

A UTILIZAÇÃO SUSTENTÁVEL DAS MALHAS ESTRUTURAIS DE MADEIRA

JORGE G. FERNANDES¹, JORGE M. BRANCO²

1: ISISE, Universidade do Minho – Departamento de Engenharia Civil
Azurém, 4800-058 Guimarães
Jorge_fernandes_91@hotmail.com

2: ISISE, Universidade do Minho – Departamento de Engenharia Civil
Azurém, 4800-058 Guimarães
jbranco@civil.uminho.pt

Palavras-chave: Malhas estruturais, estruturas de madeira, malhas elásticas.

Resumo

As malhas estruturais de madeira são estruturas com características muito particulares que lhe conferem a sustentabilidade que hoje em dia se procura na construção. Contudo, a sua utilização tem que ser analisada considerando essas características ímpares que lhe podem conferir uma ajustada utilização, ou não, tendo em conta o contexto em que se insere e o desenho da própria malha. Nesse sentido, é necessário compreender estas malhas como um todo. Desde o seu enorme potencial formal e espacial até às suas limitações geométricas, físicas e construtivas. Apenas com uma base informada se pode, sequer, esboçar a sua adequada utilização. Neste trabalho, com base num caso de estudo, tentar-se-á perceber a adequação de uma malha estrutural de madeira. Uma utilização completa ou parcial compreendendo as ditas limitações da solução e negociando as qualidades de cada opção.

1. INTRODUÇÃO

Entre todos os materiais de construção, a madeira é o único que é natural, completamente renovável e o seu processamento precisa de uma energia mínima, em comparação com outros materiais de construção [1]. Isso é muito importante porque a "Sustentabilidade" hoje em dia é uma exigência e graças às florestas bem geridas, a madeira é um dos recursos mais sustentáveis. Na verdade, há uma grande preocupação em reduzir a pegada humana e a fraqueza do uso de outros materiais também pode ser de grande vantagem para a madeira. Ao contrário da crença popular, o uso da madeira contribui para a manutenção e incremento das florestas, já que na Europa as reservas florestais são controladas e reguladas. Esta nova tendência de mercado também está relacionada com outros fatores, como as vantagens técnicas na construção com madeira e fatores relacionados a uma tendência global onde espaço e forma também são a estrutura [2].

Nesse sentido, se para além de escolher o material correto for selecionado o sistema estrutural certo as vantagens serão amplificadas e as malhas estruturais elásticas de madeira são um excelente exemplo disso mesmo. São estruturas muito eficazes com um uso mínimo de material. A sua eficiência resulta da dupla curvatura, que conforma uma ação similar ao de uma membrana. A partir da qual é possível obter formas tridimensionais simples ou complexas, garantindo uma excelente relação geometria-eficiência.

Para além disso, as malhas de madeira têm vindo a ganhar notoriedade e as suas qualidades, naquilo que diz respeito ao desenho de espaços de qualidade e ao novo potencial de criação para os projetistas, são de grande interesse [3]. Na verdade, estas características fizeram com que nos últimos anos, as malhas estruturais de madeira tenham ganho alguma popularidade no campo da investigação. Como é possível comprovar analisando alguns exemplos como: o pavilhão de Hanover na Expo no Japão, o Centro Earth Gridshell no Reino Unido, bem como a malha do edifício do Savill Garden ou o Downland Gridshell também na Inglaterra [4], entre outros.

Com base em tudo o que foi referido, seria de esperar que as malhas elásticas de madeira fossem mais comuns hoje em dia, no entanto, apenas alguns exemplos acompanham aqueles que já foram mencionados. A sua liberdade formal, que faz delas estruturas aliantes para qualquer projetista, acaba por ser o grande desafio/barreira já que a definição da sua geometria é um processo complexo que dificulta a análise estrutural e o processo de conceção das mesmas [5].

A ausência desse conhecimento consolidado tem deixado este tipo de estruturas de lado em várias situações onde o seu uso seria apropriado e provavelmente mais coerente do que as soluções que foram utilizadas. A escolha de uma malha estrutural de madeira pode ser vantajosa de vários pontos de vista, para além da óbvia plasticidade destas estruturas, a sua leveza, a sua transparência, o material em si e até a curiosidade das pessoas em geral inerente à sua rara utilização, são claras vantagens. E como é de esperar, se um tipo de estrutura é o mais adequado para um projeto, o designer deve ter a capacidade de projetá-lo [6].

