Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo
Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo

Cross Laminated Timber (CLT) no Brasil: processo construtivo e desempenho

Recomendações para o processo de projeto arquitetônico

Gabriela Lotufo Oliveira

São Paulo
2018

Cross Laminated Timber (CLT) no Brasil: processo construtivo e desempenho

Recomendações para o processo de projeto arquitetônico

Dissertação apresentada no Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo (USP) para obtenção do título de Mestre em Arquitetura.

Exemplar revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade da autora e anuência da orientadora.

Aluna: Gabriela Lotufo Oliveira

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Fabiana Lopes de Oliveira

São Paulo, 2018

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Catálogo na Publicação
Serviço Técnico de Biblioteca
Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo

Oliveira, Gabriela Lotufo

Cross Laminated Timber (CLT) no Brasil: processo construtivo e desempenho / Gabriela Lotufo Oliveira; orientadora Fabiana Lopes de Oliveira. - São Paulo, 2018. 192 p.

Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo. Área de concentração: Tecnologia da Arquitetura.

1. Cross Laminated Timber. 2. Estruturas de Madeira. 3. Sistema Construtivo Inovador. 4. Desempenho. I. Oliveira, Fabiana Lopes de, orient. II. Título.

Agradecimentos

A presente pesquisa é decorrência de um estudo realizado de maneira contínua desde o ano de 2015, quando foi estabelecido o primeiro contato com a tecnologia construtiva analisada, durante a elaboração do Trabalho Final de Graduação na FAUUSP. Este contato estreitou-se entre o ano de 2016 e primeiro semestre de 2017, período no qual a pesquisadora atuou como arquiteta no atual fabricante nacional de painéis de CLT. O aprofundamento do estudo deu-se durante o Mestrado, com apoio financeiro da CAPES¹, e participação no programa IPT Novos Talentos, resultando na dissertação aqui apresentada. Assim, sou profundamente grata a todos que participaram desses momentos, contribuindo para o resultado final: aos amigos e professores da graduação, aos profissionais da Crosslam, aos funcionários e pesquisadores do IPT, aos colegas e professores da pós-graduação.

Pelo auxílio e colaboração, agradeço ainda ao Laboratório de Madeiras e Estruturas de Madeira (LAMEM), ao Me. Marcos Pereira e ao Prof. Dr. Carlito Calil Júnior. Pelas trocas de informações, contribuições e fornecimento de arquivos, agradeço aos arquitetos Antônio Carlos Barossi, Sérgio Sampaio e André Hauser. Um agradecimento também ao José Alberto Corrêa Gonçalves, pelo apoio na realização desse trabalho, pelas discussões e pelo fornecimento dos painéis e informações relevantes ao desenvolvimento da pesquisa.

Ao meu coorientador, Dr. Sérgio Brazolin, expresso aqui minha gratidão pela dedicação, auxílio e, acima de tudo, orientação na busca pelos conhecimentos necessários para ampliar a compreensão do tema estudado.

Agradeço ainda, especialmente, à minha orientadora, Prof^a. Dr^a. Fabiana Oliveira, que com muita paciência e dedicação me incentivou a buscar sempre perfeição durante esse processo, orientando os melhores caminhos a serem seguidos, tanto em termos acadêmicos como pessoais.

Finalmente, aos familiares mais próximos, que me amparam diariamente, nas crises e alegrias, contribuindo para o suporte emocional que possibilitou concluir essa jornada: à minha irmã Beatriz, ao meu noivo Bruno e aos meus pais Desirée e Jorge. Em particular, agradeço à minha mãe pela leitura paciente e correção interativa do trabalho, e à minha irmã, pela formatação.

¹ O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Resumo

Painéis de *Cross Laminated Timber* (CLT) consistem em um elemento construtivo relativamente novo no cenário da construção civil internacional. No Brasil, a fabricação desta tecnologia iniciou-se há cerca de seis anos. Em razão de sua incipiente utilização em território nacional, não se formou ainda bibliografia consistente a seu respeito, suscitando questionamentos sobre o desempenho dos painéis ao longo da vida útil da edificação. Deve-se ressaltar também que o elemento construtivo estudado consiste em uma inovação, associada à pré-fabricação e a técnicas de fabricação digital, diferenciando-se das tecnologias convencionais com as quais arquitetos e projetistas estão acostumados a projetar. Consequentemente, observam-se frequentes dúvidas não apenas sobre o desempenho dos painéis, mas também associadas a como projetar, de forma eficaz e apropriada, um edifício em CLT. Logo, surge o interesse em aprofundar os estudos acerca da tecnologia, com o intuito de propor, ao final da pesquisa, recomendações para projetos arquitetônicos que visem incorporar painéis de CLT de produção brasileira. Dessa forma, estudou-se tanto o desempenho do elemento construtivo, no que diz respeito à segurança estrutural e à durabilidade, conforme a ABNT NBR 15575:2013, quanto o processo construtivo de edificações em CLT. Para a análise de desempenho mencionada foram realizados os seguintes ensaios laboratoriais: retenção e penetração do produto preservativo na matéria-prima utilizada para a fabricação dos painéis nacionais; impacto de corpo mole, impacto de corpo duro e determinação da resistência do painel às solicitações de peças suspensas; estanqueidade à água; verificação do comportamento do painel exposto à ação de calor e choque térmico; ensaios de delaminação. Ao final, em vista de inconformidades apontadas em alguns ensaios, constatou-se a necessidade de assegurar a qualidade no tratamento da matéria-prima e na colagem das lamelas, de modo a garantir a devida vida útil da edificação. Concluiu-se, também, que o CLT se apresenta, de fato, como uma alternativa extremamente promissora na construção civil. Contudo, seu emprego, deve ser planejado de maneira a se compreender e respeitar a intrínseca relação existente entre suas etapas construtivas e as soluções técnicas e arquitetônicas, para que se garanta adequado desempenho da edificação em uso.

Palavras-chave: *Cross Laminated Timber* (CLT), estruturas de madeira, sistema construtivo inovador, desempenho.

Abstract

Cross Laminated Timber (CLT) panels are a relatively new building component to the international construction sector. Their production in Brazil started around six years ago. Since its use is still scarce in the country, academic and technical references are still rare and there are uncertainties about the performance of the panels during the life of the building. In addition, CLT can be considered as an innovation, which is associated to pre-fabrication and digital technologies, being consequently different from usual building techniques. Therefore, the doubts concern not only the panels performance but also the appropriate design of the CLT building. In order to provide recommendations for architectural designs which will use Brazilian CLT panels, this research aims to extend the investigation of CLT in Brazil. The study focuses on structural performance and durability of CLT panels, according to the Brazilian regulation ABNT NBR 15575, and on the construction process of CLT buildings. The performance analysis is based on the following laboratory tests: retention and penetration of the wood preservatives used in the panels manufacture; soft body impact and hard body impact tests and suspended pieces loading tests; water tightness; heat and thermal shock test; delamination tests. Some of the tests results showed nonconformities. This indicates the importance of a quality control process of the wood preservation treatment and bonding of CLT layers, to ensure the proper performance of the building. In conclusion, CLT panels are indeed a promising alternative to the construction sector. However, its use must respect the intrinsic relation between construction steps, as well as technical and architectural solutions, in order to guarantee adequate performance of the CLT building.

Keywords: *Cross Laminated Timber (CLT), wood structures, innovative building system, performance.*

Lista de Figuras

Figura 01: Esquema de configuração dos perfis verticais de madeira no (a) Sistema Balão; (b) Sistema Plataforma.	28
Figura 02: Configuração de elementos construtivos em (a) MLC e (b) CLT.	32
Figura 03: Esquema de configuração de um painel de CLT, com base nos conceitos apresentados em EN (2015), ANSI/APA (2017) e BRANDNER <i>et al</i> (2016).	36
Figura 04: <i>Finger-joint</i> (a) na superfície da lamela e (b) na lateral.	38
Figura 05: Painel de CLT (a) com e (b) sem colagem lateral.	40
Figura 06: Esquema de configuração de um painel de CLT com camada central dupla.	40
Figura 07: Exemplos de conexões entre painéis de CLT, sendo: (a) conexões entre duas paredes ou duas lajes; (b) conexões entre lajes e paredes; (c) conexões entre paredes e fundações.	42
Figura 08: Edifício Brock Commons.	48
Figura 09: Edifício The Tree.	48
Figura 10: Edifício Murray Grove.	48
Figura 11: Obra 01.	62
Figura 12: Obra 05.	62
Figura 13: Obra 08.	62
Figura 14: Obra 10.	63
Figura 15: Obra 11.	63
Figura 16: Obra 12.	63
Figura 17: Obra 13.	64
Figura 18: Obra 14.	64
Figura 19: Obra 15.	64
Figura 20: Obra 18.	65
Figura 21: Obra 19.	65
Figura 22: Obra 23 em construção.	65
Figura 23: Diagrama ilustrando o processo construtivo em CLT.	68
Figura 24: Corte transversal do caule de uma (a) conífera, com idade de cerca de 10 anos, e de uma (b) folhosa.	72
Figura 25: Exemplo de duas fachadas de um mesmo edifício sendo uma (esq.) protegida, sem sofrer a ação do <i>weathering</i> e outra (dir.) exposta, com superfície acinzentada pela ação do <i>weathering</i>	76
Figura 26: madeira atacada por fungos manchadores (esq.) antes de ser aplainada e (dir.) após ser aplainada.	76
Figura 27: Madeira atacada por fungos emboloradores (esq.) antes de ser aplainada e (dir.) após ser aplainada.	76
Figura 28: Fungos de podridão, sendo (a) podridão mole, (b) podridão parda e (c) podridão branca.	76

Figura 29: Ciclo de vida de uma broca de madeira.....	78
Figura 30: (a) broca de madeira adulta e (b) madeiras atacadas.	78
Figura 31: Exemplo do ataque de cupins de madeira seca.....	80
Figura 32: Exemplo de ninho de cupim epígeo.	80
Figura 33: Exemplo de ninho de cupim arborícola.	80
Figura 34: Diagrama ilustrando o Plano de Corte.	88
Figura 35: Ligação das lamelas de pinus por meio de <i>finger-joints</i>	90
Figura 36: Aplicação do adesivo estrutural.....	90
Figura 37: Posicionamento das lamelas de pinus de forma a criar camadas perpendiculares entre si.	90
Figura 38: Esquema de funcionamento de um equipamento de usinagem com cinco eixos.	92
Figura 39: Equipamento de usinagem do fabricante nacional de CLT.	92
Figura 40: Projeto Obra 16.....	96
Figura 41: Projeto da residência da Obra 23.....	96
Figura 42: Plano de montagem da Obra 16. (a) vista posterior; (b) vista frontal da residência.....	98
Figura 43: Perspectivas presente no Plano de montagem da Obra 23. (a) perspectiva ilustrando os elementos de laje; (b) perspectiva ilustrando os elementos de parede.....	98
Figura 44: Plano de carga da Obra 16, sendo (a) carga do primeiro dia, (b) detalhe de posicionamento das peças e (c) carga do segundo dia.	100
Figura 45: Transferência da carga do frete para o caminhão munck durante a montagem da Obra 16.....	100
Figura 46: Esquema ilustrando a sequência de carga e de posicionamento das peças.....	102
Figura 47: Movimentação das peças em CLT pelo caminhão munck na montagem da Obra 16. .	106
Figura 48: Movimentação das peças em CLT pelo caminhão munck na montagem da Obra 23 .	106
Figura 49: Abertura da lança manual do caminhão munck na montagem da Obra 16.	106
Figura 50: Linha de silicone resistente às intempéries aplicada antes da conexão entre duas vedações em CLT alinhadas, durante a montagem da Obra 12.	108
Figura 51: Parafusos do tipo VGZ (esq.) e HBS (dir.) da Rotoblaas®. O primeiro possui comprimento de 140 mm e o segundo 180 mm.	108
Figura 52: Cantoneira metálica utilizada na Obra 23.	108
Figura 53: Conexão entre duas paredes de CLT alinhadas, por meio de parafusos VGZ (escala 1:10).	110
Figura 54: Conexão entre duas vedações ou uma laje e uma vedação, dispostas entre si de forma perpendicular, por meio de conectores em T (escala 1:10).....	110
Figura 55: Conexão de elementos em CLT na fundação em concreto por meio de cantoneiras metálicas (escala 1:10).	111
Figura 56: Conexão de elementos em CLT na fundação em concreto por meio de chapas metálicas (escala 1:10).	111
Figura 57: Conexão de elementos em CLT na fundação em concreto por meio de perfis e chapas metálicos (escala 1:10).	111

Figura 58: Exemplo de conexão de elementos em CLT na fundação em concreto por meio de perfis e chapas metálicos.	112
Figura 59: Aplicação da fita de EPDM na face inferior do elemento em CLT na Obra 16.	112
Figura 60: Conexão das vedações em CLT na fundação em concreto, na Obra 23.	112
Figura 61: Usinagem na vedação da Obra 23 para passagem dos conduítes elétricos.	114
Figura 62: Detalhe construtivo ilustrando o <i>shaft</i> para passagem das tubulações hidráulicas.	114
Figura 63: Perfis de drywall fixados na vedação em CLT da cozinha da Obra 23, os quais estruturam o shaft para passagem das tubulações hidráulicas.	114
Figura 64: Obra 16 após finalização da montagem e antes da execução da limpeza.	116
Figura 65: Esquema ilustrando a instalação de revestimentos cerâmicos em elementos construtivos em CLT (medidas em centímetros).	116
Figura 66: Esquema ilustrando uma fachada ventilada com acabamento em madeira (medidas em centímetros).	118
Figura 67: Obra 23 após a aplicação da fachada EIFS (Exterior Insulation and Finish System), na cor branca. A fachada ventilada em madeira, a qual seria instalada no interior das varandas, ainda não havia sido finalizada até o término desta pesquisa.	118
Figura 68: Esquema dos painéis externos da Obra 05 (sem escala).	120
Figura 69: Visualização da cobertura da Obra 23 após aplicação da manta de PVC.	120
Figura 70: Esquema comparativo entre duas edificações fictícias quanto ao aproveitamento da montagem.	122
Figura 71: Exemplo das amostras de pinus que apresentaram penetração irregular do produto preservativo CCB.	128
Figura 72: Projeto do corpo de prova realizado para averiguação do desempenho estrutural do painel de CLT. Medidas em milímetro (sem escala).	130
Figura 73: Parafusos testados no ensaio de peça suspensa, sendo (a) parafuso HBS 6 x 60 da Rothoblaas® e (b) parafuso para MDF no tamanho 4,5 x 60.	132
Figura 74: Realização do ensaio de peça suspensa.	132
Figura 75: Esquema ilustrando o paquímetro de profundidade a ser utilizado no ensaio de verificação da resistência do painel aos impactos de corpo mole.	134
Figura 76: Medição do deslocamento horizontal instantâneo e residual durante ensaio de verificação da resistência do painel aos impactos de corpo mole	134
Figura 77: Marcas dos impactos dos corpos duros nos painéis de CLT após ensaio de impactos de corpo duro.	136
Figura 78: Realização do ensaio de impactos de corpo mole.	136
Figura 79: Registro do deslocamento horizontal instantâneo após ensaio de impactos de corpo mole.	136
Figura 80: Esquema ilustrando a aparelhagem do ensaio de estanqueidade à água.	144
Figura 81: Corpo de Prova 02 instalado na câmara de formato prismático antes do início do ensaio de estanqueidade à água.	144
Figura 82: Projeto dos corpos de prova submetidos aos ensaios de estanqueidade à água	146

Figura 83: Aplicação da linha de selante de silicone resistente às intempéries durante a montagem dos corpos de prova.....	146
Figura 84: Corpo de Prova 01 após ensaio de estanqueidade à água.....	148
Figura 85: Corpo de Prova 02 após ensaio de estanqueidade à água.	149
Figura 86: Teor de umidade verificado na face dos corpos de prova expostas à água durante o ensaio de estanqueidade à água.	150
Figura 87: Junta do Corpo de Prova 01 aberta.	150
Figura 88: Junta do Corpo de Prova 02 aberta	150
Figura 89: Projeto do corpo de prova submetido ao ensaio de calor e choque térmico.	154
Figura 90: Aplicação das duas linhas de selante de silicone no painel de CLT	155
Figura 91: Corpo de prova instalado no dispositivo de ensaio após aplicação superficial de <i>stain</i>	155
Figura 92: Esquema de extração dos corpos de prova para ensaio de delaminação.	158
Figura 93: Posicionamento dos corpos de prova na autoclave.	160
Figura 94: Exemplo de fissura considerada como delaminação.	160
Figura 95: Exemplo de falha na madeira ocasionada pelo nó e não considerada como delaminação.	160
Figura 96: Linha de cola aberta do Corpo de Prova 4D, sem nenhuma falha na madeira.	162
Figura 97: Linha de cola aberta do Corpo de Prova 2J b.....	162
Figura 98: Cálculo da área de falha na madeira (em azul) do Corpo de Prova 2J b no <i>software</i> AutoCAD.	162
Figura 99: Projeto esquemático de edificação fictícia ilustrando o aproveitamento do Plano de Corte. Medidas em metros.	176

Lista de Gráficos

Gráfico 01: Número de edificações em CLT construídas por ano.....	56
Gráfico 02: Porcentagem de edificações em CLT construídas por local.....	56
Gráfico 03: Número de edificações em CLT construídas por uso e ano.....	56

Lista de Tabelas

Tabela 01: Levantamento das edificações em CLT no Brasil. Fonte: da autora (2018).	58
Tabela 02: Categorias de uso. Fonte: adaptado da ABNT NBR 16143:2013.	84
Tabela 03: Modelos de veículos utilizados no transporte dos elementos construtivos nacionais em CLT.	104
Tabela 04: Resultados dos ensaios de retenção e penetração realizados nas amostras de pinus.	127
Tabela 05: Profundidade das mossas verificadas em cada impacto de corpo duro.	138
Tabela 06: Deslocamentos verificados em cada impacto de corpo mole.	138
Tabela 07: Impacto de corpo mole para vedações verticais internas.	140
Tabela 08: Impactos de corpo mole para vedações verticais externas (fachadas) de casas térreas, com função estrutural.	141
Tabela 09: Impactos de corpo mole para vedações verticais externas (fachadas) de casas térreas, sem função estrutural, constituídas por elementos leves ($G < 60 \text{ kg/m}^2$).	142
Tabela 10: Compilação dos resultados encontrados para os deslocamentos horizontais do painel ensaiado.	142
Tabela 11: Deslocamento horizontal verificado a cada ciclo de calor e choque térmico a que foi submetido o painel de CLT.	156
Tabela 12: Valores encontrados para os comprimentos de delaminação máximos nos corpos de prova ensaiados.	164
Tabela 13: Valores encontrados para os comprimentos de delaminação totais dos corpos de prova ensaiados.	165
Tabela 14: Valores encontrados para as áreas de falha na madeira na linha de cola separada dos corpos de prova que apresentaram delaminação excedente aos valores estabelecidos em norma.	166

Sumário

1. Introdução	17
1.1. Justificativa	21
1.2. Objetivos	22
1.3. Metodologia.....	22
2. <i>Cross Laminated Timber</i>: contextualização.....	25
2.1. Inserção do CLT no cenário atual da construção civil.....	26
2.2. Panorama internacional do CLT	34
2.2.1. Desenvolvimento arquitetônico	47
2.3. Panorama nacional do CLT	50
2.3.1. Desenvolvimento arquitetônico	55
3. <i>Cross Laminated Timber</i>: processo construtivo.....	67
3.1. Matéria-prima.....	70
3.1.1. Características morfológicas e fisiológicas da madeira	73
3.1.2. Agentes deterioradores.....	74
3.1.3. Métodos de preservação	82
3.2. Fabricação.....	87
3.2.1. Projeto dos painéis	89
3.2.2. Seleção da madeira	91
3.2.3. Emenda das lamelas (<i>finger-joint</i>).....	91
3.2.4. Montagem e prensagem	91
3.2.5. Corte e usinagem.....	93
3.2.6. Finalização	94
3.3. Montagem	95
3.3.1. Plano de montagem.....	99
3.3.2. Plano de carga	101
3.3.3. Transporte	105
3.3.4. Posicionamento	107
3.3.5. Conexões	109
3.3.6. Instalações	115
3.3.7. Acabamentos.....	117
3.3.8. Duração da montagem	123
4. <i>Cross Laminated Timber</i>: desempenho	125
4.1. Ensaio de retenção e penetração do produto preservativo CCB	126
4.1.1. Materiais.....	126
4.1.2. Métodos	126
4.1.3. Resultados.....	127
4.1.4. Análise dos resultados.....	129

4.2.	Desempenho estrutural	131
4.2.1.	Materiais.....	131
4.2.2.	Métodos	133
4.2.3.	Resultados	137
4.2.4.	Análise dos resultados	137
4.3.	Estanqueidade à água.....	145
4.3.1.	Método.....	145
4.3.2.	Materiais.....	147
4.3.3.	Resultados	147
4.3.4.	Análise dos resultados	151
4.4.	Resistência à ação de calor e choque térmico	152
4.4.1.	Métodos.....	152
4.4.2.	Materiais.....	153
4.4.3.	Resultados	157
4.4.4.	Análise dos resultados	157
4.5.	Delaminação	159
4.5.1.	Material	159
4.5.2.	Método.....	159
4.5.3.	Resultados	163
4.5.4.	Análise dos resultados	167
5.	Considerações finais.....	169
5.1.	As interferências do emprego do CLT no projeto arquitetônico	170
5.1.1.	Matéria-prima.....	171
5.1.2.	Fabricação.....	175
5.1.3.	Montagem	178
5.1.4.	Acabamentos	180
5.2.	Recomendações de projeto para edificações em CLT	182
5.3.	Conclusões.....	184
	Referências Bibliográficas.....	187

1.

INTRODUÇÃO

A utilização da madeira na construção civil remete aos primórdios do desenvolvimento humano, estando ao alcance do homem, desde os tempos mais remotos. O elemento vegetal foi um dos primeiros materiais a ser utilizado pela Humanidade, para sua defesa, aquecimento, preparação de alimentos, iluminação, primeiras formas de habitação e primeiras embarcações (LOURENÇO; BRANCO, 2013). No caso específico da construção civil, o início da aplicação da madeira como matéria-prima data do período Neolítico, aproximadamente entre 12000 a.C. e 4000 a.C., frente à necessidade do homem de construir abrigos para se proteger (COSTA, 2013). Nesse sentido, como consequência de seu emprego abrangente, até o século XX a madeira poderia ser considerada como uma das principais matérias-primas utilizadas pelo setor da construção. Contudo, o desenvolvimento de novas técnicas construtivas, em especial do concreto armado, ocasionou no declínio de seu uso como elemento estrutural.

Segundo COSTA (2013) as estruturas em madeira dividem-se em três tipos: casas tronco (*Loghomes*), estruturas em madeira pesada (*Heavy Timber*) e estruturas em madeira leve (*Light Framing*). Entretanto, é possível acrescentar ainda nessa classificação o grupo dos sistemas lamelados em madeira, dentre os quais podem ser mencionados painéis de *Cross Laminated Timber* (CLT).

Painéis de CLT são pré-fabricados e constituídos por madeira engenheirada. Podem ser empregados como lajes, de piso ou cobertura, e vedações, internas ou externas, com ou sem função estrutural. Como o próprio nome descreve (*Cross Laminated Timber* em português pode ser traduzido como madeira lamelada colada cruzada), são compostos por camadas de madeira maciça coladas de maneira perpendicular entre si. Desenvolvidos, inicialmente, na década de 1990 no continente europeu, começaram a ser fabricados no Brasil há cerca de seis anos. Durante esse período, foram construídas no país mais de 30 edificações, dentre as quais a maioria consiste em residências unifamiliares.

A inserção recente do CLT no cenário da construção civil suscita questionamentos a respeito de seu desempenho ao longo da vida útil da edificação. Muitas dessas dúvidas associam-se ao preconceito em relação ao uso da madeira como elemento estrutural. Dessa forma, o estudo do desempenho dos painéis se mostra fundamental, sendo que no caso específico do Brasil, tratando-se do uso predominantemente residencial, é essencial que a tecnologia em questão atenda aos requisitos estabelecidos pela norma técnica ABNT NBR 15575:2013 – Edificações Habitacionais – Desempenho. Ainda mais que não há normas específicas para o CLT.

No entanto, o tempo de execução desta pesquisa de mestrado impossibilitou a verificação de todos os requisitos apresentados na norma citada. Assim, analisou-se, inicialmente, o painel quanto ao desempenho estrutural por considerar-se o requisito fundamental de qualquer edificação e uma das premissas essenciais para garantir a estabilidade da edificação e segurança do usuário. Além disso, outro requisito muito questionado quando se trata do material “madeira” é a sua resistência natural à deterioração. Desse modo, outro item de desempenho estudado neste trabalho consistiu na análise de alguns parâmetros que indicam a durabilidade dos painéis.

A durabilidade, conforme define a ABNT NBR 15575-1:2013, é a “capacidade da edificação ou de seus sistemas de desempenhar suas funções, ao longo do tempo e sob condições de uso e manutenção especificadas no manual de uso, operação e manutenção” (ABNT NBR 15575-1, 2013, pág. 7). Faz-se necessário, também, compreender outros conceitos apresentados pela norma em questão, esclarecendo as nomenclaturas que serão utilizadas

ao longo da presente dissertação. Dentre eles, o termo “Sistema Construtivo” é definido como a maior parte funcional do edifício, consistindo no conjunto de elementos e componentes destinados a atender a uma macrofunção que o define, a exemplo de fundações, estruturas, pisos, vedações verticais, instalações hidrossanitárias, cobertura, etc. O “Elemento Construtivo”, por sua vez, é definido como uma parte de um sistema, apresentando funções específicas e sendo, em geral, composto por um conjunto de componentes. Como exemplos, podem ser mencionados paredes de vedação de alvenaria, painéis de vedação pré-fabricados, estruturas de cobertura, dentre outros. Por fim, um “Componente Construtivo” consiste em uma unidade integrante de determinado sistema da edificação, com forma definida e destinada a atender funções específicas, a exemplo de blocos de alvenaria, telhas, folhas de porta, etc.

O desempenho isolado dos painéis de CLT, aqui considerados como elementos construtivos - com base nos conceitos da norma mencionada - não se mostra suficiente para garantir o desempenho da edificação como um todo. O correto emprego dos painéis, quando inseridos no contexto mais amplo do edifício, também se apresenta como princípio fundamental de modo a garantir conforto ao usuário e durabilidade da edificação ao longo de sua vida útil.

Deve-se ressaltar que o elemento construtivo estudado consiste em uma inovação, associada à pré-fabricação e a técnicas de fabricação digital, diferenciando-se muito das tecnologias convencionais com as quais arquitetos, projetistas e outros agentes da construção civil estão acostumados a projetar. Consequentemente, observam-se frequentes dúvidas e questionamentos não apenas sobre desempenho dos painéis, mas também associados a como projetar, de forma eficaz e apropriada, um edifício em CLT. Nesse contexto, o conhecimento prévio das particularidades dos painéis por parte dos projetistas e arquitetos, de modo a se considerar, ainda no projeto arquitetônico, aspectos e decisões que possam garantir a durabilidade e o desempenho satisfatórios da edificação, faz-se fundamental.

Assim, o presente trabalho pretende abordar tanto o processo construtivo em CLT quanto os painéis (elemento) no que diz respeito ao desempenho estrutural e durabilidade, possibilitando, ao final, gerar subsídios para a concepção do projeto arquitetônico que empregue a tecnologia. Para isso, esta dissertação foi dividida em cinco capítulos.

Inicialmente, o primeiro capítulo apresenta a introdução, a justificativa, os objetivos, a metodologia, assim como a estrutura da dissertação de mestrado. O segundo capítulo, baseado em uma revisão bibliográfica realizada sobre o tema, discorre sobre o atual

cenário da construção civil nacional e internacional, no que diz respeito, especificamente, aos conceitos de industrialização e fabricação digital, de modo a contextualizar a tecnologia estudada. Além disso, enfoca o estágio de desenvolvimento e difusão do CLT em escala global e, mais especificamente, no Brasil. Para isso, expõe, de maneira sucinta, todas as edificações construídas em CLT no país, que se tem conhecimento até o momento (novembro/2018), e as principais características nelas observadas.

O terceiro capítulo abrange o estudo do processo construtivo de uma edificação em CLT no Brasil, que pode ser dividido em três principais fases: a matéria-prima, a fabricação dos painéis e a montagem da edificação. Inicialmente, objetiva-se compreender a formação morfológica e fisiológica do material madeira, assim como os principais agentes que atuam diretamente nos processos de deterioração da matéria-prima. Identificam-se também os métodos de preservação adotados, atualmente, no combate aos agentes deterioradores, de modo a evitar o aparecimento de possíveis manifestações patológicas em edificações estruturadas em madeira. Em seguida, estuda-se o processo de fabricação dos painéis de CLT, abordando, em detalhes, todas as etapas a este inerentes, assim como os projetos necessários para a concretização destas. Por fim, ainda neste capítulo, aborda-se o processo de montagem de edificações construídas em painéis de CLT, indicando todas as etapas após a fabricação, passando pelo transporte, movimentação e conexão dos painéis, até as fases finais de acabamento da edificação. São também apresentados os projetos necessários para a consolidação das etapas mencionadas, como o plano de carga e plano de montagem.

O quarto capítulo estuda o desempenho do elemento CLT no Brasil, tendo como base a Norma de Desempenho (ABNT NBR 15575:2013) para edifícios residenciais, por meio de ensaios laboratoriais realizados no Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT, no programa Novos Talentos, sob orientação do biólogo Dr. Sérgio Brazolin, e no Laboratório de Madeiras e Estruturas de Madeira da Escola de Engenharia de São Carlos da USP.

O último capítulo se divide em três partes. Na primeira delas realiza-se uma discussão sobre os itens abordados na dissertação, com foco nas relações existentes entre as etapas apresentadas e de que forma cada etapa do processo construtivo em CLT influencia as etapas seguintes e precedentes. A segunda parte apresenta o produto final da dissertação, que consiste em recomendações para projetos arquitetônicos de edificações em CLT. Para finalizar, a última parte aborda as principais conclusões levantadas no decorrer do presente trabalho.

1.1. Justificativa

Em razão da incipiente utilização desse elemento construtivo inovador em território nacional, como mencionado, não se formou ainda bibliografia consistente a seu respeito. A maior parte das pesquisas desenvolvidas em escala global sobre o tema foi elaborada com base em métodos de produção e matéria-prima adotados especialmente em países europeus e que, muitas vezes, não condizem com a forma de utilização ou fabricação da tecnologia no Brasil. Diferenças na diversidade de espécies vegetais, no clima, nas condições dos meios de transporte, na legislação, na mão de obra e em diversos outros fatores influenciam diretamente o processo construtivo, alterando o modo como o CLT é empregado no Brasil, na Europa, na América do Norte ou no Japão, por exemplo.

Destaca-se, também, que o elemento construtivo CLT produzido nacionalmente carece de ensaios realizados em institutos de pesquisa certificados, que comprovem seu desempenho. Assim, neste cenário de escassa documentação nacional relativa ao CLT, pouco se conhece sobre essa tecnologia no país, tanto no meio acadêmico quanto profissional, incluindo fornecedores, arquitetos e engenheiros.

Além disso, seu emprego ainda restrito acarreta, inicialmente, àqueles que passam a conhecer o material, diversos receios no que diz respeito a seu uso. Algumas dessas restrições relacionam-se ao descrédito quanto à possibilidade de se construir edificações com múltiplos pavimentos em CLT. Outras, com questões ambientais e de incêndio, ou dúvidas quanto à resistência e à vulnerabilidade da madeira frente a materiais construtivos tradicionais.

Em contrapartida, diante da associação às técnicas de fabricação industrializadas e a uma matéria-prima (madeira) que, dentre aquelas utilizadas no setor da construção civil, pode ser considerada atualmente como uma das únicas de fato renováveis, aponta-se para o potencial apresentado pela tecnologia em questão para o futuro do setor.

Logo, surge o interesse em aprofundar os estudos acerca deste elemento construtivo inovador. Desse modo, diante do contexto apresentado, busca-se abordar a temática do CLT como elemento construtivo produzido no Brasil, verificando seu desempenho e o processo construtivo a ele associado, ressaltando, ao final as principais recomendações de projeto para seu adequado emprego.

1.2. Objetivos

Essa pesquisa tem como escopo principal a proposição de recomendações para projetos arquitetônicos que visem incorporar painéis de *Cross Laminated Timber* (CLT) no Brasil. Para isso, estudou-se tanto o desempenho do elemento construtivo, no que diz respeito à segurança estrutural e à durabilidade, conforme a ABNT NBR 15575:2013, quanto o processo construtivo de edificações em CLT.

Quanto ao desempenho estrutural dos painéis, verificou-se o atendimento a critérios e requisitos apresentados pela norma em questão. Em relação à durabilidade, foi possível averiguar a resistência à biodeterioração e qualidade da aplicação do produto preservativo, por meio de ensaios específicos, além do atendimento a determinados critérios estabelecidos pela Norma de Desempenho. Já por meio da análise do processo construtivo em CLT, buscou-se compreender as relações existentes entre cada fase deste processo e a interferência dessas etapas no projeto arquitetônico, assim como deste na fabricação e montagem do edifício.

A partir do estudo do processo construtivo em CLT e dos resultados obtidos com os ensaios laboratoriais, no capítulo final desta dissertação, propõe-se recomendações para projetos arquitetônicos que especifiquem painéis em CLT. Dessa maneira, pretende-se que o material elaborado, como resultado deste trabalho, possibilite a maior difusão das informações sobre o uso do CLT, sua produção e seu desempenho em território nacional, de modo a quebrar mitos acerca do uso da madeira na construção civil e reforçar a potencialidade desse elemento construtivo inovador e promissor.

1.3. Metodologia

Como mencionado, a dissertação foi dividida em cinco capítulos e para a elaboração de cada um deles adotou-se determinada metodologia. Vale aqui ressaltar que os ensaios laboratoriais realizados na presente dissertação foram possíveis por meio da participação no programa IPT Novos Talentos, do fornecimento dos painéis pelo fabricante nacional de CLT, do Laboratório de Árvores, Madeiras e Móveis (LAMM) – IPT e do Laboratório de Madeiras e Estruturas de Madeira (LaMEM) da Escola de Engenharia de São Carlos da USP.

A metodologia adotada em cada capítulo é apresentada a seguir:

Capítulo 2 - *Cross Laminated Timber*: contextualização

- Revisão bibliográfica sobre o atual estágio de industrialização da construção civil;
- Revisão bibliográfica sobre o elemento construtivo estudado, por meio da leitura e análise de publicações até o momento realizadas no Brasil e no exterior;
- Visita a uma fábrica de CLT localizada na Alemanha;
- Levantamento das edificações executadas e em execução em CLT no Brasil.

Capítulo 3 - *Cross Laminated Timber*: processo construtivo

- Revisão bibliográfica sobre a madeira como elemento estrutural, por meio da leitura de publicações relacionadas ao tema e análise de normas nacionais específicas;
- Visitas ao fabricante nacional de CLT, visando compreender o processo de fabricação dos painéis;
- Acompanhamento do projeto e da montagem de duas edificações construídas em CLT no Brasil, por meio de visitas periódicas às obras.

Capítulo 4 - *Cross Laminated Timber*: desempenho

- Ensaios de retenção e penetração do produto preservativo na matéria-prima utilizada para a fabricação dos painéis nacionais;
- Ensaios laboratoriais para verificação do desempenho estrutural dos painéis: Ensaios de impacto de corpo mole, Ensaios de impacto de corpo duro e Ensaios para a determinação da resistência do painel às solicitações de peças suspensas;
- Ensaios laboratoriais para verificação da estanqueidade à água dos painéis;
- Verificação do comportamento do painel exposto à ação de calor e choque térmico – aqui denominado simplesmente de ensaio de calor e choque térmico;
- Ensaios de delaminação dos painéis de CLT.
- Análise comparativa dos resultados obtidos nos ensaios laboratoriais realizados aos valores estabelecidos pelos critérios e requisitos apresentados pelas normas ABNT NBR 15575:2013, ABNT NBR 16143:2013 e EN 16351:2015.

Capítulo 5 - Conclusão

- Análise da relação entre o processo construtivo de uma edificação em CLT e a concepção do projeto arquitetônico;
- Formulação de recomendações para projetos arquitetônicos de edificações em CLT, com base nos resultados observados nos ensaios laboratoriais e nas constatações levantadas no decorrer da pesquisa sobre o elemento construtivo.

2.

CROSS LAMINATED TIMBER: CONTEXTUALIZAÇÃO

O surgimento da tecnologia em estudo enquadra-se em um cenário específico do setor da construção civil, marcado pela introdução dos conceitos de pré-fabricação e pela recente adoção de tecnologias que incorporam a fabricação digital em sua produção. O processo construtivo de edificações em CLT, por sua vez, quando inserido no Brasil difere, em alguns aspectos, daquele adotado em países europeus ou norte-americanos, por exemplo. Por esse motivo, de modo a melhor compreender o elemento construtivo estudado na presente pesquisa, inicialmente, deve-se analisar o contexto no qual ele está circunscrito, em nível nacional e internacional, as pesquisas acadêmicas desenvolvidas até o momento a seu respeito, além do atual panorama de aplicação do produto no campo da arquitetura e da engenharia. Dessa forma, buscando embasar os conteúdos a serem apresentados no decorrer desta dissertação, o presente capítulo tem como objetivo contextualizar a tecnologia do CLT, apresentando o panorama atual de desenvolvimento deste elemento, tanto no Brasil como no restante do mundo.

