



LISBOA

UNIVERSIDADE  
DE LISBOA



FACULDADE DE ARQUITETURA  
UNIVERSIDADE DE LISBOA

## **CONSTRUÇÃO EM MADEIRA EM ALTURA**

As possibilidades de inovação na construção para o desenvolvimento sustentável

**Renata Esbroglio**  
(Licenciada)

Dissertação elaborada para obtenção de Grau de Mestre em Arquitetura

### **Orientação Científica:**

Prof. Doutor Paulo Manuel dos Santos Pereira de Almeida  
Prof. Doutor Luís Augusto da Costa Álvares Rosmaninho

### **Júri:**

Presidente - Prof. Doutora Joana Raquel de Sousa Bastos Malheiro Carrola Gomes  
Vogal: Prof. Doutor Pedro Miguel Gomes Januário  
Vogal: Prof. Doutor Paulo Manuel dos Santos Pereira de Almeida

### **Documento Definitivo**

Lisboa, FA ULisboa, janeiro 2021

\*Dissertação escrita em Português do Brasil



**OBATI**

Observatório da Arquitectura, Tecnologia, Inovação



## **RESUMO**

O propósito desta dissertação é desenvolver uma compreensão sobre as inovações possíveis no uso da madeira maciça na arquitetura e construção, mais especificamente nas construções em altura. Com tecnologias inovadoras é possível dar um novo rumo à história do setor. Alguns países da Europa, Estados Unidos e Canadá e são os pioneiros em inovação e implementação dessas novas tecnologias.

A grande demanda de habitação nos centros urbanos tende a seguir crescendo nas próximas décadas, o que evidencia a importância do uso de métodos construtivos industrializados. Assim como o movimento demográfico, as alterações climáticas também nos levam a procurar alternativas para os métodos construtivos tradicionais, nomeadamente betão e aço.

Não é novidade que os processos produtivos desses materiais liberam um volume muito grande de gases de efeito estufa na atmosfera. É, portanto, necessário e urgente o uso de novas soluções principalmente nas construções em altura, que tende a ser a principal tipologia no cenário urbano futuro.

Atualmente, o único material disponível possível de atender todas essas necessidades, é a madeira maciça. A tecnologia existe, diversas experiências bem-sucedidas são uma realidade e as regulamentações estão a acompanhar esses avanços. Diversos exemplares já realizados mostram as vantagens e desvantagens da arquitetura e construção em madeira em altura. Além disso, métodos construtivos inovadores vêm sendo desenvolvidos para criar uma produção possível através da pré-fabricação e da modulação. Cabe a nós, arquitetos, o poder de escolha e persuasão de clientes e realizadores. Grande parte da responsabilidade de promover uma nova cultura sustentável está em nossas mãos.

## **PALAVRAS-CHAVE**

Sustentabilidade, madeira maciça, construção em altura,

## **ABSTRACT**

The purpose of this dissertation is to develop an understanding of the possible innovations in the use of solid wood in architecture and construction, more specifically in height constructions. With innovative technologies it is possible to give a new direction to the sector's history. The United States, Canada and some European countries are the pioneers in innovation and implementation of these new technologies.

The great demand for housing in urban centers tends to continue growing in the coming decades, which highlights the importance of using industrialized construction methods. Like the demographic movement, climate change also leads us to look for alternatives to traditional construction methods, namely concrete and steel.

It is not new that the production process of these materials releases a very large volume of greenhouse gases into the atmosphere. It is, therefore, necessary and urgent to use new solutions mainly in buildings at height, which tends to be the main typology in the future urban scenario.

Currently, the only material available to meet all these needs is mass timber systems. The technology exists, a number of successful experiences are a reality and regulations are keeping pace with these advances. Several examples already made show the advantages and disadvantages of architecture and wooden construction in height. In addition, innovative construction methods have been developed to create production possible through prefabrication and modulation. It is up to us, architects, the power of choice and persuasion of clients and directors. Much of the responsibility for promoting a new sustainable culture is in our hands.

## **KEYWORDS**

Sustainability, Mass Timber, Tall Wood Buildings

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de agradecer principalmente ao meu companheiro, que foi meu maior incentivador e me ajudou a seguir em frente sempre que pensei em desistir.

Também agradeço aos meus pais, que lá do Brasil fizeram todo o esforço de apostilar meus documentos para submissão à candidatura.

Agradeço também aos meus orientadores, que foram indispensáveis nesse processo.

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>FIGURA 0.1:</b> Gráfico das alterações climáticas ao longo do tempo desde a Revolução Industrial – Fonte: NASA/GISS .....	<b>01</b>
<b>FIGURA 0.2:</b> Comparativo na produção dos principais materiais de construção– Fonte: Athena Calculator .....	<b>02</b>
<b>FIGURA 1.1.1:</b> Organograma do conceito de sustentabilidade global .....	<b>06</b>
<b>FIGURA 1.3.1:</b> Mapa Florestal Europeu - FONTE: Foundation for European Research .....	<b>09</b>
<b>FIGURA 1.3.2:</b> Ciclo do Carbono - FONTE: NASA .....	<b>11</b>
<b>FIGURA 1.4.1:</b> Pirâmide dos custos das decisões de projeto - FONTE: Ivo Mareines Arquitetura .....	<b>12</b>
<b>FIGURA 1.4.2:</b> Requisitos para certificação LEED - FONTE: UGREEN <b>FIGURA 1.4.5:</b> Classificação por pontuação do certificado LEED - FONTE: UGREEN .....	<b>13</b>
<b>FIGURA 1.4.4:</b> Decisões de projeto como aberturas para ventilação podem representar uma grande diferença na eficiência do controle de temperatura de ambientes internos - FONTE: UGREEN <b>FIGURA 1.4.5:</b> Estratégias bioclimáticas que combinam as corretas captação de calor do sol e ventilação passiva eficiente têm resultados expressivamente eficazes na economia de uso de equipamentos de aquecimento e refrigeração - FONTE: UGREEN .....	<b>15</b>
<b>FIGURA 2.1.1:</b> Templo de <i>Isthmia</i> (650 a.C) - FONTE: Pinterest <b>FIGURA 2.1.2:</b> Cidade Proibida, Pequim (séc. XV) – FONTE: Pinterest <b>FIGURA 2.1.3:</b> Templo de <i>Horyu-ji</i> no Japão. Construção em madeira mais em antiga do mundo, construída entre os anos de 680 e 710 - FONTE: Pinterest <b>FIGURA 2.1.4:</b> Igreja de <i>Urnes</i> , na Noruega, erguida em 1132 – FONTE: Pinterest .....	<b>16</b>
<b>FIGURA 2.1.5:</b> Ponte <i>Ironbridge</i> sobre o Rio Severn, na Inglaterra. Primeira ponte construída em estrutura de aço em 1779 - Fonte: Pinterest .....	<b>17</b>
<b>FIGURA 2.2.1:</b> Parede celular - FONTE: APSE <b>FIGURA 2.2.2:</b> Celulose - FONTE: APSE <b>FIGURA 2.2.3:</b> Lignina - FONTE: APSE .....	<b>19</b>

<b>FIGURA 2.2.4:</b> Seção de um tronco de madeira mostrando eixos longitudinal e radial e estrutura microscópica - FONTE: (Husson, 2009)	20
.....	
<b>FIGURA 2.3.2.1.1:</b> Peças de madeira atacadas por fungos manchadores com penetração de diferentes formas - FONTE: Concise Guide for the Identification of Insect Attack and Fungal Decay of Tiber	
<b>FIGURA 2.3.2.1.2:</b> Peças de madeira atacadas por fungos emboloradores.- FONTE: Concise Guide for the Identification of Insect Attack and Fungal Decay of Tiber	
.....	
<b>FIGURA 2.3.2.1.3:</b> Fungo de podridão parda - FONTE: Concise Guide to the Identification of Insect attack and Fungal decay of Timber	
<b>FIGURA 2.3.2.1.4:</b> Fungo de podridão branca - FONTE: Concise Guide to the Identification of Insect attack and Fungal Decay of Timber	
<b>FIGURA 2.3.2.1.5:</b> Fungo de podridão fibrosa - FONTE: Concise Guide to the Identification of Insect attack and Fungal Decay of Timber	
.....	
<b>FIGURA 2.3.2.1.6:</b> Características de madeiras atacadas por fungos de podridão mole: Tábua usada como moldura de canteiro - FONTE: Biodegradação e Preservação da Madeira, UFPR	
<b>FIGURA 2.3.2.1.7:</b> Aspeto da madeira atacada por inseto Coleóptero - FONTE: Biodegradação e Preservação da Madeira, UFPR	
.....	
<b>FIGURA 2.4.1:</b> Esquema ilustrativo dos processos produtivos do CLT, LVL e MLC (Glulam)- FONTE: (Madeira Engenheirada, 2020)	28
.....	
<b>FIGURA 2.4.2:</b> Desdobro normal (acima), desdobro radia (abaixo à esquerda), desdobro misto (abaixo à direita) - FONTE: Madeira como Material de Construção – IES	
.....	
<b>FIGURA 2.4.3:</b> Ilustração esquemática da sequencia do processo de tratamento da madeira em autoclave - FONTE: Bernardino-mendes.pt	
.....	
<b>FIGURA 2.5.1:</b> Madeira Estrutural colada- FONTE: Bernardino-mendes.pt	
<b>FIGURA 2.5.2:</b> Esquema de colagem da madeira estrutural - FONTE: madeiralaminadacolada.com	
<b>FIGURA 2.5.3:</b> Pavilhão Atlântico - FONTE: tsf.pt	
.....	
	31

<b>FIGURA 2.5.4:</b> A colagem das peças em Glulam com as fibras sempre no mesmo sentido - FONTE: Archdaily	
<b>FIGURA 2.5.5:</b> Colagem das lamelas com uso de <i>finger joints</i> para aumentar a superfície de contato e garantir resistência estrutural - FONTE: (Madeira Engenheirada, 2020)	
<b>FIGURA 2.5.6:</b> Painel Lamelado Colado - FONTE: Archiproducts.com	
.....	<b>32</b>
<b>FIGURA 2.5.7:</b> Pranchas, tábuas e réguas - FONTE: blogpraconstruir.com	
<b>FIGURA 2.5.8:</b> Contraplacado - FONTE: Artimol.pt	
<b>FIGURA 2.5.9:</b> Painel em LVL - FONTE: ArchiExpo	
<b>FIGURA 2.5.10:</b> Esquema de colagem de peça em LVL - FONTE: (Madeira Engenheirada, 2020)	
.....	<b>33</b>
<b>FIGURA 2.5.11:</b> OSB - FONTE: topeca.pt	
<b>FIGURA 2.5.12:</b> MDF - FONTE: londongraphics.co.uk	
<b>FIGURA 2.5.13:</b> Isolamento de origem vegetal - FONTE: ArchiExpo	
.....	<b>34</b>
<b>FIGURA 3.1.1:</b> Log Homes - FONTE: gettyimages.com	
.....	<b>35</b>
<b>FIGURA 3.1.2:</b> Shopping Iguatemi Fortaleza – Brasil - FONTE: matanativa.com	
<b>FIGURA 3.1.3:</b> Esquema técnico do sistema pilar e viga - FONTE: (Tavares, et al., 2017)	
.....	<b>36</b>
<b>FIGURA 3.2.1:</b> Estrutura de uma residência unifamiliar com sistema <i>light framing</i> - FONTE: gettyimages.com	
.....	<b>37</b>
<b>FIGURA 3.2.2:</b> Evolução do sistema <i>Baloon Framing</i> (esquerda) e <i>Platform Framing</i> (direita) - FONTE: Universidade Federal do Paraná	
<b>FIGURA 3.2.3:</b> Estrutura de uma residência unifamiliar com sistema <i>light framing</i> - FONTE: Pinterest	
.....	<b>38</b>
<b>FIGURA 3.3.1:</b> Casa estilo alpina - FONTE: Pinterest	
<b>FIGURA 3.3.2:</b> Casas típicas da tundra sueca- FONTE: Getty Images	
<b>FIGURAS 3.3.3:</b> Sistema de encaixe - FONTE: Rusticasa	
.....	<b>39</b>
<b>FIGURA 3.3.4:</b> Esquema de parede multicamadas - FONTE: Almeida, 2009	
<b>FIGURA 3.4.1:</b> Ligações tradicionais - FONTE: Cenci, 1987	
.....	<b>40</b>
<b>FIGURA 3.4.2:</b> a) Ligação colada entre dois painéis; b) Ligação dentada horizontal; c) Ligação dentada vertical - FONTE: ALMEIDA, 2012	
.....	<b>41</b>

**FIGURA 3.4.3:** a) Pregos; b) Cavilha; c) Parafuso de porca; d) Parafuso autorroscante de cabeça redonda; e) Parafuso autorroscante de cabeça de embeber; f) Parafuso autorroscante de cabeça sextavada; g) Anel abero; h) Placa metálica dentada; i) Chapa metálica dentada. - FONTE: ALMEIDA, 2012  
 .....42

**FIGURA 3.5.1:** Cobertura em CLT com sistema aligeirado, com isolamento incorporado (SR) com pavimento acessível revestido com deck (P) exterior e impermeabilização termoplástica (I) - FONTE: CYPE Ingenieros SA  
 .....43

**FIGURA 4.2.1:** Esquema de colagem do CLT - FONTE: reidmiddleton.com

**FIGURA 4.2.2:** a) disposição ortogonal das lâminas de madeira nos painéis de CLT; b) painel sujeito à flexão no sentido horizontal e c) painel no sentido vertical - FONTE: (Gagnon, et al., 2011)

**FIGURA 4.2.3:** Painéis chegam à obra com vãos já recortados - FONTE: Amanu-Invest  
 .....46

**FIGURA 4.2.4:** Lajes em CLT - FONTE: Pinterest / Alan Dias

**FIGURA 4.2.5:** Esquema do sistema construtivo em CLT - FONTE: Pinterest / Alan Dias  
 .....47

**FIGURA 4.3.1:** Efeito estético do NLT - FONTE: StructureCraft

**FIGURA 4.3.2:** Cobertura com geometria livre em NLT- FONTE: StructureCraft

**FIGURA 4.3.3:** Cobertura com geometria livre em NLT - FONTE: StructureCraft  
 .....48

**FIGURA 4.4.1:** Glulam - FONTE: BIMObjects

**FIGURA 4.4.2:** Glulam em obra residencial - FONTE: Archdaily

**FIGURA 4.4.3:** Glulam em obra corporativa - FONTE: Erel Company  
 .....49

**FIGURA 4.5.1:** flexibilidade de combinações de perfis que permitem variações estéticas ilimitadas - FONTE: StructuralCraft

**FIGURA 4.5.2:** flexibilidade para integração de instalações pré-definidas - FONTE: StructuralCraft

**FIGURA 4.5.3:** a) flexão do painel de uma carga distribuída aplicada no centro do vão; b) ilustração das forças atuando nas lamelas e nas cavilhas; c) ilustração das distribuições de tensões de compressão e tração no painel - FONTE: (Pereira, et al., 2018)  
 .....50

**FIGURA 4.5.4:** Construção do T3 Minneapolis. Prédio de 7 pisos que utilizou painéis de DLT - FONTE: StructuralCraft

**FIGURA 4.5.5:** Construção do T3 Minneapolis. Prédio de 7 pisos que utilizou painéis de DLT - FONTE: StructuralCraft  
 .....51

**FIGURA 4.7.1:** Secção de madeira carbonizada - FONTE: madeiraestrutural.wordpress.com  
 .....52

<b>FIGURA 4.12.1.1</b> : Brock Commons Tallwood House - FONTE: Archello	56
<b>FIGURA 4.12.2.1</b> : Mjostarnet - FONTE: Archdaily	57
<b>FIGURA 4.12.2.2</b> : Vista do interior - FONTE: Archdaily	
<b>FIGURA 4.12.2.3</b> : Circulação vertical - FONTE: Archdaily	
<b>FIGURA 4.12.2.4</b> : Alçado Frontal -FONTE: Archdaily	58
<b>FIGURA 4.12.3.1</b> : Complexo W350 - FONTE: Archdaily	
<b>FIGURA 4.12.3.2</b> : Corte do W350 - FONTE: Archdaily	59
<b>FIGURA 4.12.3.3</b> : Esquema estrutural da torre - FONTE: Archdaily	
<b>FIGURA 4.12.3.4</b> : Varandas amplas com vegetação - FONTE: Archdaily	
<b>FIGURA 4.12.3.5</b> : Espaços públicos internos - FONTE: Archdaily	60
<b>FIGURA 6.3.1</b> : Hotel Rural Casa do Rio do Arquiteto Francisco Vieira de Campos em Vila Nova de Foz Côa - FONTE: PNAM.PT	67
<b>FIGURA 6.4.1</b> : Crescimento da produção do CLT em m3 ao longo dos anos - FONTE: Planckner	68
<b>FIGURA 6.4.2</b> : Edifício Brock Commons no Canadá ainda em fase de execução: Fundação e rés de chão em betão armado - FONTE: engenheironaweb.com	
<b>FIGURA 6.4.3</b> : Esquema estrutural do Edifício Brock Commons no Canadá: Fundação e rés de chão em betão armado - FONTE: engenheironaweb.com	69
<b>FIGURA 6.4.4</b> : Fachadas do Edifício Brock Commons, no Canadá, em execução - FONTE: The Earthbound Report	
<b>FIGURA 6.4.5</b> : Esquema da fachada ventilada do Edifício Brock Commons, no Canadá - FONTE: nvbcom	70

## LISTA DE ACRÔNIMOS

AFN Autoridade Florestal Nacional  
AIMMP Associação das Indústrias de Madeira e Mobiliário de Portugal  
BSLC *Binational Softwood Lumber Council*  
CCA Arseniato de Cobre Cromatado  
CEN Comitê Europeu de Normatização  
CLT *Cross Laminated Timber*  
CNC Comando Numérico Computadorizado  
CO<sub>2</sub> Gás Carbônico  
DLT *Dowel Laminated Timber*  
EC *European Commission*  
EEA *European Environment Agency*  
FAUP Faculdade de Arquitetura da Universidade do Porto  
FII *Forestry Innovation Investment*  
GISS *Goddard Institute for Space Studies*  
GLT *Glue Laminated Timber*  
IBC *International Building Code*  
IESP *Instituto de Ensino Superior de Piedade*  
LEED *Leadership in Energy and Environmental Design*  
LNEC *Laboratório Nacional de Engenharia Civil*  
NASA *National Aeronautics and Space Administration*  
NLT *Nail Laminated Timber*  
ONU Organização das Nações Unidas  
PNAM Prêmio Nacional de Arquitetura em Madeira  
PNUMA Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente  
USGBC *United States Green Building Council*

## ÍNDICE

RESUMO .....	III
PALAVRAS-CHAVE .....	III
ABSTRACT .....	IV
KEYWORDS .....	IV
AGRADECIMENTOS.....	V
ÍNDICE DE FIGURAS .....	VI
LISTA DE ACRÔNIMOS.....	XI
INTRODUÇÃO .....	1
TEMA E OBJETIVOS.....	1
METODOLOGIA.....	3
ESTRUTURA .....	4
1. SUSTENTABILIDADE.....	5
1.1. CONCEITO GLOBAL.....	5
1.2. SUSTENTABILIDADE NA CONSTRUÇÃO .....	6
1.3. A FLORESTA SUSTENTÁVEL E MANEJO RESPONSÁVEL .....	8
1.4. ARQUITETURA SUSTENTÁVEL .....	11
2. CARACTERÍSTICAS E POTENCIAIS DA MADEIRA COMO MATERIAL DE CONSTRUÇÃO .....	16
2.1. CONTEXTO HISTÓRICO .....	16
2.2. MORFOLOGIA DO MATERIAL, PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS .....	18
2.3. PATOLOGIAS.....	20
2.3.1. FALHAS HUMANAS.....	21
2.3.2. CAUSAS NATURAIS .....	21
2.3.2.1. AGENTES BIÓTICOS .....	22
2.3.2.2. AGENTES ABIÓTICOS .....	26
2.3.2.3. CONSERVAÇÃO E PROTEÇÃO DA MADEIRA .....	26
2.4. SISTEMA DE PRODUÇÃO DA MADEIRA COMO MATERIAL DE CONSTRUÇÃO.....	27
2.5. UTILIZAÇÃO .....	30
3. SISTEMAS CONSTRUTIVOS EM MADEIRA .....	35
3.1. PILAR E VIGA.....	35
3.2. SISTEMA ALIGEIRADO ( <i>LIGHT FRAMING</i> ).....	36
3.3. MADEIRA MACIÇA:.....	38
3.4. CONEXÕES PARA ELEMENTOS EM MADEIRA.....	40
3.5. IMPERMEABILIZAÇÃO .....	43
3.6. PRÉ FABRICAÇÃO.....	43

4.	CONSTRUÇÃO DE MADEIRA EM ALTURA.....	45
4.1.	INTRODUÇÃO .....	45
4.2.	CLT – <i>Cross Laminated Timber</i> .....	45
4.3.	NLT – <i>Nail Laminated Timber</i> .....	48
4.4.	GLT - Glulam .....	48
4.5.	DLT – <i>Dowel Laminated Timber</i> .....	49
4.6.	AVANÇOS E PESQUISAS TECNOLÓGICAS .....	51
4.7.	PROTEÇÃO CONTRA INCÊNDIO .....	52
4.8.	COMPORTAMENTO ANTI-SÍSMICO .....	53
4.9.	CONFORTO TÉRMICO .....	53
4.10.	CONFORTO ACÚSTICO.....	54
4.11.	RESISTÊNCIA À HUMIDADE .....	55
4.12.	CASOS DE ESTUDO .....	56
4.12.1.	BROCK COMMONS TALLWOOD HOUSE.....	56
4.12.2.	EDIFÍCIO <i>MJOSTARNET</i> .....	57
4.12.3.	W350 .....	59
5.	REGULAMENTAÇÃO .....	61
6.	CONCLUSÃO .....	63
6.1.	VANTAGENS E DESVANTAGENS .....	63
6.2.	CONTEXTO INTERNACIONAL .....	65
6.3.	CONTEXTO NACIONAL.....	66
6.4.	PROJEÇÕES FUTURAS.....	67
	BIBLIOGRAFIA (de acordo com ISO 690) .....	71



## INTRODUÇÃO

### TEMA E OBJETIVOS

Desde a Revolução Industrial, os níveis de CO<sub>2</sub> na atmosfera têm crescido de forma exponencial. Há dados que indicam que esse volume já atinge níveis de 40% a mais. A temperatura média do planeta também vem subindo desde então. Dezanove dos vinte anos mais quentes de sempre, aconteceram a partir de 2001, com exceção de 1998 (NASA/GISS, 2020).

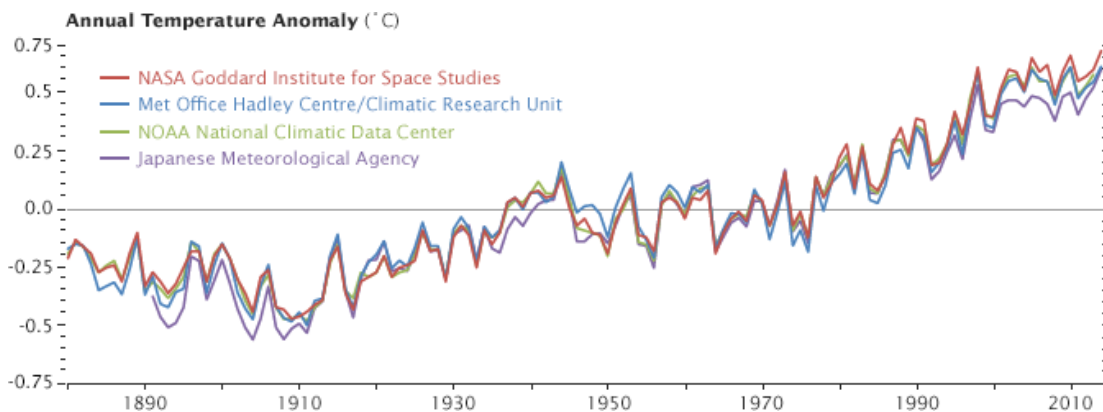


FIGURA 0.1 Gráfico das alterações climáticas ao longo do tempo desde a Revolução Industrial – FONTE: NASA/GISS

A ONU estabeleceu, através do Acordo Climático de Paris em 2015, entre os países membros, um limite máximo de aumento da temperatura média global para 2°C. As resoluções devem ser cumpridas em prazos determinados e fundamentalmente definem ações para reduzir as emissões globais de gases de efeito estufa e reconhecendo que são necessárias reduções profundas e enfatizando a necessidade de urgência (ONU, 2019).

O estilo de vida urbano, muitas vezes, leva a grandes pegadas ambientais. Cerca de 75% da energia e dos recursos naturais do mundo são consumidos nas cidades. Aproximadamente 60% de todo o lixo e 70% das emissões de gases de efeito estufa vêm de centros urbanos. Prevê-se que as emissões diretas e indiretas de ar condicionado e refrigeração aumentem 90% até 2050 em relação aos níveis de 2017 (Msuya, 2019).

À medida que a população humana continua crescendo e o planeta enfrenta graves ameaças por conta das mudanças climáticas, a necessidade de planejamento urbano sustentável torna-se evidente. As Nações Unidas preveem que até 2050, duas em cada três pessoas, ou seja, mais 2,5 bilhões de pessoas, estarão vivendo em centros urbanos. Tanto é que o tema do Fórum Urbano Mundial de 2020 foi o meio ambiente como fio condutor que conecta cultura e inovação. Por meio da inovação, podemos criar caminhos para tornar nossas cidades neutras em carbono, eficientes no uso de recurso e resilientes ao clima (Msuya, 2019).

Os materiais tradicionais de construção do século XX como aço e betão têm contribuído largamente para esse aumento acentuado da emissão de gases de efeito estufa. Seus processos produtivos são extremamente poluentes. Quando comparamos os impactos da produção da madeira como material de construção, betão e aço, é possível perceber o grande passo que podemos dar tomando decisões baseadas em dados científicos comprovados.

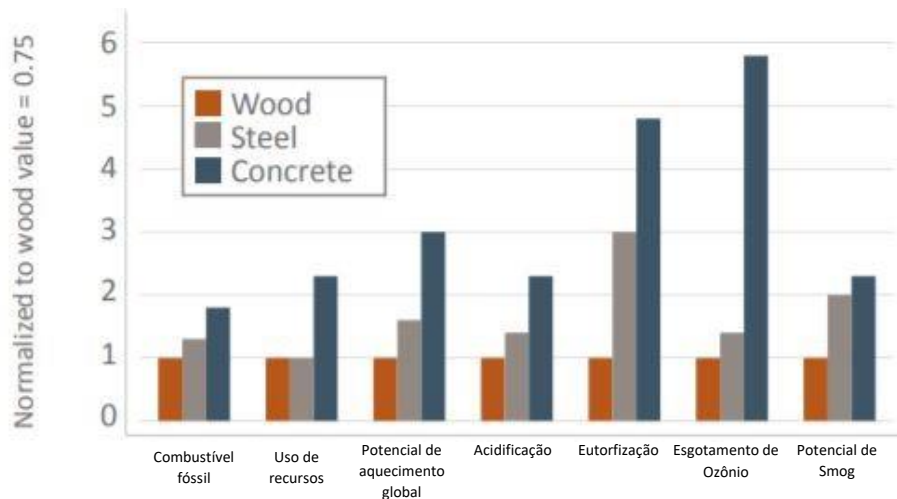


FIGURA 0.2: Comparativo na produção dos principais materiais de construção— FONTE: Athena Calculator

Nós, arquitetos, temos a chance de repensar e mudar o ambiente construído sem emissão de CO<sub>2</sub> em vez de continuar fazendo o que nossos antecessores fizeram e agravar ainda mais o quadro crítico que enfrentamos hoje como consequência.

A indústria da construção representa, hoje, aproximadamente um terço do total de gases de efeito estufa emitidos no mundo. Isso remete aos arquitetos um papel de grande responsabilidade nessa crise. Conforme a população mundial continua a crescer, novas construções continuarão a ser necessárias. O modo como essas construções serão projetadas dependem de decisões e tendências que laçarmos agora.

Não é incomum que, quando se fala em madeira, se visualize uma cabana, uma choupana, uma construção rudimentar. Mas a madeira virou um produto de alta tecnologia. A tendência envolve tanto o uso exclusivo quanto a construções híbridas com alvenaria, argamassa e outros materiais. A madeira é leve, permite furos, cortes e ajustes em obra.

Em diversos países como Canadá, Estados Unidos, Alemanha, França e países escandinavos, a construção em estrutura de madeira têm ganhado não só espaço no mercado como altura. São projetos que utilizam madeira modificada industrialmente através de laminação e colagem, formando painéis que ainda recebem a adição de químicos de controle de humidade e afins. A grande vantagem desse produto é a possibilidade de personalização pré-fabricada, com medidas precisas para montagem em obra, o que acelera a construção.

