Estruturas de suporte em rolaria de madeira para parques fotovoltaicos

Timber-logs bearing structures for photovoltaic power stations

João H. Negrão
Tiago Pires
Telmo Morgado

Resumo

Os parques de painéis solares fotovoltaicos requerem áreas relativamente extensas, ocupadas de forma compacta. Não estando em causa valores elevados de cargas de utilização ou de ações ambientais, as estruturas de suporte são relativamente ligeiras, geralmente de tipo porticado com barras metálicas de gama comercial. Este parece ser o tipo de utilização na qual uma estrutura constituída por rolaria pode ter vantagens competitivas, porque a dimensão e secção das peças é pequena, compatível com a rolaria disponível de operações de desbaste e manutenção. Além do mais, esta aplicação constitui um fator de valorização para este material, que é de muito baixo custo e escassa aplicabilidade industrial. Neste trabalho são analisadas e comparadas soluções metálica e em madeira de rolaria para um caso concreto. A primeira corresponde a um caso real construído, e a segunda a uma alternativa em rolaria, concebida com vista a ultrapassar os constrangimentos relativos ao tipo de material, nomeadamente na disponibilidade de dimensões e na problemática das ligações.

Palavras-chave: Estrutura / Parques fotovoltaicos / Rolaria de madeira

Abstract

Photovoltaic power stations require extensive areas with a compact occupation. As the service or environmental loadings are moderate, the bearing structures are relatively light, usually of framed type made up with commercially available laminate steels profiles. This seems to be the type of use in which a structure made up with timber logs may have competitive advantages, because the size and cross-section of the elements is small, compatible with the logs available from thinning and maintenance forestry operations. Besides, this application adds value to this material, which has a very low cost and scarce industrial use. In this work, steel and timber-log solutions are analysed and compared for a concrete case. The former corresponds to an actually built solar park and the latter to a timber-log based alternative, designed in order to overcome the constraints related to the type of material, namely concerning the available sizes and the connections.

Keywords: Structure / Photovoltaic power stations / Timber logs

João H. Negrão

PhD, Professor Associado
Universidade de Coimbra
Coimbra, Portugal
jhnegrao@dec.uc.pt

Tiago Pires

MSc, Engenheiro Civil
Portugal
tiagobalhau@gmail.com

Telmo Morgado

PhD, Engenheiro Civil
SERQ
Portugal
telmo.morgado@gmail.com

Aviso legal

As opiniões manifestadas na Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas são da exclusiva responsabilidade dos seus autores.

Legal notice

The views expressed in the Portuguese Journal of Structural Engineering are the sole responsibility of the authors.

NEGRÃO, J. [*et al.*] – Estruturas de suporte em rolaria de madeira para parques fotovoltaicos. **Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas**. Ed. LNEC. Série III. n.º 7. ISSN 2183-8488. (julho 2018) 15-22.

1 Introdução

As necessidades energéticas do mundo contemporâneo aumentam a um ritmo nunca visto, sob a pressão conjunta do desenvolvimento económico e social de regiões e populações do chamado Terceiro Mundo e dos elevados padrões de consumo dos países industrializados. Esta realidade coloca tremendos desafios de sustentabilidade, quer quanto à capacidade de responder a essa procura crescente, quer quanto à forma de o conseguir sem causar danos ambientais irreparáveis, que coloquem em causa ecossistemas inteiros e, em última análise, a própria preservação da habitabilidade do nosso planeta. Desde o início da Revolução Industrial, as energias fósseis (carvão, gás e petróleo) têm assegurado a maior parte das necessidades energéticas, mas a certeza de um esgotamento futuro dessas reservas e a crescente perceção das alterações climáticas, que a libertação diária de milhões de toneladas de dióxido de carbono vem provocando, têm pressionado a busca de fontes energéticas alternativas, que sejam simultaneamente renováveis e não poluentes.

Várias tecnologias estão atualmente em vias de desenvolvimento e exploração, com graus variáveis de sucesso e dependendo dos recursos regionais. Assim, e para além da energia hídrica, que pode considerar-se hoje uma fonte de energia tradicional, e da nuclear, que suscita as reservas conhecidas face ao seu potencial de contaminação na eventualidade de um acidente, têm sido propostos sistemas baseados em energia eólica, solar, geotérmica, ondas do mar e biomassa (Figura 1), sendo as primeiras duas as mais promissoras e já com uma significativa capacidade instalada.