2.1. Inserção do CLT no cenário atual da construção civil

Prevalece ainda no Brasil a lógica da construção convencional, pautada no uso predominante da alvenaria e do concreto. Entretanto, adotando processos construtivos usuais, o setor da construção civil brasileiro é marcado por “altos custos, baixo nível de planejamento, baixa qualificação do trabalhador, altos índices de desperdícios, baixa qualidade e incidências de manifestações patológicas e baixo desempenho ambiental” (ABDI, 2015, pág. 25). É, assim, um dos maiores responsáveis pela geração de resíduos sólidos e pela emissão de gases de efeito estufa, sendo também responsável por uma grande parcela do consumo de recursos naturais, dentre eles, água e energia. O volume de resíduos gerado é agravado pelas perdas dos processos ainda não otimizados e que carecem de avanços tecnológicos.

Infelizmente, a cadeia produtiva da construção civil e os órgãos governamentais, em nível internacional, demoraram a perceber o impacto do setor no ambiente natural e, atualmente, são forçados a mudanças culturais, tecnológicas e comportamentais para atender às demandas da sociedade em relação à preservação ambiental (AGOPYAN; JOHN, 2011).

Significativas mudanças nesse sentido ocorreram nas últimas duas décadas, predominantemente em países desenvolvidos, mas também no Brasil. Dentre elas podem ser citadas, por exemplo, a criação da Câmara Ambiental da Indústria da Construção do Estado de São Paulo e a elaboração da Resolução Conama 307, que estabelece “diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão de resíduos da construção civil, disciplinando as ações necessárias de forma a minimizar os impactos ambientais” (CONAMA, 2002, Art.1º). Essas iniciativas representam uma mudança de mentalidade na sociedade, mas são ainda ações tímidas quando comparadas às de outros setores ou mesmo de outros países (AGOPYAN; JOHN, 2011).

É evidente, portanto, a necessidade de se introduzir neste campo inovações que modifiquem a abordagem da construção, garantindo a evolução contínua da tecnologia e a modernização da indústria. Como afirmam AGOPYAN e JOHN (2011), “inovações progressivas e incrementais já não são suficientes para que a construção seja, de fato, sustentável. Inovações radicais são imprescindíveis e urgentes” (AGOPYAN; JOHN, 2011, pág. 26).

Uma inovação tecnológica, como definida por SABATTINI (1989), consiste em um novo produto, método, processo ou sistema construtivo que, ao ser introduzido no mercado,

incorpora uma nova ideia e representa um sensível avanço na tecnologia existente, no que diz respeito ao desempenho, qualidade ou custo do edifício.

Nessa perspectiva, acredita-se que a evolução dos meios de produção na construção civil passa, necessariamente, por processos de industrialização e racionalização, cujos benefícios neste campo são inúmeros (SABATTINI, 1989). Conforme define BLACHERE (1977, apud ABDI, 2015),

(...) a industrialização da construção é um processo de natureza repetitiva, em que a variabilidade casual de cada fase que caracteriza as ações artesanais é substituída por graus pré-determinados de uniformidade e continuidade de execução, típica de operações parcial ou totalmente mecanizadas (BLACHERE, 1977, apud ABDI, 2015, pág. 35).

A implementação de tais conceitos no setor se deu a partir do deslocamento dos processos construtivos convencionais para a fábrica. Nessa lógica, os componentes construtivos são produzidos em ambiente industrial, sendo posteriormente montados no canteiro de obras, de forma semelhante às montadoras de veículos (ABDI, 2015).

Dessa forma, quando bem planejada, a pré-fabricação pode ajudar a reduzir os prazos de execução da obra, eliminação dos desperdícios de materiais e consequente redução nos custos da construção, garantindo qualidade dos componentes e a segurança construtiva. Ao se adotar a fabricação fora do local da obra, também é possível garantir maior estabilidade e melhores condições de trabalho ao operário – em relação à obra tradicional. Além disso, tecnologias construtivas industrializadas podem ser compreendidas como aliadas no combate à degradação ambiental, considerando a significativa redução na produção de resíduos nos canteiros, o que as torna menos poluentes (BRUNA, 2002).

No Brasil, pesquisas relacionadas à criação de novos sistemas construtivos, associados à racionalização e industrialização, surgem a partir da década de 1980. Nessa época, são desenvolvidos diversos elementos e sistemas construtivos, como alvenaria estrutural de bloco de concreto, painéis de argamassa armada e painéis cerâmicos. Conforme define o Manual da Construção Industrializada, da Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial (ABDI, 2015), esses sistemas podem ser divididos em dois grupos: sistemas leves para vedações (com pesos não superiores a 60 kgf/m²), destinados à compartimentação interna, e sistemas destinados às estruturas e aos fechamentos com função estrutural ou de vedação.

Figura 01: Esquema de configuração dos perfis verticais de madeira no (a) Sistema Balão; (b) Sistema Plataforma.

Fonte: da autora (2018).

O segundo grupo é constituído, majoritariamente, por elementos construtivos de concreto armado ou concreto protendido. Esse tipo de indústria de estruturas pré-fabricadas foi impulsionado, em especial, pelo uso do concreto protendido intensificado no Brasil no final da década de 1950 (ABDI, 2015).

Já no grupo dos sistemas leves, um exemplo de tecnologia empregada no país é aquela denominada *drywall*, que surge no Brasil na década de 1970, ganhando maior visibilidade a partir da década de 1990. Esta tecnologia, utilizada em vedações verticais, configura-se em perfis ou guias de aço galvanizado com fechamento de chapas de gesso acartonado (ABDI, 2015).

Ainda nesse grupo, outro sistema que passou a ser empregado recentemente no Brasil é o *wood-frame*, que consiste em um sistema construtivo industrializado leve, estruturado em perfis de madeira plantada tratada e contraventada com placas delgadas. Em geral, utiliza-se o pinus como a madeira que compõe os perfis internos da estrutura e, para o contraventamento, chapas de madeira tratada fixadas sobre a estrutura de madeira por meio de parafusos ou grampos. Os painéis resultantes dessa técnica podem ser preenchidos com material isolante, como mantas de lã de vidro. Além disso, para proteger a edificação das intempéries e contra o fogo, aumentando também seu desempenho térmico e acústico, a estrutura de madeira, após montada, é revestida com outros materiais, como por exemplo, placas cimentícias (MOLINA; CALIL JUNIOR, 2010).

O *wood frame* subdivide-se em duas categorias: o Sistema Balão e o Sistema Plataforma. O primeiro foi desenvolvido inicialmente nos Estados Unidos em 1833, como uma evolução das técnicas construtivas em madeira levadas para a América do Norte por imigrantes europeus. O segundo, por sua vez, surge por volta de 1920 como um aperfeiçoamento do Sistema Balão e se sobressai em relação a este primeiro por apresentar melhor desempenho em relação ao fogo (ABDI, 2015). A grande diferença entre ambos consiste nos perfis verticais em madeira, os quais, no Sistema Balão, vão de forma contínua da fundação até o telhado, enquanto, no Sistema Plataforma, esses possuem comprimento equivalente ao pé direito do pavimento (Figura 01).

Em países do Hemisfério Norte, principalmente na América do Norte e Europa, em contrapartida ao cenário nacional, a ideia de industrialização da construção já é há muito tempo adotada e aplicada. Como exemplificado pelo desenvolvimento do sistema *wood-frame*, tais conceitos começam a ser empregados na construção civil durante a segunda metade do século XIX.

Posteriormente, algumas experiências realizadas nas primeiras décadas do século XX na área, como foi o caso das habitações modulares de Jean Prouvé, somadas à escassez de materiais e mão-de-obra acarretada pela Segunda Guerra Mundial possibilitaram o surgimento de uma industrialização da construção em países como a França, Dinamarca, Suécia, Inglaterra e Alemanha (BRUNA, 2002).

Essa nova indústria, que perdura até os dias atuais, tornou-se responsável pela rápida reconstrução de habitações nesses países, considerando o grande déficit habitacional ocasionado pelos anos de guerra. Diante deste cenário, os principais objetivos dessa produção era obter a melhor relação possível entre qualidade e preço das construções. A racionalização do processo construtivo se tornou, assim, essencial para se diminuir os desperdícios de materiais e o tempo de construção, o que acarreta também na diminuição da mão de obra (BRUNA, 2002).

Apesar de seus benefícios, a construção industrializada, historicamente, relaciona-se à produção seriada e à padronização. É, assim, comumente vinculada a questões de rigidez e uniformidade. Entretanto, nas últimas décadas, observa-se a introdução de novas tecnologias digitais de fabricação no campo da industrialização, de modo a oferecer soluções mais versáteis e flexíveis (FONSECA DE CAMPOS; LOPES, 2017).

As tecnologias com comando numérico computadorizado (CNC) permitem a conversão de projetos concebidos e desenvolvidos digitalmente em objetos reais. Observa-se, conseqüentemente, um novo marco na história da civilização humana, que é denominado por alguns autores como a revolução industrial do século XXI (SODERBERG, 2013) e por outros como a Revolução Digital (KOLAREVIC, 2003).

A adoção de tais práticas é observada há alguns anos em setores como o aeroespacial e automotivo. No setor manufatureiro, robôs e máquinas com comando numérico computadorizado começam a ser introduzidos já em meados da década de 1960. No entanto, no setor da construção civil este cenário é ainda recente, sendo a fabricação digital mais aplicada à criação de componentes estruturais e de fachadas (BUSWELL *et al*, 2007).

Um dos primeiros exemplos arquitetônicos desenvolvido e executado digitalmente é a escultura em forma de peixe localizada no complexo da Vila Olímpica de Barcelona, na Espanha, construída em 1992 e projetada pelo arquiteto Frank Gehry. Poucos anos mais tarde o mesmo arquiteto projeta o Museu de Guggenheim (1997), em Bilbao, que pode ser considerado como o marco da atual Revolução Digital (KOLAREVIC, 2003).

A fabricação digital consiste em um processo de manufatura no qual são utilizados equipamentos com CNC. As tecnologias de fabricação com CNC podem ser de quatro tipos: fabricação bidimensional, fabricação subtrativa, fabricação aditiva e fabricação formativa (KOLAREVIC, 2003). Para as quatro formas de classificação, o processo ocorre da mesma maneira: é elaborado um modelo virtual em um computador (*Computer-aided Design* – CAD, em português, desenho assistido pelo computador), no qual são introduzidos os parâmetros para sua fabricação (*Computer-aided Manufacturing* – CAM, em português, manufatura assistida pelo computador). O programa gera então instruções numéricas para que a máquina controlada pelo computador (CNC) execute os comandos necessários para a fabricação do objeto (FONSECA DE CAMPOS; LOPES, 2017).

Dentre os materiais amplamente adotados atualmente, que possibilitam essa pré-fabricação associada a comandos computadorizados, encontra-se a madeira e, em especial, tecnologias construtivas industrializadas em madeira, a exemplo de elementos em Madeira Lamelada Colada (MLC) ou painéis de *Cross Laminated Timber* (CLT), sendo estes últimos o foco do presente trabalho.

Ambas tecnologias, consistindo em subgrupos dos produtos lamelados de madeira, baseiam-se no princípio da colagem de lamelas para sua fabricação, o qual é adotado há mais de um século e foi desenvolvido inicialmente na região central da Europa (Suíça e Alemanha). A escassez de árvores com grandes dimensões para uso estrutural levou à solução de união de peças menores por meio de ligações metálicas. As lamelas eram empilhadas umas sobre as outras, formando elementos estruturais maiores e mais rígidos. A ligação metálica foi substituída por cola, executada à base de uma proteína encontrada no leite, no início do século XX (PEREIRA, 2014).

No caso de MLC, denominado internacionalmente de *Glued Laminated Timber* (GLT) ou *Glulam*, duas ou mais lamelas de madeira maciça são coladas de forma paralela, configurando, assim, elementos lineares empregados como vigas, arcos, pórticos ou pilares. A primeira estrutura em MLC da qual se tem conhecimento, como apresenta MIOTTO (2009) consiste em um auditório localizado na Suíça e construído em 1893. Na América do Norte foi utilizada originalmente em 1934, nos Estados Unidos, sendo que em 1963 é redigida a primeira norma norte-americana que regulava o processo de fabricação das peças (MIOTTO, 2009).

CLT (*Cross Laminated Timber*), por sua vez, também é conhecido como X-Lam, *Brettsper Holz* (BSP), em alemão, ou madeira lamelada colada cruzada (MLCC), em

Figura 02: Configuração de elementos construtivos em (a) MLC e (b) CLT.
Fonte: da autora (2018).

português. Consiste em painéis pré-fabricados, constituídos por números ímpares de camadas de madeira maciça coladas em sentido ortogonal. Desenvolvidos inicialmente na Europa na década de 1990, podem ser empregados como lajes ou vedações, com ou sem função estrutural. Estes, certamente, constituem-se como uma inovação tecnológica, enquadrando-se na definição apresentada por SABATTINI (1989).

A grande diferença entre as duas tecnologias é a colagem das lamelas de madeira de forma paralela, no caso do MLC, e de forma ortogonal, no caso do CLT, originando, respectivamente, elementos lineares ou painéis (Figura 02).

Quando inserida em um cenário caracterizado pelo desperdício e pela geração de resíduos e poluentes, a madeira, como matéria-prima, pode ser considerada um dos poucos materiais de construção de fato renováveis, apresentando baixo consumo energético para sua produção, quando comparada a outros materiais (MOLINA; CALIL JUNIOR, 2010).

Sua utilização também se mostra muito benéfica para o meio ambiente. Durante o crescimento, as árvores absorvem e fixam o gás carbônico por meio da fotossíntese, e o CO₂ absorvido será lançado novamente à atmosfera apenas ao final do ciclo de vida dessas árvores, seja por meio da decomposição ou da combustão da madeira. Logo, a utilização da madeira na construção civil, evitando sua decomposição, impede a liberação do CO₂, sendo assim, considerada um meio eficiente de combate ao efeito estufa, que é ocasionado pelo aumento da taxa de CO₂ na atmosfera, e causa das alterações climáticas do planeta (GAUZIN-MÜLLER, 2011).

Dessa forma, diante do contexto apresentado, tecnologias como o CLT e o MLC, em uma esfera global, apresentam-se como uma excelente opção para um futuro próximo. SILVA *et al*/ (2012) mencionam, inclusive, a crença de que o CLT consiste no material do século XXI. Em um cenário internacional pautado pela busca por alternativas sustentáveis, elementos construtivos em CLT ou MLC associam o uso de uma matéria-prima renovável a técnicas contemporâneas de industrialização e fabricação digital, possibilitando seu emprego com baixo impacto ao meio ambiente, além de proporcionar melhores condições de trabalho aos operários. Assim, sua utilização se apresenta como uma alternativa promissora para a construção civil.

2.2. Panorama internacional do CLT

Cross Laminated Timber (CLT) é um elemento construtivo relativamente novo. De acordo com CRESPELL e GAGNON (2010), esta tecnologia começou a ser desenvolvida inicialmente na Suíça, nas cidades de Zurique e Lausanne, durante o início da década de 1990. Porém, o CLT, como se conhece atualmente, é resultado de um projeto de pesquisa iniciado em 1990 na Áustria e proveniente de uma parceria entre a indústria e a universidade. Conforme apontam BRANDNER *et al*/(2016), já em 1994, Schickhofer publicou sua tese sobre estruturas compostas lameladas rígidas ou flexíveis, com foco no CLT. O autor cita também outros trabalhos publicados em seguida a este e nesta mesma década, igualmente enfocados no estudo do CLT. Em paralelo a essas pesquisas, as primeiras indústrias foram instaladas na Europa Central, em especial na Áustria, Suíça e Alemanha, a princípio em pequena escala, e, nos últimos dez anos, em escala industrial.

COSTA (2013) afirma que uma das pioneiras na fabricação do CLT foi a empresa austríaca KLH Massivholz GmbH, fundada em 1998, por Heimo de Monte e Wolfgang Weirer, após anos de pesquisa e estudos desenvolvidos em parceria com a *Graz University of Technology* (Áustria). Na mesma década, sabe-se, também, que a empresa alemã MERK Timber GmbH, que é, atualmente, integrante do grupo empresarial Ed. Zübling AG, inicia seu desenvolvimento para a fabricação de painéis de CLT, conforme identificou-se em uma visita técnica realizada no ano de 2018 nesta fábrica. Em 1994 é patenteado seu método produtivo baseado na prensagem a vácuo (MERK, 2015).

Contudo, segundo STAUDER (2013), somente após alguns anos, a demanda por esse produto passou a se tornar de fato significativa, tendo em vista que, a princípio, as informações acerca do desempenho do CLT ainda eram escassas.

O uso do CLT está consolidado na Europa, sendo que, conforme afirma PASSARELLI (2013), 63 % da produção de CLT no continente europeu concentra-se na Áustria. Esse fato é demonstrado por EBNER (2017), que levanta os principais fabricantes de CLT do mundo em 2016. Dentre eles, os cinco maiores localizavam-se na Áustria e consistiam nas seguintes empresas: Binderholz (Áustria e Alemanha), Stora Enso (Áustria), KLH Massivholz (Áustria), Mayr Melnhof Holz (Áustria) e Hasslacher Norica Timber (Áustria). Neste ano, a produção dos painéis, em metragem cúbica, dos fabricantes mencionados foi de, respectivamente, 145.000 m³, 130.000 m³, 88.000 m³, 60.000 m³ e 40.000 m³. Estima-se, ainda, que até o ano de 2020 a produção mundial chegará a dobrar quando comparada a 2016 e atingirá volume superior a 1,2 milhões de m³ (EBNER, 2017).

BRANDNER *et al* (2016) também apontam a expectativa de um significativo aumento no volume produzido de CLT na próxima década, particularmente em países como Canadá, Estados Unidos e Japão, em vista do crescente interesse e importância do CLT para arquitetos, engenheiros e outros agentes do setor da construção civil. Consequentemente, os autores recomendam o estabelecimento de um conjunto de normativas internacionais, de modo a fortalecer o uso desta tecnologia.

Na América do Norte, o elemento construtivo estudado se encontra em fase de implementação, mostrando-se como uma alternativa viável em relação aos sistemas em madeira (*wood-frame*) largamente utilizados na região (KARACABEYLI; DOUGLAS, 2013). Já se elaborou, inclusive, uma norma que estabelece padrões para a fabricação e a caracterização do CLT produzido nos Estados Unidos e Canadá. A norma americana ANSI/APA PRG 320 (2017) define *Cross Laminated Timber* como um produto pré-fabricado de madeira engenheirada constituído por ao menos três camadas de madeira serrada maciça ou *Structural Composite Lumber* (SCL), coladas entre si com adesivo estrutural. A espessura de cada camada deve ser de no mínimo 16 mm e de no máximo 51 mm, resultando em painéis com até 508 mm de espessura. O documento estabelece ainda que, para a confecção de painéis de CLT, pode ser utilizada qualquer espécie de conífera (*softwood*) reconhecida pelo *American Lumber Standards Committee* (ALSC) ou pelo *Canadian Lumber Standards Accreditation Board* (CLSAB). Em uma única camada devem ser utilizadas as mesmas espécies de madeira. Entretanto, um painel pode conter camadas distintas compostas por diferentes espécies (ANSI/APA PRG 320, 2017).

Na Europa, a primeira norma que regulamenta o CLT, EN 16351, é publicada em 2015. Esta dispõe sobre as características de desempenho, além de estabelecer requisitos mínimos para a fabricação dos painéis, sejam eles retilíneos ou curvos. Aplica-se a painéis confeccionados com ao menos três camadas ortogonais, que podem possuir também até três camadas sucessivas coladas de forma paralela, no caso de painéis com ao menos quatro camadas (EN, 2015).

A espessura das camadas deve variar entre 6 mm e 45 mm. Para painéis de 3 camadas, a espessura da camada central pode ser de até 60 mm. Para painéis curvos, a norma também apresenta uma fórmula para a espessura máxima da camada, a qual deve ser calculada de acordo com o raio de curvatura do painel. As lamelas podem ser coladas lateralmente ou não. Caso não o sejam, o espaço entre lamelas adjacentes deve ser de, no máximo, 6 mm e a largura dessas deve ser maior ou igual a 40 mm e menor ou igual

Figura 03: Esquema de configuração de um painel de CLT, com base nos conceitos apresentados em EN (2015), ANSI/APA (2017) e BRANDNER *et al* (2016).

Fonte: da autora (2018).

a 300 mm. De modo a evitar o aparecimento de fissuras nos painéis, as lamelas podem receber sulcos com espessura máxima de 4 mm e profundidade de até 90 % da espessura da camada. A distância entre sulcos adjacentes e entre sulcos e a lateral das lamelas deve ser igual ou superior a 40 mm (EN, 2015).

No continente europeu faltam regulamentações sobre o dimensionamento dos elementos estruturais em CLT, sendo estes, atualmente, dimensionados de acordo com aprovações técnicas específicas (BRANDNER *et al*, 2016). Todavia, a norma EN Eurocode 5 (2009), a qual dispõe sobre o dimensionamento de estruturas em madeira, menciona a tecnologia, descrevendo o CLT como painéis que tipicamente possuem número ímpar de camadas, podendo conter três, cinco, sete ou mais camadas, de modo a se criar um eixo de simetria na camada central. Cada camada, composta por madeira de coníferas (*softwood*), é posicionada de forma perpendicular em relação à adjacente. As camadas são coladas umas às outras em uma prensa (EN, 2009).

BRANDNER *et al* (2016) afirmam que apesar do uso predominante de *softwoods*, o emprego de folhosas (*hardwoods*) também é possível e pode ser até vantajoso. Além disso, em virtude da standardização almejada pelos fabricantes, as espessuras padrões para as lamelas adotadas na Europa Central são de 20, 30 ou 40 mm.

O esquema ao lado ilustra a composição de um painel de CLT, conforme descrito pelas referências bibliográficas estudadas (Figura 03).

Como visto anteriormente, os painéis se baseiam no mesmo conceito de colagem de lamelas de madeira maciça utilizado na produção de MLC. No entanto, no caso do CLT, conforme apontam SILVA *et al* (2012), COSTA (2013) e SILVA (2014), a configuração cruzada das lamelas possibilita a distribuição de cargas de forma bidirecional, permitindo atingir elevadas capacidades de resistência e rigidez. A principal inovação, é, portanto, a produção de elementos em painéis, que funcionam, dessa forma, como paredes autoportantes ou lajes. Em contrapartida, elementos em MLC, possuindo resistência em uma direção só, adquirem “maior capacidade à compressão e aos esforços verticais” (SILVA, 2014, pág. 54), quando comparados a painéis de CLT.

BRANDNER *et al* (2016) também salientam que a ideia da laminação empregada no CLT não é nova, sendo que este pode ser comparado a produtos mais comuns como painéis compensados. Contudo, o desenvolvimento singular observado no CLT é a grande dimensão dos painéis, assim como suas grandes espessuras, tornando-o viável para o uso

(a)

(b)

Figura 04: *Finger-joint* (a) na superfície da lamela e (b) na lateral.
Fonte: da autora (2018).

como único elemento estrutural. As grandes dimensões, aliadas ao fácil manuseio e versatilidade na aplicação, permitiram a expansão da construção em madeira para mercados que, no último século, eram reservados a construções em concreto armado ou alvenaria. Em termos de arquitetura ou engenharia, esta tecnologia possibilitou a execução de superestruturas e edifícios monolíticos em madeira, correspondendo a uma nova forma de pensar em planos e volumes, e não mais em linhas (BRANDNER *et al*, 2016).

Segundo CRESPELL e GAGNON (2010), os tamanhos dos painéis de CLT variam de acordo com o fabricante, alcançando dimensões de até 2,95 m x 24,00 m. Os regulamentos de transporte, entretanto, também podem impor limitações dimensionais nestes elementos construtivos. De acordo com BRANDNER *et al* (2016) as dimensões comuns são comprimentos de até 18,00 m, podendo chegar a 30,00 m, e larguras máximas de 3,00 m, atingindo até 4,80 m, com espessuras máximas entre 300 e 400 mm. Conforme visita técnica mencionada, realizada a uma fábrica na Alemanha, identificou-se, também, a existência de prensa com dimensões de 4,80 m x 20,00 m.

O processo de fabricação dos painéis, como apresentado por BRANDNER (2013), consiste em seis etapas. Na primeira, é realizada a classificação visual e mecânica das lamelas de madeira secas em estufa, possuindo umidade de $(12 \pm 2) \%$.

A classificação visual, é necessária para que seja possível “descartar peças com defeitos acima dos permitidos, como nós, bolsas de resina, fendas, rachas, encanoamentos, encurvamentos e ainda classificar a densidade pela quantidade de anéis por polegada na seção transversal da peça” (PEREIRA, 2015, pág. 34). Já a classificação mecânica das peças, a qual deve ser empregada para classificar a madeira em classes de qualidade, segundo PEREIRA (2015), é realizada em países europeus e da América do Norte, em geral, pelas serrarias, sendo que as fábricas dos produtos engenheirados adquirem a matéria-prima com a classificação mecânica desejada. Porém, esta não é a realidade brasileira. Dessa forma, no Brasil, a classificação mecânica deve ser realizada antes do início da produção por meio de ensaios em equipamentos portáteis ou ensaios laboratoriais.

Na segunda etapa do processo de fabricação dos painéis, conforme descreve BRANDNER (2013), são removidos os defeitos das peças que possam prejudicar sua resistência, como grandes nós. As lamelas são então emendadas por meio de ligações denominadas *finger-joints*, que consistem em juntas com formato triangular, as quais maximizam a superfície de aplicação do adesivo estrutural para aderência das peças entre si. A posição dos *finger-joints* pode ser tanto na superfície das lamelas quanto em sua lateral (Figura 04).

Figura 05: Paineis de CLT (a) com e (b) sem colagem lateral.

Fonte: da autora (2018), adaptado de BRANDNER (2013).

Figura 06: Esquema de configuração de um painel de CLT com camada central dupla.

Fonte: da autora (2018).

Na terceira etapa, as lamelas emendadas são cortadas nas dimensões corretas para utilização em camadas longitudinais ou transversais. A quarta etapa consiste na fabricação de camadas individuais de CLT. Essa etapa é opcional e se relaciona à intenção dos fabricantes de remover os espaços laterais entre as lamelas. Para a fabricação dessas camadas, as lamelas são coladas umas às outras em sua lateral. A colagem lateral apresenta como vantagem o melhor comportamento do painel em relação à estanqueidade ao ar, resistência ao fogo e acústica. No entanto, essa etapa pode ocasionar fissuras nas superfícies do painel, dado que as variações dimensionais da madeira, como consequência da variação de temperatura e umidade, não podem ser evitadas. Em painéis nos quais as lamelas não são coladas lateralmente, observam-se variações dimensionais nas linhas de emenda entre as lamelas (Figura 05).

Outra estratégia utilizada para garantir ao painel estanqueidade ao ar, conforme identificado na visita à fábrica alemã citada anteriormente, é a adoção de uma camada central dupla, com lamelas dispostas de forma intercalada (Figura 06). De acordo com informações passadas por essa fábrica, painéis de três camadas produzidos de forma convencional, ou seja, com camadas simples, não se apresentam estanques ao ar e, consequentemente, à água.

Na quinta etapa, segundo BRANDNER (2013), ocorre a montagem e prensagem das lamelas ou colagem das camadas individuais umas sobre as outras de modo a configurar painéis de CLT. Para a colagem, o adesivo é aplicado sobre as lamelas, em geral de forma mecânica, e a prensagem dos painéis pode ocorrer em prensas hidráulicas, prensas a vácuo ou por meio de parafusos, pregos e pinos. Os principais adesivos estruturais utilizados são a Melamina Ureia Formaldeído (MUF) ou o poliuretano monocomponente. Ambos são resistentes à radiação solar, umidade e hidrólise.

No que diz respeito à prensagem, a pressão exercida por prensas hidráulicas varia entre 0,1 e 1,0 N/mm², enquanto prensas a vácuo atingem pressões entre 0,05 e 0,1 N/mm². As pressões mínimas necessárias para adesivos a base de melamina e fenol variam, em geral, entre 1,4 e 2,0 N/mm². Para os poliuretanos, pressões entre 0,01 e 1,0 N/mm² são suficientes. No entanto, o autor não especifica se esses valores são para todas as peças e tipos de adesivos. Nas prensas a vácuo, o processo de fabricação é semi-mecanizado, pois as lamelas são dispostas manualmente na prensa enquanto a aplicação do adesivo é mecanizada. Nessa opção de prensa também é possível comprimir as camadas lateralmente e produzir painéis curvos ou em formatos diversos (BRANDNER, 2013).

Figura 07: Exemplos de conexões entre painéis de CLT, sendo: (a) conexões entre duas paredes ou duas lajes; (b) conexões entre lajes e paredes; (c) conexões entre paredes e fundações.

Fonte: da autora (2018) adaptado de KARACABEYLI; DOUGLAS (2013).

Ressalta-se, também, a necessidade de constante verificação e limpeza das superfícies das lamelas no caso de prensas a vácuo, as quais, conseqüentemente, exigem maior controle de qualidade da produção. Isso ocorre pois, conforme constatado na visita à fábrica alemã, a menor pressão exercida pelo equipamento pode acarretar em um prejuízo na aderência do adesivo quando depositadas, nas superfícies das lamelas, serragens, nós soltos da madeira ou qualquer outro tipo de sujeira, durante o processo de colagem.

Por fim, na sexta etapa, os painéis são cortados e usinados para configurar os elementos estruturais customizados (BRANDNER, 2013). O corte dos painéis, por ser realizado em equipamentos de usinagem com CNC, possibilita alta precisão dos elementos arquitetônicos e uma conseqüente redução de resíduos em obra (SILVA *et al*, 2012). Dessa maneira, aberturas para portas e janelas, canaletas para passagem de eletrodutos e outras instalações prediais são realizadas ainda em fábrica.

Segundo COSTA (2013), para a montagem da obra, os painéis são entregues nas dimensões e formatos definidos previamente no projeto e são movimentados com o auxílio de uma grua. A grande dimensão dos painéis e a produção em fábrica permitem uma construção rápida, simples e silenciosa, com conseqüente diminuição de custos e maior segurança em obra, reduzindo o número de possíveis fontes de erros durante a montagem (COSTA, 2013; SILVA, 2014).

Haja vista a alta capacidade de carga do CLT, a performance das estruturas executadas com o produto depende totalmente dos sistemas de conexões. As ligações entre os elementos, em geral, constituem-se, nas construções em madeira, como o ponto mais fraco da estrutura. Em contrapartida, a facilidade de se conectar elementos em madeira, tradicionalmente, constitui-se como um benefício dessa matéria-prima, em comparação a outros materiais como o concreto e o aço (LOURENÇO; BRANCO, 2013).

As conexões entre elementos de CLT podem ser de três tipos: (a) conexões entre duas paredes ou duas lajes, (b) conexões entre lajes e paredes, (c) conexões entre paredes e fundações (BRANDNER *et al*, 2016) (Figura 07). Como apresentam KARACABEYLI e DOUGLAS (2013), a conexão entre dois painéis de CLT é realizada, majoritariamente, por meio de parafusos ou conectores metálicos, conforme recomendação dos fabricantes do sistema. A conexão por meio de parafusos auto perfurantes, que dispensam a execução de pré-furos nos elementos estruturais, é mais comum, enquanto a utilização de conectores metálicos, como chapas metálicas, é recomendada para situações onde a estrutura apresenta maior solicitação (KARACABEYLI; DOUGLAS, 2013).

As conexões mencionas são válidas tanto para a fixação entre dois painéis de CLT, quanto para a fixação de um painel de CLT em um elemento de outro sistema construtivo, como estruturas metálicas ou fundações em concreto (KARACABEYLI; DOUGLAS, 2013).

Após a montagem, é possível aplicar diferentes materiais de revestimento nas fachadas de edifícios em CLT, desde que se garantam adequados níveis de ventilação nos painéis. A ventilação os protege de condensações e problemas de degradação precoce, pois, considerando as características higroscópicas da madeira, os painéis adquirem a capacidade de regular o teor de umidade do ar no ambiente, sendo capazes de absorver, reter e liberar umidade (COSTA, 2013).

SILVA (2014) também salienta a necessidade de se proteger os elementos em madeira expostos ao ambiente exterior, a fim de garantir sua qualidade e estabilidade por longos períodos, visto que esta matéria-prima não pode estar em contato com agentes presentes no meio ambiente, como a água ou a radiação solar.

SILVA *et al*/ (2012), que analisaram as potencialidades do uso do CLT em edificações em altura, com múltiplos pavimentos, apontam como benefícios deste elemento construtivo, além da menor produção de resíduos no canteiro, a associação da madeira à construção sustentável. Os autores consideraram essa matéria-prima como uma forte aliada das recentes políticas ambientais que visam a diminuição das emissões de dióxido de carbono. Afirmaram também que a madeira consiste em um material natural, renovável e reciclável, como já apontado anteriormente, sendo capaz de armazenar dióxido de carbono, o qual apenas será emitido para a atmosfera no momento da combustão ou decomposição da madeira. No entanto, apesar dos aspectos positivos que motivam a implementação do uso da madeira na construção civil, existem importantes barreiras que ainda devem ser ultrapassadas.

Uma das maiores dificuldades consiste em combater o preconceito errôneo ao se considerar que estruturas em madeira possuem resistência ao fogo inferior a outras soluções construtivas convencionais, como, por exemplo, estruturas em aço (SILVA *et al*/ 2012; SILVA, 2014). Na realidade sistemas estruturais em madeira maciça e espessa proporcionam excelente resistência ao fogo, quando comparados a outros materiais estruturais, em razão de seu lento processo de carbonização (MOLINA; CALIL JUNIOR, 2010).

Conforme define SILVA (2014), "a capacidade de resistência ao fogo é definida como sendo o período de tempo que um elemento de construção, componente ou sistema construtivo

é capaz de manter as suas capacidades físicas para desempenhar a sua função” (SILVA, 2014, pág. 68), seja ela de vedação ou suporte de cargas. A madeira maciça, ao queimar de forma lenta, cria uma camada de carvão em sua superfície a medida que esta arde, protegendo e isolando o núcleo central da peça das altas temperaturas, de tal modo que este interior não queimado retém cerca de 85 a 90 % da sua força original (SILVA, 2014).

A autora também apresenta testes em escala real realizados por investigadores do NRC (*National Research Council Canada*), os quais buscam compreender a resistência dos painéis de CLT em situações de incêndio. Como resultado, constatou-se que a menor espessura de painel testada (painel de 5 camadas e espessura de 105 mm), sem qualquer tipo de proteção superficial, atingiu resistência ao fogo de 57 minutos. O painel de maior espessura testado (painel de 7 camadas e espessura de 245 mm), por sua vez, atingiu resistência ao fogo de 178 minutos, sem que, igualmente, houvesse recebido qualquer tipo de revestimento (*National Research Council Canada*, 2012, apud SILVA, 2014).

De forma semelhante, realizou-se em Tsukuba, no Japão, no ano de 2008, um teste de incêndio, em escala real, em um edifício de três pavimentos construído em CLT. Conforme apresentado por FRANGI *et al* (2008), o fogo iniciado em apenas um dos ambientes pôde ser extinguido manualmente após 60 minutos, sem ocorrência de danos estruturais nos painéis ou mesmo difusão do incêndio a outros ambientes do edifício.

Ainda no que diz respeito à segurança contra incêndio, deve-se atentar às ligações estruturais metálicas, cujas características de resistência e rigidez degradam de forma rápida com o aumento de temperatura. Consequentemente, conexões metálicas com função estrutural devem ser protegidas contra a ação do fogo. Uma das estratégias para essa proteção é a adoção de conectores embutidos nas peças de madeira (COSTA, 2013).

No que diz respeito à aplicação do CLT em edifícios altos, a principal barreira, de acordo com SILVA (2014) consiste no fato de ser um sistema maciço, associado ao colapso progressivo de toda a estrutura, em casos nos quais se utiliza um número elevado de paredes resistentes. A autora, ao analisar edifícios que utilizam o CLT em seu sistema estrutural, também constata como aspecto negativo deste emprego, a volumetria da torre, a qual é definida como “uma imagem de paralelepípedo, rígida e pouco trabalhada ou experimentada” (SILVA, 2014, pág. 18), resultado de uma extrusão dos desenhos da planta.

Em contrapartida, de modo a complementar os benefícios apresentados pelo elemento construtivo em estudo, pode-se citar o desempenho face à ação sísmica e a eficiência energética, conforme apontou JORGE (2013). A madeira, apresentando baixa

condutibilidade térmica ($\lambda=0,13 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$), possui grande potencial para a construção de edifícios energeticamente eficientes. Também proporciona melhor comportamento no que diz respeito às pontes térmicas, por essas apresentarem valores significativamente menores do que as de sistemas construtivos tradicionais (JORGE, 2013).

BRANDNER *et al* (2016) também mencionam a possibilidade de se executar aberturas, a exemplo de portas e janelas, de forma livre, sem restrição a nenhuma modulação ordenada, possibilitando alto grau de pré-fabricação. Além disso, o reduzido peso próprio da estrutura permite sua instalação em solos com baixa capacidade estrutural e para a revitalização de edifícios existentes. Nessa lógica, o autor aponta, assim como mencionam outros pesquisadores, que construção em CLT é caracterizada por um rápido tempo de montagem, devido à pré-fabricação e ao tamanho dos elementos construtivos, por canteiros de obras secos, cargas baixas e alta precisão.

Outro exemplo, mencionado por LEITE *et al* (2018) é a baixa produção de resíduos, citada anteriormente, e ainda a possibilidade de reaproveitamento destes, uma vez que os resíduos gerados durante a usinagem, como pó de serra, podem ser aproveitados para compostagem e complemento de ração animal. As sobras de painéis originadas dos cortes, por sua vez, também podem ser utilizadas na fabricação de outros componentes como degraus ou mesmo mobiliários (LEITE *et al*, 2018).

Por fim, é possível observar o consenso alcançado pelos autores analisados no sentido de considerar o CLT como uma tecnologia em constante ascensão, a qual, apesar de ainda possuir alguns pontos a serem estudados e otimizados, como visto no tópico anterior, apresenta grande potencial para o setor da construção civil.

2.2.1.Desenvolvimento arquitetônico

Ainda que possam ser considerados como uma tecnologia recente na história da construção civil, painéis de CLT, atualmente, são empregados em diversos países e continentes. BRANDNER *et al*/(2016) assinalam que o potencial do CLT pode ser observado em edificações residenciais ou comerciais com múltiplos pavimentos, acarretando no renascimento das construções em madeira no meio urbano.

