

O PAPEL DA MONITORIZAÇÃO NA DURABILIDADE DE CONSTRUÇÕES COM MADEIRA



Daniel F. Lima

Estudante de doutoramento
 Departamento de Engenharia Civil
 Universidade do Minho, ISISE
 Guimarães, Portugal
 daniel.asmf.lima@gmail.com



Jorge M. Branco

Professor Auxiliar
 Departamento de Engenharia Civil
 Universidade do Minho, ISISE
 Guimarães, Portugal
 jbranco@civil.uminho.pt



Lina Nunes

Investigadora Auxiliar
 Departamento de Estruturas,
 Laboratório Nacional
 de Engenharia Civil
 Lisboa, Portugal
 linanunes@lnec.pt

SUMÁRIO

A possibilidade de se vencer antigas limitações inerentes ao uso da madeira maciça com o desenvolvimento de novos produtos derivados de madeira, como é exemplo a Madeira Lamelada Cruzada Colada (MLCC), aliada à maior sensibilidade atual às questões ecológicas, tornam a madeira um material com potencialidades renovadas. Por outro lado, trata-se de um material natural sujeito a degradação biológica cuja durabilidade em diferentes climas e situações de aplicação é ainda questionável. Os agentes biológicos são capazes de causar danos à madeira que podem ser simplesmente estéticos, mas que em níveis mais elevados podem levar à redução considerável das suas propriedades mecânicas. Neste contexto, este estudo expõe as condições propícias à instalação e desenvolvimento dos principais agentes de degradação da madeira e discute a importância da existência de um plano de monitorização de estruturas de produtos derivados de madeira para uma promoção de uma maior vida útil destas construções.

Palavras-chave: Monitorização; Madeira Lamelada Cruzada Colada; Durabilidade; Degradação biológica; Vida útil.

1. INTRODUÇÃO

A madeira é um dos materiais de construção mais antigos de que se tem registo, como consequência da sua disponibilidade na natureza e pelas características mecânicas e físicas

que apresenta. O desenvolvimento de novos produtos derivados de madeira (*Engineered Wood Products* – EWP), em linha com a crescente consciencialização da necessidade da procura da neutralidade carbónica, fizeram com que a madeira ressurgisse no mercado como material estrutural competitivo e capaz de contribuir para o cumprimento das metas de descarbonização fixadas no Pacto Ecológico Europeu. Nos últimos anos, é notório o aumento das construções em madeira, tanto em quantidade como em complexidade e altura. Como exemplo, pode-se citar a lei que obrigará os novos edifícios públicos franceses a serem, pelo menos, 50% em madeira ou noutro material de origem biológica [1].

O potencial da madeira no combate às alterações climáticas é evidenciado em análises de ciclo de vida realizados por diversos autores [2,3,4]. Por exemplo, [2] reportou reduções de 34% a 84% na emissão de gases com efeito de estufa ao substituir estruturas metálicas e de betão por estruturas de madeira. Neste sentido, os EWP surgem como uma alternativa para o setor da construção, uma vez que se estima que 40% de todo o consumo de energia, 36% das emissões de gases com efeito de estufa, 40% do consumo de matéria-prima e 33% de todos os resíduos gerados, provêm desse setor [5].

EWP são produtos feitos de fibras, lâminas ou lamelas de madeira selecionadas, preparadas e coladas, como a Madeira Lamelada Colada (Glulam) e a Madeira Lamelada Cruzada Colada (MLCC ou CLT) [6]. Apesar de serem considerados os produtos de origem florestal com maior valor agregado, a sua durabilidade em diversos climas ainda é desconhecida, resultante do seu uso predominante no norte da Europa, onde o clima frio reduz a presença e atividade dos agentes bióticos de degradação da madeira [7,8].