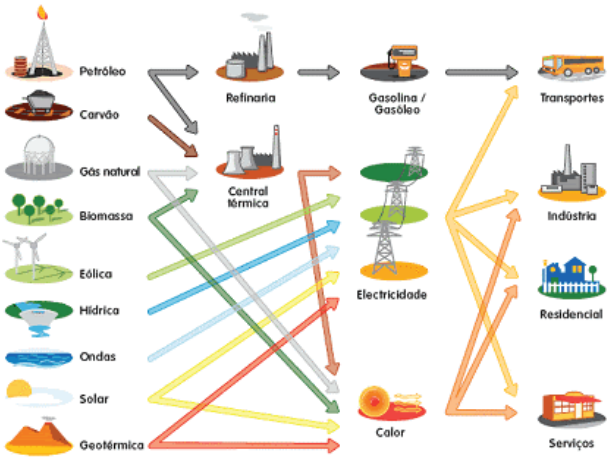

Figura 1 Ciclo de energia ([1], acedido em 2016-10-24)

A energia solar, em particular, constitui um recurso inesgotável, à dimensão humana, e tem a vantagem de tanto poder ser utilizada diretamente como convertida em energia elétrica por efeito fotovoltaico. A energia solar recebida pela Terra em 1 ano equivale a 15000 vezes a energia total utilizada em toda a história da Humanidade [5]. Regiões de baixas latitudes e/ou com climas temperados de tipo mediterrânico, como é o caso da Europa do Sul e de Portugal, têm condições ideais para instalação rentável de parques fotovoltaicos. O número de horas de sol em Portugal