Naturalmente, grande parte das edificações construídas em CLT encontram-se na Europa, em especial na Áustria, Alemanha, Suíça, Inglaterra, França, Itália e países nórdicos. Contudo, na América do Norte, com destaque especial para o Canadá, e na Austrália, o emprego deste elemento construtivo tem se tornado cada vez mais dissipado. É no Canadá, inclusive, onde se localiza o maior edifício construído até o momento com painéis de CLT, o Brock Commons, que será detalhado mais à frente.

Nos últimos anos, o surgimento de projetos de edifícios de múltiplos pavimentos que utilizam painéis de CLT como principal elemento construtivo, é apontado, por SILVA (2014) como uma resposta à necessidade de crescimento das cidades de forma sustentável, em vista do impacto ambiental negativo associado ao setor da construção civil. A autora divide tais edifícios em duas categorias: Sistema Integral de CLT e Sistema Híbrido.

Na primeira categoria, que também pode ser denominada como Construção Celular, enquadram-se aquelas edificações pautadas pela adoção de painéis de CLT em todas as paredes e lajes. Neste caso, a estabilidade estrutural é alcançada pelo emprego da parede viga e de um núcleo de circulação vertical construído com elementos mais espessos em CLT ou com painéis duplicados. Como exemplo, podem ser citados o Murray Grove (Londres, Inglaterra), o Bridport (Londres, Inglaterra) e o Fortè (Melbourne, Austrália).

No caso dos Sistemas Híbridos, por sua vez, recorre-se, frequentemente, ao concreto armado para execução das circulações verticais e das fundações, de modo a garantir maior resistência e estabilidade às solicitações laterais da construção (SILVA, 2014). Há também a possibilidade de se associar outros elementos aos painéis de CLT, como vigas ou pilares em aço, vigas em MLC ou mesmo lajes mistas de CLT e concreto. Nesse sentido, por meio da adoção de diferentes materiais de forma combinada são maximizadas as propriedades de cada um deles.

Um exemplo de edifício que se enquadra nesta categoria de construções híbridas é o Brock Commons (Figura 08), já mencionado. Localizada em Vancouver, no Canadá, e finalizada

Figura 08: Edifício Brock Commons.
Fonte: <http://vancouver.housing.ubc.ca/residences/brock-commons/>
(acesso em outubro de 2018).

Figura 09: Edifício The Tree.
Fonte: <http://www.skyscrapercenter.com/building/treet/16540>
(acesso em outubro de 2018).

Figura 10: Edifício Murray Grove.
Fonte: <http://waughthistleton.com/murray-grove/>
(acesso em outubro de 2018).

em 2017, esta é, atualmente, a maior edificação construída em madeira no mundo. Possui 18 pavimentos, sendo o primeiro estruturado em concreto armado e os 17 restantes constituídos por pilares de MLC e lajes de CLT. Apresenta dois núcleos de circulação vertical construídos também em concreto. Seu uso consiste em habitações estudantis para cerca de 400 alunos da *The University of British Columbia*.

Ainda nesta categoria, outro exemplo interessante é o edifício residencial Treet (Figura 09), localizado em Bergen, na Noruega e finalizado em 2015, consolidando-se como o maior edifício em madeira até então. Apresentando 14 pavimentos e 49 m de altura, sua estrutura é composta por pilares, vigas e contraventamento em MLC, núcleo de circulação vertical em CLT, fundação em concreto, módulos pré-fabricados em madeira para compor os apartamentos, lajes em concreto no quinto e no décimo pavimento e na cobertura (ABRAHAMSEN, 2015).

Dentre os exemplos apresentados para os edifícios com sistema integral em CLT, é válido discorrer com maiores detalhes, também, sobre o Murray Grove (Figura 10), dada sua importância na história das construções em CLT. Localizado em Londres e concluído em 2009, este possui nove pavimentos e cerca de 30 m de altura. Com uso residencial, foi o primeiro edifício construído inteiramente em CLT, incluindo as caixas de escada e elevador. A única exceção consiste na fundação, realizada em concreto.

Estes são apenas alguns exemplos de edificações com múltiplos pavimentos executadas em CLT, apresentadas com o intuito de ilustrar o atual emprego desta tecnologia no campo da arquitetura e da engenharia. Contudo, vale ressaltar que, mesmo que não tão abundantes como aquelas em sistemas construtivos tradicionais, as edificações finalizadas em CLT são inúmeras, localizando-se em vários países de diferentes continentes, como mencionado anteriormente.

2.3. Panorama nacional do CLT

Conforme comentado, o CLT é, atualmente, largamente empregado no continente Europeu. No Brasil, no entanto a produção desta tecnologia construtiva é muito recente. Até o momento, tem-se conhecimento de apenas um fabricante, que iniciou a produção dos painéis em 2012, no Estado de São Paulo.

O recente período de implantação desse elemento construtivo no Brasil não permitiu, até o momento, a formação de uma bibliografia extensa a seu respeito em território nacional. As referências técnicas e bibliográficas acerca do CLT limitam-se, predominantemente, ao Hemisfério Norte, onde são elaboradas com base nos métodos de produção e matéria-prima adotados especialmente em países europeus e que, muitas vezes, não condizem com a forma de utilização ou fabricação do material no Brasil.

Contudo, recentemente, alguns pesquisadores brasileiros vêm se dedicando ao estudo deste elemento construtivo. Como resultado, tem-se um número em crescente ascensão, de pesquisas sobre o tema publicadas nos últimos seis anos.

Dentre elas, CUNHA *et al*, em 2012, avaliaram o comportamento das ligações estruturais de CLT e MLC, utilizando para isso quatro tipologias de parafusos autoperfurantes, dispostos com uma inclinação de penetração de 45° e 90°. Concluíram que os sistemas de ligação dispostos com uma inclinação de penetração de 45° apresentam valores de resistência ao cisalhamento superiores e deslocamentos inferiores em relação aos sistemas de ligação com inclinação de penetração de 90°. Para a condução da pesquisa, os autores executaram corpos de prova com CLT fornecido pela empresa austríaca Binderholz.

PASSARELLI (2013) visou estabelecer diretrizes para a produção de painéis de madeira maciços, utilizando o princípio da laminação cruzada. Para isso, o autor estudou a produção de diferentes tipos de painéis maciços, dentre eles o CLT. Ao final, elaborou uma proposta para a fabricação de um painel maciço que utiliza toras de eucalipto como matéria-prima e pode ser produzido de forma, predominantemente, manual, adequando-se às características do setor madeireiro do Estado de São Paulo. Embora o produto final da pesquisa distancie-se dos conceitos de industrialização associados ao CLT, esta traz contribuições sobre a produção do painel no continente europeu.

Em 2014, PEREIRA, desenvolveu uma metodologia de ensaios para a caracterização estrutural de painéis de CLT, de modo a contribuir para a normatização do produto no Brasil. Para isso, o autor fabricou um painel de CLT em laboratório, utilizando madeira de

Pinus elliotti e adesivo estrutural a base de Melamina Ureia Formaldeído (MUF), no qual realizou ensaios para determinação de suas características físicas.

ALENCAR e MOURA (2014) analisaram a qualidade e o desempenho da colagem entre peças de madeira de pinus e eucalipto, de baixo valor agregado, utilizando-se para isso dois tipos de adesivos, para futura aplicação em painéis de CLT. Os adesivos utilizados foram MUF e ureia-formaldeído (UF). Após testes de cisalhamento nos corpos de prova, os autores constataram que o adesivo MUF apresentou melhor desempenho em relação ao adesivo UF nos dois planos de colagem estudados.

PEREIRA e CALIL JUNIOR (2015) demonstraram o dimensionamento de uma peça em CLT com base no Método Gama, que consiste em uma adaptação do Anexo B do Eurocode 5, concluindo que a aplicação deste método se mostra uma aproximação coerente, que poderia ser utilizada no dimensionamento de painéis fabricados no Brasil.

ALENCAR, em 2015, analisou, de forma bastante consistente, a viabilidade de produção de painéis em CLT com lamelas de *Eucalypto grandis* provenientes da medula e peças resultantes dos cortes de *Pinus ssp*, com comprimento inferior a 120 cm, verificando a qualidade e desempenho estrutural dos painéis confeccionados. As peças analisadas são consideradas rejeitos pelas serrarias por apresentarem baixo valor comercial. A autora confeccionou e ensaiou 16 painéis de CLT, com 4 configurações distintas, sendo dois tipos elaborados somente com pinus ou eucalipto e outros dois tipos combinando as duas espécies. Além disso, para cada configuração, três dos quatro painéis diferenciavam-se de acordo com o módulo de elasticidade das peças utilizadas como matéria-prima, identificado após classificação não destrutiva por ultrassom. O quarto painel de cada configuração foi realizado com lamelas cujo módulo de elasticidade era desconhecido. Ao final, os painéis fabricados foram submetidos a testes de flexão para determinação da resistência e rigidez, com base na metodologia prescrita no Anexo B da ABNT NBR 7190:1997 – Projeto de Estruturas de Madeira.

Como resultado, ALENCAR (2015) constatou que os valores obtidos nos ensaios se mostraram acima dos referenciados na literatura e na norma que regulamentava o CLT na América do Norte, ANSI/APA 320 (2012), na época do desenvolvimento deste trabalho. Concluiu, assim, que existe viabilidade técnica na utilização de matéria-prima com baixo valor agregado para a produção dos painéis. Verificou também a importância da classificação tanto visual como mecânica não destrutiva, tendo em vista que os resultados dos grupos sem classificação foram inferiores aos dos grupos elaborados com peças classificadas.

No mesmo ano, BOURSCHEID *et al* (2015) analisam em seu artigo a situação do potencial brasileiro na produção de CLT. Para isso, os autores discorrem sobre o processo de fabricação dos painéis, com bases nos estudos realizados por PASSARELLI (2013). Levantam também o potencial deste elemento construtivo e os desafios a serem enfrentados para sua implantação, dentre os quais podem ser mencionadas a aceitação na comunidade por essa forma de construção e a demanda intensiva por capital imobilizado (investimento em infraestrutura e maquinaria de produção). Afirmam, ainda, que o Brasil possui grande potencial para uso da madeira na construção civil e que inexistia empresa fabricando o CLT no país. Contudo, deve-se salientar que há um fabricante brasileiro desde 2012.

SILVA *et al* (2016) buscaram identificar as oportunidades e os desafios para a utilização do CLT no contexto brasileiro. As autoras apresentaram a tecnologia e seu processo de produção, com base nos procedimentos adotados na Europa para a confecção do CLT. Realizaram entrevista com empresária do setor madeireiro de Curitiba (PR), a qual tem como objetivo desenvolver um processo construtivo nacional com o CLT. Dentre as conclusões, mencionaram a necessidade de se criar normas específicas que regulamentem o uso da tecnologia no Brasil. Porém, ainda mesmo sem normatização o CLT, já está sendo tanto fabricado como empregado no país desde 2012, como um sistema construtivo inovador.

Em 2017, AMORIM *et al* analisaram quatro métodos analíticos adotados para o dimensionamento de lajes de CLT sujeitas à flexão. Os autores comparam os resultados obtidos por meio de ensaios, publicados por pesquisadores italianos em 2016, com os resultados obtidos nos cálculos, concluindo que o método denominado *Shear Analogy*² é o que apresenta menor percentual de erro em relação à situação real ensaiada.

PEREIRA e CALIL JUNIOR (2017) buscaram avaliar e comparar três painéis de CLT confeccionados no Brasil, sendo o primeiro produzido em laboratório com prensa hidráulica e adesivo MUF, o segundo produzido industrialmente em uma prensa a vácuo, com adesivo a base de poliuretano, e o terceiro confeccionado industrialmente em uma prensa hidráulica com adesivo MUF. Os autores realizaram ensaios de flexão, delaminação e cisalhamento nos painéis. Como o segundo painel foi reprovado no teste de

² De acordo com a autora, o método *Shear Analogy* "considera os módulos de elasticidade transversal e longitudinal para todas as camadas do painel. (...) O painel de CLT é considerado como duas vigas virtuais posicionadas em suas extremidades para a homogeneização da seção transversal." (AMORIM, *et al*, 2017, pág. 5).

delaminação na linha de cola, concluíram que aqueles painéis que apresentaram melhores resultados foram os confeccionados em uma prensa hidráulica. Afirmaram também que a qualidade da colagem é influenciada fortemente pelo tipo de prensagem, e não pelo adesivo.

No mesmo ano, OLIVEIRA e OLIVEIRA (2017), almejando gerar subsídios para o desenvolvimento de projetos arquitetônicos que empreguem o CLT no Brasil, apresentaram o processo produtivo nacional dos painéis, com base no acompanhamento de obras e da confecção de CLT brasileiro. Levantaram as decisões tomadas ainda na fase de concepção do projeto que interferem na produção do elemento construtivo em estudo e ressaltaram, ao final, a necessidade de se respeitar as características e limitações desta tecnologia, de modo a se maximizar os benefícios por ela proporcionados.

No ano de 2018, no XVI Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira e III Congresso Latino-americano de Estruturas de Madeira promovidos pela Escola de Engenharia da USP (EESC-USP) em São Carlos, constatou-se a publicação de cinco artigos que tiveram como foco o estudo de painéis de CLT.

PEREIRA e CALIL JUNIOR (2018), neste evento, apresentaram uma série de painéis maciços com laminação cruzada, além de realizarem um comparativo entre dois modelos experimentais desenvolvidos no Laboratório de Madeiras e Estruturas de Madeira (LaMEM) da EESC-USP, sendo um deles de CLT e outro de DLT (*Dowel Laminated Timber*). DLT consiste em um painel de madeira maciço unido por outro elemento de madeira, dispensando o uso de adesivos. O painel fabricado pelos autores constituiu-se por lamelas de pinus dispostas de forma perpendicular entre si e ligadas por cavilhas de madeira de pau-roxo. Após ensaios de flexão longitudinal e transversal aos quais foram submetidos ambos painéis, concluiu-se que o de CLT apresentou valores dos módulos de elasticidade superiores àqueles obtidos para o DLT, sendo que este último pode ser utilizado como elemento estrutural com o devido dimensionamento. Consideram ainda o menor impacto ambiental ocasionado pelo uso de cavilhas em comparação ao adesivo estrutural como vantagem do DLT em relação ao CLT.

Ainda neste encontro, MANAVELLA *et al* (2018) realizaram uma comparação entre a resistência à compressão paralela e cisalhamento na linha de cola de painéis confeccionados em laboratório, a partir de *Eucalyptus* sp. e *Araucaria angustifolia* e painéis comerciais de *Pinus taeda*. A motivação deste estudo diz respeito à possibilidade de se produzir painéis de CLT com diferentes espécies, dentre as quais podem ser incluídas madeiras nativas e de reflorestamento ou de florestas plantadas, apontando o grande

potencial apresentado pela tecnologia para a construção civil brasileira. Ao final, os autores verificaram que todos os painéis testados tiveram bom desempenho em comparação a resultados obtidos em estudos anteriores. Não obstante, os painéis produzidos em laboratório apresentaram valores iguais ou superiores ao painel confeccionado comercialmente.

ALMEIDA *et al* (2018), por sua vez, buscaram realizar uma análise comparativa entre corpos de prova de CLT produzidos em laboratório e concreto, no que diz respeito à resistência à compressão paralela às fibras e à densidade. Após ensaios, constataram que o concreto é mais denso que o CLT, apresentando-se igualmente mais resistente à compressão. Os autores ressaltaram também os benefícios ambientais proporcionados pelo CLT quando comparado a estruturas em concreto.

No mesmo evento, LEITE *et al* (2018) caracterizaram e analisaram o processo produtivo de painéis de CLT, verificando as possibilidades de implantação no mercado brasileiro. Para isso, os autores basearam-se no processo produtivo adotado em fábricas localizadas no exterior. Reconhecem, ainda assim, o fabricante nacional de CLT e obras já executadas no país. Concluíram, ao final, que os principais fatores que influenciam o sucesso na produção dos painéis são a qualidade da matéria-prima, localização do polo produtor e florestal, infraestrutura, mão de obra envolvida e demanda.

AMORIM *et al* (2018) estudaram o dimensionamento de lajes mistas compostas por painéis de CLT e concreto sujeitas à flexão, por meio dos métodos analíticos Método Gama e Analogia de Cisalhamento. A combinação de placas de CLT a uma camada de concreto é uma das possíveis soluções para a deformação excessiva das lajes de madeira empregadas em amplos vãos. Comparando os resultados analíticos encontrados para as lajes mistas e lajes de CLT com espessura igual às primeiras, os autores constataram uma melhora significativa no comportamento do painel composto CLT- concreto quanto à rigidez e à deformação.

Diante das referências acima expostas, nota-se a ocorrência de uma pequena quantidade de publicações enfocando estudos acerca de painéis de CLT confeccionados no Brasil. Porém, deve ser ressaltado o número crescente e significativo de publicações realizadas sobre o tema nos últimos anos, em especial entre 2017 e 2018, além da importância destas para o desenvolvimento e disseminação da tecnologia no país.

2.3.1.Desenvolvimento arquitetônico

A produção do CLT no Brasil iniciou-se em 2012, sendo neste ano edificada a primeira residência no país, implantada na cidade de Tiradentes (MG). Não foram encontradas outras referências a fabricantes ou exemplos de edificações construídas antes dessa data.

Entre os anos de 2012 e 2018, construíram-se no Brasil 31 edificações, que utilizam painéis de CLT de forma parcial ou total. Neste contexto, essas obras foram numeradas por ordem cronológica conforme a data de sua construção. Levantou-se suas principais características construtivas, como por exemplo, os materiais utilizados em cada pavimento da obra, a forma de construção (modular ou *in loco*) e a função do elemento construtivo CLT (parede, laje, vedação sem função estrutural, etc.), informações essas compiladas na Tabela 01.

Observa-se que os painéis de CLT não apresentaram função estrutural em todos os casos e algumas obras levantadas foram executadas inteiramente na indústria (construções modulares) e posteriormente transportadas ao local de instalação. Além disso, dentre o total das edificações, nota-se que oito delas possuem dois pavimentos. Dessas, apenas uma opta pela execução do pavimento térreo inteiramente com painéis de CLT e outras três empregam estruturas híbridas nos dois pavimentos. O restante adota sistemas construtivos tradicionais no pavimento térreo e painéis de CLT no pavimento superior.

Isto posto, torna-se evidente que as construções em CLT até o momento executadas no Brasil, ainda são tímidas e com dimensões reduzidas, restringindo-se a apenas edificações de dois pavimentos no máximo, quando comparadas àqueles edifícios em CLT construídos em outros países e apresentados anteriormente. Este fato é naturalmente compreensível, em razão do tempo de implantação no país do elemento construtivo estudado. O mesmo também ocorreu no continente europeu no início do desenvolvimento desta tecnologia.

No entanto, a partir das obras implantadas no Brasil e das informações levantadas, algumas análises já podem ser realizadas de modo a compreender a evolução do CLT no país. Dentre elas, a mais interessante de se avaliar é a quantidade de edificações executadas por ano desde o início da produção nacional. A princípio, os exemplares ainda eram escassos, consistindo em uma média entre 2 e 3 unidades entre os anos de 2012 e 2016. Após cerca de cinco anos o número de edificações cresceu de forma exponencial, alcançando um total de 31 obras levantadas até o ano de 2018. Vale aqui ressaltar que este levantamento foi realizado até novembro de 2018, incorporando também obras ainda em construção, como é o caso da Obra 23, a qual iniciou-se no primeiro

Gráfico 01: Número de edificações em CLT construídas por ano.
Fonte: da autora (2018).

Gráfico 02: Porcentagem de edificações em CLT construídas por local.
Fonte: da autora (2018).

Gráfico 03: Número de edificações em CLT construídas por uso e ano.
Fonte: da autora (2018).

semestre deste ano e no momento encontra-se na fase de conclusão dos acabamentos. Esta evolução, em termos de quantidade de edificações, pode ser observada no Gráfico 01.

Além disso, conforme visto no Gráfico 02, é interessante verificar que a grande maioria das edificações brasileiras em CLT localizam-se no Estado de São Paulo, totalizando 84 %, sejam elas na cidade de São Paulo (23 %), em cidades situadas no interior (48 %), mas ainda próximas à capital, como Suzano, Jundiaí, Itu ou Valinhos, ou mesmo no litoral do estado (13 %). Esta constatação se deve a dois motivos: a localização da fábrica nacional do CLT na cidade de Suzano e o fato de que o grande polo consumidor do país concentra-se em São Paulo. Naturalmente, esses fatores se relacionam entre si, visto que a implantação da fábrica próxima ao polo consumidor auxilia na disseminação da tecnologia ao reduzir os custos com o frete, os quais podem se apresentar bastante significativos no custo final do produto.

Outro fator interessante de se averiguar é o uso das edificações, as quais majoritariamente consistem em residências unifamiliares, correspondendo a 58 % do total das obras levantadas. Presumivelmente, isto se deve à inovação associada ao CLT, facilitando, assim, seu emprego em construções que envolvem um número menor de agentes e menos burocracia. Buscou-se comparar também os usos das edificações ao seu ano de construção (Gráfico 03), comprovando, como já era de se esperar, que a execução de edificações de outros usos que não o residencial apresentou maior crescimento apenas no ano de 2018, quando o CLT já se mostrava, de certa forma, mais estabelecido.

Consequentemente, tendo em vista a ascensão do número de edificações, a incorporação progressiva de novos usos a essas e a gradual disseminação pelo território nacional da tecnologia, tem-se a expectativa de que o CLT possa, de fato, se consolidar nos próximos anos no setor da construção civil brasileira.

De modo a ilustrar as construções em CLT no Brasil, algumas das obras levantadas são apresentadas nas imagens 11 a 22 a seguir.

nº da obra	ano	local	área (m²)	uso	tipo de montagem	tecnologia construtiva adotada por pavimento		função do elemento CLT
1	2012	Tiradentes (MG)	62	residencial	<i>in loco</i>	térreo	CLT	paredes autoportantes e lajes de piso e cobertura
2	2013	Itupeva (SP)	321	serviços	<i>in loco</i>	térreo	CLT	paredes autoportantes e lajes de piso e cobertura
3	2013	Ubatuba (SP)	78	serviços	<i>in loco</i>	térreo	CLT e vigas H20	paredes autoportantes e lajes de piso e cobertura
4	2013	São Sebastião (SP)	60	residencial	<i>in loco</i>	térreo	CLT	paredes autoportantes e lajes de piso e cobertura
5	2013	Itu (SP)	1350	residencial	<i>in loco</i>	subsolo	estrutura metálica e concreto	painéis de fachada (sem função estrutural)
						térreo	estrutura metálica (pilares e vigas) e CLT (vedação)	
6	2014	Jundiaí (SP)	30	serviços	modular	térreo	CLT	paredes autoportantes e lajes de piso e cobertura
7	2014	Jundiaí (SP)	30	serviços	modular	térreo	CLT	paredes autoportantes e lajes de piso e cobertura
8	2015	Vale do Parnaíba (SP)	45	residencial	modular	térreo	CLT	paredes autoportantes e lajes de piso e cobertura
9	2015	Vale do Parnaíba (SP)	45	residencial	modular	térreo	CLT	paredes autoportantes e lajes de piso e cobertura

Tabela 01: Levantamento das edificações em CLT no Brasil.

Fonte: da autora (2018) com base em informações fornecidas pela Crosslam.

nº da obra	ano	local	área (m²)	uso	tipo de montagem	tecnologia construtiva adotada por pavimento		função do elemento CLT
10	2015	Ubatuba (SP)	450	residencial	<i>in loco</i>	térreo	concreto e CLT	divisórias dos ambientes internos
						1º pav.	CLT	paredes autoportantes e lajes de piso e cobertura
11	2016	Belo Horizonte (MG)	18	comercial temporário	modular	térreo	CLT	paredes autoportantes e lajes de piso e cobertura
12	2016	Porto Feliz (SP)	600	residencial	<i>in loco</i>	térreo	CLT	paredes autoportantes e laje de cobertura
						mezanino	CLT	paredes autoportantes e lajes de piso e cobertura
13	2016	Itu (SP)	370	residencial	<i>in loco</i>	térreo	estrutura metálica e alvenaria	
						1º pav.	CLT	paredes autoportantes e lajes de piso e cobertura
14	2017	Suzano (SP)	85	serviços (escritório)	<i>in loco</i>	térreo	CLT (estrutura) e <i>wood-frame</i> (vedação e cobertura)	pilares e vigas
						mezanino	CLT (estrutura) e <i>wood-frame</i> (vedação e cobertura)	laje de piso, pilares e vigas

Continuação Tabela 01: Levantamento das edificações em CLT no Brasil.
Fonte: da autora (2018) com base em informações fornecidas pela Crosslam.

nº da obra	ano	local	área (m²)	uso	tipo de montagem	tecnologia construtiva adotada por pavimento		função do elemento CLT
15	2017	São Sebastião (SP)	165	residencial	<i>in loco</i>	térreo	alvenaria estrutural	
						1º pav.	CLT (quartos) e alvenaria estrutural (banheiros)	paredes autoportantes e lajes de piso e cobertura
16	2017	São Paulo (SP)	80	residencial	<i>in loco</i>	térreo	estrutura pré-existente em concreto e alvenaria	
						1º pav.	CLT	paredes autoportantes
17	2017	São Paulo (SP)	26,5	serviços	modular	térreo	CLT	paredes autoportantes e lajes de piso e cobertura
18	2017	Gonçalves (MG)	54	residencial	<i>in loco</i>	térreo	CLT (estrutura) e <i>wood-frame</i> (vedação e cobertura)	pilares e vigas
19	2018	Curucaca (SC)	90	residencial	<i>in loco</i>	térreo	CLT	paredes autoportantes e lajes de piso e cobertura
20	2018	Suzano (SP)	709	serviços (escolar)	<i>in loco</i>	térreo	CLT	paredes autoportantes e laje de cobertura
21	2018	São Paulo (SP)	78	serviços	<i>in loco</i>	térreo	CLT	paredes autoportantes e lajes de piso e cobertura
22	2018	São Paulo (SP)	1662	serviços (escolar)	<i>in loco</i>	térreo	CLT e MLC	laje de cobertura
23	2018	Valinhos (SP)	285	residencial	<i>in loco</i>	térreo	CLT	paredes autoportantes e lajes de piso e cobertura

Continuação Tabela 01: Levantamento das edificações em CLT no Brasil.

Fonte: da autora (2018) com base em informações fornecidas pela Crosslam.

nº da obra	ano	local	área (m²)	uso	tipo de montagem	tecnologia construtiva adotada por pavimento		função do elemento CLT
24	2018	São Paulo (SP)	*	comercial	modular		CLT	divisórias internas e mobiliário
25	2018	Boaçava (SP)	157	residencial	<i>in loco</i>	térreo	CLT	paredes autoportantes e lajes de piso e cobertura
26	2018	Gonçalves (MG)	27	residencial	modular	térreo	CLT	paredes autoportantes e lajes de piso e cobertura
27	2018	São Luiz do Paraitinga (SP)	208	residencial	<i>in loco</i>	térreo	CLT e MLC (Vigas)	paredes autoportantes
						1º pav.	CLT, MLC (vigas) e <i>wood-frame</i> (laje de cobertura)	laje de piso e paredes autoportantes
28	2018	Valinhos (SP)	525	residencial	<i>in loco</i>	térreo	estrutura metálica, CLT e <i>wood-frame</i>	paredes autoportantes
						1º pav.	CLT, MLC (vigas) e <i>wood-frame</i> (laje de cobertura)	laje de piso e paredes autoportantes
29	2018	São Paulo (SP)	50	serviços	<i>In loco</i>	térreo	CLT	paredes autoportantes e lajes de piso e cobertura
30	2018	São Paulo (SP)	50	serviços	<i>in loco</i>	térreo	CLT	paredes autoportantes e lajes de piso e cobertura
31	2018	Avaré (SP)	245	residencial	<i>in loco</i>	térreo	CLT e <i>wood-frame</i> (laje de cobertura)	paredes autoportantes

Continuação Tabela 01: Levantamento das edificações em CLT no Brasil.
 Fonte: da autora (2018) com base em informações fornecidas pela Crosslam.
 * obra com área indefinida e volume total de CLT de 20 m³.

Figura 11: Obra 01.

Fonte: da autoa (2017).

Figura 12: Obra 05.

Fonte: da autora (2017).

Figura 13: Obra 08.

Fonte:

<https://www.dezeen.com/2016/08/09/m-apa-architects-minimod-prefabricated-houses-brazil/>.

(acesso em setembro de 2017).

Figura 14: Obra 10.

Fonte:

<https://architizer.com/projects/residencia-itamam-buca/media/1942235/>.
(acesso em maio de 2017).

Figura 15: Obra 11.

Fonte: fornecido pela Crosslam (2016).

Figura 16: Obra 12.

Fonte: fornecido pela Crosslam (2017).

Figura 17: Obra 13.

Fonte: fornecido pela Crosslam (2017).

Figura 18: Obra 14.

Fonte: da autora (2017).

Figura 19: Obra 15.

Fonte: fornecido pela Crosslam (2017).

Figura 20: Obra 18.
Fonte: fornecido pela Crosslam (2018).

Figura 21: Obra 19.
Fonte: <https://mapaarq.com/min-cur>.
(acesso em outubro de 2018).

Figura 22: Obra 23 em construção.
Foto: da autora (2018).

3.

CROSS LAMINATED TIMBER:

PROCESSO CONSTRUTIVO

Analisado o contexto no qual se insere o CLT, em âmbito nacional e internacional, interessa agora compreender como ocorre o processo construtivo com estes painéis especificamente no caso do Brasil. O processo construtivo, de acordo com MESEGUER (1990, apud ABDI, 2015) é constituído pelo planejamento, projeto, materiais, construção ou execução, e manutenção. Classifica-se como tradicional, quando contempla o uso de técnicas artesanais; convencional, ao incorporar tecnologias comumente utilizadas no mercado; racionalizado, na medida em que apresenta melhoria gradativa dos processos tradicionais, e, por fim, industrializado ou pré-fabricado. Tratando-se de uma construção industrializada, torna-se fundamental integrar, em seu processo construtivo, as decisões anteriores ao projeto no desenvolvimento do produto. Nessa perspectiva, entende-se que a definição da tecnologia a ser adotada antecede o desenvolvimento dos projetos técnicos (ABDI, 2015). O entendimento do processo construtivo em CLT, portanto, mostra-se de suma importância para o desenvolvimento do projeto arquitetônico, de modo a garantir o melhor aproveitamento dos benefícios proporcionados pelo produto.

Figura 23: Diagrama ilustrando o processo construtivo em CLT.
 Fonte: da autora (2018).

Neste trabalho, divide-se o processo construtivo em CLT no Brasil em três partes: matéria-prima, fabricação dos painéis e montagem do edifício. Cada uma possui suas próprias etapas internas. A matéria-prima, após extração, pode ou não receber tratamento preservativo de modo a prevenir o ataque de organismos deterioradores, como fungos ou insetos. A fabricação, por sua vez, inicia-se com triagem visual das lamelas, passando pela emenda destas com *finger joints*, pela montagem e prensagem do painel e pelo corte e usinagem do painel prensado. A montagem do edifício inclui a logística, ou seja, o transporte dos elementos construtivos até o local da obra, assim como a movimentação e conexão das peças, a execução das instalações hidráulicas e elétricas e a instalação dos acabamentos finais.

De modo a planejar e orientar essas etapas, é necessário também a execução de projetos específicos que integram o processo construtivo em diferentes momentos. Para a confecção dos painéis, realiza-se o projeto e plano de corte destes, com base no projeto arquitetônico fornecido inicialmente. Da mesma forma, o carregamento dos elementos construtivos no veículo de transporte e a movimentação e conexão das peças, seguem, respectivamente, o plano de carga e o plano de montagem.

As fases mencionadas, a sequência de execução de cada uma delas e os projetos necessários para tal podem ser observados no diagrama ao lado, o qual busca sintetizar o processo construtivo de edifícios com painéis de CLT no Brasil (Figura 23).

Naturalmente, muitas dessas etapas assemelham-se ao processo de fabricação ou montagem dos painéis de CLT europeus ou americanos, conforme observado no tópico anterior. Contudo, o processo construtivo brasileiro possui certas particularidades específicas, em virtude das diferenças observadas, principalmente, nas condições climáticas dos países estudados. Consequentemente, no Brasil, torna-se necessário, acrescentar certos procedimentos no processo construtivo que visam adaptar a tecnologia ao contexto nacional, a exemplo do tratamento da matéria-prima. Além disso, observam-se, também, diferenças nos acabamentos, tendo em vista que camadas de isolamento térmico, por exemplo, não se mostram necessárias em muitas regiões do país, ao contrário do que ocorre no Hemisfério Norte.

Dessa forma, o presente capítulo tem como objetivo apresentar, em detalhes, as etapas integrantes do processo construtivo brasileiro em CLT. Busca-se, assim, gerar subsídios para o desenvolvimento de projetos arquitetônicos que empreguem os painéis em questão, e possibilitar o levantamento de recomendações projetuais para a aplicação do elemento construtivo em estudo.

3.1. Matéria-prima

O potencial florestal brasileiro é amplamente difundido e também divulgado por diversos autores como LEITE *et al* (2018). O Brasil encontra-se entre os principais produtores internacionais de papel, celulose e painéis de madeira, sendo a indústria brasileira de base florestal mundialmente conhecida pela sua alta produtividade. Como mencionou IBÁ (2017), o Brasil apresentou em 2016 a maior produtividade (madeira produzida por unidade de área ao ano) do mundo, além de possuir também a menor rotação (tempo decorrido entre o plantio e a colheita das árvores) em escala global.

No país, o solo e as condições climáticas favoráveis, no que diz respeito à luz, umidade e temperatura, possibilitam a formação de florestas em poucos anos. Dessa maneira, a produção brasileira de madeira torna-se muito mais rápida do que aquela de países do Hemisfério Norte, onde as baixas temperaturas acarretam o lento crescimento das árvores (ALENCAR, 2015).

O Brasil apresenta cerca de 58 % de seu território coberto por florestas naturais e plantadas, sendo que apenas a Rússia possui área florestal maior que a brasileira. Estima-se que as florestas nativas brasileiras ocupam área equivalente a 485,8 milhões de hectares (SNIF, 2017).

As florestas plantadas, por sua vez, são compostas por árvores de pinus e eucalipto e destinam-se à produção de celulose, papel, painéis de madeira, pisos laminados, carvão vegetal e biomassa. Em 2016, a área ocupada por estas totalizou 7,84 milhões de hectares, representando 1 % do território nacional e responsabilizando-se por 91 % de toda a madeira produzida no país para fins industriais (IBÁ, 2017).

Desse total, o plantio de eucalipto ocupa 5,7 milhões de hectares, distribuídos, principalmente, pelos estados de Minas Gerais (24 %), São Paulo (17 %) e Mato Grosso do Sul (15 %). O plantio de pinus corresponde a 1,6 milhão de hectares e concentra-se, majoritariamente, no Paraná (42 %) e em Santa Catarina (34 %) (IBÁ, 2017).

A madeira proveniente de florestas plantadas no Brasil é normalmente subutilizada pelo setor da construção civil, destinando-se, principalmente, para construção de fôrmas temporárias para estruturas de concreto e escoras de lajes (ALENCAR, 2015).

No entanto, como discorrido previamente, a madeira consiste em uma das únicas matérias-primas renováveis utilizadas no setor. A indústria brasileira de árvores plantadas, ademais, além de possibilitar o estoque de carbono mencionado no capítulo anterior,

contribui para a preservação das florestas nativas e conservação da biodiversidade, por reduzir a pressão exercida sobre estas. A adoção de técnicas de silvicultura, como o plantio em mosaico, garante ainda a formação florestal em diferentes estágios de crescimento, criando corredores ecológicos que integram áreas plantadas e florestas naturais. Contribuem também para a regulação do fluxo hídrico, da polinização e para a conservação do solo (IBÁ, 2017).

O setor florestal brasileiro apresenta também um grande aproveitamento dos resíduos gerados em suas atividades. Dentre os 47,8 milhões de toneladas de resíduos sólidos produzidos, 33,7 milhões (70,5 %) são provenientes das atividades florestais, correspondendo, principalmente, a galhos, cascas e folhas, e 14,1 milhões (29,5 %) originam-se das atividades industriais. Na área florestal, 99,7 % desses resíduos são mantidos no campo para proteção e fertilização do solo. Já aqueles provenientes das atividades industriais são destinados, em sua maioria, à geração de energia (em substituição a combustíveis fósseis), como matéria-prima para outras empresas do setor ou para a produção de novos produtos, como cimento e óleo combustível reciclado. Apenas 3,5 % dos resíduos gerados nessa segunda categoria são destinados a aterros próprios para descarte (IBÁ, 2017).

De modo a garantir a sustentabilidade do setor florestal, seu comprometimento com as questões socioambientais e a proveniência da madeira adquirida, uma das principais ferramentas adotadas é a certificação florestal, que consiste em um processo voluntário ao qual se submetem algumas empresas do ramo (SNIF, 2017).

As certificações são atribuídas por organizações independentes, como o *Forest Stewardship Council* (FSC), o Ceflor (Certificação Florestal) do Inmetro e o *Program for the Endorsement of Forest Certification Schemes* (PEFC) e, conforme afirma IBÁ (2017), atestam “que o manejo florestal é conduzido de forma responsável, ou seja, seguindo os princípios e critérios de responsabilidade social e ambiental estabelecidos pelas normas do sistema de certificação” (IBÁ, 2017, pág. 35). No Brasil, a primeira área certificada pelo FSC-Brasil data de 1995 (SNIF, 2017). Dentre a área de florestas plantadas brasileiras, especificamente, o total certificado corresponde a 3,1 milhões de hectares, ou seja, 39,5 % do total (IBÁ, 2017).