Os fungos e os insetos representam os agentes que causam a degradação biológica. O processo de degradação biológica da madeira é relacionado com as condições ambientais no qual a estrutura está inserida (humidade relativa do ar e temperatura), a espécie e o teor de água da madeira [9]. A colonização da madeira por fungos requer a ocorrência de uma série de fatores, como: teor de água elevado (ativação a partir de 18%-30% e ponto ótimo por volta de 50%-60%, a depender do fungo), temperatura e humidade relativa do ar favoráveis e presença de oxigênio [9]. Relativamente aos insetos, as térmitas subterrâneas, comuns em países com clima temperado, apesar de conseguirem infestar madeiras com baixo teor de água, possuem preferência por madeiras com teor de água acima de 20% [9]. Neste sentido, diversos autores estabelecem o limiar de 18%-30% de teor de água para que o processo de degradação biológica da madeira se ative, considerando-se o teor de água como parâmetro chave para o controle da degradação biológica (por exemplo, [10,11]).

A degradação causada por fungos pode reduzir o valor estético da madeira, influenciar a qualidade do ar interior ou, em formas mais severas, comprometer a sua capacidade resistente. Portanto, a degradação biológica representa um risco para a saúde e segurança dos ocupantes, além de aumentar os custos com reparações e manutenções e reduzir a vida útil da construção. Relativamente às térmitas subterrâneas é estimado que, na Austrália, a sua ação nas construções em madeira seja responsável por perdas económicas na ordem de 1,5 bilhão de dólares [12].

É essencial considerar a vida útil de uma construção, uma vez que, quanto mais longa, menores serão os impactos ambientais e os custos relativos ao ciclo de vida. Porém, a

previsão da vida útil é uma tarefa complexa, que envolve a consideração e definição de um vasto conjunto de critérios físicos, funcionais e económicos [13, 14].

Para o devido controle da deterioração, a monitorização, associada a um plano de manutenção, apresenta-se como uma boa alternativa aos tratamentos químicos, que são cada vez mais limitados pelos regulamentos e necessidades ambientais atuais [15, 16].

Este estudo tem como objetivo abordar a monitorização de estruturas que recorrem a EWP (como a MLCC) como ferramenta auxiliar para que se cumpra ou prolongue o tempo de vida útil de uma construção. Assim, aqui são descritos os principais processos de degradação biológica e os recentes avanços em relação aos sistemas de monitorização.

2. DEGRADAÇÃO BIOLÓGICA

Como mencionado anteriormente, os principais agentes de degradação da madeira são fungos e insetos. Para que o processo de biodegradação tenha início, deve ocorrer uma série de fatores, por um determinado período de tempo, que contribuem para o estabelecimento dos agentes, como temperatura e humidade relativa favoráveis, existência de oxigénio, teor de água suficiente, nutrientes e presença de agentes degradantes (Figura 1).



Figura 1. Principais fatores que condicionam a degradação biológica

2.1 Degradação por fungos

A degradação por fungos na madeira pode ser causada por três grupos distintos: os fungos cromogéneos, os bolores e os fungos de podridão.

Os bolores crescem de maneira superficial na madeira e, por isso, não possuem a capacidade de causar perdas de massa e danos estruturais apreciáveis [17]. Porém, o controle e remediação de bolores é importante por questões de saúde dos ocupantes e por razões estéticas.

A maior parte dos bolores consegue desenvolver-se nas mais diversas superfícies e, na madeira, só exige a presença de água livre (teor de água superior ao Ponto de Saturação das Fibras) (Figura 2a). Porém, é comum encontrar bolores em madeiras com teores de água abaixo do Ponto de Saturação das Fibras, e isso deve-se às condensações superficiais resultantes dos ciclos de temperatura, fazendo com que exista água livre nestas regiões específicas [17].

No que se refere aos fungos cromogéneos, a sua principal característica é a coloração, com consequente mudança de cor da madeira afetada e, de maneira geral, não são capazes de causar danos estruturais significativos [11] (Figura 2b). Os bolores e os fungos cromogéneos são um indício de teores de água mais elevados na madeira (acima do ponto de saturação

das fibras ou com presença de água proveniente de condensações superficiais), que podem ser considerados um sinal de risco para o desenvolvimento de fungos de podridão e outros agentes biológicos que causam danos estruturais significativos à madeira.

