

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA - CAMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DA CONSTRUÇÃO CIVIL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**KAROLINY CORRÊA
LUCAS SCHMITT**

Análise estrutural de madeira engenheirada: aplicação de ferramentas
computacionais em um estudo de caso no município de Florianópolis

FLORIANÓPOLIS, 2025.

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA - CAMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DA CONSTRUÇÃO CIVIL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**KAROLINY CORRÊA
LUCAS SCHMITT**

Análise estrutural de madeira engenheirada: aplicação de ferramentas computacionais em um estudo de caso no município de Florianópolis

Projeto de Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientadora: Prof.^a Luciana da Rosa Espindola, Doutora.

FLORIANÓPOLIS, 2025.

Ficha de identificação da obra elaborada pelos autores.

Corrêa, Karoliny; Schmitt, Lucas.

Análise estrutural de madeira engenheirada: aplicação de ferramentas computacionais em um estudo de caso no município de Florianópolis / Karoliny Corrêa e Lucas Schmitt; orientação de Luciana Da Rosa Espindola. - Florianópolis, SC, 2025.

132 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) - Instituto Federal de Santa Catarina, Câmpus Florianópolis. Bacharelado em Engenharia Civil. Departamento Acadêmico de Construção Civil.

Inclui Referências.

1. Madeira engenheirada. 2. CLT. 3. MLC. 4. Concepção estrutural. 5. Ferramentas Computacionais. 6. Análise Comparativa. I. Da Rosa Espindola, Luciana. II. Instituto Federal de Santa Catarina. III. Análise estrutural de madeira engenheirada: aplicação de ferramentas computacionais em um estudo de caso no município de Florianópolis.

**ANÁLISE ESTRUTURAL DE MADEIRA ENGENHEIRADA: APLICAÇÃO DE
FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS EM UM ESTUDO DE CASO NO MUNICÍPIO
DE FLORIANÓPOLIS**

**KAROLINY CORRÊA
LUCAS SCHMITT**

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título de Engenheiro em 2025 e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do Curso Engenharia Civil do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Florianópolis, 27 de Fevereiro, 2025.

Banca Examinadora:

Prof.^a Luciana da Rosa Espíndola, Doutora

Prof. Auro Cândido Marcolan Júnior, Doutor

Prof. Miguel Correia de Moraes, Mestre

RESUMO

Com o avanço das tecnologias industrializadas, componentes de madeira engenheirada, como o *Cross Laminated Timber* (CLT) e o *Glued Laminated Timber* (GLULAM ou GLT), já são produzidos e aplicados no Brasil. A madeira engenheirada, quando comparada à madeira serrada, oferece vantagens como melhor estabilidade dimensional e a possibilidade de manufatura de elementos de grandes seções e comprimentos. Este trabalho tem como objetivo demonstrar como as ferramentas disponibilizadas por uma empresa de madeira engenheirada podem auxiliar na elaboração da análise estrutural de um estudo de caso na cidade de Florianópolis. As atividades realizadas foram a modelagem do sistema estrutural do estudo conforme projeto original em concreto, a concepção estrutural do estudo de caso em madeira engenheirada, a análise comparativa de informações presente nas ferramentas computacionais utilizadas, a realização de ajustes nas dimensões dos componentes conforme catálogo do fabricante e a análise comparativa entre o concreto e a madeira. Os resultados indicaram que, embora a utilização da madeira engenheirada tenha apresentado aumento no volume de material necessário para atender aos requisitos estruturais, esse sistema construtivo mostrou uma redução significativa das cargas transmitidas ao solo, podendo favorecer a economia produzida no dimensionamento do projeto de fundações. Esse aumento no volume de madeira também evidencia que o projeto em madeira não deve ser uma adaptação de um projeto originalmente concebido para concreto, mas sim desenvolvido em madeira desde a sua concepção. Por fim, observaram-se algumas inconsistências entre os componentes de madeira engenheirada nas ferramentas computacionais utilizadas, evidenciando a necessidade de ajustes para aprimorar sua aplicação no projeto estrutural.

Palavras-chave: Madeira engenheirada. CLT. MLC. Concepção estrutural. Ferramentas computacionais. Análise comparativa.

ABSTRACT

With the advancement of industrialized technologies, engineered wood components such as Cross Laminated Timber (CLT) and Glued Laminated Timber (GLULAM or GLT) are already being produced and applied in Brazil. Compared to sawn timber, engineered wood offers advantages such as better dimensional stability and the possibility of manufacturing elements with large cross-sections and lengths. This study aims to demonstrate how the tools provided by an engineered wood company can assist in the structural analysis of a case study in the city of Florianópolis. The activities carried out included modeling the structural system of the case study according to the original concrete project, designing the structural concept in engineered wood, conducting a comparative analysis of the information available in the computational tools used, adjusting the dimensions of components according to the manufacturer's catalog, and comparing concrete and wood. The results indicated that, although the use of engineered wood led to an increase in the volume of material required to meet structural requirements, this construction system significantly reduced the loads transmitted to the ground, potentially lowering foundation design costs. This increase in wood volume also highlights that timber projects should not be adaptations of designs originally conceived for concrete but should be developed in wood from the outset. Finally, some inconsistencies were observed in the engineered wood components within the computational tools used, emphasizing the need for adjustments to enhance their application in structural design.

Keywords: Engineered wood. CLT. GLT. Structural design. Computational tools. Comparative analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Principais países produtores de madeira serrada em 2021 (milhões de m ³)	19
Figura 2: Produtividade florestal máxima, média e mínima do Brasil (m ³ /ha/ano com casca).....	20
Figura 3: a) MLC; b) CLT; c) MLP; d) DLT; e) DCLT	23
Figura 4: a) LVL; b) PSL; c) LSL; d) OSL	23
Figura 5: Tipos de camadas em painéis de CLT	25
Figura 6: Esquema de fabricação do painel de CLT	27
Figura 7: CLT após fabricação	27
Figura 8: Esquema da sequência de carga e de posicionamento das peças.....	28
Figura 9: Fabricação e produto final de arcos em MLC.....	29
Figura 10: Composição de uma peça de MLC	31
Figura 11: Tipos de disposição das lamelas coladas	32
Figura 12: Ciclo da fabricação de MLC	34
Figura 13: MLC após fabricação	35
Figura 14: Içamento com guindaste de viga em MLC com cinta de tecido não abrasivo	36
Figura 15: Edifício Ascent, EUA	39
Figura 16: Edifício Brock Commons Tallwood House, Canadá.....	39
Figura 17: Loja Dengo, São Paulo	40
Figura 18: McDonald's, São Paulo	40
Figura 19: Verificação esquemática dos deslocamentos-limite.....	44
Figura 20: Especificações ND e NI de uma viga estrutural	46
Figura 21: Mapa tridimensional – IFSC	50
Figura 22: Planta Baixa pavimento térreo - Ala C	51

Figura 23: Planta Baixa pavimento tipo - Ala C	51
Figura 24: Corte Transversal - Ala C	52
Figura 25: Fluxograma das atividades desenvolvidas nesta pesquisa	53
Figura 26: Indicação do núcleo da edificação	54
Figura 27: Elemento VIGA - MLC	55
Figura 28: Elemento PILAR - MLC	55
Figura 29: Elemento BIM – lajes CLT	56
Figura 30: Elemento BIM – paredes CLT	56
Figura 31: Áreas de influência de cargas	59
Figura 32: Distribuição das cargas por elemento estrutural	59
Figura 33: Tela inicial da CalculaTimber_CLT	60
Figura 34: Tela de configuração dos coeficientes e ponderadores de cálculo da CalculaTimber_CLT	62
Figura 35: Tela inicial da CalculaTimber_MLC	63
Figura 36: Tela inicial da CalculaTimber_Column	63
Figura 37: Tela inicial da CalculaTimber_Column com ênfase na localização da função otimizar	64
Figura 38: Aviso na função "otimizar"	64
Figura 39: Núcleo de concreto com duplicação em madeira	67
Figura 40: Modelagem inicial	68
Figura 41: Distribuição de áreas	73
Figura 42: Ponderações para verificação de dimensões	74
Figura 43: Localização dos elementos analisados	74
Figura 44: Dados da primeira simulação da laje L1 em CLT aplicando classe C22 ..	75
Figura 45: Dados da segunda simulação da laje L1 em CLT aplicando classe C24 ..	76
Figura 46: Simulação com classe de resistência C45 da laje L1 em CLT aplicando classe C45	77

Figura 47: Simulação da laje L1 em CLT com condição bi-engastada e classe C22	78
Figura 48: Simulação da laje L1 em CLT com condição bi-engastada e classe C50	78
Figura 49: Dados de entrada da primeira simulação da viga V18	80
Figura 50: Resultado da primeira simulação da viga V18	81
Figura 51: Resultado da segunda simulação da V18 com a função otimizar	81
Figura 52: Simulação base (b) igual a 15 cm para classe C24	82
Figura 53: Simulação base (b) igual a 15 cm para classe C50	83
Figura 54: Simulação base (b) igual a 20 cm para classe C22	84
Figura 55: Simulação base (b) igual a 20 cm para classe C35	85
Figura 56: Simulação base (b) igual a 25 cm para classe C22	85
Figura 57: Simulação base (b) igual a 25 cm para classe C24	86
Figura 58: Resultado da simulação b igual a 25 cm para classe C40	87
Figura 59: Simulação base (b) igual a 20 cm para classe C22	89
Figura 60 Simulação base (b) igual a 20 cm para classe C45	89
Figura 61: Simulação base (b) igual a 20 cm para classe C50	90
Figura 62: Simulação base (b) igual a 25 cm para classe C22	90
Figura 63: Composição do painel em CLT no <i>template</i> Revit da empresa Urbem	93
Figura 64: Comparativo entre painéis em CLT contidos na calculadora CalculaTimber_CLT e no <i>template</i> Urbem	94
Figura 65: Destaque aos painéis em CLT com 7 camadas contidos na calculadora CalculaTimber_CLT	94
Figura 66: Dimensões para seções de vigas e pilares contidas nas calculadoras Urbem para MLC	95
Figura 67: Dimensões existentes na biblioteca BIM da Urbem para pilares em MLC	96
Figura 68: Dimensões existentes na biblioteca BIM da Urbem para vigas em MLC	96
Figura 69: Edifício em madeira engenheirada	98

Figura 70: Detalhe construtivo 01.....	99
Figura 71: Detalhe construtivo 02.....	99