Para garantir que o alargamento do uso do material não seja causa de mais desmatamentos ilegais, são necessárias certificações de origem. Outras questões a serem abordadas envolvendo a madeira modificada e afins é a segurança contraincêndios através de regulamentações específicas e a durabilidade do material através de tratamentos feitos nas fábricas e programas de manutenção simples e eficazes.

Como arquitetos, temos a oportunidade de criar tendências. Quando encaramos nossa responsabilidade sobre o desenvolvimento das cidades e toda consequência que nossas decisões como projetistas trazem à tona, é o momento de sairmos do óbvio, do comum, do ultrapassado. Temos nas mãos a grande oportunidade de escrever um novo capítulo da história e fazermos parte não só da transformação da forma de construir, mas também na forma de

pensar arquitetura além do objeto e do usuário, mas como parte do mundo que estamos construindo. E indo além, levando essa transformação do pensar para o agir. Agir diante de uma realidade completamente diferente daquela do século passado, que levou ao uso dos materiais que ainda usamos largamente nos dias de hoje, mas que não são mais adequados.

A construção em madeira é uma opção viável para esse combate e para reduzir a pegada de carbono das edificações. Fundamentalmente, para reverter as mudanças climáticas, a pegada de carbono deve ser drasticamente reduzida através da alavancagem dos benefícios que a construção em madeira traz.

## **METODOLOGIA**

Buscando lançar as bases para a fundamentação de pesquisa e desenvolvimento do tema foram realizadas intensas leituras de bibliografia, artigos, revistas especializadas, dissertações de mestrado e doutoramento sobre os estudos das inovações e experiências realizadas relativos à construção em madeira.

Primeiramente, intenciona-se romper com preconceitos e falsas evidências acerca da madeira como material de construção de pouca durabilidade e menor resistência que materiais tradicionais no que diz respeito às suas propriedades. A ideia de que a madeira é um material construtivo de qualidade inferior ao betão ou ao aço é de natureza empírica, interiorizado por crenças ultrapassadas. Isto é, vai contra as evidências de natureza científica.

Os procedimentos metodológicos do trabalho incluem o levantamento e análise de bibliografia que trata da madeira como material de construção, levando em conta os avanços tecnológicos que permitem a expansão em altura dos projetos arquitetônicos e estruturais. Somado a isso, as propriedades físicas e mecânicas serão analisadas. Assim como a sua durabilidade e comportamento em relação ao fogo. Para convergir com a questão da sustentabilidade, serão levados em conta as relações culturais, econômicas e ambientais dos produtos da madeira aplicáveis à construção.

No que diz respeito às questões de sustentabilidade, foi fundamental a identificação de dados científicos comparativos com materiais tradicionais na construção em altura, como aço e betão, para análise do impacto no meio ambiente e económico que levaram a identificar as vantagens e viabilidade reais do uso da madeira na construção em altura.

Foram igualmente analisados e sistematizados os principais sistemas estruturais e elementos construtivos que compõem os projetos em madeira e a pormenorização dos produtos em madeira industrializada e elementos construtivos que são exemplo de sucesso em projetos realizados no mundo todo, assim como avanços tecnológicos e atualizações de regulamentações vindouros para ser possível fazer uma análise das perspectivas futuras.

Por fim, após observação sistemática de informações qualitativas expostas ao longo dos capítulos e evidências através dos casos de estudo, é feita uma abordagem racional do contexto geral e perspectivas futuras acerca do tema.

## **ESTRUTURA**

O capítulo introdutório segue uma linha expositiva para apresentação do tema baseado da realidade atual, a necessidade urgente de popularizar sua utilização, de preconceitos e subutilização do material citando suas principais características, suas qualidades como material construtivo de fonte sustentável.

O capítulo 1 aprofunda a questão da sustentabilidade como conceito global, trazendo questões ambientais, econômicas, sociais e culturais. Também aborda soluções para que a madeira de construção venha de fonte renovável sem prejudicar a natureza através de desmatamentos e fomentando o desenvolvimento económico em regiões hoje pouco desenvolvidas e com escassez de trabalho.

O capítulo 2 expõe de forma mais focada as propriedades físicas e mecânicas da madeira para o aproveitamento de suas potencialidades como material estrutural e construtivo, os processos produtivos inovadores de pré-fabricação e a utilização de seus produtos mais modernos para a construção, assim como os desafios a serem enfrentados. Aborda também as causas de suas potenciais patologias e tratamentos preventivos.

No capítulo 3 estão descritos os sistemas estruturais mais utilizados em madeira, demonstrando assim as diversas possibilidades construtivas com o material, sendo muitas delas apenas conhecidas superficialmente pela maioria dos arquitetos, como pormenorização de elementos de vedação, conexões e revestimentos.

O capítulo 4 é o momento em que é decorrido os produtos em madeira para utilização na construção em altura. É o capítulo que fala do tema de maneira decomposta e detalhada, elemento por elemento e questões de utilização como proteção e combate a incêndio, comportamento antissísmico e condições de bem-estar dos ambientes internos. E finalmente, os exemplos de sucesso para demonstrar que toda a defesa do uso do material para edificação em altura feita até aqui é viável e sua eficiência comprovada.

No capítulo 5 cito a situação das regulamentações internacionais acerca das construções em madeira e mais ainda das construções em madeira em altura e as expectativas para as atualizações a serem divulgadas em 2021. Também estão presentes as regulamentações existentes em Portugal e o que se espera para os próximos anos referente a isso.

Concluindo, o capítulo 6 traz uma compilação das vantagens e desvantagens, vistas ao longo desse trabalho, do uso da madeira para construção em altura. Resumirá também os contextos internacional e nacional e uma breve análise do cenário atual e o que podemos esperar para os próximos anos para a construção em madeira em altura.

## 1. SUSTENTABILIDADE

### 1.1. CONCEITO GLOBAL

Quando pensamos em sustentabilidade devemos considerar diversos ângulos para percebermos a maneira mais correta de abordar um determinado tema. A primeira consideração deve ser o tripé da sustentabilidade, que define que é preciso observar questões ambientais, sociais e econômicas. Esse tripé é conhecido também como triplo “P”: *people, planet and profits*. O triplo “P” define que uma atividade realmente sustentável deve agregar benefícios ao meio ambiente, gerar impacto econômico positivo e ter objetivo de melhorar a vida das pessoas.

#### SUSTENTABILIDADE SOCIAL:

A responsabilidade social é a base do tripé menos trabalhada. É também, muitas vezes, motivo de fracasso de tentativas de implementação de atividades que buscam ser sustentáveis e negligenciam os recursos humanos. Há duas maneiras de ver a questão social no contexto de uma construção, por exemplo: interna e externamente.

Internamente a sustentabilidade social consiste em respeitar seus colaboradores e oferecer boas condições de trabalho. Nesse sentido, o mínimo que se espera dela é o atendimento a aspectos como flexibilidade, remunerações justas, benefícios, inclusão e diversidade, suporte (Ferreira, 2019). Isso garante um ambiente de trabalho saudável, uma relação harmoniosa e justa, fatores que impactam positivamente os resultados da obra.

Além disso, externamente, deve haver a preocupação com a comunidade na qual a empresa está inserida. Ajudar seu entorno é fundamental, muitas vezes, como forma de realmente assumir sua responsabilidade. Projetos sociais, valorização da mão de obra local e programas de apoio ao bem-estar e incentivo educacional são alguns dos melhores exemplos de como atuar nesse sentido (Ferreira, 2019).

#### SUSTENTABILIDADE ECONÔMICA:

A parte econômica gera muitas dúvidas dentro da ótica do tripé da sustentabilidade. O foco não pode ficar somente no lucro. O primeiro passo é cuidar do processo de maneira responsável, com a renovação do que é necessário em nível de tecnologia, investindo em bons resultados.

Esses cuidados internos são fundamentais para que a produção e prestação de serviços sejam de melhor qualidade. Inclusive, é preciso ter maior responsabilidade na gestão financeira especialmente em relação aos custos e orçamentos (Ferreira, 2019). Análises e estudos mais detalhados são importantes para que, em longo prazo, não haja problemas econômicos.

#### SUSTENTABILIDADE AMBIENTAL:

A exploração de recursos adequada é a única maneira de garantir uma prática ambientalmente sustentável e sua continuidade. É possível ir além no controle de uso de matéria-prima e na emissão de poluentes, e isso está ligado a programas de preservação e com o comprometimento com o incentivo de novas práticas mais adequadas.

Para uma empresa tornar-se ecologicamente sustentável, muitas mudanças internas são necessárias e não apenas um bom plano de marketing. Uma empresa que consegue isso alcança outro patamar e, em longo prazo, vai colher bons frutos.

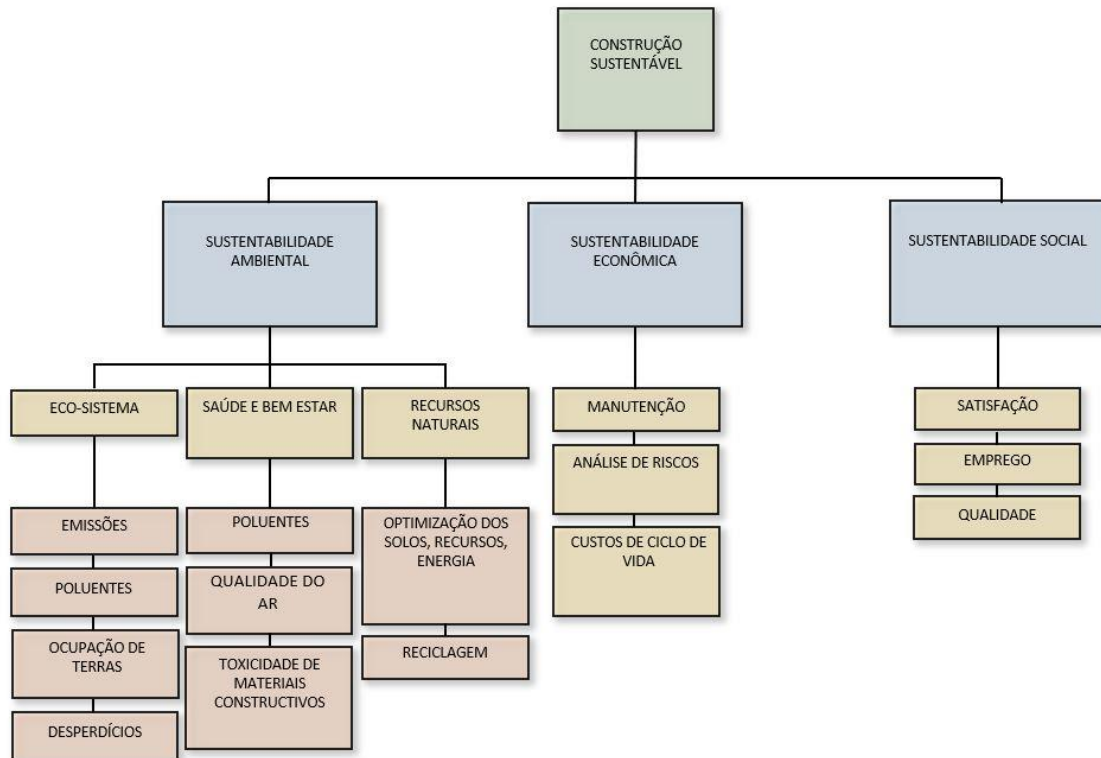


FIGURA 1.1.1: Organograma do conceito de sustentabilidade global

Para que o tripé da sustentabilidade seja aplicado de maneira eficaz, algumas dificuldades precisam ser identificadas e superadas com soluções que realmente se destaquem.

Muitas vezes uma das bases do tripé é negligenciada. Nem sempre isso acontece premeditadamente, mas é importante sempre analisar para avaliar em quais das 3 perspectivas ainda está em subdesenvolvimento. É preciso que social, econômico e ecológico sejam trabalhados da mesma forma, para que o resultado seja integrado (Ferreira, 2019).

Para que uma empresa se adeque a um modelo de gestão sustentável, é preciso abordar a questão do lucro com um novo olhar. Isso não significa que o lucro deixe de ser prioridade, mas não pode ser o motivo para o desequilíbrio da base do tripé. Muitas vezes, isso acontece em busca de uma produção mais barata, mas mais agressiva à natureza, más condições de trabalho, falta de incentivos sociais, pouco investimento e uma série de outros fatores. Os lucros até se mantêm altos, mas a relevância do projeto fica comprometida (Ferreira, 2019).

## 1.2. SUSTENTABILIDADE NA CONSTRUÇÃO

O planeta Terra é um ecossistema fechado. Fora dele, não há possibilidade de vida (pelo menos até onde temos conhecimento). Os recursos naturais disponíveis não são infinitos (água, ar, biodiversidade, alimentos). Portanto, a tendência de construção com uso de materiais

renováveis, como a madeira de manejo responsável, é uma necessidade. O uso de materiais de origem extrativista deve ser reduzido ao mínimo possível.

Os principais materiais estruturais que usamos na construção civil, como já citado, são o betão e o aço. O Betão é o primeiro por diversos motivos, a começar pelo preço. É extremamente barato e o mais presente na história da arquitetura modernista e nas construções das grandes cidades modernas no século XX. Somente esse material, sozinho, é responsável por cerca de 8% da emissão de gases de efeito estufa. Estima-se que o consumo de betão anual *per capita* no mundo todo seja de 3 toneladas. Para traçarmos uma comparação simples: para cada 1m<sup>3</sup> de betão utilizada em obra, 1 tonelada de CO<sub>2</sub> é emitida na atmosfera. Para cada 1m<sup>3</sup> de madeira aplicada em obra, 1 tonelada de CO<sub>2</sub> é sequestrada da atmosfera ([www.climainfo.org.br](http://www.climainfo.org.br)).

Logo após o betão, vem o aço, que é um dos maiores consumidores de energia do planeta e representa cerca de 3 a 4% do total de emissões de gases de efeito estufa. Para sua produção, é preciso fundir ferro e carbono em fornos de altas temperaturas que utilizam carvão mineral como combustível. Mas mesmo assim, apresenta vantagens sobre o betão quanto ao sistema construtivo, eficiência e rapidez de montagem. A sua maior vantagem, entretanto, é a possibilidade de reciclagem. Mas isso não lhe confere a categoria de material sustentável, pois sua produção gera muito resíduo. Esses resíduos são metais pesados, tóxicos, descartados em barragens. Se essas barragens se rompem, temos desastres ecológicos difíceis de medir as consequências não só para a natureza como para comunidades próximas. (<https://g1.globo.com/>). Temos como exemplo disso, o rompimento de uma barragem de uma empresa multinacional que produzia aço próximo à cidade de Mariana, no Brasil.

A construção civil é a atividade humana mais poluidora do mundo devido à produção dos seus materiais, ficando muito à frente até mesmo dos sistemas de transportes. O cenário atual da construção civil é, em geral, caótico. São muitos trabalhadores, muitas vezes fazendo a mesma coisa, poluição sonora, muita poeira e, principalmente, muito resíduo. Um volume significativo do material adquirido para uma obra acaba descartado.

Considerando tudo que foi dito até aqui sobre alterações climáticas e poluição, vamos em busca de uma solução sustentável. Em terceiro lugar dessa lista, temos a madeira. Atualmente, com a tecnologia existente e disponível, só temos essa alternativa de material para substituir o betão e aço. A madeira, como material bruto, é “produzida” de forma sustentável: através do poder da natureza. Enquanto uma árvore cresce na floresta, ela consome CO<sub>2</sub> e libera O<sub>2</sub>. Quando essa árvore morre e decompõem-se na natureza, lentamente ela libera todo CO<sub>2</sub> armazenado nela de volta à atmosfera. Mas se pegarmos essa madeira antes dela morrer e transformarmos ela em material de construção, esse CO<sub>2</sub> mantém-se armazenado.

É importante enfatizar que construir com madeira hoje não é mais como se construía antigamente. Antes não havia qualquer controle de qualidade, características técnicas para cada tipo de uso, procedência, tratamentos de secagem ou precisão de cortes. Com a nova tecnologia de colagem de madeira, que nem é tão nova assim, o processo de construção mudou completamente, tornando possível transformar um material de pouca resistência, como o Pinus por exemplo, em peças com grande performance e garantias por ter passado por processos de engenharia, dando o nome a esses novos materiais de “madeira engenheirada”.

A tendência da construção em madeira não é mais algo distante. Não apenas está ganhando espaço no mercado em diversos países como está recebendo grande incentivo na forma de volumosos investimentos das maiores empresas do mundo. Nos Estados Unidos, uma das maiores construtoras do mundo, a Katterra, já investiu mais de 2 bilhões de dólares em fábricas para construir madeira engenheirada para construir seus prédios (Moore, 2019).

É claro que com isso vem a preocupação acerca do desmatamento. Afinal, a demanda de material de construção evolui numa velocidade muito maior que o tempo de crescimento de uma árvore. Mas, se usarmos técnicas de reflorestamento e gestão responsável de recursos, além de criar atividade econômica em localidades menos desenvolvidas (sustentabilidade social e econômica), aumentamos a capacidade das florestas de absorver CO<sub>2</sub> e criamos uma fonte sustentável de recurso natural renovável (sustentabilidade ambiental).

O caso de edifícios altos de madeira também é motivado, em parte, por seus significativos benefícios ambientais. Ao encararmos o fato de que a indústria da construção, como se apresentada atualmente, é uma das maiores consumidoras de energia e recursos, a madeira traz uma solução que cresce, literalmente, em árvores. Enquanto o betão emite quase o seu próprio peso em dióxido de carbono, a madeira colhida com responsabilidade é naturalmente renovável, reciclável e bloqueia o carbono durante toda a vida útil do edifício.

Em relação à vida útil do edifício, considerando que o mundo está em transformação cada vez mais rápida, podemos ter um encurtamento da utilização dos prédios que construímos hoje. Em 50 ou 60 anos o planeta terá mudado bastante; as necessidades serão outras; novas e melhores tecnologias de construção surgirão entre outras situações que não podemos prever. Esses edifícios podem ser 100% desmontados sem necessidade de demolições ou implosões e suas peças serem reaproveitadas em outras construções ou serem recicladas e transformadas em biomassa. Isso é construir para o futuro, pensando no legado que deixaremos para nossos descendentes.

### **1.3. A FLORESTA SUSTENTÁVEL E MANEJO RESPONSÁVEL**

“As florestas são talvez o único instrumento natural ao nosso dispor em termos de sequestro de carbono e de atenuação das alterações climáticas. Podemos plantá-las e abatê-las: Não temos tanto controle sobre os oceanos, por exemplo”

Annemarie Bastrup-Birk – Especialista florestal na European Environment Agency

Ao contrário do que indicam os números mundiais, a área total de florestas na Europa vem aumentando, ocupando cerca de 40% do seu território. Segundo o Parlamento Europeu, desse total, cerca de 12% são protegidas sob códigos específicos. Ao norte e leste da Europa há grandes tratados de proteção para manter a intervenção humana ao mínimo a fim de preservar solos, água e ecossistema. Mas isso não significa que a população europeia não faça parte dos números mundiais de destruição das florestas. Bem pelo contrário. A importação de produtos em madeira e agrícolas representam o desmatamento dos países exportadores, principalmente das regiões tropicais e boreais (Nègre, 2020).

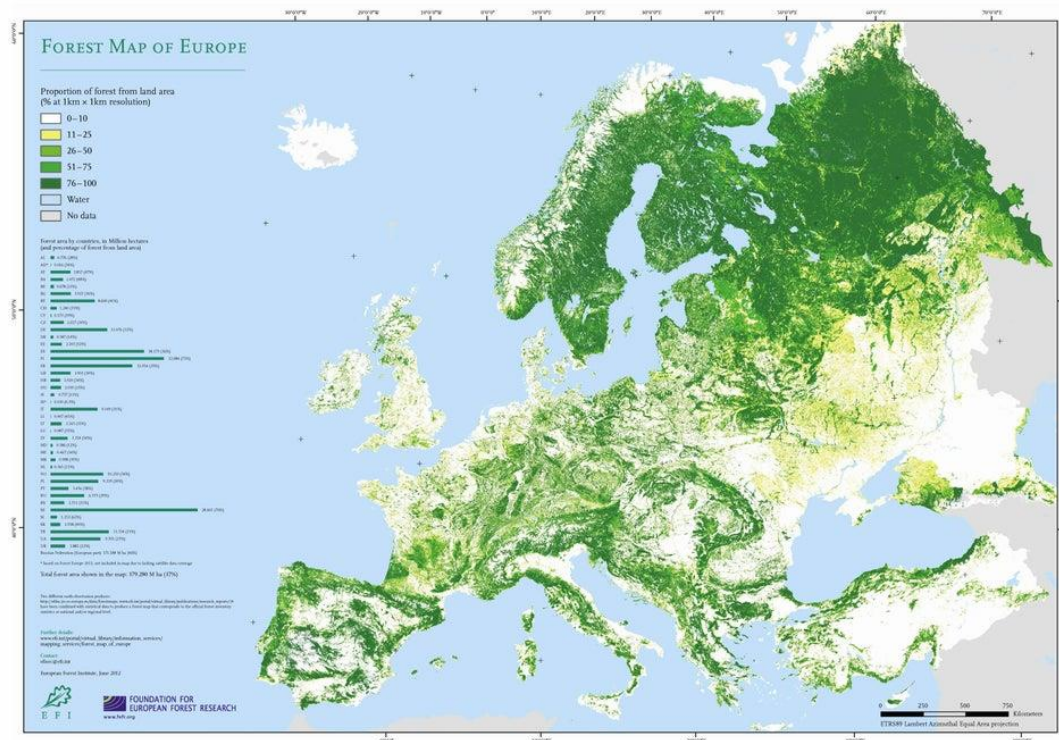


FIGURA 1.3.1: Mapa florestal da Europa  
 FONTE: Foundation for European Research

Apesar de mostrarem essa tendência a expansão, as florestas europeias enfrentam desafios como a poluição, alterações climáticas, construção de redes de transportes e expansão urbana, que promove fragmentações de suas áreas.

Esses desafios deixam claro que, apesar do momento de expansão, é preciso proteger as florestas com políticas públicas garantindo sua gestão sustentável não só em relação à extração da madeira, mas também ao uso de outros recursos essenciais ao equilíbrio do ecossistema e garantia do nosso bem-estar.

Se cuidarmos bem das florestas cultivando árvores para serem cortadas e depois plantarmos novas árvores no local, teremos material de construção renovável eternamente. Esse é o grande mote para construir em madeira: atingir o equilíbrio da balança da sustentabilidade.

### A ESTRATEGIA EUROPEIA PARA GESTÃO DE FLORESTAS SUSTENTÁVEIS

“A gestão das florestas continua a ser uma responsabilidade nacional. Não obstante, está um curso um processo europeu para definir certos critérios e diretrizes sobre boas práticas de manutenção das florestas europeias. Embora não exista uma política florestal ao nível da UE, a União Europeia pretende apoiar e implementar uma gestão sustentável das florestas na Europa, bem como proteger e preservar as diversas funções que elas desempenham “ (Bastrup-Birk, 2016).

Segundo a Comissão Europeia, entre as prioridades dessas funções estão inclusas políticas de desenvolvimento rural, políticas ambientais e climáticas, provisão de serviços

provenientes do ecossistema (como qualidade da água e ar ou controle da erosão) e de desenvolvimento sustentável de empregos em áreas rurais. Essas prioridades serão atendidas, dando atenção a 8 ações:

- 1) Apoio a comunidades urbanas e rurais;
  - 2) Promover a competitividade e a sustentabilidade das indústrias florestais da UE, da bioenergia e da economia verde em geral;
  - 3) Proteger as florestas em alteração climática e promover o manejo florestal sustentável para mitigar as mudanças climáticas;
  - 4) Proteger florestas e melhorar os serviços ecos sistémicos;
  - 5) Reforçar o nosso conhecimento das florestas que a UE possui e de que forma estão a mudar;
  - 6) Desenvolvimento de produtos florestais novos e inovadores e de valor agregado;
  - 7) Trabalhando juntos para gerenciar coerentemente e entender melhor as florestas;
  - 8) centrar-se nas florestas a partir de uma perspectiva global, incluindo a conservação de florestas não pertencentes à EU.
- (Comissão Europeia)

#### PEGADA DE CARBONO

A pegada de carbono é a medida de volume de CO<sub>2</sub> emitida na atmosfera como resultado de uma atividade específica. Com esse dado é possível entender qual o impacto que cada material deixa no ambiente.

Nenhum outro material tem a pegada de carbono tão reduzida como a madeira. Isso graças ao processo de fotossíntese, que se utiliza da luz do sol para absorver CO<sub>2</sub> da atmosfera, transformar o carbono (C) em celulose (principal componente da fibra da madeira) e liberar O<sub>2</sub> de volta à atmosfera. Porém, se essa árvore morre e se decompõe na natureza, esse carbono é liberado de volta em forma de CO<sub>2</sub>. Esse processo faz parte de um sistema complexo de troca de carbono conhecido como ciclo do carbono. Desmatamento sem qualquer controle é o principal problema que leva ao desequilíbrio desse ciclo, seguido de todas as atividades humanas dependente de combustíveis fósseis.

A gestão de florestas sustentáveis permite que as árvores sejam extraídas do seu habitat antes de morrerem e se decomporem na natureza, evitando que liberem de volta à atmosfera o CO<sub>2</sub> armazenado. Essa retirada deixa espaço para novas árvores crescerem e a floresta continua absorvendo CO<sub>2</sub>. Além disso, o uso da madeira como material de construção prolonga o armazenamento de CO<sub>2</sub> por décadas.

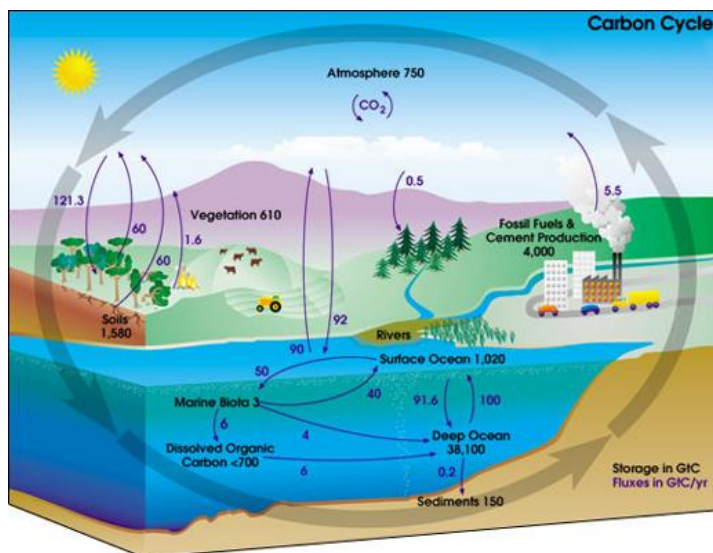


FIGURA 1.3.2: Ciclo do Carbono  
 FONTE: NASA

Portanto, os principais objetivos da gestão de florestas sustentáveis são garantir a absorção de CO<sub>2</sub> da atmosfera, adotar uso inteligente da madeira retirada e ajudar a diminuir os efeitos das alterações climáticas a longo prazo.

#### 1.4. ARQUITETURA SUSTENTÁVEL

Da mesma forma que a tecnologia permite avanços na forma de construir, também permite avanços na forma de projetar. O trio caneta nanquim, papel vegetal, lâmina de barbear não é mais utilizado. Assim como a mesa com régua paralela e esquadros sumiram dos ateliês de arquitetura. Hoje, os meios de expressão ampliaram-se radicalmente. Com o uso do computador e de equipamentos eletrônicos tais como impressoras 3D, softwares que permitem desde o tridimensionamento de forma simples e rápida, passando por outros mais avançados que geram complexas formas geométricas com duplas curvaturas, até os que mostram o comportamento do edifício em termos de conforto ambiental.

Com o auxílio de tantas ferramentas de alta tecnologia que nos permitem experimentar as possibilidades de projeto antes mesmo de o aprovarmos, é fundamental que a sustentabilidade seja pensada de uma forma globalizada ainda nas fases iniciais de tomada de decisão. Hoje, muito se fala em sustentabilidade quando, na verdade, estão falando em soluções de alta tecnologia que têm custos elevados. Se não forem consideradas as condicionantes do local de implantação do projeto, serão necessários sistemas e equipamentos que podem sair mais caro que a própria construção, além de gerarem consumo de energia desnecessário.

A pirâmide abaixo ilustra o conceito de *low technology* e como as decisões de base na fase de projeto podem gerar economia não só de recursos financeiros, como de consumo de energia durante execução e vida da edificação.