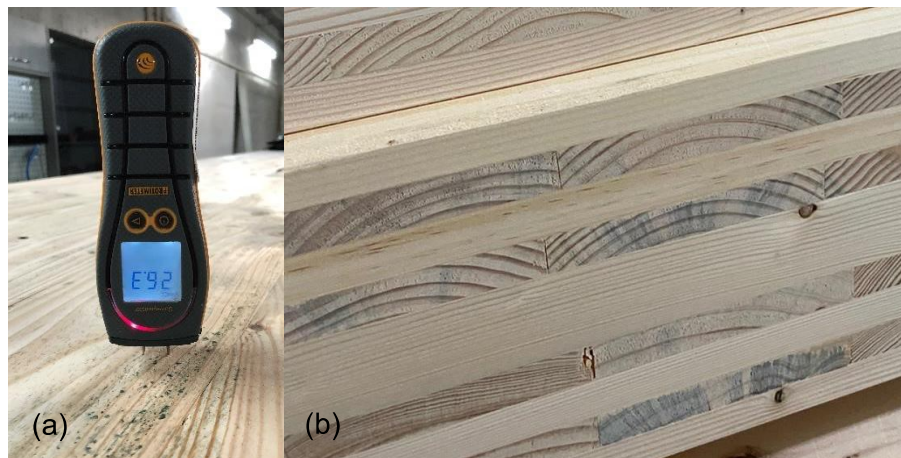


Figura 2. Painéis MLCC com sinais de degradação por fungos; (a) Painel MLCC com teor de água elevado e degradação por bolor após provável exposição accidental a uma fonte de humedificação; (b) Painel MLCC com coloração devida a ação de fungos cromogéneos que se terão desenvolvido durante a secagem da madeira

Por outro lado, os fungos de podridão alteram de forma significativa a estrutura lenhosa da madeira e, conseqüentemente, causam redução da sua capacidade resistente, podendo levar à sua completa destruição [18] (Figura 3). O teor de água, humidade relativa do ar e temperatura ambiente são fatores preponderantes na degradação por fungos de podridão, não existindo um valor único que defina se o ataque irá ocorrer ou não, sendo dependente da espécie da madeira e do fungo [19]. Porém, a degradação só deverá iniciar-se caso a madeira atinja um teor de água de, aproximadamente, 18%, com valores ótimos acima de 50%, e em condições ideais de temperatura entre 10 e 30°C, não sendo comum o seu desenvolvimento em temperaturas abaixo de 0°C e nem acima dos 40°C [9, 17]. Adicionalmente, os fungos necessitam de oxigénio para se desenvolverem, razão pela qual não atacam madeira saturada [20].



Figura 3. Painel MLCC com degradação por fungo de podridão [21]

2.2 Degradação por insetos

A degradação causada pela ação de fungos pode ter alto poder destrutivo e comprometer severamente a capacidade resistente da madeira, porém, esta tende a ser localizada nas zonas com teor de água mais elevado. Por outro lado, a degradação por insetos pode ocorrer de maneira mais extensa e levar a uma deterioração geral da estrutura [22]. Em países com clima temperado, como é o caso de Portugal e Espanha, os insetos mais comuns e capazes de deteriorar estruturas de madeira são as térmitas e os carunchos.

Tratando-se das térmitas (Blattodea: Isoptera), estas possuem como característica principal a sua organização em castas e comportamento social. As espécies mais relevantes em termos de danos às estruturas de madeiras podem ser divididas em dois grupos: térmitas subterrâneas e térmitas de madeira seca.

As térmitas subterrâneas necessitam de uma fonte de humidade para sobreviverem e costumam construir os ninhos no interior de solos húmidos e com pouca luz. O seu ataque ocorre, preferencialmente, em elementos de madeira próximos ou em contato com o solo (exteriores) ou então em pisos térreos (interiores) [18, 20]. Por outro lado, as térmitas de madeira seca possuem a capacidade de infestar madeiras com teores de água reduzidos, porém, exigem níveis específicos de temperatura e humidade para a sua sobrevivência [23].

Existem poucos sinais externos da atividade de térmitas, pelo que a madeira aparenta estar intacta superficialmente, dificultando o seu diagnóstico. Os sinais mais comuns são a presença de canais de terra sobre a madeira ou presença de insetos adultos [18, 23].

Os carunchos (Coleoptera) são insetos que possuem metamorfose completa durante o desenvolvimento (holometabólicos) e, de todas as fases do desenvolvimento (ovo, larva, pupa e adulto), a larva é a que se alimenta da madeira, realizando a perfuração de galerias, o que resulta em danos estruturais ao elemento [24]. O caruncho na sua fase adulta causa apenas um dano reduzido à madeira, referente à perfuração do orifício de saída.