Na fabricação nacional de CLT utiliza-se madeira de pinus como matéria-prima, a qual, por não se constituir como uma espécie nativa do Brasil, é proveniente de florestas plantadas localizadas na região sul do país.

Figura 24: Corte transversal do caule de uma (a) conífera, com idade de cerca de 10 anos, e de uma (b) folhosa.

Fonte: da autora (2018). Imagem (b) retirada de LELIS *et al*/ (2001).

3.1.1. Características morfológicas e fisiológicas da madeira

As madeiras são classificadas em duas categorias: madeiras de Gimnospermas (conhecidas também como coníferas, resinosas, não porosas ou *softwood*) e as madeiras de Angiospermas (folhosas, porosas ou *hardwood*). O termo não-porosas e porosas refere-se à ausência ou presença, respectivamente, de elementos anatômicos denominados vasos ou “poros” nessas madeiras. Dentre as coníferas de interesse comercial tem-se a produção de exemplares da ordem Coniferales, como, por exemplo, o pinus, o pinho-do-paraná (*Araucaria angustifolia*) e o pinho bravo. As folhosas de interesse para a construção civil, por sua vez, consistem nas Angiospermas Dicotiledôneas, exemplificadas pelo eucalipto, ipê, cerejeira, peroba-rosa, imbuia, jatobá e mogno (LELIS *et al*, 2001; LEPAGE *et al*, 1986).

Apesar de suas diferenças, os caules das espécies das duas categorias, quando observados em seção transversal, podem ser divididos em quatro regiões básicas, apresentadas do centro para a periferia: medula, cerne, alburno e casca (Figura 24). Nas coníferas, contudo, as regiões tornam-se evidentes apenas em árvores adultas.

A medula se localiza na região central do tronco e constitui-se como um tecido primário, com função de armazenar substâncias nutritivas para as plantas. O cerne, por sua vez, é composto por células provenientes do alburno que perdem a atividade fisiológica. É a porção do caule onde são depositados os extrativos, resultado da transformação do alburno em cerne, e que apresenta, em geral, coloração escura, baixa permeabilidade e massa específica ligeiramente superior. Já o alburno é formado por células vivas e funcionais, responsáveis pelo transporte de água e sais minerais, sendo esta a porção permeável do caule. O caule de uma planta jovem é constituído inteiramente de alburno, sendo que a partir de uma certa idade da árvore, as células mais centrais do alburno vão, aos poucos, transformando-se em cerne. Por fim, a casca é composta por tecido morto e possui a função de proteger os tecidos vivos da árvore contra o ressecamento, ataque de organismos e variações climáticas (LEPAGE *et al*, 1986).

A presença de materiais nutritivos nos troncos das árvores, em especial nas parcelas do alburno e da medula, as quais não possuem substâncias tóxicas, torna essa matéria-prima suscetível ao ataque de organismos xilófagos, ou seja, aqueles organismos que comem (do grego *phagein* = comer) a madeira (do grego *xylon* = madeira) (LELIS, 2001). Esse processo pode ser denominado de biodeterioração e se constitui, assim como outras formas de deterioração passíveis de ocorrência nesse material natural, como um dos desafios a ser contornado quando do emprego da madeira na construção civil.

3.1.2. Agentes deterioradores

Apesar dos benefícios ambientais e estruturais, dentre outros mencionados anteriormente, a madeira apresenta algumas desvantagens. Como exemplo, tem-se a biodeterioração, ocasionada por organismos que reconhecem os polímeros da parede celular da madeira como fonte de alimento. No entanto, a deterioração dos elementos construtivos que utilizam essa matéria-prima não é causada apenas por organismos xilófagos, uma vez que os agentes deterioradores podem ser divididos em duas categorias: os biológicos (biodeterioração) e os físicos e químicos.

Dentre os fatores físicos e químicos, LEPAGE *et al*/(1986) mencionam quatro causas desta forma de deterioração, as quais são descritas a seguir:

Umidade: provoca a variação dimensional da madeira e é ocasionada pelos polímeros da parede celular (celulose, hemicelulose e lignina) que captam a umidade através de pontes de hidrogênio provocando o inchamento desta parede até a saturação. A madeira troca umidade com o ar a que está exposta, em função da umidade relativa e da temperatura do ar. Uma peça desse material submetida a um ambiente com temperatura e umidade relativa constantes, atinge, após certo período, situação de estabilidade, alcançando sua umidade de equilíbrio. Quando uma peça é utilizada com umidade acima do seu ponto de equilíbrio, essa perderá água para o meio externo, sendo que a perda de água abaixo do ponto de saturação das fibras é acompanhada pela contração volumétrica da peça. O ponto de saturação das fibras "corresponde a um teor de umidade no qual as paredes celulares se encontram completamente saturadas" (LEPAGE *et al*, 1986, pág. 188). Em média, a umidade de equilíbrio corresponde a aproximadamente 20 % da umidade relativa do ar, para temperaturas variando entre 20 °C e 30 °C. Ou seja, em regiões com umidade relativa média de 60 % e temperatura de 25 °C, por exemplo, a umidade de equilíbrio será igual a 12 %.

Produtos químicos: degradação apresentada pela superfície da madeira em contato com ácidos fortes, álcalis ou agentes oxidantes. Os principais tipos de reação são: hidrolíticas, oxidativas, descristalização, desfolhamento e manchamento. Este último consiste em uma forma de degradação frequentemente encontrada e resulta na conversão de extrativos incolores em produtos intensamente coloridos, como decorrência da oxidação destes componentes.

Fogo: pode ser enquadrado dentre os fatores físicos que promovem a degradação da madeira, a qual consiste em um material combustível. Apesar disso, inflamabilidade e

resistência ao fogo não são determinadas pela composição química dos elementos, mas pelas suas proporções e espessuras. A elevação da temperatura não diminui a resistência da madeira, podendo, inclusive, elevá-la, dado que o calor tira a sua umidade levando a uma contração das peças. Como mencionado anteriormente, peças de madeira maciça, ao queimarem, criam uma camada de carvão em sua superfície, protegendo, assim, seu núcleo central, que permanece intacto.

Weathering. consiste na degradação da madeira quando exposta à atmosfera, ocasionada pela ação conjunta de fatores como luz, umidade, temperatura, oxigênio, poluição atmosférica e abrasão. A consequência mais perceptível desse fenômeno é a alteração na cor, decorrência da fotodegradação ocasionada pela radiação ultravioleta. A mudança de cor da madeira, que assume aparência levemente acinzentada (Figura 25), relaciona-se à decomposição da lignina. Os produtos resultantes dessa decomposição são lixiviáveis, permanecendo, na superfície da madeira, fibras com alto teor de celulose e com coloração variando de branco ao cinzento, as quais são resistentes à degradação por ultravioleta. Este fenômeno é estritamente superficial, atingindo profundidade entre 0,05 e 2,50 mm.

Dentre os fatores biológicos, os principais grupos responsáveis por essa deterioração são aqueles denominados xilófagos, ou seja, que utilizam a madeira como fonte de nutrição, e causadores da biodeterioração.

O termo biodeterioração, conforme definido pela norma ABNT NBR 16143:2013 – Preservação de madeiras – Sistema de categorias de uso, consiste nas alterações indesejáveis produzidas pela ação direta ou indireta de seres vivos, em materiais usados pelo homem (ABNT NBR 16143, 2013). Esse processo, segundo LELIS *et al* (2001), leva à decomposição do substrato, tornando-o prejudicial e indesejável ao ser humano.

Os três principais agentes responsáveis por este processo consistem nos microrganismos, nos insetos e nos perfuradores marinhos. No grupo dos microrganismos encontram-se as bactérias e os fungos, sendo esses últimos subdivididos em fungos emboloradores, fungos manchadores, fungos de podridão mole, fungos de podridão parda e fungos de podridão branca. Cada um deles será descrito em detalhes a seguir, conforme definições apresentadas por LEPAGE *et al* (1986):

Bactérias: a presença desses organismos é identificada pelo surgimento de pequenas manchas acinzentadas na superfície da madeira, comumente distribuídas de forma aleatória. Observa-se também aumento na permeabilidade e redução das características mecânicas da peça.

Figura 25: Exemplo de duas fachadas de um mesmo edifício sendo uma (esq.) protegida, sem sofrer a ação do *weathering* e outra (dir.) exposta, com superfície acinzentada pela ação do *weathering*.

Fonte: da autora (2018).

Figura 26: Madeira atacada por fungos emboloradores (esq.) antes de ser aplainada e (dir.) após ser aplainada.

Fonte: LELIS *et al*/(2001).

Figura 27: madeira atacada por fungos manchadores (esq.) antes de ser aplainada e (dir.) após ser aplainada.

Fonte: LELIS *et al*/(2001).

Figura 28: Fungos de podridão, sendo (a) podridão mole, (b) podridão parda e (c) podridão branca.

Fonte: LELIS *et al*/(2001).

Fungos emboloradores: a madeira embolorada, infectada por esses fungos, apresenta uma formação pulverulenta em sua superfície, popularmente conhecida como bolor ou mofo, ocasionada pela produção de massas de esporos coloridos. Essa formação pode ser facilmente removida por raspagem, sendo que a madeira intensamente embolorada apresenta redução na sua resistência ao impacto e maior permeabilidade, ainda que o restante de suas propriedades mecânicas, como resistência à tração e à flexão, seja pouco afetado (Figura 26).

Fungos manchadores: provocam, no alburno da madeira, manchas profundas de coloração variável (geralmente de azul a cinza escuro), em razão do desenvolvimento de hifas pigmentadas. Assim como os emboloradores, não degradam a parede celular, interferindo apenas na resistência ao impacto das peças em que se emprega esse material. Ainda assim, mesmo não impactando as propriedades mecânicas da madeira, acarretam prejuízos consideráveis de ordem estética (Figura 27).

Fungos de podridão mole: a madeira contaminada apresenta superfície escurecida (Figura 28a). Quando úmida, encontra-se amolecida e facilmente removível, e quando seca, tende a apresentar pequenas fissuras paralelas e perpendiculares às fibras da madeira. Este apodrecimento é sempre superficial, porém, o ataque intenso resulta em redução nas características mecânicas da madeira, devido à destruição dos seus elementos estruturais.

Fungos de podridão parda: ocasionam uma coloração pardo-escuro, sendo que este apodrecimento pode atingir porções profundas da madeira (Figura 28b). Em estágios avançados, as peças atacadas, quando secas, tendem a colapsar parcialmente. Quanto às propriedades mecânicas da madeira, esses fungos provocam, também, um enfraquecimento bastante rápido, afetando, primeiramente, a resistência ao impacto e a permeabilidade.

Fungos de podridão branca: as madeiras atacadas por estes fungos adquirem coloração mais clara, esbranquiçada, em relação às sadias, apresentando-se também mais macias e esponjosas (Figura 28c). Quanto à resistência mecânica, resultam nos mesmos efeitos de enfraquecimento provocados pelos fungos de podridão parda, ainda que de forma relativamente mais lenta.

Dentre os fatores que condicionam a deterioração biológica ocasionada por microrganismos estão a temperatura, umidade e aeração da madeira, como aqueles mais relevantes. Praticamente todos os organismos bióticos necessitam de oxigênio para sua

Figura 29: Ciclo de vida de uma broca de madeira, sendo (a) ovo, (b) larva jovem, (c) larva ao final do estágio, (d) pupa e (e) estágio adulto.

Fonte: LELIS *et al* (2001).

Figura 30: (a) broca de madeira adulta e (b) madeiras atacadas.

Fonte: LELIS *et al* (2001).

sobrevivência e se desenvolvem em uma faixa de temperatura entre 5 °C e 65 °C, ainda que a temperatura ideal para sua subsistência varie em torno de 20 °C e 35 °C. Enquanto as baixas temperaturas desaceleram os processos de degradação, altas temperaturas podem ser letais a esses organismos, visto que poucos deles crescem acima de 35 °C ou 40 °C (LELIS *et al*, 2001; LEPAGE *et al*, 1986).

A umidade é outro fator fundamental à sua sobrevivência, dado que a decomposição não ocorre se o teor de umidade da madeira estiver abaixo do seu ponto de saturação das fibras, ou seja, em torno de 25 %. Isso ocorre, pois os constituintes da madeira devem ser quebrados em moléculas menores, solúveis em água, para que sirvam de fonte de energia para um microrganismo. Assim, os microrganismos produzem enzimas que atuam como catalisadores sobre os constituintes da madeira, possibilitando sua quebra. No entanto, a difusão dessas enzimas pela parede celular exige a criação de aberturas que permitam a passagem das enzimas, sendo essas aberturas proporcionadas pelo inchamento da parede celular quando saturada. Além disso, a água livre na madeira também irá atuar como solvente, possibilitando o transporte das enzimas dos microrganismos até o substrato e das moléculas resultantes da decomposição do substrato até os microrganismos. Por esse motivo, a maioria dos organismos não provoca danos em peças com umidade abaixo do ponto de saturação das fibras (25 a 30 %).

Esses mesmos fatores ambientais também possibilitam a criação de condições favoráveis para o desenvolvimento dos agentes deterioradores pertencentes ao grupo dos insetos, os quais se desenvolvem, predominantemente, em climas tropicais, ou seja, quentes e úmidos. Os principais representantes deste grupo consistem nos cupins e nas brocas de madeira, os quais são detalhados a seguir, conforme definições apresentadas por LELIS *et al* (2001).

Brocas de madeira: consiste em um grupo de insetos predominantemente tropical e composto por milhares de espécies, que podem atacar a madeira em todas as etapas, desde a árvore viva até a madeira seca de edifícios, mobiliários ou objetos. O início do ataque se dá quando a fêmea adulta deposita seus ovos na madeira. Ao eclodirem, os ovos darão origem às larvas, que se alimentam da madeira até atingirem a fase adulta. Os principais danos ocorrem na fase larval do ciclo de vida desses insetos (Figura 29). Ao final dessa fase, o inseto se transforma em um adulto e perfura a madeira para sair ao meio externo, onde irá acasalar e iniciar um novo ciclo (Figura 30). É nesse momento que é percebida sua presença, tendo em vista que no entorno do orifício utilizado pelo adulto para sair da madeira pode ser observado o acúmulo de serragem, resultado da escavação da abertura.

Figura 31: Exemplo do ataque de cupins de madeira seca.

Fonte: <http://www.dedetizacaoInsetan.com.br/descupinizacao/tipos-de-madeira-que-sao-menos-suscetiveis-ao-ataque-de-cupins/>.
(acesso em maio de 2018).

Figura 32: Exemplo de ninho de cupim epígeo.

Fonte: LELIS *et al* (2001).

Figura 33: Exemplo de ninho de cupim arborícola.

Fonte: LELIS *et al* (2001).

Cupins: insetos sociais, que formam colônias compostas por diferentes castas de indivíduos, divididas em operários, soldados e reprodutores (siriris ou aleluias quando adultos). Seu principal alimento é a celulose, sendo que para a digestão deste componente, associam-se a microrganismos. Dividem-se em três grupos: cupins de madeira, cupins de solo e cupins arborícolas. O primeiro grupo se desenvolve inteiramente dentro da madeira, seja ela com teor de umidade abaixo de 30 % (cupins de madeira seca) ou com teor de umidade elevado, acima de 30 % (cupins de madeira úmida). Seu ataque é facilmente reconhecido pelos resíduos (fezes) que lançam para fora da madeira atacada (Figura 31). Os indivíduos do segundo grupo, os cupins de solo, desenvolvem sua colônia no solo e podem ser cupins-subterrâneos (ninho subterrâneo) ou cupins epígeos (parte do ninho se aflora para a superfície) (Figura 32). Nos dois casos, túneis são construídos no solo ou na superfície, conectando as colônias à fonte de alimento. No grupo dos cupins-subterrâneos, as espécies xilófagas são aquelas consideradas como as que mais causam danos às edificações. Por fim, os cupins arborícolas constroem seus ninhos acima do solo, seja em árvores ou telhados (Figura 33).

No caso de madeiras instaladas em ambientes marinhos, a deterioração pode ser ocasionada pelos perfuradores marinhos, como crustáceos e moluscos. Pela inexistência destes organismos fora do ambiente marinho e consequente impossibilidade de impactarem as edificações em madeira, estes não serão apresentados de forma detalhada na presente dissertação.

3.1.3. Métodos de preservação

Os processos de deterioração apresentados anteriormente podem ser controlados por meio de medidas preventivas ou medidas curativas, no caso de processos já em andamento. No que diz respeito à deterioração ocasionada por agentes biológicos, dentre os métodos preventivos, passíveis de adoção em elementos construtivos como painéis de CLT, podem ser mencionados: a escolha correta da madeira ou o tratamento preservativo da madeira (LELIS *et al*, 2001).

A escolha da madeira pode ser adotada como medida preventiva dos processos de biodeterioração uma vez que algumas espécies possuem resistência natural a organismos xilófagos, ou seja, são capazes de resistir ao seu ataque. Tais espécies possuem, em seu cerne, extrativos que apresentam atividades inibidoras ou tóxicas aos organismos xilófagos, servindo como preservativos naturais. Mas quando se opta pela utilização de espécies com baixa resistência natural, dentre as quais pode ser citado o pinus, por exemplo, deve-se recorrer ao tratamento preservativo da madeira, que consiste em “proporcionar o aumento da sua resistência aos organismos deterioradores, pela aplicação de preservativos químicos” (LELIS *et al*, 2001, pág. 33).

Os preservativos químicos podem ser de três tipos: oleosos (representados pelos derivados de alcatrão e hulha), óleossolúveis (produtos contendo misturas de agentes fungicidas e/ou inseticidas, à base de compostos de natureza orgânica e/ou organometálica) e hidrossolúveis (misturas de sais metálicos dissolvidos em água) (ABNT NBR 16143, 2013).

A era moderna da preservação de madeiras tal como se conhece atualmente, inicia-se, por volta da década de 1830, com a patente do creosoto como produto preservativo e com o advento do processo de célula cheia para impregná-lo na madeira. O creosoto foi, durante muito tempo, o tratamento mais efetivo disponível no mercado (MORRELL, 2006). Este preservativo oleoso era utilizado, majoritariamente, em postes, não sendo recomendado para edificações, em virtude de sua natureza oleosa e suas propriedades químicas que provocam forte odor e exsudação de óleo (migração para a superfície).

Na década de 1930, dois novos importantes produtos foram desenvolvidos, o pentaclorofenol e o CCA (Arseniato de Cobre Cromatado). Pentaclorofenol consiste em um preservativo óleossolúvel que apareceu como um substituto ao creosoto, enquanto o CCA consiste em uma mistura de cobre, cromo e arsênio dissolvidos em água. Neste composto, o cobre atua como fungicida e o arsênio como inseticida. O cromo reage com ambos de modo a possibilitar a fixação destes na madeira, evitando, assim, sua lixiviação

ao meio ambiente. Até a década 2000, o CCA era considerado o produto químico mais importante utilizado na preservação de madeiras (MORRELL, 2006).

Contudo, nos Estados Unidos, no início da década de 2000, observou-se uma crescente inquietação relacionada aos efeitos na saúde provocados pela exposição a madeiras tratadas com CCA, devido à presença do arsênio. A maior preocupação era quanto ao risco de se desenvolver câncer ao longo da vida (WEST, 2004). Dessa maneira, em 31 de dezembro de 2003, a *Environmental Protection Agency* (EPA) e a indústria madeireira norte americana decidiram retirar, voluntariamente, o registro do CCA para usos residenciais (MORRELL, 2006), como áreas de recreação infantil, deques e mesas de piquenique, evitando, assim, contato direto com os usuários. Apesar disso, seu uso ainda é verificado para fins industriais e comerciais.

Neste cenário, foram desenvolvidos outros produtos químicos que visam substituir o CCA. Um deles consiste em uma mistura de cobre, cromo e boro (CCB), diluídos em água, a qual foi comercializada pela primeira vez no início da década de 1960, na Alemanha (LEPAGE *et al*, 1986). Neste composto, o boro, na condição de inseticida, atua como substituto ao arsênio. No Brasil, ainda que o CCB seja frequentemente utilizado na construção civil, não há restrição legal para o uso de CCA.

Os produtos mencionados, com ação fungicida e inseticida, são os mais difundidos no Brasil para este fim e são impregnados na madeira por meio de processos sob pressão, ou seja, impregnação profunda do preservativo na madeira em autoclave. Entretanto, existem no mercado outros produtos preservativos que, muitas vezes, atuam apenas como inseticida ou fungicida, e podem ser aplicados na madeira por meio de processos sem pressão, isto é, impregnação superficial, por meio do duplo vácuo ou por difusão.

Os processos com pressão são os mais eficientes para a preservação da madeira permeável, por promoverem a penetração total do produto preservativo nas peças. São processos realizados em instalações industriais, as usinas de preservação de madeira, e podem ser de dois tipos: célula cheia ou célula vazia. No primeiro processo, de célula cheia, a madeira é disposta na autoclave, onde é aplicado um vácuo inicial ao sistema. Posteriormente, é acrescentado o preservativo na autoclave, que é absorvido pela madeira em consequência do vácuo aplicado. Na sequência, aplica-se pressão positiva (12 kg/m³, por exemplo), para impregnação total da porção permeável da madeira. Depois, é aplicado um vácuo final de curta duração apenas para eliminação do excesso de preservativo. O processo de célula vazia diferencia-se do anterior unicamente pelo fato de não ser aplicado o vácuo inicial. Logo, ele é recomendado para o grupo das coníferas que

Categoria de uso	Condições de uso da madeira	Organismo xilófago
1	Interior de construções, fora de contato com o solo, fundações ou alvenaria, protegidas das intempéries, das fontes internas de umidade e locais livres do acesso de cupins subterrâneos ou arborícolas	Cupim de madeira seca Broca de madeira
2	Interior de construções em contato com a alvenaria, sem contato com o solo ou fundações, protegidas das intempéries e das fontes internas de umidade	Cupim de madeira seca Broca de madeira Cupim subterrâneo Cupim arborícola
3	Interior de construções, fora de contato com o solo e protegidas das intempéries, que podem, ocasionalmente, ser expostas a fontes de umidade	Cupim de madeira seca Broca de madeira Cupim subterrâneo Cupim arborícola Fungo embolorador ou manchador Fungo apodrecedor
4	Uso exterior, fora de contato com o solo e sujeitas às intempéries	Cupim de madeira seca Broca de madeira Cupim subterrâneo Cupim arborícola Fungo embolorador ou manchador Fungo apodrecedor
5	Contato com o solo, água doce e outras situações favoráveis à deterioração, como engaste em concreto e alvenaria	Cupim de madeira seca Broca de madeira Cupim subterrâneo Cupim arborícola Fungo embolorador ou manchador Fungo apodrecedor
6	Exposição à água salgada ou salobra	Perfurador marinho Fungo embolorador ou manchador Fungo apodrecedor

Tabela 02: Categorias de uso. Fonte: ABNT NBR 16143:2013.

apresentam alta permeabilidade, enquanto o de célula cheia é recomendado para o grupo das folhosas, por apresentarem baixa permeabilidade (LELIS *et al*, 2001).

A escolha do tipo de tratamento e produto preservativo a ser utilizado deve ser realizada levando-se em consideração o sistema de categorias de uso, estabelecido pela norma ABNT NBR 16143:2013 – Preservação de madeiras – Sistema de categorias de uso (Tabela 02). Este sistema foi dividido em seis categorias baseadas nas condições de exposição ou uso da madeira e nos possíveis agentes deterioradores presentes. Com base nas categorias estabelecidas e no tipo de madeira a ser tratada (madeira serrada, painel compensado, madeira roliça, etc.), a norma define também as medidas que devem ser adotadas ainda no projeto da estrutura, auxiliando na escolha do produto preservativo.

No caso das categorias de uso 1 e 2, é possível aplicar produto preservativo com ação unicamente inseticida, pois essas categorias englobam apenas peças em madeira que estarão fora do contato da umidade e sujeitas à ação exclusiva de insetos xilófagos (cupins e brocas). Alguns desses produtos, a exemplo de ciflutrina, cipermetrina, clorpirifós, deltametrina e endosulfan, podem ser aplicados sem pressão, ou seja, superficialmente (ABNT NBR 16143, 2013). Nas categorias 3, 4 e 5, por sua vez, é necessária a aplicação tanto de produtos com ação inseticida, quanto fungicida, haja vista a possibilidade de contato com umidade. Para as cinco primeiras categorias, os produtos preservativos com ação fungicida e inseticida que podem ser aplicados por meio de processos sob pressão consistem no CCA-C, CCB, creosoto (recomendado apenas para componentes que não estarão em contato com pessoas ou animais) e CA-B (produto preservativo à base de cobre e azóis, tipo B). E, finalmente, para a categoria de uso 6, que engloba elementos empregados em ambiente marinho, podem ser utilizados apenas os produtos preservativos CCA-C e creosoto, impregnados sob pressão nas peças (ABNT NBR 16143, 2013).

Contudo, produto algum pode conferir proteção satisfatória à madeira se não for corretamente aplicado. Assim, a especificação de um produto preservativo, com base nas categorias de uso, deve requerer penetração e retenção adequadas que dependem do processo escolhido. Maiores índices de retenção e penetração resultam, em geral, em maior vida útil do componente construtivo (ABNT NBR 16143, 2013).

A retenção, conforme estabelece a norma, consiste na “quantidade de produto preservativo introduzido e retido na madeira” (ABNT NBR 16143, 2013, pág. 4). É expressa em quilogramas de ingrediente ativo por metro cúbico de madeira tratável (kg/m³). A penetração é definida como a “profundidade atingida pelo produto preservativo na porção permeável da madeira” (ABNT NBR 16143, 2013, pág. 4).

Nessa perspectiva, a depender da categoria de uso definida, a norma apresenta os produtos preservativos e os processos de tratamento indicados para cada tipo de componente construtivo em madeira, seja ele madeira serrada ou painel compensado, por exemplo. Em cada caso, ficam estabelecidas também as retenções e penetrações mínimas que devem ser alcançadas. Não são mencionados painéis de CLT, abordando-se, apenas, elementos construtivos em madeira laminada colada empregados como arco, coluna, ponte ou passarela, poste e viga.

Os tratamentos preservativos mencionados, no entanto, não evitam o aparecimento de manifestações patológicas ocasionadas por agentes físicos e químicos, sendo que neste caso é necessária a adoção de acabamentos superficiais nas peças em madeira. Conforme definem LEPAGE *et al*/ (1986), “a função primária de qualquer acabamento para madeira é protegê-la contra os elementos responsáveis pelo *weathering* (sol e água), ajudando a manter a aparência.” (LEPAGE *et al*, 1986, pág. 204). Basicamente são adotados dois produtos para a proteção desta superfície: aqueles que formam película, recobrimdo a superfície, e aqueles que penetram através da superfície, não formando película. No primeiro grupo podem ser incluídos vernizes, tintas e lacas, enquanto no segundo encontram-se os repelentes de água e *stains*. O *stain* consiste em um acabamento superficial, aplicado comumente por meio de pincéis ou rolinhos de pintura, que penetra na face da madeira e não forma película. É constituído por pigmento sólido, resina hidro-repelente e fungicida, auxiliando na prevenção do desenvolvimento de microrganismos xilófagos (LEPAGE *et al*, 1986).

Vale ressaltar que a tendência observada no controle da deterioração de madeiras, atualmente, é regida por questões de saúde humana e proteção ambiental, englobando tanto a busca por novos métodos e produtos de caráter menos poluente e com menor toxicidade, quanto no sentido de proporcionar planejamento mais adequado das edificações, de modo a evitar os processos de deterioração discutidos, por meio de detalhes construtivos e projetos arquitetônicos eficazes.

3.2. Fabricação

O processo de fabricação dos painéis em CLT no Brasil inicia-se com a chegada da matéria-prima na fábrica, a qual é estocada de acordo com a demanda de fabricação. Esta matéria-prima consiste em madeira serrada (lamelas) de pinus, como antes mencionado, proveniente de florestas plantadas da região sul do país. A madeira é fornecida após secagem em estufa, com umidade de $(12 \pm 2) \%$.

As lamelas são adquiridas com ou sem impregnação de produto preservativo, podendo ser tratados em autoclave com CCB ou não tratados. Naturalmente, como analisado nas categorias de uso apresentadas pela ABNT NBR 16143:2013, os painéis confeccionados com matéria-prima não tratada devem receber aplicação superficial de inseticida, por não estarem isentos do ataque de insetos xilófagos. No caso da produção nacional, é aplicado, por pincelamento, inseticida óleo-solúvel, como cipermetrina, após o corte do elemento construtivo, antes do carregamento deste no veículo de transporte. Ressalta-se, que estes painéis devem ser aplicados em um contexto compatível ao seu tratamento, como divisórias internas fora do contato com a umidade, enquadradas nas categorias de uso 1 ou 2 da ABNT NBR 16143:2013, em situações onde é possível a manutenção de sua superfície. Isso se deve ao fato de que a aplicação superficial de inseticida apresenta menor durabilidade em relação ao tratamento em autoclave, podendo, assim, exigir reaplicações futuras durante a vida útil do edifício.

A produção nacional também emprega, em um mesmo painel, camadas compostas por lamelas tratadas e camadas de lamelas não tratadas. A camada superficial de um painel, que ficará aparente, por exemplo, quando determinado no projeto arquitetônico, pode ser confeccionada com lamelas não tratadas, por uma questão estética. Deste modo é mantida a coloração clara (variando de branca a amarelada) natural do pinus, tendo em vista que a madeira submetida ao tratamento com CCB adquire uma tonalidade esverdeada. As mesmas ressalvas constatadas para o caso anterior (painéis confeccionados com matéria-prima não tratada) são válidas também para este último tipo de painel.

Para que se dê início, de fato, à fabricação dos painéis de CLT, assim como para qualquer outra tecnologia construtiva encontrada no mercado, elabora-se o projeto arquitetônico da edificação, o qual leva em consideração, de antemão, as particularidades do componente construtivo em estudo.

Figura 34: Diagrama ilustrando o Plano de Corte.

Fonte: da autora (2018).

3.2.1. Projeto dos painéis

Após o recebimento do projeto arquitetônico, inicia-se, em fábrica, outra etapa de projeto, que consiste na modelagem dos elementos construtivos em CLT. Aqui vale distinguir os termos painel de CLT e elemento construtivo em CLT. O primeiro será utilizado para os painéis de grandes dimensões resultado da prensagem das lamelas de pinus. Desses painéis, são cortados os elementos construtivos em CLT de menores dimensões, que irão compor a edificação, ou seja, as vedações, as lajes, os pilares, dentre outros.

A modelagem desses elementos construtivos é realizada no *software* de desenho AutoCAD 3D e esses são ajustados em conformidade com as dimensões do projeto da edificação. Para aqueles com tamanhos que ultrapassam as dimensões máximas de fabricação, como lajes com mais de 12 m, são projetadas peças distintas que serão conectadas durante a montagem da edificação, para configurar a laje de maior dimensão.

O projeto dos elementos deve considerar, além do projeto arquitetônico comentado anteriormente, questões de transporte e fabricação. A título de exemplo, pode-se citar uma vedação com dimensões de 2,70 m de altura e 18 m de comprimento. Uma das opções possíveis para sua montagem seria fabricar um elemento de 6 m e outro de 12 m de comprimento para se conectar as duas peças no local de montagem. No entanto, essa escolha não é a mais adequada para a fabricação, por exigir o ajuste da prensa e do equipamento de usinagem para dois tamanhos distintos. Uma opção mais vantajosa seria a fabricação de dois painéis com 9 m de comprimento por 2,70 m de largura, pois, assim, tanto a configuração da prensa quanto a do equipamento de usinagem seria realizada uma única vez para as duas peças.

Deve-se ressaltar, que esse exemplo demonstra, de maneira simplificada, um dos aspectos que necessitam ser considerados na modelagem dos elementos. Naturalmente, mais fatores devem ser avaliados, como o veículo para transporte, os tamanhos e formatos dos demais elementos que serão utilizados na edificação, as condições de montagem, dentre outros de igual relevância que serão apresentados no decorrer deste trabalho.

Após a modelagem de todos os elementos a serem utilizados na edificação, esses são numerados e distribuídos nos painéis para que sejam fabricados, buscando-se maior economia e menor desperdício de material. Esse processo é denominado de Plano de Corte e será utilizado posteriormente na etapa de corte e usinagem do painel. Dessa forma, como ilustrado no esquema ao lado (Figura 34), de um único painel, é possível obter diversos elementos menores que irão configurar o edifício.

Figura 35: Ligação das lamelas de pinus por meio de *finger-joints*.

Fonte: Crosslam, foto da autora (2016).

Figura 36: Aplicação do adesivo estrutural.

Fonte: Crosslam, foto da autora (2016).

Figura 37: Posicionamento das lamelas de pinus de forma a criar camadas perpendiculares entre si.

Fonte: Crosslam, foto da autora (2016).

3.2.2. Seleção da madeira

As lamelas de pinus, primeiramente, são submetidas à avaliação visual de controle de qualidade, verificando-se as características da madeira e removendo-se defeitos que possam prejudicar a estrutura futuramente, como grandes nós ou pedaços de cascas.

3.2.3. Emenda das lamelas (*finger-joint*)

A emenda das lamelas é realizada por meio de ligações *finger-joints*, como as já apresentadas anteriormente. Na produção nacional essas emendas dentadas localizam-se na face das lamelas (Figura 35). As lamelas emendadas, após atingirem o comprimento necessário para uso em camadas transversais ou longitudinais, são, em seguida, aplainadas de modo a garantir a planicidade da superfície e uniformidade dimensional. As dimensões das lamelas passam, então, a ser 14 cm de largura por espessuras padronizadas de 19 mm, 20 mm, 30 mm, 35 mm ou 40 mm. O comprimento pode chegar a 12,00 m (camadas longitudinais) ou 3,00 m (camadas transversais).

3.2.4. Montagem e prensagem

As lamelas aplainadas são dispostas na prensa a vácuo lado a lado e orientadas em uma mesma direção, até se obter o comprimento desejado, ou a largura, para o painel. É então aplicado, de forma automatizada, o adesivo estrutural sobre a superfície dessa primeira camada de lamelas (Figura 36), posicionando-se em seguida uma nova camada acima e com orientação perpendicular à camada subjacente (Figura 37). O adesivo estrutural utilizado é monocomponente de poliuretano, isento de solventes ou formaldeídos, do tipo Purbond da Henkel AG®. O tempo de prensagem varia de acordo com a umidade e temperatura ambientes, fatores esses que alteram o período de ação do adesivo.

A prensa a vácuo utilizada na fabricação nacional possui um tamanho de 12,00 m de comprimento por 3,00 m de largura. Consequentemente, os painéis confeccionados podem atingir dimensões de, no máximo, 12,00 m x 3,00 m. A espessura dos painéis varia de acordo com a configuração de camadas e espessura das lamelas utilizadas. Assim, o painel mais esbelto possui espessura de 57 mm (três camadas de lamelas de 19 mm) e o mais robusto pode atingir 250 mm de espessura (sete camadas, sendo quatro de 40 mm e três de 30 mm). Outras configurações comuns são painéis de 80 mm (três camadas, sendo as duas externas com 20 mm e a interna com 40 mm), 95 mm (cinco camadas de 19 mm) e 105 mm (três camadas de 35 mm), os quais são mais utilizados para vedações verticais, e 120 mm (três camadas de 40 mm), sendo este último empregado em maior escala em lajes.

Figura 38: Esquema de funcionamento de um equipamento de usinagem com cinco eixos.

Fonte: adaptado de KOLAREVIC (2003).

Figura 39: Equipamento de usinagem do fabricante nacional de CLT.

Fonte: Crosslam, foto da autora (2016).

3.2.5. Corte e usinagem

O corte e a usinagem dos painéis são realizados em um equipamento de usinagem com CNC, por meio de fabricação subtrativa, que envolve a remoção de materiais sólidos por meio de processos mecânicos, elétricos ou químicos. A fresadora pode ser axial, superficial ou volumétrica. Na primeira delas, a cabeça de corte do equipamento possui dois eixos de translação enquanto o material a ser fresado é fixado em um eixo de rotação. Nas fresadoras superficiais, por sua vez, a cabeça de corte se movimenta apenas nos eixos X e Y. Já as fresadoras volumétricas consistem em uma extensão das superficiais. Nesse último processo, além dos eixos X e Y, a fresa movimenta-se também no eixo Z, possibilitando a remoção volumétrica de material. No entanto, para a elaboração de formas mais complexas, é possível, ainda, utilizar fresadoras com quatro ou cinco eixos. Nas fresadoras com quatro eixos, é adicionado um eixo de rotação (A) na cabeça de corte ou na mesa de corte. Nas fresadoras de cinco eixos acrescenta-se, além do eixo A, o eixo de rotação B, que consiste na rotação em torno do eixo Z (Figura 38). Para os três tipos de fresadoras descritos anteriormente, é possível utilizar no equipamento ferramentas com tamanhos distintos, como por exemplo, fresas de diferentes diâmetros (KOLAREVIC, 2003).

Nas fresadoras com comando numérico computadorizado (CNC), ou fresadoras CNC, um sistema computacional atua no controle dos movimentos do equipamento. Para isso, a geometria da peça a ser fresada é exportada para um *software* de pós-processamento, o qual irá gerar as instruções que serão transmitidas à fresadora, de modo a controlar seus movimentos, sua velocidade, as ferramentas utilizadas, dentre outros parâmetros. Nesse processo, a definição da sequência ideal de movimentos do equipamento, executada frequentemente por operadores qualificados, é uma etapa de fundamental importância (KOLAREVIC, 2003).

Para o corte e a usinagem dos painéis na fábrica nacional de CLT, realizados em uma fresadora de cinco eixos, utiliza-se o modelo tridimensional realizado previamente no *software* de modelagem durante a etapa de projeto dos painéis. O modelo tridimensional de cada elemento que irá configurar a edificação é exportado, individualmente, para o *software* do equipamento de usinagem, onde também são programados os movimentos que deverão ser executados para cortar e usar o painel. De acordo com o Plano de Corte, o painel é transformando nos elementos construtivos necessários para a montagem do edifício, incluindo as devidas aberturas de portas e janelas, canaletas de passagem de eletrodutos e outras necessárias para instalações prediais (Figura 39).