Para demonstrar a versatilidade, e a sua utilização sustentável, neste trabalho será feito de forma simples um exercício comparativo, quase que transformativo. Com base num caso de estudo, bem conhecido, tentar-se-á perceber a adequação, ou não, de uma malha estrutural de madeira tendo em conta todos os aspetos já referidos. Uma transformação parcial, compreendendo a ditas limitações da solução e negociando as qualidades de cada opção. Assim, apenas como caso de estudo, será utilizado o pavilhão de Portugal, projetado pelo arquiteto Siza e pelo engenheiro Segadães Tavares, deixando de parte qualquer comentário ao conceito por de trás da obra, fazendo apenas um proveito meramente formal/volumétrico.

O trabalho divide-se em três partes, a primeira parte com uma introdução geral acerca das malhas estruturais de madeira, de seguida o exercício explanado e, por fim, uma reflexão acerca das oportunidades futuras deste sistema construtivo. Pretende-se desta forma fazer um exercício crítico em relação à adequação deste sistema em casos existentes, bem como, suscitar o interesse dos arquitetos e engenheiros fazendo das malhas uma das opções no momento de projeção.

2. CASO DE ESTUDO- PAVILHÃO DE PORTUGAL

Construído para a Exposição Mundial de Lisboa de 1998, o edifício foi concebido para ser a peça central do festival e o pavilhão nacional do país anfitrião, Portugal. A Expo apresentava-se com o tema "The Oceans: A Heritage for the Future" [7], tema que inspirou o autor da obra, Álvaro Siza Vieira com a cooperação de Eduardo Souto de Moura e a Arup AGU [8].

Trata-se de um edifício com reconhecido valor (Figura 1), vulgarmente conhecido como "A PALA", a cobertura da praça cerimonial contígua ao edifício em que durante a EXPO'98 funcionou o Pavilhão De Portugal é formado por duas partes separadas por uma junta de construção. Uma parte é a cobertura suspensa entre dois pórticos implantados perpendicularmente ao cais, constituída por uma lamina de betão com altura mínima de 10 metros. Esta cobertura define uma área destinada a atos públicos e representações e as suas dimensões são de 65 metros por 50 metros. A lamina de betão forma uma catenária pela própria força da gravidade e os cabos de protensão são deixados a mostra nas extremidades [9].



Figura 1. Representação do Pavilhão de Portugal

Esta Pala é na realidade uma membrana de 20 cm de espessura em betão armado e agregados ligeiros, com cabos de aço de alta resistência ancorados de nível em duas estruturas paralelas. Estruturas constituídas por contrafortes prismáticos em betão armado, unidas por uma das faces por paredes e solidarizados no seu coroamento por lajes de repartição de esforços, também em betão armado. A estrutura da cobertura tem uma área de implantação aproximada de quatro mil duzentos e cinquenta metros quadrados, dos quais cerca de três mil novecentos e setenta e cinco metros quadrados correspondem à área livre cobertura (a Pala). Esta cobertura apresenta uma flecha máxima na ordem dos 3 metros e pode considerar-se que o peso da faixa de "Pala" em questão, tem um valor uniforme ao longo da sua extensão, sendo também uniformes as outras ações características que podem atuar sobre a membrana [10]. A sua construção, tal como de todos os pavilhões da EXPO, foi dispendiosa e ultrapassou o orçamento inicial em mais de metade [10]. O seu processo de construção requereu muito tempo e trabalho no que diz respeito à cofragem e betonagem, tendo sido necessário criar um emaranhado estrutural para suportar este processo, como é possível observar na Figura 2.



Figura 2. Construção da 'Pala' [10]

3. SUSTENTABILIDADE TECTÓNICA – GEOMETRIA E MATERIALIDADE

Como é possível verificar é uma obra distinta e sem pare no que diz respeito à sua arquitetura e engenharia. Pode também, constatar-se a inquietude criada entre a forma e o material. Até para aqueles que fizeram parte do seu processo criativo existe esta sensação, pois, segundo Eduardo Souto de Moura - o que inquieta na pala é o facto de um objeto que deveria ser feito com materiais leves ser construído em betão e ter um ar perene. O facto de ser de betão - contranatura - é o que produz a surpresa [9]. Uma inquietação pretendida, mas que será mote, também, para este exercício, que poderá trazer alguma concordância natural e fazer daquilo que é leve... leve. Fazendo com que a sua sustentabilidade geométrica se traduza na sua materialidade (Figura 3).