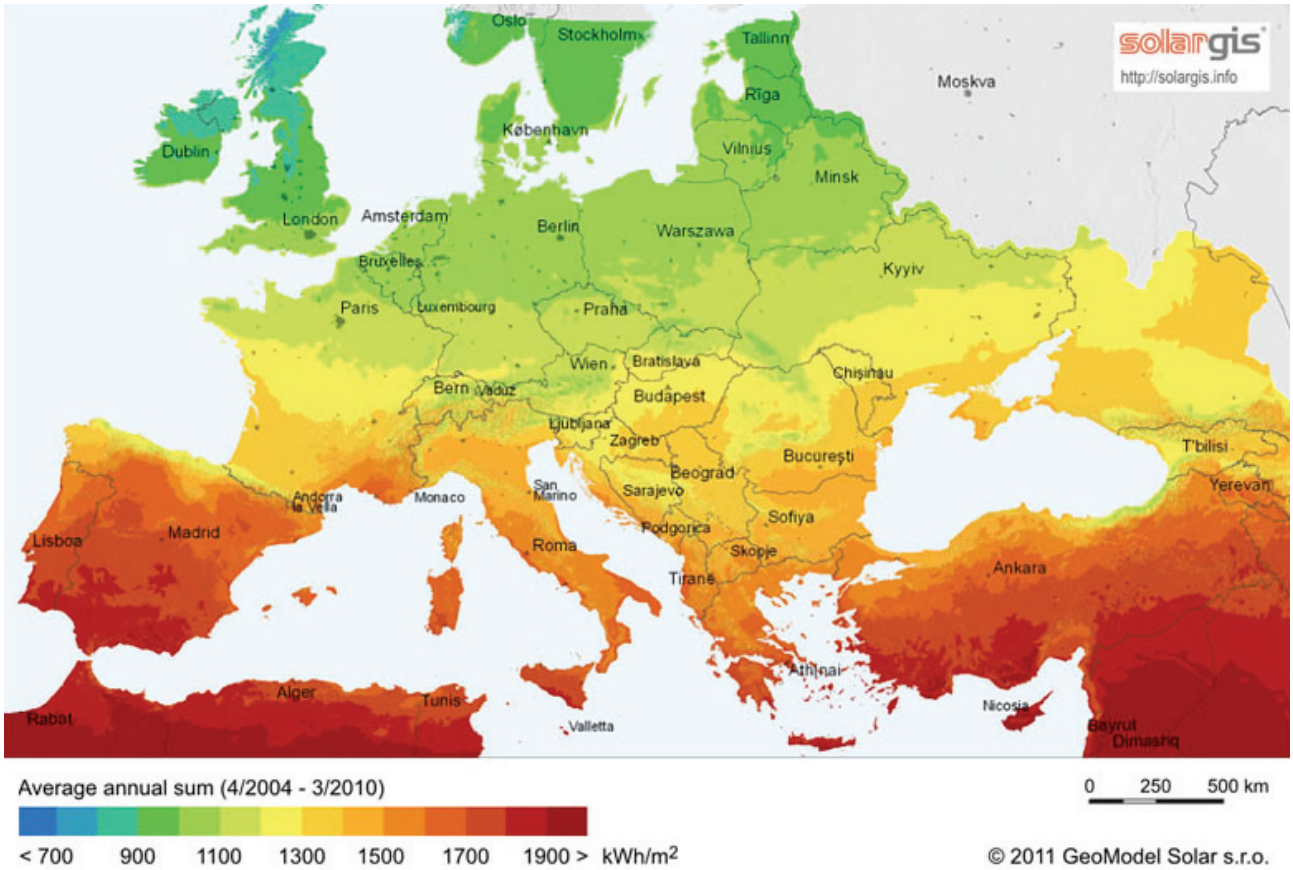

Figura 2 Irradiação solar na Europa ([3], acedido em 2016-10-24)

varia entre 2200 e 3000, contra 1200 a 1700 na Alemanha, por exemplo. A Figura 2 representa o mapa de irradiação solar na Europa, evidenciando bem este potencial. Segundo um relatório de 2016 da International Energy Agency [2], os custos de produção de energia fotovoltaica sofreram uma redução de 65% entre 2010 e 2015 e espera-se que sofram uma redução adicional de 25% até 2020. Estes indicadores colocam esta fonte de energia renovável, juntamente com a eólica como as mais promissoras para assegurar o abastecimento energético futuro.

Os parques fotovoltaicos, já construídos um pouco por todo o mundo, são constituídos por milhares de painéis fotovoltaicos, apoiados numa estrutura simples que lhes confere a orientação adequada à melhor exposição solar. Na maior parte dos casos, a estrutura é metálica, constituída por perfis laminados ligeiros, como Us ou cantoneiras. O valor relativamente modesto das cargas de projeto torna viável o uso alternativo de rolaria de madeira de baixo diâmetro, geralmente sem desempenho suficiente para aplicação estrutural. Este material resulta das operações de desbaste, indispensáveis ao desenvolvimento adequado de florestas economicamente exploradas.

Neste artigo procede-se ao estudo comparativo entre uma solução metálica real e uma possível alternativa em rolaria de madeira de baixo diâmetro. A consideração de uma situação de referência real teve como objetivo limitar, tanto quanto possível, as escolhas subjetivas de topologia e dimensões, que poderiam influenciar as conclusões em favor ou desfavor de algum dos materiais em confronto. O parque de referência situa-se na ilha de Reunião, território francês no Oceano Índico, e foi escolhido pelo facto de um dos autores exercer funções de diretor técnico da obra de construção. A área total do terreno de implantação é de cerca de 50 000 m^2, totalmente ocupado por estufas em cuja cobertura se situam os painéis.

3 Solução metálica real

3.1 Sistema estrutural

A estrutura construída é constituída por um sistema de pórticos contínuos com 2 vãos de 5 m (Figura 3). O espaçamento entre pórticos é de 4,048 m e os centrais estão contraventados (Figura 4).

Os pórticos e as madres são em aço. Os painéis assentam em perfis de alumínio apoiados nestas, como mostra a Figura 5.