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dimensões painéis CLT	26
Tabela 2: Exemplos de edificações verticais com Mass Timber	38
Tabela 3: Classes de umidade	41
Tabela 4: Definição de classes de carregamento e valores de k_{mod1}	42
Tabela 5: Valores de k_{mod2}	42
Tabela 6: Valores do coeficiente K_E	44
Tabela 7: Verificação esquemática dos deslocamentos de limite	45
Tabela 8: Painéis em CLT contidos na Calculadora da empresa Urbem - CalculaTimber_CLT	57
Tabela 9: Vigas e pilares em MLC contidos na Calculadora da empresa Urbem - CalculaTimber_MLC e CalculaTimber_Column	57
Tabela 10: Classes de resistências definidas em ensaios de peças estruturais.	61
Tabela 11: Ações e carregamentos.....	69
Tabela 12: Ajuste das dimensões das lajes de concreto para CLT.....	69
Tabela 13: Ajuste das dimensões das vigas de concreto para MLC	70
Tabela 14: Ajuste das dimensões dos pilares de concreto para MLC	70
Tabela 15: Alturas obtidas para a laje L1 conforme classes de resistência e condição de contorno	79
Tabela 16: Carregamento da V18	79
Tabela 17: Resultado das simulações bi-apoiadas para a viga V18 em MLC.....	87
Tabela 18: Resultado das simulações bi-engastadas para a viga V18 em MLC.....	88
Tabela 19: Carregamento do pilar P14	88
Tabela 20: Resultado das análises b igual a 25 cm bi-apoiado para o pilar P14 em MLC.....	91

Tabela 21: Comparativo do pilar P14 classe C35 bi-apoiado X apoiado engastado X bi-engastado.....	91
Tabela 22: Comparativo entre dimensões dos pilares e vigas em concreto armado e MLC.....	100

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação I: k_{mod3} para MLC.....	42
Equação II: Esbeltez	43
Equação III: Comprimento de Flambagem L_0	43

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Justificativa.....	18
1.2	Definição do problema.....	21
1.3	Objetivo Geral.....	21
1.4	Objetivos Específicos	21
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	22
2.1	Madeira Engenheirada	22
2.1.1	Madeira Lamelada Colada Cruzada (MLCC ou CLT, em inglês)	24
2.1.1.3	Fabricação, transporte e montagem.....	26
2.1.2	Madeira Lamelada Colada (MLC ou, em inglês, GLULAM).....	29
2.1.2.3	Fabricação, transporte e montagem.....	33
2.1.3	Conexões e ligações entre elementos de madeira engenheirada.....	36
2.1.4	Exemplos de edificações em Madeira Engenheirada.....	37
2.2	Critérios para dimensionamento de estruturas de madeira engenheirada estabelecidos pela NBR 7190:2022	41
2.2.1	Coeficientes de modificação.....	41
2.2.2	Esbeltez.....	43
2.2.3	Valores dos limites de deslocamentos	44
2.3	Modelagem da informação da construção (BIM) em projetos de estruturas de madeira	45
2.4	Ferramentas computacionais para desenvolvimento de projetos em madeira engenheirada	47
3	MÉTODO DE PESQUISA	50
3.1	Modelagem do projeto estrutural original em BIM	53
3.2	Análise estrutural da madeira engenheirada	56
3.2.1	Definições de ações e carregamentos	56
3.2.2	Ajustes das dimensões originais para as dimensões das Calculadoras Urbem	57

3.2.3	Verificação das dimensões adotadas e aplicação nas calculadoras	58
3.3	Ajuste das dimensões dos componentes modelados conforme os valores adotados.....	65
3.4	Comparativo entre madeira e concreto	65
4	APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS.....	67
4.1	Modelagem do projeto estrutural conforme valores do projeto original	67
4.2	Concepção estrutural em madeira engenheirada.....	68
4.2.1	Ações e carregamentos.....	68
4.2.2	Ajustes de dimensões conforme Calculadoras Urbem	69
4.2.3	Verificação estrutural aplicando as Calculadoras da empresa Urbem	73
4.2.4	Valores finais adotados para o estudo de caso em madeira engenheirada	91
4.3	Ajuste das dimensões dos componentes modelados conforme os valores adotados na análise estrutural	92
4.3.1	Comparação entre Calculadora Urbem x <i>Template</i> Urbem: elementos em CLT	93
4.3.2	Comparação entre Calculadora Urbem x Biblioteca Revit Urbem: elementos em MLC.....	95
4.3.3	Ajuste de modelagem com as dimensões finais.....	97
4.4	Comparativo entre Estrutura de concreto armado e Estrutura de madeira engenheirada	100
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	102
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	104
	ANEXO 01 - TIPOS DE MADEIRA ENGENHEIRADA À BASE DE LAMELAS (TÁBUAS) DE MADEIRA	115
	ANEXO 02 - TIPOS DE MADEIRA ENGENHEIRADA À BASE DE LÂMINAS, TIRAS E LASCAS DE MADEIRA.....	116
	ANEXO 03 – LIGAÇÕES ENTRE PAINÉIS CLT.....	117
	ANEXO 04 - LIGAÇÕES ENTRE PAINEL CLT E CONCRETO (CONTINUA).....	118

ANEXO 04 - LIGAÇÕES ENTRE PAINEL CLT E CONCRETO (CONCLUSÃO) ..	119
ANEXO 05 - LIGAÇÕES ENTRE ESTRUTURAS EM MLC COM CONCRETO OU AÇO (CONTINUA)	120
ANEXO 05 - LIGAÇÕES ENTRE ESTRUTURAS EM MLC COM CONCRETO OU AÇO (CONCLUSÃO).....	121
ANEXO 06 - LIGAÇÕES ENTRE PAINÉIS EM CLT E PILARES EM MLC (CONTINUA).....	122
ANEXO 06 - LIGAÇÕES ENTRE PAINÉIS EM CLT E PILARES EM MLC (CONCLUSÃO).....	123
APÊNDICE 01 – ESFORÇOS CARACATERÍSTICOS PARA OS PILARES DE MADEIRA ENGENHEIRADA EM MLC	124
APÊNDICE 02 – MEMORIAL DE CÁLCULO PARA LAJE L1 COM CLASSE C24, ALTURA 18 CM, BI-APIOADA.....	125
APÊNDICE 03 – MEMORIAL DE CÁLCULO PARA VIGA V18 COM CLASSE C24, SEÇÃO 25 X 68 CM, BI-APIOADA	126
APÊNDICE 04 – MEMORIAL DE CÁLCULO PARA PILAR P14 COM CLASSE C35, SEÇÃO 25 X 76 CM, BI-APIOADO	127
APÊNDICE 05 – DIMENSÕES AJUSTADAS E ADOTADAS PARA AS LAJES EM CLT	128
APÊNDICE 06 – DIMENSÕES AJUSTADAS E ADOTADAS PARA AS VIGAS EM MLC	129
APÊNDICE 07 – DIMENSÕES AJUSTADAS E ADOTADAS PARA OS PILARES EM MLC	130
APÊNDICE 08 – ESFORÇOS CARACATERISTICOS EM MADEIRA ENGENHEIRADA COM PERCENTUAL DE VARIAÇÃO.....	131
APÊNDICE 09 – COMPARAÇÃO ENTRE ESFORÇOS CARACATERISTICOS PARA OS PILARES ORIGINAIS DE CONCRETO ARMADO E PILARES FINAIS ADOTADOS DE MADEIRA ENGENHEIRADA (MLC).....	132

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, diversos componentes em madeira são produzidos com tecnologias altamente industrializadas, envolvendo as engenharias para aprimorar as características desse material, em especial sua durabilidade natural, estabilidade dimensional, resistência estrutural e resistência ao fogo. A madeira sólida é transformada em lamelas¹, lâminas² ou tiras³ e, por instrumentos industrializados e mecanizados, são unidas com cola estrutural, pregos ou cavilhas para formar os produtos finais. Por isso, hoje, esses são denominados produtos de madeira engenheirada, ou, em inglês, *engineered wood* (Naturally Wood, s.d.; Woodworks, 2022; APA - The Engineered Wood Association, 2019).

Cada vez mais, o potencial da madeira engenheirada tem-se destacado na construção de edificações (Kremer; Symmons, 2018). A madeira engenheirada quando aplicada para a produção de grandes pilares, vigas, painéis estruturais de lajes e de paredes é denominada de madeira massiva, ou, em inglês, *mass timber* (Naturally Wood, s.d.; Woodworks, 2022; APA - The Engineered Wood Association, 2019).

Dos diversos tipos de madeira engenheirada e madeira massiva, este trabalho destaca o *Cross Laminated Timber* (CLT⁴), traduzido como Madeira Lamelada Colada Cruzada (MLCC), e o *Glued Laminated Timber* (GLULAM ou GLT), traduzido como Madeira Lamelada Colada (MLC), os quais já são produzidos e aplicados no Brasil (Leite *et al.*, 2017, Shigue, 2018, Oliveira, 2018, 2023).

O *Cross Laminated Timber* (CLT) é denominado pela ABNT NBR 7190 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2022) como Madeira Lamelada Colada Cruzada (MLCC), onde cada painel estrutural é composto por camadas de lamelas de madeira, ou seja, tábuas de madeira serrada. Estas camadas são empilhadas com as fibras em direções ortogonais e coladas com adesivo estrutural e prensadas para formar um painel sólido, plano e retangular. Geralmente, o CLT é utilizado para construção de painéis estruturais de piso/laje e de parede (APA - The Engineered

¹ Lamelas são tábuas de madeira.

² Lâmina é uma fina folha de madeira.

³ Tiras são pedaços pequenos e finos de madeira retirados como lascas.

⁴ Este trabalho adota a sigla CLT, em inglês, que ainda é mais usual no Brasil.

Wood Association, 2020).

Por sua vez, o *Glued Laminated Timber* (GLULAM ou GLT) é denominado pela ABNT NBR 7190 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2022) como Madeira Lamelada Colada (MLC), onde, as peças são compostas por camadas de lamelas de madeira empilhadas e coladas com as fibras paralelas ao eixo longitudinal das peças. Geralmente, a MLC é utilizada para vigas e pilares.

No Brasil, a produção de estruturas em MLC ocorre desde a década de 1960, mas ainda não é abrangente no seu território quando comparada com outros países, como os norte-americanos (Gauzin-Müller, 2011 *apud* Lotufo Oliveira, 2023). Entretanto, nos últimos anos, estas construções em madeira começaram a ter mais destaque no país. Um exemplo é o relato da revista Valor Econômico (2024) que aponta como referência na América Latina a construção da Escola Moradas Infantis Canuanã, da Fundação Bradesco, no estado de Tocantins realizada pela empresa ITA com projeto da Rosenbaum + Aleph Zero com 25 mil metros quadrados.

Já as construções com CLT são mais recentes no Brasil, iniciando em 2012 com a empresa Crosslam no estado de São Paulo. E, até o ano de 2018, o país tinha contabilizado 31 edificações construídas em CLT, sendo metade para uso residencial e localizadas principalmente no estado de São Paulo. Mas, desde então, observa-se um crescimento destas construções, inclusive para uso educacional, lazer e industrial. Em 2022, registrou-se o início de outra empresa produtora de CLT no Brasil, a Urbem (Lotufo Oliveira, 2023).

A inclusão de aspectos normativos para MLC e CLT na ABNT NBR 7190 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2022) também evidencia o avanço destas tecnologias em madeira no Brasil. Entretanto, para uma propagação que mantenha as qualidades do CLT e do MLC no país, salienta-se a importância da concepção de projetos adequada às tecnologias, considerando todo o processo de produção das edificações. Pois, aplicações inadequadas terão como consequência a inviabilidade destes materiais, tanto em questões relacionadas à durabilidade quanto aos custos (Lotufo Oliveira, 2023).

