia para a sua transformação.

Este material de construção provém da floresta, sendo que tem um papel importantíssimo em diversos aspetos dentro de cada país. São as florestas que fixam dióxido de carbono e libertam oxigénio ajudando a proteger o planeta do aquecimento global. Por conseguinte, as árvores têm um papel imprescindível para a manutenção da qualidade do ar.

Outro aspeto sustentável é o facto de apresentar elevada resistência mecânica quando comparada com o seu peso o que se reflete na redução do tamanho das fundações e redução do efeito da ação sísmica. Também, quando devidamente arejada e seca, mantém uma grande durabilidade, um excepcional isolamento térmico, acústico e elétrico.

Como se pode constatar no artigo “Utilização da Madeira na Construção” (Madeira estrutural, 2009) é o material que requer menor quantidade de energia desde o fabrico ao final da obra. Segundo (Júnior - 2004), a obtenção de uma tonelada de madeira, precisa 5 vezes menos energia do que a produção da mesma quantidade de vidro, 14 vezes menos que o equivalente em aço e 126 vezes menos que uma tonelada de alumínio.

Por outro lado, e segundo Winter (1998), a madeira, em metade constituída por carbono, consome cerca de 940 kg de CO₂ da atmosfera sendo que esta quantidade só volta a ser devolvida à atmosfera quando a madeira apodrecer ou for queimada, facto que sublinha mais uma vez o carácter ecológico da madeira.

1.2.6 MÃO-DE-OBRA E EQUIPAMENTOS

A utilização em construção da madeira, em detrimento do betão armado ou do aço, constitui também uma mais-valia no que diz respeito ao manuseio dos elementos em obra assim como nas deslocações para os locais onde decorrerá, e à quantidade de mão-de-obra necessária à realização de determinado projeto. Para além disso, está à disposição dos responsáveis pela obra uma mais rápida e eficiente montagem, uma vez que não é necessário um período de presa e endurecimento, como no caso do betão.

1.2.7 MADEIRA DE SECÇÃO CIRCULAR VS MADEIRA SERRADA

Uma vez que é usada a totalidade da sua secção, a madeira de secção circular, em comparação com a madeira serrada, exige menos processamento e logo menos desperdício de material lenhoso e de energia no seu fabrico. Como consequência disto, segundo Lukindo et al. (1997), *a madeira de secção circular custa cerca de 1/3 a 1/5 do preço da madeira serrada, o que a torna num material low cost, sendo um dos mais baratos no seio das madeiras*. Também, deve ter-se em conta que a madeira de secção circular é em 30 % mais resistente do que a madeira serrada (Sandoz, 1991) e deve isso à continuidade das fibras que não é interrompida com a serração (Boren, 1998).

Um aspeto importante é que a madeira de secção circular oferece boa resistência a esforços de tração e de compressão, sendo ideal para a aplicação a estruturas treliçadas.

2 ENERGIA FOTOVOLTAICA

A fonte de energia mais utilizada no mundo, o petróleo, não é renovável e a sua taxa de consumo cresce exponencialmente sendo que se constitui como o principal impulsionador de guerras, conflitos geopolíticos e sociais sendo também responsável pelo efeito de estufa.

Entretanto, fontes de energia “verdes” não são devidamente valorizadas e aproveitadas em termos globais. É o caso da fotovoltaica, que de forma indireta é objeto do estudo sobre a qual se contextualiza o seu panorama atual com referências a projetos realizados em Portugal e no Mundo.

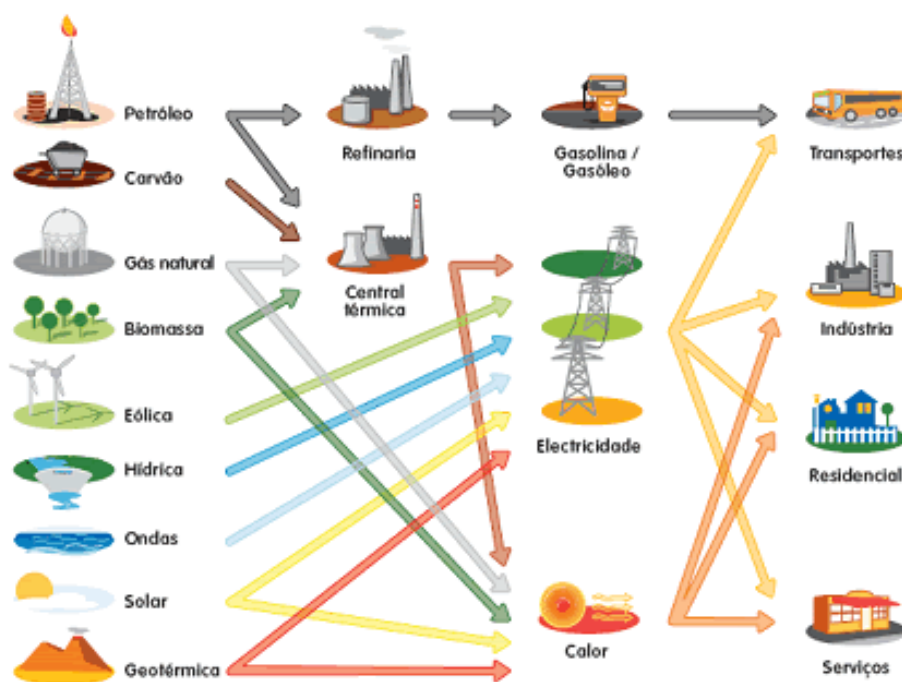


Figura 2.1 - Ciclo de energia (www.portal-energia.com)

O sol é assim a principal fonte de energia do planeta, sendo responsável pela manutenção das várias formas de vida terrestre e para além disso pode ser considerado um recurso praticamente inesgotável e constante.

A partir de uma camada chamada fotosfera com cerca de 300 kms de espessura e com uma temperatura superficial de 5800°K (5500°C), é emanada a energia que chega à Terra. Na sua origem estão reações de fusão dos núcleos dos átomos de hidrogénio que originam núcleos de hélio, sendo radiada para o espaço sob a forma de energia eletromagnética a uma velocidade de 300000 km/s.

De acordo com a WMO (World Meteorological Organization), pode-se dizer que a radiação solar incidente sobre uma superfície perpendicular ao eixo Terra-Sol que se situe no topo da atmosfera é de 1367 W/m². Esta radiação reflete uma distribuição espectral constituída por radiação gama dos raios ultravioleta de 7%, luz visível de 47% e raios infravermelhos de 46%.

Depois de atravessar a atmosfera, tendo em consideração um dia de céu limpo, a radiação irá atingir a superfície da Terra com uma potência a rondar aproximadamente 30% inferior àquela que se regista no topo da atmosfera, ou seja, cerca de 1000W/m². A radiação que atinge o solo pode ser de três tipos diferentes: Radiação direta - que atinge diretamente a superfície; Radiação difusa - que pode ser desviada em diferentes direções pelos componentes da atmosfera; e Radiação refletida - que é a forma de radiação proveniente da reflexão no solo e objetos circundantes.

O sol produz mais energia num segundo que toda a energia consumida pela humanidade desde o começo dos tempos (www.portal-energia.com). Por outro lado, refira-se que a energia que chega à terra durante um ano proveniente do sol equivale a 15000 vezes a energia total utilizada pelo Homem no mesmo período.

No que diz respeito a Portugal, tem-se à disposição um potencial bastante grande constituindo-se como um dos países da Europa com melhores condições para aproveitar o recurso solar (ver Figura 2.2). Neste contexto, é de referir que o número médio anual de horas de sol varia entre 2200 a 3000, no continente e, entre 1700 e 2200 respetivamente nos Açores e na Madeira. Como termo comparativo, para se perceber, na Alemanha, varia de 1200 a 1700 horas.

No que diz respeito ao uso, as vantagens em se utilizar a energia solar são: a utilização final direta, as aplicações distribuídas e a disponibilidade geográfica. Então, a energia solar pode ser utilizada diretamente para aquecer e iluminar edifícios, aquecer água de piscinas, aquecer água para fornecimento doméstico, serviços, indústria e agropecuária. Para além disto, a energia solar possibilita também a produção de elevadas temperaturas para a produção de vapor no decorrer do processo de geração de eletricidade pois através do efeito fotovoltaico pode converter-se a energia solar em energia elétrica.

Esta forma de energia constitui uma opção económica em variadas aplicações nomeadamente em situações de locais afastados da rede. Contudo, o elevado preço deste tipo de sistemas é um entrave à sua expansão para outros sectores embora recentemente isto venha a ser contrariado devido à baixa dos preços dos módulos fotovoltaicos.

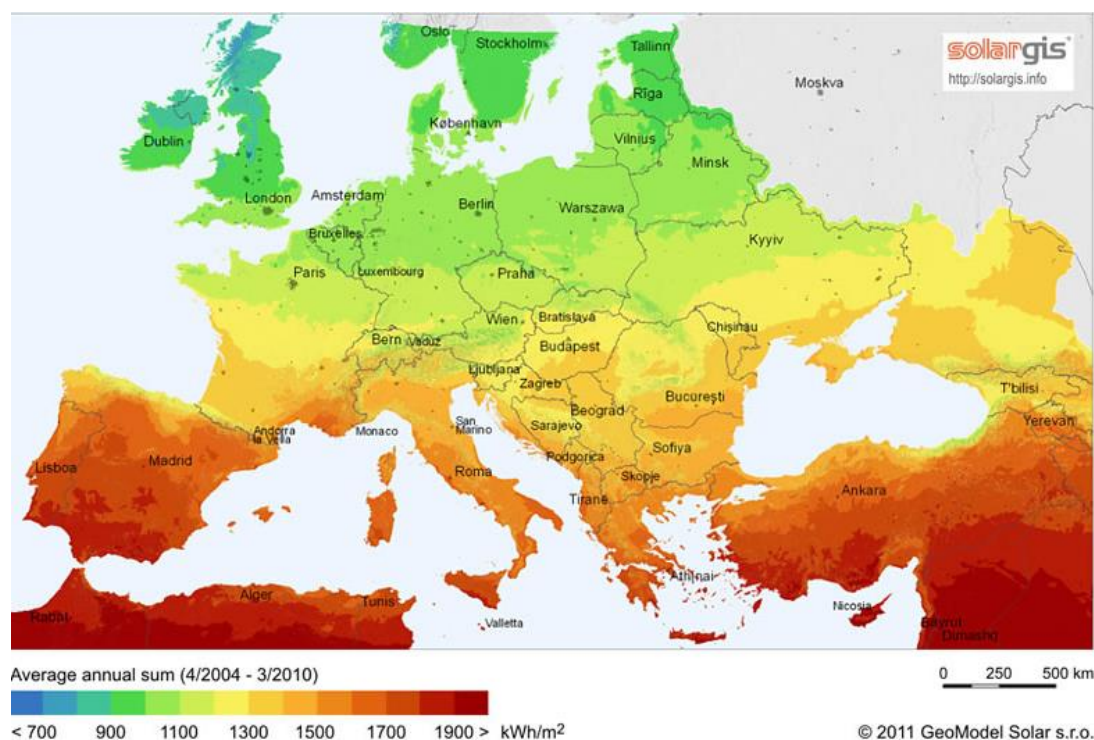


Figura 2.2 - Irradiação solar na Europa (Solargis, 2011)

Em termos sociais, a energia fotovoltaica tem outras vantagens para além da energia produzida, se se considerar que os investimentos desta envergadura podem induzir o desenvolvimento local e consolidar a economia, melhorando o ambiente e aumentando a fiabilidade do abastecimento de energia eléctrica, diminuindo os custos ao nível das infraestruturas de produção centralizada, transporte e distribuição de electricidade.

Para se poder ter uma ideia da ordem de grandeza, faça-se a comparação com a potência contratada pela EDP. Então, tendo uma potência contratada de 6,9 kW/casa, essa será a potência máxima que é possível ter em casa, ou seja, que é possível consumir. Assim, tendo 1000 casas a consumir ao máximo da capacidade, consomem-se 6900 kW, o equivalente a 6,9 MW. Por analogia, se se tiver 10 MW (10000 kW) poder-se-á servir no mínimo cerca de 1450 casas se

todas elas estiverem a consumir toda a potência contratada, o que dificilmente acontece pelo que estes números constituem uma estimativa por defeito.

O setor das energias renováveis alcançou um crescimento mundial recorde no ano de 2015 segundo relatório publicado recentemente pela Agência Internacional de Energias Renováveis (Irena). A capacidade instalada mundial aumentou de 8,3% (153 gigawatts) face a 2014 com os contributos da energia solar (26%), da energia eólica (+17%), da bioenergia e geotérmica (+5%) e da energia hídrica (+3%). Estes indicadores de crescimento mostram que estão a ser feitos esforços no caminho certo e sustentam o objeto do presente trabalho. Apresenta-se o contexto de produção de energias renováveis na tabela 2.1 e 2.2.

	Produção Anual (GWh)									
	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016 ¹
Total Renovável²	16 593	15 140	19 016	28 754	24 692	20 411	30 610	32 405	25 357	26 757
Hídrica	10 449	7 298	9 009	16 547	12 114	6 660	14 868	16 412	9 762	10 866
Grande Hídrica (>30MW)	9 405	6 281	7 648	14 454	10 615	5 683	12 931	14 168	8 633	9 561
em bombagem	422	499	724	399	578	1 038	1 138	843	1 146	1 168
PCH (>10 e <=30 MW)	500	459	619	1 005	637	411	887	1 014	482	574
PCH (<= 10 MW)	544	558	742	1 088	862	566	1 050	1 229	647	731
Eólica	4 036	5 757	7 577	9 182	9 162	10 260	12 015	12 111	11 609	11 963
Biomassa³	1 549	1 500	1 713	2 226	2 467	2 496	2 516	2 530	2 391	2 344
c/ cogeração	1 385	1 338	1 364	1 560	1 722	1 710	1 780	1 765	1 607	1 572
s/ cogeração	164	163	349	665	745	786	736	765	784	773
Resíduos Sólidos Urbanos	551	561	579	577	592	490	571	481	592	590
Fração renovável	276	281	290	289	296	245	286	240	296	295
Biogás	58	71	83	100	161	210	250	278	297	298
Geotérmica	201	192	184	197	210	146	197	205	204	204
Fotovoltaica	24	41	160	215	282	393	479	627	797	786
Total normalizado (Diretiva 2009/28/CE)	17 593	18 737	20 411	22 905	25 094	25 438	26 195	27 532	27 540	27 012
Hídrica normalizada	11 390	11 169	10 978	11 478	12 187	11 587	11 333	11 860	11 555	11 085
Eólica normalizada	4 096	5 482	7 003	8 401	9 492	10 361	11 135	11 791	11 999	11 999
Produção Bruta + Saldo Importador⁴	54 319	54 901	54 259	56 316	54 697	53 470	53 310	52 861	53 272	52 964
% de renováveis (Real)	30,5%	27,6%	35,0%	51,1%	45,1%	38,2%	57,4%	61,3%	47,6%	50,5%
% de renováveis (Diretiva)	32,4%	34,0%	37,5%	40,7%	45,9%	47,6%	49,1%	52,1%	51,7%	51,0%

¹ Ano-móvel: fevereiro de 2015 a janeiro de 2016.

² Exclui a fração não renovável de RSU.

³ Inclui resíduos vegetais, florestais e licores sulfúricos.

⁴ Produção Bruta + Saldo Importador é estimado para 2014 e 2015. Exclui a bombagem.

Tabela 2.1 - Produção de energias renováveis em Portugal (DGEG)

	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Consumo de Energia Final	19 292	18 708	18 311	17 832	17 699	16 494	15 640	15 167	15 167
Carvão	26	168	71	22	50	20	19	19	12
Petróleo	10 821	9 841	9 582	9 324	9 106	8 334	7 513	7 286	7 372
Gás natural	1 337	1 431	1 451	1 378	1 514	1 525	1 551	1 524	1 527
Outros não renováveis	41	37	39	39	54	76	149	70	86
Electricidade	4 083	4 216	4 159	4 126	4 289	4 162	3 977	3 889	3 886
Calor	1 219	1 221	1 202	1 123	1 336	1 370	1 326	1 370	1 226
Renováveis³	1 766	1 793	1 807	1 820	1 349	1 007	1 105	1 010	1 057
Contribuição renovável	19,5%	20,8%	20,6%	24,1%	26,8%	24,7%	23,8%	29,1%	28,4%

³ Inclui biomassa, solar térmico, geotermia e biocombustíveis. Exclui componente renovável na electricidade e calor.