3. DURABILIDADE NATURAL, IMPREGNABILIDADE E CLASSES DE RISCO

Apesar de ser um material sujeito à degradação biológica, a madeira, quando aplicada de forma correta, demonstra durabilidade elevada. Para isso, as normas EN 335 [25] e EN 350 [26] abordam o problema em termos das condições gerais de exposição da estrutura (Classes de Risco), a durabilidade natural da espécie e sua impregnabilidade.

A EN 350 [26] define a durabilidade natural de uma espécie como a sua resistência natural frente à ação dos principais agentes biodegradantes (fungos e insetos), definindo-se sistemas de classificação distintos para cada agente. Para os fungos, existem cinco classes de durabilidade (muito durável, durável, moderadamente durável, pouco durável e não durável), onde o borne é sempre enquadrado como não durável (Quadro 1).

Em relação aos insetos, a classificação é separada entre carunchos e térmitas. Para os carunchos, existem duas classes de durabilidade natural do borne (durável e suscetível) e uma classificação extra para o cerne (suscetível no cerne). Relativamente às térmitas, as

madeiras são classificadas em três classes (durável, moderadamente durável e suscetível), onde o borne é sempre considerado suscetível (Quadro 1).

Quadro 1. Classes de durabilidade natural contra fungos e insetos [26]

Durabilidade natural					
Fungos		Carunchos		Térmitas	
1	Muito durável	D	Durável	D	Durável
2	Durável	S	Suscetível	M	Moderadamente durável
3	Moderadamente durável	SH	Suscetível no cerne	S	Suscetível
4	Pouco durável				
5	Não durável				

A impregnabilidade/tratabilidade, definida pela EN 350 [26] como a facilidade de uma espécie em absorver líquidos, é separada em quatro (facilmente impregnável, medianamente impregnável, dificilmente impregnável e não impregnável), conforme indica o Quadro 2.

Quadro 2. Classificação de impregnabilidade/tratabilidade [26]

Impregnabilidade		
1	Facilmente impregnável	Pode ser impregnada por pressão completamente, sem dificuldade.
2	Medianamente impregnável	Geralmente, não é possível a impregnação total, mas após 2h a 3h de tratamento por pressão, pode-se atingir uma penetração lateral superior a 6mm.
3	Dificilmente impregnável	Penetração lateral do produto preservador de 3mm a 6mm mesmo após 3h a 4h de tratamento por pressão.
4	Não impregnável	Pequena quantia de produto preservador é absorvida, mesmo após 3h a 4h de tratamento por pressão.

Para que seja possível uma escolha adequada da espécie a ser utilizada em cada projeto, é necessário considerar as classes de risco estabelecidas na EN 335 [25], que considera cinco níveis, correlacionando as condições gerais de exposição da madeira (interior seco, interior ou coberto com possibilidade de humedificação, exterior sem contato com o solo, exterior em contato permanente com solo e/ou água doce e permanentemente ou regularmente submerso em água salgada), a frequência em que a madeira apresenta teor de água elevado e o risco de ocorrência de agentes biológicos (Quadro 3).

Quadro 3. Classes de risco [25, 27]

Classe de Risco	Condição de exposição	Teor de água	Ocorrência de agentes biológicos*			
			Fungos	Térmitas	Carunchos	Xilófagos marinhos
1	Interior seco	≤ 20%	Sem risco	Risco baixo	Risco alto	Sem risco
2	Interior ou coberto, sem exposição aos agentes atmosféricos. Possibilidade de condensação de água	Ocasionalmente > 20%	Risco alto	Risco baixo	Risco alto	Sem risco
3	Exterior, sem contato com o solo, exposto aos agentes atmosféricos	Frequentemente > 20%	Risco muito alto	Risco alto	Risco baixo	Sem risco
4	Exterior, em contato com o solo e/ou água doce	Predominantemente /permanentemente > 20%	Risco muito alto	Risco muito alto	Risco baixo	Sem risco
5	Permanentemente ou regularmente submerso em água salgada	Permanentemente > 20%	Risco alto	Risco baixo	Risco baixo	Risco muito alto

4. SISTEMA DE MONITORIZAÇÃO

A aplicação correta do material, apesar de ser crucial para que a estrutura tenha o melhor desempenho possível em termos de durabilidade, não é suficiente para garantir que a mesma cumprirá o seu tempo de vida útil inicialmente estipulado. Sendo assim, atualmente, há uma forte aposta na monitorização contínua de estruturas de madeira associada a um plano de manutenção.