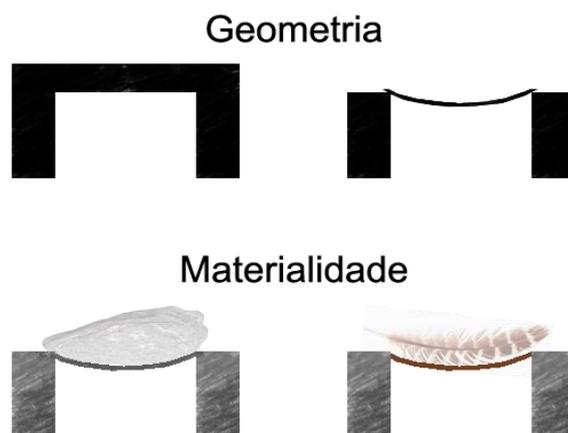


Figura 3. Sustentabilidade geométrica e material

Até porque, ao contrário do betão, as malhas elásticas de madeira são amplamente associadas à preparação das coberturas. Esta colagem deve-se à sua forma, em cúpula, e ao fato de ser um modelo efetivo com grande capacidade de "cobrir". É igualmente associado a adições menores e a construções pré-existentes.

Outra das grandes vantagens associadas a estas estruturas é a sua associação a usos temporários. Pois paralelamente às evoluções estruturais e técnicas estas são soluções leves que podem ser pré-fabricadas e produzidas em massa, garantindo altos padrões de qualidade e controlo de custos. Além disso, esses elementos também são produzidos de forma a permitir a fácil demolição / desmontagem, fazendo destas estruturas ideais para ser usadas em exposições (EXPOS) e festivais organizados por todo o mundo. Este campo de aplicação é provavelmente o mais favorável ao desenvolvimento destas estruturas. Aproveitando os expedientes já associados à madeira, como a "sustentabilidade" e o caráter efêmero deste tipo de edifício. Podendo ainda ser utilizado um revestimento leve, como o policarbonato ou o tecido, requerendo pouca mão-de-obra, rápida instalação e possibilidade de reutilização de todos os componentes [11].

A oportunidade das malhas de madeira pode estar, ainda, na sua imagem diferenciadora, de fato, muitos eventos pretendem criar imagens/marcas excepcionais com as quais os organizadores querem deixar uma boa impressão nos participantes (espectadores, exibicionistas, personalidades...) e as malhas elásticas de madeira têm características arquitetónicas claramente interessantes que só poderiam melhorar a sensação inesquecível que os organizadores procuram [11].

4. TRANSFORMAÇÃO

Tendo por base a volumetria do edifício será considerado apenas a substituição da pala, mantendo os suportes em betão, mesmo que a sua dimensão seja exagerada para os novos, e aligeirados, esforços (Figura 4).

As malhas estruturais de madeira apenas têm um comportamento semelhante ao de uma membrana, no entanto, não são uma superfície. É necessário colocar um revestimento para que possa ter o mesmo efeito plástico, e para que as forças a considerar sejam as mesmas que foram consideradas

no projeto original do Pavilhão de Portugal. Assim, será estimada a utilização de placas de policarbonato, que tal como as malhas de madeira são um revestimento igualmente leve e flexível. Este revestimento será utilizado apenas na parte superior da 'Pala', deixando assim a parte inferior à vista e diminuindo para cerca de metade o peso do revestimento necessário para a forra de toda a cobertura.

Dada a grande massa da própria cobertura, rondando as 1500 toneladas, que agitadas pelas ações sísmicas poderiam, se a "Pala" estivesse rigidamente ligada à estrutura de suporte, originar forças horizontais de inércia de grande magnitude que iriam agravar as já importantes solicitações horizontais. Tomaram assim a decisão de libertar completamente a sua estrutura, sendo a única ligação ao suporte constituída pelos cabos de aço de sustentação na descontinuidade existente entre a "Pala" propriamente dita e a estrutura de suporte. Aqui, da mesma forma serão consideradas as ações das linhas das malhas aos suportes, mas similarmente, o revestimento apenas entra nas contas das ações/peso, visto que, não encostará nas estruturas de suporte [10].



Figura 4. Representação Estrutural da alteração proposta.