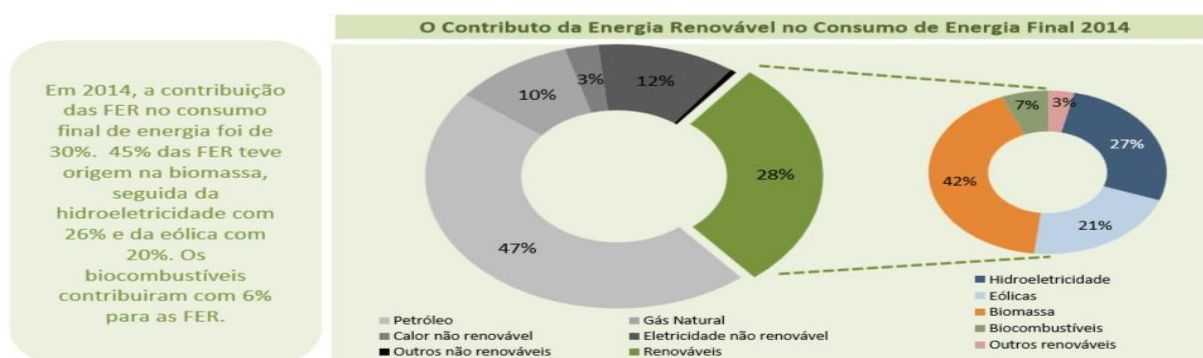


Tabela 2.2 - Contributo das energias renováveis no consumo de energia em Portugal (DGEG)

2.1 O EFEITO FOTOVOLTAICO

O efeito fotovoltaico, descrito por Edmond Becquerel em 1839, consiste no aparecimento de uma diferença de potencial nos extremos de uma estrutura de material semicondutor, produzida pela absorção da luz sendo que a energia fotovoltaica é então a energia obtida através da conversão da luz em eletricidade.

A célula fotovoltaica constitui a unidade básica do processo de conversão da energia sendo o Silício (segundo elemento mais abundante no globo terrestre), o material mais utilizado no seu fabrico sob diversas formas como o monocristalino, policristalino e amorfo. Contudo, a busca de alternativas é intensa, concentrando-se na área de filmes finos na qual se enquadra o Silício amorfo. Esta alternativa requer menor quantidade de material e menor quantidade de energia no fabrico possuindo portanto maior eficiência energética.

2.2 FUNCIONAMENTO DO PAINEL SOLAR

Um painel solar é constituído por várias células fotovoltaicas juntas no mesmo circuito e por sua vez as células fotovoltaicas são formadas por duas camadas de materiais semicondutores, uma com carga positiva e outra com carga negativa. No processo decorrente da incidência da luz sobre as células fotovoltaicas, fótons são refletidos ou absorvidos pela célula. Assim que forem absorvidos pela célula fótons suficientes, estes migram para a camada positiva criando uma diferença de potencial entre as duas camadas. A eletricidade será criada com a circulação dos eletrões pelo circuito aquando da ligação do sistema a um eletrodoméstico. Cada uma destas células produz cerca de 1-2 watts. Para que se obtenha a potência desejada é necessário combinar e concentrar várias células num módulo solar compacto e consequentemente, combinar esses módulos em série ou em paralelo de forma a obtermos a potência necessária de acordo com o projeto.

A **associação em série** consiste em ligar o terminal positivo ao terminal negativo do outro módulo e assim sucessivamente sendo que se as irradiâncias forem semelhantes, as tensões são somadas e a corrente elétrica é constante (ver Figura 2.3).

$$V = V1 + V2 + \dots + Vn$$

$$I = I1 = I2 = \dots = In$$

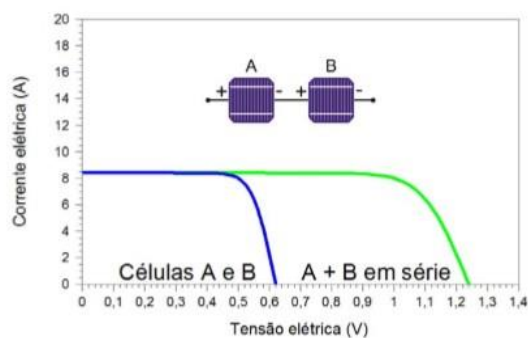


Figura 2.3 - Esquema elétrico representativo de duas células ligadas em série (Pinho, 2014)

Por outro lado, a **associação em paralelo** consiste em ligar os terminais positivos dos dispositivos assim como os terminais negativos entre si o que resulta em correntes que são somadas e tensões constantes (ver Figura 2.4).

$$V = V1 = V2 = \dots = Vn$$

$$I = I1 + I2 + \dots + In$$

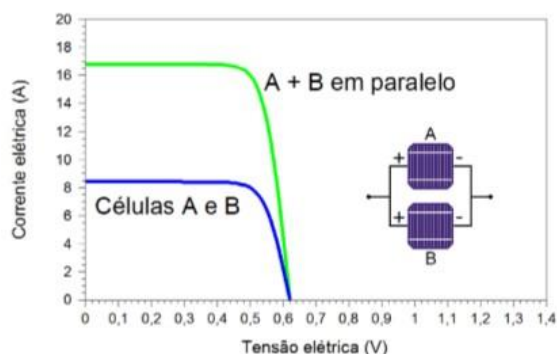


Figura 2.4 - Esquema elétrico representativo de duas células ligadas em paralelo (Pinho, 2014)

W_p = Watt de pico é a máxima potência obtida em condições ideais;

W_h = Watt-hora é a potência gerada ou consumida por hora;

A_p = Ampère de pico é a corrente máxima obtida em uma condição ideal;

A_h = Ampère hora a corrente máxima obtida ou consumida em uma hora;

Volt (V) é usado para medir Tensões;

Ampère (A) é usado para medir Corrente;

Watt (W) é utilizado para medir a potência e é o resultado da multiplicação de tensão pela corrente:

$$W = V \times A$$

2.2.1. CURVA CARACTERÍSTICA

O conhecimento da curva característica da célula fotovoltaica é fundamental para se obter um correto dimensionamento da produção fotovoltaica pois só assim se maximiza o desempenho desta. Esta curva que se apresenta na Figura 2.5, contém uma série de variáveis que se definem abaixo :

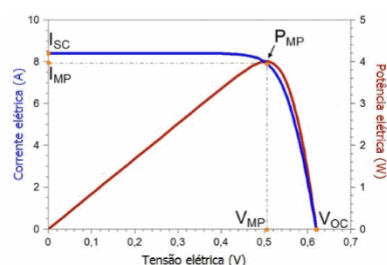


Figura 2.5 - Curva característica da célula fotovoltaica (Pinho, 2014)

I_{SC} : Corrente de curto-circuito correspondente ao valor máximo de corrente que uma célula pode entregar a uma carga sob condições de potência nula;

V_{OC} : Tensão em circuito aberto que corresponde ao valor máximo de tensão que uma célula pode entregar a uma carga sob condições de potência nula;

I_m : Corrente a máxima potência correspondente ao valor de corrente nominal da célula;

V_m : Tensão a máxima potência que corresponde ao valor de tensão nominal da célula;

P_m : Também regularmente conhecido como *MPP – Maximum Power Point*, é o ponto da curva que corresponde à máxima potência produzida pela célula. Este ponto representa o produto entre a tensão máxima e a corrente máxima.

2.2.2. HORA DE PICO SOLAR

A energia solar é recolhida durante um determinado período do dia, indicado em horas. A denominação para este período é designada por hora de pico solar, e pode variar entre 3 a 6 horas diárias, dependendo do mês e do lugar geográfico da instalação. Na Figura 2.6, verifica-se que existe um aproveitamento energético da radiação fora das horas solares de pico, mas em menor quantidade. De forma a simplificar os cálculos de viabilidade económica para as estimativas de produção, é normal considerar que a norte de Portugal este será de aproximadamente 3 horas e a sul de Portugal de 6 horas.

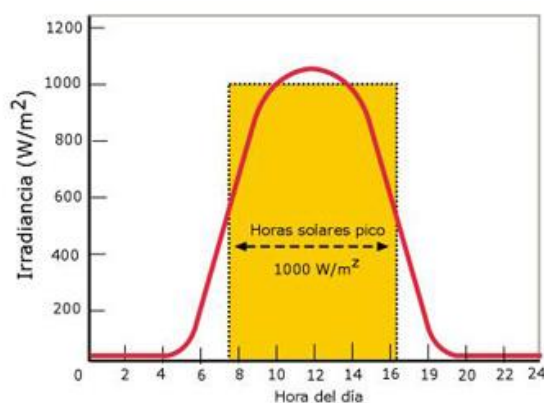


Figura 2.6 - Hora de pico solar (www.calculationsolar.com)

2.3 FUNCIONAMENTO DE UM SISTEMA DE PAINÉIS SOLARES

Os sistemas fotovoltaicos mais utilizados podem ser de três tipos: isolados, híbridos ou ligados à rede e compreendem uma série de equipamentos necessários ao seu bom funcionamento. Assim, de entre os seus vários componentes destacam-se: os módulos, os cabos,

armários de contagem, caixas de junção, inversores, transformadores e, no caso de sistemas autónomos, baterias e controladores de carga.

No caso dos **sistemas isolados**, por precisarem de armazenar a energia elétrica produzida e que não é consumida aquando da geração, estes sistemas necessitam de baterias e controladores de carga/descarga. A energia acumulada será utilizada nos períodos com baixo nível de irradiância solar. Estes sistemas utilizam-se nos casos em que as necessidades de energia não coincidem com os períodos de incidência solar, em situações em que não existe rede de distribuição ou por razões técnicas, económicas, as infraestruturas elétricas são escassas ou inexistentes. Esta tipologia poderá ter ou não inerente o armazenamento.

Relativamente aos **sistemas híbridos**, faz-se a conjugação de um sistema fotovoltaico com outro tipo de sistema de produção de energia como por exemplo o recurso ao motor *diesel*, gás ou eólico. A utilização de diferentes sistemas poderá trazer maior fiabilidade e continuidade embora possam ter um acréscimo de custo devido ao facto de necessitarem de sistemas de controlo mais eficientes.

Os **sistemas ligados à rede** são os mais comuns e são em consequência disso aqueles cuja tecnologia está mais desenvolvida. A energia produzida desta forma pode ser vendida em parte ou na sua totalidade (ver Figura2.7). Dado existirem incentivos à produção de energia proveniente de fontes renováveis, a REN é obrigada a adquirir toda a energia produzida destas formas sendo que o kW é mais caro o que leva os produtores a vender a totalidade da produção.

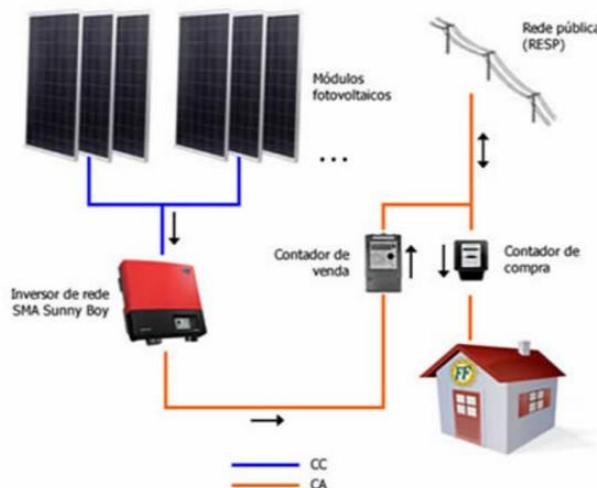


Figura 2.7 - Esquema representativo de um sistema fotovoltaico ligado à rede (SMA)

2.4 EQUIPAMENTOS

Módulos – Os módulos podem ser ligados em série ou em paralelo dependendo da corrente e da tensão desejadas. A tensão de cada um dos módulos é relativamente pequena, da ordem dos 0,5 Volt para o caso de células de silício cristalino. Assim, um módulo de 30 Volt é constituído por 60 células de 0,5 Volt conectadas em série. Dependendo das células que o constituem estes são denominados de forma diferente.

CÉLULAS DE SILÍCIO MONOCRISTALINO

Constituem a primeira geração de células fotovoltaicas e são as mais utilizadas até aos dias de hoje apresentando um processo de fabrico relativamente simplificado. O seu rendimento elétrico é relativamente elevado (aproximadamente 16%, podendo subir até cerca de 23% em laboratório), mas as técnicas utilizadas na sua produção são complexas e caras. Por outro lado, é necessária uma grande quantidade de energia no seu fabrico, devido à exigência de utilizar materiais em estado muito puro e com uma estrutura de cristal perfeita.

O fabrico deste tipo de células de silício começa com a extração do cristal de dióxido de silício. O material é depois desoxidado em grandes fornos, purificado e solidificado. Este processo atinge um grau de pureza em 98 e 99% o que é razoavelmente eficiente sob o ponto de vista energético e custo. Este silício para funcionar como células fotovoltaicas necessita de outros dispositivos semicondutores e de um grau de pureza maior devendo chegar na faixa de 99,999%.

CÉLULAS SILÍCIO POLICRISTALINO

As células policristalinas têm um custo de produção inferior por necessitarem de menos energia no seu fabrico, mas apresentam um rendimento elétrico inferior (entre 11% e 13%, obtendo-se até 18% em laboratório). Esta redução de rendimento é causada pela imperfeição do cristal, devido ao sistema de fabrico.

As células de silício policristalino são mais baratas do que as de silício monocristalino por exigirem um processo de preparação das células menos rigoroso. A eficiência desce em comparação com as células de silício monocristalino.

CÉLULAS DE SILÍCIO AMORFO

As células de silício amorfo são as que apresentam o custo mais reduzido, mas em contrapartida o seu rendimento elétrico é também o mais baixo (aproximadamente 8% a 10%, ou 13% em laboratório). As células de silício amorfo são películas muito finas, o que permite serem utilizadas como material de construção, tirando ainda mais proveito energético.

Uma célula de silício amorfo difere das demais estruturas cristalinas por apresentar alto grau de desordem na estrutura dos átomos. A utilização de silício amorfo para uso em fotocélulas tem mostrado grandes vantagens tanto nas propriedades elétricas quanto no processo de fabrico.

Mesmo apresentando um custo reduzido na produção, o uso de silício amorfo apresenta como desvantagens a baixa eficiência de conversão comparada com as células mono e policristalinas de silício e o facto de serem afetadas por um processo de degradação logo nos primeiros meses de operação, o que reduz a sua eficiência ao longo da vida útil.

Strings – cadeias de módulos fotovoltaicos ligados em série;

Caixa de junção – No caso de sistemas de inversores descentralizados, como aquele que foi utilizado no caso de estudo presente, têm como função agrupar os cabos vindos dos vários inversores consoante o número de entradas que tenham seguindo o dimensionamento elétrico do projeto. Devem ser equipadas com um interruptor geral que atua nas *strings* que estão sob a sua influência. Para além disso, são ainda equipadas com os elementos de proteção, fusíveis e disjuntores.

Cablagem – Num sistema fotovoltaico encontram-se pelo menos 3 tipos de cabo diferentes, cada um com a sua função: os cabos das *strings* (também chamados de cabo solar), o cabo DC e o cabo AC (que devem assegurar o cumprimento dos limites fixados pela tensão nominal, pela intensidade de corrente máxima admissível, e a minimização das perdas na linha). No dimensionamento dos cabos DC deve ter-se atenção redobrada dado que a fraca qualidade dos contactos elétricos poderá levar à ocorrência de arcos e conseqüente risco de incêndio. Nos sistemas em que seja provável a ocorrência de descargas atmosféricas, é recomendado o uso de cabos blindados que por razões de falhas de terra e curtos-circuitos deverão ser monocondutores isolados.

Os cabos de *string* são os responsáveis por fazer a ligação elétrica entre os painéis fotovoltaicos e a caixa de junção (no caso de sistema com inversor centralizado), e devem ser sobredimensionados para uma corrente 25% superior à corrente de curto-circuito do gerador. O cabo principal DC tem a função de estabelecer o contacto elétrico entre a caixa de junção e o inversor (nos sistemas centralizados). O cabo AC é responsável pela ligação entre a saída do inversor e a rede elétrica através do equipamento de proteção (considerando o sistema do nosso caso de estudo, utilizando inversores de *strings*, o cabo AC irá desde os inversores até ao posto de transformação.

Inversor – Os painéis fotovoltaicos fornecem uma tensão e corrente DC, ou seja, corrente contínua, não podendo por isso ser diretamente injetados na rede elétrica de energia sendo necessária a utilização de inversores que transformam a corrente DC em corrente AC, alterna,

que poderá então ser injetada na rede. Os sistemas fotovoltaicos podem ser organizados de várias formas diferentes no que respeita aos inversores (ver Figura 2.8). O esquema de inversor centralizado, em que existe apenas um inversor para um grande número de *strings* não deixando a possibilidade de otimização de cada *string*, tornando portanto o sistema menos eficiente, mas mais barato que as restantes soluções. Por outro lado, inversor *Multistring*, o esquema em que se utiliza um inversor mais pequeno para um reduzido número de *strings*, aproximadamente 4, permitindo obter um sistema com redundância, aumentando o investimento inicial mas, permitindo a continuidade da produção no caso de avaria de algum dos inversores e permitindo também a otimização das *strings* de painéis (tipologia utilizada no presente caso de estudo).