Conforme dito anteriormente, o teor de água da madeira e o microclima no qual a estrutura está inserida (temperatura e humidade relativa do ar) são os parâmetros chave para o controle da degradação biológica e, portanto, os mais relevantes para a monitorização da degradação biológica de elementos estruturais em madeira.

A madeira, como material natural e higroscópico, realiza trocas de humidade com o ambiente de acordo com as variações de temperatura e humidade relativa, procurando sempre alcançar o seu teor de água de equilíbrio [28]. Este comportamento higroscópico possibilita estimar o teor de água de um elemento de madeira em serviço, a partir das medições de temperatura e humidade relativa, com recurso às curvas de equilíbrio higrotérmico [29]. Porém, a aplicação das curvas de equilíbrio higrotérmico é limitada, uma vez que nestas não são consideradas situações de humidificação que podem aumentar de forma drástica o teor de água (como humidificações acidentais e condensações superficiais).

Assim, deve-se recorrer a métodos de medição do teor de água, que podem ser diretos ou indiretos. Os métodos diretos, de acordo com a EN 13183 [30], são baseados na

medida direta da massa de água presente no interior da madeira (por exemplo, a partir da sua secagem em estufa). Esses métodos, apesar de possuírem precisão elevada, consomem mais tempo e necessariamente requerem a retirada de amostras.

No que se refere aos métodos indiretos, esses são baseados na correlação entre uma propriedade física da madeira e o seu teor de água. Em [31], é possível encontrar uma revisão da literatura acerca dos métodos existentes para a medição do teor de água.

Entre os métodos indiretos, o método da resistência elétrica é o mais disseminado e utilizado. Esse método utiliza a relação inversa entre a resistência elétrica da madeira e o seu teor de água, onde uma resistência elétrica mais elevada indica um teor de água mais baixo [31]. O valor numérico do teor de água é obtido a partir de curvas de calibração, como as encontradas em [32] (Figura 4). Em termos práticos, a medição é realizada a partir da inserção de pinos metálicos na madeira, e a resistência elétrica entre os dois pinos é registada pelo equipamento.

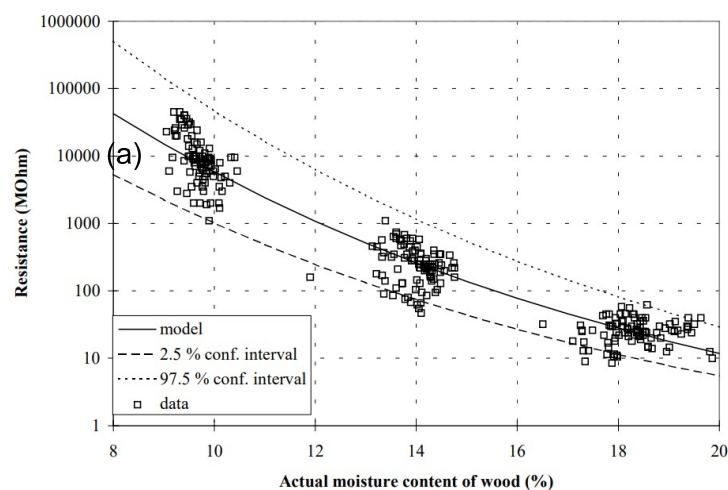


Figura 4. Obtenção do teor de água da madeira pelo método da resistência elétrica. Curva de calibração para o Espruce (*Picea abies*) [32]

Devido à sua fiabilidade, facilidade em executar e flexibilidade, o método da resistência elétrica é o mais utilizado para medir o teor de água em monitorizações contínuas do teor de água em estruturas. Atualmente, existem equipamentos capazes de realizar as medições de forma automática e periódica, armazenando os dados obtidos em *data loggers* ou online.