3.2.6. Finalização

A última etapa do processo de fabricação dos painéis de CLT consiste no acabamento final dos elementos já cortados, os quais, inicialmente, passam por uma limpeza ainda em fábrica. Aqueles que exigem uma superfície mais uniforme e lisa, no caso de peças que ficarão expostas após a montagem, por exemplo, são, também, lixados de modo a alcançarem o acabamento estipulado pelo projeto arquitetônico. Esse lixamento não é necessário para elementos que receberão, durante a montagem da edificação, revestimentos não-aderidos, a exemplo da aplicação de chapas de gesso acartonado, que serão analisadas mais à frente.

Além disso, todos os elementos fabricados com lamelas não tratadas em autoclave com produto preservativo, os quais serão empregados no interior da edificação, fora do contato com a umidade, recebem, ainda em fábrica, aplicação superficial de inseticida por pincelamento. Deve-se ressaltar, entretanto, que, durante a montagem da edificação, quando da realização de qualquer novo corte nos elementos construtivos, não previsto originalmente no projeto dos painéis, torna-se imprescindível nova aplicação deste inseticida, no local cortado, a fim de garantir a devida proteção de todas as faces das peças de CLT. Ademais, é importante atentar-se para a durabilidade e garantia do inseticida utilizado, verificando, assim, como já mencionado anteriormente, a necessidade de reaplicação após determinado período de tempo, conforme especificado pelo fornecedor do produto em questão.

Nessa etapa é possível também a aplicação de uma primeira camada de *stain* nos elementos construtivos. O *stain* pode apresentar diversas tonalidades e quando especificado no projeto arquitetônico, pode ser aplicado previamente nas peças de CLT, na cor indicada. Porém, possivelmente, será necessária nova aplicação após a montagem da edificação.

3.3. Montagem

A montagem de uma edificação em CLT é, neste trabalho, classificada de quatro formas: inteiramente modular, parcialmente modular (híbrida), parcialmente *in loco* ou inteiramente *in loco*. Na primeira categoria são enquadradas aquelas edificações que consistem em um ou mais módulos, executados completamente em fábrica, incluindo esquadrias, revestimentos e instalações. No caso de edificações compostas por mais de um módulo, esses são transportados individualmente, sendo, *a posteriori*, conectados um ao outro no local onde serão instalados. Naturalmente, ajustes finais para a conexão dos módulos entre si são executados *in loco*.

A segunda categoria engloba edificações nas quais módulos executados em fábrica são associados a peças individuais de CLT. Os elementos construtivos em CLT, muitas vezes, são empregados nos ambientes localizados entre os módulos, podendo também auxiliar na conexão entre eles.

O termo parcialmente *in loco*, por sua vez, é aqui utilizado para denominar a montagem de edificações compostas por elementos construtivos configurados por mais de um painel em CLT conectados entre si previamente, ou por peças de CLT que são, em fábrica, associadas a outros sistemas construtivos. Como exemplo, é possível citar elementos construtivos em CLT transportados com eletrodutos instalados em fábrica ou mesmo com revestimentos aplicados ainda na indústria.

As edificações restantes, compostas unicamente por elementos construtivos isolados em CLT, enquadram-se nas montagens inteiramente *in loco*. Nesse caso, esquadrias, instalações hidráulicas e elétricas, revestimentos e acabamentos são realizados *in loco*, após a montagem dos elementos construtivos em CLT.

Vale ressaltar que, para essas quatro categorias, a edificação pode ser composta unicamente por elementos construtivos em CLT, como estrutura e vedação, ou pode incorporar também outras tecnologias, a exemplo de estrutura metálica, componentes em MLC ou mesmo estruturas em concreto. De qualquer maneira, o transporte das peças, a conexão dos elementos em CLT, a execução de instalações e aplicação de acabamentos são realizados da mesma forma para as quatro categorias apresentadas, assim como os projetos necessários para tal. Essas etapas integrantes da montagem da edificação serão apresentadas a seguir e exemplificadas com base em constatações levantadas durante a montagem de duas residências (Obras 16 e 23 da Tabela 01), as quais foram incorporadas na presente dissertação como estudos de caso.

PLANTA ATELIÊ

— ELEMENTO EM CLT

CORTE AA

0 1 2 5 m

Figura 40: Projeto Obra 16.
Fonte: da autora (2018),
adaptado de desenhos
fornecidos pelo escritório
de arquitetura.

PLANTA RESIDÊNCIA

— ELEMENTO EM CLT

CORTE AA

0 1 2 5 m

Figura 41: Projeto da
residência da Obra 23.
Fonte: da autora (2018),
adaptado de desenhos
fornecidos pelo escritório
de arquitetura.

A edificação 16 (Figura 40) compreendeu a ampliação de uma residência no Butantã, na cidade de São Paulo. A estrutura em CLT foi montada no segundo pavimento da residência, de modo a configurar o ateliê de pintura e escultura do proprietário, resultando em um total de 80 m². Os elementos construídos em CLT foram empregados, nesse caso, como vedações verticais internas e externas com função estrutural. A cobertura foi executada com telhas metálicas termo acústicas, enquanto a laje de piso, em concreto. Configurou-se, assim, como uma edificação híbrida. O acompanhamento da montagem desta obra ocorreu em fevereiro de 2017.

A segunda obra adotada como estudo de caso, de número 23 (Figura 41), consistiu em uma residência localizada na cidade de Valinhos, interior do estado de São Paulo. Compõe-se por duas edificações térreas, comportando uma delas o espaço da garagem e de uma oficina, e a outra uma residência para hóspedes, composta por duas suítes e um ambiente com sala e cozinha integradas. A área total construída foi de 285 m², sendo 123 m² de garagem/oficina e 162 m² de residência.

Nesta segunda obra, os elementos construtivos em CLT foram empregados como vedações verticais internas e externas com função estrutural, lajes de cobertura e, especificamente nos dormitórios da residência, lajes de piso. As lajes de piso, nesse caso, foram instaladas acima de vigas metálicas dispostas sobre os pilares em concreto da fundação, afastando-se do solo cerca de 1,0 m. Na garagem/oficina e no ambiente social da residência a laje de piso foi executada em concreto.

O acompanhamento da montagem dos elementos em CLT nessa obra ocorreu em abril de 2018. Os acabamentos, no entanto, foram realizados posteriormente, no decorrer do segundo semestre de 2018. Até a finalização deste trabalho, esta obra encontrava-se ainda em construção, na etapa de execução dos acabamentos finais. Os exemplos apresentados a seguir alusivos à obra 23, referem-se, especificamente, à edificação da residência de hóspedes.

As duas edificações apresentadas enquadram-se na categoria de montagem inteiramente *in loco*.

(a)

(b)

Figura 42: Plano de montagem da Obra 16. (a) vista posterior; (b) vista frontal da residência.

Fonte: fornecido pela Crosslam (2017).

(a)

(b)

Figura 43: Perspectivas presente no Plano de montagem da Obra 23. (a) perspectiva ilustrando os elementos de laje; (b) perspectiva ilustrando os elementos de parede.

Fonte: adaptado de fotos da autora (2018).

3.3.1.Plano de montagem

Uma vez que os elementos construtivos em CLT são cortados em fábrica no tamanho exato e usinados para passagens de instalações elétricas, hidráulicas ou aberturas como de portas e janelas, é fundamental que sejam identificados e numerados para possibilitar sua fixação no local correto. A numeração dos elementos ocorre antes mesmo de se iniciar a fabricação, ou seja, durante a etapa de Projeto dos Painéis. A mesma numeração será utilizada também para a montagem desses no canteiro de obras.

A montagem, por sua vez, deve ser minuciosamente planejada de modo a otimizar a logística dos funcionários e das cargas. Nesse planejamento, define-se quais serão os primeiros elementos a serem montados, tendo em vista a facilidade de acesso, a estrutura da edificação e os equipamentos utilizados na montagem (guindaste, grua, caminhão munck, por exemplo). Levando-se em consideração esses mesmos fatores, posteriormente, é decidida a sequência e estimado o tempo de montagem.

Essas definições devem constar no Plano de Montagem, que consiste em desenhos (plantas, cortes, detalhes) e imagens (perspectivas), ilustrando o posicionamento de cada elemento construtivo na edificação. A perspectiva elaborada no plano de montagem da Obra 16 (Figura 42), por exemplo, ilustrava, por meio de cores, a sequência de montagem. Assim, as peças representadas na perspectiva pela cor verde, consistiam naquelas que seriam fixadas no primeiro dia. Em seguida, seriam montados os elementos de cor amarela (segundo dia), roxo (terceiro dia) e marrom (quarto dia). Por fim, seriam fixadas seis prateleiras, sendo a montagem dessas detalhada em um plano a parte. Ao todo, a edificação era composta por 38 elementos e o tempo de montagem foi estimada em cinco dias.

A utilização de cores, no entanto, é uma ferramenta opcional, e não foi utilizada, por exemplo, no plano de montagem da Obra 23. Neste caso, pela maior complexidade da edificação, foram necessárias plantas e perspectivas explodidas para sua montagem, de forma que elementos de laje e parede eram indicados em desenhos distintos (Figura 43).

O Plano de Montagem também deve conter detalhes indicando a quantidade e o espaçamento dos parafusos ou conectores metálicos que serão utilizados para a conexão dos elementos construtivos entre si. Da mesma forma, é interessante que apresente um documento listando todas as peças em CLT que serão utilizadas na edificação em questão, além de suas dimensões, de modo a possibilitar que os montadores chequem as dimensões dos elementos, durante a montagem, caso achem necessário.

Figura 44: Plano de carga da Obra 16, sendo (a) carga do primeiro dia, (b) detalhe de posicionamento das peças e (c) carga do segundo dia.

Fonte: adaptado do projeto fornecido pela Crosslam (2017).

Figura 45: Transferência da carga do frete para o caminhão munck durante a montagem da Obra 16.

Fonte: da autora (2017).

3.3.2. Plano de carga

Após a definição da sequência de montagem, no caso de edificações construídas inteira ou parcialmente *in loco*, deve-se planejar também como os elementos construtivos em CLT serão transportados ao canteiro de obras e qual será a disposição dessas peças no veículo de transporte. Estas informações estarão contidas no Plano de Carga, o qual deverá considerar a quantidade e tamanho das peças que compõem a edificação e a possibilidade de armazenamento dessas no canteiro de obras. Além disso, este deverá levar em conta também a sequência de montagem e o equipamento utilizado para tal, pois é possível que o mesmo veículo que realize o transporte das peças também execute seu içamento e posicionamento.

A quantidade e o tamanho dos elementos construtivos irão definir o tamanho do veículo de transporte e a quantidade de viagens necessárias para que se possa transportar todas as peças até a obra, dado que cada veículo possui uma capacidade de carga específica. A quantidade de viagens também é definida pela possibilidade de armazenamento das peças na obra. Vale, aqui, apontar que este armazenamento é realizado posicionando-se as peças umas sobre as outras, de modo a criar pilhas de CLT.

No caso da edificação 16, por exemplo, os 38 elementos construtivos em CLT, em termos de peso e tamanho, poderiam ter sido transportados em apenas uma viagem. No entanto, esses foram divididos em dois fretes (Figura 44), em razão da falta de espaço para o armazenamento, considerando que a laje onde foi executada a montagem poderia não suportar o peso total das peças empilhadas. Dessa maneira, a carga enviada no primeiro dia continha os elementos que seriam montados nos dois primeiros dias e mais três peças (01, 03 e 05), que seriam montadas no terceiro dia. Essas três últimas peças foram acrescentadas na primeira carga apenas para auxiliar a disposição dos elementos no frete. Planejou-se enviar a segunda carga no terceiro dia com o restante dos elementos.

Nessa edificação, o veículo que realizou o transporte não foi o mesmo que realizou a montagem. Assim, a posição dos elementos no frete era exatamente a mesma da sequência de montagem. Ou seja, a primeira peça a ser montada foi a primeira a ser posicionada, localizando-se abaixo de todas as outras no frete, já a última peça a ser movimentada também foi a última a ser colocada no frete, localizando-se no topo da pilha. Desse modo, após a transferência das peças para o equipamento que realizou a montagem (Figura 45), o elemento que se localizava abaixo de todos os outros na pilha transportada passa a ser o primeiro. Igualmente, o primeiro elemento da pilha do frete, será o último elemento da pilha da montagem.

Figura 46: Esquema ilustrando a sequência de carga e de posicionamento das peças.
Fonte: da autora (2018).

Esse mesmo raciocínio (posicionamento das peças no frete oposto à sequência de montagem) também deve ser utilizado para edificações que possuem espaço no canteiro de obras para armazenamento das peças.

Em contrapartida, em situações nas quais o mesmo veículo que fará o transporte das peças para o canteiro, realizará também a movimentação dessas, a posição dos elementos no frete deve ser oposta à sequência de montagem. Ou seja, a primeira peça a ser posicionada no veículo será a última a ser montada, sendo que a última peça colocada no frete será a primeira da pilha e, conseqüentemente, a primeira a ser movimentada durante a montagem da edificação.

A sequência de carregamento dos elementos construtivos em CLT pode ser melhor compreendida no esquema ao lado (Figura 46), que ilustra as opções de carga descritas acima, simulando a montagem da edificação esquemática exemplificada no item 3.2.1.

Não obstante, o encadeamento da montagem, por si só, não é determinante na definição da sequência de carga. É necessário também, verificar as melhores disposições das peças no frete, de modo a otimizar o transporte e garantir a estabilidade da pilha de elementos transportados. Alguns ajustes logísticos devem ser realizados nesse sentido. Como mencionado, no exemplo da Obra 16, três elementos construtivos que seriam montados apenas nos últimos dias, foram transportados logo no primeiro frete, de modo a possibilitar uma melhor organização e estabilidade das peças no veículo.

Percebe-se que o Plano de Carga visa melhorar e agilizar a etapa a montagem da edificação. Quando o frete é organizado sem que se leve em conta a sequência de montagem, possivelmente, será preciso movimentar os elementos construtivos mais vezes do que, de fato, necessário. Isso porque as primeiras peças a serem movimentadas, dificilmente, estarão acima de todas as outras.

O processo de busca dos elementos construtivos no canteiro de obras, ou a movimentação das peças que se encontram acima daquelas que devem ser posicionadas inicialmente, pode levar muito tempo, atrasando a montagem em horas ou dias. Esse tempo é extremamente valioso, especialmente quando se trata de uma edificação cujo período de construção é estimado em dias. Ressalta-se, dessa forma, a importância do Plano de Carga, no sentido de potencializar a logística de montagem de uma edificação em CLT.

	Modelo de veículo	Comprimento (m)	Largura (m)
Strada	1,9	1,2
HR	3,0	1,8
Iveco	3,9	2,1
Caminhão 3/4	5,5	2,2
Toco	6,0	2,2
Truck	8,0	2,4
Carreta simples	12,4	2,5

Tabela 03: Modelos de veículos utilizados no transporte dos elementos construtivos nacionais em CLT.
Fonte: da autora (2018), adaptado de tabela fornecida pela Crosslam.

3.3.3. Transporte

Os elementos construtivos após passarem pelas etapas de corte, usinagem, limpeza e lixamento (quando necessário) são armazenados em fábrica próximos ao local de saída dos veículos que os transportarão até o canteiro de obras. Esse armazenamento também considera, preferencialmente, o Plano de Carga, de modo a facilitar a colocação das peças no veículo de transporte.

O deslocamento dos elementos em CLT para o local de montagem pode ocorrer de diversas formas, de acordo com a quantidade e tamanho das peças que serão transportadas. Os veículos mais comuns utilizados pelo fabricante nacional constam na tabela apresentada ao lado (Tabela 03), a qual também relaciona as dimensões e capacidade de carga próprias de cada veículo.

Os limites regulamentados para transporte de cargas no território brasileiro constam na Resolução nº 210, de 2006, do Conselho Nacional de Trânsito - CONTRAN (CONTRAN, 2006). Neste documento, fica estabelecido que as dimensões máximas autorizadas para veículos com ou sem carga são: largura de 2,60 m, altura de 4,40 m e comprimento total, para o caso de veículos não-articulados, de 14,00 m, sendo que essa última dimensão é variável, podendo chegar a até 19,80 m para veículos articulados com mais de duas unidades. O peso para esses veículos é determinado em detalhes pela legislação em questão e varia de acordo com a tipologia, quantidade de eixos, dentre outras características.

Os veículos com dimensões excedentes a essas mencionadas ou que transportem cargas indivisíveis com dimensões acima dos limites regulamentados somente poderão circular se munidos de Autorização Especial de Trânsito (AET). A emissão dessa autorização deverá ser realizada previamente à data do transporte da carga e exigirá o pagamento de determinada taxa.

Caso esses possuam largura superior a 3,20 m, comprimento superior a 30,00 m ou altura superior a 5,00 m, deverão circular acompanhados por escolta credenciada ou com a Polícia Federal, a depender da categoria em que se enquadram, conforme estabelece o Anexo II da Resolução nº 1, de 2016, do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes - DNTI (DNIT, 2016).

Em vista do exposto, percebe-se a inviabilidade de se transportar componentes construtivos ou módulos pré-fabricados em CLT com dimensões superiores a 3,20 m de largura e comprimento, concomitantemente, pela necessidade de escolta para esse transporte.

Figura 47: Movimentação das peças em CLT pelo caminhão munck na montagem da Obra 16.
Fonte: da autora (2017).

Figura 48: Movimentação das peças em CLT pelo caminhão munck na montagem da Obra 23.
Fonte: da autora (2018).

Figura 49: Abertura da lança manual do caminhão munck na montagem da Obra 16.
Fonte: da autora (2017).

3.3.4. Posicionamento

Como visto na etapa de fabricação, os elementos construtivos em CLT podem atingir dimensões de até 12,00 m x 3,00 m. A densidade média considerada para o pinus empregado como matéria-prima é de 550 kg/m³. Por esse motivo, devido às grandes dimensões e ao elevado peso dos elementos construtivos, sua movimentação durante a montagem de uma edificação é realizada com o auxílio de equipamentos, a exemplo de gruas, guindastes ou caminhões munck.

O equipamento utilizado com maior frequência nas edificações brasileiras é o caminhão munck, que consiste em um equipamento com sistema hidráulico que tem a função de fazer a movimentação e içamento de cargas no canteiro de obras, ou remoção de equipamentos e máquinas, por meio de seu braço hidráulico telescópico, podendo, também, atuar no transporte dos materiais de construção. Os guindastes, por sua vez, são veículos especiais projetados para elevar, movimentar e baixar materiais, podendo ser auto propelidos ou montados sobre caminhão (DNTI, 2016).

No caso das duas edificações aqui estudadas, adotou-se para o içamento dos elementos construtivos em CLT, o caminhão munck (Figura 47 e 48). No entanto, no caso da Obra 16, a opção por este equipamento deu-se por conta da logística de montagem e não pela distância a ser alcançada pelo braço hidráulico. Tendo em vista que a lança automática do caminhão munck não alcançava o fundo da laje onde algumas peças deveriam ser posicionadas, o ideal para esta obra seria a utilização de um guindaste. Todavia, esse equipamento, pelo seu tamanho, exigiria o fechamento da rua em frente à residência, a qual comportava apenas trânsito local. Portanto, a montagem foi realizada com o auxílio de um caminhão munck, sendo que para as peças localizadas mais ao fundo da edificação foi preciso aumentar a lança hidráulica de forma manual (Figura 49). Esse processo aumentou, de certa forma, o tempo total de montagem.

Em situações nas quais não é possível o acesso de equipamentos hidráulicos de grande porte, pode-se adotar equipamentos menores, como empilhadeiras, ou mesmo realizar a movimentação das peças apenas com operários. Entretanto, ressalta-se que, o artigo 198 da Consolidação das Leis do Trabalho, Decreto-Lei no 5.452 de 01/05/1943, determina como sendo de 60 kg o peso máximo que um empregado pode remover individualmente, ressalvados o trabalho infantil e feminino. Dessa forma, para esses casos, os elementos construtivos devem ser dimensionados de modo a possuir peso compatível àquele definido na legislação brasileira.

Figura 50: Linha de silicone resistente às intempéries aplicada antes da conexão entre duas vedações em CLT alinhadas, durante a montagem da Obra 12.
Fonte: da autora (2017).

Figura 51: Parafusos do tipo VGZ (esq.) e HBS (dir.) da Rotoblaas[®]. O primeiro possui comprimento de 140 mm e o segundo 180 mm.
Fonte: da autora (2018).

Figura 52: Cantoneira metálica utilizada na Obra 23.
Fonte: da autora (2018).

3.3.5. Conexões

Após a movimentação e posicionamento dos elementos construtivos nos locais indicados pelo Plano de Montagem, estes são fixados entre si, ou nos demais sistemas do edifício, como lajes de concreto, vigas metálicas, dentre outros, por meio de parafusos auto perfurantes ou conectores metálicos. Nas juntas formadas entre dois elementos em CLT, estando eles paralelos ou perpendiculares entre si, aplica-se uma linha de selante de silicone resistente às intempéries (Figura 50).

Os parafusos utilizados no Brasil são fabricados por uma empresa italiana especializada em conectores para estruturas em madeira. São utilizados tanto em conexões simples, como entre duas vedações em CLT, quanto nas mais complexas, ou seja, quando a fixação ocorre por meio de conectores metálicos. Dentre eles, os dois principais tipos consistem no VGZ e no HBS (Figura 51), ambos produzidos pela Rothoblaas®. Conforme informações coletadas no sítio do fabricante, o primeiro possui uma cabeça cilíndrica e rosca contínua por todo seu comprimento, fornecendo alta performance no que diz respeito a resistência e rigidez. O segundo possui rosca assimétrica em forma de “guarda-chuva”, a qual permite uma maior capacidade de penetração na madeira. Também pode ser empregado sobre chapas e conectores metálicos.

Quanto aos conectores metálicos, estes estão disponíveis em diversos tamanhos e formatos, podendo tanto ser adquiridos da empresa mencionada ou de outros fornecedores, inclusive nacionais. Algumas das opções mais comuns encontradas nas edificações brasileiras são cantoneiras metálicas (Figura 52), chapas metálicas e conexões em formato de T, a exemplo do Alumini da Rothoblaas®.

Na montagem de uma edificação, o VGZ pode ser utilizado na conexão entre duas vedações em CLT dispostas de forma alinhada, fixados nessas com um ângulo de 45° (Figura 53). Esse tipo de conexão pode ser adotado apenas no caso de elementos de vedação, não sendo válido para a conexão entre duas lajes. O HBS, por sua vez, é empregado, por exemplo, para a conexão entre dois elementos dispostos entre si de maneira perpendicular, sejam eles duas vedações ou uma vedação e uma laje. A conexão entre dois elementos construtivos perpendiculares também se dá por meio de cantoneiras metálicas ou por meio de conexões em T (Figura 54). Da mesma forma, essas duas conexões são empregadas para a fixação das peças de madeira em fundações de concreto (Figura 55). Nesta última situação, é possível, ainda, empregar chapas metálicas (Figura 56), as quais, igualmente, podem conectar duas lajes em CLT alinhadas entre si. Algumas opções de emprego das conexões mencionadas são apresentadas a seguir.

Figura 53: Conexão entre duas paredes de CLT alinhadas, por meio de parafusos VGZ (escala 1:10).

Fonte: da autora (2018) com base em informações coletadas no sítio da Rothoblaas®.

Figura 54: Conexão entre duas vedações ou uma laje e uma vedação, dispostas entre si de forma perpendicular, por meio de conectores em T (escala 1:10).

Fonte: da autora (2018) com base em informações coletadas no sítio da Rothoblaas®.

Figura 55: Conexão de elementos em CLT na fundação em concreto por meio de cantoneiras metálicas (escala 1:10).
Fonte: da autora (2018) com base em informações coletadas no sítio da Rothoblaas®.

Figura 56: Conexão de elementos em CLT na fundação em concreto por meio de chapas metálicas (escala 1:10).
Fonte: da autora (2018) com base em informações coletadas no sítio da Rothoblaas®.

Figura 57: Conexão de elementos em CLT na fundação em concreto por meio de perfis e chapas metálicos (escala 1:10).
Fonte: da autora (2018) com base em desenho fornecido pela Crosslam.

Figura 58: Exemplo de conexão de elementos em CLT na fundação em concreto por meio de perfis e chapas metálicas.

Foto: fornecido pela Crosslam (2018).

Figura 59: Aplicação da fita de EPDM na face inferior do elemento em CLT na Obra 16.

Foto: da autora (2017).

Figura 60: Conexão das vedações em CLT na fundação em concreto, na Obra 23.

Fonte: Nathan Brito (2018).

No caso específico da conexão entre elementos construtivos de CLT e fundações em concreto, como já visto anteriormente, é necessário atentar-se para o desenvolvimento de detalhes construtivos eficazes que busquem isolar a peça de madeira, evitando a transmissão de umidade proveniente do solo e da fundação.

Esse isolamento pode ser executado de diversas formas, posicionando-se, por exemplo, um perfil metálico entre o CLT e a fundação. Em situações onde a laje de concreto não está muito bem nivelada, a utilização deste perfil é muito recomendada, auxiliando no nivelamento do piso. Sobre ele é colocado material emborrachado, a exemplo de fitas de EPDM (etilenopropilenodieno-monômero), de modo a evitar a ascensão de umidade para o elemento de madeira, o qual é conectado no perfil por meio de chapas metálicas e parafusos (Figura 57 e 58).

Quando da não necessidade de nivelamento da fundação, a conexão entre a esta e o elemento em CLT também pode ser realizada por meio de uma cantoneira metálica, empregando, do mesmo modo, o elemento emborrachado para evitar a ascensão de umidade (Figura 59).

Na edificação 23, a solução adotada foi semelhante à instalação de um perfil metálico para se executar a transição da fundação para o CLT. O elemento utilizado para nivelamento da fundação e transição entre esta e o CLT foi, neste caso, executado em alvenaria com uma fiada de blocos. Os elementos construtivos em madeira foram fixados nessa alvenaria por meio de chapas metálicas, posicionadas no lado externo do edifício (Figura 60). Para a fixação da chapa na alvenaria adotaram-se chumbadores mecânicos, enquanto que para a conexão da chapa no CLT, utilizaram-se parafusos HBS 8x80, ou seja, com diâmetro de 8 mm e comprimento de 80 mm.

Deve-se ressaltar que todas as conexões apresentadas são apenas exemplos das possibilidades de execução dessa etapa de montagem de um edifício em CLT, não se pretendendo, neste trabalho, esgotar as opções de conexões disponíveis no mercado. Além disso, as quantidades de parafusos ou conectores necessários, bem como o espaçamento entre esses, devem ser especificados pelo projeto estrutural da edificação, de acordo com cada caso específico. Para isso, é imprescindível levar em consideração a função do elemento construtivo na edificação, a carga a ele aplicada, dentre outros fatores.

Figura 61: Usinagem na vedação da Obra 23 para passagem dos conduítes elétricos.

Fonte: da autora (2018)

DETALHE EM PLANTA
ESCALA 1:10

Figura 62: Detalhe construtivo ilustrando o *shaft* para passagem das tubulações hidráulicas.

Fonte: da autora (2018).

Figura 63: Perfis de *drywall* fixados na vedação em CLT da cozinha da Obra 23, os quais estruturam o *shaft* para passagem das tubulações hidráulicas.

Fonte: da autora (2018).

3.3.6. Instalações

A execução de instalações elétricas em edificações em CLT pode ser realizada de maneira aparente, com conduítes expostos, ou de forma oculta, com eletrodutos embutidos nos elementos de CLT, sejam eles com ou sem função estrutural. Para essa segunda forma de execução, as canaletas para passagem dos eletrodutos são usinadas nos painéis por meio do equipamento de usinagem. Da mesma forma, as aberturas para caixas de tomadas e interruptores também são usinadas ainda em fábrica no tamanho exato, proporcionando assim, perfeito encaixe entre as peças (Figura 61).

Instalações hidráulicas, entretanto, não são alojadas no interior das vedações em CLT. Isso decorre da possibilidade de vazamentos nas tubulações, que poderiam ocasionar o aparecimento de manifestações patológicas, acarretadas pelo processo de biodeterioração. A construção de áreas molhadas é executada por meio de *shafts*, semelhantes a paredes hidráulicas, dispostos na frente dos painéis. Esses *shafts* são estruturados com perfis metálicos de *drywall* e placas de gesso acartonado resistentes à umidade, as quais, posteriormente recebem revestimentos com materiais cerâmicos ou pinturas (Figura 62). As tubulações, dessa forma, são dispostas entre o CLT e as placas de gesso acartonado, passando pelos perfis metálicos. Naturalmente, é necessária a aplicação superficial de produto impermeabilizante na superfície do elemento em CLT no qual serão instalados os perfis metálicos, evitando assim, o contato direto com a umidade no caso de eventuais vazamentos.

Essa solução foi adotada tanto na parede da cozinha, quanto dos banheiros da Obra 23, como se observa na imagem 63, a qual ilustra o momento anterior à instalação das placas de gesso acartonado, sendo que os perfis metálicos já estavam fixados nos painéis de CLT e as tubulações devidamente posicionadas.

Em situações onde dois banheiros são projetados com paredes hidráulicas posicionadas de forma espelhada, é possível, ainda, recorrer à execução direta de uma vedação inteiramente em *drywall* para a passagem das tubulações hidráulicas, dispensando, assim, o elemento construtivo em CLT como divisória dos espaços. No entanto, essa solução só é válida caso a vedação em CLT não tenha função estrutural.

Para lajes de piso em CLT, as instalações devem correr abaixo delas, tornando-se necessária, em edificações de múltiplos pavimentos, a execução de um forro no ambiente inferior à área molhada, se as tubulações não puderem ficar expostas.

Figura 64: Obra 16 após finalização da montagem e antes da execução da limpeza.

Fonte: da autora (2017).

Figura 65: Esquema ilustrando a instalação de revestimentos cerâmicos em elementos construtivos em CLT (medidas em centímetros).

Fonte: da autora (2018).

3.3.7. Acabamentos

A última etapa de montagem de uma edificação em CLT consiste nos acabamentos dos elementos construtivos. Como visto, ainda em fábrica, aplica-se uma primeira camada de *stain* na superfície das peças, considerado como uma proteção de superfície. No caso das peças que permanecem, quando em uso na edificação, sem a aplicação de qualquer outro tipo de proteção *a posteriori*, essas são denominados, aqui, de elementos sem revestimento, ou seja, são posicionados acabados em seus lugares definitivos.

Os elementos construtivos podem, também, receber a aplicação de diferentes revestimentos após sua instalação em obra. Esse revestimento, aplicado em um momento posterior, pode ser do tipo aderido ou não-aderido. No primeiro tipo enquadram-se aqueles que aderem na superfície em madeira. O segundo tipo, ou seja, revestimento não-aderido, por sua vez, engloba os materiais que são instalados nas superfícies com o auxílio de sistemas de fixação, a exemplo de fachadas ventiladas ou placas de gesso acartonado fixadas no CLT.

A escolha do revestimento a ser adotado, contudo, depende do uso para o qual se destina o elemento em questão. No caso de elementos construtivos de uso interno, a exemplo de vedações internas, lajes de piso ou forro, essas são empregados apenas com aplicação de uma proteção de superfície, com revestimento aderido aplicado *a posteriori*, como lajes mistas de concreto e madeira, ou com revestimentos não-aderidos aplicados igualmente em um momento posterior.

No caso das proteções de superfície, recomenda-se a adoção de produtos impregnantes que não criem película, pois, os movimentos de retração e expansão das fibras da madeira, em função de suas características higroscópicas, ocasionam o aparecimento de fissuras nesta película. Essa solução foi adotada na Obra 16, por exemplo, onde se optou por manter a madeira aparente no interior da edificação, aplicando-se apenas um *stain* na superfície dos elementos construtivos em CLT (Figura 64). Não obstante, para que isso ocorresse, foi necessária uma etapa de limpeza das peças após a finalização da montagem, considerando que essas estavam sujas e manchadas, em decorrência dos processos de movimentação, içamento e conexão. As manchas e sujeiras foram removidas por meio de panos umedecidos e lixas durante a etapa de acabamento, a qual teve uma duração de três dias.

Ainda levando em conta as características higroscópicas da madeira, recomenda-se, também, a aplicação de chapas de gesso acartonado em vedações que receberão revestimentos cerâmicos (Figura 65), de modo que a chapa de gesso acartonado absorva

Figura 66: Esquema ilustrando a aplicação do revestimento não-aderido externo com acabamento em madeira (medidas em centímetros).

Fonte: da autora (2018).

Figura 67: Obra 23 após a aplicação da fachada EIFS (*Exterior Insulation and Finish System*), na cor branca. A fachada em madeira, a qual seria instalada no interior das varandas, ainda não havia sido finalizada até o término desta pesquisa.

Fonte: da autora (2018).

as deformações do elemento estrutural e não as transmita para os revestimentos, evitando, assim, o aparecimento de fissuras nestes. Naturalmente, no caso de áreas molhadas que receberão esses revestimentos cerâmicos, a chapa de gesso acartonado a ser utilizada deve ser do tipo resistente à umidade.

Em áreas secas internas também é possível a aplicação de chapas de gesso acartonado para revestimento, as quais deverão, naturalmente, ser pintadas. Esse tipo de revestimento foi adotado, por exemplo, na edificação 23 e se deve ao desejo do usuário de possuir uma superfície plana e homogênea nas vedações, sem resquícios das diferenças de tonalidade ou da textura proporcionada pela madeira de pinus. Para as lajes de piso localizadas em áreas secas, por sua vez, tem-se que considerar o fato da madeira do gênero pinus possuir baixa dureza superficial. Logo, é comum o aparecimento de mossas quando o painel está sujeito a impactos constantes e pontuais, como, por exemplo, aqueles proporcionados por sapatos de salto. Quando essas mossas não são desejadas, deve-se revestir as lajes de piso, a exemplo de pisos laminados, em madeira, vinílicos, dentre outros.

Para elementos construtivos localizados no perímetro da edificação, ou seja, de uso externo, não são utilizados os mesmos revestimentos citados. A grande maioria das edificações em CLT construídas no Brasil adotou, nos elementos externos, a aplicação de uma fachada, a qual se enquadra na categoria dos revestimentos não-aderidos. De modo a se garantir a devida ventilação desta fachada, empregam-se perfis metálicos ou em madeira fixados nos elementos em CLT de modo a afastar o revestimento final da superfície dos painéis (Figura 66). Como revestimento final podem ser especificados os mais diversos materiais, a exemplo de placas cimentícias, ripas de madeira, telhas metálicas, dentre outras opções disponíveis no mercado.

Na edificação 23 foram especificados dois tipos de revestimentos não-aderidos externos. O primeiro tipo consiste em um sistema europeu composto por placas de poliestireno expandido (EPS), fixadas nos elementos em CLT, sobre as quais é aplicado um revestimento final semelhante a um estuque (Figura 67). Para esse revestimento final a empresa disponibiliza diversas opções de texturas e cores. O segundo tipo, adotado nesta edificação, é uma fachada de madeira fabricada por uma empresa europeia. Essa fachada difere-se das demais empregadas em outras edificações em CLT por possuir como revestimento final ripas de madeira termo tratada de pinus escandinavo. O termo tratamento adotado nessas madeiras é um método desenvolvido na Finlândia que provoca alterações químicas na matéria-prima por meio do vapor da água aliado ao aquecimento

SITUAÇÃO 01

SITUAÇÃO 02

Figura 68: Esquema dos painéis externos da Obra 05 (sem escala).

Fonte: da autora (2018), com base em desenho fornecido pela Crosslam.

Figura 69: Visualização da cobertura da Obra 23 após aplicação da manta de PVC.

Foto: da autora (2018).

das peças a temperaturas superiores a 190°C. Como resultado desse processo, observa-se o escurecimento da madeira e uma melhora da sua estabilidade em condições de variação da umidade do ar. Além disso, a matéria-prima se torna resistente a processos de deterioração atingindo uma vida útil de 30 anos. Porém, este produto não se apresenta resistente ao fenômeno do *weathering*, sendo necessária a aplicação de acabamentos do tipo *stain*, de modo a propiciar essa proteção e evitar a consequente mudança na coloração da peça.

A adoção dos elementos construtivos apenas com aplicação de proteção de superfície do tipo *stain* para uso externo foi verificada, dentre as edificações em CLT já construídas no Brasil, apenas na Obra 05. Apesar desta edificação não se constituir como um dos estudos de caso deste capítulo, é válido compreender em maiores detalhes a maneira como os elementos construtivos externos foram empregados, sem que fosse adotada uma fachada ventilada. O *stain* foi aplicado nas peças primeiramente em fábrica e posteriormente, após a finalização da montagem.

A estrutura da residência era composta por vigas e pilares metálicos, laje de piso em concreto e laje de cobertura em madeira. Os elementos em CLT, que consistiram nas vedações externas, foram fixados nas vigas metálicas conforme os detalhes ao lado (Figura 79), não apresentando, assim, função estrutural. Na primeira situação apresentada, que exemplifica a fachada dos dormitórios, os painéis com 60 mm de espessura foram empregados apenas na face exterior da edificação, sendo fixada uma chapa de gesso acartonado no interior da residência, afastada do CLT. Na segunda situação, a vedação era composta por dois painéis com espessura de 60 mm, sendo um externo e outro interno, afastados entre si em 200 mm. Analisando o detalhe construtivo da fixação dos elementos em CLT nessa obra específica, é possível constatar que os painéis em si foram utilizados como uma fachada (Figura 68), pois estão afastados da vedação interna, seja ela outro painel de CLT ou gesso acartonado. Além disso, a utilização dos elementos apenas como vedação, sem função estrutural, facilita possíveis substituições que venham a se mostrar necessárias no futuro.

Especificamente no emprego de lajes de piso externas ou lajes de cobertura, mostra-se necessária a execução de uma impermeabilização das peças, do tipo flexível pré-fabricada, ou seja, mantas de polícloreto de vinila (P.V.C), manta elastomérica de etilenopropilenodieno-monômero (EPDM) ou de acetato de etilvinila (EVA), por exemplo. Esse foi o caso da Obra 23, que adotou mantas de PVC para impermeabilização da cobertura (Figura 69).