As ações relevantes para o cálculo desta estrutura são as permanentes (peso da estrutura e dos painéis) e o vento. Para os painéis, considerou-se uma carga uniformemente distribuída de 0,11 kN/m^2, obtida a partir das dimensões e peso unitário fornecidos

pelo fabricante. Quanto ao vento, e tratando-se de um território francês, foram tidos em conta os coeficientes do Anexo Nacional Francês da EN 1991-1-4 (Eurocódigo 1 ou EC1, Parte 1-4) [4]. Para coberturas isoladas, como é o caso presente, a ação do vento deve ser considerada por meio dos coeficientes de pressão resultantes, que já exprimem o efeito conjunto nas faces de barlavento e sotavento da superfície exposta ao vento, e coeficientes de força, que permitem determinar os valores globais da força do vento na cobertura. Para as condições específicas do local, a pressão dinâmica de pico é de 0,99 kN/m^2 e, considerando os coeficientes de pressão resultantes do Quadro 7.6 do EC1:1-4, para uma cobertura com 2° de inclinação e um coeficiente de obstrução $\varphi = 0$, obtêm-se as pressões indicadas na Tabela I. As zonas B e C são as orlas da cobertura e os coeficientes correspondentes são usados apenas para verificação da segurança de elementos secundários nessas zonas localizadas. As combinações de ações fundamentais foram as do vento como ação variável de base, originando quer pressões quer sucções na cobertura. O estado-limite de utilização considerado foi o de deformação.

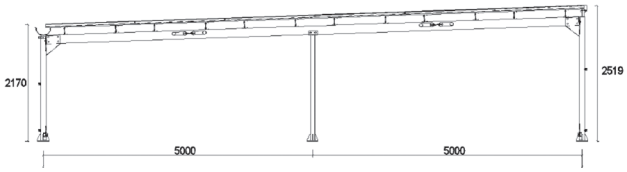

Figura 3 Esquema do pórtico-tipo

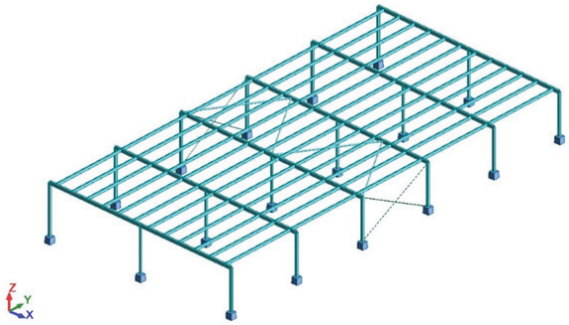

Figura 4 Esquema da estufa tipo (o número de pórticos é variável)

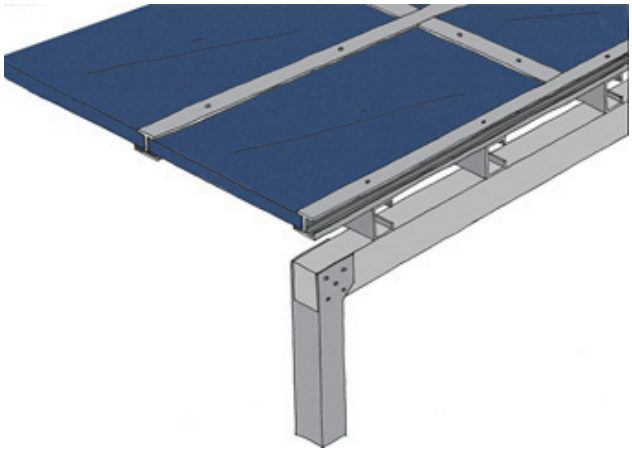

Figura 5 Pormenor de apoio dos painéis

Tabela I Valores caraterísticos das pressões do vento

Zona A pressão	+0,61	Zona B pressão	+1,89	Zona C pressão	+1,17
Zona A sucção	−0,79	Zona B sucção	−1,45	Zona C sucção	−1,55

Os esforços e deformações foram obtidos a partir de uma análise estrutural linear e elástica. O dimensionamento foi realizado em observância da EN 1993-1-1 (Eurocódigo 3, Parte 1-1) [5].

A Tabela II define as características e quantidades das barras de aço desta solução. Todas as secções são em aço laminado a quente da classe S275, à exceção das madres, executadas em chapa quinada (*Light Steel Framing*) e aço enformado a frio. Admitir-se-á que os preços unitários das duas variedades de aço são iguais. Os preços rigorosos são difíceis de determinar, pois incluem efeitos de fatores diversos, como o fabrico, transporte, montagem, pintura, conservação, manutenção e volume da encomenda. Por isso, considerar-se-á apenas o custo da estrutura à saída da serralharia, atribuindo-se ao aço um custo unitário de 1,5 €/kg, o que perfaz um total de 3986€ por pórtico, incluindo madres.