Apesar das suas reconhecidas vantagens, este método realiza apenas medições pontuais, implicando a necessidade de estabelecer um plano de monitorização em que se define a quantidade de pontos a serem medidos numa estrutura de forma a representá-la como um todo e identificar antecipadamente as regiões com maior risco de humedificação, mantendo o compromisso entre a redundância, diversidade e representatividade dos dados (obter dados comparáveis em localizações diferentes) [33].

Os dados obtidos numa monitorização higrótérmica (temperatura, humidade relativa e teor de água) possuem diversas aplicações no campo da durabilidade de estruturas de

madeiras, por exemplo, a utilização como dados de entrada em modelos de degradação baseados em relações dose-resposta [34] que, por sua vez, são utilizados para estimar o tempo de vida útil daquela estrutura, e assim contribuir para a tomada de decisão no âmbito de planos de manutenção. Porém, apesar de ser possível encontrar diversos modelos de degradação, a maioria é destinada apenas à degradação por fungos de podridão e, na verdade, os modelos para degradação por insetos ainda são muito limitados.

5. CONCLUSÕES

Apesar das evidentes vantagens funcionais e ecológicas do aumento da utilização da madeira como material estrutural, a sua durabilidade em diferentes climas é um desafio complexo, conseqüente de uma grande variedade de espécies, agentes de degradação (fungos e insetos) e parâmetros que influenciam o processo de degradação (teor de água, temperatura, humidade relativa, entre outros).

Por ser um método construtivo relativamente recente, a utilização de MLCC em estruturas de madeira ainda levanta incertezas em relação ao seu comportamento a longo prazo. Apesar de utilizar um material de construção tradicional, os edifícios em MLCC diferem dos outros métodos construtivos em madeira pela sua capacidade de armazenar grandes volumes de água e possuir comportamento de secagem e humidificação mais lentos [35].

Logo à partida, são imprescindíveis cuidados na fase de projeto, adotando medidas construtivas que impeçam a entrada e a retenção de água, garantindo um teor de água baixo durante a vida útil do elemento. Além disso, a correta escolha da espécie a ser empregue deve ser feita com base nas referências normativas vigentes [25,26], considerando a classe de risco ao qual a madeira será exposta, sua durabilidade natural e a sua tratabilidade.

Porém, a adoção de boas práticas construtivas não exclui a necessidade de realizar a monitorização higrotérmica da estrutura e a correta manutenção periódica. Atualmente, apesar de existirem diversos equipamentos comerciais para a recolha destes dados, a monitorização continua a apresentar limitações no que toca ao efeito de escala, integração de dados, escassez de dados disponíveis na literatura, complexidade na análise dos dados e uso limitado das ferramentas de modelação da degradação [36].

Além disso, [37] alerta que, apesar da durabilidade ser um assunto amplamente estudado, a maioria dos estudos foca o material, ressaltando a necessidade de expandir a investigação para a escala estrutural. Portanto, de forma a controlar o problema emergente da durabilidade de estruturas de madeira que recorrem a EWP em diferentes climas, é necessário evoluir no estado do conhecimento acerca da degradação das estruturas, dos modelos de degradação, das ferramentas de previsão de vida útil e das metodologias de monitorização.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho recebeu financiamento da FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia através de uma bolsa de doutoramento (PRT/BD/152833/2021) concedida ao primeiro autor pelo MIT Portugal Program.