EDIFICAÇÃO A

QTDE. DE PAINÉIS = 9

QTDE. DE LINHAS DE CONEXÃO = 14

LEGENDA

--- LINHAS DE CONEXÃO

EDIFICAÇÃO B

QTDE. DE PAINÉIS = 16

QTDE. DE LINHAS DE CONEXÃO = 21

LEGENDA

--- LINHAS DE CONEXÃO ACRESCENTADAS
EM RELAÇÃO À EDIFICAÇÃO A

Figura 70: Esquema comparativo entre duas edificações fictícias quanto ao aproveitamento da montagem.

Fonte: da autora (2018).

3.3.8. Duração da montagem

Como mencionado anteriormente, a montagem de uma edificação em CLT é extremamente rápida. A montagem, exclusivamente, dos elementos construtivos em CLT pode, inclusive, ser dimensionada em dias. O tempo de instalação dos acabamentos, em específico, varia de acordo com as especificações projeto arquitetônico. No caso da Obra 16, o tempo total de montagem dos elementos construtivos em CLT foi de 4 dias, assim como da Obra 23.

Os fatores que influenciam o tempo total de montagem dos elementos construtivos em CLT são, principalmente, a quantidade de painéis, a logística de montagem, ou seja, as condições de içamento e posicionamento dos painéis, e o número de funcionários que executam a montagem – além da habilidade que estes apresentam, naturalmente.

Como visto, para a montagem de uma edificação em CLT os elementos construtivos são içados da pilha por meio de um equipamento como caminhão munck ou guindaste, sendo posicionados no local planejado e conectados aos painéis adjacentes e à fundação, se for o caso. A sequência é a mesma para um painel grande e um pequeno. Todavia, a quantidade de conexões necessárias para painéis pequenos é muito maior do que para painéis grandes. No caso de uma edificação fictícia, como a exemplificada no esquema ao lado (Figura 70), de 10,00 m de comprimento por 5,00 m de largura, com pé direito de 2,90 m, seriam necessários 9 elementos para essa montagem, resultando em um total de 14 linhas de conexão. No entanto, caso essa mesma edificação tivesse um pé direito de 3,20 m, considerando o tamanho máximo de fabricação, ter-se-iam 16 elementos e 21 linhas de conexão. Tratando-se da mesma quantidade de funcionários e implantação da edificação, o tempo de conexão entre dois elementos adjacentes e o de içamento de cada peça seria o mesmo nos dois casos. Dessa maneira, o tempo de montagem da segunda será muito maior que o da primeira, comprovando a importância da quantidade de elementos no tempo de montagem de uma edificação.

Além deste fator, as condições de içamento podem alterar muito o tempo total. Em situações onde existe uma quantidade significativa de vegetação na frente da obra, por exemplo, dificulta-se a operação de içamento e posicionamento dos elementos construtivos, retardando esse processo. Esse foi o caso da Obra 16, a qual possuía uma árvore bem em frente ao lote. Nessa mesma obra, a necessidade de abertura da lança do caminhão munck de forma manual também influenciou, de certa forma, o tempo de montagem. A Obra 23, de maneira oposta, localizava-se em um lote amplo, com quase nenhuma vegetação, facilitando e acelerando, assim, o posicionamento dos painéis.

4.

CROSS LAMINATED TIMBER:

DESEMPENHO

Neste trabalho, optou-se por estudar, especificamente, os elementos construtivos no que diz respeito ao desempenho estrutural (impactos de corpo mole e corpo duro e a solicitações de cargas provenientes de peças suspensas) e à durabilidade (verificação da qualidade do tratamento empregado na matéria-prima, por meio de ensaios de retenção e penetração do produto preservativo, da resistência dos painéis à ação do calor e choque térmico e delaminação). Além disso, antes de se realizar o ensaio de calor e choque térmico, executou-se dois ensaios de estanqueidade à água. Os resultados obtidos foram comparados aos requisitos de desempenho estabelecidos pela ABNT NBR 15575:2013, os quais são classificados como mínimos, intermediários ou superiores. Nessa lógica, o elemento construtivo estudado pode atingir nível de desempenho mínimo, que deve ser atendido de modo a se garantir as necessidades básicas de segurança, saúde, higiene e economia, como pode também atingir nível de desempenho intermediário ou superior. Vale ressaltar, que todos os painéis aqui analisados foram considerados em sua pior situação de uso, ou seja, uso externo em edificações sem emprego de revestimento não-aderido externo, apenas com aplicação de *stain* em um momento posterior à sua produção.

4.1. Ensaios de retenção e penetração do produto preservativo CCB

Visando averiguar a resistência à biodeterioração e, conseqüentemente, a durabilidade da matéria-prima utilizada na fabricação nacional do CLT, realizou-se ensaios laboratoriais para determinar a retenção e penetração do produto preservativo CCB na madeira, comparando, ao final, a adequação dos valores obtidos àqueles determinados pela norma ABNT NBR 16143:2013 – Preservação de madeiras – Sistema de categorias de uso.

Os ensaios em questão foram realizados pelo Laboratório de Árvores, Madeiras e Móveis (LAMM) do IPT e se sucederam em dois momentos distintos. Inicialmente, no segundo semestre de 2017, foram submetidas aos testes seis amostras provenientes do estoque de matéria-prima do fabricante nacional do CLT. Posteriormente, no início do ano de 2018, realizou-se novamente o mesmo ensaio em quinze amostras de um novo lote do estoque.

4.1.1. Materiais

Ao todo, 21 amostras foram submetidas aos ensaios, selecionadas de forma aleatória entre aquelas disponíveis no estoque de matéria-prima do fabricante nacional de CLT. As amostras possuíam dimensões aproximadas de 150 mm x 150 mm. Dentre elas, 13 possuíam espessura de cerca de 40 mm e 8 de cerca 20 mm. De acordo com o fornecedor da matéria-prima, localizado em Santa Catarina, a madeira era do gênero pinus, proveniente da região sul do país e tratada em autoclave com produto preservativo CCB.

4.1.2. Métodos

A determinação da retenção do produto preservativo foi realizada segundo procedimento estabelecido pelo LAMM, com base na norma ABNT NBR 6232:2013 – Penetração e retenção de preservativos em madeira tratada sob pressão. O equipamento utilizado no ensaio foi um espectrofotômetro de absorção atômica, para determinação de elementos metálicos Cobre (Cu), Cromo (Cr), Arsênio (As) e Boro (B).

O ensaio de penetração do produto preservativo, por sua vez, consistiu no teste colorimétrico das amostras e sucedeu-se de acordo com o método presente na norma AWPA - *AMERICAN WOOD PRESERVERS' ASSOCIATION - Standard A03-08 - Standard Methods for Determining Penetration of Preservatives and Fire Retardants* (2005). Neste método, a cor azul nas amostras indica a presença do produto preservativo e para a avaliação da penetração deste considerou-se as seguintes categorias: PT - penetração evidente em toda a porção permeável da amostra; PI - penetração irregular na porção permeável; e PN - penetração não evidente.

4.1.3.Resultados

Os valores obtidos para os parâmetros testados são apresentados na Tabela 04.

Amostra	Ret. CuO (kg/m ³)	Balanc. CuO (%)	Ret. CrO ₃ (kg/m ³)	Balanc. CrO ₃ (%)	Ret. B (kg/m ³)	Balanc. B (%)	Ret. Total (kg/m ³)	Penetração
1338	0,8	28,6	1,8	64,3	0,2	7,1	2,8	PT
1339	0,4	26,7	1,0	66,7	0,1	6,7	1,5	PI
1340	0,7	25,9	1,8	66,7	0,2	7,4	2,7	PI
1341	0,8	27,6	1,9	65,5	0,2	6,9	2,9	PT
1342	0,9	30,0	1,9	63,3	0,2	6,7	3,0	PT
1343	0,8	26,7	2,0	66,7	0,2	6,7	3,0	PT
1387	1,0	22,2	3,1	68,9	0,4	8,9	4,5	PT
1389	0,9	23,7	2,6	68,4	0,3	7,9	3,8	PI
1394	1,0	29,4	2,2	64,7	0,2	5,9	3,4	PT
1395	1,3	24,1	3,6	66,7	0,5	9,3	5,4	PT
1396	0,8	29,6	1,7	63,0	0,2	7,4	2,7	PT
1397	0,9	20,9	3,1	72,1	0,3	7,0	4,3	PT
1399	0,6	26,1	1,5	65,2	0,2	8,7	2,3	PI
1402	1,1	25,6	2,8	65,1	0,4	9,3	4,3	PI
1403	0,8	30,8	1,6	61,5	0,2	7,7	2,6	PI
1405	1,1	24,4	3,2	71,1	0,2	4,4	4,5	PT
1406	1,1	23,4	3,3	70,2	0,3	6,4	4,7	PT
1407	1,3	25,0	3,6	69,2	0,3	5,8	5,2	PI
1408	0,9	22,0	2,9	70,7	0,3	7,3	4,1	PI
1412	1,0	20,8	3,4	70,8	0,4	8,3	4,8	PI
1423	1,0	22,7	3,0	68,2	0,4	9,1	4,4	PI

Tabela 04: Resultados dos ensaios de retenção e penetração realizados nas amostras de pinus.

Onde: Ret. = retenção

Balanc. = balanceamento

CuO = óxido de cobre

CrO₃ = trióxido de cromo

B = boro

Figura 71: Exemplo das amostras de pinus que apresentaram penetração irregular do produto preservativo CCB.

Fonte: da autora (2018).

4.1.4. Análise dos resultados

A penetração e retenção total do produto preservativo CCB presente nas amostras ensaiadas foram comparadas aos valores estabelecidos na norma ABNT NBR 16143:2013. Para isso, considerou-se que os elementos construtivos em CLT, quando empregados como lajes ou vedações, adequam-se, em geral, às Categorias de uso 2, 3 ou 4 da Tabela 02 (item 3.1.3), tendo em vista que podem ser utilizados tanto no interior (em contato ou não com fontes de umidade) quanto exterior das construções. Para as três categorias mencionadas, uma das opções apresentadas pela norma para tratamento da madeira serrada (matéria-prima na fabricação do CLT) é o produto preservativo CCB aplicado sob pressão. A retenção desse produto deve ser de no mínimo $4,0 \text{ kg/m}^3$. No caso de componentes estruturais de difícil manutenção, reparo ou substituição e/ou críticos para o desempenho e segurança do sistema construtivo, essa retenção mínima passa a ser de $6,5 \text{ kg/m}^3$. Contudo, dentre as 21 amostras ensaiadas, 11 delas (52 %) apresentavam resultado abaixo do valor mínimo.

No que diz respeito à penetração do produto preservativo em questão, a mesma norma estabelece que este deve alcançar 100 % da porção permeável da madeira. Consistindo o pinus um gênero completamente permeável e, desse modo, passível de tratamento, espera-se, portanto, a penetração total do CCB nas amostras ensaiadas. Todavia, 10 amostras (47 %) não atingiram essa penetração total (Figura 71).

Analizando a retenção e a penetração do produto preservativo de forma conjunta, constata-se que apenas 5 delas (23,8 %) apresentam os dois parâmetros de acordo com os valores estabelecidos pela norma estudada, ou seja, retenção superior a $4,0 \text{ kg/m}^3$ e penetração total. A mesma quantidade (23,8 %) apresenta retenção superior à esperada, mas penetração irregular do produto preservativo, enquanto 6 amostras (28,6 %) apresentam, de forma oposta, retenção inferior ao valor mínimo e penetração total do produto preservativo. O restante das amostras, ou seja, 5 delas (23,8 %), não atingem os valores esperados para os dois parâmetros analisados.

Das 21 amostras analisadas 16 estavam em desacordo do que é requerido por norma, ou seja, 76,2 % do total apresentavam desconformidade com os parâmetros mínimos exigidos, podendo comprometer a durabilidade dos elementos construtivos. Com isso, ressalta-se a importância em se garantir a qualidade do tratamento da matéria-prima antes da produção dos painéis, cuja vida útil é diretamente afetada pelos métodos de preservação. Além disso, deve-se exigir do fornecedor da matéria-prima a garantia do tratamento dentro dos padrões estabelecidos em norma.

Figura 72: Projeto do corpo de prova realizado para averiguação do desempenho estrutural do painel de CLT. Medidas em milímetro (sem escala).

Fonte: da autora (2018).

4.2. Desempenho estrutural

De acordo com a ABNT NBR 15575:2013 Parte 2: Requisitos para os sistemas estruturais, deve-se verificar por meio de ensaios apenas o item 7.4 Requisito – Impactos de corpo mole e corpo duro. O restante dos requisitos estruturais apresentados pode ser constatado por meio da análise de projetos. Além disso, considerando que o CLT consiste em um elemento de vedação vertical que pode apresentar função estrutural, deve-se analisar ainda o atendimento ao item 7.3 Requisito – Solicitações de cargas provenientes de peças suspensas atuantes nos sistemas de vedações internas e externas, presente na ABNT NBR 15575:2013 Parte 4: Requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas – VVIE.

Assim, para a devida apuração das características de desempenho estrutural de edificações em CLT os ensaios acima mencionados foram realizados entre setembro e outubro de 2017.

4.2.1. Materiais

Para os três ensaios mencionados, executou-se um único corpo de prova. Este possuía espessura de 80 mm (três camadas de lamelas de pinus tratadas em autoclave com CCB) e dimensões totais de 4000 mm de largura e 2700 mm de altura. Era composto por dois painéis de CLT, o primeiro com 3000 mm de largura e o segundo com 1000 mm de largura (Figura 72). A espessura adotada consiste na espessura mais comumente utilizada nas edificações em CLT construídas no Brasil, para vedações verticais com função estrutural. Optou-se por realizar uma junta no painel de modo a se averiguar o desempenho do sistema também no ponto de fixação entre dois painéis. A fixação entre os dois ocorreu por meio de parafusos VGZ 7x140 da Rothoblaas® parafusados com um ângulo de 45° em relação às faces dos painéis. A junta entre ambos se deu com aplicação de uma linha de selante de silicone resistente a intempéries.

O corpo de prova foi fixado em suas bordas inferior e superior em um pórtico, composto por duas vigas metálicas preenchidas com concreto, pré-existente no laboratório. Para essa fixação, simulando uma conexão real entre elementos construtivos em CLT e fundações em concreto, adotou-se um barrote de madeira, o qual foi fixado no dormente de concreto por meio de chumbadores. Acima do barrote foi posicionada uma fita de EPDM. Os painéis foram fixados no barrote por meio de parafusos VGZ 7x140 da Rothoblaas®, com um ângulo de 45° em relação às faces dos painéis.

Figura 73: Realização do ensaio de peça suspensa.

Fonte: da autora (2017).

Figura 74: Parafusos testados no ensaio de peça suspensa, sendo (a) parafuso HBS 6 x 60 da Rothoblaas® e (b) parafuso para MDF no tamanho 4,5 x 60.

Fonte: IPT (2017).

4.2.2. Métodos

O primeiro ensaio realizado consistiu no requisito *Solicitação de cargas provenientes de peças suspensas atuantes nos sistemas de vedações internas e externas*. O método adotado para tal consta no Anexo A da norma ABNT NBR 15575:2013 Parte 4. O objetivo deste ensaio é analisar a resistência do painel de CLT às solicitações originadas pela fixação de peças suspensas, a exemplo de armários, prateleiras, lavatórios, hidrantes, quadros e outros. A aplicação da carga no painel, para constatação de sua resistência, é realizada por meio de uma mão-francesa padronizada (Figura 73).

Foram realizados dois ensaios desse tipo, sendo que em cada um utilizou-se diferentes parafusos para a fixação da mão-francesa. No primeiro foram utilizados parafusos HBS 6 x 60 da Rothoblaas® (Figura 74a) e no segundo, parafusos para MDF convencionais no tamanho 4,5 x 60 mm (Figura 74b). A aplicação da carga na mão-francesa é realizada em patamares de 50 N e sem golpes, de acordo com o estabelecido em norma, aguardando-se um intervalo de 3 minutos entre o posicionamento de cada patamar. A carga máxima considerada no ensaio deve ser mantida na peça por um período de 24 horas.

Para o segundo ensaio realizado, que consistiu na verificação da resistência do painel de parede a impactos de corpo duro, o método adotado consta no Anexo B da norma ABNT NBR 15575:2013 Parte 4. Neste ensaio, os componentes estruturais sob ação de impactos de corpo duro, não podem sofrer ruptura ou traspassamento sob qualquer energia de impacto, sendo tolerada a ocorrência de fissuras, lascamentos e outros danos (impactos de utilização). O ensaio é realizado com a liberação pendular, em repouso, de um corpo de massa conhecida, a uma altura determinada. O corpo consiste em esferas de aço de dois tipos: um corpo duro de pequenas dimensões com 0,5 kg e um corpo duro de grandes dimensões com 1 kg.

Estes corpos são suspensos por um cabo e liberados em movimento pendular, gerando as energias de impacto indicadas na norma, até atingir o corpo de prova. Os impactos são aplicados em pontos aleatórios distintos, ou seja, cada impacto deve se suceder em um ponto diferente, sem haver repiques. Para cada energia estabelecida são realizados dez impactos. A norma em questão estabelece como energia de impacto 10 J e 20 J, para o corpo de grandes dimensões, e 2,5 J e 3,75 J para o corpo de pequenas dimensões. De modo a marcar o ponto de impacto do corpo duro no painel, utilizou-se um papel carbono, fixado com fita autoadesiva no corpo de prova.

Figura 75: Esquema ilustrando o paquímetro de profundidade a ser utilizado no ensaio de verificação da resistência do painel aos impactos de corpo mole.

Fonte: adaptado de ABNT NBR 11675:2016.

Figura 76: Medição do deslocamento horizontal instantâneo e residual durante ensaio de verificação da resistência do painel aos impactos de corpo mole.

Foto: da autora (2017).

O último ensaio realizado consistiu na aferição da resistência dos painéis a impactos de corpo mole, conforme método de ensaio indicado na ABNT NBR 11675:2016 Divisórias leves internas moduladas — Verificação da resistência aos impactos. Para tanto, utiliza-se um saco cilíndrico de couro, com dimensões de, aproximadamente, 350 mm de diâmetro e 900 mm de altura, contendo em seu interior areia seca e serragem, com peso total de (400 ± 4) N (equivalente a cerca de 40 kg), a ser usado como corpo mole. Além disso, a medição do deslocamento horizontal do painel é realizada por meio de um paquímetro de profundidade com resolução igual ou inferior a 0,1 mm (Figura 75).

Conforme descrito na norma em questão, o ensaio inicia-se com a suspensão do saco de couro, por meio de um fio de aço, de modo que a projeção de seu centro de massa sobre a superfície do corpo de prova coincida com o ponto onde o impacto deve ser aplicado. O dispositivo para registro gráfico dos deslocamentos do painel deve ser instalado em posição coincidente com o centro de massa do saco de couro, na face do corpo de prova oposta àquela que sofrerá a atuação direta do impacto. O saco cilíndrico de couro é então abandonado em movimento pendular e deve atingir o corpo de prova com as energias especificadas em norma, sendo elas: 120 J, 180 J, 240 J, 360 J, 480 J, 720 J e 960 J.

Após cada impacto, o corpo de prova passa por inspeção visual. O deslocamento horizontal instantâneo (dh) e o deslocamento horizontal residual (dhr) do painel são determinados para cada impacto por meio do paquímetro de profundidade. Após a aplicação de cada impacto, aguarda-se 5 minutos para registro do deslocamento residual do painel (Figura 76), deslocando-se, então, o papel milimetrado do dispositivo para registro gráfico dos deslocamentos e aplicando-se o impacto seguinte (ABNT NBR 11675, 2016).

O ensaio realizado nos painéis de CLT seguiu os procedimentos descritos anteriormente e previstos na norma mencionada. Foram determinados dois pontos onde o impacto foi aplicado, sendo que o primeiro se encontrava no centro do Painel de CLT 01, com largura de 3000 mm e o segundo localizava-se na junta entre os dois painéis. Para cada ponto realizou-se um impacto para cada energia especificada em norma, registrando-se o deslocamento horizontal por meio do paquímetro de profundidade.

Figura 77: Marcas dos impactos dos corpos duros nos painéis de CLT após ensaio de impactos de corpo duro.
Fonte: da autora (2017).

Figura 78: Realização do ensaio de impactos de corpo mole.
Fonte: da autora (2017).

Figura 79: Registro do deslocamento horizontal instantâneo após ensaio de impactos de corpo mole.
Fonte: da autora (2017).

4.2.3. Resultados

No ensaio para verificação da resistência do painel às solicitações de cargas provenientes de peças suspensas atuantes nos sistemas de vedações internas e externas, para ambos os parafusos testados, alcançou-se a carga de 100 kgf durante o período estipulado. As cargas de 80 kgf e 100 kgf foram mantidas na mão-francesa durante 24 horas, nos dois casos, sem que ocorresse qualquer tipo de danos ou deslocamentos horizontais instantâneos ou residuais no painel.

Na verificação da resistência do painel de parede a impactos de corpo duro, testou-se o painel ensaiado apenas com as energias 3,75 J, para o corpo de pequenas dimensões, e 20 J, para o corpo de grandes dimensões. Optou-se por não testar as menores energias, uma vez que se o painel não sofresse danos com as energias mais altas, naturalmente também não sofreria com as mais baixas, dispensando-se, assim, sua realização. Como consequência dos impactos realizados, observou-se o aparecimento de mossas com pequena profundidade. Na Figura 77, ilustra-se o painel após ensaio, com as mossas destacadas em tom escuro, consequência da ação do papel carbono. Não se verificou, em nenhum dos casos, ruptura, traspassamento, ocorrência de fissuras, lascamentos ou outros danos. As profundidades das mossas verificadas em cada impacto são apresentadas na Tabela 05.

No último ensaio realizado (impactos de corpo mole) (Figura 78), por sua vez, nos dois pontos de impacto e para todas as energias testadas, não se verificou ocorrência de ruína e traspassamento ou falhas superficiais, como mossas, fissuras, lascamentos, destacamentos e desagregações. No entanto, ocorreu pequeno deslocamento horizontal instantâneo nos painéis, o qual foi registrado pelo paquímetro de profundidade (Figura 79). Este deslocamento, para cada ponto e energia de impacto, é apresentado na Tabela 06.

4.2.4. Análise dos resultados

No que diz respeito à solicitação de cargas provenientes de peças suspensas atuantes no painel de CLT, este ensaio foi pausado no momento em que se alcançou, para os dois parafusos testados, o limite de carga estabelecida pela ABNT NBR 15575:2013 para o nível de desempenho intermediário (Anexo F da ABNT NBR 15575-4:2013), ou seja, de 1,0 kN (equivalente a 100 kgf). Não se observou, em nenhum dos casos, fissuras, destacamentos ou deslocamentos horizontais instantâneos ou residuais. Entretanto, é possível que os parafusos aguentassem carga ainda superior ao valor atingido. Dessa forma não é possível afirmar se alçariam desempenho intermediário ou superior neste quesito.

Impacto nº	Profundidade de mossa (mm)	
	Impacto de 3,75 J	Impacto de 20 J
1	0,6	1,3
2	0,6	1,7
3	1,0	1,1
4	0,7	1,6
5	0,2	1,2
6	0,3	2,5
7	0,7	2,1
8	1,4	1,6
9	0,6	0,8
10	0,2	0,6

Tabela 05: Profundidade das mossa verificadas em cada impacto de corpo duro.

Energia (J)	Impacto na junta		Impacto no centro do corpo de prova	
	Deslocamento instantâneo - d_h (mm)	Deslocamento residual - d_{hr} (mm)	Deslocamento instantâneo - d_h (mm)	Deslocamento residual - d_{hr} (mm)
120	8	0	6	0
180	9	0	7	0
240	11	0	9	0
360	13	0	12	0
480	14	1	13	1
720	18	0	16	0
960	22	1	18	1

Tabela 06: Deslocamentos verificados em cada impacto de corpo mole.

Para a verificação da resistência do painel de parede a impactos de corpo duro, conforme estabelece a ABNT NBR 15575:2013, a fim de se atingir o nível de desempenho mínimo, para as energias de 2,5 J e 10 J são permitidas mossas com qualquer profundidade, não podendo ocorrer falhas no elemento estrutural. Para as energias de 3,75 J e 20 J são permitidas falhas superficiais como mossas, fissuras, lascamentos e desagregações. Não podem ocorrer ruínas e traspassamentos. Para se atingir o nível de desempenho intermediário ou superior a norma determina, para a energia de 3,75 J, a profundidade máxima da mossa de 5 mm e 2 mm, respectivamente.

Neste ensaio, como citado anteriormente, não se verificou, em nenhum dos casos, ruptura, traspassamento, ocorrência de fissuras, lascamentos ou outros danos. Quanto às mossas, conforme verificado na Tabela 05, a profundidade máxima obtida no impacto de energia de 3,75 J foi de 1,4 mm. Consequentemente, no que diz respeito à resistência do painel ensaiado a impactos de corpo duro, atinge-se o nível de desempenho superior pelos critérios estabelecidos na ABNT NBR 15575:2013.

Para a análise dos resultados obtidos com os ensaios de corpo mole, verificou-se os critérios de desempenho apresentados no Anexo F da ABNT NBR 15575:2013 Parte 4 para todas as possibilidades de emprego do elemento construtivo em CLT, sendo elas: vedações verticais internas com e sem função estrutural (Tabela 07), vedações verticais externas (fachadas) de casas térreas com função estrutural (Tabela 08) e vedações verticais externas de casas térreas sem função estrutural (Tabela 09). Neste último caso, analisou-se apenas os critérios para vedações leves, ou seja, com densidade inferior a 60 kg/m^2 , visto que o painel ensaiado (com 80 mm de espessura e densidade média de 550 kg/m^3), por possuir massa de 44 kg/m^2 aproximadamente, enquadra-se nessa categoria.

Considerando a não ocorrência de ruínas, traspassamentos ou qualquer outro tipo de falha, faz-se necessária a verificação dos deslocamentos horizontais acarretados pelos impactos (Tabela 06).

Assim, calculou-se os deslocamentos instantâneos e residuais máximos permitidos em cada situação, sendo que o termo “h” nas equações apresentadas nas Tabelas 07, 08 e 09 é a altura do corpo de prova, a qual é de 2700 mm no painel de CLT ensaiado. Esses deslocamentos foram comparados aos valores máximos estabelecidos pela Norma de Desempenho, sendo que os valores calculados e os valores reais medidos durante o ensaio para cada ponto de impacto são apresentados na Tabela 10.

Sistema	Energia de impacto de corpo mole (J)	Critério de desempenho	Nível de desempenho		
			M	I	S
Vedação com função estrutural	360	Não ocorrência de ruína	X		
	240	São permitidas falhas localizadas	X		
	180	Não ocorrência de falhas	X		
	120	Não ocorrência de falhas Limitação dos deslocamentos horizontais: $d_h \leq h/250$; $d_{hr} \leq h/1250$	X		
	60	Não ocorrência de falhas	X		
	240	Não ocorrência de ruína		X	X
Vedação sem função estrutural	180	São permitidas falhas localizadas		X	X
	120	Não ocorrência de falhas Limitação da ocorrência de deslocamento: $d_h = h/125$; $d_{hr} \leq h/625$		X	X
	120	Não ocorrência de ruína São permitidas falhas localizadas	X		
	60	Não ocorrência de falhas		X	X
	60	Não ocorrência de falhas Limitação da ocorrência de deslocamento: $d_h \leq h/125^a$; $d_{hr} \leq h/625$	X		

^a para paredes leves ($G \leq 600 \text{ N/mm}^2$), sem função estrutural, os valores do deslocamento instantâneo (d_h) podem atingir o dobro dos valores indicados nesta Tabela.

Tabela 07: Impacto de corpo mole para vedações verticais internas.

Fonte: Anexo F da ABNT NBR 15575-4:2013.

Impacto	Energia de impacto de corpo mole (J)	Critério de desempenho	Nível de desempenho		
			M	I	S
Impacto externo (acesso externo do público)	960	Não ocorrência de ruptura		X	X
	720	Não ocorrência de ruptura	X	X	X
	480	Não ocorrência de falhas		X	X
	480	Não ocorrência de ruptura	X		
	360	Não ocorrência de falhas		X	X
	360	Não ocorrência de ruptura	X		
		Não ocorrência de falhas			
	240	Limitação dos deslocamentos horizontais: $d_h \leq h/250$; $d_{hr} \leq h/1250$	X	X	X
	180	Não ocorrência de falhas	X	X	X
	120	Não ocorrência de falhas	X	X	X
Impacto interno	480	Não ocorrência de ruína nem traspasse da parede pelo corpo impactador	X	X	X
	240	Não ocorrência de ruína nem traspasse da parede pelo corpo impactador	X	X	X
	180	Não ocorrência de falhas	X	X	X
		Não ocorrência de falhas			
	120	Limitação dos deslocamentos horizontais: $d_h \leq h/250$; $d_{hr} \leq h/1250$	X	X	X

Tabela 08: Impactos de corpo mole para vedações verticais externas (fachadas) de casas térreas, com função estrutural.

Fonte: Anexo F da ABNT NBR 15575-4:2013.

Impacto	Energia de impacto de corpo mole (J)	Critério de desempenho	Nível de desempenho		
			M	I	S
Impactos externos (acesso externo ao público)	360	Não ocorrência de ruptura nem traspasse da parede pelo corpo percussor de impacto	X		
	180	Não ocorrência de ruptura nem traspasse da parede pelo corpo percussor de impacto	X		
	120	Não ocorrência de falhas Limitação dos deslocamentos horizontais: $d_h \leq h/62,5$; $d_{hr} \leq h/312,5$	X		

Tabela 09: Impactos de corpo mole para vedações verticais externas (fachadas) de casas térreas, sem função estrutural, constituídas por elementos leves ($G < 60 \text{ kg/m}^2$).

Fonte: adaptado do Anexo F da ABNT NBR 15575-4:2013.

Tipo de vedação vertical	Energia de impacto (J)	Deslocamento calculado (mm)	Deslocamento real (mm)	
			Ponto A	Ponto B
Interna com função estrutural	120	$d_h \leq 10,8$; $d_{hr} \leq 2,16$	$d_h = 8$; $d_{hr} = 0$	$d_h = 6$; $d_{hr} = 0$
Interna sem função estrutural	120	$d_h \leq 21,6$; $d_{hr} \leq 4,32$	$d_h = 8$; $d_{hr} = 0$	$d_h = 6$; $d_{hr} = 0$
	60	$d_h \leq 43,2$; $d_{hr} \leq 4,32$	- -	- -
Externas de casas térreas, com função estrutural - Impacto externo	240	$d_h \leq 10,8$; $d_{hr} \leq 2,16$	$d_h = 11$; $d_{hr} = 0$	$d_h = 9$; $d_{hr} = 0$
Externas de casas térreas, com função estrutural - Impacto interno	120	$d_h \leq 10,8$; $d_{hr} \leq 2,16$	$d_h = 8$; $d_{hr} = 0$	$d_h = 6$; $d_{hr} = 0$
Externas de casas térreas, sem função estrutural, leves - Impacto externo	120	$d_h \leq 43,2$; $d_{hr} \leq 8,64$	$d_h = 8$; $d_{hr} = 0$	$d_h = 6$; $d_{hr} = 0$

Tabela 10: Compilação dos resultados encontrados para os deslocamentos horizontais do painel ensaiado.

Percebe-se, pelos resultados apresentados na Tabela 10, que praticamente todos os deslocamentos reais medidos, sejam eles instantâneos ou residuais, mostraram-se inferiores aos valores calculados com base nas equações apresentadas pela ABNT NBR 15575-4:2013.

Ainda nessa tabela, é interessante analisar o uso “vedações verticais externas de casas térreas com função estrutural – impacto externo (acesso externo do público)”. Nesta situação de aplicação dos painéis de CLT, para a energia de impacto do corpo mole de 240 J, o limite de deslocamento instantâneo deve ser menor ou igual a $h/250$. Como mencionado, o painel ensaiado possuía altura de 2700 mm e, por conseguinte, pela equação apresentada, o limite de α_h é de 10,8 mm. Neste caso, o valor de 11 mm medido para o deslocamento instantâneo seria superior ao limite calculado de 10,8 mm. No entanto, considerando a precisão do paquímetro de profundidade de 1 mm, e não de 0,1 mm, como prevê a norma, não é possível afirmar, ao certo, que o deslocamento real foi, de fato, inferior ao limite estabelecido. Pelo exposto, considerou-se que o valor medido seria equivalente ao calculado, arredondando-se o limite de 10,8 mm para 11 mm, por proximidade.

Considerando os resultados alcançados, é possível constatar que, se empregado como vedação vertical interna com ou sem função estrutural (Tabela 07), o painel de CLT ensaiado atinge o nível de desempenho superior no que diz respeito à resistência aos impactos de corpo mole. No caso de seu emprego como vedação vertical externa de casas térreas, com função estrutural (Tabela 08), o nível de desempenho alcançado nesse requisito analisado também é superior. Por último, se empregado como vedação vertical de casa térrea, sem função estrutural (Tabela 09), igualmente atingiria o nível de desempenho superior.

Figura 80: Esquema ilustrando a aparelhagem do ensaio de estanqueidade à água.
Fonte: ABNT, NBR 15575 (2013).

Figura 81: Corpo de Prova 02 instalado na câmara de formato prismático antes do início do ensaio de estanqueidade à água.
Fonte: da autora (2017).

4.3. Estanqueidade à água

Os ensaios laboratoriais para a verificação do desempenho dos painéis quanto à estanqueidade à água foram realizados entre novembro e dezembro de 2017, como prévia do ensaio de calor e choque térmico, conforme recomendação dos pesquisadores do IPT, dado que este segundo ensaio também analisa a estanqueidade à água do painel. Isto porque, caso os painéis não apresentassem desempenho satisfatório quanto à estanqueidade à água, não seria realizado o ensaio de calor e choque térmico.

Os ensaios em questão visam analisar o desempenho de painéis fabricados no Brasil quanto à estanqueidade, avaliando tanto a estanqueidade da junta (conexão entre dois elementos construtivos em CLT) quanto do próprio painel de CLT, à água proveniente de chuvas incidentes ou de outras fontes, considerando-se ainda a ação dos ventos.

4.3.1. Método

O método adotado consta no Anexo C da norma brasileira ABNT NBR 15575:2013 Parte 4. O ensaio consiste em submeter, durante um tempo determinado, a face externa do corpo de prova de um sistema de vedação vertical externa a uma vazão de água constante, criando uma película homogênea e contínua, com a aplicação simultânea de uma pressão pneumática sobre essa face. Aplicou-se vazão de água de 3 L/min/m² e pressão estática de 500 Pa.

Os sistemas de vedação vertical externa da edificação devem permanecer estanques, sem apresentar infiltrações que proporcionem borrifamentos, escorrimentos ou formação de gotas de água aderentes na face interna por um período de 7 horas. Podem ocorrer, contudo, pequenas manchas de umidade, equivalentes a 10 % da área total do corpo de prova, no caso de edificações térreas, e 7 % da superfície ensaiada, em edificações com mais de um pavimento (ABNT NBR 15575, 2013).

O ensaio é realizado em uma câmara de formato prismático estanque (Figuras 80 e 81), em pelo menos dois corpos de prova preparados de maneira idêntica. O corpo de prova é então fixado à câmara de ensaio com a face externa voltada para o interior do equipamento. As dimensões mínimas das amostras são de 1050 mm de largura e 1350 mm de comprimento, inexistindo restrições para sua espessura.

VISTA FRONTAL

PASSO 01: APLICAÇÃO DE UMA LINHA DE SELANTE

PASSO 02: FIXAÇÃO DOS PAINÉIS ENTRE SI

PASSO A PASSO DA EXECUÇÃO DA JUNTA

Figura 82: Projeto dos corpos de prova submetidos aos ensaios de estanqueidade à água.

Medidas em milímetros (sem escala).

Fonte: da autora (2018).

Figura 83: Aplicação da linha de selante de silicone resistente às intempéries durante a montagem dos corpos de prova.

Fonte: da autora (2017).

4.3.2. Materiais

Os painéis de CLT ensaiados foram confeccionados seguindo o processo de fabricação apresentado anteriormente.

Os corpos de prova realizados para o ensaio possuíam dimensões de 1200 mm de largura e 1500 mm de comprimento, com espessura de 80 mm, sendo compostos por três camadas de lamelas de pinus tratadas em autoclave com CCB. Cada um era composto por dois painéis de CLT de 600 mm de largura e 1500 mm de comprimento, configurando, assim, uma junta vertical no centro do corpo de prova (Figura 82).

Os painéis foram conectados entre si com parafusos VGZ 7x140 da Rothoblaas®, fixados com um ângulo de 45° em relação às faces dos painéis. Seguindo os procedimentos adotados na montagem dos elementos construtivos de uma edificação, já mencionados, aplicou-se, nas juntas, uma linha central de selante de silicone resistente às intempéries (Figura 83).

A junta escolhida para realização deste ensaio foi a mais simples possível dentre aquelas utilizadas nas edificações executadas no Brasil. Como observado anteriormente, há uma diversidade grande de juntas para painéis alinhados. Optou-se aqui por ensaiar, inicialmente, a pior situação encontrada, partindo-se do princípio que se a junta simples pode ser estanque à água, juntas mais complexas naturalmente também o serão.

Na face externa dos painéis aplicou-se duas camadas de *stain*, por meio de rolos para pintura.

4.3.3. Resultados

No primeiro corpo de prova ensaiado, observou-se um vazamento na junta, que se iniciou de forma praticamente simultânea ao início da vazão de água. Posteriormente, alguns outros pontos de vazamento foram identificados na face do painel, distanciados da junta em até cerca de 200 mm. Ao final, após 7 horas de ensaio, totalizaram-se cinco pontos de vazamento observados no Corpo de Prova 01 (Figura 84).