Tabela II Características das barras da solução em aço

Elementos	Tipo de secção	Comprimento (m)	Quantidades	Peso unitário (kg)	Peso total (kg)
Vigas pórticos	RHS 160 × 80 × 4	9,88	6	151,4	908,4
Pilares centrais	SHS 80 × 3	1,98	6	20,4	122,4
Pilares laterais curtos	SHS 100 × 4	2,21	6	36,0	216,0
Pilares laterais longos	SHS 100 × 5	2,44	6	41,3	247,8
Madres	LSF C140 × 50 × 14 × 2	4,10	60	17,2	1032,0
Travamentos cobertura	CHS 60 × 3	4,50	4	21,5	86,0
Travamentos laterais	Varão ϕ 20 mm	4,34	4	11,1	44,4

4 Solução alternativa em rolaria de pinho

4.1 Sistema estrutural

Embora, do ponto de vista estrito da comparação de soluções, fosse desejável que a alternativa proposta fosse geometricamente igual à da solução metálica, isso implicaria, para as vigas dos pórticos, o uso de rolos com 5 m de comprimento o que está acima da dimensão habitual deste tipo de elemento que, recorde-se, procede de operações de desbaste de árvores juvenis. Por isso, considerou-se uma solução com três em vez de dois vãos, com rolos de cerca de 3,3 m de comprimento (Figura 6). Os rolos são emendados sobre os apoios, podendo estabelecer-se continuidade parcial entre vãos usando chapas metálicas finas pregadas, para suportar as trações do momento negativo, como esquematizado na Figura 7a. Em alternativa, pode não se usar estas chapas, ficando os tramos das vigas simplesmente apoiados sobre os pilares, mas é então necessário verificar a admissibilidade das rotações relativas entre vigas adjacentes. Uma vez que não há continuidade de momentos das vigas para os pilares, pelo menos um destes deverá ser encastrado na base, a fim de evitar a ocorrência de mecanismos. Tendo em conta que os rolos de pinho serão necessariamente impregnados com produto preservador e podem ser encastrados no terreno sem risco de apodrecimento, a solução mais óbvia será a de encastrar todos os pilares na fundação, pelo que aquele requisito não implicará dificuldades adicionais, tendo sido por isso adotada esta variante no modelo analisado. Poderia ainda ter sido mantida a solução de dois vãos, emendando as vigas com rótulas metálicas na região de momento nulo dos vãos, o que permitiria continuidade dos rolos sobre os apoios, onde os esforços são maiores (Figura 7b). Todavia, esta solução requer continuidade de momentos nos apoios laterais, sem o que é instável.

Tanto as vigas como os pilares são de secção circular, com 160 mm no caso das primeiras e 130 mm para os últimos. As quantidades e os volumes correspondentes são indicados na Tabela IV. A massa volúmica, resistência à flexão, compressão paralela ao fio e módulo de elasticidade global foram determinados por Morgado [6], mediante ensaio de uma amostra de 120 toros torneados de pinho bravo com aproximadamente 12% de teor em água, apresentando-se os respetivos valores na Tabela III. Destes valores pôde inferir-se o de outras propriedades, seguindo o procedimento indicado na EN 384 [7].

Tabela III Propriedades mecânicas da rolaria de pinho bravo [6]

Propriedade	Valor médio	Valor característico
f_m (N/mm²)	69,3	38,6
$f_{c,0}$ (N/mm²)	37,7	24,6
$f_{t,0}$ (N/mm²) (*)	–	23,2
f_v (N/mm²) (*)	–	3,7
$E_{0,global}$ (kN/mm²)	13,9	9,3
ρ (kg/m³)	528,8	444,6

(*) Determinadas segundo a EN 384

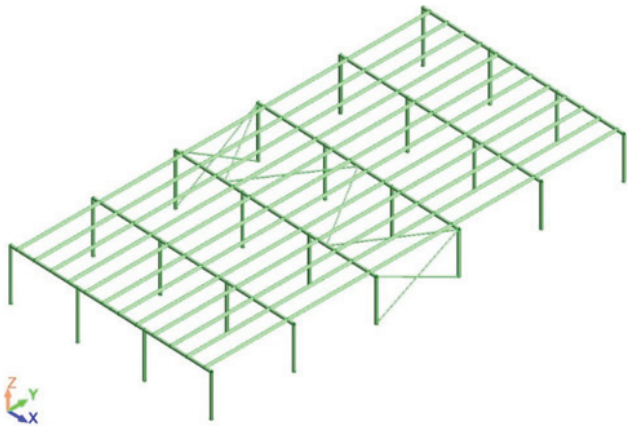

Figura 6 Esquema da estufa tipo (o número de pórticos é variável)