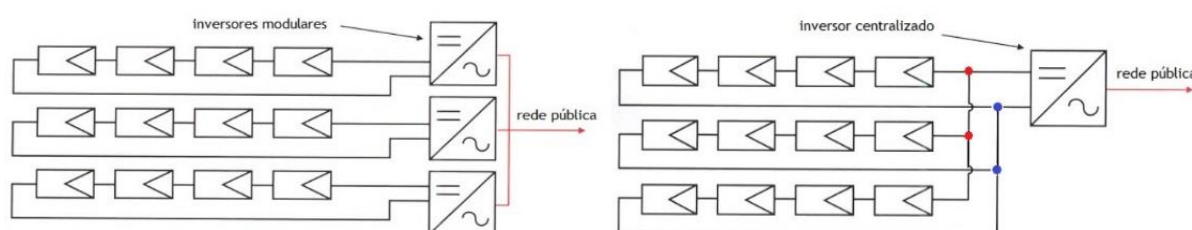


Figura 2.8 - Esquema de sistema de inversores

Transformadores – A necessidade de instalação de um posto de transformação (PT) destinado à elevação da baixa tensão para a média tensão, para que a entrega da energia à rede seja possível. Em Portugal, o produtor terá de adquirir um PT elevador nos casos em que o ponto de consumo associado à central de produção seja abastecido em média tensão com contagem no lado da média e nos casos das grandes produções sem consumo associado, excluindo-se a microprodução e a miniprodução com contagem de consumo na baixa tensão. Normalmente, os PTs com uma potência igual ou inferior a 630 kVA, têm a contagem no lado da baixa tensão, sendo que a contagem é realizada em média tensão para potências superiores.

Q.G.B.T. – Quadro Geral de Baixa Tensão - é instalado com a função de agrupar as chegadas dos inversores descentralizados visto que a ligação deste quadro ao transformador não é direta por serem vários. Neste quadro deverão ser instaladas todas as proteções adequadas para as situações de curto-circuito e de sobretensão, apesar de à saída do inversor o cabo AC ser equipado com estes componentes. Eventualmente, por motivos de falha do sistema ou por eventuais ligações à terra, o fluxo de potência poderá ocorrer do lado da rede para o inversor e desta forma é aconselhável o reforço destas proteções pelo lado da rede. Note-se que este equipamento é também chamado de TRC (*tableau de regroupement de cables*).

Contadores – Tem como função medir a produção efetiva para entrega à rede pública. Os restantes eventuais contadores, independentes da contagem de consumo, deverão ser instalados em local acordado com o distribuidor e devidamente protegidos. Na contagem é utilizado normalmente um contador bidirecional com capacidade de telecontagem que poderá, para além de efetuar a contagem, identificar possíveis defeitos. As entidades competentes deverão autorizar previamente a escolha do contador.

IMPACTO AMBIENTAL

O impacto ambiental da energia produzida com recurso a módulos fotovoltaicos é mínimo. Durante a produção de energia solar não existe qualquer emissão de gases. A questão da reciclagem pós vida útil não está ainda disponível a larga escala, embora se esteja a trabalhar no sentido de desenvolver essa tecnologia, constituindo o tendão de Aquiles desta forma de produção de energia. Os impactos visuais decorrentes da vasta área normalmente ocupada têm vindo a ser contornados com a integração das instalações nas próprias edificações, como no presente caso de estudo, em que a componente de produção de energia funciona como cobertura de estufas destinadas à produção agrícola, visando aproveitar o espaço para desenvolver a economia local e minimizar o impacto estético que um projeto desta grandeza confere.

A emissão de poluentes no decorrer do processo de fabrico das células fotovoltaicas é muitas vezes apontada como um ponto negativo desta forma de energia mas, na verdade, esta é reduzida e bastante controlada. Esta indústria tem grande interesse em preservar a sua imagem de limpa e amiga do ambiente, o que se traduz em rigoroso controlo das emissões.

Assim, a energia produzida por um módulo de silício ao longo de toda a sua vida útil é 9-17 vezes superior à energia consumida no seu fabrico principalmente no processo químico de purificação do silício (desde a matéria-prima até às células). Se se considerarem módulos de filmes finos, esta relação é aproximadamente duas vezes superior.

3 SISTEMAS RETICULADOS EM ROLARIA DE MADEIRA

3.1 ESTADO DA ARTE

As primeiras estruturas de madeira na sua forma natural circular surgem provavelmente após a Idade da Pedra, quando o Homem sai das cavernas e começa a construir as primeiras cabanas que consistiam na configuração de dois toros cravados no solo ligados por laços de materiais vegetais fibrosos e só mais tarde por elementos de ferro ou bronze (ver Figura 3.1).

Hoje em dia, embora se comece a olhar para o uso deste tipo de madeira com outros olhos, a rolaria é usada essencialmente com fins não estruturais como barreiras sonoras, vedações, mobiliário urbano, etc.. Apesar disso, e depois de efetuados estudos de resistência devidamente comprovados, o seu uso não se deve limitar à utilização ornamental, podendo ser usada com funções estruturais com maior frequência. Entre as suas valências enquanto material de construção encontra-se a sua excelente relação resistência/peso e o seu carácter sustentável sendo que, com uma caracterização e dimensionamento adequados dos elementos e ligações, pode eventualmente substituir materiais como o aço ou o betão. Apresentam-se alguns exemplos de aplicação deste material.

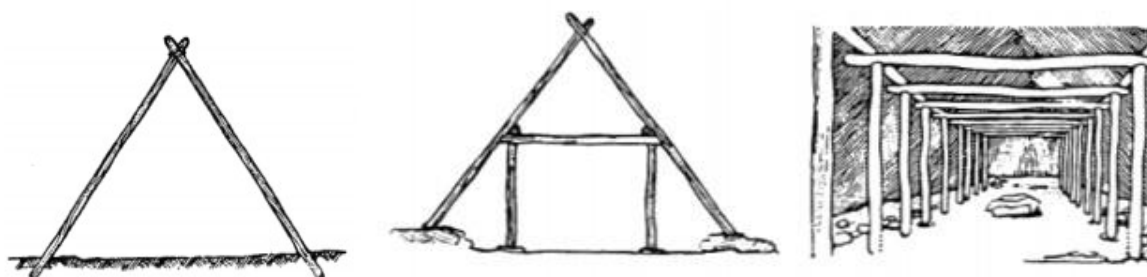


Figura 3.1 - Primeiras estruturas em Rolaria de Madeira (Mateus, 1961)

RAILS DE PROTECÇÃO

Foi estudado o caso de aplicação da rolaria de madeira às barreiras de proteção das vias de comunicação como suporte para as chapas dos *rails* de proteção (ver Figura 3.2). Para além

de ser mais económica, esta solução apresenta bons resultados em termos de resistência a embates (Faller *et al.* (2010).



Figura 3.2 - Exemplo de aplicação da rolaria de madeira a rails de proteção (Morgado 2012)

PARQUES INFANTIS

A aplicação deste material em estruturas de espaços de lazer como parques infantis demonstra que o seu uso pode ser bem mais alargado. Neste caso as secções utilizadas variam entre 50 e 150 mm podendo ser apresentadas várias configurações (ver Figura 3.3).



Figura 3.3 - Exemplo de aplicação da rolaria de madeira a parques infantis (Morgado 2012)

FUNDAÇÕES

Também em fundações, a rolaria de madeira apresenta muito bons desempenhos embora tenha sofrido pouca evolução desde os tempos mais remotos. O seu baixo custo e capacidade de suportar a cravação fazem deste material uma ótima solução neste campo.

Existem vários exemplos na Europa de edifícios que estão há séculos apoiados sobre estacas de madeira como é o caso dos edifícios da Baixa Pombalina da cidade de Lisboa, construídos após o sismo de 1755 (Miná, 2005)(ver Figura 3.4). Grande parte das estacas nestas condições estão ao serviço há centenas de anos, não apresentando problemas.



Figura 3.4 - Cravamento de uma estaca de madeira (Miná, 2005)

EDIFÍCIOS

No que diz respeito a edifícios, existe maior tradição nos países com maior parque florestal como é o caso do Canadá, EUA e países nórdicos, podendo variar entre soluções de pequenos edifícios como quiosques até moradias complexas (ver Figura 3.5). Os diâmetros correspondentes a este uso variam entre os 10 e os 35 centímetros segundo Mill, 2011.



Figura 3.5 - a) Edifício (Ranta-Maunus, 1999) b) Edifício (Beaudette Consulting Engineers Inc, 2001)
c) www.sampac.com.br d) ateliernobody.tumblr.com

Na Figura 3.6 apresenta-se o caso do edifício que é apelidado de Capela Sistina da rolaria de madeira de pequeno diâmetro, a biblioteca de Darby, Montana, EUA com 510 m² de área, no qual são usadas treliças planas Pratt.



Figura 3.6- Edifícios em que são usadas treliças planas de Pratt (Engineers, 2010)

COBERTURAS

Neste tipo de estruturas os toros são ligados a nós, sendo que o dimensionamento das ligações irá fazer a diferença no desempenho da estrutura. A rolaria de madeira é adequada para treliças espaciais onde existem apenas esforços axiais nas barras que as compõem, os diâmetros são pequenos e as secções transversais reduzidas. São exemplos de aplicação deste tipo de estruturas as coberturas de pavilhões. A madeira de secção circular pode também ser usada em treliças planas em que todos os elementos de cada treliça se situam no mesmo plano sendo que existem diversas tipologias diferentes (ver Figura 3.7).



Figura 3.7 - Cobertura (Malo e Ellingsbo, 2010) e Cobertura de uma bancada (Engineers, 2010)

TORRES

A aplicação deste tipo de madeira em estruturas espaciais expandiu o uso de rolaria das coberturas para as torres, nas quais o sistema de ligações é semelhante. Existem vários exemplos de torres, dos quais se referem alguns.

Um deles pode ser encontrado em Fribourg, na Dinamarca, possui cerca de 23 m de altura e os principais elementos são 3 toros com diâmetros entre 450 e 600 mm sendo estabilizada por um sistema de cabos (Huybers, 1996). Em Apeldorn, Holanda, encontra-se uma torre com 27 m de altura, na qual se usam toros com diâmetros a variar entre os 120 e os 200 mm e com comprimento entre os 2,5 e os 3,6m. Na execução desta torre usaram-se ligações de chapa centrais com laços (Yeates, 1999). Ainda na Holanda, em Drenthe, foi construída uma torre com 15m de altura, para cujas ligações foi usada uma solução de bloco metálico. Os toros da base têm 140 mm de diâmetro e os restantes de 120mm. Outro exemplo, no Brasil, é uma torre com 25m de altura com toros de eucalipto em que os pilares de sustentação da estrutura possuem 250mm de diâmetro e os restantes variam entre os 100mm e os 150mm (ver Figura 3.8).



(a) Hofberg, Suíça (b) Lausanne, Suíça (c) Fribourg, Dinamarca

Figura 3.8 - Exemplos de torres construídas com recurso a rolaria de madeira (Calil 2010).

ESTRUTURAS DE CONTENÇÃO DE TERRAS

Outro dos usos da madeira de secção circular são as estruturas de contenção de terras como cortinas autoportantes ou paliçadas de madeira. As primeiras consistem em toros justapostos cravados no solo com ou sem ligação enquanto as paliçadas consistem em toros cravados no solo que suportam toros horizontais ou tábuas de madeira serrada que suportam as terras (ver Figura 3.9).

Por outro lado, poderá usar-se a madeira para estabilização de taludes e margens sendo para tal usados troncos de madeira cravados no solo segundo um determinado ângulo, dando apoio a troncos colocados horizontalmente, designando-se estes sistemas por *crib walls*.



Figura 3.9 - Estabilização de taludes (Verde, 2010; Flach e Frenette, 2000)

PONTES

Outra opção para o uso deste material é a da construção de passagens aéreas como passadiços, pontes pedonais e rodoviárias em pequenos e médios vãos, pelo seu desempenho mecânico e pelo baixo custo quando comparado com outras soluções em aço ou betão. Os passadiços podem ser construídos sobre o solo ou sobre a água, assentam em troncos dispostos verticalmente e podem servir de guarda corpos ao mesmo tempo (ver Figura 3.10).



Figura 3.10 - Exemplos de pontes em madeira de rolaria (Morgado 2012)

3.2 LIGAÇÕES

O comportamento de uma estrutura concebida em madeira de secção circular depende fortemente do adequado dimensionamento das suas ligações e do seu desempenho mecânico. A falha de uma ligação pode comprometer a estabilidade da estrutura e levar ao seu colapso. Por exemplo, no caso do telhado de duas águas com estrutura treliçada triangular no qual se têm ligações fundamentais como o nó de apoio, a emenda do banzo inferior ou o nó de cumeeira, ao acontecer a situação descrita poderá acontecer o colapso da estrutura.

LIGAÇÕES MADEIRA-MADEIRA

Este tipo de ligações é baseado em métodos tradicionais de construção, apresentando por isso baixo valor tecnológico e soluções simples. É um sistema simples e de fácil montagem mas que se reflete numa reduzida versatilidade na construção. O facto de existir a possibilidade de possuir apenas entalhes sem a presença de ligadores torna este tipo de ligação adequado a resistir apenas a esforços de compressão (ver Figura 3.11). No caso de existir inversão de esforços, causada pela ação do vento, deve ser prevista outra forma para resistir a esse tipo de esforço sem prejuízo da estabilidade da estrutura. Este tipo de ligação deve ser cuidado ao nível dos efeitos localizados pois pode haver tendência ao corte paralelo às fibras da madeira, (Calil *et al* 2003).



Figura 3.11 - Exemplos de ligações madeira – madeira (Calil *et al* 2003)

LIGAÇÕES COM CAVILHA DE MADEIRA

Esta tipologia constitui uma alternativa à utilização dos pinos metálicos, apresentando um funcionamento semelhante a estes, no que diz respeito à transmissão dos esforços, mas possuindo a mais-valia de poderem ser usadas em situações não adequadas aos pinos metálicos (ver Figura 3.12). Neste caso a madeira utilizada para a cavilha deve ser da classe de resistência C60, caso contrário, deve-se impregnar as cavilhas de resinas adequadas de forma a aumentar a sua resistência até valores compatíveis com a classe referida, (Calil *et al* 2003).



Figura 3.12 - Exemplos de ligações com cavilha de madeira (Calil *et al* 2003)

LIGAÇÕES DE VARÕES COLADOS

Apresentam uma resistência à tração bastante superior à tipologia anterior, embora dependam da classe de resistência do varão e do seu número. Para além disso, apresentam poucas peças metálicas à vista pelo facto dos varões serem embutidos. Nos casos em que a rotura se dá pela cola, esta é frágil, pouco indicada para a aplicação estrutural. Contudo, este tipo de ligações possui um comportamento bom à tração e à compressão tornando-as adequadas a sistemas treliçados. Pelo contrário, não são adequadas a resistir a momento fletor porque provocam esforços perpendiculares às fibras, direção pela qual a madeira apresenta debilidades no que diz respeito a resistência mecânica (ver Figura 3.13).



Figura 3.13 - Exemplos de ligações com varões colados (Calil et al 2003)

LIGAÇÕES DE PARAFUSOS DE ROSCA À TRACÇÃO

Nestas ligações são usados parafusos de rosca aparafusados diretamente no topo dos elementos de madeira para fixarem chapas que depois poderão ser ligadas a nos de ligação (ver Figura 3.14). Esta tipologia tem a vantagem de poder entrar em serviço imediatamente após a execução. Por outro lado, para se atingirem cargas de rotura elevadas são necessários parafusos de elevado diâmetro requerendo pré-furação o que torna a execução mais complexa. Também, para que este tipo de ligação seja utilizado deve ter-se em conta que o seu desempenho depende bastante da massa volúmica e teor em água da madeira assim como o comprimento da penetração do parafuso no toro (Correia e Dias, 2006).



Figura 3.14 - Placa de encabeçamento tipo macho (Hamm e Schnuriger, 2002)

LIGAÇÕES DE CHAPAS EXTERNAS

As ligações de chapas externas têm como vantagem o facto de poderem transmitir momentos aos outros elementos ao contrário das tipologias anteriores. Em termos estéticos são mais pobres por terem vários elementos metálicos visíveis e para além disso requerem que os seus elementos constituintes sejam torneados (ver Figura 3.15).



Figura 3.15 - Exemplos de ligações de chapas metálicas externas (Calil et al 2003)

Por outro lado, facilitam a montagem uma vez que são concebidos para efetuar ligações entre elementos de uma forma simples e com período de execução bastante reduzido. Esta tipologia de ligação é indicada para a construção de estruturas porticadas, conseguindo vencer vãos da ordem dos 10 metros num sistema de duas águas.