Portanto, “não se trata simplesmente de substituir a parede de alvenaria ou o pilar de concreto por uma parede de CLT e um pilar de MLC” (Lotufo Oliveira, 2023, p. 93). Como as estruturas de madeira engenheirada são essencialmente industriais, é importante transformar o pensamento da construção tradicional para a construção

de um produto industrial, que é consequente de fabricação e montagem. Para manter a racionalização e otimização, além do desempenho, o projeto deve aproximar conceitos e execução (Lotufo Oliveira, 2023).

As estruturas de madeira exigem cada vez mais demonstração de desempenho por meio de instrumentos de modelagem computacional. Esses instrumentos de projeto são importantes desde a modelagem inicial até a montagem final da estrutura. Eles garantem precisão na definição e detalhamento dos projetos, verificam a integridade estrutural e otimizam a produção e montagem das peças (Chen *et al.*, 2023).

Nesse sentido, *softwares* e aplicativos estão sendo desenvolvidos para contribuir na elaboração de projetos com estruturas de madeira engenheirada, como MLC e CLT. Por exemplo, em 2021, a empresa brasileira Urbem lançou calculadoras criadas em parceria com a empresa TQS para a verificação estrutural isolada de elementos de laje, viga e pilar (Almeida *et al.*, 2022).

Diante disso, o presente estudo busca demonstrar como essas ferramentas computacionais podem contribuir para a análise estrutural de um estudo de caso no município de Florianópolis adaptado para madeira engenheirada.

1.1 Justificativa

A madeira foi selecionada como escolha principal deste trabalho visando, além de suas propriedades físicas e mecânicas, principalmente, sua contribuição ambiental para o setor da construção no Brasil.

Durante décadas a utilização do concreto nas construções de casas e edifícios tem sido significativa. Todavia, o concreto utilizado é responsável por pelo menos 5% da emissão de CO₂ na atmosfera (Leite, 2001). Desse modo, tem sido cada vez mais recorrente a procura de soluções de sistemas mais sustentáveis.

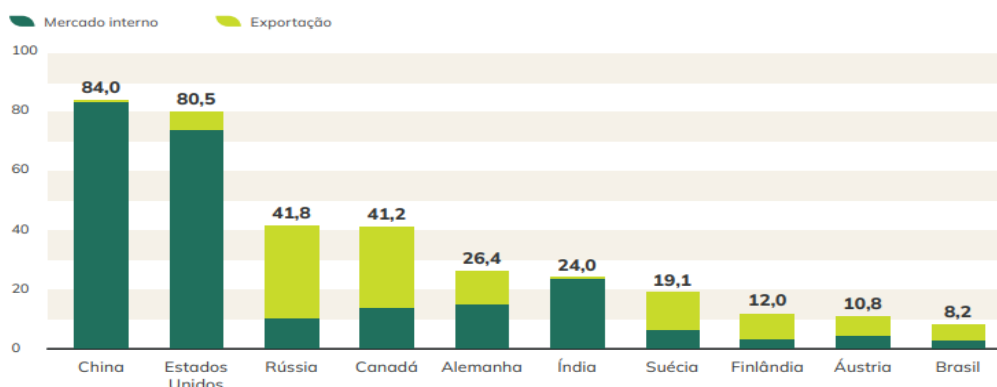
A madeira entra como um concorrente sustentável reduzindo a taxa de CO₂ na atmosfera, devido a sua capacidade de absorção e retenção de carbono (Lotufo Oliveira, 2023). Por isso, os sistemas construtivos em *mass timber* tendem a ser grandes responsáveis para uma construção civil ecologicamente mais sustentável em escala global (Kremer; Symmons, 2018).

Para a produção de madeira engenheirada, tem sido dada preferência à madeira de plantios florestais, especialmente o eucalipto e o pinus, no Brasil,

pelas seguintes características: rapidez de crescimento; leveza (média densidade); disponibilidade; e trabalhabilidade (Ino; Shimbo, 2024, p. 109).

O potencial madeireiro do Brasil, em especial do pinus e do eucalipto, pode ser observado nos relatórios anuais do Ibá (2023), responsável pela representação institucional da cadeia produtiva de árvores plantadas do Brasil, que destaca o país entre os 10 maiores produtores de madeira serrada do mundo (Figura 1), com uma produção de madeira serrada em torno de 8 milhões de m³ nos últimos anos.

Figura 1: Principais países produtores de madeira serrada em 2021 (milhões de m³)



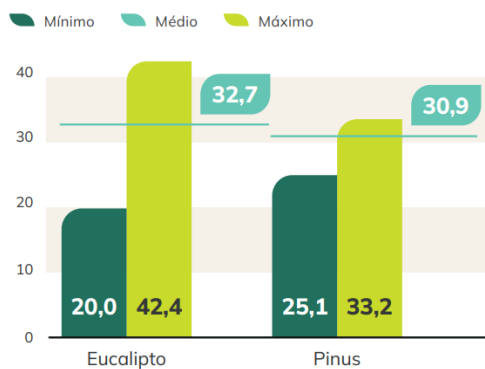
Fonte: Ibá (2023).

Conforme o Ibá (2023), as plantações de árvores no Brasil em 2022 chegaram a 9,94 milhões de hectares, superando em 0,3% o ano anterior. Dentre as espécies mais cultivadas estão:

- Eucalipto: com 76% de área plantada, totalizando 7,6 milhões de hectares;
- Pinus: com 19% de área plantada, totalizando 1,9 milhões de hectares;
- Outras espécies: 5% de área plantada, incluindo a seringueira com 230 mil hectares, a teca com 76 mil hectares e a acácia com 54 mil hectares;

Além disso, o Brasil apresenta uma ótima produtividade florestal por ano, conforme apresentado na Figura 2.

Figura 2: Produtividade florestal máxima, média e mínima do Brasil ($\text{m}^3/\text{ha}/\text{ano}$ com casca)



Fonte: Ibá (2023).

Embora o grande volume madeireiro no Brasil seja evidente, sua aplicação para madeira engenheirada ainda é limitada no Brasil. Por exemplo, apenas as empresas Crosslam e Urbem produzem painéis em CLT no país, como relata Lotufo Oliveira (2023). Já as empresas produtoras de MLC no país, conforme pesquisa de Shigue (2018), são: TW Brazil, Catalana Artefatos de Madeira, Portela Woods, Esmara Estruturas de Madeira, Rewood, Ita Construtora, Artpine, Simonin e Madeira Status.

A madeira engenheirada, quando comparada a peças de madeira serrada, apresenta vantagens nas propriedades físicas e mecânicas dos elementos, incluindo melhor estabilidade dimensional, e também possibilita a manufatura de elementos de grandes dimensões (Ino; Shimbo, 2024), entre outras vantagens que serão mais detalhadas no decorrer deste trabalho.

No entanto, a adoção da madeira engenheirada no Brasil ainda enfrenta desafios, especialmente no mundo acadêmico. Ino e Shimbo (2024) e Lotufo Oliveira e Brazolin (2023) destacam que o tema ainda é pouco abordado nos cursos de engenharia civil, o que impacta a difusão do conhecimento técnico necessário para sua aplicação. Nesse sentido, este estudo busca contribuir para a ampliação do conhecimento sobre a madeira engenheirada, abordando suas possibilidades estruturais e ferramentas de projeto e dimensionamento.

A modelagem computacional é uma ferramenta essencial no desenvolvimento de projeto e na análise de edificações com produtos e sistemas em madeira. Segundo a FPInnovations (*apud* Chen *et al.*, 2023), grande parte dos engenheiros não estão familiarizados com a modelagem de estruturas de madeira e, além disso, faltam recursos para modelagem avançada de sistemas de madeira. Nesse sentido, a FPInnovations desenvolveu um guia denominado “*Modelling Guide for Timber Structures*” para apoiar a aplicação de modelagem numérica em análise e projeto de

estruturas de madeira (Chen *et al.*, 2023).

No Brasil, existem pesquisas que aplicam a modelagem paramétrica para analisar a malha estrutural de madeira, aplicando *softwares* como o Rhinoceros com *plugin* Grasshoper e o Dlubal da RFem (Barbosa, 2018; Violin, 2019). Para estruturas mais simples e lineares, a empresa brasileira Urbem desenvolveu três calculadoras: uma para pilares em MLC, outra para vigas em MLC e outra para lajes em CLT.

Assim, este trabalho selecionou estas calculadoras da empresa Urbem, disponíveis gratuitamente online, para avaliar como ocorrem suas funcionalidades para projetos de estruturas de madeira engenheirada. Esta análise foi realizada em um estudo de caso já construído em concreto armado no município de Florianópolis, que foi adaptado para madeira engenheirada neste trabalho.

1.2 Definição do problema

Como as ferramentas disponíveis no mercado podem auxiliar na elaboração da análise estrutural de um estudo de caso em madeira engenheirada na cidade de Florianópolis?

1.3 Objetivo Geral

Demonstrar como as ferramentas disponibilizadas por uma empresa de madeira engenheirada podem auxiliar na elaboração da análise estrutural de um estudo de caso na cidade de Florianópolis.

1.4 Objetivos Específicos

- a) Modelar o sistema estrutural do estudo de caso conforme projeto original em concreto;
- b) Realizar a análise estrutural do estudo de caso aplicando ferramentas de uma empresa de madeira engenheirada;
- c) Ajustar as dimensões dos componentes modelados conforme os valores adotados na análise estrutural;
- d) Comparar as dimensões das seções e pesos dos elementos em madeira engenheirada adotados e do concreto.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Na sequência, apresenta-se uma revisão sobre: madeira engenheirada, com ênfase para Madeira Lamelada Colada Cruzada (CLT) e Madeira Lamelada Colada (MLC); e ferramentas para projetos em madeira engenheirada.

2.1 Madeira Engenheirada

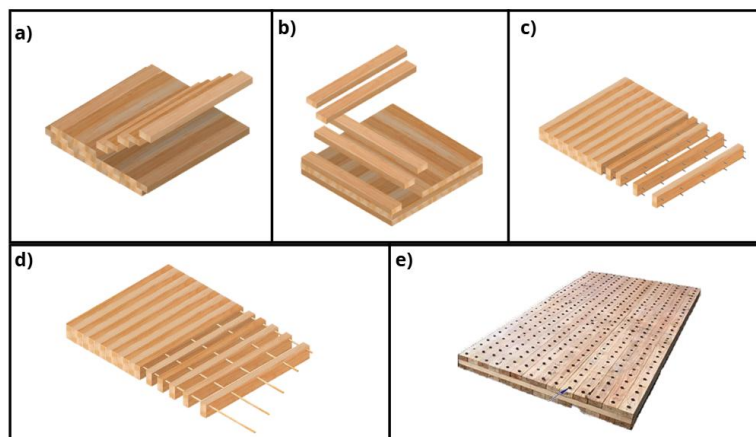
A madeira engenheirada, ou *engineered wood*, consiste no desmembramento da madeira em pedaços menores que são unidos com técnicas de colagem, obtendo um produto mais resistente, mais estável e com dimensões superiores à madeira original. Assim, pode-se dizer que a madeira engenheirada é um produto que agrega a engenharia moderna à resistência natural da madeira (Dawson *et al.*, 2022).