No segundo corpo de prova ensaiado, não se observou vazamento na junta entre os dois painéis. Contudo, ocorreu um pequeno vazamento próximo à extremidade do painel, que se originou de uma emenda entre duas lamelas de pinus. Nesse painel, identificou-se apenas esse único ponto de vazamento (Figura 85).

Figura 84: Corpo de Prova 01 após ensaio de estanqueidade à água.
Fonte: da autora (2017).

Figura 85: Corpo de Prova 02 após ensaio de estanqueidade à água.

Fonte: da autora (2017.)

Figura 86: Teor de umidade verificado na face dos corpos de prova expostos à água durante o ensaio de estanqueidade à água. Valores em porcentagem. Fonte: da autora (2018).

Figura 87: Junta do Corpo de Prova 01 aberta. Fonte: da autora (2017).

Figura 88: Junta do Corpo de Prova 02 aberta. Fonte: da autora (2017).

4.3.4. Análise dos resultados

Após os ensaios, realizou-se a medição da umidade na face externa dos painéis em alguns pontos, de modo a se verificar a proveniência dos vazamentos (Figura 86). No Corpo de Prova 01, apenas um ponto, localizado próximo à junta do painel, apresentou umidade elevada, em torno de 28 %, atingindo, possivelmente, o ponto de saturação das fibras. Nos pontos restantes, a madeira apresentava-se seca, com umidade em torno de 12 %. Dessa forma, os painéis permaneceram estanques no primeiro ensaio realizado, sendo que a vedação da junta mostrou-se ineficaz. Já no Corpo de Prova 02, a madeira manteve-se seca na junta, com umidade em torno de $(12 \pm 2) \%$. Contudo, na emenda entre as lamelas da face externa, alinhada ao local de ocorrência do vazamento na face interna do corpo de prova, observou-se umidade elevada, em torno de 20 %. Percebe-se, assim, que o painel em si não se manteve estanque durante o ensaio e que a junta no segundo corpo de prova não interferiu no vazamento deste painel.

Após a finalização dos ensaios, os painéis foram desmontados, visando identificar possíveis falhas na junta que pudessem ter ocasionado o vazamento no primeiro ensaio (Figura 87 e 88). Observou-se que o selante de silicone aplicado no segundo corpo de prova apresentava-se homogêneo e cobriu toda a espessura do painel. Dessa maneira, proporcionou a devida estanqueidade à junta. No entanto, o mesmo não ocorreu no primeiro corpo de prova, que apresentou uma grande falha na aplicação do selante de silicone, localizada próxima ao centro dos painéis.

Constatou-se, assim, que o tipo de junta considerada, ainda que tenha se mostrado eficiente em um dos corpos de prova, aparenta não ser ideal para aplicação em painéis externos nas edificações, pois sua execução ocasionaria maior probabilidade de problemas. Além disso, cabe ressaltar que a junção dos painéis ocorreu em ambiente controlado de laboratório e, ainda assim, ocorreram falhas na execução. Portanto, é provável que aumentariam as chances dessa ocorrência em se tratando de montagens de edificações. Com esse resultado, verificou-se que a adoção de apenas uma linha de selante de silicone resistente às intempéries não se mostra adequada, optando-se pela aplicação de duas linhas nos próximos ensaios realizados para a presente pesquisa.

No que diz respeito ao vazamento ocorrido no Corpo de Prova 02, levanta-se a necessidade de realização de mais ensaios para que se possa constatar ao certo se o problema foi pontual, ocasionado por falhas durante o processo de fabricação, ou se painéis de CLT com 80 mm de espessura e 3 camadas não são de fato estanques. Pelos ensaios realizados, é possível afirmar que esses painéis específicos não garantem a devida estanqueidade à água da vedação vertical.

4.4. Resistência à ação de calor e choque térmico

De acordo com a ABNT NBR 15575:2013 Parte 4: Requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas – VVIE, deve-se verificar por meio de ensaios apenas o item 14.1 Requisito (paredes externas – SVVE). Esse requisito deve ser avaliado por meio do ensaio em laboratório “Verificação do comportamento de sistemas de vedações verticais externas expostos à ação de calor e choque térmico”.

Vedações verticais, quando empregadas externamente, ficam expostas ao calor e resfriamento que ocorrem durante a vida útil do edifício. Nestas situações, não devem apresentar grandes deslocamentos, fissuras ou falhas. Assim, busca-se, com a realização do ensaio de calor e choque térmico, averiguar a resistência, e consequente durabilidade, dos painéis de CLT empregados nesta condição de uso.

Realizou-se este ensaio no Laboratório de Componentes e Sistemas Construtivos do IPT, no mês de maio de 2018. Composto por três etapas, iniciou-se com o ensaio de estanqueidade à água no painel. A seguir verificou-se a resistência do painel quanto à ação do calor e choque térmico. Ao final, conduziu-se novo ensaio de estanqueidade à água.

4.4.1.Método

A verificação da estanqueidade à água dos painéis, realizada ao início e ao final deste ensaio, seguiu método apresentado no item anterior (Anexo C da ABNT NBR 15575:2013 Parte 4). A verificação do comportamento do painel quanto à resistência à ação do calor e choque térmico é executada de acordo com o método apresentado no Anexo E da ABNT NBR 15575:2013 Parte 4.

Neste método, o corpo de prova deve ser submetido a dez ciclos de ação do calor e resfriamento por meio de água. Cada ciclo é composto por duas etapas: a primeira consiste na ação do calor, fornecido ao corpo de prova por meio de painel radiante disposto defronte a ele; a segunda, no resfriamento por meio de jato de água. Na primeira etapa de cada ciclo, quando atingida temperatura superficial do corpo de prova de $(80 \pm 3) ^\circ\text{C}$, esta é mantida durante 1 h. Imediatamente após a supressão da radiação, a face exterior do corpo de prova é resfriada por meio de jatos de água aspergidos sobre toda a sua superfície, até se alcançar temperatura superficial igual a $(20 \pm 5) ^\circ\text{C}$.

O corpo de prova deve ser constituído por um trecho de parede acabada, executada com os detalhes construtivos a serem empregados em obra, incluindo juntas, com extensão

mínima de $(1,20 \pm 0,20)$ m e a espessura característica. Deve ser fixado em um dispositivo na posição vertical, de tal modo que se mantenha simplesmente apoiado em seu bordo superior e em suas laterais, permitindo a ocorrência de possíveis deformações verticais e horizontais e consequentes fissuras, resultante do aquecimento e resfriamento. Na face oposta à incidência de radiação é instalado, no ponto central do corpo de prova, um medidor de deslocamento, o qual mede os deslocamentos horizontais sofridos pelo painel. Esse deslocamento horizontal é medido após 45 min de estabilização da temperatura superficial em (80 ± 3) °C e logo após o resfriamento.

As vedações externas, incluindo seus revestimentos, quando submetidas a dez ciclos sucessivos de exposição ao calor e resfriamento, não podem apresentar: deslocamento horizontal instantâneo, no plano perpendicular ao corpo de prova, superior a $h/300$, onde "h" é a altura do corpo de prova; ocorrência de falhas, como fissuras, destacamentos, empolamentos, descoloramentos e outros danos que possam comprometer a utilização da vedação (ABNT NBR 15575, 2013).

4.4.2. Material

O corpo de prova utilizado neste ensaio possuía dimensões de 2400 mm de largura e 2500 mm de altura, com espessura de 80 mm (três camadas de lamelas de pinus tratadas com CCB em autoclave). Era composto por dois painéis de CLT de 1200 mm de largura e 2500 mm de altura, configurando, assim, uma junta vertical no centro do corpo de prova (Figura 89). Os painéis foram conectados entre si com parafusos VGZ 7x140 da Rothoblaas[®], fixados com um ângulo de 45° em relação às faces dos painéis. Assim como nos ensaios de estanqueidade à água, aplicou-se, nas juntas, selante de silicone resistente às intempéries. Não obstante, haja vista a ineficiência da junta nos ensaios mencionados, para este corpo de prova, optou-se por executar a junta com duas linhas de selante, posicionadas paralelamente na linha de cola entre as camadas do painel.

Fixou-se o bordo inferior do corpo de prova em uma viga metálica, preenchida com concreto, pré-existente no laboratório. Para essa fixação, simulando uma conexão real entre elementos construtivos em CLT e fundações em concreto, adotou-se um barrote de madeira, fixado no dormente de concreto por meio de chumbadores. Acima do barrote posicionou-se uma fita de EPDM. Os painéis foram instalados no barrote por meio de parafusos VGZ 7x140 da Rothoblaas[®], posicionados em ângulo de 45° em relação às faces dos painéis. Na face externa dos painéis aplicou-se, ainda, duas camadas de acabamento superficial do tipo *stain*, por meio de rolos para pintura. A montagem do corpo de prova é apresentada a seguir (Figuras 90 e 91).

Figura 89: Projeto do corpo de prova submetido ao ensaio de calor e choque térmico.

Medidas em milímetros (sem escala).

Fonte: da autora (2018).

Figura 90: Aplicação das duas linhas de selante de silicone no painel de CLT.
Fonte: da autora (2018)

Figura 91: Corpo de prova instalado no dispositivo de ensaio após aplicação superficial de *stain*.
Fonte: da autora (2018)

Nº do ciclo	Temperatura superficial da parede	Deslocamento horizontal (mm)
1	80 °C	-0,4
	Ambiente	-1,6
2	80 °C	-1,0
	Ambiente	-0,2
3	80 °C	-0,8
	Ambiente	-2,7
4	80 °C	-0,1
	Ambiente	-1,3
5	80 °C	-0,4
	Ambiente	-2,1
6	80 °C	0,5
	Ambiente	-1,4
7	80 °C	0,5
	Ambiente	-1,3
8	80 °C	0,2
	Ambiente	-1,5
9	80 °C	0,1
	Ambiente	-0,4
10	80 °C	0,2
	Ambiente	-1,5

Tabela 11: Deslocamento horizontal verificado a cada ciclo de calor e choque térmico a que foi submetido o painel de CLT.

4.4.3. Resultados

No primeiro ensaio de estanqueidade realizado no corpo de prova, após 7 horas de ensaio, não se observou ocorrência de infiltrações, formação de gotas de água aderentes na face interna, nem mesmo manchas de umidade ou vazamentos. No ensaio de calor e choque térmico, verificou-se ausência de falhas, como fissuras, destacamentos, empolamentos, descoloramentos ou outros danos que pudessem comprometer a utilização deste elemento construtivo. Constatou-se, contudo, deslocamento horizontal, apresentado na Tabela 11. No segundo ensaio de estanqueidade, assim como no primeiro, não se constatou presença de infiltrações, formação de gotas de água aderentes na face interna, manchas de umidade ou vazamentos.

4.4.4. Análise dos resultados

No que diz respeito aos ensaios de estanqueidade, percebe-se que a junta, executada com duas linhas de selante de silicone resistente às intempéries, mostrou-se eficiente. O painel em si também se mostrou estanque neste ensaio. Contudo, ressalta-se a necessidade de se realizar mais ensaios para comprovar, de fato, a eficiência da junta e sanar o questionamento sobre a estanqueidade do painel, tendo em vista que, nos ensaios anteriores de estanqueidade à água, foram observadas falhas no painel.

Quanto ao ensaio de calor e choque térmico, a norma estudada, ABNT NBR 15575:2013, estabelece que o limite para deslocamento horizontal do corpo de prova, quando submetido ao ensaio de calor de choque térmico, consiste em $h/300$, onde "h" é a altura do corpo de prova. No caso do ensaio realizado, o corpo de prova possuía altura de 2500 mm. Consequentemente, o deslocamento máximo permitido seria de 8,3 mm. Percebe-se, pelo resultado apresentado anteriormente, que não se atingiu deslocamento horizontal superior ao máximo em nenhum dos ciclos de aquecimento e resfriamento.

Dessa forma, considerando-se ainda a não ocorrência de qualquer dano, fissura, descoloramento, destacamento, dentre outras falhas mencionadas pela norma estudada, afere-se que este corpo de prova específico, no que diz respeito unicamente à estanqueidade e à ação do calor e do choque térmico, poderia ser empregado como vedação vertical externa. No entanto, devido às observações levantadas na análise dos resultados dos ensaios de estanqueidade à água ressalta-se, novamente, a necessidade de se submeter um número maior de corpos de prova ao ensaio em questão, para que se possa, de fato, ampliar e confirmar essa constatação nos painéis de CLT fabricados no Brasil até então.

CORPO DE PROVA SUBMETIDO AOS ENSAIOS
DE DESEMPENHO ESTRUTURAL

CORPO DE PROVA SUBMETIDO AO ENSAIO
DE CALOR E CHOQUE TÉRMICO

Figura 92: Esquema de extração dos corpos de prova para ensaio de delaminação.

Medidas em milímetros (sem escala).

Fonte: da autora (2018).

4.5. Delaminação

De modo a finalizar o estudo desenvolvido nesta pesquisa, após a conclusão dos ensaios laboratoriais descritos anteriormente, optou-se por ensaiar amostras dos painéis utilizados nos ensaios de desempenho estrutural e de calor e choque térmico no que diz respeito também à delaminação, verificando a qualidade da colagem. Entende-se que este quesito afeta diretamente a capacidade estrutural do painel, assim como a sua durabilidade. Os ensaios foram conduzidos nos meses de outubro e novembro de 2018.

4.5.1. Material

Os corpos de prova para a execução dos ensaios de delaminação possuíam formato quadrado com dimensões laterais de (100 ± 5) mm e espessura de 80 mm (três camadas de lamelas de pinus tratadas em autoclave com CCB), conforme prescreve a EN 16351 (2015). Contudo, a norma também contempla amostras com formato cilíndrico e diâmetro de (95 ± 5) mm. Ao todo foram ensaiadas 28 amostras, numeradas de acordo com o painel de onde foram removidas, sendo aquelas advindas dos painéis submetidos aos ensaios de calor e choque térmico numeradas de 1 e 2 e aquelas extraídas dos painéis submetidos aos ensaios estruturais de 3, 4, 5 e 6 (Figura 92).

4.5.2. Método

Para a realização deste ensaio foi adotado o método apresentado no Anexo C da norma europeia EN 16351 (2015). De acordo com o documento em questão, antes de se submeter os corpos de prova aos ciclos de ensaio, deve-se medir o comprimento total das linhas de cola. Colocam-se, então, os corpos de prova em uma autoclave, introduzindo-se água a uma temperatura compreendida entre 10 °C e 20 °C (Figura 93, página seguinte). Os corpos de prova devem permanecer totalmente submersos e separados de modo que seus topos estejam livremente expostos à água. Aplica-se um vácuo entre 70 kPa e 85 kPa e mantém-se por 30 minutos. Libera-se o vácuo e aplica-se uma pressão entre 500 kPa e 600 kPa, mantida por 2 horas. Posteriormente, secam-se os corpos de prova por um período de aproximadamente 10 a 15 horas em uma câmara climatizadora onde o ar circule a uma velocidade entre 2 m/s a 3 m/s, temperatura entre 65 °C e 75 °C e umidade relativa entre 8 % e 10 %. Durante a secagem, os corpos de prova devem estar distanciados entre si em pelo menos 50 mm e posicionados com os topos paralelos ao fluxo de ar. A delaminação deve ser observada e registrada quando a massa do corpo de prova alcançar um valor compreendido entre 100 % e 110 % da massa original. A medição da

Figura 93: Posicionamento dos corpos de prova na autoclave.
Fonte: da autora (2018).

Figura 94: Exemplo de fissura considerada como delaminação.
Fonte: da autora (2018).

Figura 95: Exemplo de falha na madeira ocasionada pelo nó e não considerada como delaminação.
Fonte: da autora (2018).

delaminação, a ser realizada em milímetros, e avaliação do resultado devem ser realizadas em até 1 hora depois de finalizado o procedimento de secagem. Devem ser consideradas como delaminações, fissuras consistentes na camada do adesivo e falhas na linha de cola entre a camada de adesivo e o substrato em madeira (Figura 94). Falhas localizadas na madeira, afastadas em mais de duas camadas de células da camada de adesivo e cujo caminho da fissura é influenciado pelo ângulo das fibras da madeira ou por anéis de crescimento, não são consideradas delaminações (Figura 95). Do mesmo modo, aberturas com menos de 2,5 mm de comprimento, afastadas em ao menos 5 mm da delaminação mais próxima, assim como aberturas ao longo de nós ou bolsas de resina, também não são consideradas delaminações. Quando se suspeita que uma abertura na linha de cola é ocasionada pela presença de um nó, esta deve ser aberta com um formão e um martelo e inspecionada, verificando-se a presença de nós ocultos. Caso a abertura da linha de cola tenha sido ocasionada por um nó oculto, não deve ser considerada como delaminação.

A resistência da ligação nas linhas de cola entre camadas é considerada suficiente se o comprimento máximo de delaminação não exceder 40 % do perímetro total de uma linha de cola individual e a soma dos comprimentos de delaminação não exceder 10 % da soma de todas as linhas de cola. Se o comprimento máximo de delaminação ou o comprimento total de delaminação exceder a este limite ou se o comprimento de delaminação não puder ser determinado pela qualidade inadequada da superfície dos topos, cada linha de cola deve ser separada. Verifica-se então a ocorrência de falhas na madeira na área separada. A porcentagem mínima de falha da madeira não pode ser inferior a 50 % e a porcentagem mínima das somas das falhas da madeira de todas as áreas separadas não pode ser inferior a 70 %.

A princípio, para a verificação do comprimento máximo de delaminação, considerou-se que este corresponderia a uma porcentagem do comprimento da linha de cola na qual estava inserida a delaminação em questão, ou seja, com dimensão aproximada de 100 mm. No entanto, após questionamentos com a equipe do Laboratório de Madeiras e Estruturas de Madeira (LaMEM), constatou-se que este corresponde a uma porcentagem do perímetro da linha de cola na qual se insere a delaminação, que possui comprimento equivalente a cerca de 400 mm. Porém, indagou-se que um valor superior a 40 % só pode ser alcançado no caso de uma delaminação a qual se insira de forma contínua em, ao menos, duas faces do corpo de prova com formato quadrado, ou em amostras cilíndricas.

Ao final, considerou-se o cálculo da delaminação total e máxima segundo EN 16351 (2015). Calcula-se a delaminação total do corpo de prova (Equação 1), a qual consiste na relação,

Figura 96: Linha de cola aberta do Corpo de Prova 4D, sem nenhuma falha na madeira.

Fonte: da autora (2018).

Figura 97: Linha de cola aberta do Corpo de Prova 2J b.

Fonte: da autora (2018).

Figura 98: Cálculo da área de falha na madeira (em azul) do Corpo de Prova 2J b no *software* AutoCAD.

Fonte: da autora (2018).

em porcentagem, entre o comprimento total das delaminações e o comprimento total das linhas de cola, ou seja, a soma do perímetro de todas as linhas de cola. Calcula-se também a delaminação máxima (Equação 2). Essa última constitui-se como a relação entre o maior comprimento isolado de delaminação e o perímetro da linha de cola no qual ele se insere.

$$Delam_{tot} = 100 \frac{l_{tot,delam}}{l_{tot,linha\ de\ cola}} \text{ em \%} \quad \text{Equação 1}$$

Onde: $l_{tot,delam}$ é o comprimento de delaminação total (em mm)

$l_{tot,linha\ de\ cola}$ é a soma dos perímetros de todas as linhas de cola de um corpo de prova (em mm)

$$Delam_{max} = 100 \frac{l_{max,delam}}{l_{linha\ de\ cola}} \text{ em \%} \quad \text{Equação 2}$$

Onde: $l_{max,delam}$ é o comprimento máximo de delaminação (em mm)

$l_{linha\ de\ cola}$ é o perímetro de uma linha de cola de um corpo de prova (em mm)

4.5.3. Resultados

Os valores encontrados para o comprimento máximo de delaminação são descritos na Tabela 12, enquanto os resultados dos comprimentos totais de delaminação, na Tabela 13.

Além disso, realizou-se a abertura dos corpos de prova que sofreram delaminação, conforme consta na metodologia para a realização deste ensaio (EN 16351, 2015), possibilitando a verificação das falhas ocorridas na madeira na linha de cola delaminada (Figuras 96 e 97). A área total de falha na madeira foi calculada por meio de imagens e com o auxílio do *software* para desenho AutoCAD (Figura 98). Os valores encontrados são apresentados na Tabela 14. Um dos corpos de prova, contudo, não foi aberto (5A), sendo removido da análise da falha na madeira.

Nº da amostra	Massa inicial (g)	Massa final (g)	Relação massa (%)	Comp. de delaminação máximo (mm)	Comp. da linha de cola (mm)*	Comp. de delaminação máximo (%)	Limite de 40%
1A	386,12	409,27	106	0	-	0%	OK
1B	431,54	463,61	107	175	404,92	43%	Não OK
1C	395,43	424,39	107	0	-	0%	OK
1D	376,21	412,4	110	0	-	0%	OK
1E	373,25	397,59	107	0	-	0%	OK
1F	439,69	485,05	110	158	408,84	39%	OK
1G	377,46	410,9	109	0	-	0%	OK
1H	352,97	390,89	111	30	408,48	7%	OK
1I	369,98	412,32	111	105	406,42	26%	OK
1J	341,42	379,71	111	0	-	0%	OK
2D	378,00	414,51	110	0	-	0%	OK
2G a	392,88	424,95	108	0	-	0%	OK
2G b	431,36	474,89	110	90	407,98	22%	OK
2H	425,8	470,38	110	100	407,4	25%	OK
2J a	413,13	451,41	109	100	407,82	25%	OK
2J b	413,84	445,74	108	100	407,38	25%	OK
2K	411,76	448,35	109	65	405,08	16%	OK
3A	375,67	414,81	110	85	409,46	21%	OK
3B	391,16	423,22	108	60	408,52	15%	OK
3D	393,85	433,82	110	205	408,08	50%	Não OK
4B	418,11	460,62	110	65	405,54	16%	OK
4D	393,26	430,54	109	235	407,48	58%	Não OK
4E	405,06	442,44	109	115	407,28	28%	OK
5A	372,71	410,77	110	175	405,08	43%	Não OK
5D	342,29	380,99	111	0	-	0%	OK
5E	296,49	330,45	111	20	388,14	5%	OK
6D	382,84	420,31	110	50	408,24	15%	OK

* o comprimento em questão refere-se ao perímetro da linha de cola na qual está inserida a delaminação

Tabela 12: Valores encontrados para os comprimentos de delaminação máximos nos corpos de prova ensaiados.

Nº da amostra	Massa inicial (g)	Massa final (g)	Relação massa (%)	Comp. de delaminação total (mm)	Comp. da linha de cola total (mm)	Comp. de delaminação total (%)	Limite de 10%
1A	386,12	409,27	106	0	811,68	0%	OK
1B	431,54	463,61	107	175	809,84	22%	Não OK
1C	395,43	424,39	107	0	809,08	0%	OK
1D	376,21	412,4	110	0	804,56	0%	OK
1E	373,25	397,59	107	0	806,00	0%	OK
1F	439,69	485,05	110	158	814,80	19%	Não OK
1G	377,46	410,9	109	0	819,28	0%	OK
1H	352,97	390,89	111	30	816,96	4%	OK
1I	369,98	412,32	111	205	812,84	25%	Não OK
1J	341,42	379,71	111	0	807,20	0%	OK
2D	378,00	414,51	110	0	820,40	0%	OK
2G a	392,88	424,95	108	0	814,28	0%	OK
2G b	431,36	474,89	110	115	815,96	14%	Não OK
2H	425,8	470,38	110	165	814,80	20%	Não OK
2J a	413,13	451,41	109	118	815,64	14%	Não OK
2J b	413,84	445,74	108	135	814,76	17%	Não OK
2K	411,76	448,35	109	175	810,16	22%	Não OK
3A	375,67	414,81	110	115	818,92	14%	Não OK
3B	391,16	423,22	108	185	817,04	23%	Não OK
3D	393,85	433,82	110	255	816,16	31%	Não OK
4B	418,11	460,62	110	65	811,08	8%	OK
4D	393,26	430,54	109	235	814,96	29%	Não OK
4E	405,06	442,44	109	190	814,56	23%	Não OK
5A	372,71	410,77	110	205	810,16	25%	Não OK
5D	342,29	380,99	111	0	808,08	0%	OK
5E	296,49	330,45	111	20	776,28	3%	OK
6D	382,84	420,31	110	60	816,48	7%	OK

Tabela 13: Valores encontrados para os comprimentos de delaminação totais dos corpos de prova ensaiados.

Nº da amostra	Falha na madeira na linha de cola separada (%)	Limite mínimo de 50%
1B	24%	Não OK
1F	64%	OK
1I	19%	Não OK
2G b	65%	OK
2H	55%	OK
2J a	50%	OK
2J b	32%	Não OK
2K	51,5%	OK
3A	37%	Não OK
3B	28%	Não OK
3D	11%	Não OK
4D	0%	Não OK
4E	39%	Não OK
5A	Não foi aberta, logo não analisada	

Tabela 14: Valores encontrados para as áreas de falha na madeira na linha de cola separada dos corpos de prova que apresentaram delaminação excedente aos valores estabelecidos em norma.

4.5.4. Análise dos resultados

Das 27 amostras consideradas no ensaio, percebe-se pelos resultados apresentados, que quatro (14,8 % do total) tiveram comprimento máximo de delaminação excedente ao limite estabelecido na EN 16351 (2015), equivalente a 40 % do perímetro da linha de cola na qual se insere essa fissura. Observa-se, porém, que dos mesmos 27 corpos de prova, 14 (51,8 % do total) deles apresentaram comprimento total de delaminação acima do limite de 10 % da soma do comprimento das linhas de cola. As quatro amostras que se apresentaram em desacordo quanto ao comprimento máximo de delaminação também obtiveram delaminação total superior ao limite estabelecido.

Analisando os corpos de prova 01 e 02 (provenientes do mesmo painel), nota-se que dos 17 corpos de prova, 8 encontraram-se em desacordo com os limites determinados pela norma europeia, ou seja, 47 %. Dos corpos de prova 03, 04, 05 e 06 (provenientes do mesmo painel), que correspondiam às dez amostras restantes, apenas quatro, 40 % do total, apresentaram resultados satisfatórios no presente ensaio.

Por meio da abertura dos corpos de prova que obtiveram delaminação excedente aos valores estabelecidos, constatou-se que cinco deles apresentaram falha na madeira superior a 50 % da área total da face aberta, enquadrando-se nos limites estabelecidos na norma analisada. Os oito corpos de prova restantes, número equivalente a 29,6 % das 27 amostras abertas, não atingiram a porcentagem mínima de falha na madeira, mantendo-se, assim, em desacordo com os padrões exigidos. Percebe-se, ainda, que os cinco corpos de prova com falha na madeira superior a 50 % eram os de número 01 e 02 (provenientes do mesmo painel), ressaltando o número maior de falhas observado nos corpos de prova de número 03, 04, 05 e 06 (provenientes do mesmo painel). Além disso, é interessante notar a inexistência de falha alguma na madeira do corpo de prova de número 4D, constatando-se grave erro ocorrido na colagem desta fração do painel.

Embora a norma não especifique a quantidade mínima de amostras a serem ensaiadas, nem tampouco a tolerância para aprovação, considerando a porcentagem de corpos de prova com resultados insatisfatórios (29,6 %), tende-se a concluir que os painéis não passariam neste ensaio.

Porém, pode-se afirmar que a delaminação está intimamente ligada à produção dos painéis. Levanta-se aqui, então, algumas possíveis razões que possam proporcionar falhas na colagem, como por exemplo, a pressão proporcionada pela prensa a vácuo, a

qualidade do adesivo, deposição de sujeira (serragem) na face das lamelas durante o processo de colagem, ou mesmo limpeza inadequada das superfícies dessas, dificultando a devida aderência do adesivo estrutural.

Quanto à pressão ideal a ser considerada na prensa a vácuo, ressalta-se aqui que pelas referências bibliográficas estudadas é viável adotar prensas a vácuo na produção de painéis de CLT. No entanto, como visto anteriormente, esse processo exige maior controle de qualidade da produção.

Além disso, o adesivo utilizado na produção brasileira – adesivo de poliuretano Purbond da Henkel AG® – é o mesmo utilizado por fabricantes consolidados no mercado das estruturas lameladas na Europa, onde não se tem conhecimento do não cumprimento dessa exigência (ensaios de delaminação). Como exemplo, o fabricante alemão visitado durante esta pesquisa (MERK Timber GmbH), igualmente, emprega prensas a vácuo e o adesivo estrutural utilizado pelo fabricante nacional.

Quanto à deposição de sujeira nas lamelas de pinus, pode-se recomendar a proteção da prensa de qualquer interferência a exemplo da deposição de serragem produzida na etapa de corte e usinagem dos painéis. Do mesmo modo, a limpeza das lamelas antes do início da colagem poderia também solucionar o problema, se confirmado ser esta a causa da falha na colagem.

Não se pode afirmar ao certo a razão que levou às delaminações nos corpos de prova. As suposições aqui realizadas são apenas algumas hipóteses, sendo que possivelmente possam ser sugeridas novas conjecturas. De qualquer forma, todas as suspeitas apontadas devem ser verificadas de modo a se aprimorar a fabricação nacional, evitando o aparecimento de possíveis danos ao longo da vida útil da edificação em CLT.

5.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Uma vez apresentados os assuntos relacionados ao CLT brasileiro, tais como Processo Construtivo e Desempenho (desempenho estrutural e durabilidade), serão analisadas, a seguir, tanto a forma como essas questões afetam o projeto arquitetônico, quanto a maneira como este interfere na otimização da construção e no desempenho da edificação. Desta análise, levantaram-se algumas recomendações para projetos arquitetônicos de edificações que buscam empregar o elemento construtivo CLT no Brasil. Ressalta-se que, embora essas recomendações sejam sugestivas – pois não se tem o intuito de estabelecer regras para o emprego do CLT – são essenciais para o melhor aproveitamento do elemento no processo de projeto. Ao final, serão apresentadas, ainda neste capítulo, as conclusões finais levantadas com o desenvolvimento da presente dissertação.

5.1. As interferências do emprego do CLT no projeto arquitetônico

O projeto arquitetônico de uma edificação em CLT sofre e gera influências em dois momentos distintos: no processo construtivo e no desempenho da edificação. O processo construtivo foi aqui dividido em três etapas: matéria-prima, fabricação dos painéis e montagem da edificação. O desempenho da edificação, por sua vez, abordado neste trabalho de forma restrita, foi simulado por meio de ensaios laboratoriais que buscaram verificar o desempenho estrutural e a durabilidade dos painéis de CLT empregados como vedações verticais.

Ao final, a análise das interferências ocasionadas por esses dois aspectos no projeto arquitetônico levou à criação de recomendações a serem incorporadas no processo projetual de edificações em CLT, de modo a possibilitar maior otimização do processo construtivo e adequado desempenho e durabilidade da edificação.

A análise das interferências do emprego de painéis de CLT como elemento construtivo em uma edificação será aqui apresentada em quatro tópicos, sendo que os três primeiros se referem às etapas consideradas no processo construtivo, ou seja, matéria-prima, fabricação e montagem. O quarto tópico trata especificamente dos acabamentos da edificação em CLT, os quais, ainda que considerados como parte integrante da etapa de montagem, serão aqui analisados de forma separada, em razão dos resultados obtidos com o estudo do desempenho estrutural e durabilidade dos painéis. Tais resultados levantam questionamentos, em especial, no que diz respeito ao emprego do elemento construtivo em CLT como vedação vertical externa, interferindo, assim, na necessidade ou não de aplicação de revestimentos não-aderidos externos nos painéis.

5.1.1. Matéria-prima

Como visto no capítulo anterior, a norma brasileira referente ao tratamento preservativo de madeiras, ABNT NBR 16143:2013, não engloba painéis em CLT, mas aborda elementos construtivos em madeira laminada. Isto posto, neste trabalho, os estudos acerca do tratamento adotado em painéis de CLT consideraram os requisitos estabelecidos para a madeira laminada.

Elementos construtivos em CLT, caso passassem a ser incorporados pela norma em questão, poderiam ser enquadrados nas categorias de uso 2 (interior de construções em contato com a alvenaria, sem contato com o solo ou fundações, protegidos das intempéries e das fontes internas de umidade), 3 (interior de construções, fora do contato com o solo e protegidos das intempéries, que podem, ocasionalmente, ser expostas a fontes de umidade) e 4 (uso exterior, fora do contato com o solo e sujeitos às intempéries). No caso da categoria 2, para elementos de madeira laminada, é possível aplicar produto preservativo com ação unicamente inseticida, enquanto nas categorias 3 e 4 é necessária a aplicação tanto de produtos com ação inseticida, quanto fungicida.

O método de tratamento deve ser considerado na avaliação do risco biológico. O tratamento com inseticida apenas por imersão ou pincelamento protegerá a madeira superficialmente, evitando a infestação por insetos, mas não garantindo o seu ataque nas porções mais profundas (não tratadas). Além disso, dependendo dos princípios ativos utilizados, haverá a necessidade periódica de reaplicação. O tratamento sob pressão já garante uma concentração de princípios ativos (retenção) e penetração adequadas para conter os processos de biodeterioração, garantindo a devida vida útil dos elementos estruturais, a qual deve ser de, no mínimo, 50 anos, conforme especificado pela ABNT NBR 15575:2013.

Nos painéis nacionais, o produto preservativo com ação fungicida e inseticida utilizado é o CCB (tratamento sob pressão), enquanto o produto com ação unicamente inseticida empregado é a cipermetrina (tratamento superficial). O primeiro deles pode ser adotado nas três categorias mencionadas para madeiras laminadas, sendo que a retenção desse produto deve ser de no mínimo 4,0 kg/m³. Em componentes estruturais de difícil manutenção, reparo ou substituição e/ou críticos para o desempenho e segurança do sistema construtivo, essa retenção mínima passa a ser de 6,5 kg/m³. Outros produtos, no entanto, poderiam também ser utilizados, como visto no item 3.1.3.

É válido recordar ainda que as lamelas tratadas com CCB adquirem uma coloração levemente esverdeada quando comparadas àquelas não tratadas, sendo que muitas vezes é desejada, por uma questão estética, a coloração clara (variando de branca a amarelada) natural do pinus para as superfícies aparentes dos elementos construtivos em CLT. Contudo, isto pode não ser possível em todas as ocasiões nas quais os painéis são empregados.

Tendo em vista o exposto, para avaliar corretamente o tratamento preservativo a ser adotado em cada situação de emprego dos elementos construtivos em CLT, esses são aqui divididos em oito classificações. Cada uma delas foi enquadrada em uma das três categorias de uso mencionadas. As classificações e suas respectivas categorias de uso são apresentadas a seguir:

- lajes de piso de áreas secas: categoria 2;
- lajes de piso de área molhada ou molhável: categoria 2 (considerando a aplicação de impermeabilização);
- lajes de cobertura: categoria 2 (considerando a aplicação de impermeabilização);
- vedações externas com aplicação de fachada ventilada: categoria 2;
- vedações externas com aplicação de *stair*: categoria 4.
- vedações internas de ambientes secos: categoria 2;
- vedações internas de ambientes molhados: categoria 3;
- vedações internas que dividem ambientes secos de ambientes molhados: categoria 3;

Naquelas situações enquadradas nas categorias 2, considera-se a necessidade de tratamento inseticida, enquanto para as demais, ação inseticida e fungicida do produto preservativo.

Para as três primeiras situações, ou seja, para lajes em CLT, considera-se necessária a aplicação de produto preservativo sob pressão, impregnado na matéria-prima, em qualquer situação, em vista da dificuldade de reparo, manutenção ou substituição deste elemento estrutural durante seu uso em uma edificação.

Para vedações, em todos os casos apresentados a seguir, deve-se evitar o contato direto com possíveis fontes de umidade, a exemplo fundações em concreto, adotando detalhes construtivos eficazes, como aqueles apresentados em capítulos anteriores.

No caso de vedações externas com revestimentos não-aderidos externos, mostra-se importante a incorporação de matéria-prima tratada sob pressão pela dificuldade de se realizar inspeções constantes no elemento em CLT. Além disto, percebe-se uma complexidade considerável de manutenção, substituição ou reparo deste, tendo em vista que tais processos pressupõem a remoção da fachada e de todos os componentes que a compõe, como membranas impermeáveis, estruturas de fixação e revestimentos.

Para a análise de vedações externas sem revestimentos não-aderidos externos, apenas com aplicação de *stain*, deve-se considerar, em um primeiro momento, a garantia de estanqueidade do elemento construtivo, a qual não foi atingida nos ensaios laboratoriais realizados neste trabalho. Vale lembrar que, nessa situação, a manutenção é mais frequente, pois há necessidade de reaplicação do *stain* conforme recomendação do fabricante. Quanto ao tratamento, é imprescindível a adoção de matéria-prima tratada sob pressão em todas as camadas do painel, considerando a absorção de umidade proveniente de água da chuva, pois a durabilidade do elemento depende muito do cumprimento desse parâmetro.

No caso de vedações internas, considera-se possível a realização de reparos, substituições ou manutenções pontuais, sem ocorrência de danos no edifício. Essa condição, mediante análise de profissional habilitado, também engloba elementos em CLT que apresentem funções estruturais, haja vista a facilidade de conexão dos painéis por meio de parafusos e conectores metálicos, além da fácil trabalhabilidade proporcionada pela madeira.

Contudo, a possibilidade de manutenção, reparo ou substituição deve ser analisada em cada projeto e para cada situação específica de emprego do elemento em CLT. Determinadas situações podem impossibilitar essas tarefas, a exemplo de vedações em CLT que configurem circulações verticais e nas quais são fixadas escadas. A substituição desses elementos implica na desmontagem de outros componentes da edificação, dificultando consideravelmente a execução do reparo. Edifícios de habitação de interesse social (HIS) também podem ser mencionados como exemplos de situações nas quais a manutenção prevista para os elementos construtivos deve ser mínima, pois se presume que esta será realizada pelos usuários de forma bastante esporádica, pela sua baixa renda. Para os dois exemplos descritos, é recomendada a utilização de matéria-prima tratada sobre pressão integralmente nos elementos em CLT.