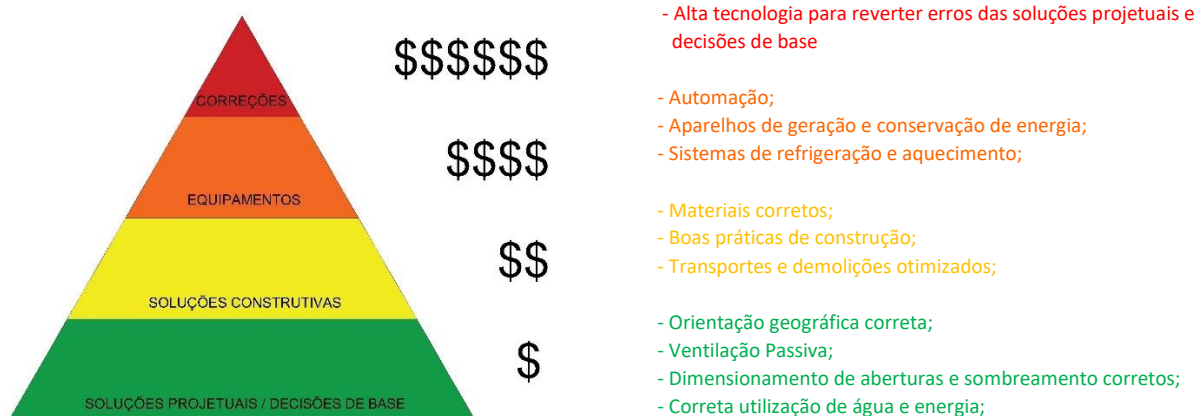


FIGURA 1.4.1: Pirâmide dos custos das decisões de projeto  
 FONTE: Ivo Mareines Arquitetura

Para explicar melhor, a base da pirâmide são as decisões de projeto e soluções de base que levam em consideração, entre outras coisas, a implantação com orientação geográfica correta, ventilação passiva (estudo da incidência de ventos no terreno), dimensionamento de abertura e sombreamentos adequados, utilização responsável de água e energia. Essa lista pode ser receber diversos itens diferentes dos descritos, mas o que importa é que essas decisões representam um custo baixo e grandes resultados na eficiência do edifício.

Soluções construtivas vem logo depois das soluções de projeto. Essas soluções passam por escolher materiais adequados e técnicas construtivas que reduzam desperdícios (de materiais, recursos naturais e financeiros e também de tempo). A forma de construir ainda está na base da pirâmide, mas representa um custo um pouco mais elevado que as decisões de base.

Seguindo na ascendência da pirâmide, temos as soluções de equipamentos de geração e conservação de energia como sistema LED, automação e tecnologia de refrigeração e aquecimento.

Por último temos um valor significativamente maior que é destinado a correções de erros cometidos na base da pirâmide que exigem alta tecnologia. Por exemplo, um erro de escolha de materiais somado a uma má implantação e orientação solar, pode resultar na total falta de conforto térmico no interior dos ambientes, tornando a edificação inabitável e exigindo soluções que podem custar até mais que o próprio edifício.

Portanto, resumidamente, arquitetura sustentável é a maneira como são concebidos os projetos de arquitetura de forma que suas premissas sejam otimização de recursos (naturais, industriais, humanos, financeiros...) com o objetivo de melhorar a qualidade da construção e sua utilização minimizando os impactos ambientais. Quando falamos em arquitetura sustentável, devemos considerar todas as atividades que envolvem a concepção e execução de um projeto sob diversos ângulos para que as abordagens dos temas sejam feitas da maneira mais correta possível.

#### CERTIFICADO LEED

LEED é uma sigla para *Leadership in Energy and Environmental Design*. Em português: Liderança em Energia e Design Ambiental. Foi criada pelo USGBC (*United States Green Building Council*) em 1993. Logo que foi criado, buscou viabilizar ideias de práticas de construção sustentáveis para a grande indústria, pois só assim atingiriam o grande público. A criação da

classificação LEED em 1994 foi uma consequência necessária para a criação de padronização de normas e estratégias para um edifício ser considerado sustentável. Com o tempo, a certificação evoluiu para um código abrangente incluindo todos os aspectos do processo construtivo (Boni, 2019).

Para obter um certificado LEED é necessário atingir uma pontuação determinada. A pontuação é dada conforme os cumprimentos dos requisitos estabelecidos para Construção Verde, que englobam a avaliação da localização e transporte, qual o nível de sustentabilidade do terreno de implantação, eficiência no uso de água, eficiência no uso de energia e cuidados com emissões atmosféricas, escolhas de materiais adequados e utilização correta de recursos, qualidade interna dos ambientes, além da utilização de inovações e prioridades regionais.



FIGURA 1.4.2: Requisitos para certificação LEED  
FONTE: UGREEN



FIGURA 1.4.3: Classificação por pontuação do certificado LEED  
FONTE: UGREEN

- LOCALIZAÇÃO E TRANSPORTE: Incentiva a escolha de terrenos localizados em áreas urbanas já consolidadas que oferecem proximidade aos serviços básicos e acesso a transportes públicos e alternativos como ônibus e ciclovias, com a finalidade de diminuir a utilização do automóvel.

- LOTES SUSTENTÁVEIS: Esse aspecto se concentra no ambiente que envolve a construção. Uma construção sustentável começa pela escolha do terreno e sua implantação. Para atender aos requisitos de pontuação e classificação LEED, o projeto deve apresentar estratégias que minimizam o impacto no ecossistema durante a construção e vida útil da edificação e aborda questões como controle e manejo das águas pluviais; utilização de pavimento permeável e telhados verdes, que aumentam a absorção de água das chuvas e diminuem o efeito “ilha de calor” (calor produzido em superfícies como betão e asfalto, muito presentes em centros urbanos). Proteger e restabelecer o meio ambiente natural do lote são atitudes de investidor valorizadas pela USBGC como, por exemplo, recuperar um solo eventualmente contaminado (Boni, 2019).

- EFICIÊNCIA DO USO DE ÁGUA: Esse pré-requisito aborda a questão do uso racional da água. Ou seja, a redução do consumo interno e externo de água da edificação. O percentual de água potável no planeta é muito baixa se comparada às demandas de consumo mundiais. Por isso é extremamente necessário a busca por soluções para atingir a eficiência no seu consumo. Tem como objetivo a eficiência em primeiro lugar no que diz respeito à conservação da água e medidas que proporcionem maior economia.

Quando se fala em economia de consumo de água nos edifícios, diversos aspectos devem ser levados em conta. A água é utilizada de muitas formas, seja no abastecimento para consumo

humano, seja em sistemas de ar condicionado, irrigação de plantas, limpeza e outros. A economia de água também está relacionada à economia de energia necessárias para seu tratamento, transporte de distribuição, utilização e descarte.

Para falar de todos os benefícios do uso eficiente desse recurso natural, é preciso falar novamente do tripé da sustentabilidade. Quando o consumo é eficiente, contribui-se diretamente nas 3 esferas. Através do uso responsável e reutilização, contribui-se para o meio ambiente. Através de estratégias de tecnologias como sistema de reutilização de água da chuva, sistemas eficientes de ar condicionado ou sistemas de irrigação, é possível atingir uma significativa redução nos custos de consumo, trazendo economia financeira. Na esfera social, um ambiente bem planejado integrado tanto o uso de água com outros métodos de eficiência sustentável proporciona aos usuários melhor bem-estar tanto através de um bom ambiente como através de uma relação custo x benefício mais favorável.

- ENERGIA E ATMOSFERA: A utilização de energia em nossos lares e locais de trabalho aumentam a cada dia e conseqüentemente agrava o impacto sobre o meio ambiente e aumento de custo para geração dessa energia.

É no projeto de arquitetura, durante as decisões de base que devem ser traçadas as estratégias a serem adotadas para a redução do consumo de energia. Existem diversos caminhos para chegarmos a esse objetivo. Uma das estratégias mais simples é utilizar recursos que podemos obter gratuitamente, como o uso de energia solar, decisões de base de projeto que otimizem a iluminação e ventilação naturais (ver figuras 1.4.2 e 1.4.3) e uso de materiais que colaboram para uma melhor eficiência energética. Todas essas estratégias têm como meta a diminuição da necessidade de equipamentos de ar condicionado que, como se sabe, são grandes emissores de gases de efeito estufa na atmosfera.

A utilização eficiente dos recursos naturais através de projeto de arquitetura como boa utilização da luz natural, boa circulação de ar com o aproveitamento adequado dos ventos dominantes, utilização e preservação de água, entre outras possibilidades, é uma das principais medidas a serem promovidas (como as já citadas decisões de base de projeto). A eficiência energética de um edifício é um tema muito abrangente e está diretamente relacionada com outros fatores do projeto como a eficiência da água e qualidade interna dos ambientes. É muito importante, portanto, integrar todos esses pré-requisitos para classificação LEED na busca de soluções inovadoras que sejam cada vez mais eco eficientes e proporcionem a otimização e redução do consumo de energia.

- MATERIAIS E RECURSOS: Esse tema tem início no momento que o projeto começa a ser concebido. Em projetos maiores, como de edificações em altura por exemplo, é preciso pensar antecipadamente para otimizar custos e atender as regulamentações vigentes.

O principal foco em relação aos materiais e recursos é a otimização do seu uso na construção e vida útil da edificação. Ou seja, incentiva o emprego de materiais de baixo impacto ambiental e redução da geração de resíduos minimizando as emissões e danos causados pela extração, transporte, processamento, manutenção, demolição e descarte.

Para atingir esse pré-requisito na pontuação da certificação LEED, são avaliados a gestão de resíduos tanto da construção quanto da utilização da edificação; reuso, reciclagem ou renovação

de materiais; utilização de materiais e produtos regionais (extraídos, recuperados, produzidos ou colhidos a menos de 800km do terreno de implantação) e utilização de madeira certificada.

Pode-se dizer que esse é o requisito mais difícil de atender devido à falta de fornecedores especializados. Também existe carência de projetistas, construtoras e fornecedores certificados. E por último, mas na verdade o maior obstáculo, a falta de interesse do mercado e da sociedade. A escolha de materiais e a forma de utilização deles numa construção é extremamente importante e, em conjunto com as demais abordagens e pensamento crítico que os arquitetos devem ter, são a chave inicial para a elaboração de um projeto sustentável.

- QUALIDADE INTERNA DOS AMBIENTES: É muito importante levar em conta a qualidade interna dos ambientes para garantir a eficiência de uma edificação e bem-estar de quem a utiliza. Pesquisas comprovam que a saúde e a qualidade de vida das pessoas melhoram quando elas moram ou trabalham em um ambiente agradável e mais saudável.

Para projetar e construir um ambiente mais saudável, não é preciso que isso se reflita em aumento de custos. Além disso, num ambiente comercial ou corporativo, o resultado a médio e longo prazo é de maior lucratividade. Os principais pontos a serem priorizados são o conforto acústico, térmico e qualidade do ar. O conforto acústico deve estar adequado ao tipo de uso ao qual o ambiente é destinado, geralmente buscando redução dos ruídos exteriores e transmissão de ruídos entre cômodos. Na questão térmica, é preciso priorizar o aproveitamento de ventilação passiva e aquecimento natural através de materiais com bons índices térmicos. Assim é possível chegar a uma maior eficiência do sistema de climatização que, como sabemos, são grandes colaboradores de emissão de gases de efeito estufa na atmosfera. Tudo isso sempre levando em conta as características da região e condições naturais do terreno de implantação.

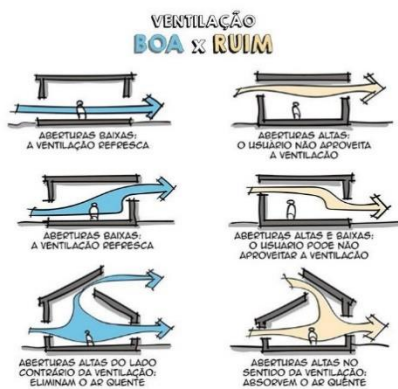


FIGURA 1.4.4: Decisões de projeto como aberturas para ventilação podem representar uma grande diferença na eficiência do controle de temperatura de ambientes internos

Fonte: UGREEN

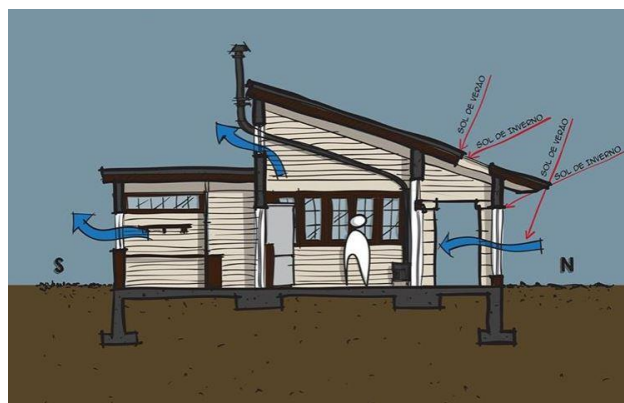


FIGURA 1.4.5: Estratégias bioclimáticas que combinam as corretas captação de calor do sol e ventilação passiva eficiente têm resultados expressivamente eficazes na economia de uso de equipamentos de aquecimento e refrigeração.

Fonte: UGREEN

- INOVAÇÃO: Incentiva a busca de novos conhecimentos sobre *Green Building* reconhecendo projetos com propostas inovadoras quanto às práticas sustentáveis na construção e uso de edificações que vão além das categorias exigidas.

- PRIORIDADES REGIONAIS: Incentiva equipes de projeto a se envolverem nas necessidades específicas do local de implantação, focando nas prioridades de cada país ou região, de acordo com as diferenças ambientais, sociais e económicas existentes em cada local.

## 2. CARACTERÍSTICAS E POTENCIAIS DA MADEIRA COMO MATERIAL DE CONSTRUÇÃO

### 2.1. CONTEXTO HISTÓRICO

“Se o século XVII foi caracterizado por trabalhos com pedras; o século XVIII como o refinamento da alvenaria, o XIX como o auge da estrutura metálica e o XX como a era do betão, isso deixa o século XXI à um próximo sucessor. Minha aposta é a madeira”

Prof. Alex de Rijke – Diretor da Royal College of Arts – Londres

Quando a humanidade começou a construir abrigos, a madeira foi o primeiro material utilizado. No que diz respeito a construções maiores, mais desenvolvidas que cabanas e abrigos temos referências já na Grécia Antiga, no período arcaico com o Templo de *Isthmia* (650 a.C.) e considerado o primeiro exemplar tipológico do templo grego. Em seguida encontramos na Ásia, primeiramente na China, com os primeiros “projetos técnicos”, com mais de 1000 anos de idade e mais recente a imponente Cidade Proibida em Pequim (séc. XV). No Japão e norte da Europa temos os edifícios de madeira mais antigos ainda em pé, o templo de *Horyu-ji* (sec. VII) e a Igreja de *Urnes*, na Noruega (sec. XII).

Archaic Temple at Isthmia, Greece. Constructed between 690 - 650 BC.  
Design by Kerény Arne Lang Antonsen & Jimmy John Antonsen.



FIGURA 2.1.1: Templo de Isthmia (650 a.C)



FIGURA 2.1.2: Cidade Proibida, Pequim (séc. XV)



FIGURA 2.1.3: Templo de Horyu-ji no Japão. Construção em madeira mais antiga do mundo, construída entre os anos de 680 e 710



FIGURA 2.1.4: Igreja de Urnes, na Noruega, erguida em torno de 1113

Com o passar do tempo, entretanto, a necessidade de maior solidez e durabilidade levaram à utilização de outros materiais disponíveis na natureza como a pedra e alvenaria e, posteriormente, a avanços tecnológicos que produziram novos materiais como o betão e aço, por exemplo.

As cidades modernas foram construídas basicamente por esses dois materiais. Ainda no século XVIII, na Inglaterra, o aço começou a ser utilizado para criar estruturas maiores, apesar

do custo ser bastante elevado em relação à construção tradicional da época. Mas foi no século XIX, com a Revolução Industrial, que o aço passou a ser produzido em larga escala. Nos Estados Unidos, tornou-se prática comum construir em aço principalmente para arranha-céus, que começaram a ficar cada vez mais altos e representavam poder econômico e avanço tecnológico do país, além de pontes, linhas de ferro e outras aplicações.



FIGURA 2.1.5: Ponte *Ironbridge* sobre o Rio Severn, na Inglaterra. Primeira ponte construída em estrutura de aço em 1779.

Fonte: Pinterest

Com o tempo, descobriu-se diversas vantagens da utilização do aço na construção civil que são pontos decisivos até hoje para a escolha do material em projetos estruturais, como a redução no tempo de construção, maior liberdade arquitetônica e melhor aproveitamento dos espaços internos, redução do desperdício de materiais, maior produtividade e racionalidade nas obras, maior leveza da estrutura e redução da carga sobre as fundações.

Curiosamente, a história do betão tem as primeiras evidências em Roma, há aproximadamente 2000 anos. Betão era essencialmente utilizado em aquedutos e estradas em Roma. Diz-se que os romanos usavam uma matéria prima especial para seus betões. Tal mistura consistia de cascalho e areia grossa misturados com água, cal e pozolana (cinzas vulcânicas encontradas na região do Vesúvio).

Na segunda metade do século XVIII ainda, alguns experimentos com cimento começaram a ser desenvolvidos até que já no século XIX, em 1824, na Inglaterra, foi criado o cimento Portland, que consistia, basicamente, em queimar o cimento em um forno até que o dióxido de carbono evaporasse, resultando em um cimento muito mais resistente. Alguns anos depois, em 1849, foi testado pela primeira vez, na Alemanha, um combinado de materiais unindo a resistência à tração do aço com a resistência à compressão do betão. A partir disso, o betão armado foi largamente utilizado na construção de rodovias, represas e prédios pelo mundo todo.

O século XX foi, definitivamente, o século da construção em altura. Desde Auguste Perret, passando por Le Corbusier e sua obra “Por Uma Arquitetura”, seguido pelo movimento moderno e a necessidade reconstrução rápida das cidades no pós-guerra, o betão armado substituiu a alvenaria, a madeira e a pedra e começou sua era dourada e ainda hoje é o material mais comum nas construções. Porém hoje, não o tratamos mais como material inovador, mas sim como material tradicional e até mesmo ultrapassado em alguns aspetos e necessidades modernas.

Não há dúvidas que aço e betão são materiais extraordinários e que foram importantíssimos para moldar as cidades modernas. Porém, sua produção demanda uma

quantidade de energia maior do que se considera aceitável nos dias e condições atuais, assim como o volume de emissão de gases de efeito estufa provenientes de sua fabricação.

Para fornecer dados mais esclarecedores, a produção de aço representa cerca de 3% a 4% de toda emissão de gases de efeito estufa na atmosfera, e o betão mais 8%. Portanto, cerca de 12% a 13% de toda emissão do mundo está relacionada a esses dois materiais.

Hoje, esses são os principais materiais ainda utilizados para estruturação de construção em altura. A madeira perdeu seu espaço principalmente após a Revolução Industrial. Porém, neste princípio de século XXI, surge novamente como promessa de desenvolvimento mais sustentável através de inovação, tecnologia de ponta e técnicas de projeto que acompanham as necessidades contemporâneas da sociedade e do meio ambiente.

Se voltarmos à informação citada anteriormente de que cerca de 2,5 bilhões de pessoas precisarão de novas habitações nas cidades nos próximos 30 anos, é evidente que não podemos seguir usando materiais de tal carga de emissão de poluição. É necessário que os materiais mais comumente usados hoje em dia (betão e aço) percam espaço para alternativas sustentáveis que atendam as necessidades da sociedade atual. E esse material é a madeira.

## **2.2. MORFOLOGIA DO MATERIAL, PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS**

A madeira é um dos mais antigos materiais estruturais. Por ser de origem natural, é não-homogêneo e ortotrópico. Isto quer dizer que além de sua resistência mecânica não ser a mesma no sentido longitudinal e no sentido radial, suas propriedades estruturais são variáveis.

Os avanços tecnológicos e conseqüentemente o surgimento de novos produtos em madeira para construção levaram o status desse material a um novo nível. Esses novos produtos potencializam sua utilização e tornam o material muito mais competitivo no mercado.

No momento de especificar o tipo de madeira a ser utilizada, é preciso considerar questões como o teor de umidade, defeitos naturais, estabilidade dimensional e resistência mecânica; e como todos esses fatores se relacionam. O que mais restringe seu uso estrutural são os defeitos naturais, nomeadamente, os nós. Também é importante analisar o ângulo das fibras em relação ao eixo longitudinal e fendas. Esses defeitos influenciam a resistência do material. Logo depois, temos a umidade como fator determinante para possíveis variações dimensionais.

Os principais componentes químicos da madeira são:

**CELULOSE:** Substância sintetizada naturalmente pelas espécies vegetais e compõe as paredes celulares vegetais (Santos, 2016). É isso que confere à madeira a sua capacidade de suportar cargas.

**LIGNINA:** é uma substância que lembra uma cola e tem a função de manter as células unidas entre si. A forma como as células são unidas pela lignina geralmente tomam a direção longitudinal ao tronco. A esse conjunto de células unidas pela lignina damos o nome de fibras da madeira. A direção das fibras paralela ao tronco da árvore ou a direção longitudinal é

chamada de direção paralela ao grão; as direções radial e tangencial são chamadas de direção perpendicular ao grão.

**ÁGUA:** está presente de duas formas na estrutura vegetal. Pode estar nas paredes das células, sendo denominada de água ligada. Ou solta nas cavidades celulares, conhecida como água livre. Quando a madeira sofre processo de secagem, primeiramente perde a água livre e depois a água ligada. Porém é a perda da água ligada responsável pelo encolhimento das peças de madeira após o processo.

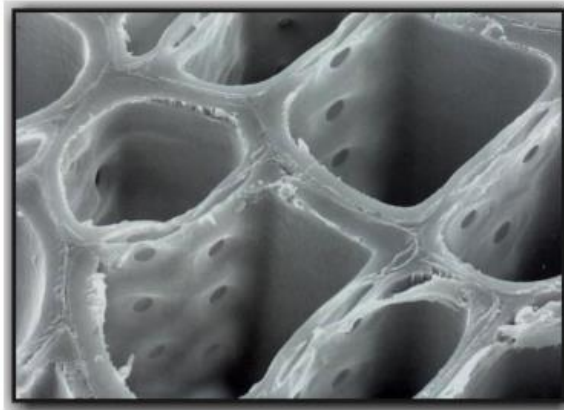


FIGURA 2.2.1: Parede Celular  
FONTE: APSE

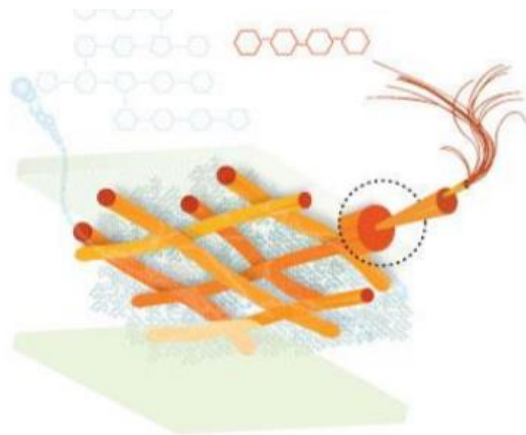


FIGURA 2.2.2: Celulose  
FONTE: APSE

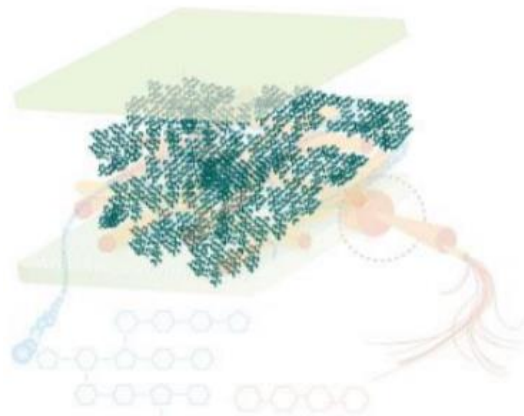


FIGURA 2.2.3: Lignina  
FONTE: APSE

#### Principais classificações de árvores:

**MADEIRA DURA:** Nem sempre indica que são as mais fortes. Levam mais tempo para amadurecer e crescer, são mais densas, mais raras (portanto mais caras) e geralmente vêm dos trópicos. Exemplos: Bordo, Carvalho, Bétula.

**MADEIRA MACIA:** Podem ser mais fortes que as madeiras duras. Desenvolvem-se mais rapidamente e são mais comuns no uso para construção. Exemplos: Abeto, Cicuta, Pinus e Pau-brasil.

A estrutura da madeira é composta da seguinte forma:

**FIBRAS:** conjunto de células unidas pela lignina geralmente no sentido longitudinal ao tronco e determina a resistência da madeira.

**ANÉIS DE CRESCIMENTO:** são anéis concêntricos na sua seção transversal que determinam a idade da árvore.

**ALBURNO OU BORNE:** camada entre a casca e o cerne. De coloração mais clara e menos resistente à deterioração, porém contém células vivas para nutrição da árvore. É mais favorável para uso quando sujeito à pressão.

**CERNE:** camada central da seção transversal. De coloração mais escura, mais antigo e mais resistente à deterioração.

As propriedades da madeira variam muito de acordo com a espécie utilizada, contexto construtivo e ambiental e processo de fabricação. A madeira maciça, por exemplo, é um material complexo e diversificado.

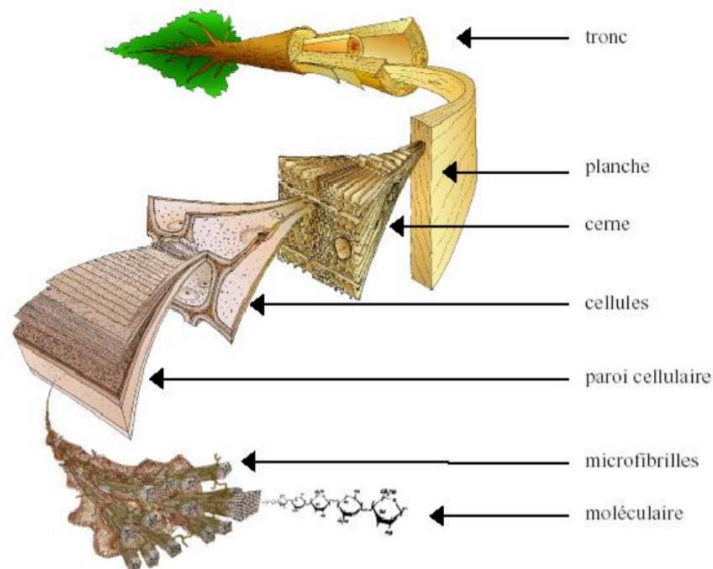


FIGURA 2.2.4: Seção de um tronco de madeira mostrando eixos longitudinal e radial e estrutura microscópica  
FONTE: (Husson, 2009)

### 2.3. PATOLOGIAS

Existe um mito sobre as construções em madeira que leva à crença popular de que estrutura em madeira apodrece. De facto, o processo de biodegradação só acontece se a madeira apresentar troca constante de humidade. Portanto, para que a madeira utilizada numa construção não apodreça, deve-se utilizá-la em um ambiente estável, que mantenha a madeira seca. Madeira seca não apodrece. Além das condições onde essa madeira será aplicada, é necessário utilizar tratamentos com produtos preservativos principalmente contra insetos e fungos.

A humidade é o pior inimigo da madeira. Como já foi citado, a madeira é um material higroscópico. Se a deixarmos sem qualquer camada de recobrimento, a água absorvida evapora

e a madeira seca. Os problemas começam a surgir quando a água fica acumulada. Uma vez que a resistência do material é inversamente proporcional ao seu teor de humidade.

Os problemas causados pelo acúmulo de água nas estruturas de madeira são geralmente de origem de falha humana como erros de projeto e detalhamento. É preciso conhecimento específico para escolher e detalhar corretamente membranas, fachadas e revestimentos, assim como impermeabilização, cuidados com áreas molhadas etc. Manutenção durante a vida útil da edificação e principalmente previsão de escoamento de água e chuva ou em caso de falha de elementos seladores, vazamentos entre outros pequenos acidentes e mau uso.

Apesar da água representar tamanho risco de degradação para uma estrutura de madeira, é perfeitamente possível evitar todos eles através de um projeto bem feito. Dessa forma, a madeira comporta-se como um material extremamente resistente. Além dos recursos de projeto, a madeira engenheirada ainda é tratada contra fungos e insetos xilófagos em autoclave com produtos específicos para cada classe de utilização.