Lotufo Oliveira (2023) menciona a madeira massiva, ou *mass timber*, como uma subcategoria da madeira engenheirada, a qual compreende os elementos estruturais de madeira com grandes dimensões.

As principais madeiras engenheiradas de uso estrutural (Figura 3) compostas de lamelas são (Naturally wood, s.d.; APA - The Engineered Wood Association, 2019; Ino; Shimbo, 2024):

- Madeira Lamelada Colada (MLC ou *Glued Laminated Timber*, GLULAM),
- Madeira Lamelada Colada Cruzada (MLCC ou *Cross Laminated Timber*, CLT),
- Madeira Lamelada Pregada (MLP ou *Nail-Laminated Timber*, NLT),
- Madeira Lamelada Cavilhada (*Dowel-Laminated Timber*, DLT),
- Madeira Lamelada Cavilhada Cruzada (*Dowel Cross-Laminated Timber*, DCLT).

Figura 3: a) MLC; b) CLT; c) MLP; d) DLT; e) DCLT

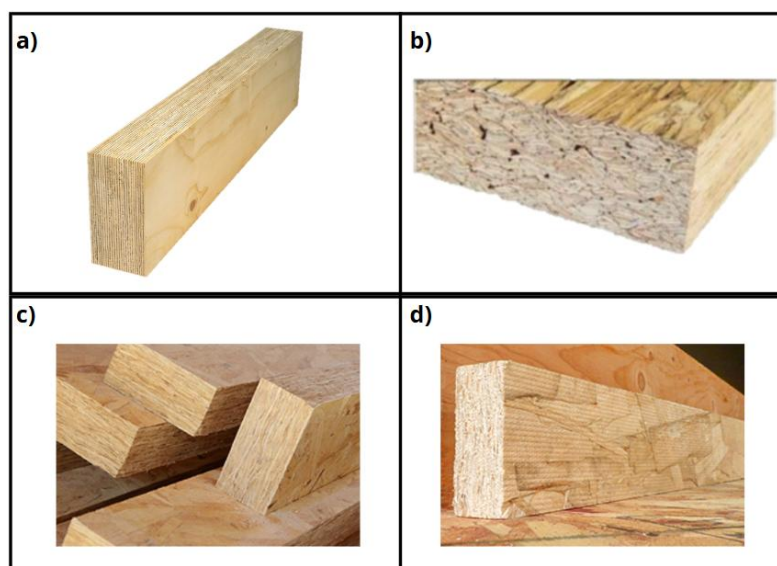


Fonte: Adaptado de Pereira (2019) e Woodworks (2022).

Também existem as madeiras engenheiradas estruturais compostas por lâminas ou tiras (Figura 4) chamadas *Structural Composite Lumber* (SCL), como (Naturally Wood, s.d.; APA, 2019, 2020):

- Madeira Micro Laminada (*Laminated Veneer Lumber*, LVL),
- *Parallel Strand Lumber* (PSL),
- *Laminated Strand Lumber* (LSL),
- *Oriented Strand Lumber* (OSL).

Figura 4: a) LVL; b) PSL; c) LSL; d) OSL



Fonte: Adaptado de APA - The Engineered Wood Association (2019), Multiplacas (s.d.) e Mass Timber Institute (2021).

Nos Anexos 01 e 02 estão apresentadas as definições e principais aplicações destas madeiras engenheiradas citadas anteriormente. E, na sequência, serão

apresentados os dois tipos de madeira engenheirada mais utilizados atualmente no Brasil: o CLT e o MLC.

2.1.1 Madeira Lamelada Colada Cruzada (MLCC ou CLT, em inglês)

A Madeira Lamelada Colada Cruzada (CLT), mais conhecida como *Cross Laminated Timber* (CLT ou X-Lam), começou a ser desenvolvida no início da década de 1990 nas cidades de Zurique e Lausanne, na Suíça. No entanto, o elemento construtivo que é utilizado atualmente começou a ser desenvolvido em 1990, na região da Áustria, proveniente de um estudo realizado entre a indústria e a universidade. As primeiras indústrias foram instaladas na Áustria, Suíça e Alemanha (Cresspell; Gagnon, 2010).

No Brasil, a empresa Crosslam Brasil foi pioneira na fabricação de painéis CLT, iniciando sua produção em 2012, no município de Suzano, em São Paulo (Lotufo, 2023). Neste mesmo município, também está a empresa CG Sistemas (Shigue, 2018). E, no estado do Paraná, desde 2022, encontra-se a empresa Urbem (Lotufo Oliveira, 2023).

2.1.1.1 Vantagens e Desvantagens

O CLT possui ótimas propriedades de resistência devido à sua composição interna de madeira maciça. As lamelas posicionadas perpendicularmente permitem uma distribuição bidirecional da carga, diferenciando os painéis em CLT dos sistemas convencionais, que transmitem cargas unidirecionais (Costa, 2013).

As construções em CLT oferecem resistência comparável ou superior às construções em aço e concreto, com a vantagem de serem mais sustentáveis. Devido à sua alta resistência, o uso do CLT está sendo considerado para projetos anteriormente vistos como inadequados para a madeira, como arranha-céus (Dias, 2018).

Além disso, a combinação de força, ductilidade e peso faz do sistema uma opção resistente a terremotos. De mesmo modo, as construções em CLT possuem isolamento térmico e acústico excelentes, sem a necessidade de utilização de sistemas de aquecimento (Dias, 2018).

Referente a sua resistência ao fogo, o desempenho do CLT é considerado um

dos melhores se comparado a outro sistema de construção de madeira, concreto ou aço (Dias, 2018). A massa térmica sólida dos painéis CLT permite que um lado do painel suporte altas temperaturas enquanto o outro lado permanece em temperatura ambiente, limitando a propagação do fogo. Além disso, a construção hermética e a baixa área de superfície dos painéis ajudam a inibir o crescimento de incêndios, encapsulando e sufocando as chamas em uma única área (Crosslam, 2020).

O sistema construtivo CLT destaca-se por ser uma construção de obra limpa e seca. Além disso, por ser pré-fabricada, a etapa de desenvolvimento das placas não é afetada por condições climáticas, sem atrasos nesse sentido. O tipo de montagem por conexão de painéis ou de módulos tridimensionais no canteiro também reduz o tempo de execução. Entretanto, a pré-fabricação pode ser também uma desvantagem, visto que é necessário um investimento inicial na parte de infraestrutura e produção (Dias, 2018).

Dentre outras desvantagens, estão: a necessidade de a superfície externa obter camadas de proteção à prova de água; e poucas unidades de produção de CLT resultando em custos adicionais de transporte para alguns locais (De Sousa, 2020).

2.1.1.2 Especificações técnicas e normativas

Os painéis de CLT devem ser compostos por pelo menos três camadas de lamelas de madeira serrada maciça ou de madeira composta estrutural, dispostas perpendicularmente entre si, unidas com adesivo estrutural (ANSI/APA PRG 320, 2019). Na Figura 5, observa-se as camadas de um painel em CLT com suas lamelas dispostas ortogonalmente entre si.



Fonte: Vilela e Mascia (2024).

O CLT pode ser utilizado em lajes, pisos, coberturas e paredes com ou sem

função estrutural (Lotufo Oliveira, 2018). As dimensões de cada painel, assim como sua espessura, dependem da especificação de cada projeto. Os painéis podem possuir de 3 a 7 camadas, de modo que o produto final seja sempre um número ímpar para que seja criado um eixo de simetria na camada central (Costa, 2013).

As dimensões dos painéis em CLT podem variar de acordo com o fabricante, podendo ocorrer limitações relacionadas ao transporte e à logística e às dimensões do canteiro de obras. As medidas limites estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Dimensões painéis CLT

Dimensões	Descrição	Autor
Comprimento total	18 metros a 24 metros	Brandner, 2016
	24 metros	Crespell e Gagnon, 2010
Largura total	3,00 metros a 4,80 metros	Brandner, 2016
	2,95 metros	Crespell e Gagnon, 2010
Espessura	Cada camada pode variar de 16 mm a 51 mm, podendo chegar a painéis com 508 mm de espessura.	ANSI/APA PRG 320 (2019)

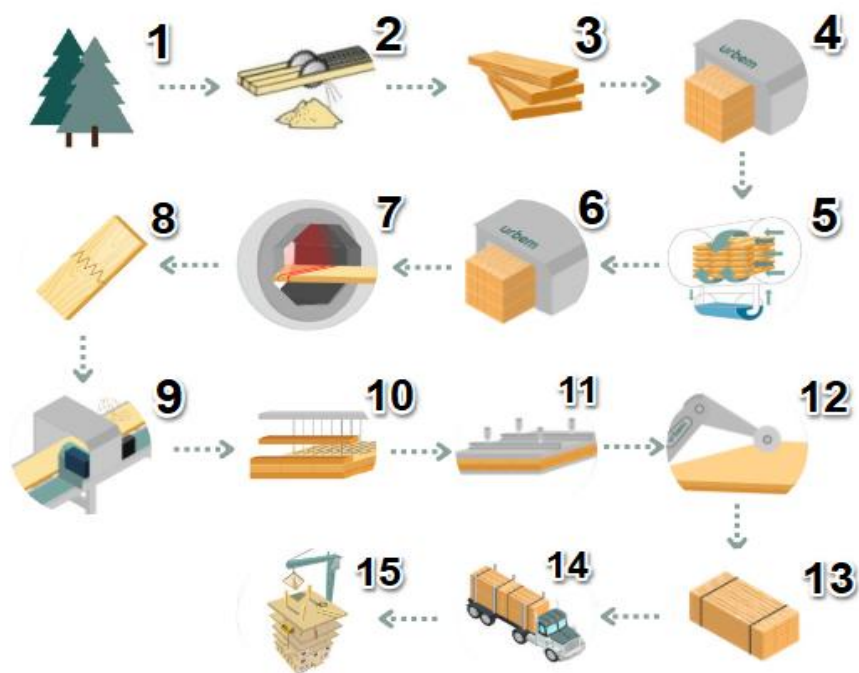
Fonte: Autores (2024).

2.1.1.3 Fabricação, transporte e montagem

Conforme ilustrado na Figura 6, as etapas do processo de fabricação do painel em CLT na empresa Urbem (2022) são:

- A madeira de pinus é extraída, serrada em lamelas e transportada para as fábricas de CLT;
- As lamelas são secas em estufa até atingir 12% de umidade;
- As lamelas são tratadas por impregnação em autoclave e passam por uma segunda secagem;
- As lamelas são classificadas e unidas por emendas dentadas coladas;
- O aplainamento das lamelas é realizado para ajustar o alinhamento;
- As lamelas são coladas em camadas conforme o projeto estrutural e prensadas para formar um painel único;
- Os painéis passam pelo processo de usinagem com Comando Numérico Computadorizado (CNC), onde são feitos cortes, furos e marcações;
- Os painéis são embalados e transportados para o local da obra.