LIGAÇÃO DE CHAPA CENTRAL

Estas ligações consistem em chapas metálicas que são introduzidas no interior dos elementos de madeira depois de serem efetuados cortes longitudinais com a mesma espessura que apresenta a chapa a ser usada para depois serem pregadas ou aparafusadas. Permitem a transferência de esforços com recurso a um número variado de ligadores o que torna possível a obter uma elevada capacidade de carga, podendo resistir a esforços axiais de compressão e de tração e também permitindo uma simples ligação a nós embora não sendo adequadas a

transmitir momentos fletores, o que as indica para uso em estruturas treliçadas. Possuem algumas peças metálicas visíveis embora em menor quantidade do que na tipologia anterior (ver Figura 3.16).

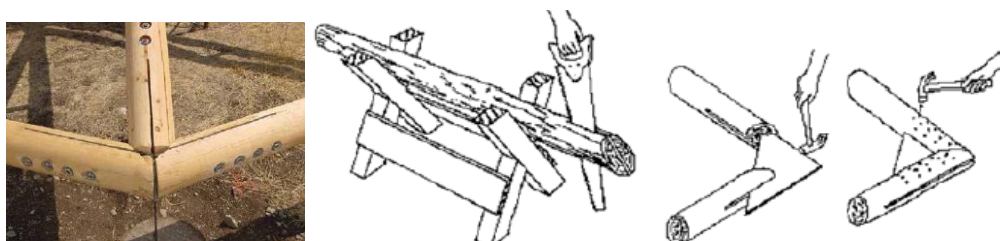


Figura 3.16 - Exemplos de ligações de chapa central (Calil et al 2003)

Normalmente é aberta uma fenda de 6 mm e efetuam-se furos alinhados transversalmente à secção e perpendiculares à fenda aberta onde se irá introduzir uma chapa metálica com a mesma espessura. Para a fixação das chapas à madeira são normalmente usados pinos tubulares de 17x3 mm de espessura de parede e 90 mm de comprimento. Para aumentar o desempenho da ligação são utilizados fios de arame galvanizados entrelaçados que passam através de cada pino e à volta do elemento de madeira. Este sistema faz com que os arames funcionem junto com as cavilhas tubulares na transição dos esforços dos elementos de madeira para as chapas metálicas. Num trabalho desenvolvido por Huybers (1991) são apresentadas estas ligações com laços de arame que são aplicados a estruturas de até 3 andares. Para além da função de fixação, os laços de arame têm a função de resolver a tendência ao fendilhamento nas extremidades dos elementos de madeira de rolaria sendo estas as zonas que comprometem a fiabilidade das ligações.

LIGAÇÕES DE SISTEMA DE ANCORAGEM

Neste caso são usadas cavilhas como bloco de ancoragem ao contrário das barras prismáticas pelo que se lhes confere uma maior facilidade de execução visto serem fáceis de executar os furos para inserção das cavilhas contrariamente à caixa para abrigar a barra prismática. Contudo, o processo é mais complexo do que nas ligações anteriores dada a precisão da execução dos furos. Em termos estéticos é uma ligação com poucas partes metálicas visíveis.

O sistema consiste em inserir um varão roscado num furo coincidente com o eixo da peça que irá enroscar num bloco de ancoragem (barra metálica ou uma cavilha) situado a uma certa distância da extremidade como podemos verificar na Figura 3.17. Como travamento das

cavilhas, são colocados discos que são enroscados até atingir a superfície lateral do elemento de madeira e tem como função a distribuição uniforme da tensão de compressão, no caso.

Tal como no sistema de ligação do ponto anterior, também aqui se podem eventualmente utilizar laços com vista ao melhoramento do desempenho da ligação.

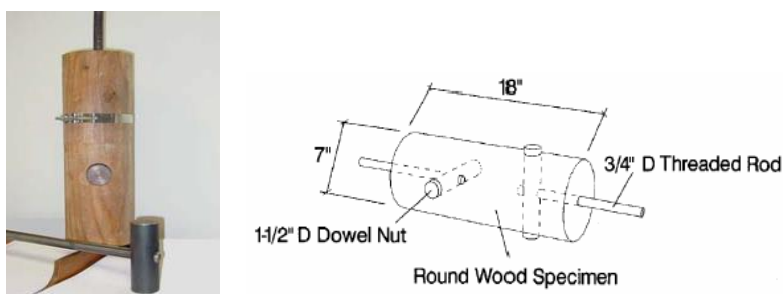


Figura 3.17 - Exemplos de ligações de sistemas de ancoragem (Calil et al 2003)

FUNDAÇÕES DE PILARES

Outra aplicação da rolaria de madeira está no uso de pilares de madeira simplesmente encastrados com recurso a betão ou mesmo a brita resultando em baixos custos para fundações (Partel, 1999). Em 1982 foi proposto por Oberg, este tipo de fundação que consiste na realização de um furo com um diâmetro superior ao diâmetro do elemento de madeira que irá ser preenchido por betão ou brita (ver Figura 3.18).

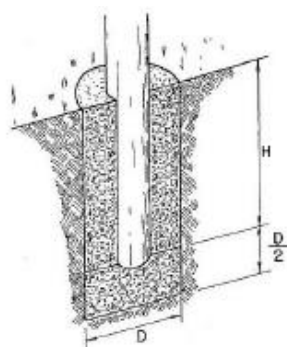


Figura 3.18 - Exemplos de fundações de pilares em rolaria de madeira (Calil et al 2003)

De entre as tipologias de ligação disponíveis, as seguintes são as que se apresentam como potenciais utilizadas como solução para este trabalho por serem de mais simples execução e baixo/medio custo. Assim, partindo da base de trabalho de Morgado (2012), em que são apresentados os resultados da análise das ligações de chapa central, de sistema de ancoragem e de varões colados.

4 CASO DE ESTUDO EM AÇO

Tendo surgido a oportunidade de ficar responsável pelos trabalhos de construção do Parque Fotovoltaico Vulcain, situado na ilha da Reunião (território francês), considerou o autor ser pertinente a utilização deste projeto como caso de estudo no contexto do tema proposto para a realização deste trabalho. Desta forma, será possível acompanhar todos os processos construtivos de forma a ter-se uma melhor percepção do desenvolvimento do projeto, dos eventuais parâmetros a melhorar, dos aspetos práticos nomeadamente ao nível do manuseio dos diferentes elementos, do encadeamento das várias tarefas, etc.

A central fotovoltaica terá uma potência total de 3960 kWp e consistirá num projeto de construção de 17 lotes de estufas destinadas à agricultura, sendo que os painéis fotovoltaicos serão instalados na cobertura e todos os componentes do sistema elétrico serão integrados na estrutura das estufas percorrendo parte dos seus pilares e vigas.

Como objeto deste estudo analisar-se-á uma unidade de estrutura composta por uma sucessão de 5 pórticos, que se irá repetir ao longo de todo o projeto, correspondendo à mesma unidade de estudo que irá ser considerada à frente no dimensionamento em madeira de forma a poder ser feito um estudo comparativo coerente. Assim, ter-se-á em conta a estufa tipo, que possibilitará verificar o comportamento dos vários elementos como vigas, pilares, madres, travamentos longitudinais e transversais.

O terreno objeto deste estudo, com uma área de 50000 m², fica localizado na costa sudoeste da ilha da Reunião, território Francês no Indico, no Município de Saint Pierre (ver Figura 4.1).

No que diz respeito à litologia, o terreno consiste em depósitos aluvionares compostos por areias, argilas, siltes, cascalhos, seixos e blocos de basalto.

4.1 LOCALIZAÇÃO

Coordenadas GPS: (-21.317372, 55.442564)



Figura 4.1 - Localização do Parque fotovoltaico;

4.2 CARACTERÍSTICAS

De seguida será feita uma exposição geral da solução adotada pela Jayme da Costa para este projeto utilizando o aço, com o objetivo de contextualizar a solução em rolaria de madeira que será proposta mais à frente no trabalho, para o mesmo projeto.

A estrutura é constituída por uma série de 6 pórticos transversais distanciados de 4,048 m. Cada um dos pórticos é constituído por 3 pilares e 1 viga transversal inclinada. Os painéis serão fixados em longarinas longitudinais (mães) que assentam sobre os sucessivos pórticos transversais formando vigas contínuas como pode observar-se na Figura 4.2.

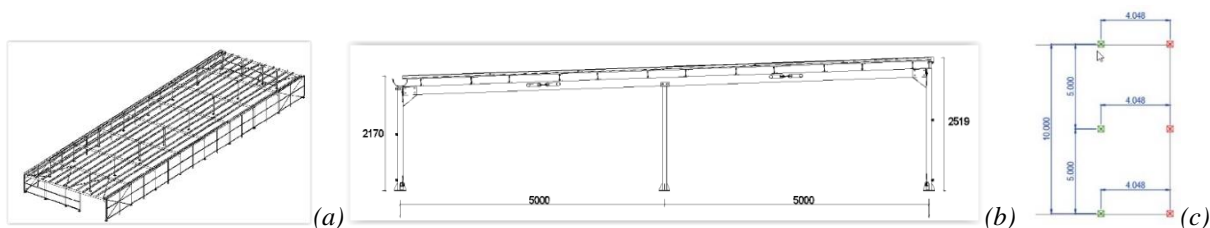


Figura 4.2 - Esquema de uma estufa tipo: a) Perspetiva b) Corte c) Planta (parcial).

4.3 DIMENSIONAMENTO DA SOLUÇÃO EM AÇO

Uma vez que se trata de um estudo comparativo entre a solução em aço e em rolaria de madeira, considerou-se como estrutura base para a modelação uma estufa tipo de 6 pórticos

com contraventamentos vertical e horizontal entre os 3º e 4º pórticos, como ilustra a Figura 4.3, não tendo interesse para este estudo comparativo fazer uma análise exaustiva de cada uma das estufas de diferentes tamanhos. Os esforços nos elementos mais solicitados de uma estufa de maior comprimento são aproximadamente iguais aos das estufas de menor dimensão pelo que é correto considerar a unidade de 6 pórticos.

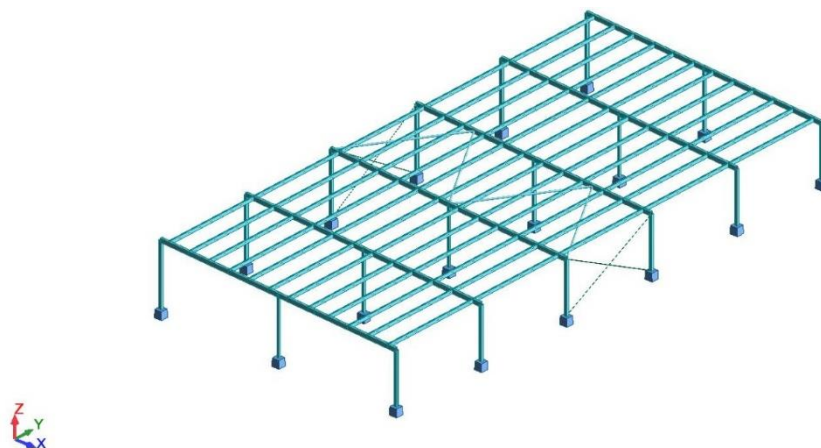


Figura 4.3 - Modelo da estrutura tipo (solução em aço).

4.3.1 AÇÕES

A quantificação das ações e sua combinação será feita de acordo com as normas europeias EN 1991 e EN 1990 (Eurocódigo 0 e 1) que dizem respeito a ações em estruturas:

EN 1990 - Quantificação e combinação de ações;

EN 1991 1-1 - Pesos Volúmicos, próprios e sobrecarga;

EN 1991 1-4 - Ações do Vento

PERMANENTES

As ações que assumem valores constantes ou com pequena variação em relação ao valor medio no decorrer de toda a vida útil da estrutura. Foram consideradas as ações do peso próprio dos elementos constituintes da estrutura e do peso próprio dos painéis.

PESO PROPRIO ESTRUTURAL

A determinação do peso próprio foi feita em função da secção e do peso volúmico do aço - 7850 kg/m³.

PESO PRÓPRIO NÃO ESTRUTURAL (PAINÉIS)

Para determinar o peso próprio dos painéis foi consultado o catálogo do fabricante Jinkosolar. Assim, uma vez que foi utilizado o painel JKM2xxP com dimensões de 1650 x 992 mm e um peso de 18,5 kg, considerou-se o valor de 110 N/m². Os painéis assentam em perfis de alumínio perpendicularmente às madres como se pode visualizar no esquema da Figura 4.4.

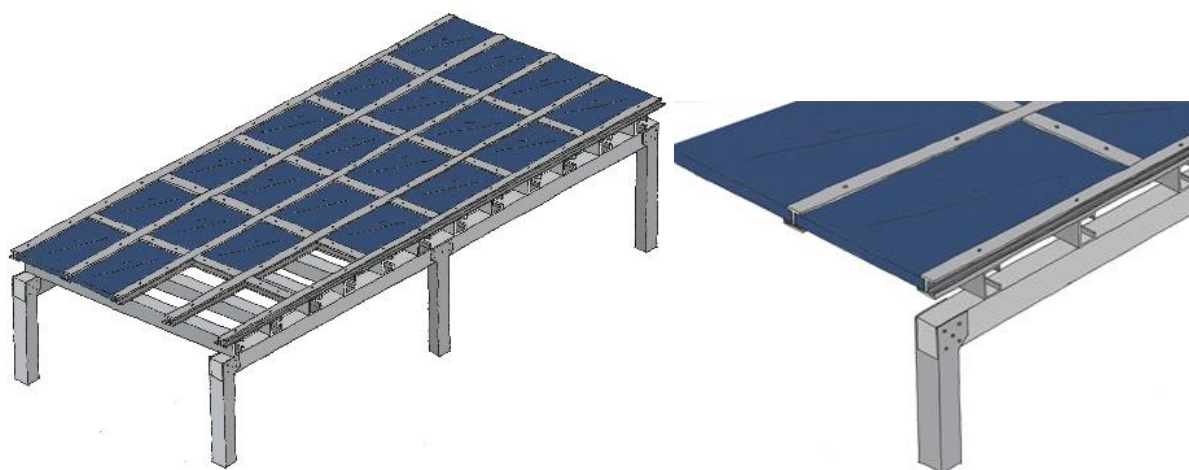


Figura 4.4 - Esquema de assentamento dos painéis entre dois pórticos

4.3.1.1 VENTO

A ação do vento é determinada a partir da velocidade de referência (V_b) que depende do clima local e da variação do vento em função da altura do edifício, da rugosidade e do terreno e sua orografia. A categoria do terreno foi considerada de acordo com o anexo nacional francês do Eurocódigo NF EN 1991 1-4. Segundo esta norma, as estruturas de coberturas inclinadas isoladas devem ser analisadas de duas formas distintas:

1. Cálculo das pressões exteriores exercidas pelo vento (W_e)
2. Cálculo da força global exercida pelo vento na construção (F_w)

CÁLCULO DAS PRESSÕES EXTERIORES EXERCIDAS PELO VENTO (W_e)

Em primeiro lugar calcula-se a pressão dinâmica de pico tendo em conta os vários parâmetros definidos de acordo com a localização do terreno e características da estrutura que estão enumerados na Tabela 4.1.

Valores de Cálculo		
Categoria do terreno: terreno com vedações, vinhas, habitações, vegetação dispersa	II	Section 4.2 (1)
Valor básico da velocidade de referência do vento: $v_{b,0}$	34 m/s	Section 4.3.2, Tab. 4.1
Coefficiente de direção: c_{dir}	1,0	Section 4.2 (2)
Coefficiente de estação: c_{season}	1,0	Section 4.2 (2)
Coefficiente de orografia: c_0	1,31	Section 4.3.3, A.3

Tabela 4.1 - Parâmetros para o cálculo da Velocidade de referência do vento

A velocidade de referência do vento é dada pela expressão seguinte:

$$V_b = c_{dir} \cdot c_{season} \cdot V_{b,0} \quad (\text{NF EN 1991 1-4, Eq. 4.1})$$

Através da velocidade de referência do vento e de mais dois parâmetros, $c_r(z)$ e $c_0(z)$, respetivamente os fatores de rugosidade e orografia do terreno, calcula-se a velocidade media:

$$V_m(z) = c_r(z) \cdot c_0(z) \cdot V_b \quad (\text{NF EN 1991 1-4, Eq. 4.3})$$

Após a obtenção da velocidade média já se está em condições para se chegar ao resultado da pressão dinâmica de pico, que é calculada de acordo com a expressão seguinte e já tem em conta o efeito de turbulência do vento (ver Quadro 4.2):

$$Q_p(z) = [1 + 7 \cdot I_v(z)] \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_m^2(z) \quad (\text{NF EN 1991 1-4, Eq. 4.8})$$

Valores Calculados		
Valor de referência da velocidade do vento: v_b	34,0 m/s	Section 4.2 (2), Eq. 4.1
Valor da velocidade média do vento: v_m	32,987m/s	Section 4.3 (1), Eq. 4.3
Pressão dinâmica de referência: q_b	708,1 N/m ²	Section 4.5 (1), Eq. 4.10
Pressão dinâmica de pico: q_p	1575,713 N/m ²	Section 4.5 (1), Eq. 4.9
Altura de referência: $z = 2,519$ m		
Obrstrução: $\phi = 0,0$		

Tabela 4.2 - Determinação da pressão dinâmica de pico

A determinação dos coeficientes de pressão é feita de acordo com a secção 7.3 da NF EN 1991-1-4 utilizando os coeficientes de pressão resultante, $C_{p,net}$, para coberturas inclinadas isoladas tendo em conta que $b=20,24m$, $d=10m$ e a inclinação da cobertura de 2° (ver Figura 4.5).