#### ORIGENS DAS PATOLOGIAS:

Na estrutura de madeira existem basicamente três origens de patologias: falhas humanas, falhas naturais por agentes abióticos e por agentes bióticos. É importante destacar que a madeira é um material orgânico e como tal, não é possível aplicá-lo com o mesmo tratamento que betão ou aço. A partir disso, é preciso considerar os defeitos naturais da composição da madeira como os galhos, nós e etc. Além dos defeitos naturais que representam a redução da resistência do material, é preciso identificar sua vulnerabilidade a patologias e suas origens para que seja possível preveni-las. Essas patologias podem variar de acordo com a aplicabilidade da peça. O conhecimento da origem das possíveis patologias de acordo com sua classe de utilização é fundamental para que seja aplicado o tratamento correto e soluções adequadas.

##### **2.3.1. FALHAS HUMANAS**

- Ausência ou falha de projeto arquitetónico ou estrutural;
- Falha de execução;
- Utilização de materiais que não seguem as especificações normativas para uso específico em cada situação como resistência mínima, ausência ou falha de tratamento preventivo;
- Deficiência nas ligações como sub-dimensionamento e baixa resistência;
- Deficiência causada no transporte do material;
- Falta de controle de qualidade;
- Ausência ou falha de manutenção.

##### **2.3.2. CAUSAS NATURAIS**

Por sua vez, podem ser divididas em dois grandes grupos: os agentes bióticos (vivos) e abióticos (não vivos).

2.3.2.1. AGENTES BIÓTICOS: causada por seres vivos como bactérias, fungos, insetos e perfuradores marinhos (crustáceos e moluscos) que causam a decomposição da madeira por apodrecimento do substrato e consequente redução do material que compõe a madeira. Os agentes bióticos necessitam de certas condições ambientais e fonte de alimento para sobreviverem. A umidade é o principal motivo de proliferação de agentes bióticos em peças de madeira. Por si só não prejudica a madeira. Mas após longos períodos de exposição do material, seu teor de umidade aumenta a tal ponto que cria condições favoráveis para o desenvolvimento de agentes bióticos. As condições de temperatura e oxigênio são semelhantes. Por si só não fazem mal a madeira, mas podem criar as circunstâncias favoráveis para sobrevivência, crescimento e desenvolvimento dos agentes biológicos. Retirando as condições favoráveis de qualquer um desses parâmetros, a madeira é preservada do ataque biótico.

**BACTÉRIAS:** São organismos colonizadores de madeira não tratada em ambientes com umidade muito elevada, provocando aumento da permeabilidade e amolecimento da superfície da madeira. A bio deterioração por apodrecimento bacteriano normalmente é um processo lento, mas pode tornar-se grave em situações em que a madeira não tratada fica submersa por longos períodos (Brito, 2014). Muitas espécies têm a capacidade de vencer a barreira criada pelo uso de preservativos e tratamentos para prevenção de outros agentes agressivos que não o são capazes de fazer. Bactérias em desenvolvimento podem atacar o verniz aderido à madeira, em condições imersas ou pulverizadas, podendo causar mudanças visíveis no aspeto do verniz, incluindo perdas de resistência (Brito, 2014). Além disso, uma combinação em contaminações com diferentes tipos de bactérias e associadas com certas espécies de fungos, possuem a capacidade, por exemplo, em acelerar o processo de bio deterioração em vigas de madeira serradas tratadas. As bactérias de bio deterioração podem funcionar como base da cadeia alimentar de grandes colônias bacterianas (Brito, 2014). A sintomatologia são manchas superficiais e amolecimento da madeira. No entanto visualmente é difícil identificar a madeira deteriorada por bactérias de bio deterioração, sem auxílio de ensaios biológicos em laboratório especializado, podendo ser confundido com bio deterioração por ataques de fungos apodrecedores, como será apresentado adiante (Brito, 2014).

As quatro principais consequências desses organismos no ataque à madeira são:

- Causam erosão da madeira com a formação de pequenas cavidades afetando a permeabilidade do material;
- Provocam a perda de resistência do material a ataques de outros organismos;
- Quando combinada à ação de fungos, causam degradação da madeira;

**FUNGOS:** Os fungos são microrganismos vegetais simples que utilizam a madeira como fonte de alimento. Deslocam-se pela estrutura interna da madeira através de cavidades ou penetrando diretamente na parede celular (Brito, 2014). Os fungos segregam as enzimas que degradam a celulose, a hemicelulose e a lignina e absorvem o material degradado para completar seu processo de digestão. Depois de devidamente alimentado, o fungo usa a energia para reprodução através do lançamento de esporos,

que são transportados por insetos, ventos ou outros meios e infetam as peças de madeira próximas e assim sucessivamente em progressão geométrica.

Esses esporos podem permanecer anos na madeira sem infetá-las de forma prejudicial, aguardando por condições favoráveis ao seu desenvolvimento. Entre todas as condições favoráveis, o teor de humidade é o principal responsável pela sua proliferação. A humidade, por sua vez, pode ocorrer de diversas formas, tal como infiltrações através contato com o solo ou por canalizações, mau estado de conservação de coberturas, vedações mal feitas, ventilação e iluminação natural insuficientes e etc.

Os principais tipos de fungos que atacam a madeira são os fungos emboloradores e manchadores. Esses tipos de fungos atacam a madeira antes mesmo de chegarem à fábrica, onde se dá o processo de secagem e industrialização das peças estruturais. Portanto, esses organismos atacam enquanto o teor de humidade está elevado. Não chegam a deteriorar a madeira no que diz respeito a sua resistência, mas afeta sua qualidade estética e a desvaloriza comercialmente. Os ataques de fungos emboloradores costumam ocorrer logo após o abate da árvore, mas também pode ocorrer em peças expostas à humidade por muito tempo, mesmo se tratando de madeira com produtos preservativos. É possível resolver o problema com escovação, lixagem ou aplainamento. Os fungos manchadores já atacam de forma mais profunda, não sendo possível remover a coloração. Além da questão estética, esse tipo de fungo dificulta a impregnação de produtos preservativos por autoclave, pois impermeabiliza as cavidades celulares.

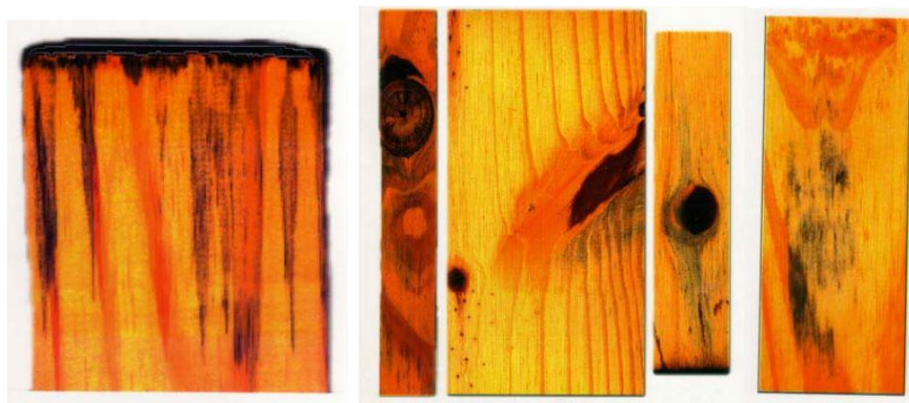


FIGURA 2.3.2.1.1: Peças de madeira atacadas por fungos manchadores com penetração de diferentes formas – Da esquerda para a direita: pelo topo; pelos nós; por contaminação durante a secagem ao ar.

FONTE: Concise Guide for the Identification of Insect Attack and Fungal Decay of Timber

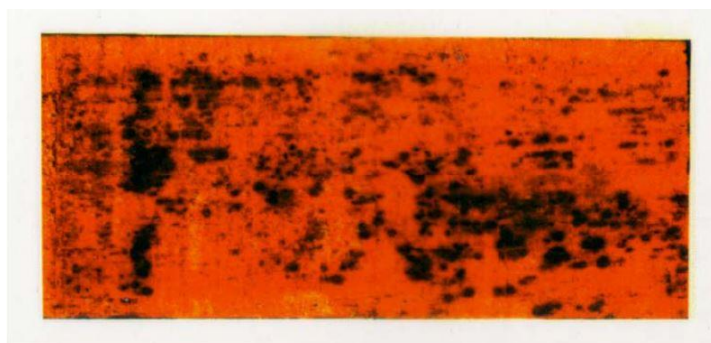


FIGURA 2.3.2.1.2: Peças de madeira atacadas por fungos emboloradores.

FONTE: Concise Guide for the Identification of Insect Attack and Fungal Decay of Timber

Fungos apodrecedores desenvolvem-se quando a madeira serve de alimento para o organismo que ataca, presença de oxigênio, alta umidade relativa do ar e temperatura elevada. Essas condições são bastante presentes nas regiões tropicais e subtropicais. Como foi dito anteriormente, o projeto arquitetônico bem feito pode evitar que as patologias se instalem nas peças de madeira com detalhamento de cobertura e vedações e escolhas adequadas de material são exemplos de definições de projeto que trazem grandes vantagens para a durabilidade da estrutura.

Existem três tipos de fungos apodrecedores. Abaixo segue as suas classificações:

- Fungos de podridão parda ou cúbica produzem “lesões” na madeira de cor parda ou acastanhada. Em estágios mais avançados de deterioração, quando a madeira se encontra bastante desidratada, apresenta uma retração anormal formada por fendas paralelas e perpendiculares às fibras da madeira e consistência quebradiça, semelhante à superfície de uma madeira carbonizada. Esses fungos causam perdas de resistência substanciais na madeira já nas fases iniciais de decomposição, apesar não serem ainda visíveis. A gravidade do dano não é fácil de quantificar. Quando identificadas pela aparição do fungo em sua superfície ou pela acentuada perda de resistência à objetos cortantes e penetrantes, é sinal de que a peça já está condenada.



FIGURA 2.3.2.1.3: as regiões atacadas por fungos de podridão parda apresentam essa camada com fendas quebradiças cúbicas que se desmancham em pequenos fragmentos e até pó com muita facilidade mesmo ao toque manual.

FONTE: Concise Guide to the Identification of Insect attack and Fungal decay of Timber

- Fungos de podridão branca ou fibrosa geralmente não apresentam processo de retração. Mas a madeira perde seu aspeto lustroso e sua cor natural, apresentando um aspeto mais esbranquiçado ou castanho ou até mesmo com listras escuras entre as fibras. Mesmo em estágios avançados de bio deterioração, a madeira não apresenta fendas, mas uma textura distintamente mais macia e consistência esponjosa. Esses fungos são bastante agressivos e degradam todos os componentes estruturais da madeira incluindo a celulose e lignina, principalmente nas paredes celulares, o que resulta na perda de resistência significativa do material (Moreschi, 2013).



FIGURA 2.3.2.1.4: Fungo de podridão branca

FONTE: Concise Guide to the Identification of Insect attack and Fungal Decay of Timber



FIGURA 2.3.2.1.5: Fungo de podridão fibrosa

- Fungos de podridão mole atacam superficialmente a camada externa da madeira, penetrando em torno de 20mm de profundidade. Entretanto, a parte mais profunda não atacada acaba ficando exposta a outros organismos mais agressivos. Os ataques ocorrem em peças submetidas a umidade constante ou com muita alternância de umidade, quando a madeira sofre muitas molhagens e secagens consecutivas.

Quando húmidas, as peças de madeira com esse tipo de fungo, apresenta uma superfície amolecida. Ao secar, essa superfície escurece e tende a apresentar pequenas fissuras paralelas e perpendiculares às fibras da madeira. Essas fissuras assemelham-se aos casos de bio deterioração por fungos de podridão parda, mas se diferenciam por terem dimensões menores. Os níveis de deterioração podem ser classificados em três etapas (Moreschi, 2013).

- Inicial, quando ocorre o avanço da infestação. É muito difícil de detectar, pois não há sinais visíveis.
- Intermediário: quando a madeira começa a ficar mole, às vezes com descoloração, mas sem grandes perdas de resistência da madeira.
- Avançado: a madeira praticamente perde a capacidade resistente e fica visivelmente evidente devido à aparição de vazios no material



FIGURA 2.3.2.1.6: Características de madeiras atacadas por fungos de podridão mole: Tábua usada como moldura de canteiro.

FONTE: Biodegradação e Preservação da Madeira, UFPR

**INSETOS:** Os principais insetos xilófagos que atacam a madeira são os cupins (ou térmitas). Ainda existem diversas outras espécies como as brocas marinhas, mas estas atacam apenas estruturas submersas.

Para identificar a bio deterioração da madeira, existe uma grande chance do inseto que deteriorou ser identificado pelos danos aparentes, pelo estado fisiológico ou condições em que o material se encontrava no momento do ataque, e pela constituição física e química do material atacado (Moreschi, 2013).

Em regiões tropicais, algumas espécies de insetos como besouros (Coleópteros) são responsáveis por danos bastante comprometedores em madeiras secas ou recém cortadas. Para combater esse tipo de praga é preciso tratamento de prevenção de ataque. Se a madeira já tiver sido atacada, provavelmente será identificado após o estrago já estar feito. A única solução nesse caso é substituição da peça.



FIGURA 2.3.2.1.7: Aspeto da madeira atacada por inseto Coleóptero

FONTE: Biodegradação e Preservação da Madeira, UFPR

Formigas (himenópteras) também podem causar danos à madeira com a abertura de “túneis” internos não visíveis externamente. Mesmo madeiras tratadas podem ser atacadas por esse tipo de inseto, pois a madeira não serve de alimento. Para prevenção é preciso evitar o aumento do teor de umidade da peça, limpeza do terreno para evitar infestação ou uso de inseticidas.

Mas os insetos que realmente representam riscos são as térmitas, ou cupins (isópteros). Se alimentam de celulose e atacam a madeira deteriorando tanto o lenho mais mole quanto o lenho duro da madeira. Têm origem nas regiões tropicais e subtropicais, mas são comumente transportados através de madeira contaminada para outras regiões.

Os cupins se desenvolvem em ambientes húmidos e com fonte de alimento. Por isso o detalhamento de estruturas bem ventiladas são fundamentais para manter a madeira seca e evitar sua proliferação em caso de ataque.

Quando o ataque acontece, é possível identificá-lo devido à observação de resíduo em pó da madeira e sai da peça. Internamente são cavados túneis em diversos sentidos, comprometendo sua resistência.

Para prevenir esses ataques, é preciso evitar a atração por fonte de alimento no local de utilização e implantação da estrutura, manter o ambiente seco e tratá-lo com veneno.

No caso de infestação, o combate deve ser feito no próprio solo, no caso de cupins subterrâneos ou fumigação de gases como monóxido de carbono no caso dos cupins de madeira seca. Em qualquer um dos casos, é recomendado a troca das peças atingidas por peças tratadas ou com resistência natural (Moreschi, 2013).

BROCAS MARINHAS existem em qualquer lugar do mundo onde a temperatura da água é elevada. Pode ser considerada broca marinha o conjunto de agentes marinhos de diversas espécies. Por este motivo, o tipo de dano e o resultado visual que possibilita sua identificação são também variáveis. As espécies mais comuns são pequenos crustáceos (limnórias) ou moluscos (teredos). Qualquer um desses agentes causam danos bastante graves para a estrutura e a melhor forma de evitá-los é o uso de proteção física como chapas metálicas ou capas de cimento ou fibra de vidro (Moreschi, 2013).

**2.3.2.2. AGENTES ABIÓTICOS:** são agentes naturais não vivos que causam danos através de ações físicas (danos mecânicos), químicas (corrosão, combustão), atmosféricas e meteorológicas (umidade, chuvas, ventos, raios).

**2.3.2.3. CONSERVAÇÃO E PROTEÇÃO DA MADEIRA:** A durabilidade da madeira pode ser comprometida por uma variedade de elementos e agentes externos, como vimos nos subcapítulos anteriores, colocando em risco a estabilidade da construção. Tendo conhecimento desses elementos, uma série de fatores e tratamentos devem ser levados em consideração. O

conhecimento das causas da deterioração é fundamental não só para a solução do problema, mas também para garantir uma manutenção que evite o reaparecimento de problemas semelhantes no futuro.

Os tratamentos contra os agentes bióticos devem ser de ação prolongada. São preservativos químicos que podem ser aplicados com pincel, por aspersão, pulverização, imersão, banho quente-frio, substituição de seiva e autoclave.

As peças de madeira somente perderão a durabilidade caso não sejam bem protegidas da humidade. Para evitar esse cenário, é necessário um afastamento da estrutura em relação ao solo, mantendo-a isolada. Mesmo na junção de peças de diferentes materiais é necessário o uso de uma membrana de proteção. Em locais com maior teor de humidade é fundamental permitir, através de ferramentas de projeto, que ela possa secar e voltar a um estado aceitável. Se a prevenção dessas ocorrências for bem planejada, a madeira pode durar séculos.

O risco de ataque de insetos varia de acordo com a geografia, necessitando ser considerado em regiões quentes e húmidas e as soluções pertinentes são abordadas pelos conselhos nacionais locais, que definem quais produtos são permitidos, especialmente os produtos tóxicos e como manipulá-los. Para lidar com esse tipo de praga é preciso basicamente manter o ambiente seco; aplicar termicidas químicos ao solo; usar sistema de iscagem para eliminar as colônias; usar barreira física como sapatas isolantes de betão, malhas de arame finas ou de plástico tratadas com termicidas ou até uma trincheira de brita miúda para separar a madeira da terra.

Da mesma forma, a melhor maneira de evitar ataques de fungos na madeira é mantê-la seca. Portanto, não é difícil garantir uma vida útil indefinidamente longa para a grande maioria dos edifícios em madeira onde a madeira estrutural é interna. A madeira interna pode ser protegida da chuva e do risco de infiltrações ou condensação excessiva novamente através de decisões de base de projeto, detalhamento e execução de qualidade, como já visto no capítulo 1.

Madeira utilizada externamente está mais exposta a riscos e tem expectativa de vida útil de acordo com a região de implantação, espécie da madeira, tratamento utilizado, detalhamento de projeto e manutenção. Revestimentos de fachada e sistemas de sombreamento externo são alguns exemplos dessa categoria e podem precisar ser substituídos durante a vida útil da estrutura.

#### **2.4. SISTEMA DE PRODUÇÃO DA MADEIRA COMO MATERIAL DE CONSTRUÇÃO**

O processo de produção da madeira como material de construção tem início com a entrega da matéria prima em bruto na fábrica. De forma resumida, o processo decorre da seguinte forma: Os troncos são cortados e transportados. Passam por uma análise e seleção automática das espécies de árvore e de corte inicial. Em função da classificação, os troncos são então separados e conduzidos para a fase de serração, onde são retiradas a casca e os galhos. Logo após os troncos são introduzidos numa primeira máquina de corte longitudinal, que são mais uma vez separados e ordenados para operações posteriores. Tanto nesta como nas restantes fases, todos os subprodutos, como aparas de madeira e cascas são conduzidas para processos de reciclagem ou produção de subprodutos de madeira compostos por esses materiais. Depois do corte os elementos de madeira vão para a secagem, estabilizando o teor

de humidade e então conduzidos para o aplainamento e acabamento final. Finalmente as peças de madeira são embaladas e distribuídas.

No que se refere aos subprodutos de madeira citados, temos como exemplos bastante utilizados na construção civil as placas de derivados de madeira como contraplacados, aglomerados de fibras ou de partículas.

Para utilização em construções relacionadas ao tema dessa tese, os produtos em madeira são conhecidos como madeira maciça reconstituída ou madeira engenheirada, como a madeira lamelada colada (LVL), que são dedicados aos elementos estruturais pois permitem a produção de peças de grandes dimensões. Rompendo assim a barreira da limitação dimensional imposta não só pela crescente necessidade de proteção às florestas, como também limitações naturais de crescimento das árvores (Cruz, et al., 2015).

Sua produção exige muita técnica e precisão. Portanto as fábricas devem seguir rigoroso controle de qualidade conforme regulamentação local. Os aspetos regulamentares que se aplicam à madeira maciça, se aplicam também à LVL como a higroscopicidade, durabilidade, comportamento ao fogo, ação da humidade e do tempo de atuação das cargas (Cruz, et al., 2015).

No momento que a madeira atinge condições de atender às exigências técnicas e construtivas, ela adquire o reconhecimento como material de construção. O processo produtivo atualmente permite anular as desvantagens clássicas da madeira em seu estado natural, como a degradação de suas propriedades devido às alterações de humidade através do processo de secagem; deterioração por patologias típicas através de tratamentos com preservativos; heterogeneidade e limitação de dimensões através dos processos de laminação.

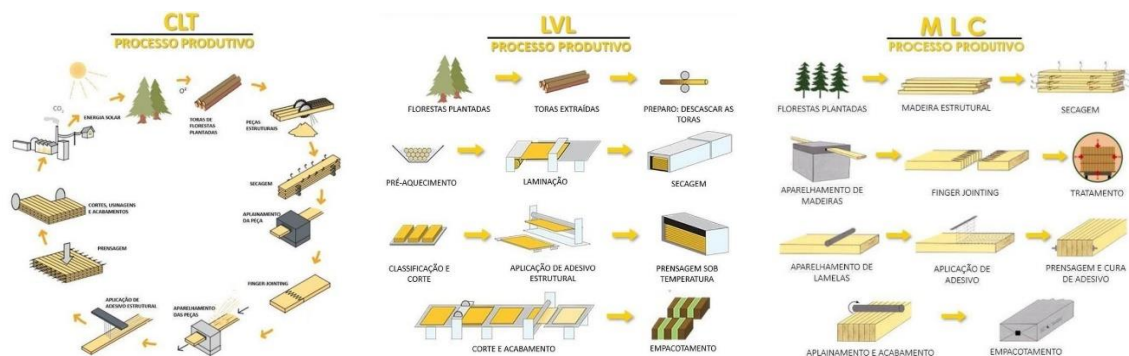


FIGURA 2.4.1: Esquema ilustrativo dos processos produtivos do CLT, LVL e MLC (Glulam)  
 FONTE: (Madeira Engenheirada, 2020)

**CORTE:** Deve ser feito em época apropriada, o que não influencia sobre a resistência da madeira, mas sim na sua durabilidade. Uma secagem mais lenta evita rachaduras e fendas e ausência de seiva elaborada a torna menos atrativa ao ataque de insetos. Portanto, o inverno tende a ser um período favorável para o abate. Entretanto, isso depende sempre da localização geográfica de onde essa madeira é extraída (Cruz, 2001).

**TORAGEM:** os galhos são removidos do tronco e fracionada em toras para facilitar o transporte. Nessa etapa também é comum serem descascadas ou falquejadas.

**DESDOBRO:** Na fábrica, os troncos são inseridos numa máquina de serra que os fatiam em lâminas com espessuras acima de 7cm. Existem 3 tipos de desdobro: o normal, com cortes feitos longitudinalmente aos anéis de crescimento; o radial, com cortes feitos ortogonalmente

aos anéis de crescimento; e o misto, que exige grande controle no processo. O desdobramento radial é o que produz peças de melhor qualidade por apresentar menor contração no processo de secagem e, portanto, menos rachaduras e fendas. Apresenta maior homogeneidade na superfície e consequentemente resistência uniforme ao longo da peça. Porém, os custos são elevados devido ao volume de perda de material sendo mais indicado na produção de peças especiais como da construção aeronáutica e mobiliário decorativo, quando o custo do material é reduzido em relação ao custo do produto final. Para a produção de peças estruturais, o desdobramento mais utilizado é o de corte normal, pois mantém a fibra inteira e conservando suas propriedades de resistência, além de possibilitar um maior aproveitamento da tora e redução de custos (Cruz, 2001).

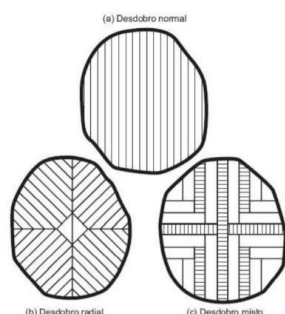


FIGURA 2.4.2: Desdobro normal (acima), desdobro radial (abaixo à esquerda), desdobro misto (abaixo à direita)

FONTE: Madeira como Material de Construção - IES

**APARELHAMENTO:** é a serragem final de acabamento, podendo ainda ser aplainada para atingir formas e dimensões específicas (Cruz, et al., 2015).

**TRATAMENTOS:** Devem ser feitos durante o processo de produção se a madeira não apresentar propriedades de resistência naturais adequadas à classe de risco a qual será submetida. Os tratamentos mais comuns são:

**SECAGEM:** processo utilizado para extrair a umidade natural da madeira e assim atingir o teor exigido para a classe de utilização que será atribuído às peças. O processo de secagem diminui o peso do material; confere estabilidade minimizando a retração; aumenta a resistência de forma progressiva; aumenta a eficiência de tratamentos preservativos posteriores e possibilita o bom acabamento com pintura ou envernizamento de proteção (Cruz, 2001).

**TRATAMENTOS PRESERVATIVOS:** São feitos com substâncias químicas que envenenam os nutrientes celulares da madeira e matam os organismos que se alimentam dela, tornando a peça resistente a ataques e desenvolvimento de agentes bióticos patológicos. Essas substâncias não podem ser agressivas em relação a seres humanos e demais seres e elementos do meio ambiente; devem ter ação prolongada, isto é, não podem ser eliminadas do material por decomposição, evaporação, lixiviação, etc... Não pode também serem corrosivas nem alterar as propriedades físicas e mecânicas da madeira (Cruz, 2001).

O processo de aplicação dos produtos pode ser feito por aplicação com pincel ou autoclave. O autoclave é uma câmara que retira todo o ar do interior das células por vácuo e sob alta pressão a peça é submetida à imersão na solução de tratamento até sua saturação.

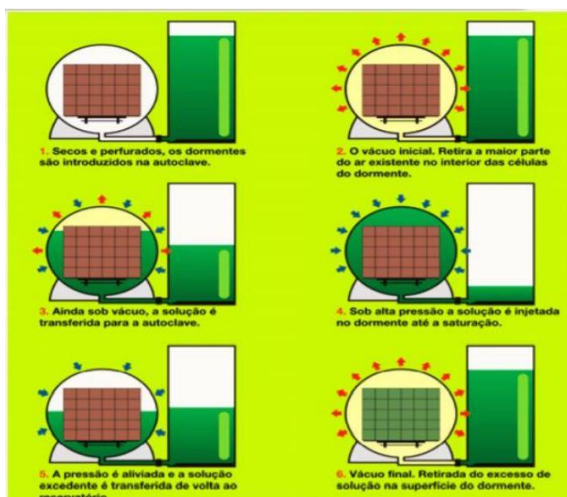


FIGURA 2.4.3: Ilustração esquemática da sequência (da esquerda para a direita) do processo de tratamento da madeira em autoclave: 1. Peças secas dentro do autoclave; 2. Vácuo retira a maior parte de ar nas células; 3. Ainda no vácuo, solução é introduzida na câmara; 4. Sob alta pressão a solução penetra na madeira até a saturação; 5. A pressão é aliviada e a solução excedente retorna ao reservatório; 6. Vácuo final para retirada de excesso de solução na superfície da madeira.

FONTE: Madeira Como Material de Construção - IESP

## 2.5. UTILIZAÇÃO

É de conhecimento da comunidade científica que a madeira tem qualidades superiores dentre à maioria dos materiais, quando utilizados em estruturas adequadamente projetadas, concebidas e associadas às manutenções periódicas e preventivas, no entanto, quando utilizadas em ambientes com certo nível de agressividade ambiental, natural ou artificial, deve ser preservada e protegida para garantir um desempenho adequado (Ritter, et al., 1990).

Falando em madeira estrutural, é correto afirmar que a madeira é durável. Dependendo da agressividade do ambiente a ser utilizada, a madeira pode ser tratada em autoclave conferindo ao material uma durabilidade de cerca de 30 anos (Brito, 2014).

Somado a isso, avanços tecnológicos têm permitido o retorno da madeira à indústria da construção. Esses novos produtos permitem que as estruturas atinjam novas alturas assim como vãos maiores também (Brito, 2014). São fabricados sob controle de qualidade exigentes: controles computadorizados, máquinas de corte de alta precisão que produzem peças nas medidas exatas do projeto. Esse nível de precisão minimiza a manipulação em obra durante a construção, reduzindo assim o desperdício (Brito, 2014).

Quando essas tolerâncias mínimas são combinadas com um projeto bem desenvolvido, boa compatibilização e detalhado planejamento de obra, atinge-se o máximo da eficiência. Pré-fabricação e montagem de componentes em grandes construções reduzem imensamente o tempo e mão de obra necessários no local da obra. Essa redução pode chegar, aproximadamente, a 20% no cronograma e 2% nos custos quando comparado a métodos tradicionais (Brito, 2014).

Os principais produtos em madeira utilizados em edificações em altura são os seguintes:

- MADEIRA ESTRUTURAL COLADA: colagem de uma série de peças em madeira maciça em menor comprimento. Podem ser utilizados para substituir a madeira

maciça em qualquer situação, evitando, entretanto, saturação por água (Almeida, 2009).