Embora para os elementos de travamento tenha sido considerada uma secção de 50 mm de diâmetro, esta deveria provavelmente ser substituída por um elemento de maior expressão, uma vez que não estão disponíveis rolos tão esbeltos e longos.

Tabela IV Características das barras da solução em rolaria de madeira

Elementos	Tipo de secção	Comprimento (m)	Quantidades	Volume unitário (m³)	Volume total (m³)
Vigas pórticos	ϕ 160 mm	9,88	6	0,198	1,192
Pilares centrais	ϕ 130 mm	2,21	12	0,029	0,352
Pilares laterais curtos	ϕ 130 mm	1,96	6	0,026	0,156
Pilares laterais longos	ϕ 130 mm	2,44	6	0,032	0,194
Madres	ϕ 130 mm	4,10	60	0,054	3,265
Travamentos cobertura	ϕ 50 mm	4,50	4	0,008	0,035
Travamentos laterais	ϕ 50 mm	4,34	4	0,007	0,034

As quantidades de material foram expressas em volume, como é mais frequente no caso de estruturas de madeira. O preço estimado da rolaria de pinho bravo é de 300 €/m^3, já incluindo tratamento, ligações e preparação para esta aplicação particular. Com esse valor-base, a estimativa de custo global da solução em rolaria de pinho será de 1567 €.

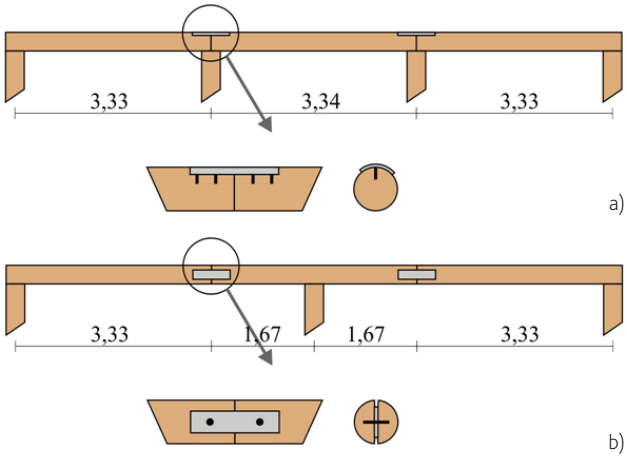

Figura 7 Pórticos de a) 3 vãos e b) 2 vãos

5 Discussão

Na estimativa de custo de ambas as soluções, não foi incluída a parcela relativa a fundações, porque se supõe que, dada a semelhança de peso próprio e topologia das duas propostas, a expressão das sapatas deve ser muito semelhante. A ser considerada aquela parcela, pensa-se até que a solução em rolaria de pinho resultaria ainda mais beneficiada uma vez que, podendo os pilares de madeira tratada ser enterrados sem problemas de durabilidade, a sua ligação às fundações seria mais simples e barata do que a da solução metálica.

Tendo em conta a estufa de referência considerada, com uma área de 202 m^2, os custos globais mencionados nas seções 3 e 4 correspondem a preços unitários de 19,7 € e 7,8 € para as soluções metálica e em rolaria de pinho, respetivamente. Uma diferença tão expressiva resiste mesmo à possibilidade de ter sido subavaliado o custo da variante em rolaria, uma vez que o custo unitário atribuído ao aço está seguramente abaixo do atualmente praticado no mercado.

Tendo este estudo o objetivo essencialmente genérico de avaliar a competitividade da variante de rolaria em relação à solução comum em aço, não foi prestada atenção especial à pormenorização, nomeadamente das ligações. Na Figura 8 representam-se algumas possibilidades de ligação madres-vigas (a, b e c) e vigas-pilares (c), todas de realização simples e dimensionáveis à luz dos métodos de cálculo já consagrados na EN 1995-1-1 (EC5, Parte 1-1) [8].