4.1. Caracterização – Material, Grelha e Ligações

Para a materialização da malha em madeira, selecionou-se a madeira de Eucalipto. Esta escolha justifica-se pelas propriedades elásticas desta espécie [12] e, neste caso em particular, pela cedência gratuita de alguns elementos, por parte de serrações próximas.

Perante a carência de valores fiáveis para as propriedades mecânicas da madeira de Eucalipto, optou-se por proceder à caracterização desta madeira tendo por base ensaios de flexão estática segundo a norma NP 619:1973. No total ensaiaram-se 15 provetes com 340 mm de comprimento e secção transversal de 20x20 mm², adotando um vão livre de 250 mm. Com base nos ensaios realizados, determinou-se um valor médio para o módulo de elasticidade à flexão de 16977 MPa para um valor médio da massa volúmica de 987 kg/m³ para um valor do teor de água de 12%.

Em relação à grelha da malha proposta será considerado um modelo de 2 camadas, com elementos que distam entre si 2 metros em ambas as direções. Criando uma grelha quadrada, com um encontro a 45° entre as linhas da malha e os suportes. Serão ainda consideradas linhas perimetrais nos dois lados suspensos (arcos), como pode ser visualizado na Figura 5.

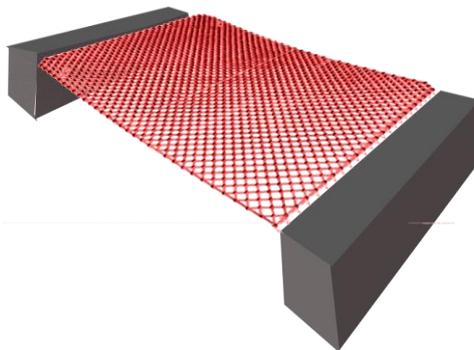


Figura 5. Representação da grelha da malha proposta.

Como solução para as ligações, serão utilizados parafusos com ligações simples. A escolha dos ligadores, baseou-se essencialmente em exemplos de outras malhas estruturais já existentes. Contudo, neste tipo de construção, a resistência dos elementos de ligação não tem uma importância considerável, pois a sua função é essencialmente manter os elementos de madeira nas suas posições.

4.2. Softwares

Sendo esta uma malha elástica, o processo de deformação foi a preocupação principal de todo o processo de construção, e naturalmente, condicionou os processos de conceção e de modelação. Assim sendo, foi necessário encontrar um processo que permitisse simular a transformação da malha no processo construtivo e que apresentasse a sua forma tensionada.

Com base na abordagem computacional [13], é de notar que os softwares atuais possuem ferramentas que nos permitem desenhar facilmente estruturas complexas, neste caso específico, os softwares usados foram o Rhinoceros 5 [14] e o Grasshopper [15]. Esta conjugação de programas consistiu na utilização da programação visual do Grasshopper para conceber os modelos e na utilização do Rhinoceros como visualizador dos mesmos, como pode ser visto na Figura 6.

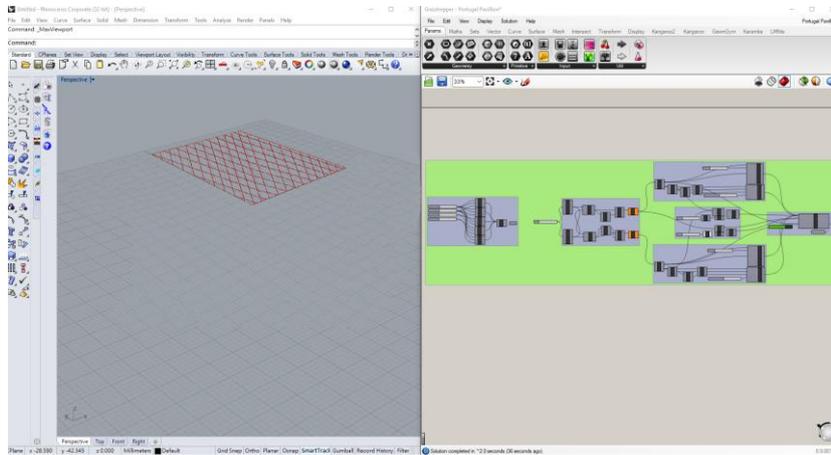


Figura 6. Combinação entre Rhinoceros 5 e o Plug-in Grasshopper.