FIGURA 2.5.1: Madeira Estrutural colada  
FONTE: Bernardino-mendes.pt

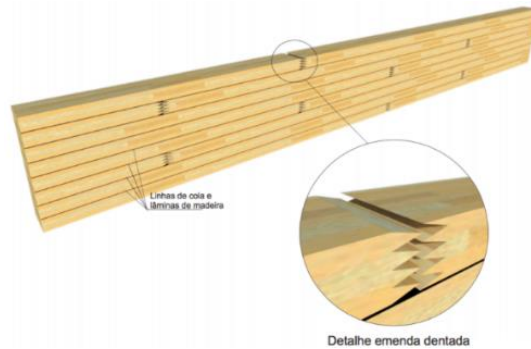


FIGURA 2.5.2: Esquema de colagem da madeira estrutural  
FONTE: madeiralaminadacolada.com

- **MADEIRA LAMELADA COLADA (Glulam):** São formadas pela colagem de face e de topo de réguas de madeira maciça para formar uma viga de maior altura. Por ter seus defeitos naturais redistribuídos a cada lamela, sua resistência torna-se maior que da madeira maciça.<sup>1</sup> Por serem produzidas em camadas, é possível criar elementos curvos, tornando esse tipo de produto muito visado por arquitetos. Além disso, as lamelas externas são feitas de madeira de maior resistência e as internas de menor resistência e conseqüentemente mais leves, reduzindo assim o peso final da peça, tornando-se muito apreciada por engenheiros estruturais também (Brito, 2014).

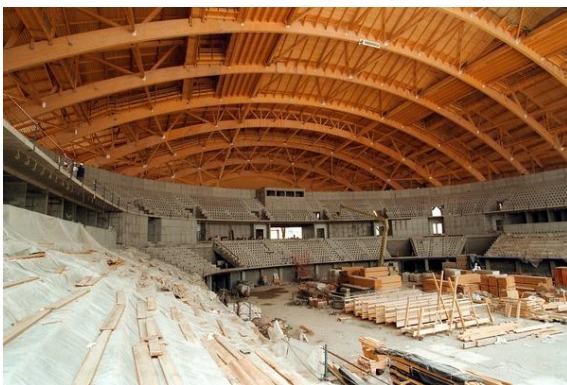


FIGURA 2.5.3: Imagem da obra do Pavilhão Atlântico (Altice Arena)  
FONTE: www.tsf.pt

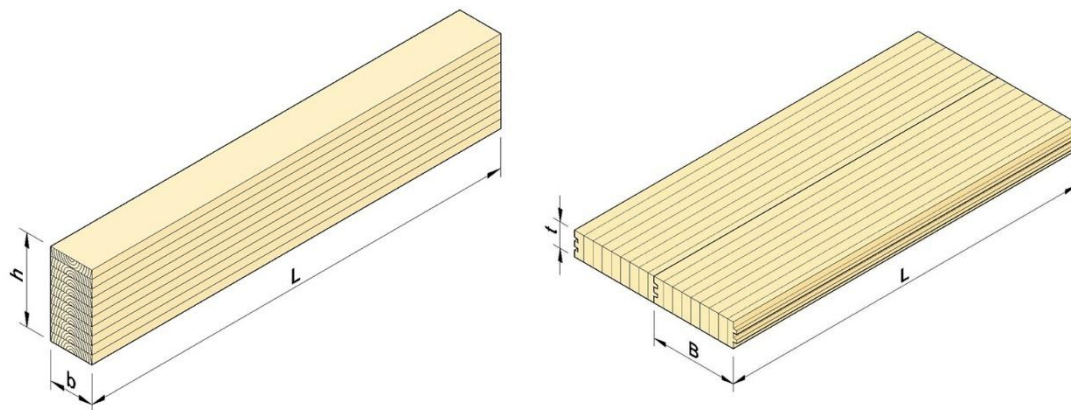


FIGURA 2.5.4: A colagem das peças em Glulam com fibras sempre no mesmo sentido  
 FONTE: (Archdaily, 2020)

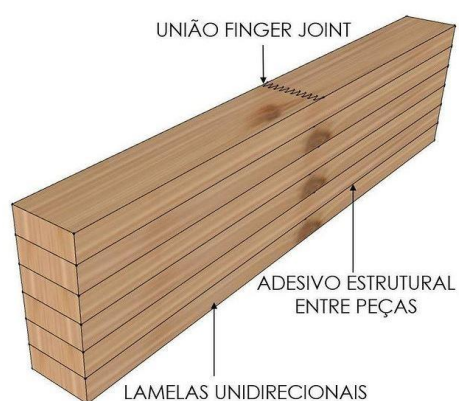


FIGURA 2.5.5: Colagem das lamelas com uso de *finger joints* para aumentar a superfície de contato e garantir resistência estrutural  
 FONTE: (Madeira Engenheirada, 2020)

- **PAINÉIS LAMELADOS:** Assim como as vigas lameladas, os painéis também são compostos por camadas sobrepostas de régua de madeira maciça. As duas formas mais comuns são os painéis pregados e os colados. São muito utilizados em construções pré-fabricadas como peças que compõem paredes, pavimentos e coberturas (Almeida, 2009).



FIGURA 2.5.6: Painel Lamelado Colado  
 FONTE: Archproducts.com

- **PRANCHAS, TÁBUAS E RÉGUAS:** São peças de seção retangular de diversas dimensões e funções que servem para construção de forros de fachadas, tetos e pavimentos entre outras aplicações (Almeida, 2009).



FIGURA 2.5.7: Pranchas, tábuas e réguas  
FONTE: blogpraconstruir.com

- **PAINÉIS FOLHEADOS:** Painel construído em três camadas, sendo a camada interior mais espessa que as externas e são fixadas entre si por colagem. Geralmente as camadas finas e externas são feitas de um tipo de madeira mais nobre para ser usado como acabamento ou para fabricação de mobiliário (Almeida, 2009).
- **CONTRAPLACADO:** São folhas de madeira coladas com suas fibras sempre em sentido perpendicular entre si, conferindo resistência rigidez e estabilidade dimensional. Como nos painéis folhados, as camadas interiores têm qualidade inferior às exteriores e podem ser utilizados em elementos estruturais como *shear walls* em paredes e diafragmas em pavimentos e coberturas (Almeida, 2009).



FIGURA 2.5.8: Contraplacado  
FONTE: Artimol.pt

- **LVL (*Laminated Veneer Lumber*):** Na tradução livre, Madeira em Lâmina folhada. Geralmente utilizado na produção de elementos lineares como vigas, vigotas e camadas de tração e compressão em vigas lameladas coladas (Almeida, 2009).



FIGURA 2.5.9: Painel em LVL  
FONTE: ArchiExpo



FIGURA 2.5.10: Esquema de colagem de peça em LVL  
FONTE: (Madeira Engenheirada, 2020)

- OSB (*Oriented Strand Board*): São fabricados a partir de pequenas plaquetas de madeira que vão mudando de direção. Tem utilização estrutural e aplicações idênticas ao contraplacado (Almeida, 2009).



FIGURA 2.5.11: OSB  
FONTE: topeca.pt

- AGLOMERADO DE FIBRA DE MADEIRA: São placas feitas a partir dos restos da produção dos outros produtos. Podem apresentar diferentes densidades conforme os aditivos e compressão utilizados na sua produção. Os painéis de baixa densidade são utilizados na composição de pavimentos, paredes e coberturas como elemento acústico. O mais conhecido e utilizado é o MDF (*medium density fireboard*) e tem sua aplicação predominante em interiores (Almeida, 2009).



FIGURA 2.5.12: MDF  
FONTE: londongraphics.co.uk

- ISOLAMENTO DE ORIGEM VEGETAL: Produzido a partir das aparas da madeira com aglomerante cimentício, é utilizado como isolante térmico em pavimentos, paredes e tetos (Almeida, 2009).



FIGURA 2.5.13: Isolamento de origem vegetal  
FONTE: ArchiExpo

### 3. SISTEMAS CONSTRUTIVOS EM MADEIRA

As construções de madeira contemporâneas podem ser divididas em três grupos: construção em sistema de pilar e viga, sistema aligeirado (*light framing*) e madeira maciça.

#### 3.1. PILAR E VIGA

Pilar e viga é o sistema construtivo de maior utilização ao longo da história (Almeida, 2009). Trata-se de pilares e vigas de madeira que funcionam como pórtico, e o contraventamento é feito nas paredes e pavimentos. O que caracteriza uma execução simples e econômica, já que se utiliza de poucos elementos. Não é necessária uma quantidade expressiva de madeira nem tecnologia avançada para sua montagem.

São estruturas que atendem muito bem a edifícios com grandes vãos, como pavilhões (Almeida, 2009). Apresentam grande flexibilidade formal pois a estrutura é independente das vedações, que podem ser de diversos materiais, mas geralmente apresentam-se em alvenaria. Em contraponto à flexibilidade formal, temos uma grande limitação construtiva no que se refere a execução de instalações, que são “bloqueadas” pelas peças estruturais.

Com a adoção do betão como material de construção em larga escala ao final do século XIX e início do século XX, esse sistema caiu em desuso. Entretanto, nesse princípio de século XXI, com o avanço da tecnologia da construção em madeira lamelada, esse sistema foi repensado e vêm sendo implantado novamente adaptado às novas técnicas. Um exemplo disso são as tradicionais empresas de *log home* americanas que vêm desenvolvendo esse tipo de solução como uma alternativa mais econômica (Mello, 2007).



FIGURA 3.1.1: Log Homes  
FONTE: gettyimages.com

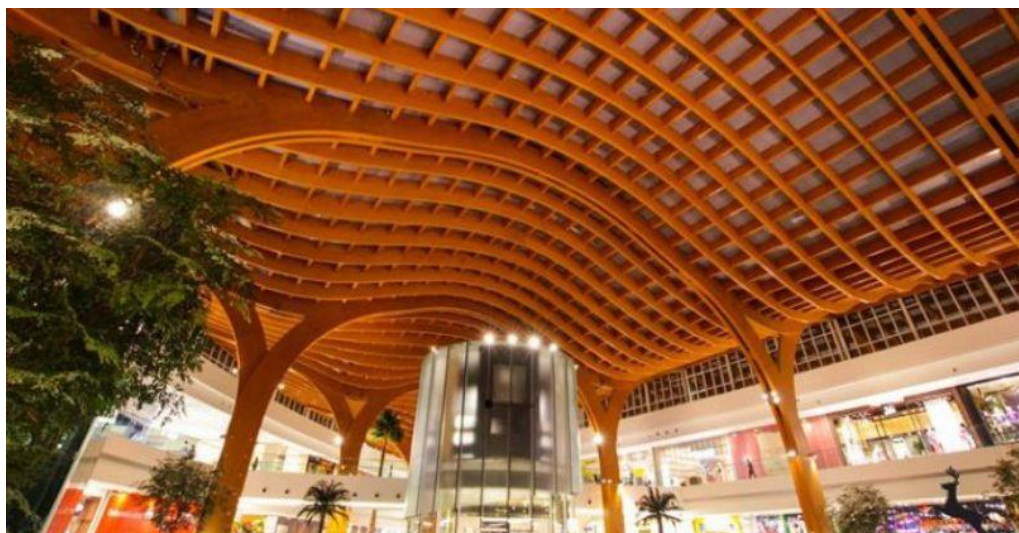


FIGURA 3.1.2: Shopping Iguatemi Fortaleza – Brasil  
 FONTE: matanativa.com

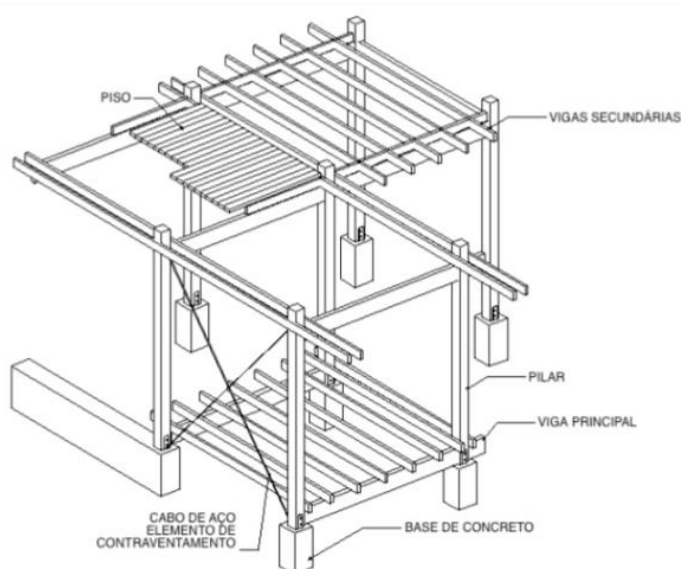


FIGURA 3.1.3: Esquema técnico do sistema Pilar e Viga  
 FONTE: (Tavares, et al., 2017)

### 3.2. SISTEMA ALIGEIRADO (*LIGHT FRAMING*)

O sistema aligeirado surgiu nos EUA a partir do desenvolvimento de sistemas entramados tradicionais de origem europeia levados pelos colonizadores (*Braced Framing*), sistema portante de armação de grandes dimensões que exigem a utilização de tirantes nos cunhais e abertura nas paredes para contraventamento. A necessidade de construir com maior velocidade e de forma mais econômica levou ao aparecimento do sistema com estrutura aligeirada de armação em balão (*Balloon Framing*). É uma evolução do sistema pilar e viga. É quando acontece a substituição de peças robustas por peças leves e padronizadas. Os elementos verticais tornam-se menores em seção transversal e passam a ser menos espaçados, conseqüentemente. As ligações entre os elementos passam por mudanças também, sendo agora apenas necessários pregos em vez de entalhes (Almeida, 2009).

Entretanto, as peças verticais eram inteiras da altura da edificação, que transmitiam os esforços diretamente ao solo. Quando a construção apresentava mais de um pavimento, essas peças tornavam-se demasiadamente longas e dificultava tanto o transporte como a sua manipulação em obra. Além, é claro, de dificultar a rigidez do sistema. Esse sistema caiu em desuso por diversas questões de ineficiência como o seu desempenho estrutural, proteção contra incêndio, transporte e manuseio. Para o substituir, surgiu o *Modern Braced Framing*, que juntou o melhor do *Braced Framing* com o *Balloon Framing* (Almeida, 2009). Os prumos passam a ter altura de apenas um pavimento, mas mantem as dimensões de seção transversal e espaçamentos do *balloon framing*. Os entalhes nas ligações também foram mantidos minimamente e os forros de parede e pavimento na diagonal contribuíram para melhorar o contraventamento (Almeida, 2009). É sistema que marcou o princípio da pré-fabricação de casas de madeira na América do Norte, culminando no sistema *platform* (Mello, 2007).

Finalmente, a evolução desse sistema culmina no sistema aligeirado (*Platform Light Framing*). Com o desenvolvimento tecnológico das técnicas construtivas citadas anteriormente, hoje, as evoluções do *braced framing* estão entre as mais avançadas soluções construtivas. A principal modificação dessa evolução é a interrupção dos elementos verticais por elementos horizontais, permitindo melhor interligação entre pavimentos e paredes, aumentando a resistência horizontal (Almeida, 2009). Esse sistema tem como principal característica a execução do piso como uma plataforma, sobre o qual são montados os prumos das paredes, que por sua vez receberão a plataforma do piso superior. As conexões são feitas através de pregos e elementos metálicos. A plataforma inicial ou *basement* é feita de betão ou pedra diretamente assentada no solo (Mello, 2007). Baseia-se, assim como sua versão anterior, em elementos construtivos com seção transversal de dimensões reduzidas e leves, dispensando necessidade de maquinários específico para mobilidade das peças de madeira. Utiliza, na maior parte das vezes, força estritamente humana (Almeida, 2009).

A versatilidade do *platform framing* está no grau de industrialização que o sistema permite como a fabricação de módulos inteiros dentro de uma fábrica para serem transportados prontos até o local de implantação. É possível subir a construção em até seis pavimentos, porém, como veremos adiante, ainda existem outras tecnologias em madeira para cumprir essas metas. O sistema *platform light framing* é predominantemente utilizado nas construções residenciais unifamiliares (Mello, 2007).



FIGURA 3.2.1: Estrutura de uma residência unifamiliar com sistema *light framing*  
FONTE: [gettyimages.com](http://gettyimages.com)

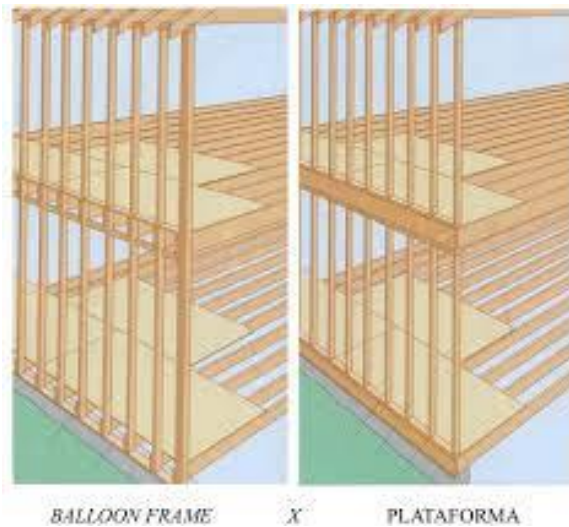


FIGURA 3.2.2: Evolução do sistema *Balloon Framing* (esquerda) e *Platform Framing* (direita) FONTE: Universidade Federal do Paraná



FIGURA 3.2.3: Estrutura de uma residência unifamiliar com sistema *light framing* FONTE: Pinterest

### 3.3. MADEIRA MACIÇA:

O sistema construtivo por empilhamento é o mais antigo dos tipos de construção em madeira utilizados atualmente. Esse sistema clássico sobrepõem os troncos horizontalmente, ou verticalmente apesar de ser muito menos frequente. Esse sistema é predominantemente presente no norte da Europa em construções residenciais unifamiliares (Almeida, 2009).



FIGURA 3.3.1: Casa estilo alpina - FONTE: Pinterest



FIGURA 3.3.2: Casas típicas da tundra sueca  
FONTE: Getty Images

A estabilidade entre os troncos é feita por samblagem e ligações macho-fêmea (Almeida, 2009). Sua principal característica é ser um sistema portante, o que resulta em edificações muito rígidas com grande isolamento térmico, porém com alto consumo de madeira. O desenvolvimento desse tipo de construção ao longo dos anos chegou até as *log homes* atuais, que têm um mercado bastante diversificado nos Estados Unidos e Canadá, principalmente em habitações de alto luxo (Mello, 2007).



FIGURAS 3.3.3: Sistema de encaixe  
FONTE: Rusticasa

Em regiões em que não há tanta abundância de florestas de coníferas (tipo de madeira utilizada para a construção por empilhamento) desenvolveu-se a necessidade de construir utilizando menos quantidade de madeira. Somando-se a isso, o desenvolvimento tecnológico permite o constante aumento de oferta de técnicas e materiais derivados da madeira. Nesse panorama, o sistema com painel de madeira maciça lamelada torna-se cada vez mais utilizado por sua versatilidade e possibilidades.

Nesse sistema, as paredes servem de apoio para o piso superior ou cobertura. O lado exterior da parede recebe revestimento próprio e o interior pode ficar direto no painel. Por ser um sistema de pré-fabricação, a infraestrutura pode vir já posicionada de fábrica dentro das paredes e exigem recobrimento interior (Almeida, 2009).

Esse sistema se caracteriza principalmente pelas paredes em multicamadas, com um núcleo de madeira maciça revestida de ambos os lados por régua de madeira dispostas na horizontal, na vertical e na diagonal alternadamente. A fixação é feita por buchas de madeira que atravessam todas as camadas desde o núcleo até a mais externa. As lajes podem ser em sistema maciço como as paredes ou em pavimento aligeirado (Almeida, 2009).

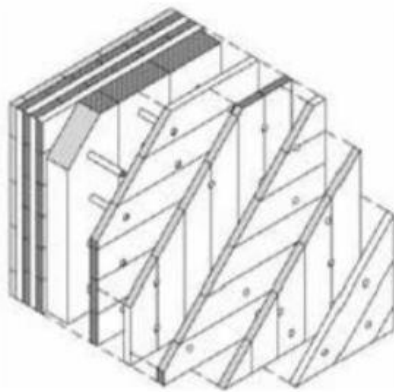


FIGURA 3.3.4: Esquema de parede multicamadas  
 FONTE: Almeida, 2009

### 3.4. CONEXÕES PARA ELEMENTOS EM MADEIRA

**SAMBLAGEM:** É a mais antiga forma de conexão entre elementos de madeira. Trata-se de entalhes feitos nas peças para que encaixem entre si. Inicialmente surgiu como algo bastante rudimentar, limitado à transmissão de esforços pelo simples contato direto entre as peças nas faces dos entalhes. Devido à necessidade de conectar peças em estruturas maiores, mais complexas e de dimensões menores, os entalhes tiveram de ser mais elaborados e precisos, utilizando cavilhas que permitiram acomodar mais facilmente esforços de tração.

O aligeiramento e surgimento de elementos metálicos como pregos fizeram com que a samblagem desaparecesse dos sistemas utilizados atualmente, pois exige mão de obra específica e não é aplicável a elementos com dimensões reduzidas como os utilizados nos sistemas atuais.

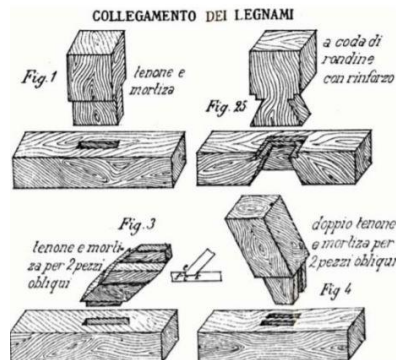


FIGURA 3.4.1: Ligações tradicionais  
 Fonte: Cenci, 1987

**COLAGEM:** Os primeiros registos de conexão de peças de madeira por colagem são restritos a elementos pequenos em relação a peças usadas na construção civil, como mobiliário e instrumentos musicais. Mais tarde passou a ser também utilizada em conjunto com o processo de samblagem em peças estruturais de madeira (Almeida, 2009). Em peças dentadas com grande seção transversal, também se utiliza cola como ligação. Mas a principal aplicação da cola atualmente é na produção de painéis de madeira como na madeira lamelada colada ou CLT.

A colagem tornou-se a conexão primária no processo de evolução da construção em madeira, possibilitando que produtos derivados fossem criados e, a partir disso, novas técnicas construtivas desenvolvidas. É importante citar que é necessário, cada vez mais, ter atenção ao tipo de cola utilizada e seus voláteis orgânicos para manter a qualidade do ar em ambientes internos. Esses tipos de cuidado já estão presentes em forma de restrições em importantes códigos regulatórios.

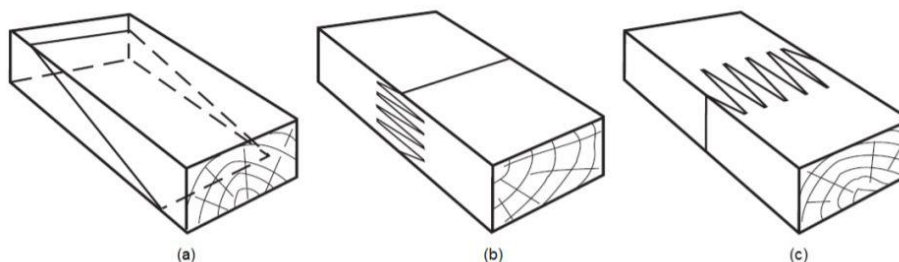


FIGURA 3.4.2: a) Ligação colada entre dois painéis; b) Ligação dentada horizontal; c) Ligação dentada vertical  
FONTE: ALMEIDA, 2012

**BUCHAS, PREGOS E PARAFUSOS:** As buchas eram, inicialmente, utilizadas como complemento às samblagens, até passarem a utilizar as chapas, cavilhas e pregos. As buchas perderam seu espaço na obra construída em madeira, pois exigem mão-de-obra intensa, mas ainda são utilizadas no meio industrial (Almeida, 2009).

No século XIX, os pregos eram ainda extremamente caros e poucos, pois eram fabricados artesanalmente. Já no início do século XX, com o desenvolvimento do processo de industrialização, a produção tornou-se acessível em quantidade e preço. Isso permitiu um largo passo na construção em madeira. A grande vantagem era a rapidez na execução e baixo custo. Os sistemas mais avançados em construção em madeira foram desenvolvidos a partir da popularização dos pregos na construção.

O uso de parafusos exige a pré furação da madeira antes da sua aplicação. Essa furação pode ocupar um volume considerável no interior da peça de madeira. Portanto, deve ser aplicado em peças de maiores dimensões que suportem essas furações sem comprometer sua resistência, como em ligações entre pilar e vigas lameladas, por exemplo (Almeida, 2009). Os parafusos são utilizados tanto em conexões simples, como entre dois painéis, quanto nas mais complexas com fixação por conectores metálicos (Oliveira, 2018).

**CONECTORES METÁLICOS:** A grande maioria das ligações realizadas em estrutura de madeira recorre ao uso de elementos metálicos e estão disponíveis em diversos tamanhos e formatos (Almeida, 2012). São, maioritariamente, feitos em chapa de aço quinada e galvanizada ou até em inox (Almeida, 2009). Os mais comuns são cantoneiras, chapas e conexões em formato T ou U. Esse tipo de conectores possibilitou um grande número de ligações mais resistente e com tempo de montagem reduzido. Podem ser visíveis ou interiores às peças de madeira, o que oferece vantagem estética, no caso de estruturas aparentes, e de resistência ao fogo, já que a peça metálica não fica exposta (Almeida, 2012).

Podem ser divididos em dois grandes grupos em função da forma ou força transmitida: a) conexões tipo cavilha, que fazem a transmissão da força através da pressão sobre a madeira na superfície de furação, como pregos, parafusos de porca e autorroscantes e cavilhas; e b) ligadores planos, que distribuem a força pela superfície de madeira em contato com o conector, como anéis, placas dentadas, placas circulares e chapas (Almeida, 2009).

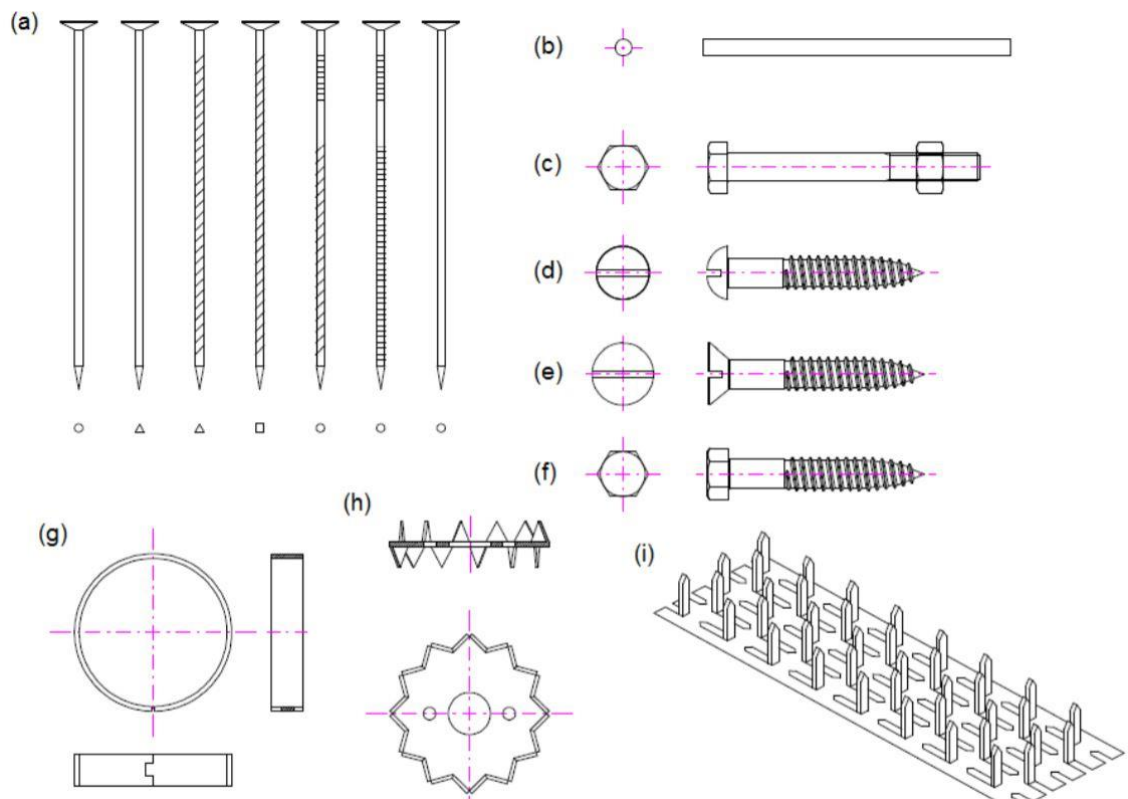


FIGURA 3.4.3: a) Pregos; b) Cavilha; c) Parafuso de porca; d) Parafuso autorroscante de cabeça redonda; e) Parafuso autorroscante de cabeça de embeber; f) Parafuso autorroscante de cabeça sextavada; g) Anel aberto; h) Placa metálica dentada; i) Chapa metálica dentada.