REFERÊNCIAS

- [1] International Forest Industries – French government to require 50% timber in all new public buildings from 2022, 2020, <https://internationalforestindustries.com/2020/02/14/french-government-require-50-timber-new-public-buildings-2022/#:~:text=The%20government%20of%20France%20is%20set%20to%20require,2022%20as%20it%20pushes%20for%20sustainable%20urban%20development.>
- [2] Skullestad, J.L.; Bohne, R.A.; Lohne, J. – “High-Rise Timber Buildings as a Climate Change Mitigation Measure—A Comparative LCA of Structural System Alternatives”, *Energy Procedia*, 96, 2016, pp. 112-123, doi: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.09.112>.
- [3] Pierobon, F.; Huang, M.; Simonen, K.; Ganguly, I. – “Environmental benefits of using hybrid CLT structure in midrise non-residential construction”, *Journal of Building Engineering*, 26, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.100862>.
- [4] Teh, S.H.; Wiedmann, T.; Schinabeck, J.; Moore, S. – “Replacement Scenarios for Construction Materials Based on Economy-wide Hybrid LCA”, *Procedia Engineering*, 180, 2017, pp. 179-189, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.177>.
- [5] Rashid, A. F. A.; Yosoff, S. – “A review of life cycle assessment method for building industry”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45, 2015, pp. 244-248, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.01.043>
- [6] Lam, F. – “Modern structural wood products”, *Progress in Structural Engineering and Materials*, 3, 2001, pp. 238-245, doi: <https://doi.org/10.1002/pse.79>
- [7] Ramage, M.H.; Burrige, H.; Busse-Wicher, M.; Fereday, G.; Reynolds, T.; Shah, D.U.; Wu, G.; Yu, L.; Fleming, P.; Densley-Tingley, D.; Allwood, J.; Dupree, D.U.; Linden, P.F.; Scherman, O. – “The wood from the trees: The use of timber in construction”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68, 2017 pp. 333-359, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.10>
- [8] Cappellazzi, J.; Konkler, M.J.; Sinha, A.; Morrell, J.J. – “Potential for decay in mass timber elements: A review of the risks and identifying possible solutions”, *Wood Material Science & Engineering*, 15, 2020, pp. 351-360, doi: <https://doi.org/10.1080/17480272.2020.1720804>
- [9] Cruz, H.; Jones, D.; Nunes, L. – “Wood”, In *Materials for Construction and Civil Engineering*, 2015, pp. 557–583, Springer International Publishing, https://doi.org/10.1007/978-3-319-08236-3_12
- [10] Brischke, C.; Rapp, A.O. – “Dose–response relationships between wood moisture content, wood temperature and fungal decay determined for 23 European field test sites”, *Wood Science and Technology*, 42, 2008, pp. 507–518, <https://doi.org/10.1007/s00226-008-0191-8>
- [11] Zabel, R. A.; Morrell, J. J. – “Wood Microbiology”, 2nd edition. *Elsevier Science & Technology*, 2020.
- [12] Govorushko, S. – “Economic and ecological importance of termites: A global review”, *Entomological Science*, 22, 2019, pp. 21-35, <https://doi.org/10.1111/ens.12328>
- [13] Prieto, A.S. – “Service life prediction and environmental exposure conditions of timber claddings in South Chile”, *Building Research & Information*, 48, 2020, pp. 191-206, doi: <https://doi.org/10.1080/09613218.2019.1631143>
- [14] Riggio, M.; Alhariri, N.; Hansen, E. – “Paths of innovation and knowledge management in timber construction in North America: a focus on water control design strategies in CLT building