Contudo, o Grasshopper não tinha a capacidade de simular o processo construtivo da malha, o que fez com que fosse usado como complemento o plug-in Karamba. Esta ferramenta mostrou-se bastante completa, pois oferecia a possibilidade de analisar a estrutura, obter valores de reações, deformações e outros valores relativos ao comportamento estrutural da malha. Apesar de tudo isto, o Karamba foi utilizado apenas no processo de obtenção da forma. Como pode ser visto na Figura 7, no processo da definição da forma da malha no Karamba foram aplicados deslocamentos nos apoios de uma estrutura plana até obter o deslocamento máximo de 3 metros.

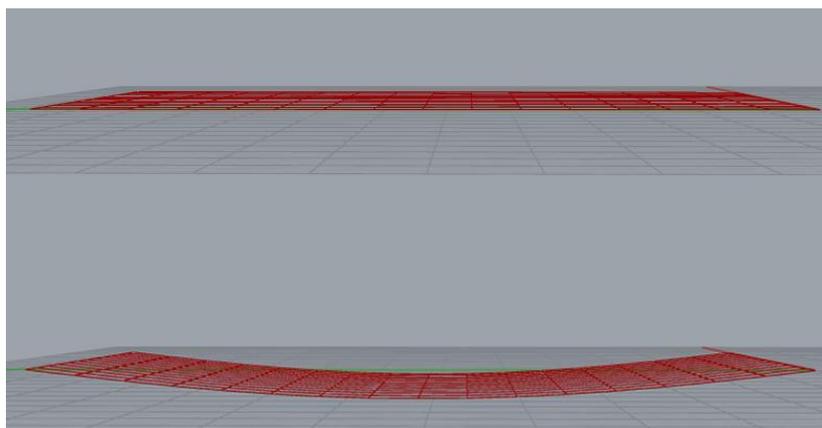


Figura 7. Obtenção da forma.

Para a análise estrutural do caso foi utilizado o software SAP2000 [16]. Tal como a maioria dos softwares comerciais de cálculo estrutural, o SAP2000 demonstrou limitações/complexidade na definição de geometria complexas. Assim sendo, foi necessário utilizar um modelo tridimensional concebido noutra programa. Surgiu com isto a interoperabilidade entre softwares. O objetivo foi utilizar o modelo concebido anteriormente (Rhinceros 5 + Grasshopper + Karamba) no SAP2000. Posto isto, foi exportado o modelo do Rhinceros para um ficheiro AutoCAD'18 [17] (.dwg), e conseqüentemente a importação deste novo ficheiro para o SAP2000. Com a exportação para ficheiro AutoCAD (.dwg) todos os elementos da malha foram transformados em linhas, e após a importação para o SAP2000 estas linhas apresentaram-se como barras unidas por nós, às quais foi possível associar as propriedades da madeira.

4.3. Modelo

Nesta fase do trabalho foram concebidas diferentes variantes do modelo final com a utilização das ferramentas digitais descritas anteriormente. Como referido anteriormente, a malha a projetar é constituída por um sistema de camada dupla (Figura 8), contudo os modelos criados no Grasshopper possuíam apenas uma camada. Com isto, para a alteração do modelo no software SAP2000 [16] foram duplicados os pontos base, sendo os novos pontos colocados a uma cota de 35mm (espessura dos elementos de madeira).



Figura 8. Cruzamento entre elementos numa malha de camada dupla

Com a conclusão dos modelos tridimensionais paramétricos, e resolvido o método de transição de modelos entre softwares, iniciou-se a análise estrutural.

Na análise estrutural teve por base a elaboração de um modelo tridimensional da malha utilizando o software de cálculo estrutural SAP 2000 [16]. No modelo os elementos da malha são modelados por elementos de barra com a secção transversal dupla de 4200 mm^2 . Os nós foram assumidos como rígidos. Aos elementos de barra foram atribuídas as propriedades mecânicas determinadas nos ensaios de caracterização apresentados no ponto 4.1, nomeadamente, a massa volúmica, o módulo de elasticidade à flexão, coeficiente de poisson e módulo de distorção.