FONTE: ALMEIDA, 2012

Esses conectores não somente permitem incorporar madeira com madeira, como possibilitam ancorar elementos de madeira com paredes de alvenaria e concreto (Archidaily, 2017).

### 3.5. IMPERMEABILIZAÇÃO

Existem diversas formas de fazer a impermeabilização das coberturas e áreas molhadas de uma edificação com estrutura de madeira. Tratando especificamente das construções em altura, em regra geral, a laje de cobertura é um painel em CLT. Os tipos de impermeabilização mais comuns de uma laje de cobertura em CLT são as membranas de PVC ou termoplásticas. São membranas que têm uma certa espessura, altamente resistentes e devem ser coladas sobre uma superfície lisa. Isto é, acima da placa estrutural de CLT são colocados espaçadores e o isolante térmico, logo acima uma placa de compensado ou CLT e por cima a lona impermeabilizante.

É possível também utilizar a manta asfáltica, mas trata-se de um método ultrapassado em relação às membranas de PVC e termoplásticas, que além de serem mais modernas, duram muito mais. Para telhados verdes e coberturas com acesso de pessoas e utilização tipo *rooftop*, essas membranas também funcionam muito bem, a única diferença é o cálculo da carga da laje estrutural em CLT, que deve ser feito para esse fim específico. No caso dos *rooftops*, a aplicação de um deck de madeira ou até um lastro de betão sobre a camada impermeabilizante possibilitam a circulação da superfície.

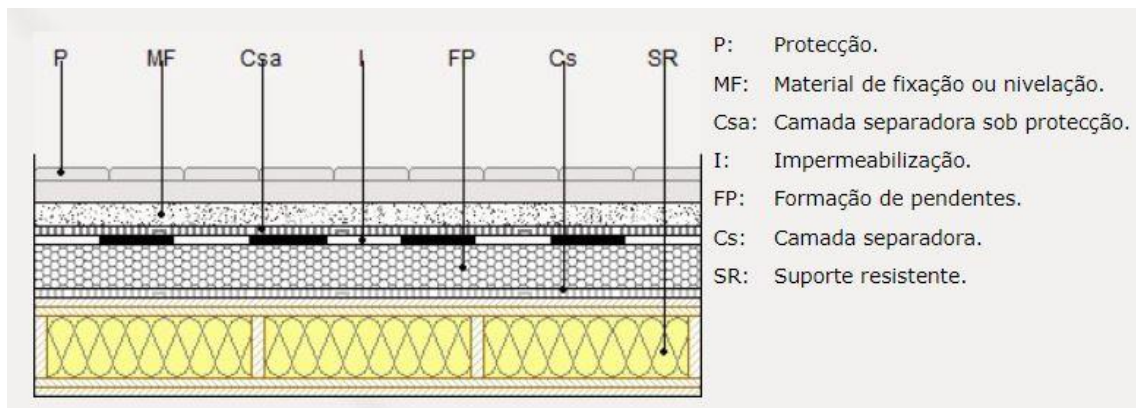


Figura 3.5.1: Cobertura em CLT com sistema aligeirado, com isolamento incorporado (SR) com pavimento acessível revestido com deck (P) exterior. Impermeabilização termoplástica (I)

FONTE: CYPE Ingenieros SA

Normalmente o CLT não é usado para acabamento final de pavimento. Ele funciona como laje e recebe um acabamento como assoalho de madeira ou uma capa de betão para receber revestimento cerâmico, no caso de áreas molhadas. No caso de aplicação de materiais com humidade como o betão e massas de assentamento, é sempre necessário utilizar algum tipo de membrana impermeável para impedir a troca de humidade.

### 3.6. PRÉ FABRICAÇÃO

Quando falamos em pré-fabricação, logo vem a ideia de linha de montagem, da produção repetitiva do mesmo. Para a arquitetura isso não é uma boa ideia, ainda mais quando falamos de soluções para questões de conforto dos ambientes internos, que dependem da análise de diversos fatores do terreno como incidência solar, direção predominante dos ventos e etc.

Hoje, a pré-fabricação toma um rumo completamente diferente da ideia fabricação em série lançada por Henry Ford. As indústrias preparam-se para uma nova fase da história da pré-

fabricação. A linha de montagem do mesmo é substituída pela linha de montagem do diferente. Ou seja, começa a ser possível uma customização e fabricação de elementos únicos. Se esse conceito já é utilizado até mesmo em áreas de especialização da saúde, como impressão 3D de próteses dentárias, o que será possível criar na área da arquitetura?

## 4. CONTRUÇÃO DE MADEIRA EM ALTURA

### 4.1. INTRODUÇÃO

Atualmente, cerca de 50% da população mundial vive em centros urbanos. E é estimado que até 2050 esse percentual suba para 70% e ainda com uma expectativa de aumento populacional para 9.7 bilhões de habitantes. As alterações climáticas impactam cada vez mais na forma como o mundo funciona. Com a população em constante crescimento, novas construções serão necessárias. A forma como isso será planejado e construído é fará a grande diferença e é exatamente aí que está a mudança que é preciso ser feita (ONU, 2019).

Como vimos, as cidades terão de suportar uma densidade populacional cada vez maior. Isso significa que será exigido maior eficiência na distribuição, uso e gestão dos recursos. Para manter tais densidades, as construções deverão ocupar lotes menores ao mesmo tempo maior diversidade de uso e capacidade de habitantes/usuários.

A construção em madeira em altura é um tipo de estratégia construtiva que faz uso em larga escala de sólidos painéis ou elementos de madeira para criar a estrutura das edificações. É um processo relativamente novo. Historicamente, a construção em madeira utilizava árvores de grandes diâmetros para criar vigas e colunas maciças inteiriças. O sistema de madeira maciça na construção contemporânea é composto por uma variedade de produtos de madeira desenvolvidos propriamente para uso em engenharia e podem ser categorizados em 5 principais grupos: CLT, NLT, GLT e DLT.

A tendência da verticalidade, portanto, é irreversível. Torres construídas em estruturas de madeira são os substitutos diretos principalmente para construções em aço e betão.

### 4.2. CLT – *Cross Laminated Timber*

Criado por engenheiros austríacos em 1997, teve sua primeira produção em 1998. É um material relativamente novo que vem ganhando cada vez mais espaço na construção em madeira. A cada ano, o consumo mundial de CLT dobra. É o material que proporcionou o avanço das estruturas de madeira em altura.

A madeira tem sua resistência apenas a esforços aplicados paralelamente às suas fibras. No sentido transversal, a resistência é insignificante. O CLT é um sistema de grandes painéis de madeira maciça com 3, 5, 7 ou mais lâminas coladas entre si com os sentidos das fibras sempre em 90° em relação à chapa contígua, o que garante resistência da peça em todos os sentidos. Com isso é possível é possível criar diafragmas de lajes vencer vãos e paredes diafragma para contraventar o edifício. Pode ser construído com 12m até 20m de comprimento, 3m a 4m de largura e de 53mm (3 camadas) até 250mm. Pode ser usado como paredes, lajes de piso e lajes de cobertura.

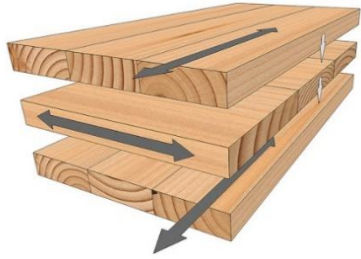


FIGURA 4.2.1: Esquema de colagem do CLT  
 FONTE: reidmiddleton.com

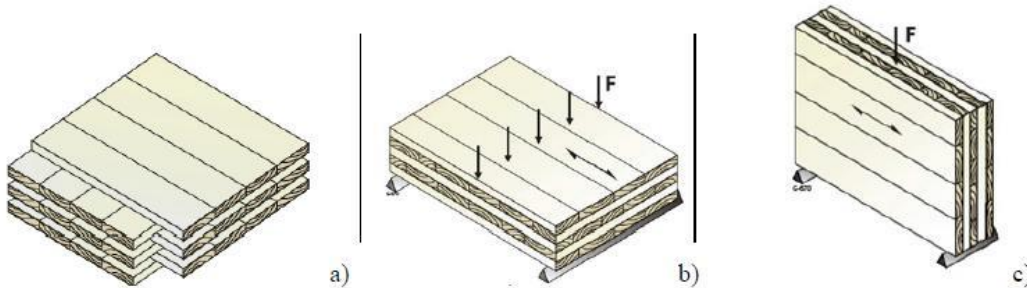


FIGURA 4.2.2: CLT: a) Disposição ortogonal das lâminas de madeira nos painéis de CLT, b) Painel sujeito à flexão no sentido horizontal e c) Painel no sentido vertical.  
 FONTE: (Gagnon, et al., 2011)

Quando usado como parede, a obra recebe o painel pronto com todos os recortes de vãos e instalações. Também há a possibilidade de os dutos das instalações já estarem inseridos no seu interior ao sair da fábrica.



FIGURA 4.2.3: Painéis chegam à obra com vãos já recortados  
 FONTE: Amanu-Invest

Como laje não exige a presença de vigas ou barrotes pois é uma peça estrutural. Pode também servir de piso acabado, sem necessidade de material de revestimento, apenas um acabamento com resina. Mas se for assentar cerâmica, necessita a aplicação de uma membrana de proteção e para proteger da camada de assentamento de cerâmica.

No caso de laje de cobertura, a grande vantagem é a sua leveza. Também não necessita de vigas. Vence o vão sem apoios extras aos pilares. Para a impermeabilização, pode receber manta asfáltica, membrana termoplástica, manta de PVC e até mesmo servir de base para coberturas verdes.



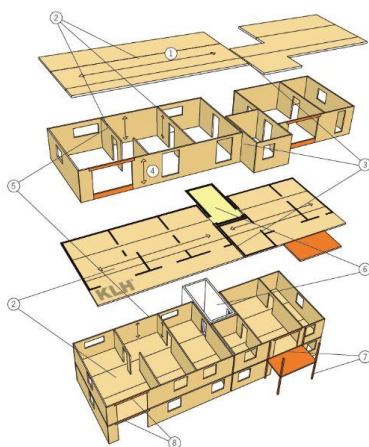
FIGURA 4.2.4: Lajes em CLT  
FONTE: Pinterest

Dependendo da localização geográfica, essas partes de madeira podem ser feitas de variadas espécies macias, incluindo Pinus, Abeto e Larício. Devido à laminação, que posiciona cada chapa com as fibras em sentido cruzado. O painel acabado é estável em todas as direções. Isso confere excepcional resistência tanto no menor quanto no maior eixo. Essa resistência bidirecional do CLT torna-o multifuncional, podendo ser aplicado como piso, cobertura e paredes em edifícios em altura.

De acordo com o número de camadas que é composto, os painéis apresentam capacidade de vencer menores ou maiores vãos. Combinados com vigas laminadas (GLT), as possibilidades são quase infinitas.

O sistema estrutural em CLT é muito mais leve que betão e aço. Essa redução em peso reflete diretamente no dimensionamento das fundações, tipicamente construídas em betão, que podem ser drasticamente reduzidas. Por outro lado, devido a essa leveza, existe a preocupação de destruição em situações geográficas de ventos muito fortes. Essas preocupações podem ser facilmente resolvidas com reforços de fixação e sistema de cintas.

Quando propriamente projetado e detalhado e considerando sua leveza, velocidade de construção, qualidade dos ambientes internos, produção de resíduos entre outros fatores, as estruturas em madeira apresentam *performances* superiores na maioria dos casos se comparado aos tradicionais sistemas em betão e aço.



- 1 - PAINÉIS CLT COMO LAJE;
- 2 - LAJES FUNCIONAM COMO VIGAS CONTÍNUAS APOIADAS NOS PAINÉIS PORTANTES TIPO PAREDES;
- 3 - SEPARAÇÃO DOS APARTAMENTOS;
- 4 - PAINÉIS CLT COMO PAREDES PORTANTE;
- 5 - CORTE ACÚSTICO PARA REDUÇÃO DE TRANSMISSÕES MARGINAIS;
- 6 - CAIXA DE ESCADAS;
- 7 - VARANDAS EM ESTRUTURAS AUTOPORTANTES (SOLUÇÃO PASSIVEHOUS) OU EM CONSOLAS;
- 8 - PADIEIRAS EM VIGAS LAMINAS COLADAS OU CLT;

FIGURA 4.2.5: Esquema do sistema construtivo em CLT  
FONTE: Pinterest

### 4.3. NLT – *Nail Laminated Timber*

NLT (*Nail Laminated Timber*) é um dos mais simples e acessíveis produtos entre as madeiras engenheiradas. Consiste em peças dimensionadas de madeira maciça sobrepostas e pregadas entre si para criar um painel multicamadas. Pode chegar até 3m de largura por 13m de comprimento.



FIGURA 4.3.1: Efeito estético do NLT  
FONTE: StructureCraft



FIGURA 4.3.2: Cobertura com geometria livre em NLT  
FONTE: StructureCraft



FIGURA 4.3.3: Cobertura com geometria livre em NLT  
FONTE: StructureCraft

É uma técnica construtiva utilizada há mais de um século, principalmente em situações que exigiam solidez e resistência. Atualmente vem sendo reutilizado para substituir lajes de betão e decks de aço, ou até mesmo para criar uma estética única. Pode ser usado em pavimentos, paredes e coberturas, inclusive as de geometrias livres (Torres, 2010).

### 4.4. GLT - Glulam

O Glulam é um material estrutural fabricado a partir de peças de madeira maciça coladas entre si com o sentido das fibras em paralelo. Entretanto, as peças não precisam seguir a geometria do tronco da árvore, facilitando a criação de peças curvas. A cola utilizada é industrial e deve garantir a mesma eficiência estrutural que uma peça de conexão metálica ou parafusos. As peças derivadas desse processo são altamente duráveis e resistentes à humidade, pois seu teor de humidade interna é de 12%, reduzindo as possíveis variações dimensionais e deformações (Migliani, 2019).



FIGURA 4.4.1: Glulam  
FONTE: BIMObjects

Sua fabricação une duas técnicas já conhecidas anteriormente: a colagem e a laminação. É muito usada em vigas, coberturas, painéis e revestimentos de fachadas, vencendo grandes vãos sem apoios intermediários com elementos leves. Aplicado desde projetos residenciais até industriais, as ligações entre peças são feitas com conectores metálicos em um número bastante reduzido.



FIGURA 4.4.2: Glulam em obra residencial  
FONTE: Archdaily



FIGURA 4.4.3: Glulam em obra corporativa  
FONTE: Erel Company

#### 4.5. DLT – *Dowel Laminated Timber*

O DLT é uma evolução dos painéis de madeira maciça. É um produto de última geração 100% em madeira, puramente orgânico, proporcionando maior versatilidade no design de projetos. Isso permite que no fim da vida útil desses painéis, podem ser transformados ou reutilizados em outra construção ou até mesmo usados como fonte de energia através da combustão, pois não levam cola.

Seu uso já é bastante comum na Europa e vêm ganhando força nos EUA e Canadá. Sua produção é muito fácil por ser possível utilizar máquinas controladas por computador que facilitam a integração de tubagem de instalações pré-definidas. Sua composição é semelhante ao NLT, empilhando as peças. Mas em vez de pregos e parafusos, usa cavilhas de madeira dura para unir as laminas, proporcionando estabilidade dimensional adicional. É adequado para uso em vãos horizontais (coberturas e pavimentos) devido às fibras unidirecionais.

Mesmo durante sua vida útil, o DLT oferece grandes vantagens igualmente como o NLT e o CLT:

- Flexibilidade na criação de texturas das superfícies. Com a grande variedade de perfis e a possibilidade de personalização a variedade de efeitos estéticos torna-se ilimitada. Isso tudo sem alteração no custo de produção.

- Perfis acústicos que atingem os objetivos de redução de transmissão de ruídos.

- Maior eficiência estrutural que o CLT (para vãos horizontais, nomeadamente pavimentos e coberturas).

- É qualificada como madeira pesada, cumprindo os requisitos de classificação de incêndio para edifícios dessa categoria.

Entretanto, a principal diferenciação para os demais painéis seja a ausência do uso de cola, o que torna o material mais ecologicamente correto. Seu tempo de produção também é reduzido devido à ausência de período de cura da cola; e por fim, menor volume de material devido à eficiência estrutural.

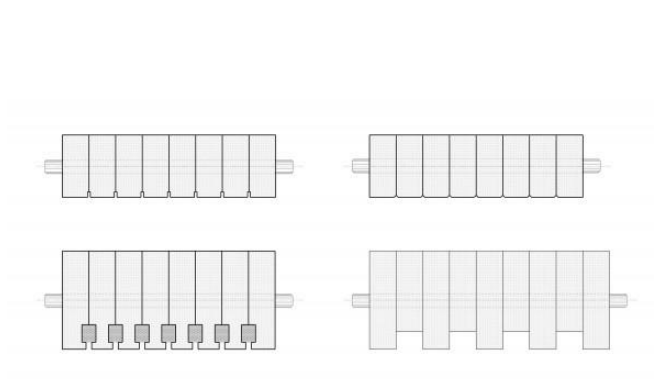


FIGURA 4.5.1: flexibilidade de combinações de perfis que permitem variações estéticas ilimitadas  
 FONTE: StructuralCraft

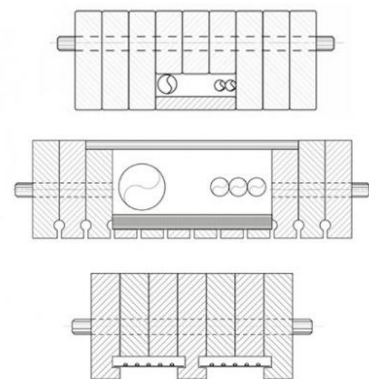


FIGURA 4.5.2: flexibilidade para integração de instalações pré-definidas  
 FONTE: StructuralCraft

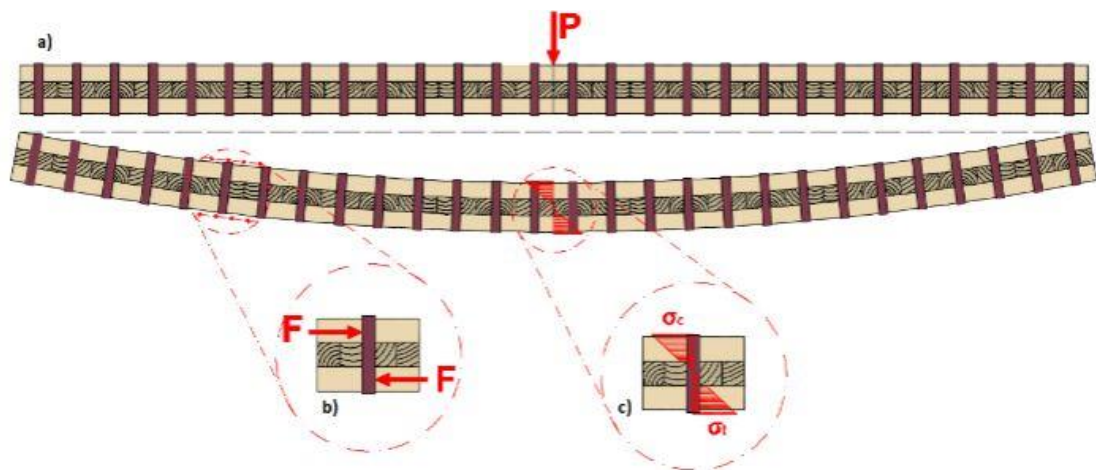


FIGURA 4.5.3: a) Flexão do painel de uma carga distribuída aplicada no centro do vão; b) ilustração das forças atuando nas lamelas e nas cavilhas; c) ilustração das distribuições de tensões de compressão e tração no painel  
 FONTE: (Pereira, et al., 2018)



FIGURA 4.5.4: Construção do T3 Minneapolis. Prédio de 7 pisos que utilizou painéis de DLT  
FONTE: StructuralCraft



FIGURA 4.5.5: Construção do T3 Minneapolis. Prédio de 7 pisos que utilizou painéis de DLT  
FONTE: StructuralCraft

#### 4.6. AVANÇOS E PESQUISAS TECNOLÓGICAS

Como já foi dito no capítulo 2, a madeira foi o primeiro material utilizado para construção de abrigos para seres humanos e perdeu espaço ao longo da história com o surgimento de novos materiais e principalmente após a Revolução Industrial. Porém, vivemos neste princípio de século XXI um momento histórico de insurgência da madeira como material de construção devido ao seu apelo sustentável, necessário nos tempos que vivemos e graças aos avanços tecnológicos com novos sistemas de pré-fabricação e produtos derivados de ponta.

Essa série de novos processos aumentam seu potencial sustentável, segurança e eficiência. As estruturas de madeira estão surgindo nos *skylines* das cidades mais desenvolvidas do mundo (Archdaily, 2020). Novas ferramentas são utilizadas a cada dia, levando o tradicional ofício do carpinteiro a um novo patamar. A precisão na pré-fabricação, a modulação e os novos materiais já expostos anteriormente possibilitam um método de fabricação extremamente eficiente através de máquinas CNC (comando numérico computadorizado), permitem que as peças sejam mais eficientes na hora de fazer as conexões. Já ferramentas como o sistema BIM, realidade virtual e impressão 3D são alguns dos exemplos de recursos que já existem e não há dúvidas que se tornarão cada vez mais comuns no planejamento de execução edifícios, fundindo o processo de criação com o de construção.

Todos esses avanços tornam possível executar edifícios como um kit de peças de madeira fácil e rápido de montar, reduzindo margem de erros, necessidade de mão-de-obra, tempo de trabalho em obra, conseqüentemente, custos de estaleiro (Archdaily, 2020). Com essa nova realidade técnica, também surgem novos modelos de negócio para o mercado da construção com envolvimento muito maior entre construtor, arquiteto e investidor.

A intensificação no campo das pesquisas abrirá ainda mais o campo da construção em madeira. Tudo indica que a madeira assumirá um papel de liderança no desenvolvimento das cidades do futuro, ajudando arquitetos, urbanistas e desenvolvedores a enfrentar o maior desafio das próximas décadas que é dar uma resposta à densificação das cidades (Archdaily, 2020) e atender às necessidades de redução de emissão de gases de efeito estufa no espectro da construção civil.

#### 4.7. PROTEÇÃO CONTRA INCÊNDIO

Uma das maiores preocupações em relação à construção em madeira é o risco de incêndio. Faz sentido do ponto de vista leigo, pois a madeira é um material combustível. Porém, não existe qualquer relação entre o tipo de construção e a causa dos incêndios. Um incêndio não começa na estrutura. É necessária uma combustão, uma explosão, uma faísca que seja para depois esse fogo propagar para a estrutura. O aço e o betão não são combustíveis como a madeira, mas nem por isso são mais seguros em caso de incêndio. Entretanto, é conhecido cientificamente como essa combustão acontece. Através de ensaios de laboratório, constatou-se que as madeiras utilizadas para construção, como as coníferas Pinus e Abeto, queimam 0,7mm por minuto. Portanto, para aumentar sua resistência ao fogo, basta aumentar sua espessura. Cerca de 2,1cm para cada 30 minutos a mais de resistência.

As árvores possuem um sistema natural de proteção contra incêndio. Quando é atingida pelo fogo, ela cria uma camada de carbono sobre sua superfície para proteger a parte interna no tronco. Essa capa de carbono impede a troca de oxigênio entre madeira e o exterior, não alimentando assim o fogo e impedindo que penetre no cerne do tronco e dessa forma o fogo auto estingue-se.



FIGURA 4.7.1 – Seção de madeira carbonizada  
FONTE: madeiraestrutural.wordpress.com

Hoje, esse sistema natural de proteção das árvores é utilizado pela engenharia. As seções das peças são calculadas em função não só dos esforços aos quais serão submetidas, mas também conforme o tempo de resistência exigido em cada situação adicionando uma camada extra de madeira para que, em caso de incêndio, ela carbonize sem comprometer a seção estrutural. Também é possível usar retardantes de chamas ou então camadas de *drywall* para aumentar a resistência das peças de madeira, calculando uma placa para cada 1hr de resistência desejada.

Na verdade, existe uma grande vantagem da madeira em caso de incêndio. Não há deformação das peças de madeira em caso de serem submetidas ao fogo. Elas seguem portantes enquanto a crosta de carbono segurar o fogo. Já o aço não é combustível, porém ao atingir 750°C começa a deformar e colapsar a estrutura.

Quanto à propagação de fumaça, é controlada pelo sistema de produção das peças estruturais como o CLT, que é prensado de forma que não permite a passagem de fumaça entre ambientes.

Projeto de proteção contra incêndio exige análise dos riscos à segurança causados pela madeira para usuários e bombeiros. É preciso considerar a altura das edificações, ocupação, e a reação do material quando utilizado em compartimentos internos, tanto na estrutura quanto nas vedações.

#### 4.8. COMPORTAMENTO ANTI-SÍSMICO

“As forças sísmicas são proporcionais ao peso da estrutura e a madeira é substancialmente mais leve que o aço ou o betão” ... “Esses edifícios de madeira mais leves significam menores cargas de fundação e uma estrutura com melhor desempenho em um evento sísmico” – Benton Johnson

Para obter um edifício com resistência a terremotos, é preciso ter alguma flexibilidade, isto é, absorver energia cinética. A estrutura em madeira possui essa propriedade e até mais. O seu bom desempenho é atribuído a seguintes características:

- LEVEZA: as forças sísmicas são proporcionais ao peso;
- CONEXÕES DÚCTEIS: capacidade de ceder e deslocar sem rupturas repentinas, possível devido às múltiplas conexões metálicas entre as peças estruturais;
- CAMINHOS DE CARREGAMENTOS REDUNDANTES: os repetidos elementos estruturais e numerosos conectores possibilitam diversos caminhos que a carga percorre, muitas vezes redundantes para as forças sísmicas. Quando painéis estruturais estão devidamente ligados ao pavimento, cobertura e estrutura das paredes, eles formam paredes de diafragmas e de cisalhamento que são muito eficientes em resistir a essas forças (American Wood Council, 2015).

Projetos e construções com base em pesquisas, testes e em conformidade com os requisitos dos códigos de construção podem ter os efeitos de um abalo sísmico minimizados. O IBC (*International Building Code*), modelo de códigos construtivos utilizado nos Estados Unidos, define diversas diretrizes para estruturas de madeira resilientes. Isso, somado às características inerentes à madeira, potencializa a capacidade de resistência das estruturas (American Wood Council, 2015).

Pesquisas e testes têm demonstrado que os danos causados por um terremoto numa estrutura de madeira podem ser pontualmente reparados, pois as peças podem ser reaproveitadas e repostas apenas o que ficou estruturalmente comprometido. Edifícios em betão e aço não podem ser reparados após um abalo sísmico. Eles devem ser totalmente reconstruídos. Não há nada menos sustentável que isso (American Wood Council, 2015).

#### 4.9. CONFORTO TÉRMICO

A madeira é um material com excelente comportamento para garantir o conforto térmico dos ambientes internos. Ao contrário do betão e do aço, a madeira não precisa de uma ruptura térmica entre o envelope estrutural e o exterior (American Wood Council, 2015).

A quantidade de energia necessária para aumentar a temperatura do material é elevada e independe da espécie ou da densidade, mas varia de acordo com a humidade. Maior humidade, maior o calor específico. Essa capacidade de absorver energia quando combinada à baixa velocidade de transporte de calor pelo material, devido à sua estrutura celular (condutividade térmica), fazem da madeira um bom material isolante.

O uso da madeira em regiões frias está associado à capacidade de retenção de energia solar térmica durante o dia e lenta liberação durante a noite. Em regiões de clima quente, a sua aplicação está relacionada a uma menor absorção e propagação de calor para o interior das construções.

Abaixo é demonstrado um comparativo da capacidade da madeira de manter um ambiente com uma temperatura menos variável em relação a materiais de construção tradicionais:

MADEIRA: 0,12 W/m<sup>2</sup> °C

VIDRO: 1,15 W/m<sup>2</sup> °C

BETÃO: 1,5 W/m<sup>2</sup> °C

AÇO: 60 W/m<sup>2</sup> °C<sup>2</sup>

Os componentes em madeira maciça pré-fabricados como as vigas de madeira laminada colada, bem como painéis de CLT, DLT e NLT devido à sua espessura, oferecem isolamento térmico eficiente para projetos que buscam atender requisitos rigorosos de desempenho energético (American Wood Council, 2015).