Quando verificada a possibilidade de manutenção, reparo e substituição da estrutura, no caso de vedações internas de ambientes secos, seria possível a aplicação superficial apenas de produtos com ação inseticida. Todavia, considerando a possibilidade de acesso de

insetos pelos mais diversos percursos, a exemplo de conduítes elétricos, recomenda-se a especificação de matéria-prima tratada sob pressão nas camadas internas de todos os elementos construtivos em questão, mantendo-se apenas as externas com tratamento superficial. Deve-se salientar que, nessas circunstâncias, existe o risco biológico do ataque de insetos nas camadas externas sem tratamento sob pressão, caso não efetuada a aplicação do inseticida de forma correta ou quando da ausência de manutenção preventiva, ou seja, reaplicação do produto preservativo.

Visando, ainda, garantir a possibilidade de inspeções frequentes e manutenções preventivas desses elementos, evitando a ocorrência de possíveis manifestações patológicas, aconselha-se que os elementos fabricados com camadas externas sem tratamento, nos quais será aplicado inseticida superficial, permaneçam com sua superfície aparente, sem receber revestimentos. Prevendo-se a aplicação de revestimentos, aconselha-se que o elemento de vedação seja fabricado inteiramente com matéria-prima tratada sob pressão.

Finalmente, para vedações internas de ambientes molhados/molháveis ou aquelas que atuam como divisórias entre recintos secos e molhados, haja vista a presença constante de umidade, considera-se necessária a adoção de matéria-prima tratada com produto preservativo aplicado sob pressão. Ainda assim, deve-se evitar o contato direto com a água permanente, optando-se, sempre, pela impermeabilização de áreas como box ou outras semelhantes.

Em todos os casos mencionados, como visto anteriormente, deve-se garantir, ainda, a proteção das superfícies expostas das peças em CLT contra a ação de agentes físicos e químicos causadores do *wheathering*. Para isso, recomenda-se a aplicação superficial de produtos impregnantes que não criem película, a exemplo de *stain*. Este deve ser reaplicado com certa periodicidade, a qual varia entre um e cinco anos a depender do fabricante do produto.

Deve-se apontar, também, que a discussão acerca da necessidade ou não de tratamento preservativo, aplicado sob pressão ou superficialmente na matéria-prima empregada na fabricação do CLT, carece de pesquisas acadêmicas e experiência prática no setor da construção civil, devido ao recente período de implantação no elemento construtivo no país.

5.1.2.Fabricação

No que diz respeito ao processo de fabricação dos elementos construtivos em CLT, é importante observar alguns aspectos relacionados diretamente à concepção projetual, os quais podem influenciar no resultado da construção.

Como mencionado, é possível a execução de elementos em CLT em qualquer dimensão e formato, considerando a possibilidade de conexão em obra. Contudo, atentar-se para os tamanhos máximos obtidos na linha de produção pode auxiliar o processo de fabricação dos painéis. A alteração das dimensões de uma parede, com altura de 3,10 m e comprimento de 7,00 m, para altura de 3,00 m e comprimento de 7,00 m, por exemplo, pode não acarretar grandes modificações no projeto arquitetônico, mas, em contrapartida, permitirá produzir o elemento em questão com apenas um painel, otimizando a fabricação e a montagem. Não é necessário, no entanto, restringir o projeto a dimensões modulares ou padronizadas, dado que o emprego do equipamento de usinagem com CNC permite alto grau de personalização, sem que se perca com isso a maximização da produção.

Quando se busca máxima otimização da fabricação, torna-se interessante, ainda, conceber a edificação considerando o Plano de Corte dos painéis. Isso não pressupõe a modulação das peças, como apontado, mas sim o aproveitamento dos cortes. A título de exemplo, pode-se citar a concepção de elementos com uma das dimensões sempre igual, como vedações com a mesma altura de 2,70 m, por exemplo, ainda que possuam larguras diferentes. Ou ainda é possível mencionar a adoção de elementos com uma das arestas inclinadas, mas que possuam mesmo ângulo de inclinação de outros elementos da edificação, como ilustrado pelo modelo esquemático na página seguinte (Figura 96). Vale ressaltar que esses são apenas alguns exemplos bastante simplificados de como é possível garantir maior aproveitamento dos painéis, sendo que esse máximo proveito também pode ser alcançado em muitas outras ocasiões.

Ademais, o detalhamento de projetos complementares, como elétricos, hidráulicos, luminotécnicos, dentre outros, é essencial para a maior otimização da construção, visto que caixas elétricas, furos para passagem de tubulação hidráulica ou mesmo canaletas para condução de eletrodutos podem ser usinados ainda em fábrica, durante a última etapa de fabricação dos painéis, por meio do equipamento de usinagem com CNC.

A adoção do equipamento de usinagem no processo de fabricação dos elementos construtivos em CLT, além de permitir grande personalização das peças e requisitar maior

PERSPECTIVA FRONTAL

PERSPECTIVA POSTERIOR

PLANTA

DETALHE DO CORTE
INCLINADO

PLANO DE CORTE - VISTA FRONTAL

PLANO DE CORTE - VISTA SUPERIOR

Figura 99: Projeto esquemático de edificação fictícia ilustrando o aproveitamento do Plano de Corte.

Medidas em metros.

Fonte: da autora (2018).

detalhamento do projeto arquitetônico e complementares, traz uma nova visão de como se conceber e produzir arquitetura. Por meio das tecnologias digitais e dos *softwares* de modelagem tridimensional, altera-se a maneira de se projetar o edifício, uma vez que as informações utilizadas na construção são retiradas fácil e rapidamente do modelo tridimensional. O modelo tridimensional passa a incorporar tanto a representação do projeto, que deixa de se restringir a desenhos bidimensionais, como cortes, plantas e elevações, quanto as informações necessárias à produção dos elementos construtivos.

Essa conexão direta entre projeto e construção é definida por KOLAREVIC (2003) como *digital continuum*. A produção maciça de desenhos, que realizam a comunicação entre arquitetura e construção, tende a declinar com a introdução dos modelos gerados digitalmente, redefinindo a relação entre concepção e produção e propiciando um *continuum* entre projeto e construção. Desse modo, o modelo digital passa a se tornar a única fonte de informação, tanto para o projeto quanto para a construção.

Nesse sentido, durante a etapa de projeto, dispensa-se a necessidade de inúmeros desenhos bidimensionais tanto para fabricação do edifício, quanto para montagem dos painéis. Para a fabricação, o modelo tridimensional executado na etapa de projeto dos painéis é utilizado de forma direta, sendo que os modelos das peças são transferidos ao *software* de usinagem, que reconhece as informações contidas no arquivo digital e executa os recortes e as usinagens modeladas. Consequentemente, a precisão no tamanho dos painéis, além da execução prévia de usinagens para passagens de instalações prediais, possibilita uma montagem fácil e intuitiva. Assim, como observado em capítulos anteriores, a elaboração de uma perspectiva torna-se suficiente para a montagem de uma residência em sua totalidade.

Percebe-se, portanto, a transferência de dados direta do modelo tridimensional dos elementos construtivos, para a confecção das peças e para a montagem do edifício, sem a necessidade de se transformar as informações contidas no projeto em desenhos bidimensionais convencionais. Essa transferência direta de dados também pode ser realizada entre o projeto arquitetônico e o projeto dos painéis, no caso de projetos arquitetônicos concebidos e desenvolvidos em *softwares* tridimensionais. Neste caso, seria possível, inclusive, a supressão de uma das etapas de projeto, pois o modelo tridimensional dos painéis poderia ser extraído diretamente do modelo do edifício, sem necessidade de se realizar um novo projeto para os painéis.

5.1.3.Montagem

Tendo em vista o exposto em relação ao processo de montagem das edificações em CLT, constata-se, a intrínseca relação existente entre o projeto arquitetônico e o processo construtivo, em especial, no que diz respeito ao tempo de montagem. Isso se deve, fortemente, à quantidade de painéis a serem empregados na edificação, sendo esse número consequência direta do projeto arquitetônico. Como mencionado, um dos aspectos que pode influenciar nessa quantidade é o pé-direito do edifício. Outros que podem ser mencionados são: formato da edificação, disposição dos ambientes internos, tipo, quantidade e localização das esquadrias (portas e janelas), dimensões da edificação, dentre outras. Dessa forma, é fundamental, na concepção do projeto arquitetônico, levar em consideração o emprego de elementos construtivos em forma de painéis e ter em mente o processo de fabricação deles, para se garantir um menor tempo de montagem, obtendo-se maior otimização no processo construtivo.

Além disso, é importante verificar a possibilidade de acesso, no local da obra, de equipamentos como caminhão munck ou guindastes antes do início do projeto, de modo a analisar a possibilidade e viabilidade de se adotar painéis de CLT como elementos construtivos. Condições como vegetação muito fechada em terrenos extremamente acidentados ou ausência de vias por onde podem trafegar caminhões, podem impossibilitar a montagem ou mesmo inviabilizá-la frente a outros métodos de construção. Porém, contrariamente, certas localizações desfavoráveis à construção *in loco*, podem, ainda assim, apresentar maior viabilidade para construções modulares.

Nessa linha de raciocínio e em virtude da logística de acesso e montagem, mostra-se primordial definir, ainda na concepção do projeto, a forma de montagem de edificação, ou seja, se essa será modular ou *in loco*. Quando se opta por uma construção com módulos, é importante verificar a logística de transporte e as restrições específicas à região onde será instalada a edificação. Como visto, a largura máxima para veículos de transporte de carga sem necessidade de escolta é de 3,20 m. Assim, a concepção de módulos com duas dimensões concomitantemente superiores a 3,20 m (por exemplo, 3,40 m de largura por 5,00 m de comprimento) pode acarretar em um custo maior de transporte por esse condicionamento legal.

Outras questões verificadas no processo de montagem e relacionadas ao projeto arquitetônico referem-se às instalações elétricas e hidráulicas. Como apontado no tópico anterior, as usinagens para a passagem dessas são realizadas ainda em fábrica. Assim, quanto às instalações elétricas, deve-se prever, ainda no projeto arquitetônico, se serão

aparentes ou embutidas, o que, naturalmente, implicará em usinagens diferentes nos elementos construtivos.

Já em relação às hidráulicas, a impossibilidade de embutir as tubulações nos painéis torna necessária a previsão, ainda na concepção projetual de locais para passagem dessas tubulações, como *shafts* ou paredes hidráulicas. Recomenda-se essa previsão no início do projeto de modo a evitar futuras alterações de leiaute dos ambientes ou nas dimensões dos elementos construtivos pela demanda de espaço das tubulações hidráulicas.

Levando-se em conta a necessidade de execução de *shafts* ou paredes hidráulicas, executadas usualmente em *drywall* nas edificações em CLT, é indicado aproximar as áreas molhadas da edificação. Recomenda-se espelhar duas paredes hidráulicas, na medida do possível, de modo a possibilitar que a vedação em CLT, atuando como divisão dos dois ambientes em questão, seja dispensada. Em seu lugar, instala-se, apenas, uma divisória em *drywall*, que atuará, também, como parede hidráulica. Essa solução pode otimizar a montagem e o processo construtivo como um todo por resultar em uma quantidade menor de painéis de CLT, sendo que a redução pode se mostrar bastante significativa a depender do tamanho da edificação.

Finalmente, para evitar o aparecimento de manifestações patológicas resultantes do processo de biodeterioração, é aconselhável prever, no projeto arquitetônico, detalhes construtivos eficazes, de modo a criar barreiras de proteção contra umidade, nas conexões entre painéis de CLT e desses com outros elementos construtivos. No caso de painéis apoiados em fundações em concreto, essa proteção pode ser realizada por meio da instalação de fitas de borracha entre os elementos em madeira e a fundação.

5.1.4.Acabamentos

Em relação aos ensaios laboratoriais realizados para avaliação do desempenho estrutural e durabilidade (estanqueidade à água e choque térmico) dos painéis de CLT, algumas observações são pertinentes, no que diz respeito ao emprego do elemento construtivo como vedação vertical externa. Enfatiza-se que os painéis ensaiados foram de 3 camadas (camadas externas com espessura de 2 cm e camada interna de 4 cm) com espessura total de 8 cm, para uso externo, com colagem na superfície das lamelas, matéria-prima integralmente tratada com CCB em autoclave e proteção superficial tipo *stain*. As considerações aqui apresentadas referem-se a esta tipologia, sendo que qualquer outra particularidade levantada (a exemplo de painéis com maior número de camadas) deve ser analisada individualmente, pois podem apresentar outros resultados que não se adequem às conclusões relatadas.

Do ponto de vista estrutural, conforme os ensaios laboratoriais realizados, os elementos construtivos em CLT, com aplicação do *stain*, analisados podem ser empregados tanto como vedações verticais internas, com ou sem função estrutural, quanto externas, em casas térreas, igualmente com ou sem função estrutural.

Alguns arquitetos e usuários brasileiros demonstram interesse em utilizar os painéis na face externa da edificação sem emprego de revestimentos não-aderidos externos, apenas com a aplicação do *stain*. O revestimento é muitas vezes indesejado do ponto de vista estético em razão da preferência pela aparência natural da madeira. Embora não haja nenhuma norma que impeça o uso de madeira tratada sob pressão externamente, não se recomenda utilizar painéis de CLT, com a tipologia aqui considerada, nessa condição, pois pelos resultados dos ensaios de estanqueidade à água obtidos nessa pesquisa, a estanqueidade não é garantida.

Recomenda-se a consideração de revestimentos não-aderidos externos para edificações em CLT, pois além de proporcionarem a devida proteção e durabilidade aos painéis, garantem a estanqueidade à água da vedação externa. Ainda assim, levantam-se os seguintes questionamentos:

- Devido à não ocorrência de vazamentos isolados e afastados da junta no Corpo de Prova 01 e no corpo de prova ensaiado quanto ao calor e choque térmico, o problema ocasionado no segundo ensaio seria consequência de uma falha ou é inerente do processo de fabricação do painel?

- Caso o problema seja inerente ao processo de fabricação do painel, adotar a colagem lateral das lamelas ou a estratégia de deslocar lamelas posicionadas no mesmo sentido poderia solucionar essa questão?

Analisando o processo de fabricação dos painéis conforme estabelecido pela Norma Europeia EN 16351 (2014), conclui-se, no caso de painéis fabricados sem colagem lateral entre as lamelas e espessura de 80 mm (três camadas), não ser possível garantir a estanqueidade à água destes, pois o espaço entre lamelas adjacentes pode ser de no máximo 6 mm (EN, 2014). Por esse motivo, a possível ocorrência de vazamento seria inerente ao processo de fabricação dos painéis, solucionando o primeiro questionamento realizado.

É importante analisar a viabilidade econômica de se introduzir uma nova etapa na fabricação, como a colagem lateral ou a camada dupla, na produção brasileira, para que se possa garantir a estanqueidade à água. Possivelmente, o custo adicional dessas modificações tornaria a aplicação de revestimentos não-aderidos externos mais econômica para atingir esse quesito de desempenho.

Até o momento, é possível aferir, unicamente, que no caso do emprego de elementos construtivos com espessura de 80 mm (três camadas), como é produzido no Brasil, considera-se necessária a adoção de revestimentos não-aderidos externos, concebidos ainda no projeto arquitetônico da edificação.

Além disso, cabe aqui destacar que para que este elemento construtivo de fato garanta a durabilidade e vida útil da edificação, empregado, independentemente, como vedação interna ou externa, há necessidade de um aprimoramento nas técnicas de produção, no que diz respeito à colagem e ao tratamento sob pressão da matéria-prima, tendo em vista as inconformidades observadas nos ensaios laboratoriais de retenção e preservação do produto preservativo e de delaminação.

5.2. Recomendações de projeto para edificações em CLT

Antes do início do projeto:

- Analisar a viabilidade de montagem dos elementos construtivos em CLT no local da edificação, considerando acesso e movimentação dos equipamentos utilizados no processo.

Durante a concepção do projeto:

- Definir a forma de montagem da edificação (em módulos ou *in loco*);
- Considerar as restrições de transporte, no caso de edificações em módulos, de modo a orientar o tamanho dos módulos concebidos;
- Idealizar o projeto em virtude da adoção de elementos construtivos em forma de painéis, otimizando a quantidade de painéis empregados e considerando o tamanho máximo de 12,00 m x 3,00 m de fabricação desses;
- Otimizar o Plano de Corte visando o máximo aproveitamento do processo construtivo;
- Prever espaços para passagem das tubulações hidráulicas;
- Considerar a possibilidade de espelhamento de paredes hidráulicas;
- Considerar a instalação de revestimentos não-aderidos externos no caso de vedações verticais externas com espessura de 80 mm (três camadas);
- Desenvolver o projeto arquitetônico, preferencialmente, em *softwares* de modelagem tridimensional.

Durante o detalhamento do projeto (antes da fabricação dos painéis):

- Detalhar os projetos complementares, definindo pontos de iluminação, elétrica (embutida ou aparente) e hidráulica;
- Incorporar no projeto detalhes construtivos eficazes para evitar o contato dos elementos em CLT com a umidade;
- Especificar a adoção de tratamento preservativo sob pressão na matéria-prima utilizada na fabricação de lajes de piso ou cobertura, vedações externas, vedações internas de áreas molhadas ou molháveis e vedações internas de difícil manutenção, reparo ou substituição;

- Especificar, no caso de vedações internas de fácil manutenção, reparo e substituição e cuja superfície permanecerá aparente, tratamento preservativo sob pressão na matéria-prima empregada, ao menos, nas camadas centrais dos elementos em CLT, aplicando produto inseticida em todas as superfícies dos painéis;
- Especificar, no caso de vedações internas de fácil manutenção, reparo e substituição e cuja superfície será revestida, tratamento preservativo sob pressão em toda a matéria-prima empregada nos elementos em CLT;
- Especificar aplicação de acabamento superficial do tipo *stain* em todos os elementos construtivos em CLT que permanecerão com suas superfícies expostas;
- Especificar juntas compostas por duas linhas de selante de silicone para conexões de elementos construtivos que devam permanecer estanques;
- Especificar, para a aplicação de peças suspensas com peso de até 50 kg, parafusos convencionais para MDF, tamanho 4,5 x 60 mm, ou HBS 6 x 60 da Rothoblaas[®].

Contudo, no que diz respeito ao alcance da devida vida útil da edificação, as recomendações apresentadas só serão válidas caso se garanta o desempenho isolado do elemento construtivo empregado na edificação quanto à colagem das lamelas e tratamento preservativo sob pressão da matéria-prima.

5.3. Conclusões

Para alcançar o resultado almejado, no decorrer do desenvolvimento desta dissertação, um dos maiores desafios encontrados deu-se ao organizar e descrever o processo construtivo de forma linear. Como observado, as etapas integrantes desse processo, sejam elas das fases de matéria-prima a montagem, passando pela fabricação, possuem estreita relação entre si. Etapas executadas no final do processo construtivo, como é o caso de instalações elétricas ou acabamentos, influenciam na fabricação dos painéis ou no tratamento da matéria-prima, por exemplo. Instalações embutidas necessitam de planejamento prévio, pois as usinagens necessárias para sua execução são realizadas ainda em fábrica pelo equipamento de usinagem e para isso, devem constar no modelo tridimensional dos painéis.

Chama-se atenção para a interligação e interdependência entre as etapas do processo construtivo em CLT, apontando a necessidade de profissionais possuírem conhecimento do processo como um todo antes de se iniciar o projeto arquitetônico. Como exemplo dessa inter-relação, pode-se citar que a instalação ou não de acabamentos interfere no tratamento da matéria-prima, pois deve-se realizar o tratamento com produto preservativo impregnado na madeira no caso de elementos que serão revestidos, tendo em vista que a dificuldade de realização de manutenções nesses casos pode levar ao aparecimento de manifestações patológicas nos elementos construtivos. E essa decisão é tomada no projeto arquitetônico. Da mesma forma, o tempo de montagem de uma edificação em CLT diz respeito, em especial, à quantidade de elementos construtivos projetados. Este número, por sua vez, apresenta-se como consequência direta do projeto arquitetônico e da incorporação ou não das características de produção dos painéis, dentre elas o tamanho máximo de fabricação.

Como qualquer sistema construtivo industrializado para se usufruir da totalidade das suas características positivas é essencial que desde a concepção do projeto arquitetônico sejam consideradas as particularidades do elemento CLT. Isto porque as decisões de projeto influenciam diretamente no transporte das peças, na montagem, no leiaute do canteiro e, principalmente no desempenho da edificação a ser construída afetando diretamente os custos e satisfação dos usuários.

Ainda no processo construtivo, por meio do estudo das técnicas de fabricação digital, concluiu-se que a principal consequência acarretada pelo uso do equipamento de usinagem com comando numérico computadorizado (CNC) ocorre durante a etapa de

projeto. Tradicionalmente, após a concepção do projeto arquitetônico, confeccionam-se desenhos bidimensionais que são enviados aos fabricantes dos componentes construtivos e à equipe responsável pela construção. Por meio da introdução da fresadora CNC, dispensa-se a elaboração de inúmeros desenhos bidimensionais tanto para fabricação dos elementos construtivos, quanto para montagem dos painéis. Como observado, o modelo tridimensional elaborado para a confecção dos painéis é enviado diretamente ao equipamento de usinagem e, para a montagem do edifício, é transformado em apenas uma perspectiva, e alguns outros detalhes de montagem.

Como visto, a norma brasileira sobre preservação de madeira não engloba os painéis de CLT, como era de se esperar em vista da recente implementação desses na construção civil nacional. Consequentemente, levanta-se a necessidade de se estudar novos produtos preservativos que possam ser empregados nos painéis e critérios de retenção e penetração específicos para essa tecnologia.

Considerando os critérios atualmente em vigor no país, os resultados encontrados para a retenção e penetração do produto preservativo utilizado na matéria-prima dos painéis de CLT mostraram-se aquém do esperado. Ressalta-se, assim, a necessidade de se exigir do fornecedor da matéria-prima a garantia do tratamento preservativo adotado na madeira dentro dos padrões estabelecidos nas normas brasileiras. Alternativamente, pode-se estabelecer no processo produtivo dos painéis de CLT um sistema de avaliação de qualidade da matéria-prima que possibilite comprovar a adequação do tratamento preservativo às normas.

Destaca-se, ainda, que a análise de desempenho do elemento em CLT deve englobar outros requisitos que não foram abordados neste estudo, como, por exemplo, conforto térmico ou acústico.

Os ensaios de desempenho estrutural (corpo mole e corpo duro), como também de choque térmico, atenderam aos requisitos e critérios exigidos na ABNT NBR 15575:2013. Porém, os ensaios de estanqueidade apresentaram resultados insatisfatórios. Ainda assim, aponta-se a necessidade de mais ensaios para se garantir a não estanqueidade do painel. Ademais, assinala-se a necessidade de verificações continuadas dos processos de tratamento da matéria-prima e colagem das lamelas, de modo a garantir a devida vida útil da edificação.

Não se pretendeu, neste trabalho, esgotar os estudos sobre o emprego dos painéis de CLT ou exaurir as lacunas existentes acerca do seu desempenho no Brasil. Claramente, a

pesquisa aqui realizada pode ser aprofundada e ramificada, verificando os diversos questionamentos levantados no decorrer deste estudo.

No entanto, ainda que muito recente no país e carente de informações a seu respeito, percebe-se que o elemento construtivo inovador CLT representa uma modificação drástica no setor da construção civil, tanto em termos de concepção e desenvolvimento do projeto arquitetônico, quanto em termos de construção. Seu emprego exige um desprendimento das técnicas construtivas tradicionais e das soluções arquitetônicas usuais a essas maneiras de se construir, para se alcançar máxima produtividade em seu processo construtivo.

De toda a análise, depreende-se que o CLT se apresenta, de fato, como uma alternativa extremamente promissora na construção civil. A especificação deste elemento construtivo, contudo, deve ser planejada de maneira a se compreender e respeitar a intrínseca relação existente entre suas etapas construtivas e as soluções técnicas e arquitetônicas, para que se garanta adequado desempenho da edificação em uso.

Certamente, a intensificação do emprego do elemento construtivo CLT na construção civil nacional, assim como ocorreu em outros países, demandará soluções diante de desafios a serem enfrentados. Cabe ao setor produtivo e aos profissionais da arquitetura e construção civil a tarefa de buscar a melhoria tecnológica do produto. Paralelamente, cabe ao setor acadêmico e científico a pesquisa e comprovação da eficácia do uso e desempenho do elemento, intercambiando informações de forma a incrementar a cadeia produtiva. Assim, diante da dinâmica que ocorre no desenvolvimento de qualquer nova tecnologia, vislumbra-se um processo continuado de análises e testes, para que esse elemento construtivo inovador e promissor seja, mais e mais, aperfeiçoado.

Referências Bibliográficas

ABRAHAMSEN, Rune B. **World's tallest timber building – 14 storeys in Bergen**. 21. Internationales Holzbau-Forum IHF. Garmisch, 2015. Disponível em: <http://www.forum-holzbau.com/pdf/41_IHF_2015_Abrahamsen.pdf>. Acesso agosto de 2018.

AGÊNCIA BRASILEIRA DE DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL (ABDI). **Manual da construção industrializada. Conceitos e etapas. Volume I: estrutura e vedação**. Brasília: ABDI, 2015. Disponível em: <<http://www.abramat.org.br/datafiles/publicacoes/manual-construcao.pdf>>. Acesso em abril de 2014.

AGOPYAN, Vahan; JOHN, Vanderley M. **O Desafio da Sustentabilidade na Construção Civil**. Col. Sustentabilidade - Vol. 5. Editora Blucher, 2011.

ALENCAR, Juliana Bello Mussi. **Sistema Construtivo em Madeira Laminada Colada Cruzada ou Cross Laminated Timber (CLT): Análise da viabilidade técnica d madeira com baixo valor agregado**. Dissertação de Mestrado. Centro de Tecnologia e Urbanismo da Universidade Estadual de Londrina. Londrina, 2015.

ALENCAR, Juliana Bello Mussi; MOURA, Jorge Daniel de Melo. **Qualidade da adesão da madeira de pinus e eucalipto para produção de painéis estruturais Cross Laminated Timber (CLT)**. XV Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. Maceió, 2014.

ALMEIDA, Aliane Cardoso de; BARBOSA, Juliana Cortez; MUNIS, Rafael Almeida. **Análise comparativa entre o CLT e o concreto – resistência mecânica a compressão e densidade**. XVI Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira. III Congresso Latino-americano de Estruturas de Madeira. São Carlos, 2018.

AMERICAN WOOD PRESERVERS' ASSOCIATION – AWP. **Standard A03-08 – Standard Methods for Determining Penetration of Preservatives and Fire Retardants**. Selma, 2005.

AMORIM, S. T. A.; MANTILLA, J. N. R.; CARRASCO, E. V. M. **Análise dos métodos analíticos de dimensionamento de lajes de madeira laminada cruzada**. II Congresso Latinoamericano e estruturas de madeira. Buenos Aires, 2017.

AMORIM, Sílvia Teixeira Andrade; RIBEIRO, Gabriela de Oliveira; BAÑO, Vanesa. **Estudo do dimensionamento das lajes do material composto: madeira laminada cruzada e concreto**.

XVI Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira. III Congresso Latino-americano de Estruturas de Madeira. São Carlos, 2018.

ANSI/APA– The Engineered Wood Association. **Standard for Performance Rated Cross-Laminated Timber PGR 320-2017**. ANSI/APA. Tacoma, WA, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 6232 – Penetração e retenção de preservativos em madeira tratada sob pressão**. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 15575 – Edificações Habitacionais — Desempenho**. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 11675 – Divisórias leves internas moduladas — Verificação da resistência aos impactos**. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 16143 – Preservação de madeiras – Sistema de categorias de uso**. Rio de Janeiro, 2013.

BOURSCHEID, Cleide B.; KNISS, Daniella D. C.; TEREZO, Rodrigo E. **Potencial da madeira laminada colada cruzada no Brasil**. II Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia da Madeira. Belo Horizonte, 2015.

BRANDNER, R. **Production and Technology of Cross Laminated Timber (CLT): A state-of-the-art Report**. 2013. Disponível em:

<http://costfp1004.holz.wzw.tum.de/fileadmin/tu/wz/costfp1004/Theme_I_Product_and_Testing.pdf>. Acesso em: abril de 2017.

BRANDNER, R.; FLATSCHER, G.; RINGHOFER, A. SCHICKHOFER, G. THIEL, A. **Cross Laminated Timber (CLT): overview and development**. European Journal of Wood and Wood Products, v. 74, n. 3, 2016, p. 331–351.

BRUNA, Paulo Julio Valentino. **Arquitetura, Industrialização e Desenvolvimento**. São Paulo: Editora Perspectiva e Editora da Universidade de São Paulo, 2002.

BUSWELL, R. A.; SOAR, R. C., GIBB, A. G. F., THORPE, A. **Freeform construction: mega-scale rapid manufacturing for construction**. Automation in Construction 16, p. 224-231, 2007.

CONAMA. Resolução n. 307, de 5 de julho de 2002: **Diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil**. Brasil, 2002.

CONSELHO NACIONAL DE TRÂNSITO – CONTRAN. **Resolução Nº 210**. Brasília: Diário Oficial da União (D.O.U.), 2006.

CONSOLIDAÇÃO DAS LEIS DO TRABALHO (CLT). **Decreto-Lei nº 5.452 de 01/05/1943**. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Decreto-Lei/Del5452.htm>. Acesso em setembro de 2018.

COSTA, Ana Alexandra Pontes da. **Construção de edifícios com Cross Laminated Timber (CLT)**. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto. Porto, Portugal, 2013.

CREPELL, Pablo; GAGNON, Sylvain. **Cross Laminated Timber: a Primer**. Pointe-Claire: FPIInnovations, 2010.

CUNHA, João; CARRASCO, Edgar V. M.; BRANCO, Jorge M.; LOURENÇO, Paulo B. **Ligações estruturais de madeira laminada colada cruzada (CLT) utilizando parafusos autoperfurantes**. XXXV Jornadas Sul Americanas de Engenharia Estrutural. Rio de Janeiro, 2012.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **Resolução Nº 1**. Brasília: Diário Oficial da União (D.O.U.), 2016. Disponível em: <<http://www.dnit.gov.br/rodovias/operacoes-rodoviaras/sistema-de-gerenciamento-de-autorizacao-especial-de-transito-siaet/RESOLUO012016DNITCargasIndivisveis.pdf>>. Acesso em setembro de 2018.

EBNER, Gerd. **CLT production is expected to double until 2020**. 2017. Disponível em: <<https://www.timber-online.net/holzprodukte/2017/06/brettsper Holz-produktion-in-europa---20162020.html>>. Acesso em: novembro de 2017.

EN 16351. Timber structures — Cross laminated timber —Requirements. British Standards Institution. European Committee for Standardization, 2015.

EN Eurocode 5: timber design essentials for engineers. High Wycombe: TRADA Technology Ltd, 2009.

FONSECA DE CAMPOS, Paulo Eduardo; LOPES, Eduardo Ignacio. **A fabricação digital aplicada à construção industrializada: estado da arte e perspectivas de desenvolvimento**. Concreto & Contrução, v. 85, p. 22-29, 2017.

FRANGI, A.; BOCHICCHIO, G.; CECCOTTI, A.; LAURIOLA, M. P. **Natural Full-Scale Fire Test on a 3 Storey XLam Timber Building**. 10th World Conference on Timber Engineering. Miyazaki, Japão, 2008.

GAUZIN-MÜLLER, Dominique. **Arquitetura Ecológica**. São Paulo: Editora Senac São Paulo, 2011.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES (IBÁ). **Relatório 2017**. Brasília: IBÁ, 2017. Disponível em: <http://iba.org/images/shared/Biblioteca/IBA_RelatorioAnual2017.pdf>. Acesso em outubro de 2017.

JORGE, Luís. **Edifícios construídos com painéis de madeira lamelada colada-cruzada (X-Lam)**. Seminário Casas de Madeira. Castelo Branco, Portugal, 2013.

KARACABEYLI, Erol; DOUGLAS, Brad. **CLT Handbook: Cross laminated timber**. Pointe-Claire: FPIInnovations, 2013.

KOLAREVIC, Branko. **Architecture in digital age: Design and manufacturing**. New York: Spon Press, 2003.

LEITE, Thaisa Marques; SÁNCHEZ, José Manoel Morales; BLUMENSCHNEIN, Raquel Naves. **O processo produtivo de painéis estruturais em Cross Laminated Timber: potencialidades e desafios de implantação na construção civil brasileira**. XVI Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira. III Congresso Latino-americano de Estruturas de Madeira. São Carlos, 2018.

LELIS, Antonio Tadeu; *et al.* **Biodeterioração de madeiras em edificações**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT, 2001.

LEPAGE, Ennio Silva (Coord.); *et al.* **Manual de Preservação de Madeiras**. Volume I. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT, 1986.

LOURENÇO, Paulo B.; BRANCO, Jorge M. **Dos abrigos da pré-história aos edifícios de madeira do século XXI**. In: MELO, Arnaldo Sousa, RIBEIRO, Maria do Carmo. **História da Construção – Arquiteturas e Técnicas Construtivas**. Braga: CITCEM/LAMOP, 2013. p. 200-213.

MANAVELLA, Cecília; TEIXEIRA, Divino Eterno; WIMMER, Peter; ROITMAN, Luciano. **Compressão e cisalhamento na linha de cola em painéis de madeira laminada colada cruzada de Eucalyptus sp., Araucaria angustifolia e Pinus taeda**. XVI Encontro Brasileiro em

Madeiras e em Estruturas de Madeira. III Congresso Latino-americano de Estruturas de Madeira. São Carlos, 2018.

MERK Timber GmbH/Züblin Timber Construction. **Leno Cross Laminated Timber (CLT)**. 2015. Disponível em: <https://www.trada.co.uk/media/3874/leno_brochure_eng_012015.pdf>. Acesso em agosto de 2018.

MIOTTO, José Luiz. **Estruturas mistas de madeira-concreto: avaliação das vigas de madeira laminada colada reforçadas com fibras de vidro**. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, 2009.

MOLINA, Julio Cesar; CALIL JUNIOR, Carlito. **Sistema construtivo em wood frame para casas de madeira**. Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas, v. 31, n. 2. Londrina, 2010, pág. 143-156.

MORRELL, J. J. **Chromate Copper Arsenate as a Wood Preservative**. In: **Environmental Impacts of Treated Wood**, T.G. Townsend and H. Solo-Gabriele (Ed.). CRC Press, Boca Raton, 2006, pág. 5-17.

OLIVEIRA, Gabriela Lotufo; OLIVEIRA, Fabiana Lopes de. **As interferências do processo produtivo na concepção de projeto de edifícios em CLT - Cross Laminated Timber**. 1º Workshop de Tecnologia de Processos e Sistemas Construtivos (TECSIC). Campinas, 2017.

PASSARELLI, Rafael Novais. **Cross laminated timber: Diretrizes para projeto de painel maciço em madeira no Estado de São Paulo**. Dissertação de Mestrado. Instituto de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo. São Carlos, 2013.

PEREIRA, Marcos Cesar de Moraes; CALIL JUNIOR, Carlito. **Aplicação do Método Gama para dimensionamento de elementos de lajes de CLT**. XV EBRAMEM - Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira. Curitiba, 2015.

PEREIRA, Marcos Cesar de Moraes; CALIL JUNIOR, Carlito. **Comparativo entre painéis de Cross Laminated Timber (CLT) produzidos no Brasil**. II Congresso Latinoamericano e estruturas de madeira. Buenos Aires, 2017.

PEREIRA, Marcos Cesar de Moraes; CALIL JUNIOR, Carlito. **Painéis estruturais produzidos pelo princípio da laminação cruzada: CLT, DLT e outros modelos**. XVI Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira. III Congresso Latino-americano de Estruturas de Madeira. São Carlos, 2018.

PEREIRA, Marcos Cesar de Moraes. **Metodologia para estudo da caracterização estrutural de painéis de Madeira Laminada Colada Cruzada**. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, 2014.

SABATTINI, Fernando Henrique. **Desenvolvimento de métodos, processos e sistemas construtivos: formulação e aplicação de uma metodologia**. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1989.

SILVA, Carla; CHIRINEA, Maria Letícia B.; BARROS, Mercia M. S. B. **Cross Laminated Timber (CLT): uma tecnologia construtiva viável no Brasil?** XVI Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído (ENTAC). São Paulo, 2016.

SILVA, Catarina; BRANCO, Jorge M.; LOURENÇO, Paulo B. **MLCC na Construção em Altura**. Congresso Construção. Coimbra, 2012.

SILVA, Tânia Sofia Barbosa. **Explorar a Potencialidade de um Edifício Construído com Madeira Lamelada Colada Cruzada (MLCC). Da organização espacial interior à relação interior – exterior**. Dissertação (Mestrado) – Escola de Arquitetura, Universidade do Minho. Guimarães, Portugal, 2014.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES FLORESTAIS (SNIF). **Boletim SNIF 2017**. Ed. 1. Brasília: SNIF, 2017. Disponível em: <<http://www.florestal.gov.br/documentos/publicacoes/3230-boletim-snif-2017-ed1-final/file>>. Acesso em setembro de 2018.

SODERBERG, Johan. **A ilusória emancipação por meio da tecnologia**. Le Monde Diplomatique Brasil, v. 66, 2013. Disponível em: <<https://diplomatie.org.br/a-ilusoria-emancipacao-por-meio-da-tecnologia/>> Acesso em agosto de 2017.

STAUDER, Cameron. **Cross-Laminated Timber: An analysis of the Austrian industry and ideas for fostering its development in America**. Fachhochschule Salzburg: University of Applied Sciences. 2013.

WEST, D. C. **Health Effects of Preserved Wood: Relationship Between CCA-Treated Wood and Incidence of Cancer in the United States**. Conference Paper from Environmental Impacts of Preservative -Treated Wood Conference, Orlando, Florida, 2004.

Referências Digitais:

<https://www.rothoblaas.pt/>