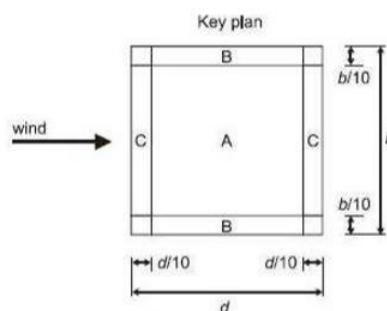


Figura 4.5 - Esquema de cálculo de $C_{p,net}$ (NF EN 1991 1-4, 7.6)

Coeficientes de Pressão	
Zona A pressão	0,62
Zona A sucção	-0,80
Zona B pressão	1,92
Zona B sucção	-1,46
Zona C pressão	1,18
Zona C sucção	-1,56

Tabela 4.3 - Coeficientes de pressão, $C_{p,net}$

A pressão atuante é determinada multiplicando a pressão dinâmica de pico calculada anteriormente, q_p , pelos coeficientes de pressão (ver Tabela 4.3 e 4.4), de acordo com a expressão seguinte:

$$W_e = q_p(z_e) \cdot C_{p,net} \quad (\text{NF EN 1991 1-4, Eq. 5.1})$$

Pressão do vento, W_e	
Zona A pressão	0,67
Zona A sucção	-0,87
Zona B pressão	2,09
Zona B sucção	-1,59
Zona C pressão	1,28
Zona C sucção	-1,70

Tabela 4.4 - Valores da pressão actuante do vento, W_e

CÁLCULO DA FORÇA GLOBAL EXERCIDA PELO VENTO NA CONSTRUÇÃO (F_w)

A determinação da ação do vento para o dimensionamento de pórticos e fundações é realizada a partir dos coeficientes de força global, c_f , para coberturas inclinadas isoladas, de acordo com a secção 7.3 da NF EN 1991-1-4 (ver Figura 4.6).

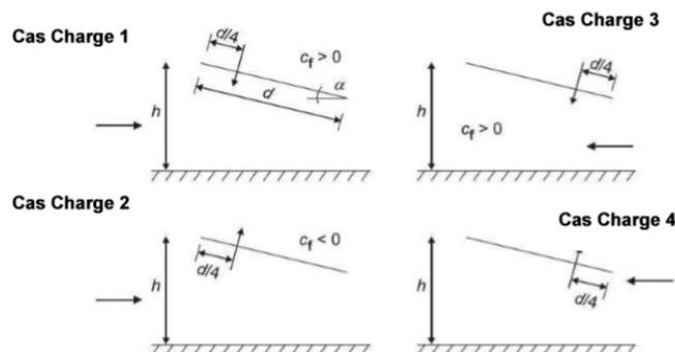


Figura 4.6 - Centro de ação das forças atuantes do vento, (NF EN 1991 1-4, Tab. 7.16)

Coefficiente de força global pressão	0,28
Coefficiente de força global sucção	-0,58

Tabela 4.5 - Coeficientes de força global, c_f

A força global atuante é determinada multiplicando a pressão dinâmica de pico já calculada, q_p , pelos coeficientes de força global, c_f , e pelo coeficiente estrutural c_{s,c_d} e área de referência de acordo com a expressão seguinte (ver Tabela 4.5 e 4.6):

$$F_w = c_s c_d \cdot c_f \cdot q_p(z_e) \cdot A_{ref} \quad (\text{NF EN 1991 1-4, Eq. 5.3})$$

O coeficiente estrutural $c_s c_d$, tem em conta o efeito da redução na ação do vento devido à não simultaneidade de ocorrência das pressões de pico e ainda pelo efeito de amplificação devido às vibrações provocadas pela turbulência e pode ser quantificado de acordo com a secção 6 da norma NF EN 1991-1-4.

Caso 1: pressão do vento (pressão)	0,28 KN/m ² (↓)
Caso 2: pressão do vento (sucção)	-0,58 KN/m ² (↑)
Caso 3: pressão do vento (pressão)	0,28 KN/m ² (↓)
Caso 4: pressão do vento (sucção)	-0,58 KN/m ² (↑)

Tabela 4.6 - Força global do Vento para o caso de estudo- F_w

4.3.2 COMBINAÇÕES DE AÇÕES

Segundo o EC0 (EN 1990) para cada caso de carga, os valores de cálculo dos efeitos das ações (E_d) devem ser determinados através de combinações os valores das ações que se consideram poder ocorrer simultaneamente e cada combinação de ações deve incluir uma ação variável de base da combinação ou uma ação accidental.

A verificação da segurança dos elementos estruturais deve ser feita seguindo a metodologia de verificação dos estados limite, de acordo com o EC0, pelo método dos coeficientes parciais. Aquando da utilização deste método devem ser verificadas todas as situações de projeto e, deve garantir-se que nenhum estado limite é excedido quando se utilizam, nos modelos de cálculo, os valores de cálculo das ações ou dos efeitos das ações e das resistências. Os valores de cálculo devem ser obtidos utilizando o valor característico das ações em combinação com os coeficientes parciais. As ações que não puderem ocorrer simultaneamente não devem ser consideradas na mesma combinação. Os estados-limite a ser verificados são:

Estados-limite últimos (ELU) - Referem-se essencialmente à segurança das pessoas e/ou à segurança da própria estrutura, estando associados ao colapso de parte ou da totalidade da estrutura. Consideram-se normalmente estados-limite de resistência, de estabilidade e de perda de equilíbrio (EN 1993-1-1, 5-6) no que diz respeito às estruturas metálicas. A segurança é garantida calculando os esforços de dimensionamento, E_d , resultantes das combinações a seguir indicadas e comparando-as com os esforços resistentes de cálculo, R_d .

$$E_d \leq R_d$$

Combinações de ações definidas pelo EC0 para verificação da resistência aos ELU:

Combinação fundamental (EC0, Eq. 6.9a):

$$E_d = \gamma_{sd} E \{ \gamma_{g,j} G_{k,j}; \gamma_p P; \gamma_{q,1} Q_{k,1}; \gamma_{q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i} \} j \geq 1; i > 1$$

Combinação de ações para situações acidentais (EC0, Eq. 6.11a):

$$E_d = E \{ G_{k,j}; P; A_d; (\psi_{1,1} \text{ ou } \psi_{2,1}) Q_{k,1}; \psi_{2,i} Q_{k,i} \} j \geq 1; i > 1$$

Estados-limite de utilização (ELS) – Referem-se essencialmente ao funcionamento da estrutura ou dos seus elementos em condições normais de utilização, ao conforto das pessoas e ao aspeto da construção e consistem no estado a partir do qual deixem de se verificar as condições específicas de utilização. No caso de estruturas metálicas consideram-se os estados limites de deformação e de vibração (EN 1993-1-1, 7.).

Existem três tipos de combinações de ações para verificação da resistência aos ELS:

Combinação característica (EC0, Eq. 6.14a):

$$E_d = E \{ G_{k,j}; P; Q_{k,1}; \psi_{0,i} Q_{k,i} \} j \geq 1; i > 1$$

Combinação frequente (EC0, Eq. 6.15a):

$$E_d = E \{ G_{k,j}; P; \psi_{1,1} Q_{k,1}; \psi_{2,i} Q_{k,i} \} j \geq 1; i > 1$$

Combinação quase-permanente (EC0, Eq. 6.16a):

$$E_d = E \{ G_{k,j}; P; \psi_{2,i} Q_{k,i} \} j \geq 1; i \geq 1$$

4.3.3. SECÇÕES UTILIZADAS

Na conceção deste projeto foram utilizados diferentes tipos de aço como se pode verificar na tabela 4.7. A solução consiste essencialmente em perfis laminados a quente, aço macio, embora se tenha utilizado Light Steel Framing, aço enformado a frio, para as madres. Também se utilizaram perfis tubulares para os contraventamentos horizontais e verticais.

Elementos	Secção utilizada	Tipo de aço	Comprimento	Quantidades	Peso unitário (kg)
Viga cobertura	RHS 160x80x4	275	9,880m	6	151,41
Pilares interiores pequenos	SHS 80x3	275	1,977m	6	20,352
Pilares extremidades pequenos	SHS100x4	275	1,955m	6	36,04
Pilares extremidades grandes	SHS100x5	275	2,442m	6	41,34
Madres	LSF C 140x50x15x2	275	4,098m	60	17,21
Travamentos superiores	CHS 60x3	275	4,502m	4	21,5
Travamentos laterais	Varão 20mm	275	4,340m	4	11,13

Tabela 4.7 - Secções utilizadas na solução em aço

4.3.4. ANÁLISE E DIMENSIONAMENTO

O cálculo estrutural foi feito considerando uma análise global elástica em que se toma como hipótese a relação tensão-deformação linear em qualquer ponto da estrutura qualquer que seja o nível de tensão atuante. Isso permite pressupor que a tensão provocada pelas ações atuantes seja inferior à tensão de cedência em qualquer ponto da estrutura. Por outro lado, foi efetuada uma análise de primeira ordem, em que se obtêm os esforços internos e deslocamentos a partir da geometria indeformada da estrutura.

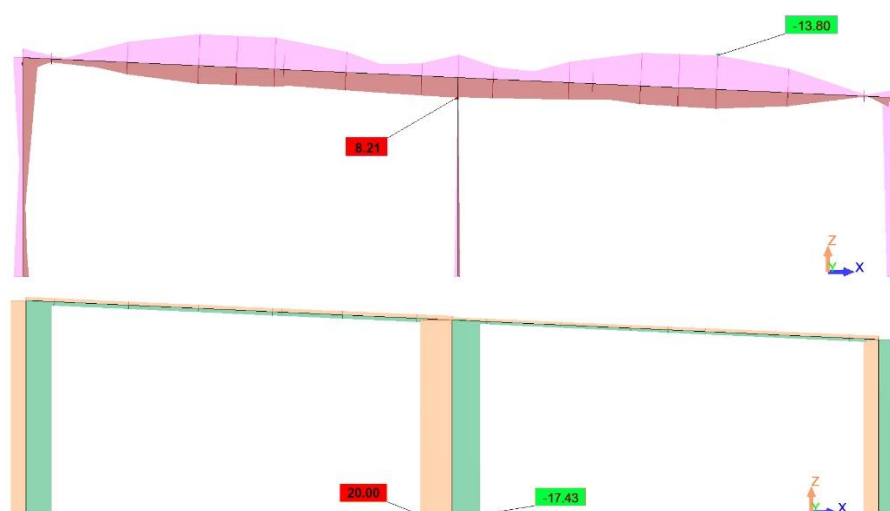


Figura 4.7 - Momento fletor(M_y) e esforço axial(F_x) no pórtico de aço.

VERIFICAÇÃO DA SEGURANÇA DA VIGA AOS ELU (Figura 4.8):

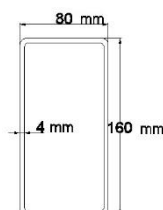


Figura 4.8 - Seção transversal da viga - RHS 160x80x4

$$h = 16,0 \text{ cm}$$

$$b = 8,0 \text{ cm}$$

$$t_w = 0,4 \text{ cm}$$

$$\gamma_{M0} = 1,00$$

$$A_y = 5,76 \text{ cm}^2$$

$$I_y = 623,58 \text{ cm}^4$$

$$\gamma_{M1} = 1,00$$

$$A_z = 12,16 \text{ cm}^2$$

$$I_z = 209,89 \text{ cm}^4$$

$$\begin{array}{lll}
 t_f = 0,4 \text{ cm} & W_{plz} = 59,01 \text{ cm}^3 & I_x = 484,71 \text{ cm}^4 \\
 W_{ply} = 96,13 \text{ cm}^3 & A_x = 18,56 \text{ cm}^2 &
 \end{array}$$

ESFORÇOS ACTUANTES (Figura 4.7):

$$\begin{array}{l}
 N_{Ed} = -1,57 \text{ kN} \\
 M_{y,Ed} = -13,80 \text{ kNm} \\
 M_{z,Ed} = 0,00 \text{ kNm} \\
 V_{y,Ed} = -0,03 \text{ kN} \\
 V_{z,Ed} = -4,97 \text{ kN}
 \end{array}$$

VERIFICAÇÃO DA RESISTÊNCIA DA SECÇÃO TRANSVERSAL

$$\varepsilon = \sqrt{235/275} = 0,924; c/t = 38 \leq 72 \varepsilon;$$

$$\text{Classe da secção} = 1 \quad (\text{EC3, Quadro 5.2})$$

$$M_{y,c,Rd} = M_{y,pl,Rd} = \frac{W_{pl,y} f_y}{\gamma_{M0}} = 26,44 \text{ kNm}$$

$$M_{z,c,Rd} = M_{z,pl,Rd} = \frac{W_{pl,z} f_y}{\gamma_{M0}} = 16,23 \text{ kNm}$$

$$n = \frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}}; \alpha = \frac{A - 2bt_f}{A}; n \leq \alpha; M_{y,c,Rd} = M_{N,y,Rd}; M_{z,c,Rd} = M_{N,z,Rd}$$

$$\alpha = \beta = \frac{1,66}{1 - 1,13n^2}, \text{ para secções retangulares tubulares.}$$

FLEXÃO DESVIADA:

$$\left(\frac{M_{y,Ed}}{M_{N,y,Rd}} \right)^{1,66} + \left(\frac{M_{z,Ed}}{M_{N,z,Rd}} \right)^{1,66} = 0,34 \leq 1 \quad (\text{EC3, Eq. 6.41})$$

ESFORÇO TRANSVERSO:

$$\frac{V_{Ed,z}}{V_{c,Rd,z}} = 0,03 \leq 1,0 \quad \frac{V_{Ed,y}}{V_{c,Rd,y}} = 0,00 \leq 1,0 \quad (\text{EC3, Eq. 6.17})$$

$$V_{c,Rd} = V_{pl,Rd} = \frac{A_v (f_y / \sqrt{3})}{\gamma_{M0}} \quad (\text{EC3, Eq. 6.18})$$

$$V_{c,Rd,z} = 192.67 \text{ kN}$$

$$V_{c,Rd,y} = 91.26 \text{ kN}$$

VERIFICAÇÃO DO ESFORÇO TRANSVERSO RESISTENTE ELÁSTICO:

$$\frac{\tau_{Ed,z}}{f_y / (\sqrt{3}\gamma_{M0})} = 0,00 \leq 1,0 \quad \frac{\tau_{Ed,y}}{f_y / (\sqrt{3}\gamma_{M0})} = 0,00 \leq 1,0 \quad (\text{EC3, Eq. 6.19})$$

ESFORÇO AXIAL:

$$N_{c,Rd} = \frac{A \times f_y}{\gamma_{M0}} = 510 \text{ kN} \quad N_{Ed}/N_{c,Rd} = 0,00 < 1,00 \quad (\text{EC3, 6.2.3})$$

VERIFICAÇÃO DA ESTABILIDADE DO ELEMENTO

VERIFICAÇÃO DA ENCURVADURA DE ELEMENTOS UNIFORMES EM FLEXÃO:

$$\frac{M_{y,Ed}}{M_{b,Rd}} = 0,52 \leq 1 \quad M_{b,Rd} = \frac{\chi_{LT} W_y f_y}{\gamma_{M1}} = 26,44 \text{ kNm} \quad (\text{EC3, Eq. 6.3.2.1.(1)})$$

VERIFICAÇÃO DA SEGURANÇA DAS MADRES AOS ELU (Figura 4.9):

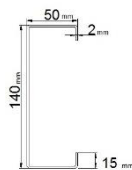


Figura 4.9 - Secção transversal da madre - LSF C 140x50x2

A verificação de segurança deste tipo de perfil, aço enformado a frio, faz-se de acordo com a norma EN 1993-1-3:

AÇO 280GD	$\gamma_{M1} = 1,00$	$I_y = 151,90 \text{ cm}^4$
$f_y = 280,00 \text{ MPa}$	$b = 5,0 \text{ cm}$	$I_z = 16,79 \text{ cm}^4$
$f_{ya} = 297,43 \text{ MPa}$	$A_y = 1,92 \text{ cm}^2$	$I_x = 0,08 \text{ cm}^4$
$f_{yb} = 280,00 \text{ MPa}$	$A_z = 2,76 \text{ cm}^2$	$t_f = 0,2 \text{ cm}$
$h = 14,0 \text{ cm}$	$A_x = 5,14 \text{ cm}^2$	$W_{ply} = 25,30 \text{ cm}^3$
$\gamma_{M0} = 1,00$	$t_w = 0,2 \text{ cm}$	$W_{plz} = 6,99 \text{ cm}^3$