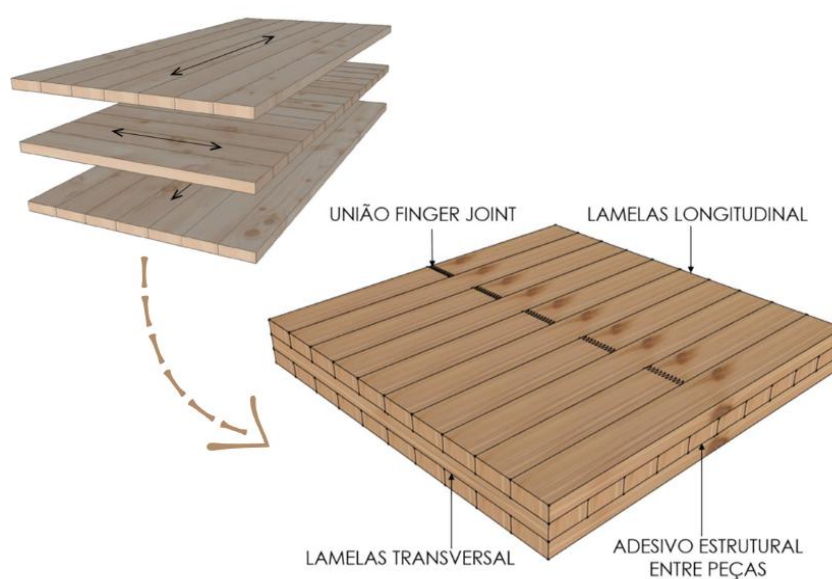
Figura 6: Esquema de fabricação do painel de CLT



Fonte: Adaptado de Urbem (2022) e Dias (2018).

A Figura 7 ilustra a configuração de um painel CLT após sua fabricação, destacando: as camadas dispostas perpendicularmente entre si, as uniões das lamelas por emendas dentadas ou *finger joints*, e o adesivo estrutural que as une.

Figura 7: CLT após fabricação

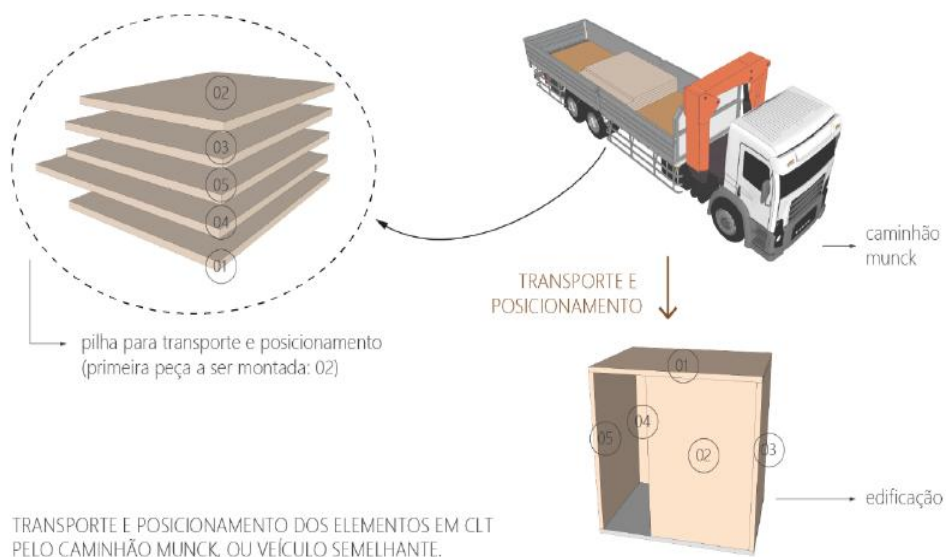


Fonte: Adaptado de Lotufo Oliveira (2018) e Kanehira (2022).

Ao serem concluídas as etapas de corte e usinagem, os painéis passam por uma etapa de limpeza e lixamento, quando necessário (Lotufo Oliveira, 2018).

Na sequência, os painéis são embalados e transportados para a obra. Um plano de carga é elaborado para facilitar o transporte e a montagem no canteiro de obras. A montagem pode ser modular, híbrida ou *in loco*. O plano de montagem determina a sequência e disposição dos elementos no veículo de transporte. A numeração dos painéis é feita na fábrica para garantir a correta montagem na obra (Lotufo Oliveira, 2018). A Figura 8 apresenta uma situação elaborada por Lotufo Oliveira (2018) onde é exemplificado o esquema da sequência de cargas e do posicionamento das peças no veículo de transporte.

Figura 8: Esquema da sequência de carga e de posicionamento das peças



Fonte: Adaptado de Oliveira (2018).

O transporte de cargas deve estar de acordo com a Resolução nº 210, de 2006, do Conselho Nacional de Trânsito (CONTRAN), que estabelece as seguintes dimensões máximas para veículos: largura de 2,60 m, altura de 4,40 m e comprimento total de 14,00 m para veículos não-articulados e de até 19,80 m para veículos articulados com mais de duas unidades. O peso permitido deve seguir a legislação vigente, conforme tipologia, quantidade de eixos, entre outras características (Lotufo Oliveira, 2018).

2.1.2 Madeira Lamelada Colada (MLC ou, em inglês, GLULAM)

As primeiras construções em madeira lamelada colada são do início do século XX. Sua expansão na Europa ocorreu principalmente após a exposição mundial de Bruxelas, em 1910. Sua difusão foi impulsionada durante a Segunda Guerra Mundial como alternativa para o aço, que tinha restrições para as produções. A evolução de adesivos sintéticos estruturais foi fundamental para esta difusão (Leite *et al.*, 2017).

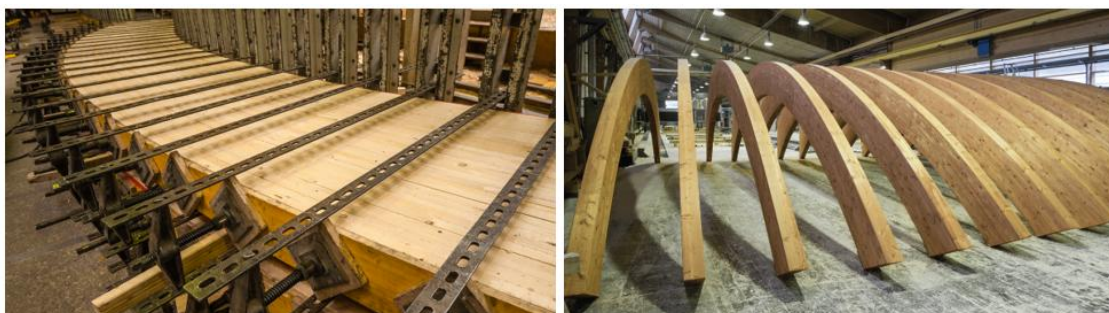
No Brasil, a produção de MLC começou na década de 1930. A primeira fábrica surgiu em 1934 no Paraná, criada por imigrantes alemães. Nos anos 60, outra fábrica foi instalada em São Paulo, usando pinho araucária (Leite *et al.*, 2017, p. 2). Mais recentemente, conforme pesquisa de Shigue (2018), as empresas produtoras de MLC no país são: TW Brazil, Catalana Artefatos de Madeira, Portela Woods, Esmara Estruturas de Madeira, Rewood, Ita Construtora, Artpine, Simonin e Madeira Status.

2.1.2.1 Vantagens e Desvantagens

Conforme mencionado anteriormente, além de utilizar madeira de floresta plantada, como pinus e eucalipto, o sistema em MLC oferece outras vantagens.

A utilização de MLC permite a criação de elementos, como pilares e vigas, com grandes seções e comprimentos, conforme a necessidade do projeto e as possibilidades da fábrica, do transporte e da montagem. Esses elementos podem ser planos e lineares, ou ainda, podem ser produzidos com grande envergadura, nas mais diferentes formas, como curvas e arcos (Figura 9). Todavia, o transporte e o custo podem ser limitantes para os tipos e tamanhos de peças criadas (Timponi, 2017; Dias, 2018).

Figura 9: Fabricação e produto final de arcos em MLC



Fonte: MHM Thermal Insulation and Timber Construction GMBH (2024).

Quando uma peça de MLC tem uma seção maior do que as peças de madeira serrada ou de madeira bruta, apresenta maior resistência ao fogo, pois mantém intacta ao fogo maior área no núcleo da peça, evitando assim o colapso. Também, ainda comparada à madeira serrada, a MLC apresenta melhor estabilidade dimensional e, conseqüentemente, o seu comportamento de contração e inchamento é reduzido (Pfeil; Pfeil, 2003).

Comparando as suas relações entre pesos e resistência com outros materiais, como aço e concreto, a MLC se destaca, pois possui peso próprio baixo e alta resistência. Nesse sentido, vigas de MLC, em geral, podem alcançar vãos maiores (APA, 2023; Timponi, 2017).

Tanto para tração e compressão a madeira apresenta boa resistência, não sendo necessário o uso de estruturas mistas, diferente do concreto. Também é resistente a cargas de choque e a cargas acidentais elevadas de curta duração (Timponi, 2017).

Por ser um material mais leve comparado a outros materiais, a MLC leva vantagem na montagem e desmontagem de grandes estruturas. Por exemplo, quando se compara uma viga de MLC com uma de concreto armado, com o mesmo volume, a viga de concreto armado apresentará um peso próprio cinco vezes maior. O que, por consequência, pode gerar também economia nas fundações de estruturas feitas de MLC (Timponi, 2017).

E, na fase de implementação da MLC, o canteiro de obra é mais limpo e a estrutura é montada muito rapidamente, devido ao fato de ser pré-fabricada, diminuindo custos com mão de obra e aumentando a velocidade de conclusão da obra (Timponi, 2017).

Mas Timponi (2017) relata que a perda de material pode ser muito alta na fabricação, com valores de 13 a 50%, tanto em madeira quanto em adesivos. E, também, que para a produção da MLC são necessários equipamentos especiais, cujo custo de aquisição é elevado e necessitam de mão de obra qualificada.

Ainda, Calil Neto (2017) salienta que “o grande obstáculo é identificar os fabricantes e verificar se eles seguem as normas vigentes, já que não existe um selo de qualidade estrutural para a MLC como em outros países”.

Assim, é fundamental que o controle de qualidade esteja presente na fabricação da MLC em todos os seus estágios, para que ela possa ser utilizada com

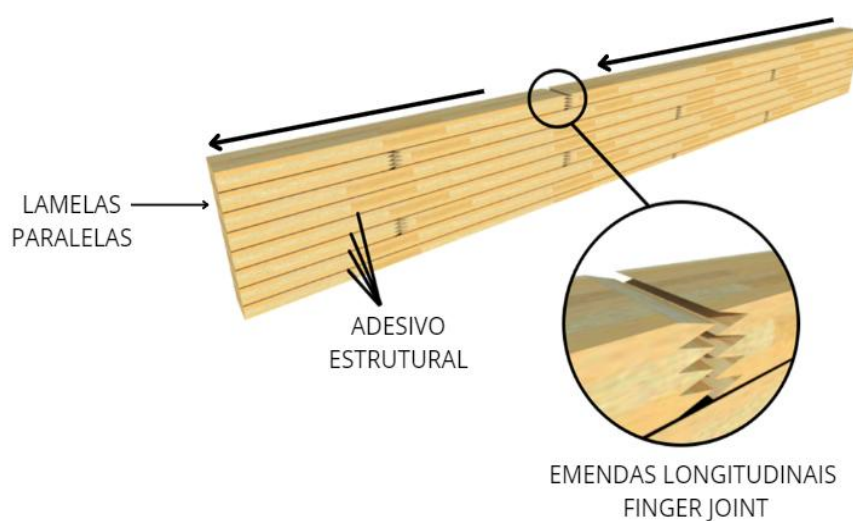
sucesso (Calil Neto, 2017).