Construído o modelo da malha com base na geometria descrita anteriormente, atribuindo as propriedades mecânicas da madeira de eucalipto aos elementos barra, passou-se à análise do comportamento da malha tridimensional. Como cargas atuantes apenas se consideraram as cargas permanentes resultantes da massa volúmica dos elementos de madeira constituintes da malha. Numa fase seguinte, considerou-se a utilização de elementos opacos de acrílico a fixar superiormente da malha, de modo a tornar o espaço sob a malha protegido. Estes elementos de acrílico são elementos com dimensões de 4000×945 e espessura de 30 mm , o que resulta num valor de uma carga permanente de $3,6 \text{ kg/m}^2$. Analisando o comportamento da malha, e a distribuição das tensões atuantes, é possível concluir-se que os valores obtidos (Figura 9, valores máximos $|110 \text{ MPa}|$) são inferiores aos valores médios da tensão resistente à flexão de 140 MPa determinados nos ensaios de caracterização da madeira de eucalipto.

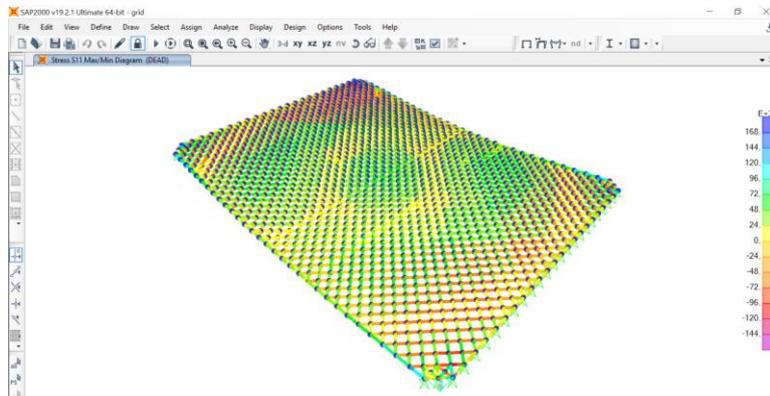


Figura 9. Modelo no Sap2000

Apesar do modelo ter um comportamento relativamente homogéneo em relação às tensões, estas apresentaram-se mais elevadas nos cantos. Por esse motivo, optou-se por um remate reforçado nos quatro vértices com o talhamento dos cantos e com a utilização de elementos cruzados dentro das quadrículas adjacentes (Figura 10).

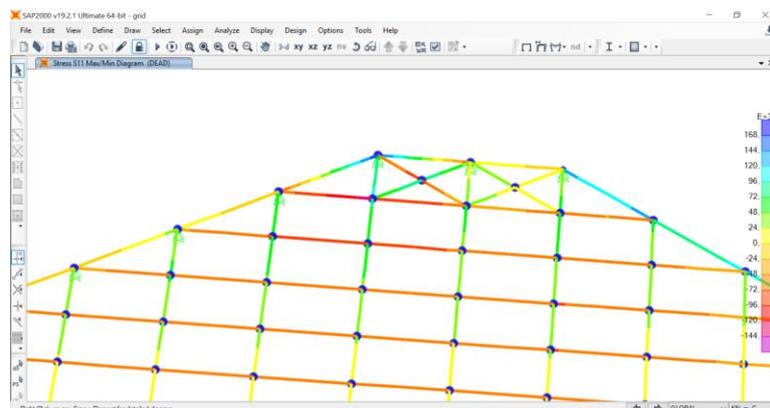


Figura 10. Pormenor do refinamento da malha nos vértices.

5. CONCLUSÕES

Neste trabalho, com base num caso de estudo, tentou demonstrar-se de uma forma geral a aplicação sustentável de uma malha estrutural de madeira substituindo o betão. Com a escolha do Pavilhão de Portugal pretendeu-se utilizar uma obra bem conhecida pela sua materialidade inquietante que, no entanto, ninguém imaginava construída de outra forma. Sendo o objetivo principal o de extrapolar este exercício para outros casos e, de preferência, para novos edifícios.

No geral e a nível construtivo, as malhas de madeira devem passar, ainda, por algumas otimizações, que podem ser conseguidas pelo estudo aprofundado das ligações, dos travamentos e dos deslocamentos que permitem durante a deformação da estrutura.

Em suma, apesar do sucesso do modelo apresentado, no que diz respeito ao seu comportamento e otimização material e de tempo de construção, ainda são muito os desenvolvimentos e as melhorias a realizar na conceção, análise e construção das malhas estruturais de madeira. Todavia, este exercício permitiu demonstrar algumas vantagens deste tipo de estrutura e dar a conhecer as malhas em si para aqueles que ainda não conheciam.