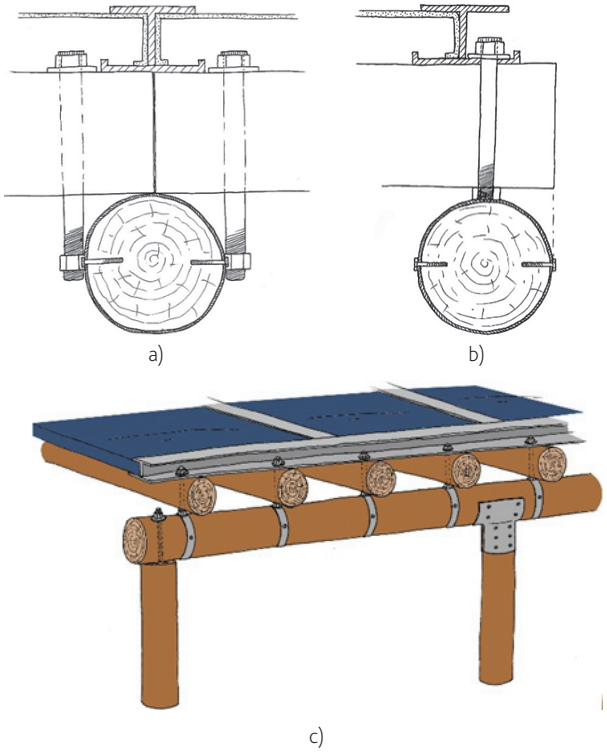

Figura 8 Possibilidades de ligação para estruturas em rolaria de madeira [9]

Para facilitar a comparabilidade das duas propostas, considerou-se uma estrutura porticada para a variante em rolaria de madeira. No entanto, pela sua secção e comprimentos correntes, estes elementos têm maior aptidão para a realização de estruturas total ou parcialmente treliçadas bi ou tridimensionais. A título exemplificativo, ilustram-se duas topologias na Figura 9, de entre as muitas possíveis para a volumetria pretendida para a construção, sendo na liberdade de formas e consequente otimização do desempenho das peças que reside a maior vantagem destas propostas.

Neste tipo de solução, muitas barras funcionam em esforço axial, pelo que é necessário recorrer a ligações adequadas, de tipos diferentes dos representados na Figura 8. Na Figura 10 representam-se alternativas possíveis de ligação. Na solução a), a transferência

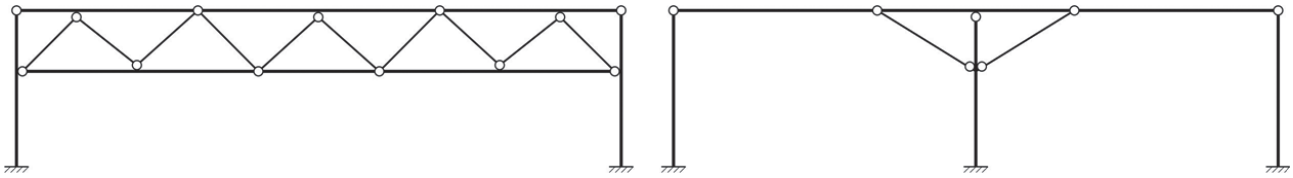

Figura 9 Possíveis topologias alternativas

de força axial é feita por corte nos parafusos ou cavilhas inseridos em furos da chapa metálica de ligação. Na configuração b), o varão de ligação axial está aparafusado num furo praticado num bloco circular transversal de ancoragem, que suporta a força por pressão axial contra a madeira envolvente. No esquema c), a força de tração é transmitida à madeira por aderência na interface lateral colada, sendo usada uma cola estrutural adequada, como uma resina epóxi. Do ponto de vista de execução é a solução mais simples e há propostas de regras de colagem para projeto, como a da Parte 2 do EC5 de 1997 [10], entretanto revogada. No entanto, a colagem só deve ser usada em situações de teor de água baixo a moderado (classes de serviço 1 e 2 segundo o EC5) e não ter exposição solar direta, condições que podem ser difíceis de assegurar numa aplicação exterior como aquela aqui discutida. Morgado [6] conduziu um estudo experimental sobre os três tipos de ligação, tendo concluído que o sistema c) é o que apresenta menor variabilidade, tanto na resistência como na rigidez, na condição de que o dimensionamento seja feito de modo a assegurar rotura dúctil pelo varão, como é desejável. Para as configurações ensaiadas, foi ainda o sistema que conduziu ao maior valor médio da carga de rotura. Vale a pena estender a comparação discutida neste trabalho a topologias treliçadas, que utilizem estes sistemas de ligação, mas esse objetivo já ultrapassa os limites deste trabalho.