2.1.2.2 Especificações técnicas e normativas

De acordo com a ABNT NBR 7190-1 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2022), a Madeira Lamelada Colada (MLC) é composta por lamelas, com espessura inferior a 50 mm, sobrepostas paralelamente, com o sentido das fibras no eixo longitudinal da peça, coladas com adesivos estruturais e prensadas em um processo industrializado de fabricação.

As espessuras das lamelas paralelas podem variar entre 1 cm a 5 cm, enquanto as emendas longitudinais são utilizadas para unir as tábuas no eixo longitudinal da peça (Macêdo, 2000). A Figura 10 ilustra as camadas com lamelas paralelas unidas com adesivo estrutural e com emendas longitudinais dentadas.

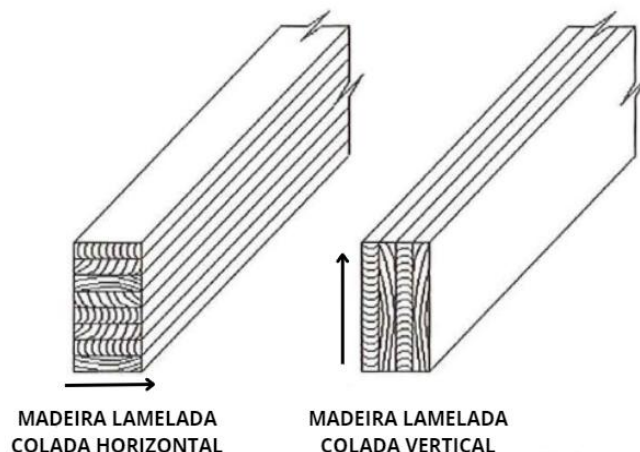
Figura 10: Composição de uma peça de MLC



Fonte: Adaptado de Engenheiro Madeireiro (2018).

Conforme a disposição das lamelas coladas em relação ao plano da peça flexionada, a MLC pode ser classificada em lamelada horizontal ou lamelada vertical, sendo o primeiro tipo o mais comum, como ilustrado na Figura 11 (Macêdo, 2000).

Figura 11: Tipos de disposição das lamelas coladas



Fonte: Adaptado de Macêdo (2000).

Normas internacionais garantem a conformidade do MLC, como: CSA 0177-2006, AITC A190.1-2007, EM 386-2001, e NCh2148.CR2010 (Calil Neto, 2011). No Brasil, a ABNT NBR 7190 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2022) classifica o MLC como madeira para fins estruturais, peças de madeira engenheirada em processo industrializado de fabricação, composto por lamelas coladas entre si e dispostas com as fibras paralelas ao eixo longitudinal da peça final.

Além disso, essa normativa estabelece que as características de resistência e rigidez dos elementos de MLC devem ser asseguradas pelos fabricantes. A norma também recomenda evitar a composição de um mesmo elemento de MLC com espécies diferentes de madeira ou que apresentem coeficientes de retração distintos.

A norma brasileira ainda determina que o tratamento para preservação dos elementos em MLC deve seguir processos que assegurem sua durabilidade e proteção biológica, conforme a ABNT NBR 16143 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2024), sem comprometer a aderência da cola. Esse tratamento pode ser realizado após a fabricação das peças de MLC, desde que a integridade das juntas coladas seja preservada conforme seção 12 da mesma normativa.

Em relação às espessuras das lamelas de MLC, a ABNT NBR 7190 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2022) determina que as lamelas não devem, em hipótese alguma, exceder 50 mm. No entanto, não há especificação de espessura mínima para o MLC, apenas para o CLT. Segundo Dias (2018), a espessura típica mais utilizada no Brasil é de 40mm.

Já os principais tipos de adesivos estruturais utilizados na fabricação de MLC

são: Phenol-Resorcinol (DeMerchant 2024); Melamina-Ureia-Formol (M.U.F) (Silva, 2013); Poliuretano (P.U.) (Silva, 2006); Emulsion Polymeriscoyanate (E.P.I.) (Hexion, 2016, *apud* Depieri; Santos; Costa, 2018).

Dentre esses, o adesivo de resorcinol é amplamente utilizado devido à sua resistência à água, solventes, fungos, mofo e calor, garantindo a durabilidade e a integridade estrutural do MLC, mesmo em condições ambientais adversas (APA - The Engineered Wood Association, 2023).

No Brasil, para produção de MLC, é comum o uso do adesivo fenol-resorcinol-formaldeído (FRF). Além desse, o adesivo melamina-ureia-formaldeído (MUF) também é utilizado, sendo um adesivo bi-componente que favorece vantagens como um menor tempo de cura e a formação de cola transparente após a catalisação (Miotto; Dias, 2009). Frihart e Hunt (2010) destacam que, além das propriedades superficiais da madeira não são os únicos fatores que influenciam para o controle da ligação, a qualidade da colagem também é influenciada pelas propriedades físicas da madeira, como densidade aparente, porosidade, teor de umidade, contração e inchamento.

2.1.2.3 Fabricação, transporte e montagem

A fabricação de MLC exige um rigoroso controle de qualidade em todas as etapas do processo para assegurar que o produto final atenda às normas vigentes, incluindo testes mecânicos e inspeções (Calil Neto, 2011).

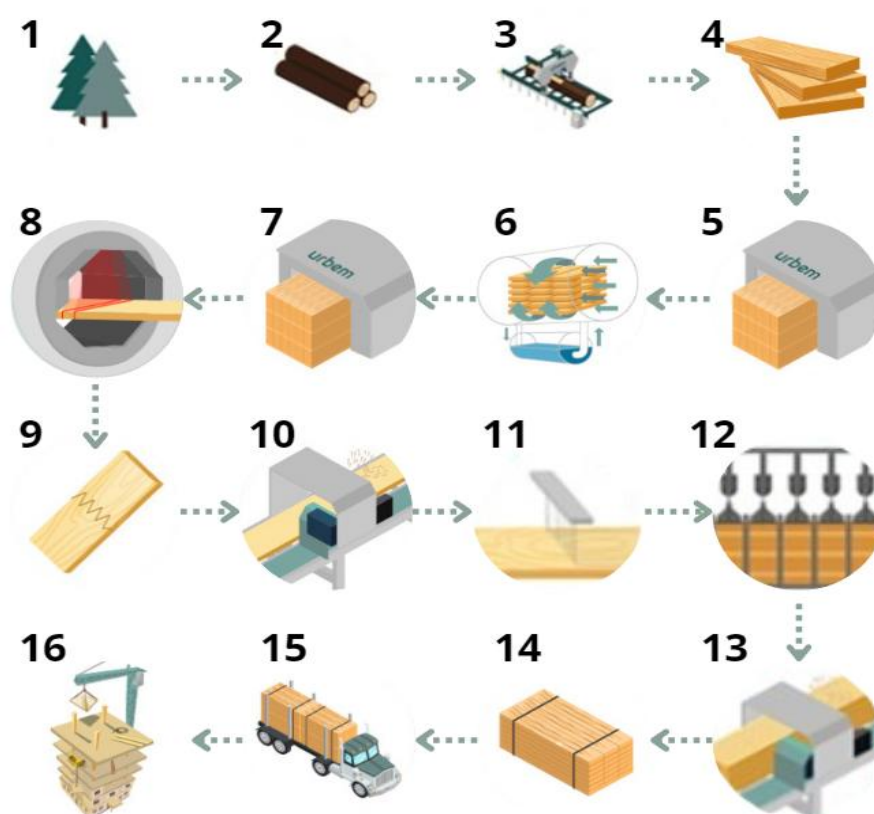
Nesse contexto, conforme ilustrado pela empresa Urbem (2022), na Figura 12, as principais etapas de produção de elementos de MLC, são:

- Extração e beneficiamento das toras de madeira em lamelas (Urbem, 2022);
- Transporte e estocagem das lamelas nas fábricas;
- Primeiro ciclo de secagem das lamelas para reduzir a umidade;
- Impregnação das lamelas em autoclave de acordo com a classe de utilização de cada produto;
- Segundo ciclo de secagem para atingir 12% de umidade conforme orientação da ABNT NBR 7190 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2022) e da EN 15425 (2023);
- Escaneamento, classificação e separação das lamelas por resistência de

acordo com as classes de resistência presentes na NBR 7190 (ABNT, 2022);

- União por emendas dentadas para aumentar o comprimento das peças (Dias, 2018);
- Aplainamento das lamelas para aplicação do adesivo estrutural (Urbem, 2022);
- Sobreposição, colagem e prensagem das lamelas posicionadas paralelamente ao eixo longitudinal da peça (Urbem, 2022);
- Usinagem para furações, cortes e rebaixos das peças;
- Embalagem e transporte dos elementos estruturais para a obra;
- Montagem final na obra.

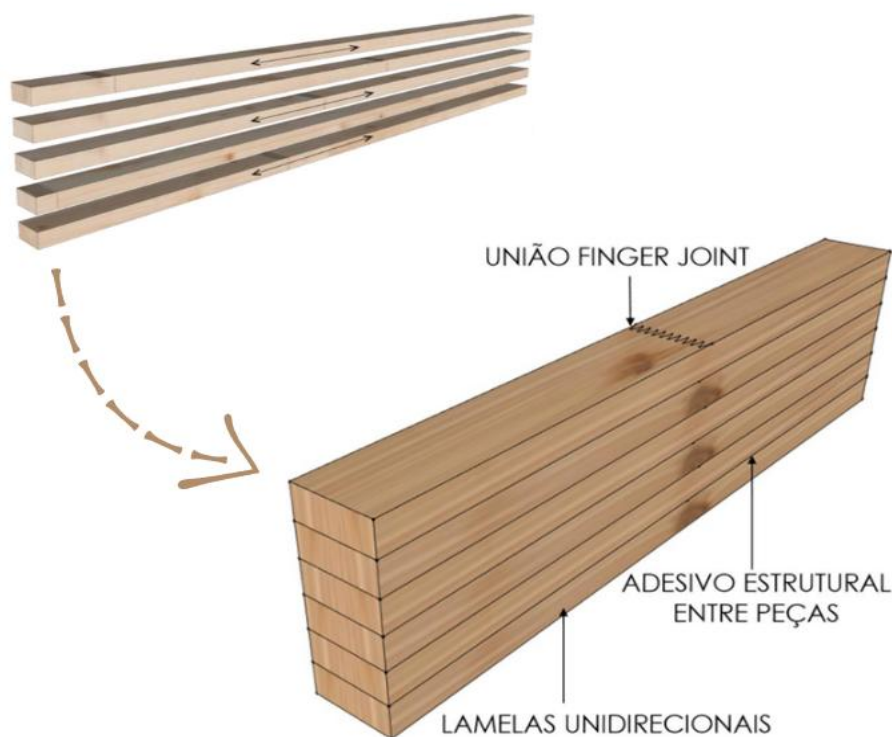
Figura 12: Ciclo da fabricação de MLC



Fonte: Adaptado de Urbem (2022).