Entretanto, a madeira sozinha não consegue garantir o conforto térmico de um edifício, apesar de contribuir de forma incomparável a outros materiais. Como falado já no subcapítulo 1.4, as decisões de projeto têm grande influência na eficiência energética. A forma e orientação, o volume, a eficiência das aberturas como janelas e portas são fatores fundamentais na avaliação de desempenho térmico de um edifício (American Wood Council, 2015).

#### **4.10. CONFORTO ACÚSTICO**

O ruído é um grande mal que atinge os centros urbanos e pode ser causa de doenças cada vez mais comuns nos tempos atuais como o stress. Cada vez mais o isolamento acústico é uma preocupação de projetistas e construtores.

As propriedades acústicas mais importantes da madeira para a construção civil são o isolamento e a absorção. De uma forma geral, os sistemas construtivos em madeira têm um reduzido desempenho acústico, sobretudo aos sons de transmissão aérea ou de isolamento, devido sua à baixa densidade (Almeida, 2009). Entretanto, a sua capacidade de absorção, isto é, de amortecer vibrações, é a sua propriedade acústica mais relevante. Um material com bom desempenho de absorção de som deve ser leve e poroso, o que explica o emprego de madeira em interiores de auditórios e salas de espetáculos (Mello, 2007).

Os materiais tradicionais apresentam capacidade de isolamento acústico muito melhores que a madeira. Mesmo sendo menos eficiente em bloquear a transmissão de som, combinando-a com outros materiais é possível obter uma barreira acústica eficiente. Por esse motivo, os sistemas modernos de construções em madeira preocupam-se em utilizar materiais isolantes associados para garantir essa estanqueidade.

No caso dos edifícios em altura, essa questão torna-se muito importante, pois deve haver isolamento entre as frações (Costa, 2013). Isso é essencial em todas as tipologias, tantas residenciais multifamiliares, corporativas, educacionais e institucionais. Os painéis estruturais como o CLT, utilizados nas construções em altura, apresentam uma densidade

significativamente maior que construções tradicionais de madeira, melhorando assim a sua capacidade isolante. De qualquer maneira, para soluções mais exigentes, o comportamento acústico pode ser melhorado com camadas de isolamento, de modo a superar questões de transferência de som (Costa, 2013).

#### **4.11. RESISTÊNCIA À HUMIDADE**

A característica higroscópica da madeira representa o principal comportamento da madeira em relação à humidade. A variação do teor de água afeta o comportamento físico e mecânico da peça, causando inchamentos e retrações. Essa capacidade de absorção de água tem seu lado positivo que é regular a humidade que vai para o interior do ambiente mantendo a qualidade do ar e boa salubridade.

A madeira não sofre alterações dimensionais até que se atinja o ponto de saturação das fibras (PSF). Sendo que, a partir desse ponto, a perda da humidade resulta em retração, que aumenta sua resistência, alterando as suas propriedades e, conseqüentemente, o seu comportamento. Portanto, as peças de madeira devem receber tratamentos apropriados para cada tipo de aplicação com revestimentos repelentes e antiaderentes de forma a impedir variações no teor de humidade. Essas proteções devem ser permeáveis ao vapor para que as boas qualidades higroscópicas da madeira não sejam comprometidas (Torres, 2010).

Os novos compostos de madeira como o CLT e a madeira lamelada colada trazem melhoras significativas no desempenho em relação à humidade, diminuindo a probabilidade de entrada de água pelas vedações (paredes e coberturas). A nível de projeto é preciso garantir que a água não se deposite junto a peças de madeira. Um dos principais pontos de infiltração de água nas estruturas é através do solo. Mas é possível evitar o contato da madeira com a água através de projeto, afastando os elementos de madeira do solo e protegendo a estrutura da chuva. Por exemplo, um edifício com fundação e pavimento térreo em betão e fachada em *steel frame* servindo de envelope para a estrutura terá seus elementos interiores de madeira preservados por muitos e muitos anos. Com a correta manutenção, para sempre talvez (ex.: *Brock Commons Building* – ver casos de estudo).

A madeira a ser utilizada deve sempre ter sua humidade em torno de 12%, pois quando está seca, não apodrece. Também é possível utilizar material hidrorrepelente que impedem a humidade de atingir a madeira

## 4.12. CASOS DE ESTUDO

### 4.12.1. BROCK COMMONS TALLWOOD HOUSE



FIGURA 4.12.1.1: Brock Commons Tall Wood House  
FONTE: Archello

Esse edifício é, atualmente, um dos maiores edifícios em altura em estrutura de madeira. Porém, ele não é 100% madeira. Sua estrutura é híbrida. Isto é, além das fundações em betão, também são o pavimento térreo e os núcleos de circulação vertical. Isso foi necessário, devido às suas dimensões, para dar resistência lateral (ventos e abalos sísmicos). Esse edifício fica em Vancouver, no Canadá e é uma residência estudantil da UBC (*University of British Columbia*). Possui uma área de mais de 15 mil m<sup>2</sup> e 53m de altura (18 andares). Foi construído em 70 dias no local da obra com uma equipe de apenas 9 trabalhadores. Seu custo ficou em torno de 40 milhões de dólares, aproximadamente 2.650 dólares por m<sup>2</sup>. Foram utilizados 2.233 m<sup>3</sup> de madeira entre Glulam e CLT. Calcula-se que o CO<sub>2</sub> sequestrado nessa obra é de cerca de 1.753 toneladas e ainda 679 outras toneladas foram evitadas de serem emitidas na atmosfera (em comparação a uma construção similar em betão). O total de todo esse volume de CO<sub>2</sub> não presente na atmosfera equivale ao consumo de uma casa unifamiliar por 222 anos, ou então de 511 carros circulando por um ano (Dias, 2017).

Seus pilares são em Glulam, pois é um excelente produto para resistência paralela às fibras. Ou seja, resistência à compressão. As lajes em CLT mistas com capas de betão. A presença do betão, nesse caso, justifica-se para dar maior massa ao prédio e evitar vibrações, já que a madeira é muito leve e o prédio tem dimensões muito grandes. Além disso, essas camadas de betão ajudam a melhorar a capacidade térmica e acústica das lajes. Não há vigas nesse edifício. É semelhante a um sistema estrutural em betão de lajes protendidas. As ligações são todas em aço (parafusos, chapas metálicas, cantoneiras e travamentos).

Toda a estrutura é encapsulada e protegida de intempéries. Ou seja, todos os elementos estruturais em madeira ficam protegidos da humidade pela fachada modulada em *steel frame*. Essa fachada é montada como uma pele cobrindo todo o esqueleto do prédio e mantendo-o intacto por muitos e muitos anos. Já chega em obra com todos os elementos de vedação como esquadrias, material de acabamento interno (*drywall* resistente ao fogo) e externo (ACM), além de uma camada de lã de rocha entre os revestimentos que colabora para o isolamento térmico e acústico. Os módulos são fixados à estrutura do edifício por cantoneiras metálicas que funcionam como ganchos e, depois de encaixadas, são parafusadas.

#### 4.12.2. EDIFÍCIO MJOSTARNET



FIGURA 4.12.2.1: Mjostarnet  
FONTE: Archdaily

Esse edifício é um marco na história da construção em altura em madeira e do desenvolvimento sustentável. Possui 18 andares, como o caso anterior, porém, sua altura atinge 85,5m. Foi construído em 2019 na cidade de Brumunddal, Noruega, às margens do lago *Mjosa*. Segundo o construtor, esse edifício simboliza toda a complexidade com a qual já é possível construir em madeira, reduzindo em 60% as emissões de CO<sub>2</sub> em relação a uma tipologia similar em betão e aço. O conceito de design do Mjostarnet foi inspirado no acordo de Paris para combater as mudanças climáticas e começou como uma ideia para reduzir as emissões de CO<sub>2</sub> e, ao mesmo tempo, obter materiais de construção localmente de maneira sustentável (Council on Tall Buildings and Urban Habitat, 2020). Os materiais têm origem próxima ao local de construção e isso é um dos requisitos da prática verdadeiramente sustentável. Foram usados 3.500m<sup>3</sup> de madeira, o equivalente a 14.000 árvores. Todas retiradas da região, que tem tradição de cultivo de madeira de forma sustentável e seu processamento (Pintos, 2020).

Como é uma tecnologia relativamente nova e algumas técnicas construtivas são realizadas pela primeira vez pelas equipes realizadoras, o tempo de planejamento ainda é maior

para garantir a estabilidade diante das condições climáticas locais, como as fortes ventanias. A leveza do material foi um dos maiores desafios diante desse tipo de situação. O início do projeto se deu em 2015 e a interação e cooperação entre equipes multidisciplinares é o que tornou possível o sucesso de uma obra inovadora como esta, buscando novas soluções para velhas questões (Pintos, 2020).

À medida que as áreas urbanas ficam mais densas do que nunca e o número de prédios altos construídos continuam a aumentar, a tendência da busca de materiais mais sustentáveis, econômicos e de rápida execução, passa a ser cada vez maior (Block, 2019). Todos os principais elementos estruturais foram executados em madeira engenheirada. Pilares e vigas foram executados em Glulam pré-fabricados com perfurações para as conexões necessárias e montados no local em treliças verticais de até 5 pisos, proporcionando estabilidade às forças horizontais e verticais (Council on Tall Buildings and Urban Habitat, 2020). Paredes internas e poços de elevador foram feitos inteiramente em CLT. As lajes até piso do nível 11 foram feitas em vigas de madeira laminada e uma fina camada de betão de 50mm para desempenho acústico e vibracional, enquanto a partir do nível 12 as lajes são totalmente compostas de betão para aumentar o peso e atingir o comportamento dinâmico desejado em períodos de vendos fortes (Archdaily, 2020).



FIGURA 4.12.2.2: Vista do interior  
 FONTE: Archdaily

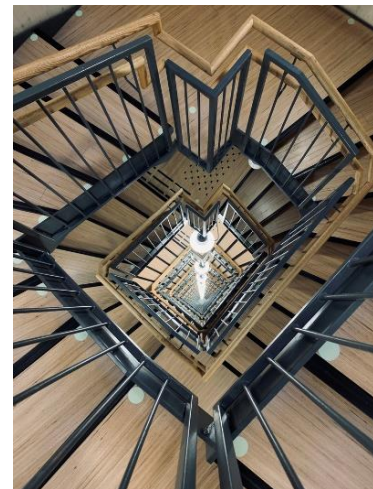


FIGURA 4.12.2.3: Circulação vertical  
 FONTE: Archdaily

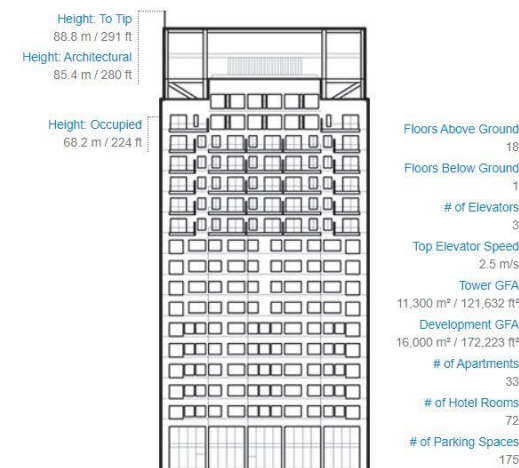


FIGURA 4.12.2.4: Alçado Frontal  
 FONTE: Archdaily

A torre trouxe outros benefícios além dos diretamente relacionados ao método construtivo. Por sua característica inovadora e única, atraiu olhares para a cidade de Brumunddal e promoveu a conexão do centro da cidade com as margens do lago, onde o edifício foi implantado. É o terceiro edifício mais alto da Noruega e o mais alto do mundo construído em madeira. Tem uso misto, permitindo que residentes, locais e viajantes possam usufruir de suas instalações. Possui área residencial, corporativa, hoteleira (com centro de conferências e restaurante), piscina pública, área de exposição e terraço com miradouro de acesso público.

#### 4.12.3. W350

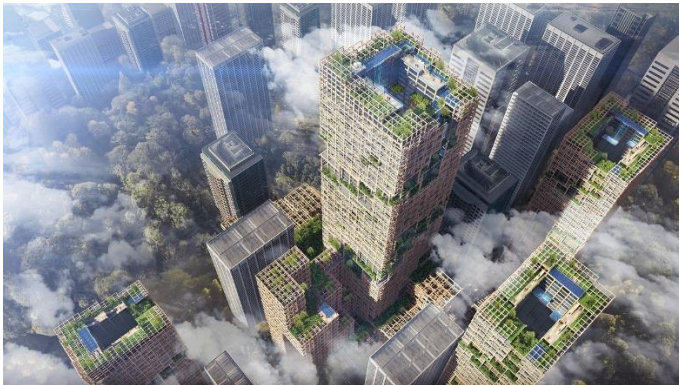


FIGURA 4.12.3.1: Complexo W350  
FONTE: Archdaily

Prédios em altura com estrutura em madeira viraram a verdadeira tendência atual entre os arquitetos mais ousados. É evidente que existe uma espécie de corrida vertical para ver quem chega mais alto com estrutura em madeira ao redor do mundo. Mas a proposta mais arrojada e impressionante que foi divulgada até agora, sem dúvida, é o japonês W350. Trata-se de um complexo de edifícios onde o mais impressionante deles possuirá 70 andares e 350m de altura. O empreendimento pretende apresentar uso misto com áreas residencial, hoteleira, corporativa e comercial na intenção de criar uma comunidade ambientalmente e socialmente sustentável (Lynch, 2018). O objetivo é criar uma cidade de arranha-céus feitos de madeira favorável ao meio ambiente que traga uma sensação de maior proximidade com a natureza em plena Tóquio (Smartwood, 2018).

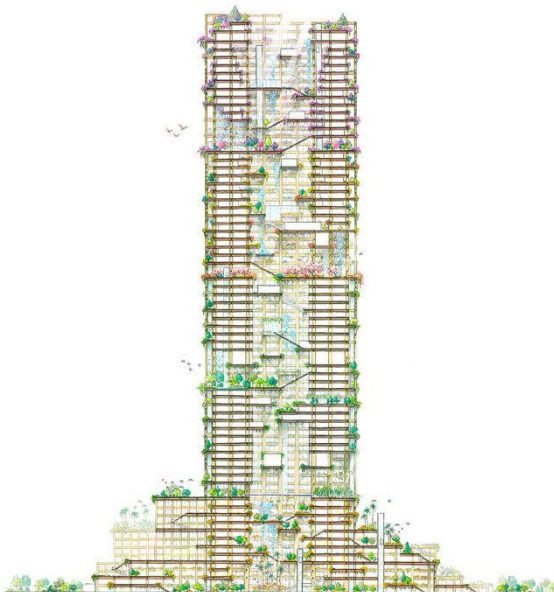


FIGURA 4.12.3.2: Corte do W350  
FONTE: Archdaily

A edificação não está prevista para ser 100% em madeira. Será um sistema híbrido que se utilizará de 90% de sua estrutura em madeira e somente 10% em aço para que seja capaz de lidar com a intensa atividade sísmica de Tóquio. O projeto estrutural prevê um conjunto de tubos metálicos que garantam a estabilidade horizontal e vertical da estrutura em madeira, tornando o edifício estável diante de ventos fortes e tremores de terra. Além da sua flexibilidade e capacidade de absorção de movimentos do solo, se um prédio em madeira colapsa durante um terremoto, é mais rápido e facilmente substituído do que uma estrutura de betão e aço.



FIGURA 4.12.3.3: Esquema estrutural da torre  
FONTE: Archdaily

O governo japonês tem incentivado o uso da madeira em prédios públicos, desde 2010 quando o país aprovou o *Act for Promotion of Use of Wood in Public Buildings*, exigindo que todos os edifícios com até 3 andares sejam construídos em madeira (Futuro Exponencial, 2018).

Nos renders divulgados podemos ver espaços internos cheios de luz, amplas varandas cobertas por vegetação, coberturas verdes, espaços abertos internos e recursos aquáticos como espelhos d'água. Entretanto não foi ainda revelado qual será o material a ser utilizado na estrutura, mas especula-se que será CLT e Glulam.

Quando concluído, o W350 será o edifício mais alto do Japão e a estrutura de madeira mais alta do mundo (Smartwood, 2018). É, sem dúvida, o projeto mais ambicioso em madeira. Os novos avanços tecnológicos, novas técnicas de construção e novos materiais de madeira engenheirada, tornam esse campo muito atrativo para as inovações arquitetônicas nos próximos anos e para que seja possível fazer cada vez melhor uso da madeira na construção. Entretanto, ainda é necessário desenvolver uma tecnologia que garanta a resistência da madeira exposta na fachada do prédio. Porém, o construtor está confiante de que esses avanços tecnológicos serão facilmente atingidos dentro das próximas duas décadas. Apesar de toda a rapidez e avanços da tecnologia japonesa que já conhecemos, esse arranha-céu está previsto apenas para 2041.



FIGURA 4.12.3.4: Varandas amplas com vegetação  
FONTE: Archdaily



FIGURA 4.12.3.5: Espaços públicos internos  
FONTE: Archdaily

## 5. REGULAMENTAÇÃO

Para avaliar e classificar a madeira, existem 2 sistemas. Um é o de avaliação visual, que não segue normas e é baseado na experiência e práticas tradicionais. Mas ao contrário da maioria dos países que utilizam esse sistema (a maioria dos países desenvolvidos), em Portugal existe uma norma, a NP4305 publicada pelo LNEC com as classes referentes ao Pinho Bravo, espécie mais comum no país, baseada na norma europeia EN 518 – classificação de madeira estrutural – requisitos para padrão de classificação de resistência visual.

A construção em madeira em altura é uma inovação para a indústria da construção. Pesquisas e desenvolvimento de materiais e produtos que possibilitam essa prática começaram na década de 1990 principalmente na Áustria e Alemanha. Devido a essa curta existência no mercado, os defensores desse sistema construtivo têm trabalhado com afinco para que as atuais regulamentações sejam atualizadas considerando esses produtos em suas normas.

### EUROCÓDIGO:

Os Eurocódigos são um conjunto de normas elaborados pelo CEN (Comitê Europeu de Normatização) que têm como objetivo a padronização dos critérios de cálculos de estabilidade e outras regras comuns para estruturas de engenharia civil. A intenção da criação desse conjunto de normas é facilitar a troca de bens e serviços entre os países da Comunidade Econômica Europeia e aumentar a competitividade da indústria (Almeida, 2009).

Os cálculos de estabilidade de estruturas de madeira têm base em 3 dos 10 Eurocódigos: EN 1990 Eurocódigo: Bases de Projeto de Estrutura; EN 1991 Eurocódigo 1: Ações em Estruturas; e EN 1995 Eurocódigo 5: Projeto de Estrutura de Madeira.

O EN 1990 define requisitos de segurança e fatores de aumentam ou diminuem os riscos de acordo com circunstâncias específicas e abrange todos os materiais estruturais principais. O EN 1991 corresponde às ações com efeito de deformação incluindo regras comuns às construções, resistência ao fogo dos elementos estruturais e cargas acidentais como sismos, fortes ventos e neve (Almeida, 2009).

O EN 1995, que trata das regras para segurança, manutenção e durabilidade das estruturas em madeira, está dividido em 3 partes. Foi atualizada em 2004 em substituição da versão anterior de 1993. A primeira contém princípios fundamentais para a verificação da estabilidade e regras específicas de cálculo. Os capítulos são constituídos de generalidades e são uma complementação à EN 1990 (bases de projeto) com questões específicas da madeira como classes de serviço (teor de água do ambiente onde o material será utilizado), classe de duração de cargas (podem ser permanentes, de média duração, de curta duração ou instantâneas – sismos e ventanias), fluência (deformação ao longo do tempo sob uma carga permanente) e deslocamento (efeito de translação ou rotação que ocorre entre dois elementos conectados por uma ligação semirrígida antes do seu colapso (Almeida, 2009), propriedade dos materiais, durabilidade e especificações de proteção, análises e cálculos de elementos estruturais, estados limite últimos e de utilização, conexões, componentes e sistemas estruturais e questões construtivas de execução. É importante destacar o capítulo específico para ligações e conexões, que deixa evidente a importância desses elementos no conjunto estrutural.

IBC:

O IBC (*International Building Code*) é o código utilizado nos Estados Unidos para normatizar as práticas construtivas. Antigamente essas regras eram elaboradas por região, estado ou município. Porém, nas últimas décadas, essas regulamentações foram revisadas e compiladas em um grande documento de abrangência nacional, o que padronizou bastante as práticas construtivas. Apesar de, na verdade, seu conteúdo ser muito menos restritivo que cada um dos regulamentos anteriores (Almeida, 2009). Determina, entre outras regras específicas, requisitos gerais de projeto, sistemas construtivos, regulamentação de diferentes materiais do ponto de vista da estabilidade, construção e qualidade dos elementos de madeira e seus conectores, classificação por ocupação, classificação por sistema construtivo, restrições de ocupação e de vãos e paredes exteriores em função do tipo de construção.

Lentamente, jurisdições nos Estados Unidos começam a reconhecer nos seus códigos de edificações com a adoção de novas regras que permitem que a madeira seja considerada um material de construção aceitável para edificações em altura. Em 2016 o IBC reuniu um novo comitê para pesquisar a expansão do CLT, principal produto para os avanços das técnicas de construção em madeira em altura, na atualização do código em 2021. O grande contraponto é o fato da madeira ser um material de rápida combustão quando comparado ao betão e aço. Porém, a tecnologia do produto em madeira a ser utilizado nas construções contemporâneas em altura apresentam características comprovadamente seguras, como já decorrido no capítulo 4.9.

## 6. CONCLUSÃO

### 6.1. VANTAGENS E DESVANTAGENS

Algumas vantagens da madeira como material estrutural:

- A madeira é renovável.
- A madeira é usinável.
- A madeira possui uma boa relação resistência / peso.
- A madeira não enferruja.
- A madeira é esteticamente agradável.

As desvantagens da madeira incluem o seguinte:

- A madeira é mais combustível que outros materiais de construção.
- A madeira pode apodrecer e pode ser atacada por insetos, como cupins e brocas marinhas. A umidade promove a decomposição e apodrecimento da madeira que pode levar a falhas estruturais.
  - A madeira retém umidade.
  - A madeira é suscetível à instabilidade volumétrica (ou seja, a madeira incha, encolhe e deforma).
- As propriedades da madeira são altamente variáveis e variam amplamente entre as espécies e até entre árvores da mesma espécie. Também há variação de força na seção transversal de um tronco de árvore (Aghayare, et al., 2017).

Primeiramente, já foi matematicamente provado que a escolha do material para concepção estrutural de uma edificação tem relação direta na quantidade final de emissão de CO<sub>2</sub>. Este trabalho de pesquisa indica que edificações que são construídas em madeira como elemento principal podem atingir significantes reduções na emissão de CO<sub>2</sub>. Além disso, o uso da madeira (um recurso renovável de relativa rapidez) aumenta a taxa de absorção de CO<sub>2</sub> com reflorestamento sustentável como fonte de recurso. Usar madeira no lugar do betão e do aço reduz as emissões de CO<sub>2</sub> de forma significativa. Após análise de diversos exemplos de construção em madeira em altura, estimativas indicam que é possível reduzir até 60% da pegada de carbono, dependendo do volume da construção e decisões de projeto. Uma edificação em madeira pode armazenar toneladas de CO<sub>2</sub>. Imaginemos o que isso representaria num bairro inteiro.

Particularmente importante para a evolução da construção de madeira em altura são os painéis de CLT. Essa tecnologia permitiu que a indústria da construção em madeira alcançasse a indústria do betão e do aço: Estruturalmente eficiente e superior em sustentabilidade. CLT é o futuro da arquitetura responsável.

Após todo estudo sobre o uso da madeira na construção em altura, a conclusão das vantagens em desenvolver este tipo de construção fica claro em alguns pontos principais: Redução da pegada de carbono, eficiência térmica, comprovada resistência ao fogo, boa performance antissísmica, eficiência e segurança na construção e novas regulamentações específicas.

Nos últimos anos, muitos projetos em altura de madeira foram concluídos em todo o mundo, demonstrando aplicações bem-sucedidas de novas tecnologias de madeira maciça. Uma pesquisa promovida pela FII e o BSLC para examinar dez edifícios altos internacionais de madeira e apresentar algumas lições comuns aprendidas com as experiências de várias partes interessadas, incluindo desenvolvedores, proprietários, equipe de design, autoridades com jurisdição e equipe de construção para cada projeto.

Existem muitas razões para decidir fazer um projeto em madeira maciça. Entre esses diversos motivos, podemos citar que são mais econômicos, ecologicamente corretos e rápidos de construir. Têm também um apelo estético e seus ambientes internos são mais favoráveis para a saúde humana.

Mas apesar de todas as vantagens já expostas, as equipes multidisciplinares que fizeram parte da pesquisa concordam com três motivações fundamentais:

- 1) **INOVAÇÃO:** Toda a inovação na indústria da construção civil em madeira está a trazer uma grande otimização no processo construtivo em si. A pré-fabricação fora do local de obra, reduz drasticamente os cronogramas de construção, e as propriedades únicas de produtos de madeira maciça estão criando oportunidades para repensar o design tradicional;
- 2) **LIDERANÇA DE MERCADO:** Proprietários, desenvolvedores e construtores querem se destacar no mercado. Querem desafiar as normas de construção e design e criar espaços criativos e funcionais que atendam às necessidades do consumidor moderno. Esse consumidor, quando busca um espaço residencial, busca mais que um teto sob o qual ele vai viver; ele quer conforto, aconchego e um lugar que se adapte ao seu estilo de vida. Já o consumidor corporativo procura espaços inovadores que reflitam as novas relações de trabalho;
- 3) **REDUÇÃO DA PEGADA DE CARBONO:** A madeira é 50% de carbono por peso seco, e produtos derivados da madeira consomem carbono durante seu ciclo de vida. O uso da madeira como material de construção primária resulta em uma economia significativa de carbono em comparação com materiais estruturais convencionais, como aço ou betão. Com a crescente conscientização da crise climática que o planeta vive, mais consumidores estão buscando opções sustentáveis e, para motivar essa conscientização e procura, muitos órgãos governamentais oferecem créditos e benefícios para construção de edifícios verdes e boas práticas de construção no que diz respeito à ecologia (Think Wood).

Na verdade, construir em madeira tem muitos benefícios para além da sustentabilidade. Das maiores vantagens podemos citar a redução da mão de obra, do desperdício de material em obra e do tempo de construção. Isso sem falar na economia de custos.

Outras grandes vantagens de construir em madeira são as reduções de força de trabalho, desperdício de material e tempo de construção. Não é necessário um grande número de trabalhadores especializados para a montagem. A madeira é um material extremamente fácil de trabalhar e não requer qualquer ferramenta especial no local de obra.

CLT e outros produtos derivados da madeira são manufaturados em fábricas com ambiente controlado, tolerâncias muito mais restritas e menor desperdício, o que significa redução no valor do material.

Edificações de madeira em altura precisam ser projetados de forma correta e representam um campo particular de projetos estruturais e de arquitetura, os quais ainda estão em desenvolvimento. Nós estamos no princípio do que pode vir a ser uma “virada de chave” que precisa ser feita devido a tantos problemas ambientais que enfrentamos neste século.

O maior obstáculo não parece ser a tecnologia necessária para realizar prédios altos em madeira pois engenheiros, arquitetos, empresas madeireiras, universidades e construtores mundo estão diariamente alcançando novos progressos e conquistas. Porém, a falta de familiaridade com essa tecnologia pode inibir uma tomada de decisão no princípio do projeto. A maioria da população ainda vê a construção em madeira com ideias preconcebidas: madeira não é resistente; madeira inflama; madeira apodrece. Esses conceitos já foram superados com inúmeros exemplos de sucesso por todo o mundo. Educar, disseminar esse conhecimento, é a melhor forma de terminar com esses conceitos ultrapassados.

Após educar os profissionais, ainda é preciso convencer a população, a opinião pública e investidores que a construção em madeira é hoje nossa única possibilidade que temos de construir, no volume que é necessário, de forma sustentável. É importante fazê-los compreender que não é suficiente construir edificações de baixa ou zero emissão de CO<sub>2</sub> depois que já estejam realizados, mas sim desde o princípio de sua concepção, na escolha da origem do material.

Construtores e investidores entendem muito melhor as vantagens financeiras do que as vantagens arquitetônicas e de sustentabilidade. É sempre interessante estimular o cliente de um projeto a entender todas as vantagens que o conceito arquitetônico traz embutido nele em relação aos materiais convencionais que são betão e aço.