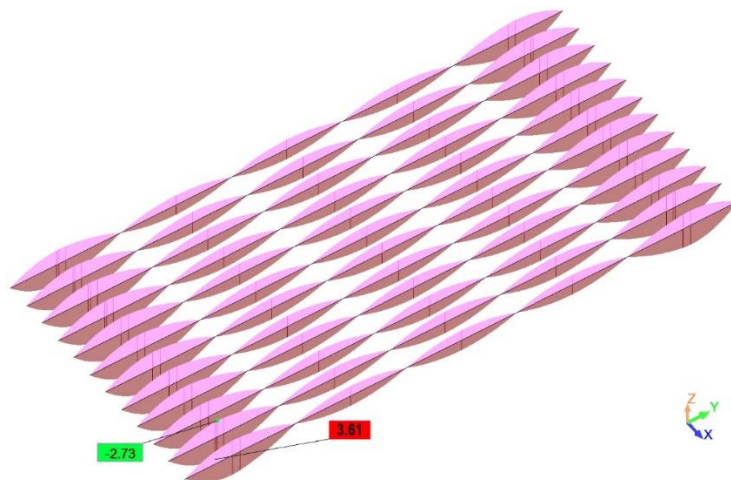


Figura 4.10 – Diagrama de momento flector (M_y) das madres

ESFORÇOS ACTUANTES (Figura 4.10):

$$M_{y,Ed} = -2,79 \text{ kNm}$$

$$V_{y,Ed} = -0,00 \text{ kN}$$

$$N_{c,Ed} = 0,06 \text{ kN}$$

$$T_{t,Ed} = 0,00 \text{ kNm}$$

$$M_{z,Ed} = -0,05 \text{ kNm}$$

VERIFICAÇÃO DA RESISTÊNCIA DA SECÇÃO TRANSVERSAL

ESFORÇO AXIAL

$$N_{c,Rd} = \frac{A_{eff} f_{yb}}{\gamma_{M0}}; \frac{N_{c,Ed}}{N_{c,Rd}} \leq 1 \quad (\text{EN313, Eq. 6.1.3})$$

$$N_{c,Rd} = 114,97 \text{ kN}$$

FLEXÃO COMPOSTA COM COMPRESSÃO

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,c,Rdcom}} + \frac{M_{z,Ed} + dM_{z,Ed}}{M_{z,c,Rdcom}} = 0,46 \leq 1 \quad (\text{EN313, Eq. 6.1.9.(1)})$$

$$\frac{M_{y,Ed}}{M_{y,c,Rdten}} + \frac{M_{z,Ed} + dM_{z,Ed}}{M_{z,c,Rdten}} - \frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} = 0,45 \leq 1 \quad (\text{EN313, Eq. (6.1.9.(2))})$$

ESFORÇO TRANSVERSO

A verificação do esforço transversal é feita com base na secção 6.1.5 do EC3-1-3. Como não temos esforço transversal atuante nesta secção, dispensa-se a sua verificação.

VERIFICAÇÃO DA ESTABILIDADE DO ELEMENTO

A instabilidade lateral destes elementos não foi considerada dado que o deslocamento está impedido pelos perfis de fixação dos painéis solares e pelos próprios painéis.

VERIFICAÇÃO DA SEGURANÇA DAS MADRES AOS ELS :

De acordo com a norma EN 313, as regras para os ELS do aço laminado são aplicáveis ao aço enformado a frio. Assim sendo:

$$u_y = 0,1 \text{ cm} < u_{y \text{ max}} = L/200 = 2,0 \text{ cm}$$

$$u_z = 1,1 \text{ cm} < u_{z \text{ max}} = L/200 = 2,0 \text{ cm}$$

VERIFICAÇÃO DA SEGURANÇA AOS ELU DOS PILARES (Figura 4.11):

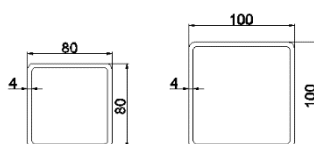


Figura 4.11 – Secções transversais dos pilares HFSHS 80x80x4; HFSHS 100x100x4

S275	$A_y = 7,36 \text{ cm}^2$	$I_x = 353,89 \text{ cm}^4$
$f_y = 275,00 \text{ MPa}$	$A_z = 7,36 \text{ cm}^2$	$t_f = 0,4 \text{ cm}$
$h = 10,0 \text{ cm}$	$A_x = 15,36 \text{ cm}^2$	$W_{ply} = 55,33 \text{ cm}^3$
$\gamma_{M0} = 1,00$	$t_w = 0,4 \text{ cm}$	$W_{plz} = 55,33 \text{ cm}^3$
$\gamma_{M1} = 1,00$	$I_y = 236,34 \text{ cm}^4$	
$b = 10,0 \text{ cm}$	$I_z = 236,34 \text{ cm}^4$	

ESFORÇOS ACTUANTES (Ver Figura 4.7):

$N_{Ed} = -15,86 \text{ kN}$	$V_{z,Ed} = 3,13 \text{ kN}$
$M_{y,Ed} = 6,34 \text{ kNm}$	$T_{t,Ed} = 0,00 \text{ kNm}$
$M_{z,Ed} = 0,01 \text{ kNm}$	$V_{y,T,Rd} = 116,85 \text{ kN}$
$V_{y,Ed} = -0,01 \text{ kN}$	$V_{z,T,Rd} = 116,85 \text{ kN}$

VERIFICAÇÃO DA RESISTÊNCIA DA SECÇÃO TRANSVERSAL

Classe da secção = 1, para secções tubulares retangulares

ESFORÇO AXIAL

$$N_{c,Rd} = \frac{A \times f_y}{\gamma_{M0}} \quad N_{Ed}/N_{c,Rd} = 0,04 < 1 \quad (\text{EC3, Eq. 6.2.3.(1)})$$

FLEXÃO COM ESFORÇO TRANSVERSO

$$\left(\frac{M_{y,Ed}}{M_{N,y,Rd}} \right)^{1,66} + \left(\frac{M_{z,Ed}}{M_{N,z,Rd}} \right)^{1,66} = 0,23 \leq 1 \quad (\text{EC3, Eq. 6.2.9.1.(6)})$$

$$n = \frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}}; \alpha = \frac{A - 2bt_f}{A}; n \leq \alpha; M_{y,c,Rd} = M_{N,y,Rd} = 15,22kNm;$$

$$M_{z,c,Rd} = M_{N,z,Rd} = 15,22kNm$$

ESFORÇO TRANSVERSO

$$\frac{V_{Ed,z}}{V_{c,Rd,z}} = 0,03 \leq 1,0; \frac{V_{Ed,y}}{V_{c,Rd,y}} = 0,00 \leq 1,0 \quad (\text{EC3, Eq. 6.17})$$

$$V_{c,Rd} = V_{pl,Rd} = \frac{A_v (f_y / \sqrt{3})}{\gamma_{M0}} \quad (\text{EC3, Eq. 6.18})$$

Verificação do esforço transverso resistente elástico:

$$\frac{\tau_{Ed,z}}{f_y / (\sqrt{3}\gamma_{M0})} = 0,00 \leq 1,0; \frac{\tau_{Ed,y}}{f_y / (\sqrt{3}\gamma_{M0})} = 0,00 \leq 1,0 \quad (\text{EC3, Eq. 6.19})$$

VERIFICAÇÃO DA ENCURVADURA DE ELEMENTOS UNIFORMES EM FLEXÃO:

$$\frac{M_{y,Ed}}{M_{b,Rd}} = 0,42 \leq 1; M_{b,Rd} = \frac{\chi_{LT} W_y f_y}{\gamma_{M1}} = 15,22kNm \quad (\text{EC3, Eq. 6.3.2.1.(1)})$$

VERIFICAÇÃO DA SEGURANÇA AOS ELS:

Deslocamento no topo dos pilares

$$v_x = 0,9 \text{ cm} < v_x \text{ max} = L/150,00 = 1,6 \text{ cm}$$

$$v_y = 0,0 \text{ cm} < v_y \text{ max} = L/150,00 = 1,6 \text{ cm}$$

VERIFICAÇÃO DA SEGURANÇA AOS ELU DOS CONTRAVENTAMENTOS (Figura 4.12):

CONTRAVENTAMENTO VERTICAL

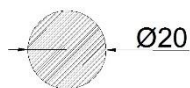


Figura 4.12 – Secção transversal do contraventamento vertical

$\gamma_{M0}=1,00$	$A_z=2,00 \text{ cm}^2$	$I_x=1,57 \text{ cm}^4$
$\gamma_{M1}=1,00$	$A_x=3,14 \text{ cm}^2$	$W_{ply}=1,33 \text{ cm}^3$
$d=2,0 \text{ cm}$	$I_y=0,79 \text{ cm}^4$	$W_{plz}=1,33 \text{ cm}^3$
$A_y=2,00 \text{ cm}^2$	$I_z=0,79 \text{ cm}^4$	

VERIFICAÇÃO DA SEGURANÇA DA SECÇÃO

$$N_{t,Ed} = 19,22 \text{ kN}$$

$$N_{t,Rd} = 86,39 \text{ kN}$$

$$N_{c,Rd} = \frac{A \times f_y}{\gamma_{M0}} \quad N_{Ed}/N_{c,Rd} = 0,22 < 1 \quad (\text{EC3, 6.2.3.(1)})$$

CONTRAVENTAMENTO HORIZONTAL

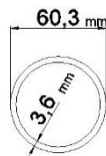


Figura 4.13 – Secção transversal do contraventamento horizontal

$h = 6,0 \text{ cm}$	$A_z = 3,42 \text{ cm}^2$	$I_z = 21,88 \text{ cm}^4$
$\gamma_{M0} = 1,00$	$A_x = 5,37 \text{ cm}^2$	$W_{ply} = 9,76 \text{ cm}^3$
$\gamma_{M1} = 1,00$	$t_w = 0,3 \text{ cm}$	$W_{plz} = 9,76 \text{ cm}^3$
$A_y = 3,42 \text{ cm}^2$	$I_y = 21,88 \text{ cm}^4$	$I_x = 43,76 \text{ cm}^4$

ESFORÇOS ACTUANTES:

$$N_{c,Ed} = -5.51 \text{ kN}$$

$$M_{y,Ed} = 0.06 \text{ kNm}$$

$$\text{Class of section} = 1$$

VERIFICAÇÃO DA SEGURANÇA DA SECÇÃO:

$$N_{c,Rd} = \frac{A \times f_y}{\gamma_{M0}} = 147,73 \text{ kN}$$

$$\frac{N_{c,Ed}}{N_{c,Rd}} = 0,04 \leq 1 \quad (\text{EC3, 6.2.4})$$

$$M_{y,c,Rd} = 2.68 \text{ kNm}$$

$$\frac{M_{y,Ed}}{M_{y,c,Rd}} = 0,02 \leq 1 \quad (\text{EC3, 6.2.5.(1)})$$

$$M_{N,y,Rd} = 2.67 \text{ kNm}$$

$$M_{y,Ed} \leq M_{N,Rd} = 0,06 \text{ kNm} \leq 2,67 \text{ kNm} \quad (\text{EC3, 6.2.9.1(2)})$$

VERIFICAÇÃO DA ESTABILIDADE DE ELEMENTOS COMPRIMIDOS:

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y \times N_{Rk}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed,max}}{\chi_{LT} \times M_{y,Rk}} = 0,33 \leq 1 \quad (\text{EC3, Eq. 6.61})$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z \times N_{Rk}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed,max}}{\chi_{LT} \times M_{y,Rk}} = 0,33 \leq 1 \quad (\text{EC3, Eq. 6.62})$$

4.4 CUSTOS

De seguida expõe-se a solução em aço que foi usada em obra no que respeita aos vários custos (fabrico, transporte, montagem, conservação e manutenção). Será contraposta aos custos de uma solução em rolaria de pinho bravo cujo dimensionamento será exposto posteriormente no decorrer do trabalho mas que tenderá a apresentar uma configuração equivalente à solução em aço. Note-se que os custos apresentados foram estimados pois estão dependentes das quantidades encomendadas.

Na Tabela 4.8 expõem-se os custos à saída da serralharia para a unidade de estrutura de estudo considerando todos os elementos participantes do seu dimensionamento que irão posteriormente constituir o termo de comparação com a solução em madeira.

Elementos	Peso unitário (kg)	Quantidades	Preço dos Elementos (€)
Pórticos de suporte	249,142	6	2242,3
Madres	17,21	60	1548,9
Travamentos	16,315	8	195,8
Transporte	0,50 €/kg	285	142,5
		Preço da Estrutura de 202 m ² (€)	4129,5
		Preço do aço laminado (€/kg)	1,5
		Preço unitário (€/m ²)	20,4

Tabela 4.8 - Preços da solução em aço

5 PROPOSTA EM ROLARIA DE MADEIRA

5.1 DIMENSIONAMENTO

O dimensionamento será feito com base numa abordagem por estados-limite e coeficientes parciais, seguindo a metodologia da EN 1995-1-1 (Eurocódigo 5 ou EC5, Parte 1-1) e considerando as bases de dimensionamento estrutural dadas pelos Eurocódigos 0 e 1. A abordagem de cálculo de ações, combinações e avaliação da segurança dos elementos será sensivelmente a mesma que foi utilizada para o dimensionamento em aço na secção 4.3, embora com as adaptações adequadas ao material madeira de rolaria que serão expostas à frente.

No capítulo 2 do EC5-1-1 podem-se encontrar os aspetos essenciais a ser respeitados pelo projetista de estruturas de madeira, nomeadamente os coeficientes de segurança a utilizar no dimensionamento no que respeita a propriedades dos materiais, resistências de cálculo e procedimento de avaliação das ações. Os valores característicos e/ou médios das propriedades mecânicas utilizadas no cálculo são identificados em normas complementares como a EN338 ou especificações dos fabricantes.

5.1.1 DADOS RELATIVOS A MATERIAIS

Como referido anteriormente, a madeira, dependendo da espécie, é bastante sensível ao ambiente em que está inserida, razão pela qual se preveem no EC5 classes de serviço que se destinam a adequar a estrutura de madeira às condições de serviço a que estará sujeita. Assim, está definido o coeficiente de modificação k_{mod} que previne essencialmente duas coisas: o efeito da duração das cargas e a perda de resistência mecânica com o aumento do teor em água (que aumenta com a classe de serviço).

No seguimento do anterior, o EC5 faz a divisão dos materiais em classes de serviço que caracterizam a estrutura em função da temperatura e da humidade relativa do ambiente em que esta se insere aquando da sua construção ou ao longo da sua vida útil:

Classe de serviço 1 – caracterizada por um teor de água dos materiais correspondentes ao teor de água de equilíbrio para um ambiente caracterizado por uma temperatura de 20°C e uma humidade relativa do ar ambiente excedendo 65% somente durante algumas semanas por ano.

Classe de serviço 2 – caracterizada por um teor de água dos materiais correspondentes ao teor de água de equilíbrio para um ambiente caracterizado por uma temperatura de 20 °C e uma humidade relativa do ar ambiente excedendo 85% somente durante algumas semanas por ano.

Classe de serviço 3 – caracterizada por condições climáticas conduzindo a valores do teor de água dos materiais superiores aos que se verificam na classe de serviço 2.

Em relação à duração das ações, o EC5 apresenta a divisão em 5 categorias:

Permanentes – Mais de 10 anos de duração (Peso próprio)

Longa duração – entre 6 meses e 10 anos de duração (sobrecargas de carácter permanente)

Media duração – entre 1 semana e 6 meses de duração (sobrecargas correntes ou neve em certos casos)

Curta duração – menos de uma semana (vento, neve em certos casos)

Instantâneas – vento, sismo, ações de acidente;

A especificação das classes de serviço e categorias de duração das ações define a utilização dos parâmetro de correção, k_{def} e k_{mod} que têm como função quantificar a correção que será feita a dada propriedade da madeira de acordo com as condições de fluência e teor em água. Os parâmetros k_{def} e k_{mod} em conjunto com o coeficiente parcial de segurança para a propriedade de um material, γ_M , vão permitir chegar aos coeficientes de segurança que serão usados na verificação da estabilidade.

5.1.2 QUANTIFICAÇÃO DAS AÇÕES E COMBINAÇÕES

As ações consideradas no dimensionamento em madeira de rolaria serão sensivelmente as mesmas que foram utilizadas no dimensionamento da estrutura em aço com a exceção do peso próprio dos elementos que será diferente uma vez que o material apresenta uma massa volúmica diferente.

5.1.3 MODELO DE CÁLCULO

A análise e dimensionamento da estrutura em estudo, foram levados a cabo com base no modelo estrutural sujeito às ações referidas anteriormente, tendo sido usado o *software Autodesk Robot Structural Analysis 2015*. Numa primeira abordagem o modelo em madeira foi concebido com dois vãos, à semelhança do modelo em aço, mas esta tipologia resultava em secções demasiado grandes, da ordem dos 200 mm, pelo que se optou por modelar a estrutura com 3 vãos, mas mantendo uma configuração aproximada da original (ver Figura 5.1 e Tabela 5.1).