A Figura 13, ilustra a configuração de uma viga de MLC após sua fabricação, onde estão destacadas: as lamelas dispostas paralelamente entre si, as uniões das lamelas e o adesivo estrutural que as conecta.

Figura 13: MLC após fabricação



Fonte: Adaptado de Oliveira (2018) e Kanehira (2022).

No transporte de MLC os componentes são empilhados em unidades para facilitar o carregamento e o transporte. É comum agrupar várias peças e amarrá-las com cintas de aço, utilizando protetores de canto para evitar danos ao MLC (Ritter, 1990). A etapa requer cuidado, pois o transporte inadequado é um dos causadores de defeitos nas peças, como arestas quebradas (Calil Junior *et al.* 1998).

Geralmente, o manuseio das vigas é feito por empilhadeiras, tanto na fábrica quanto no canteiro de obras. Para obter maior estabilidade das peças, recomenda-se que as laterais das vigas repousem nos garfos, em vez das bases, ou seja, a viga deve permanecer deitada (APA - The Engineered Wood Association, 2023).

O uso de múltiplas empilhadeiras para manusear as peças de MLC é recomendado para evitar danos. Quando um guindaste com cabos for utilizado para carregar ou descarregar as vigas, é necessário fornecer bloqueios adequados entre o cabo e o membro. Devem ser usadas cintas de tecido não abrasivo para levantar as peças de MLC, conforme ilustrado na Figura 14 (APA - The Engineered Wood Association, 2023).

Figura 14: Içamento com guindaste de viga em MLC com cinta de tecido não abrasivo



Fonte: APA - The Engineered Wood Association (2023).

Em aplicações residenciais e comerciais leves, as vigas de MLC podem ser instaladas com auxílio de empilhadeiras, carregadeiras frontais e outros equipamentos de construção disponíveis. Durante esse procedimento, é importante manter as vigas protegidas para evitar exposição à umidade, sujeira, luz solar e arranhões no momento da instalação. Quando as vigas forem extremamente longas, pode ser necessário o uso de barras de distribuição para reduzir a probabilidade de danos ao utilizar guindastes (APA - The Engineered Wood Association, 2023).

2.1.3 Conexões e ligações entre elementos de madeira engenheirada

No que diz respeito às ligações, o detalhamento adequado é essencial para garantir o desempenho estrutural do sistema com madeira engenheirada. Ligações mal projetadas ou instaladas inadequadamente podem resultar em falhas graves. Desse modo, o projetista deve considerar os efeitos das variações de umidade na peça, o posicionamento adequado dos fixadores mecânicos e a quantidade necessária para suportar as cargas previstas (APA - The Engineered Wood Association, 2023).

Ao projetar ligações, deve-se considerar a estética, as tolerâncias de construção, a facilidade de montagem e questões como umidade e encolhimento. Nas estratégias de montagem faz-se necessário considerar as diferentes tolerâncias dos

materiais, tais como madeira e concreto, para assegurar uma junção precisa e duradoura. A durabilidade e a manutenção das conexões também são críticas, já que as condições ambientais podem causar expansão ou contração da madeira, exigindo conexões que se adaptem sem perder a integridade. Dessa maneira, a escolha adequada das conexões não impacta somente na segurança e na aparência da estrutura, mas também no seu custo total e na complexidade de construção (Kinder; Kingsley, 2021).

As ligações são escolhidas com base em requisitos específicos de *design*, custo, e durabilidade, considerando fatores como a exposição visual desejada, resistência ao fogo, e adaptação a mudanças climáticas que podem afetar a madeira (Kinder; Kingsley, 2021).

Os Anexos 03 e 04 trazem conexões para a montagem de painéis CLT combinados com esses mesmos elementos. Já o anexo 05 apresenta exemplos de conexões utilizadas na montagem de vigas e pilares de MLC combinados com elementos de madeira, concreto e aço.

Por fim, o Anexo 06 ilustra exemplos de conexões entre os painéis CLT combinados com pilares e vigas de MLC.

2.1.4 Exemplos de edificações em Madeira Engenheirada

A publicação *Tall Timber: Mass Timber for High-Rise Buildings (Council on Tall Buildings and Urban Habitat, 2023)* apresenta as edificações mais altas construídas com madeira engenheirada. Na Tabela 2 são apresentados algumas dessas edificações já finalizadas.

Tabela 2: Exemplos de edificações verticais com Mass Timber

EDIFÍCIO	PAÍS	PAVIMENTOS	ALTURA [m]	USO	CONSTRUÍDO [ano]
Ascent	Estados Unidos	25	86,6	Residencial	2022
Mjøstårnet	Noruega	18	85,4	Uso Misto	2019
Brock Commons Tallwood House	Canadá	18	57,9	Residencial	2017
Treet	Noruega	14	49,0	Residencial	2015
25 King	Austrália	11	46,8	Escritórios	2018
Hoas Tuulinitty	Finlândia	13	44,0	Residencial	2021
Obayashi Training Facility	Japão	11	44	Escritórios	2022
Palazzp Nice Meridia	França	10	44	Escritórios	2019
Tallwood 1 at District 56	Canadá	12	41,6	Residencial	2022
Blindern Studenthus	Noruega	12	41	Residencial	2019

Fonte: Council an Tall Building and Urband Habitat (tradução nossa, 2024).

Considerado o maior edifício vertical em madeira do mundo desde 2022, o Ascent, apresentado na Figura 15, está localizado em Milwaukee, nos EUA. Possuindo 25 andares, totalizando cerca de 86 metros de altura, sua estrutura foi construída com os sistemas de CLT e MLC, com exceção da base de concreto (Urbem, 2024).

Figura 15: Edifício Ascent, EUA



Fonte: Daykin (2021).

O edifício Brock Commons Tallwood House, apresentado na Figura 16, possui 53 metros de altura, construído em CLT, MLC, com telhado com estrutura de aço e seções feitas de concreto, incluindo a base e o núcleo. Sendo um grande destaque no quesito sustentável e arquitetônico, o edifício abriga a moradia estudantil da Universidade de British Columbia, em Vancouver, no Canadá (Urbem, 2023).

Figura 16: Edifício Brock Commons Tallwood House, Canadá



Fonte: Urbem (2023).

A loja de chocolates Dengo, localizada em São Paulo, foi o primeiro edifício no Brasil construído com madeira engenheirada, apresentado na Figura 17, possui 1.500 m² e quatro andares em madeira. Segundo Calil Neto (2022) para a construção foram utilizados Pinus Taeda do Brasil com tratamento CCA para a fabricação das vigas de MLC e o CLT foram importadas da Áustria e fabricadas pela empresa KLH.

Figura 17: Loja Dengo, São Paulo



Fonte: Calil Neto (2022).

Para a construção do edifício do McDonald's, apresentado na Figura 18, localizado em São Paulo foram utilizados 140 m³ de *Mass Timber*, onde, para as lajes e paredes em CLT foram usados 99 m³ de madeira, e para vigas e pilares construídas em Glulam (MLC) foram usados 41m³ de madeira (Urbem, 2023).

Figura 18: McDonald's, São Paulo



Fonte: Urbem (2023).

2.2 Critérios para dimensionamento de estruturas de madeira engenheirada estabelecidos pela NBR 7190:2022

A norma ABNT NBR 7190 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2022) é utilizada para a elaboração de projetos de madeira no Brasil, de tal modo, faz-se necessária a verificação sobre o dimensionamento apresentado na norma que faz referência a madeira engenheirada. Na normativa estão apresentados os aspectos de caracterização da madeira, dentre os quais pode-se destacar a Tabela 3, relativo as classes de umidade, tendo como finalidade ajustar as propriedades de resistência e rigidez da madeira em função das condições ambientais onde permanecem as estruturas durante toda sua vida útil.

Tabela 3: Classes de umidade

Classes de umidade	Umidade relativa do ambiente U_{amb}	Umidade de equilíbrio máxima da madeira U_{eq}
1	$U_{amb} \leq 65 \%$	12 %
2	$65 \% < U_{amb} \leq 75 \%$	15 %
3	$75 \% < U_{amb} \leq 85 \%$	18 %
4	$U_{amb} > 85 \%$ durante longos períodos	$\geq 25 \%$

Fonte: ABNT NBR 7190 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2022).

2.2.1 Coeficientes de modificação

A fim de ajustar a resistência da madeira em decorrência de condições que podem afetar seu desempenho, como a umidade, a duração do carregamento e a qualidade do material, utilizam-se coeficientes de modificação, sendo eles: k_{mod1} , k_{mod2} e k_{mod3} .

Para o ajuste da umidade deve-se utilizar o k_{mod1} , que contempla a classe de carregamento e o tipo de material utilizado, conforme apresentado na Tabela 4.

Tabela 4: Definição de classes de carregamento e valores de k_{mod1}

Classes de carregamento	Ação variável principal da combinação		Tipos de madeira	
	Duração acumulada	Ordem de grandeza da duração acumulada da ação característica	Madeira serrada Madeira roliça Madeira lamelada colada (MLC) Madeira lamelada colada cruzada (MLCC) Madeira laminada colada (LVL)	Madeira recomposta
Permanente	Permanente	Mais de dez anos	0,60	0,30
Longa duração	Longa duração	Seis meses a dez anos	0,70	0,45
Média duração	Média duração	Uma semana a seis meses	0,80	0,65
Curta duração	Curta duração	Menos de uma semana	0,90	0,90
Instantânea	Instantânea	Muito curta	1,10	1,10

Fonte: ABNT NBR 7190 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2022).

O coeficiente de modificação k_{mod2} é utilizado para avaliar a classe de umidade e o tipo de material utilizado, conforme Tabela 5.

Tabela 5: Valores de k_{mod2}

Classes de umidade	Madeira serrada Madeira roliça Madeira lamelada colada (MLC) Madeira lamelada colada cruzada (MLCC) Madeira laminada colada (LVL)	Madeira recomposta
(1)	1,00	1,00
(2)	0,90	0,95
(3)	0,80	0,93
(4)	0,70 ^a	0,90

^a Não é permitido o uso do MLCC para classe de umidade (4).

Fonte: ABNT NBR 7190 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2022).

Por fim, o coeficiente k_{mod3} , é incorporado na normativa brasileira para ser utilizado em madeiras engenheiradas, em que, para a utilização do MLC, deve-se utilizar os fatores de modificação conforme a equação I.

$$k_{mod3} = C_e \cdot C_C \cdot C_t \quad (I)$$

Onde:

C_e é o coeficiente da emenda de múltiplo entalhe;

C_C é o coeficiente de modificação devido à curvatura;

C_t é o coeficiente de modificação de temperatura.