No caso apresentado pode perceber-se que a solução funciona, é certo que sem grande esmiuçar das particularidades/pormenores construtivos e do processo de construção. Contudo pôde perceber-se que a leveza e flexibilidade do material, o próprio processo de construção, a pré-fabricação associada ao sistema e a rapidez de construção fazem desta solução atrativa, não só para este tipo de programas mas também. Mais, o carácter sustentável já associado à madeira combinado com a efemeridade das malhas, fazem desta uma decisão sensata. Uma ponderação cuidada até pela capacidade de vir a ser desmontada e reutilizada, dando espaço para que no futuro possa vir a transformar-se e acompanhar as necessidades de cada momento. Uma forma de sustentabilidade que nem sempre é evidente.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho é financiado pela FEDER através do Programa Operacional de Fatores Competitivos - COMPETE e por fundos nacionais através da FCT - Fundação para Ciência e Tecnologia no âmbito do projeto POCI-01-0145-FEDER-007633. Agradece-se o apoio da Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) através da bolsa de doutorado SFRH / BD / 104677/2014.

REFERÊNCIAS

- [1] Sanchez, J. E. P.; Martitegui, F. A.; MArtitegui, C. A.; Alvarez, M. A. G.; Sanchez, F. P.; Nevado, M. A. R., 1995. "Libro Casas de Madera Sistemas Constructivos". Madrid: AITIM.
- [2] Silva, C.; Branco, J. M.; Lourenço, P. B., 2014, "UT System : a Structural System To Build Taller Urban Timber Houses With the Aspired Spatial Flexibility," 41st IAHS WORLD Congr., no. December, pp. 1–12.
- [3] Science, L.; Trust, C.; Lowenstein, O., 2004. "Lothian Gridshell," Build. a Futur. Winter, p. 29.
- [4] Harris, R.; Dickson, M.; Kelly, O., 2004. "The Use of Timber Gridshells for Long Span Structures,".
- [5] Fernandes, J. G.; Kirkegaard, P. H.; Branco, J. M., 2016. "Tectonic Design of Elastic Timber Gridshells," World Conf. Timber Eng., no. August, 2016.
- [6] Fernandes, J. G., 2015. "Timber Gridshells . A state-of-the-art review," in 2th EEUM PhD symposium, p. 15.
- [7] Siza Vieira, A., 2017. "Expo'98 Portuguese National Pavilion," Gallery of AD Classics, 2015. [Online]. Available: <https://www.archdaily.com/583307/ad-classics-expo-98-portuguese-national-pavilion-alvaro-siza>. [Accessed: 11-Dec-2017].
- [8] Balmond Studio, "Portuguese National Pavilion." [Online]. Available: <http://www.balmondstudio.com/work/portuguese-national-pavilion.php>. [Accessed: 27-Dec-

- 2017].
- [9] Fernandinho, D., 2017. "Pavilhão de Portugal para a Expo 98 em Lisboa," *Arquitetando Caminhos*, 2017. [Online]. Available: <http://arquitetandocaminhos.blogspot.pt/2007/05/pavilhao-de-portugal-para-expo-98-em.html>. [Accessed: 11-Dec-2017].
 - [10] Tavares, P. A. S.; Tavares, A. S., 1998. "A 'Pala' e o Pavilhão de Portugal na EXPO'98".
 - [11] Paoli, C., 2008. "Past and Future of Grid Shell Structures," *Massachusetts Institute of Technology*.
 - [12] Ribeiro, M., 2015. "Caracterização do Eucalipto globulus para aplicação estrutural," *Universidade de Coimbra*.
 - [13] Barroso, J. M. P., 2016. "Conceção , análise e construção de malhas estruturais em madeira," *Universidade do Minho*.
 - [14] MCNeel, R., 2018. "Rhinceros," 2018. [Online]. Available: <https://www.rhino3d.com/>. [Accessed: 06-Jan-2018].
 - [15] Davidson, S., 2018. "Grasshopper - algorithmic modeling for Rhino," 2018. [Online]. Available: <http://www.grasshopper3d.com/>. [Accessed: 06-Jan-2018].
 - [16] Structures, C., 2018, "CSI Portugal | SAP2000," *Software*, 2018. [Online]. Available: <http://www.csiportugal.com/software/2/sap2000>. [Accessed: 06-Jan-2018].
 - [17] Autodesk, "AutoCAD," 2018. [Online]. Available: <https://www.autodesk.pt/products/autocad/overview>. [Accessed: 06-Jan-2018].