- enclosures”, *Architectural Engineering and Design Management*, 16, 2020, pp. 58-83, doi: <https://doi.org/10.1080/17452007.2019.1617672>
- [15] Palma, P.; Steiger, R. – “Structural health monitoring of timber structures – Review of available methods and case studies”, *Construction and Building Materials*, 248, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118528>.
- [16] Broda, M. – “Natural Compounds for Wood Protection against Fungi—A Review”, *Molecules*, 25, 2020, doi: <https://doi.org/10.3390/molecules25153538>
- [17] Goodell, B. – “Fungi Involved in the Biodeterioration and Bioconversion of Lignocellulose Substrates”, In *Genetics and Biotechnology*, 2020, pp. 369–397, Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-49924-2_15
- [18] Machado, J.S.; Cruz, H.; Custódio, J.; Palma, P.; Dias, A. – “Avaliação, Conservação e Reforço de Estruturas de Madeira”, *Verlag Dashöfer*, 2009.
- [19] Berry, R. W. – “Remedial Treatment of Wood Rot and Insect Attack in Buildings”, *IHS BRE*, 1994.
- [20] Eaton, R. A.; Hale, M.D.C. “Wood: Decay, Pests and Protection”, *Chapman & Hall*, 1993.
- [21] LABC News – “Rotting of cross-laminated timber (CLT) roof panels”, 2019, https://www.labc.co.uk/news/rotting-cross-laminated-timber-clt-roof-panels?language_content_entity=cy
- [22] Gilfillan, J.R.; Gilbert, S.G. – “Development of a technique to measure the residual strength of woodworm infested timber”, *Construction and Building Materials*, 15, 2001, pp. 381– 388, [https://doi.org/10.1016/s0950-0618\(01\)00004-6](https://doi.org/10.1016/s0950-0618(01)00004-6)
- [23] Cruz, H.; Nunes, L. – “Madeira”, *Ciência e Engenharia de Materiais de Construção*, 2012, pp. 629–661, IST Press.
- [24] Bravery, A.F.; Berry, R.W.; Carey, J.K.; Cooper, D.E. – “Recognising Wood Rot and Insect Damage in Buildings”, *IHS BRE*, 1992.
- [25] EN 335 – “Durability of wood and wood-based products. Use Classes: definitions, application to solid wood and wood-based products”, 2013, CEN – European Committee for Standardization.
- [26] EN 350 – “Durability of wood and wood-based products - Testing and classification of the durability to biological agents of wood and wood-based materials”, 2016, CEN – European Committee for Standardization.
- [27] Nunes, L. – “Bases para a monitorização do risco de degradação na construção de casas de madeira”, In P. B. Lourenço, J. M. Branco, H. Cruz & L. Nunes (Eds.), *Casas de Madeira*, 2013, pp. 29–38.
- [28] Verbist, M.; Nunes, L.; Jones, D.; Branco, J.M. – “11 - Service life design of timber structures”, In Ghiassi B, Lourenço PB, *Civil and Structural Engineering: Long-term Performance and Durability of Masonry Structures*, Woodhead Publishing, 2019, pp. 311-336, <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102110-1.00011-X>
- [29] LNEC – “Madeira para a construção: Humidade da madeira”, *Ficha M9*, 1997.
- [30] EN 13183 – “Moisture content of a piece of sawn timber”, 2012, CEN – European Committee for Standardization.
- [31] Dietsch, P.; Franke, S.; Franke, B.; Gamper, A.; Winter, S. – “Methods to determine wood moisture content and their applicability in monitoring concepts”, *J Civil Struct. Health Monit.*, 5, 2015, pp. 115-127. <https://doi.org/10.1007/s13349-014-0082-7>
- [32] Forsén, H.; Tarvainen, V. – “Accuracy and functionality of hand held wood moisture content meters”, *VTT, Espoo*, 2000. A. Gaspari, I. Giongo, M. Piazza. “A Risk-Based Approach for Quantifying Durability and Life Expectancy of the Wall-Foundation Construction Detail in Timber Buildings”, in XV International Conference on Durability of Building Materials and Components, Oct. 2020,

Barcelona, C. Serrat, J.R. Casas, V. Gilbert, 2020, doi:
<https://doi.org/10.23967%2Fdbmc.2020.004>

- [33] Schmidt, E.; Riggio, M. – “Monitoring Moisture Performance of Cross-Laminated Timber Building Elements during Construction”, *Buildings*, 9, 2019, <https://doi.org/10.3390/buildings9060144>
- [34] Brischke, C.; Thelandersson, S. – “Modelling the outdoor performance of wood products – A review on existing approaches”, *Construction and Building Materials*, 66, 2014, pp. 384-397, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.05.087>
- [35] Riggio, M.; Mrissa, M.; Krész, M.; Včelák, J.; Sandak, J.; Sandak, A. – “Leveraging Structural Health Monitoring Data Through Avatars to Extend the Service Life of Mass Timber Buildings”, *Front. Built Environ.*, 8, 2022, doi: 10.3389/fbuil.2022.887593
- [36] Schmidt, E.L.; Riggio, M.; Barbosa, A.R.; Mugabo, I. – “Environmental Response of a CLT Floor Panel: Lessons for Moisture Management and Monitoring of Mass Timber Buildings”, *Build. Environ.*, 148, 2019, pp. 609–622, doi:10. 1016/j.buildenv.2018.11.038
- [37] Gaspari, A.; Giongo, I.; Piazza, M. – “A Risk-Based Approach for Quantifying Durability and Life-Expectancy of the Wall-Foundation Construction Detail in Timber Buildings”, in *XV International Conference on Durability of Building Materials and Components*, 2020, doi: <https://doi.org/10.23967%2Fdbmc.2020.004>