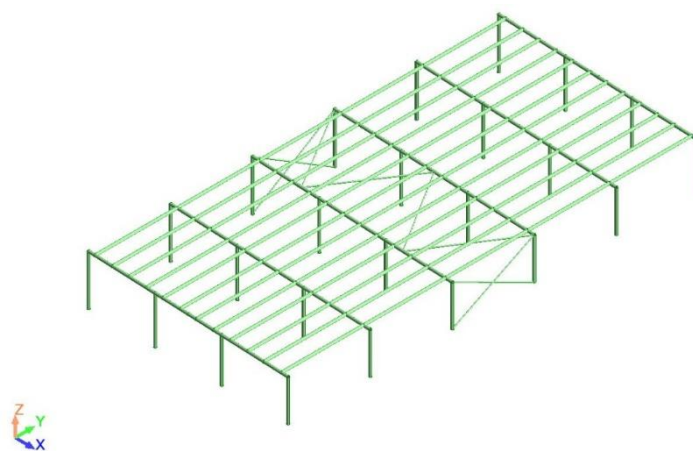


Figura 5.1 - Modelo em madeira de rolaria

SECÇÕES UTILIZADAS

Elementos	Secção utilizada (mm)	Massa Volúmica	Comprimento	Quantidades
Viga cobertura	160	Pinheiro bravo (528,8kg/m ³)	3,330m	18
Pilares interiores pequenos	130	Pinheiro bravo (528,8kg/m ³)	1,977m	6
Pilares extremidades pequenos	130	Pinheiro bravo (528,8kg/m ³)	1,955m	6
Pilares extremidades grandes	130	Pinheiro bravo (528,8kg/m ³)	2,442m	6
Longarinas (madres)	130	Pinheiro bravo (528,8kg/m ³)	4,098m	60
Travamentos superiores	50	Pinheiro bravo (528,8kg/m ³)	4,502m	4
Travamentos laterais	50	Pinheiro bravo (528,8kg/m ³)	4,340m	4

Tabela 5.1 - Secções utilizadas em madeira de rolaria

5.1.4 DIMENSIONAMENTO DOS ELEMENTOS DE MADEIRA

PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS:

Os valores das propriedades resistentes dos materiais utilizados têm como base os resultados obtidos no trabalho de Morgado (2012) em que foram realizados ensaios experimentais a amostras de toros de pinheiro bravo. No decorrer do referido trabalho, foram obtidos valores das propriedades físicas e mecânicas das amostras com base na norma EN14251 (CEN, 2003a). As propriedades para as quais não foi possível obter valores experimentalmente foram determinadas a partir dos valores experimentais obtidos dos ensaios, com base em fórmulas empíricas presentes na norma EN384.

$$\begin{aligned}\gamma_M &= 1,3 && - \text{para madeira maciça;} \\ K_{mod} &= 0,5 && - \text{para classe de serviço 3 e ação permanente;} \\ K_{mod} &= 0,9 && - \text{para classe de serviço 3 e ação instantânea;}\end{aligned}$$

Como existem dois tipos de duração de ações da combinação determinante para o cálculo (ações permanentes - peso próprio estrutural e não estrutural e, ação instantânea – pressão do vento) utiliza-se o k_{mod} correspondente à ação de mais curta duração (EC5, 3.1.3 (2)), mas também foi considerada a combinação constituída apenas pelas ações permanentes, com K_{mod} de 0,5.

$$\begin{aligned}f_{m,k} &= 38,6 \text{ Mpa} \\ f_{m,d} &= k_{mod} \frac{f_{m,k}}{\gamma_M} = 26,72 \text{ MPa} \\ f_{t,0,k} &= 0,6 \times f_{m,k} = 23,16 \text{ MPa} \\ f_{t,0,d} &= k_{mod} \frac{f_{t,0,k}}{\gamma_M} = 16,03 \text{ MPa} \\ f_{c,0,k} &= 24,16 \text{ Mpa} \\ f_{c,0,d} &= k_{mod} \frac{f_{c,0,k}}{\gamma_M} = 16,73 \text{ MPa} \\ f_{v,k} &= \min (3,8 ; 0,2 \times f_{m,k}^{0,8}) = 3,71 \text{ MPa} \\ f_{v,d} &= k_{mod} \frac{f_{v,k}}{\gamma_M} = 2,57 \text{ MPa} && \text{(EC5, Eq. 2.14)} \\ f_{t,90,k} &= \min (0,6 ; 0,0015 \rho_k) = 0,60 \text{ MPa} \\ f_{c,90,k} &= 0,007 \rho_k = 3,11 \text{ MPa} \\ E_{0,mean} &= 13600 \text{ MPa} \\ G_{mean} &= E_{0,mean} / 16 = 870 \text{ MPa} \\ E_{0,05} &= 0,67 \times E_{0,mean} = 9100 \text{ MPa}\end{aligned}$$

$$E_{90,mean} = E_{0,mean} / 30 = 460 \text{ MPa}$$

$$\rho_k = 444,6 \text{ Kg/m}^3$$

5.1.4.1 VERIFICAÇÃO DA SEGURANÇA AOS ELU

VIGA (ver Figura 5.3):

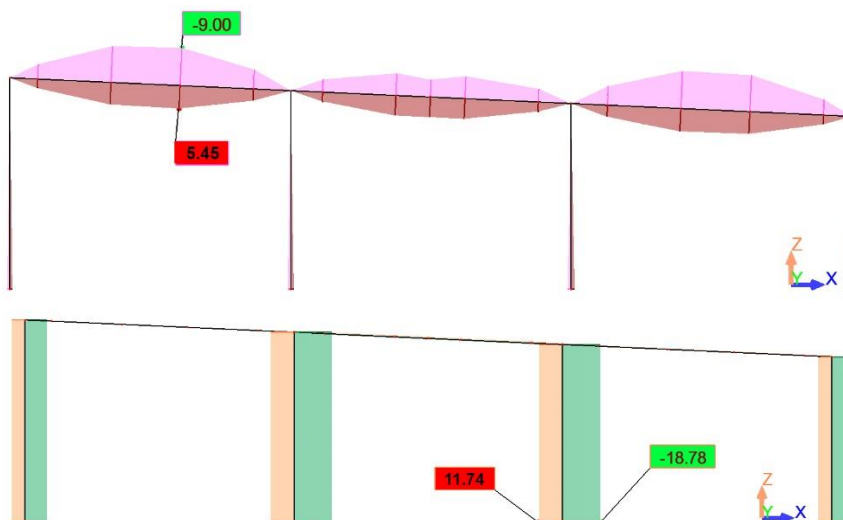


Figura 5.2 - Diagramas de momento flector (M_y) esforço axial do pórtico (F_x)

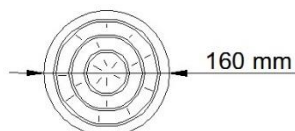


Figura 5.3 – Secção transversal da viga

$h_t = 160,0 \text{ mm}$	$t_w = 80,0 \text{ mm}$
$i_x = 6434,0 \text{ cm}^4$	$A_y = 120,64 \text{ cm}^2$
$w_y = 402,12 \text{ cm}^3$	$A_x = 201,06 \text{ cm}^2$
$b_f = 160,0 \text{ mm}$	$t_f = 80,0 \text{ mm}$
$A_z = 120,64 \text{ cm}^2$	$i_y = 3216,99 \text{ cm}^4$
$w_z = 402,12 \text{ cm}^3$	$i_z = 3216,99 \text{ cm}^4$

ESFORÇOS ACTUANTES (ver Figura 5.2):

$$N_d = -0,24 \text{ KN}$$

$$V_{sd} = 5,08 \text{ KN}$$

$$M_y = -9,00 \text{ KNm}$$

$$M_z = -0,02 \text{ KNm}$$

DIMENSIONAMENTO AO CORTE:

$$V_{sd} = 5,08 \text{ kN} \quad \tau_{sd} = 1,5 \frac{V_{sd}}{A} = 0,42 \text{ MPa} \leq f_{v,d} \quad (\text{EC5, Eq. 6.1.7})$$

DIMENSIONAMENTO À FLEXÃO DESVIADA COM COMPRESSÃO:

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N_{sd}}{A} = 0,01 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{m,y,d} = \frac{M_y}{w_y} = 22,37 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{m,z,d} = \frac{M_z}{w_z} = 0,00 \text{ MPa}$$

$$K_m = 1,0 \quad \text{para secções circulares} \quad (\text{EC 5, Eq. 6.1.6 (2)})$$

$$\left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} \right)^2 + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1,084 \leq 1 \quad (\text{EC5, Eq. E6.19})$$

MADRE (Ver Figura 5.5):

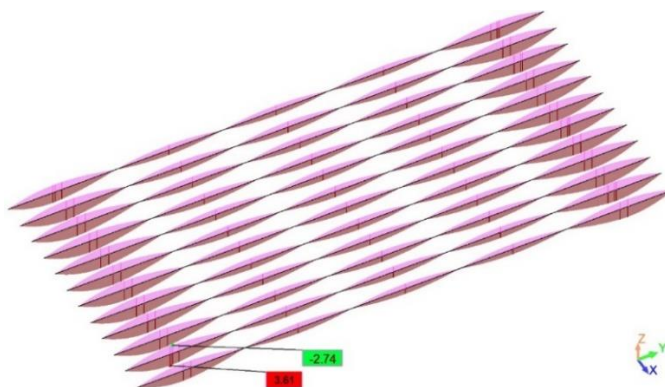


Figura 5.4 - Diagrama de momento fletor (M_y) das madres

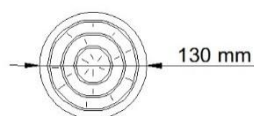


Figura 5.5 – Secção transversal da madre

$$\begin{array}{ll}
 d = 130,0 \text{ mm} & I_y = 1401,98 \text{ cm}^4 \\
 A_x = 132,73 \text{ cm}^2 & I_z = 1401,98 \text{ cm}^4 \\
 A_y = 79,64 \text{ cm}^2 & w_y = 215,69 \text{ cm}^3 \\
 A_z = 79,64 \text{ cm}^2 & w_z = 215,69 \text{ cm}^3
 \end{array}$$

ESFORÇOS ACTUANTES (Ver Figura 5.4):

$$\begin{array}{l}
 N_d = 0,04 \text{ KN} \\
 V_{sd} = 0,82 \text{ KN} \\
 M_y = 3,48 \text{ KNm} \\
 M_z = 0,05 \text{ KNm}
 \end{array}$$

DIMENSIONAMENTO AO CORTE:

$$V_{sd,z} = 0,82 \text{ KN} \quad \tau_{sd,z} = 1,5 \frac{V_{sd}}{A} = 0,10 \text{ MPa} \leq f_{v,d} \quad (\text{EC5, Eq. 6.1.7})$$

DIMENSIONAMENTO À FLEXÃO COMPOSTA COM TRAÇÃO:

$$\begin{array}{l}
 \sigma_{t,0,d} = \frac{N_{sd}}{A} = 0,00 \text{ MPa} \\
 \sigma_{m,y,d} = \frac{M_{sd,y}}{w_y} = 16,11 \text{ MPa} \\
 \sigma_{m,z,d} = \frac{M_{sd,z}}{w_z} = 0,00 \text{ MPa}
 \end{array}$$

$$K_m = 1,0 \quad (\text{EC 5, Eq. 6.1.6 (2)})$$

$$k_h = \min \left(\left(\frac{150}{h} \right)^{0,2}; 1,3 \right) = 1,03 \quad (\text{EC 5, Eq. 3.2 (3)})$$

O coeficiente k_h tem como função corrigir a resistência à tração tendo em conta o efeito de volume em elementos tracionados;

$$f'_{t,0,d} = f_{t,0,d} \times k_h$$

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad 0,59 \leq 1 \quad (\text{EC5, Eq. 6.17})$$

PILAR (Ver Figura 5.7):

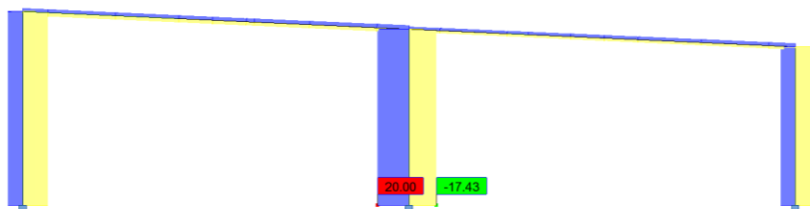


Figura 5.6 - Diagrama de esforço axial (N_d)

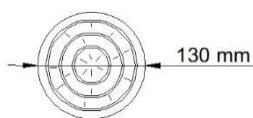


Figura 5.7 – Secção transversal dos pilares

$d = 130,0 \text{ mm}$	$I_z = 1401,98 \text{ cm}^4$
$A_y = 79,64 \text{ cm}^2$	$w_y = 215,69 \text{ cm}^3$
$A_z = 79,64 \text{ cm}^2$	$w_z = 215,69 \text{ cm}^3$
$A_x = 132,73 \text{ cm}^2$	$L = 2,17 \text{ m}$
$I_y = 1401,98 \text{ cm}^4$	

ESFORÇOS ACTUANTES (Ver Figura 5.6):

$$N_d = -18,78 \text{ KN}$$

$$M_y = -0,84 \text{ KNm}$$

DIMENSIONAMENTO À COMPRESSÃO:

Como existe compressão no elemento procede-se de seguida à verificação de estabilidade à encurvadura:

Adotou-se, conservadoramente, o comprimento de encurvadura igual ao comprimento do elemento.

$$i_y = \sqrt{\frac{I_y}{A_{\text{sec}}}} = 32,49; \lambda_y = \frac{l_{\text{eq}}}{i_y} = \frac{2170}{32,49} = 67 \quad (\text{EC5, Eq. 6.21})$$

$$\lambda_{\text{rel},y} = \frac{\lambda_y}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} = 1,246$$

$$k_y = k_z = 0,5(1 + \beta_c(\lambda_{rel,y} - 0,3) + \lambda_{rel,y}^2) = 1,371 \quad (\text{EC5, Eq. 6.27})$$

$$K_m = 1,0 \quad (\text{EC 5, Eq. 6.1.6 (2)})$$

$$\beta_c = 0,2 \text{ para madeira maciça} \quad (\text{EC5, Eq. 6.29})$$

$$k_{c,y} = k_{c,z} = \frac{1}{k_y + \sqrt{k_y^2 - \lambda_{rel,y}^2}} = 0,515$$

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N_{sd}}{A_x} = 1,41 \text{MPa}$$

$$\sigma_{m,y,d} = \frac{M_{sd,y}}{W_y} = 3,89 \text{MPa}$$

$$\sigma_{m,z,d} = \frac{M_{sd,z}}{W_z} = 0,00 \text{MPa}$$

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad 0,31 \leq 1 \quad (\text{EC5, Eq. 6.23})$$

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} f_{c,0,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad 0,31 \leq 1 \quad (\text{EC5, Eq. 6.24})$$

CONTRAVENTAMENTOS:

Vertical (Ver Figura 5.8):

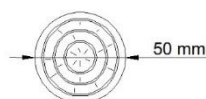


Figura 5.8 – Seção transversal do contraventamento vertical

$$A_y = 11,78 \text{ cm}^2$$

$$I_z = 30,68 \text{ cm}^4$$

$$A_z = 11,78 \text{ cm}^2$$

$$I_x = 61,4 \text{ cm}^4$$

$$A_x = 19,63 \text{ cm}^2$$

$$W_y = 12,27 \text{ cm}^3$$

$$I_y = 30,68 \text{ cm}^4$$

$$W_z = 12,27 \text{ cm}^3$$

$$f_{t,0,d} = 19,97 \text{ Mpa}$$

$$\sigma_{t,0,d} = \frac{N_{sd}}{A_x} = \frac{15,95}{19,63} = 8,12MPa$$
$$\sigma_{t,0,d} \leq f_{t,0,d} \quad 8,12 \leq 19,97 \quad (\text{EC5, Eq. 6.1})$$

Horizontal (Ver Figura 5.9):

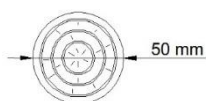


Figura 5.9 – Seção transversal do contraventamento horizontal

$$\begin{aligned} A_y &= 11,78 \text{ cm}^2 & I_z &= 30,68 \text{ cm}^4 \\ A_z &= 11,78 \text{ cm}^2 & I_x &= 61,4 \text{ cm}^4 \\ A_x &= 19,63 \text{ cm}^2 & W_y &= 12,27 \text{ cm}^3 \\ I_y &= 30,68 \text{ cm}^4 & W_z &= 12,27 \text{ cm}^3 \end{aligned}$$

DIMENSIONAMENTO À COMPRESSÃO PURA:

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N_{sd}}{A_x} = \frac{9,02}{19,63 \times 10^{-4}} = 4,60MPa$$
$$f_{c,0,d} = 16,73 \text{ MPa}$$
$$\sigma_{c,0,d} \leq f_{c,0,d} \quad 4,60 \leq 16,73 \quad (\text{EC5, Eq. 6.2})$$

5.1.4.2 VERIFICAÇÃO DA SEGURANÇA AOS ELS

No que respeita à verificação da segurança em relação aos estados-limite de utilização, a abordagem em madeira é relativamente diferente da dos restantes materiais como o aço por exemplo, sendo esta diferença devida principalmente à influência da variação do teor em água e ao fenómeno de fluência, já mencionados anteriormente. Assim, e de acordo com o EC5, os estados-limite de utilização relevantes para o cálculo de estruturas são o de deformação e o de vibração. O estado limite de deformação corresponde à deformação propriamente dita dos elementos estruturais, às suas flechas e ao escorregamento das ligações. O estado limite de vibração refere-se a vibrações nas estruturas causadas pelo funcionamento de máquinas, impactos, ruído, utilização humana, etc., e destina-se a pavimentos, pelo que não será verificado no presente estudo.