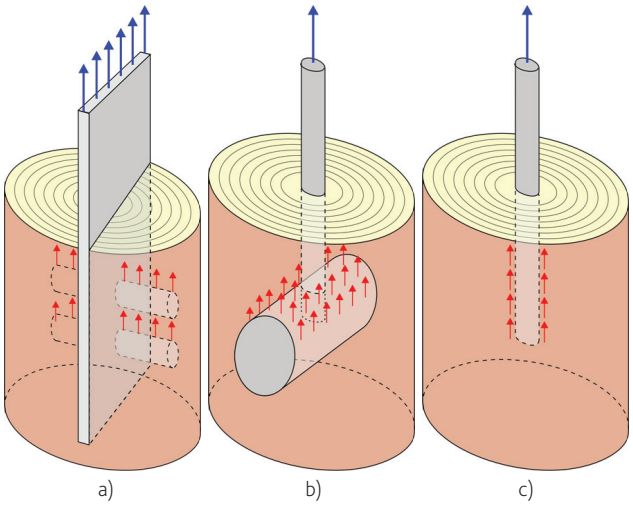

Figura 10 Sistemas de ligação topo a topo

6 Conclusões

As estruturas de suporte dos parques de painéis fotovoltaicos são pequenas e modulares, podendo inclusivamente repetir-se de uma para outra instalação. Essas caraterísticas ajustam-se a uma elevada componente de prefabricação e têm favorecido o uso de soluções metálicas, dada a gama normalizada de secções comercialmente disponíveis. No entanto, a dimensão dos elementos destas estruturas e o nível de esforços que devem suportar são igualmente compatíveis com o uso de rolaria de pinho de baixo diâmetro, obtida de operações de desbaste florestal e com muito baixo valor comercial. Neste estudo procedeu-se à comparação das soluções para uma situação de projeto real, obtidas com os dois materiais, sendo a solução metálica a que está efetivamente executada. A conclusão relevante é de que, mesmo tendo sido considerado um custo unitário baixo para a estrutura metálica, a solução em madeira tem um custo da ordem de 50% daquela, apresentando, por conseguinte, um elevado potencial de exploração e de aproveitamento de um recurso renovável, energeticamente limpo e disponível em Portugal e noutros países com vocação florestal.

Referências

[1] www.portal-energia.com

[2] International Energy Agency (IEA) – "Tracking Clean Energy Progress" 2016.

[3] http://solargis.info

[4] CEN-Comité Européen de Normalization – EN 1991-1-4: Eurocode 1 – Actions sur les structures – Partie 1-4: Actions générales – Actions du vent, Brussels, 2005.

[5] CEN-Comité Européen de Normalization – EN 1993-1-1:2005 + AC:2009, Eurocode 3 – Design of steel structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings, Brussels, 2005.

[6] Morgado, T. – *Classificação e Aplicação Estrutural da Madeira de Secção Circular de Pinheiro Bravo*. Tese de Doutoramento, Universidade de Coimbra, Portugal, 2013.

[7] CEN-Comité Européen de Normalization – EN 384:2010, Structural timber – Determination of characteristic values of mechanical properties and density, Brussels, 2010.

[8] CEN-Comité Européen de Normalization – EN 1995-1-1:2005, Eurocode 5: Design of timber structures – Part 1-1: General – Common rules and rules for buildings, Brussels, 2004.

[9] Pires, T. – *Estudo comparativo entre soluções metálicas e de rolaria de madeira de pequeno diâmetro para a produção de estruturas de suporte de painéis fotovoltaicos*. Tese de Mestrado, Universidade de Coimbra, Portugal, 2016.

[10] CEN-Comité Européen de Normalization – EN 1995-2:1997, Eurocode 5: Design of timber structures - Part 2: Bridges, Brussels, 1997 (withdrawn).