Somente assim nós, como arquitetos, contribuiremos de forma eficiente para a saúde do planeta. Mas por enquanto a construção em madeira maciça ainda tem um longo caminho a percorrer antes de estar a ponto de competir com o mercado de betão e aço em larga escala, alguma luz podemos lançar sobre a trilha à frente.

As principais soluções encontradas pelos profissionais para enfrentar os desafios da construção em madeira: prefabricação de componentes de madeira maciça; colaboração intensa entre projetistas e construtores; e promoção da acessibilidade a soluções de problemas comuns.

## **6.2. CONTEXTO INTERNACIONAL**

Em Diversos países da Europa percebe-se o aumento do uso da madeira, principalmente na construção de edifícios de múltiplos pavimentos. Existem diversos motivos para a expansão desse mercado, entre eles o interesse pela economia de baixo carbono, resistência a sismos, qualidade dos ambientes internos, interesse na exploração florestal sustentável, mas o principal é o desenvolvimento de novas tecnologias construtivas e popularização da madeira engenheirada, principalmente da madeira lamelada colada e CLT.

A busca por alternativas construtivas com menor impacto ambiental começou na Europa, onde ainda acontece a maior parte da produção desses materiais. Sem dúvidas a nova tecnologia do CLT impulsionou de forma vertiginosa as novas técnicas de construção devido às suas qualidades já expostas. Foi essencial a parceria entre indústria e universidade para possibilitar a pesquisa e desenvolvimento do produto e sua primeira aplicação em projeto em 1998 no seu país de origem, a Áustria. Mas somente alguns anos de experiências e comprovação do seu desempenho é que seu uso se tornou significativo.

Por motivos evidentes, esse crescimento vem acontecendo mais expressivamente em países com volume maior de florestas e potencial de extração de madeira, como países escandinavos e alpinos. Além de desenvolver a economia de regiões de floresta, o reduzido custo de transporte do material é uma mais valia para custos globais de obra e conceito de sustentabilidade. Entretanto, países sem tradição de construção em madeira também estão se aventurando nesse mercado. A grande diferença é que nos países com tradição de construção em madeira, as investidas avançam para a construção em altura, enquanto nos países sem essa tradição, a construção ainda está focada em outras tipologias.

Após sua consolidação na Europa, as novas tecnologias começaram a ter sucesso em países como Canadá, Estados Unidos e Japão e estão em franco crescimento tanto na sua aplicação como no desenvolvimento de regulamentações necessárias para o desenvolvimento da indústria da construção em madeira em altura.

O aumento da produção a nível mundial reflete esse crescimento e, como consequência, novas pesquisas buscam mais conhecimento acerca das potencialidades e propriedades dos materiais derivados da madeira. Outro fator de extrema importância que pode ser considerado causa e consequência do aumento do número de construções em madeira em altura é a atuação de políticas ambientais em países de expressão nesse mercado como Reino Unido e Alemanha. Além, é claro, da popularidade dos primeiros empreendimentos que encorajaram investidores a fazer crescer esse mercado.

### **6.3. CONTEXTO NACIONAL**

Assim como em outros países, com a Industrialização do final do século XIX e início do século XX e surgimento de novos materiais de construção, a cultura da madeira e o manejo de florestas como fonte de recursos foram diminuindo em Portugal. A população desloca-se em massa para os centros urbanos em busca de novas oportunidades de trabalho e melhores salários. As construções existentes e artesãos desaparecem nas comunidades abandonadas e nos centros urbanos, o betão e o aço dominam a construção devido ao aumento da demanda de habitação repentina. Nos anos 1950 o betão armado já é usado em larga escala.

Nas duas últimas décadas assistiu-se em Portugal a um crescente interesse na madeira como material estrutural na construção, interesse este que se deve em grande parte à cobertura do Pavilhão Atlântico cuja estrutura tinha à data da sua construção o maior vão de madeira lamelada colada da Europa com 114 metros. O interesse neste material deve-se também ao crescente número de estudos realizados pelas universidades portuguesas em parcerias com empresas do sector das madeiras ou com a colaboração do LNEC (através do Núcleo de Estruturas de Madeira) (Fernandes, 2007).

Como incentivo e promoção da arquitetura contemporânea em madeira, surgiu em 2011, em parceria entre o Ministério da Agricultura através da AFN (Autoridade Florestal Nacional), a Ordem dos Arquitetos, o PNAM (Prêmio Nacional de Arquitetura em Madeira). Tem como objetivo incentivar e promover a indústria florestal portuguesa através da inovação, valorização, promoção e utilização da madeira e seus derivados em edificações (PNAM, 2011). Apesar do incentivo à construção em madeira, nenhum exemplar em altura foi desenvolvido ainda no país. Encontramos exemplos de obras residenciais, religiosas, hoteleiras e de lazer. Porém todas de alturas baixas.



FIGURA 6.3.1: Hotel Rural Casa do Rio do Arquiteto Francisco Vieira de Campos em Vila Nova de Foz Côa  
FONTE: PNAM.PT

Portugal é considerado um país rico em vegetação, mas que faz pouco uso de seus recursos florestais na construção. A destruição das florestas portuguesas, que se tornaram visíveis para todo o mundo após os incêndios de 2017, levantam a questão da urgência de desenvolver um pensamento racional sobre o potencial da floresta portuguesa. A arquitetura pode e deve ter um papel importante para valorizar o produto das florestas nacionais. Incentivos governamentais e educacionais são os primeiros passos para Portugal entrar na cena de tendências futuras da construção sustentável.

#### **6.4. PROJEÇÕES FUTURAS**

CLT é uma tecnologia emergente que vem abalando as práticas tradicionais. Entretanto, as indústrias do betão e do aço estão muito lentas em adaptar-se e envolver-se às mudanças do mundo.

Essas indústrias não se esforçam suficientemente ou não são capazes de reduzir sua pegada de carbono para ajudar ao combate ao aquecimento global. Por essa razão que resistem à evolução da construção, dos códigos regulamentadores e na aceitação da construção em madeira em larga escala.

Desde sua introdução no mercado na década de 1990, a produção de CLT não para de crescer exponencialmente, criando uma expectativa de mais de 3 milhões de m<sup>3</sup> nos próximos 10 anos com a introdução da produção dos mercados americanos, canadense e japonês como principais aceleradores dessa expansão (Revista da Madeira, 27).

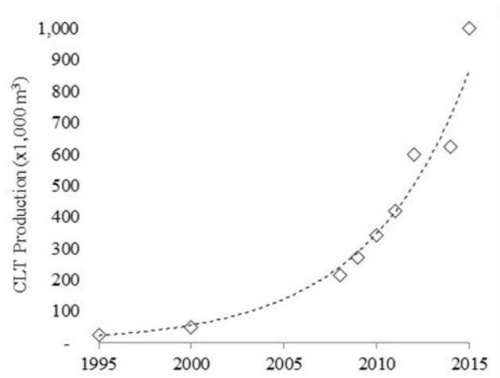


FIGURA 6.4.1: Crescimento da produção do CLT em m<sup>3</sup> ao longo dos anos  
FONTE: Planckner, 2014

Para que isso aconteça, é necessário algumas mudanças no universo da construção civil em escala global como, por exemplo, o aprimoramento das regulamentações específicas para CLT e Glulam, incluindo método produtivo, testes de laboratório, projetos de arquitetura, cálculo estrutural, detalhamento, ligações e execução.

Entretanto, os benefícios e propriedades da madeira engenheirada e principalmente do CLT como material de construção viável para edifícios em altura estão cada vez mais conhecidos. O CLT trouxe à tona não apenas as possibilidades de inovação na construção para um desenvolvimento sustentável, como para toda a indústria da construção mundial, que se encontrava estagnada em relação à tecnologia de materiais brutos há mais de 100 anos. Entretanto as particularidades da madeira e dos novos produtos dela derivados exigem considerações cuidadosas.

Em 2016 foi formada uma comissão para descobrir como incorporar as regras aplicáveis ao material no IBC (*International Building Code*). Hoje, a edificação em madeira está limitada a 6 pisos, por regulamentação. A proposta para a nova versão a ser publicada em 2021 é criar uma classificação que, através de normas de segurança específicas, permita chegar até 20 andares.

Ao contrário do que a maioria das pessoas pensam em relação aos problemas de construir em madeira, não é o fogo que representa o maior risco de problemas que podem ocorrer numa estrutura em madeira. Os edifícios em madeira não queimam tão facilmente como se imagina, ele carboniza. Já o concreto explode e o aço derrete em altas temperaturas. O real problema que é preciso evitar é a água. A causa mais grave do colapso de uma estrutura de madeira é, sem dúvidas, a deterioração das peças por exposição prolongada à humidade, que atrai fungos apodrecedores, insetos xilófagos e causam amolecimento das fibras e reduzindo a resistência da madeira.

Para evitar que a água se acumule na estrutura, é preciso muita atenção ao detalhamento e especificações (a madeira pode até molhar, só não pode é acumular humidade). O uso de madeira seca com baixo teor de humidade (sempre abaixo dos 12%); aplicação de

produtos hidrorrepelentes como velaturas e vernizes nas superfícies das peças; especificação correta da espécie de madeira; evitar contato com o solo; afastamento dos revestimentos como fachadas e paredes ventiladas e forros com caixa de ar são essenciais para a durabilidade do conjunto estrutural.

Para evitar o contato da estrutura de madeira com o solo, as fundações devem ser executadas de forma tradicional em betão armado. É recomendado também que o betão seja utilizado até o rés de chão para que a madeira fique realmente afastada dos riscos de contaminação biótica vinda do solo ou absorção da sua humidade.



FIGURA 6.4.2: Edifício Brock Commons no Canadá ainda em fase de execução: Fundação e rés de chão em betão armado  
FONTE: engenheironaweb.com

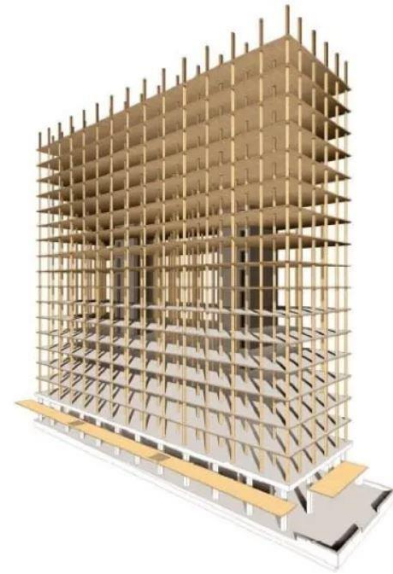


FIGURA 6.4.3: Esquema estrutural do Edifício Brock Commons no Canadá: Fundação e rés de chão em betão armado  
FONTE: engenheironaweb.com

Quanto ao afastamento dos revestimentos como fachadas e paredes ventiladas e forros afastados da laje por caixas de ar, são recursos utilizados também para evitar o acúmulo de água e humidade na estrutura. As fachadas ventiladas são painéis modulares com sistema *steel/frame*, fixados à estrutura da edificação. O afastamento entre as superfícies interna e externa cria uma câmara de ar, por onde ocorre a ventilação contínua no sentido vertical. Isso é possível graças ao sistema de juntas abertas das placas do revestimento. Ou seja, o espaço entre elas não é totalmente vedado nas partes inferiores e superiores. Assim, o ar frio entra pela abertura inferior e o ar quente sai pela abertura superior, criando o *efeito chaminé*. Essa ventilação garante que a água e humidade não se depositem ali e protege a estrutura, que está totalmente encapsulada por esse sistema. Além disso, o módulo como todo também é afastado da estrutura, aumentando ainda mais a proteção.



FIGURA 6.4.4: Fachadas do Edifício Brock Commons, no Canadá, em execução  
FONTE: The Earthbound Report



FIGURA 6.4.5: Esquema da fachada ventilada do Edifício Brock Commons, no Canadá  
FONTE: nvbcom

O principal obstáculo para a expansão massiva da construção em madeira engenheirada em altura é a difusão de conhecimento. A demanda existe, o mercado está pronto para receber obras dessa categoria. Porém, não há profissionais para atender a demanda. Quando refiro falta de profissionais, me refiro a diversas categorias relacionadas a todo processo produtivo de uma obra dessas. Desde arquitetos e engenheiros que vão idealizar e planejar o projeto, até a mão-de-obra para execução das peças e montagem no local. Contudo, a construção em madeira é pouco abordada dentro de universidades e entre empresas do meio, o que dificulta o uso em maior escala. Por isso, arquitetos ainda têm muito receio, construtores não conhecem e a mão de obra também não. Quem detém esse conhecimento está muito ocupado com a demanda que só cresce. É preciso unir equipes com experiência de execução, fabricantes de madeira engenheirada, pesquisadores e universidades para que isso realmente atinja a escala que se espera. As escolas ainda não abordam o assunto de forma substancial. Tem poucos docentes que realmente o dominam. A madeira laminada colada existe há anos, mas não há profissionais suficientes no país que permita construir mais de um prédio ao mesmo tempo, por exemplo.

É preciso arquitetos e engenheiros arrojados que se aventurem nessas experimentações e descobertas, assim como aconteceu com o betão e o aço há mais de 100 anos e educar a população acerca dos benefícios descritos ao longo dessa dissertação, inclusive profissionais e futuros profissionais que vão desenhar o futuro da construção através das escolhas que fizerem hoje.

Do ponto de vista de mercado imobiliário, a construção de um prédio de madeira envolve algumas mudanças no planejamento financeiro também. Tudo precisa acontecer em um prazo muito mais curto. Precisa ter outro modelo de negócio e de financiamento (Estado Conteúdo, 2020).

Embora o conceito de arranha-céus em madeira como o W350 no Japão sejam projetos impressionantes, com a tecnologia atualmente disponível não é possível executá-los. São projetos conceituais que servem para impulsionar e provocar a ciência, arquitetos e engenheiros na busca de soluções para os novos desafios. Servem também para chamar a atenção de governos que ainda não olharam de frente para essas mudanças tão necessárias (Dias, 2017).

Já passamos do momento de começarmos a enfrentar a necessidade de inovação e transformação da forma como construímos como algo necessário e possível, e não mais como uma possibilidade remota de um futuro distante. O futuro será o resultado das nossas atitudes agora.

## **BIBLIOGRAFIA** (de acordo com ISO 690)

[Online]

<http://engenhariacivil.com/>. [Online] [Citação: 8 de Julho de 2020.]

<https://archello.com/>. [Online] [Citação: 3 de Junho de 2020.]

<http://matanativa.com/>. [Online] [Citação: 21 de Julho de 2020.]

<http://structurecraft.com/>. [Online] [Citação: 25 de Julho de 2020.]

<https://www.dw.com/>. [Online] [Citação: 7 de Agosto de 2020.]

**Aghayare, Abe e Vigil, Jason. 2017.** *Structural Wood Design*. Boca Raton FL : CRC Press, 2017. 2ª Edição.

**Almeida, Filipe André Leitão de. 2012.** A Madeira como Material Estrutural: Projeto da Estrutura de um Edifício. *Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil - Especialização em Materiais e Processos de Construção*. Universidade do Porto : Faculdade de Engenharia , 2012.

**Almeida, Paulo Manuel dos Santos Pereira de. 2009.** Sistema construtivo de madeira em edifícios de habitação de baixa densidade. *Tese definitiva para a obtenção do grau de doutor no ramo de Arquitectura, na*. Lisboa : Universidade Técnica de Lisboa, 2009.

**American Wood Council. 2015.** <https://www.woodworks.org/wp-content/uploads/reThink-Wood-Designing-for-Earthquakes-Sept-2015.pdf>. <https://www.woodworks.org/>. [Online] ReThink Wood, Setembro de 2015. [Citação: 17 de Agosto de 2020.]

**Anders Vestergaard Jensen & Nic Craig. 2019.** *Wood in Construction: 25 Cases of Nordic Good Practices*. Denmark : Nordic Wood in Construction Secretariat, 2019.

**Archdaily. 2020.** <https://www.archdaily.com/>. [Online] 2020. [Citação: 17 de Agosto de 2020.]

**Archdaily. 2017.** <https://www.archdaily.com.br/br/867547/15-conexoes-metalicas-para-estruturas-de-madeira-laminada-arauco>. <https://www.archdaily.com.br>. [Online] Archdaily, 21 de Março de 2017. [Citação: 29 de Janeiro de 2021.]

**Arkitema Architects / Cowe.** *Timber: Multi-Storey Timber Building*.

**Bastrup-Birk, Annemarie. 2016.** <https://www.eea.europa.eu/pt/articles/uma-gestao-sustentavel-e-a>. <https://www.eea.europa.eu/>. [Online] 11 de Abril de 2016. [Citação: 13 de Maio de 2020.]

**Block, India. 2019.** <https://www.dezeen.com/2019/03/19/mjostarne-worlds-tallest-timber-tower-voll-arkitekter-norway/>. <https://www.dezeen.com/>. [Online] 19 de Março de 2019. [Citação: 16 de Agosto de 2020.]

**Boni, Filipe. 2019.** <https://www.ugreen.com.br/leed/>. <https://www.ugreen.com.br/>. [Online] UGREEN, 27 de Julho de 2019. [Citação: 02 de Junho de 2020.]

**Brito, J. 2004.** Diagnóstico, Patologia e Reabilitação de Construção de Madeira. *Materiais de apoio ao Curso de Mestrado em Ciências da Construção*. Coimbra : FCTUC, 2004.

**Brito, Leandro Dussarrat. 2014.** Patologia em Estruturas de Madeira: Metodologia de Inspeção e Técnicas de Reabilitação. *Dissertação de Doutoramento em Engenharia de Estruturas*. Escola de Engenharia de São Carlos : Universidade de São Paulo, 2014.

**Comissão Européia.** <https://ec.europa.eu/info/food-farming-fisheries/forestry/forestry-explained>. <https://ec.europa.eu/>. [Online] [Citação: 13 de Maio de 2020.]

**Costa, Ana Alexandra Pontes da. 2013.** Construção de Edifício com Cross Laminates Timber (CLT). *Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil - Especialidade em Construção Civil*. Universidade do Porto : Departamento de Engenharia Civil, 2013.

**Council on Tall Buildings and Urban Habitat. 2020.**

<https://www.skyscrapercenter.com/building/mjostarnet/26866>.

<https://www.skyscrapercenter.com>. [Online] Council on Tall Buildings and Urban Habitat, 2020. [Citação: 16 de Agosto de 2020.]

**Cruz, Helena e Nunes, Lina. 2015.** A Madeira como material de construção. s.l. : Núcleo de Estruturas de Madeira, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 2015.

**Cruz, Helena. 2001.** Patologia, avaliação e conservação de estruturas de madeira. *II Curso Livre Internacional de Patrimônio - Forum UNESCO Portugal*. Santarém : Associação portuguesa de municípios com centro histórico, 2001.

**CYPE Ingenieros SA. 2021.**

[http://www.geradordeprecos.info/obra\\_nova/Coberturas/Planas/Acessiveis\\_ao\\_ventiladas/QAB121\\_Cobertura\\_plana\\_acessivel\\_\\_ao\\_vent.html](http://www.geradordeprecos.info/obra_nova/Coberturas/Planas/Acessiveis_ao_ventiladas/QAB121_Cobertura_plana_acessivel__ao_vent.html). <http://www.geradordeprecos.info>.

[Online] CYPE Ingenieros SA, 2021. [Citação: 30 de Janeiro de 2021.]

**De estudantes para estudantes.** Manuais da Madeira na Arquitetura Contemporânea. Brasil : Universidade Federal do Paraná.

**Dias, Alan. 2017.** <https://carpinteria.com.br/>. [Online] 2017. [Citação: 08 de Agosto de 2020.]

**Estadão Conteúdo. 2020.** <https://revistapegn.globo.com/Banco-de-ideias/Econegocio/noticia/2020/01/pegn-tendencia-mundial-predios-de-madeira-comecam-a-ser-erguidos-em-sao-paulo.html>. <https://revistapegn.globo.com/>. [Online] 3 de Janeiro de 2020. [Citação: 24 de Março de 2020.]

**Fernandes, Paulo Jorge Correia Trindade da Costa. 2007.** A História da Madeira como Material na Arquitetura. *Dissertação de Mestrado*. Universidade Lusíada de Lisboa : Faculdade de Arquitetura e Artes, 2007.

**Ferreira, Kellison. 2019.** <https://rockcontent.com/br/blog/triple-bottom-line/>.

<https://rockcontent.com/>. [Online] ROCK CONTENT, 26 de Fevereiro de 2019. [Citação: 07 de Abril de 2020.]

**Futuro Exponencial. 2018.** <https://futuroexponencial.com/toquio-edificio-madeira-alto-mundo/>. <https://futuroexponencial.com/>. [Online] 27 de Novembro de 2018. [Citação: 17 de Agosto de 2020.]

**Gagnon, S. e Pirvu, C. 2011.** *CLT handbook: cross-laminated timber*. Québec : FPInnovations, 2011.

**Germano, Michael A. 2018.** Mass Timber: Expanding the Sustainable Design Domain. *Master's Degree Project*. University of Florida, USA : School of Architecture, 2018.

**Green, Michael e Taggart, Jim. 2019.** Tall Wood buildings: Seven Perspectives on the Use of Timber in Building Design and Construction. London : Aroup, 2019.

- <https://g1.globo.com/>. <https://g1.globo.com/>. [Online] [Citação: 09 de Abril de 2020.]
- <https://madeiraestrutural.wordpress.com/>. [Online] [Citação: 29 de Maio de 2020.]
- Husson, Jean-Marie. 2009.** Loi comportement viscoélastique avec effet mémoire application à la mécanosorption dans le bois. *thèse de doctorat*. L'université de Limoges : s.n., 2009.
- Jefree, Mike. 2018.** Wood: Building the Economy. s.l. : European Union, 2018.
- Kaufmann, Hermann, Krortsch, Stefan e Winter, Stefan. 2019.** Manual of Multi-storey Timber Construction. Munich : Detail, 2019.
- Lago, Marta Piñeiro.** High Rise Wooden Buildings in Contemporary Architecture.
- Lennartz, Marc Wilhelm e Jacob-Freitag, Susanne. 2015.** New Architecture in Wood: Forms and Structure. Verlag : Birkhauser, 2015.
- Lynch, Patrick. 2018.** [https://www.archdaily.com/889142/japan-plans-for-supertall-wooden-skyscraper-in-tokyo-by-2041?ad\\_source=search&ad\\_medium=search\\_result\\_all](https://www.archdaily.com/889142/japan-plans-for-supertall-wooden-skyscraper-in-tokyo-by-2041?ad_source=search&ad_medium=search_result_all). <https://www.archdaily.com/>. [Online] 15 de Fevereiro de 2018. [Citação: 17 de Agosto de 2020.]
- Madeira Engenheirada. 2020.** <https://www.instagram.com/madeira.engenheirada/>. [Online] 2020.
- Mello, Robert Lecomte de. 2007.** Projetar em Madeira: Uma Nova Abordagem. *Dissertação de Mestrado*. Universidade de Brasília : Faculdade de Arquitetura e Urbanismo. , 2007.
- Migliani, Audrey. 2019.** <https://www.archdaily.com/>. <https://www.archdaily.com/928387/what-is-glued-laminated-wood-glulam>. [Online] Archdaily, 19 de Novembro de 2019. [Citação: 17 de Agosto de 2020.]
- Moore, Rowan. 2019.** <https://carpinteria.com.br/2019/05/24/por-que-a-madeira-esta-de-volta-no-topo-da-arvore-para-arquitetos/>. <https://carpinteria.com.br/blog/>. [Online] The Observer, 24 de Maio de 2019. [Citação: 18 de Março de 2020.]
- Moreschi, J. C. 2013.** Biodegradação e preservação da madeira. *Biodegradação da madeira*. Curitiba : Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal da Universidade Federal do Paraná, 2013. Vol. 1.4.
- Msuya, Joyce. 2020.** Diretora Executiva Adjunta do programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente, no nível do Secretário-Geral Adjunto. Forum Urbano Mundial de Abu Dhabi : s.n., 2020.
- . **2019.** <https://www.unep.org/news-and-stories/press-release/world-leaders-gather-uns-top-environmental-body-ramp-solutions>. <https://www.unenvironment.org/>. [Online] ONU, 10 de Março de 2019. [Citação: 08 de Abril de 2020.]
- NASA/GISS. 2020.** <https://climate.nasa.gov/evidence/>. <https://climate.nasa.gov/>. [Online] Earth Science Communications Team at NASA's Jet Propulsion Laboratory, 04 de 2020. [Citação: 08 de Abril de 2020.]
- Nègre, François. 2020.** <https://www.europarl.europa.eu/factsheets/pt/sheet/105/a-uniao-europeia-e-as-florestas>. <https://www.europarl.europa.eu/>. [Online] Novembro de 2020. [Citação: 30 de Novembro de 2020.]

**Oliveira, Gabriela Latufo. 2018.** Cross Laminated Timber (CLT) no Brasil: Processo construtivo e Desempenho. *Programa de Pós Graduação em Arquitetura e Urbanismo*. Universidade de São Paulo : Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, 2018.

**ONU. 2019.** <https://brasil.un.org/pt-br/node/88191>. <https://brasil.un.org/>. [Online] ONU, 2019. [Citação: 08 de Abril de 2020.]

**Palma, Pedro Manuel Coutinho. 2009.** Ligações Tradicionais em Estrutura de Madeira: Avaliação Experimental do Comportamento Mecânico. *Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil*. Universidade Técnica de Lisboa : Departamento de Engenharia Civil, 2009.

**Pereira, M. C. M., Sohier, L. A. P. e Junior, C. Calil. 2018.** Theoretical and experimental analysis of the wooden dowel connection to a DLT panel. In: XX Simpósio em Ciência e Engenharia de Materiais. *Anais do XX Simpósio em Ciência e Engenharia de Materiais*. São Carlos : EESC, 2018.

**Pintos, Paula. 2020.** <https://www.archdaily.com/934374/mjostarnet-the-tower-of-lake-mjosa-voll-arkitekter>. <https://www.archdaily.com/>. [Online] 25 de Fevereiro de 2020. [Citação: 16 de Agosto de 2020.]

**PNAM. 2011.** <https://pnam.pt/>. [Online] 2011. [Citação: 21 de Agosto de 2020.]

**Revista da Madeira. 27.** Revista da Madeira. *Madeira Laminada Colada Cruzada: Produção e Desenvolvimento*. 156, 27, p.12.

**Ritter, M. A. e Morrell, J. J. 1990.** Timber Bridges: Design, Construction, Inspection and Maintenance. United States : United States Department of Agriculture. Forest Service, 1990.

**Rodgers, Lucy. 2018.** <https://www.bbc.com/portuguese/geral-46591753>. <https://www.bbc.com/>. [Online] BBC News, 17 de Dezembro de 2018. [Citação: 8 de Abril de 2020.]

**Salvadori, Vittorio. 2017.** The Development of a Tall Wood Building. *Master's Degree Project*. Politécnico di Milano : s.n., 2017.

**Santos, Vanessa Sardinha dos. 2016.** <https://brasilescola.uol.com.br/o-que-e/biologia/o-que-e-celulose.htm>. <https://brasilescola.uol.com.br/>. [Online] 2016. [Citação: 03 de Julho de 2020.]

**Shigue, Erich Kazuo. 2018.** Difusão da Construção em Madeira no Brasil: Agentes, ações e Produtos. *Dissertação de Mestrado*. Universidade de São Paulo : Instituto de Arquitetura e Urbanismo, 2018.

**Smartwood. 2018.** <https://mysmartwood.com/empresa-japonesa-planeia-o-edificio-de-madeira-mais-alto-do-mundo/>. <https://mysmartwood.com/>. [Online] 9 de Agosto de 2018. [Citação: 17 de Agosto de 2020.]

**Tavares, Simone Fernandes, Ino, Akemi e Ometto, Aldo R. 2017.** Construção em Madeira e Edificação Circular: Potencialidades para a sustentabilidade. São Paulo : USP, 2017.

**Taylor, Molly. 2017.** Mass Timber Methods: An Investigation of Approaches to the Challenges, Opportunities and Wellness Benefits of Mass Timber Architecture. s.l. : Hart Howerton Travel Research Fellow, 2017.

**Think Wood.** <https://www.thinkwood.com/wood-performance-and-design>. <https://www.thinkwood.com/>. [Online] [Citação: 18 de Março de 2020.]

**Torres, João tiago Caridade. 2010.** Sistemas Construtivos Modernos em Madeira. *Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil*. Universidade do Porto : Faculdade de Engenharia Civil, 2010.

**Weinan, Yves.** Advanced Timber Structures: Architecture Designs and Digital Dimensioning.

**www.climainfo.org.br.** <https://www.climainfo.org.br/>. [Online] [Citação: 07 de Abril de 2020.]