ESTADO LIMITE DE DEFORMAÇÃO

Segundo o EC5, a deformação dos elementos de madeira é constituída por várias componentes como a deformação instantânea (w_{inst}), que ocorre no instante em que são aplicadas as cargas, o incremento de deformação devido à fluência (w_{creep}) e, eventualmente, a deformação decorrente da contra flecha (w_c) que é por vezes utilizada. Observe-se a expressão de cálculo da deformação e suas componentes sugeridas pelo EC5 na Figura 5.10.

Refira-se ainda que a deformação u_{inst} deve ser calculada para a combinação característica (apresentada na secção 4.3.2 do presente trabalho) combinando os valores característicos das ações permanentes e ação variável de base Q_1 com os valores de combinação das restantes ações $\psi_0 \cdot Q_{k,i}$. Por outro lado, a deformação final, deve ser obtida a partir de valores calculados para a combinação quase-permanente, também apresentada na secção 4.3.2. Os valores máximos definidos pelo EC5 podem ser consultados na Tabela 5.2.

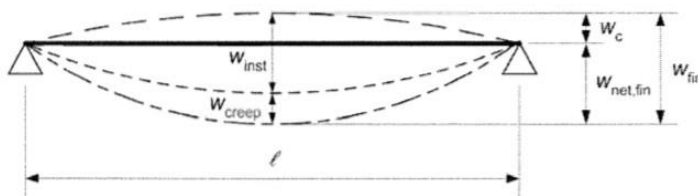


Figura 5.10 - Componentes da deformação e sua relação segundo EC5

	w_{inst}	$w_{net,fin}$	w_{fin}
Beam on two supports	$l/300$ to $l/500$	$l/250$ to $l/350$	$l/150$ to $l/300$
Cantilevering beams	$l/150$ to $l/250$	$l/125$ to $l/175$	$l/75$ to $l/150$

$$u_{fin} = u_{inst} (1 + k_{def})$$

Tabela 5.2 - Deformações máximas admissíveis segundo EC5.

No caso em estudo, a situação condicionante ocorre nas madres:

$$u_{fin,z} = 1,8 \text{ cm} < u_{fin,max,z} = L/150 = 2,7 \text{ cm}$$

No caso dos pilares:

$$u_{fin,x} = 0,8 \text{ cm} < u_{fin,max,x} = L/150 = 1,6 \text{ cm}$$

5.1.5 LIGAÇÕES

O dimensionamento das ligações constitui um dos grandes desafios do projeto de estruturas de madeira devido à anisotropia do material. Assim, a capacidade mecânica de uma

ligação é normalmente condicionada pela falta de espaço para introduzir os ligadores (Negrão, 2009).

No caso presente existem quatro questões fulcrais que condicionam o projeto da estrutura de suporte de madeira: a ligação que permite a continuidade da viga sobre os pilares centrais, a ligação viga-pilar de extremidade, a ligação madre-viga e a fixação dos painéis solares às madres.

Uma vez que o vão total a vencer é de 10 metros e, não havendo madeira de rolaria disponível com essas dimensões, optou-se por dimensionar a estrutura em três vãos considerando a viga rotulada em cada um dos pilares intermédios. Para isso foi necessário estudar uma solução para assegurar a continuidade da viga nos pontos de momento nulo, sendo a ligação através de chapas metálicas aparafusadas a mais adequada.

No que diz respeito à ligação viga-pilar de extremidade, foi considerada a ligação de varão colado de topo no pilar a atravessar a viga com porca e anilha do lado superior desta.

A escolha da tipologia de ligação viga-madre é a de maior dificuldade uma vez que não se deve fazer furação ao longo do comprimento da viga dado que isso acarreta perda de resistência, optou-se por um sistema de abraçadeiras metálicas com fêmea que irão abraçar a viga e fixar os parafusos que atravessam as madres como mostra o esquema da Figura 5.11. A fixação das abraçadeiras na viga será feita ao longo da linha neutra com parafusos de roscar de forma a evitar perda de resistência das fibras tracionadas ou comprimidas. Outra situação a ter em conta, diz respeito às madres que se encontram nos pórticos intermédios, que, pelo facto de estarem justapostas condicionam o espaço disponível para colocar a ligação (no caso as abraçadeiras metálicas).

Em relação à ligação painéis-madre foi prevista utilização de perfis em alumínio que fazem a fixação de sequências de painéis como ilustrado no esquema da Figura 5.11. Estes perfis serão fixos com recurso a parafusos de roscar. A posição das fixações na madre depende do tamanho dos painéis e da quantidade a instalar estando portanto dependentes do projeto eletrotécnico. Dada a evolução tecnológica neste campo, as dimensões e número de painéis a instalar varia de dia para dia pelo que há uma margem de manobra no que respeita ao posicionamento dos perfis de alumínio e fixação dos painéis. Devem considerar-se os pontos ao longo das madres onde o momento é menor em módulo de forma a comprometer o menos possível o desempenho da estrutura à flexão. Apresentam-se os esquemas do resultado do dimensionamento em Rolaria na Figura 5.12.

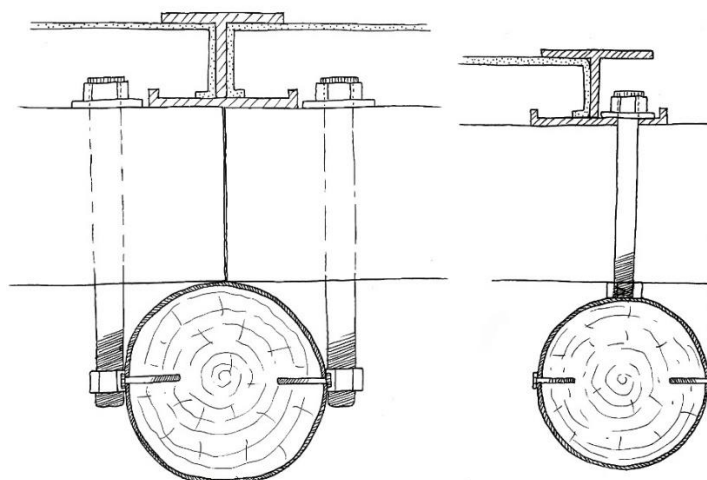


Figura 5.11 – Esquemas da ligação madre-viga nos pórticos intermédios e de extremidade

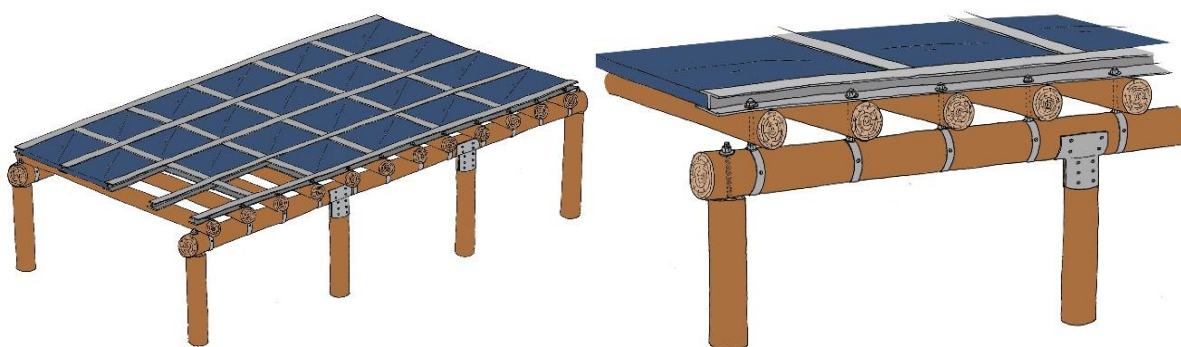


Figura 5.12 – Esquemas da solução em Rolaria de Madeira

5.1.6 FUNDAÇÕES

Em relação às fundações, podem ser utilizadas duas tipologias diferentes que, para além do seu custo relativamente baixo, apresentam desempenhos aceitáveis tendo em conta as condicionantes de projecto – estacas de rolaria de madeira cravadas ou pilares encastrados com recurso a betão ou brita. A escolha de uma destas tipologias estará dependente das características do solo a que se destina o projecto. No caso de estudo em que foi baseado este trabalho, foi efectuado um sistema de estacas em betão armado no qual se procedeu em primeiro lugar à furação e, posteriormente, à inclusão das armaduras e betonagem. Na solução em madeira, a utilização da segunda tipologia aparenta ser a mais adequada para um solo maioritariamente rochoso.

5.2 DISCUSSÃO E JUSTIFICAÇÃO DO DIMENSIONAMENTO

Uma vez que a normalização para a classificação da rolaria de madeira como material estrutural ainda não está implementada foi tida em conta a classificação da norma EN338. Embora esta seja referente a madeira de secção retangular, o comportamento mecânico da madeira de secção circular é semelhante ao da madeira serrada da classe C30. Por outro lado, o material em estudo apresenta comportamento mecânico em termos de módulo de elasticidade e resistência à flexão semelhante à classe EE segundo a norma NP4305 (IPQ) que corresponde à Classe C35 da norma EN338.

5.3 ESTUDO COMPARATIVO COM AS SOLUÇÕES EM AÇO

No que respeita aos custos foi levada a cabo uma análise de uma estrutura tipo de 202 m² semelhante à estrutura em aço na qual se baseou este estudo. Para o cálculo de cada uma das componentes de custo foram consideradas as quantidades de cada um dos elementos constituintes da estrutura tipo (Tabela 5.3). Note-se que não estão incluídas no estudo as componentes referentes aos custos inerentes às fundações e parafusaria correspondente às ligações, de forma análoga ao que foi feito no estudo da solução em aço. Também, foram estimados os valores referentes às componentes transporte e ligações que são dependentes das quantidades encomendadas variando consideravelmente em função destas, contudo, foi feito um estudo de mercado para ter referências aceitáveis.

6 CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

No decorrer do presente estudo procurou explorar-se as vantagens da rolaria de madeira como material de construção sustentável, com elevado potencial para o uso estrutural.

A escolha e posicionamento da tipologia de ligação metálica constitui talvez o maior desafio do projeto de estruturas de madeira de secção circular à imagem do que acontece com a madeira de secção retangular dado o reduzido espaço disponível para as posicionar. Por outro lado, os elevados custos das ligações metálicas condicionam bastante a escolha da tipologia de ligação a utilizar na medida em que isso irá trazer variações significativas no custo final do projeto. Por isso, e em projetos de grande escala em que uma estrutura base é repetida ao longo de vastas áreas torna-se bastante importante e decisivo o trabalho em paralelo dos diferentes intervenientes no projeto desenvolvendo em paralelo soluções complementares que se tornem vantajosas em termos de custo-benefício.

Elementos	Comprimento	Quantidades	Preço dos Elementos (euros)
Pórticos de suporte	16,364	6	392,7
Madres	4,098	60	983,5
Travamentos	4,421	8	141,5
Transporte	1€/ml	379	379,4
Ligações	2€/m ²	202	404,0
		Preço da Estrutura de 202 m ² (€)	2301,2
		Preço da Rolaria Tratada (€/ml)	4,0
		Preço unitário de Estrutura de Madeira (€/m ²)	11,4
		Preço unitário de Estrutura de Aço (€/m ²)	20,4
		Diferença (€)	9,1
		Diferença (%)	44,6

Tabela 6.1 - Preços da solução em madeira

De acordo com o dimensionamento efetuado e com os custos estimados para soluções equivalentes, a solução em rolaria de madeira apresenta uma redução em cerca de 45% face à solução em aço. Adicionalmente, o aprovisionamento dos materiais bem como o seu manuseio em obra vêm-se facilitados dada a versatilidade superior da madeira em comparação com o aço.

No que respeita a desenvolvimentos futuros, seria interessante desenvolver uma solução em rolaria de eucalipto de forma a averiguar a sua adequabilidade a projetos desta natureza.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Carvalho, Domingos Miguel Sequeira – Análise e Caracterização Energética de Sistemas Fotovoltaicos de Baixa Potência com Ligação à Rede Elétrica. FEUP, 2011. Dissertação de mestrado.

Dias, A. (2009) Apontamentos de Estruturas de Madeira, DEC, UC.

European Committee for standardization, CEN (2001). “EN 1990 - Eurocode 0: Basis of structural Design.”, Brussels, Belgium.

European Committee for Standardization, CEN (2004). “EN 1991 - Eurocode 1: Actions on structures.”, Brussels, Belgium.

European Committee for standardization, CEN (2002). "EN 1995 - Eurocode 5: Design of timber structures Part 1-1.", Brussels, Belgium.

European Committee for standardization, CEN (2003a). " EN 1995 - Eurocode 5: Design of timber structures Part 2.", Brussels, Belgium.

European Committee for standardization, CEN (2003c). "EN338 - Structural timber – Strength classes.", Brussels, Belgium.

European Committee for standardization, CEN (2004b). "EN1912 - Structural timber - Strength classes - Assignment of visual grades and species.", Brussels, Belgium.

European Committee for standardization, CEN (2004). "EN 1993-1-1 - Eurocode 3 - Design of Steel Structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings.”, Brussels, Belgium.

European Committee for standardization, CEN (2004). "EN 1993-1-3 - Eurocode 3 - Design of Steel Structures - Part 1-3: General rules - Supplementary rules for cold-formed members and sheeting.”, Brussels, Belgium.

European Committee for standardization, CEN (2006). “ EN 335-1 - Durability of wood and wood-based products — Definitions of use classes — Part 1: General.”, Brussels, Belgium.

European Committee for standardization, CEN (1994). “EN 350-2 - Durability of wood and wood-based products — Natural durability of solid wood — Part 2: Guide to natural durability and treatability of selected wood species of importance in Europe.”, Brussels, Belgium.

- European Committee for standardization, CEN (2004). "EN 384 - Structural timber — Determination of characteristic values of mechanical properties and density.", Brussels, Belgium.
- European Committee for standardization, CEN (2003a). "EN14251 - Structural round timber – Test methods.", Brussels, Belgium.
- Green, D. W. (1999). Wood Handbook - Wood as an engineering material. Forest Products Laboratory.
- IPQ (1995). "Madeira de pinheiro bravo para estruturas." NP4305. Instituto Português da Qualidade.
- Junior, Carlito Calil (2010). Manual de projeto e construção de estruturas com peças roliças de madeira de reflorestamento. USP, Brasil.
- Makepeace, J. (1993). The encyclopedia of wood. Nova York.
- Negrão, J. H. (2005). Estruturas de Madeira - Durabilidade e Preservação. Coimbra: Universidade de Coimbra.
- Negrão, J., & Faria, A. (2009). Projecto de Estruturas de Madeira, Ed. Publindústria, Porto, Portugal.
- Porteous, J., & Kermani, A. (2007). Structural timber design to Eurocode 5. United Kingdom: Blackwell Publishing.
- Pinho, João Tavares (2014) - Manual de Engenharia para sistemas fotovoltaicos, Rio de Janeiro, CEPTEL – CRESESB.
- Sousa Paulo, Elisabete Maria Madureira Coelho de (2010) – O Processo de Avaliação de Fornecedores de madeira no desenvolvimento do Sistema da Qualidade – Dissertação de mestrado, FEUP, Porto.
- Szücs, C. A., Terezo, R. F., Valle, Â. d., & Moraes, P. D. (2005). Sebenta de Estruturas de Madeira. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil.
- <https://madeiraestrutural.wordpress.com/2009/05/12/vantagens-do-uso-da-madeira-como-material-estrutural/>
- <http://www.lnec.pt/pt/servicos/normalizacao-e-regulamentacao/normalizacao/ct-115-eurocodigos-estruturais/>
- <http://www.portal-energia.com/vantagens-e-desvantagens-da-energia-solar/>
- <http://fisica.ufpr.br/grimm/aposmeteo/cap2/cap2-7.html>