2.2.2 Esbeltez

Os requisitos para os dimensionamentos de pilares dependem da esbeltez da peça, que é definida a partir da equação II.

$$\lambda = \frac{L_0}{\sqrt{I/A}} \quad (\text{II})$$

Onde:












- L_0 é o comprimento de flambagem;
- I é o momento de inércia na direção analisada;
- A é a área da seção transversal.

O comprimento de flambagem L_0 depende das condições de vinculação (ou condições de contorno) das extremidades das barras, calculado pela equação III.

$$L_0 = K_E \cdot L \quad (\text{III})$$

Os valores de K_E são obtidos na Tabela 6.

Tabela 6: Valores do coeficiente K_E

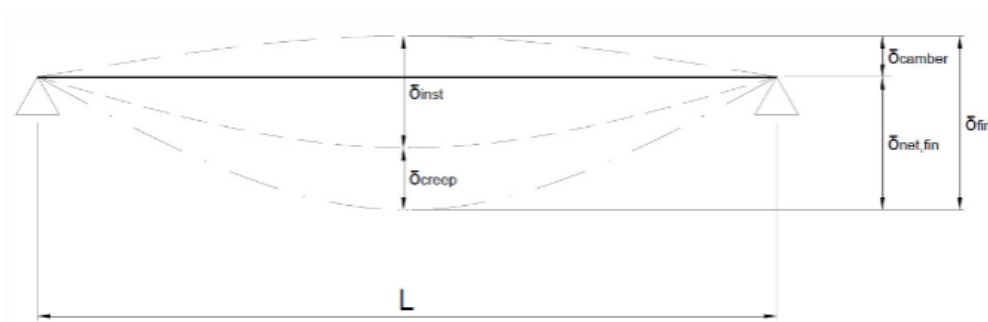
Modos de flambagem						
Valores de projeto para K_E	0,65	0,80	1,20	1,00	2,10	2,40
Código das condições de extremidade		Rotação e translação lateral impedidas, translação vertical livre				
		Rotação e translação vertical livres, translação lateral impedida				
		Rotação livre e translações impedidas				
		Rotação impedida e translações livres				
		Rotação e translações livres				

Fonte: ABNT NBR 7190 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2022).

2.2.3 Valores dos limites de deslocamentos

Para o cálculo decorrente de elementos fletidos de madeira, sendo eles, lajes e vigas, com exceção de restrições especiais, os limites de deslocamentos devem ser considerados conforme a Tabela 7 e Figura 19.

Figura 19: Verificação esquemática dos deslocamentos-limite



Fonte: ABNT NBR 7190 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2022).

Tabela 7: Verificação esquemática dos deslocamentos de limite

Tipo de viga	δ_{inst}	δ_{fin}	$\delta_{net,fin}$
Vigas biapoiadas ou contínuas	L/300 a L/500	L/150 a L/300	L/250 a L/350
Vigas em balanço	L/150 a L/250	L/75 a L/150	L/125 a L/175

Fonte: ABNT NBR 7190 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2022).

2.3 Modelagem da informação da construção (BIM) em projetos de estruturas de madeira

A tecnologia BIM possui aplicabilidades em todo o ciclo de vida de um projeto, Eastman *et al.* (2014) definiram o método como uma análise e simulação inteligente da arquitetura, que traz benefícios em todas as etapas do projeto desde a pré-construção até a pós-construção.

O BIM trouxe a possibilidade de integrar informações de diversas disciplinas, viabilizando representações digitais detalhadas, utilizando a colaboração em tempo real por meio de uma plataforma na nuvem. Essa abordagem aumenta a visibilidade, melhora a qualidade das decisões e promove soluções mais sustentáveis otimizando os custos em projetos de arquitetura, engenharia e construção (Autodesk, 2024). Além disso, o uso de visualizações 3D parametrizadas e desenhos detalhados potencializa tarefas como pré-fabricação, definição de restrições dimensionais, transporte e montagem (Lobos Calquin *et al.*, 2024).

Para a utilização da metodologia BIM, é preciso estabelecer os padrões de informação contidos em cada elemento do projeto, para tal, utiliza-se o *LOIN* (Nível de Informação Necessária). Afim de estabelecer esses padrões, podem ser utilizados os Níveis de Detalhe (ND) e os Níveis de Informação (NI) para determinar a granularidade dos elementos representados através de representações gráficas e não gráficas no modelo BIM (SEINFRA; DER-MG, 2024).

Para os Níveis de Detalhe (ND) são utilizados quatro níveis: ND1, ND2, ND3 e ND4, que seguem de detalhes bidimensionais, para geometrias sem dimensões específicas, a geometrias definidas com detalhes e dimensões específicas, além de geometrias com dimensões e detalhamentos bem definidos que podem possuir relação com outros elementos da mesma disciplina ou de disciplinas diferentes, respectivamente. Já os Níveis de Informação (NI) seguem uma escala: NI1 (Baixo),

NI2 (Médio), NI3 (Alto) e NI4 (Muito Alto) (SEINFRA; DER-MG, 2024).

Na Figura 20 tem-se um exemplo referente as especificações de vigas, com exemplos dos Níveis de Detalhe (ND) e os Níveis de Informação (NI).

Figura 20: Especificações ND e NI de uma viga estrutural

09.00 VIGA								
09.01 VIGA ESTRUTURAL								
Nível de Detalhe	ND 1	ND 2	ND 3	ND 4				
	Exemplo: Viga Estrutural	Exemplo: Viga Estrutural	Exemplo: Viga Estrutural	Exemplo: Viga Estrutural	Exemplo: Viga Estrutural			
Não se aplica.	Representação da geometria genérica com dimensões não definidas.	Geometria definida com dimensões específicas, como largura, comprimento e altura.	Geometria definida com dimensões específicas, como largura, comprimento e altura. Detalhamento de elementos que possuem ligação com elementos da mesma disciplina ou de disciplinas distintas.					
EDIFICAÇÕES	Informação	Formato	Pset_GOV/MG	NI 1	NI 2	NI 3	NI 4	
	SISTEMA DE CLASSIFICAÇÃO							
	Código de Classificação EOI	Texto	00_01_MG_EOI					
	Nome da Classificação EOI	Texto	00_02_MG_EOI_Descricao				Não se aplica	
	LOCALIZAÇÃO							
	Disciplina	Texto	02_01_MG_Disciplina					
	Pavimento - Nível	Texto	02_03_MG_Pavimento_nivel				Não se aplica	
	Sector	Texto	02_04_MG_Sector					
	ESPECIFICAÇÃO							
	Fase do Objeto	Texto	03_01_MG_Fase					
	Descrição	Texto	03_02_MG_Descricao					
	Resistência do concreto (Mpa)	Texto	03_05_MG_Resistencia_mpa				Não se aplica	
	Consumo aço (kg/m³)	Valor	03_19_MG_Consumo_aço_kg/m3					
	QUANTIDADES							
	Largura (m)	Valor	04_01_MG_Largura_m					
Comprimento (m)	Valor	04_02_MG_Comprimento_m						
Altura (m)	Valor	04_03_MG_Altura_m						
Volume (m³)	Valor	04_05_MG_Volume_m3				Não se aplica		
Aço (kg)	Valor	04_09_MG_Aço_kg						
Observação	Descrição: Objeto_Material_Dimensões(larguraxaltura) Exemplo: Viga_concreto_0,25x0,60 m							

Fonte: SEINFRA e DER-MG (2024).

No contexto da construção em madeira, especialmente na produção de componentes como MLC (Madeira Laminada Colada) e CLT (*Cross-Laminated Timber*), o BIM contribui significativamente para a eficiência do projeto, auxiliando nas tomadas de decisão. Como resultado, há um aumento na produtividade e uma melhoria substancial na qualidade do produto final. Além disso, a integração da metodologia com projetos paramétricos avançados permite a criação de modelos altamente detalhados e a automação dos processos de fabricação (Lobos Calquin *et al.*, 2024).

De mesmo modo, o BIM contribui na simplificação da fabricação *off-site* (fora do canteiro de obras), e facilita a montagem das peças durante a execução. Os modelos com nível de detalhamento adequado para fabricação podem ser utilizados para especificar todos os elementos de madeira e automatizar a geração de códigos CNC. A tecnologia CNC (*Computer Numerical Control*), é amplamente utilizada na fabricação digital, permitindo cortar, moldar e montar componentes de madeira com

alta precisão e eficiência. Essa precisão é vital na construção de MLC e CLT, onde a precisão das peças é essencial para a integridade estrutural e a eficiência da montagem (Staub-Frensch, *et al*, 2018).

Apesar das inúmeras vantagens e benefícios da tecnologia BIM, existem desafios substanciais a serem superados. A configuração de parâmetros detalhados nesses *softwares* pode ser um processo demorado, que exige um alto nível de familiaridade com as ferramentas, tornando o treinamento adequado e os custos das licenças obstáculos significativos a serem superados (Lobos Calquin *et al.* 2024). Além disso, a interoperabilidade entre diferentes ferramentas BIM é vital para assegurar a precisão e a eficiência dos projetos. Formatos de troca de dados como IFC (*Industry Foundation Classes*) e STEP (*Standard for the Exchanger of Product Model data*) facilitam a interoperabilidade, embora persistam alguns desafios nesse campo (Staub-Frensch, *et al.* 2018).

2.4 Ferramentas computacionais para desenvolvimento de projetos em madeira engenheirada

O desenvolvimento de projetos com uso estrutural de MLC e CLT podem ser otimizados com o uso de *softwares* especializados, que auxiliam no projeto, análise e fabricação. Dentre as principais ferramentas disponíveis, destacam-se:

- Autodesk Revit - possui uma extensão chamada hsbTimber que facilita a estruturação de quadros de madeira, geração de desenhos de oficina e comunicação entre Revit e máquinas CNC (Autodesk, 2024).
- ArchiCAD - possui a extensão ArchiFrame, que interage com máquinas CNC e oferece suporte para componentes de madeira, como paredes, colunas e vigas. Essa função permite o detalhamento e o design dos componentes (Graphisoft, 2024).
- Tekla Structures - é um *software* de modelagem que permite o detalhamento e a fabricação de componentes estruturais, incluindo madeira. Possui suporte para vários formatos de arquivo e facilita a coordenação do projeto desde o projeto até a fabricação (Teckla, 2024).
- CADWORK - é amplamente utilizado para projetos de estruturas de MLC e CLT. Possibilita integrar o modelo arquitetônico do REVIT. Dentre suas

funcionalidades estão: modelagem 3D, detalhamento, interoperabilidade com CNC, análise estrutural e simulação de montagem (Cadwork,2024).

- Dietrich's PlanCad - é um *software* de design que oferece recursos específicos para construção em madeira. Suporta importação e exportação de arquivos IFC e tem módulos específicos para diferentes estruturas de madeira, como o CLT, telhado, paredes e outros (Dietrich's, 2024)
- CATIA - é um *software* utilizado para criação do modelo virtual de construção. Originalmente era um *software* da indústria aeroespacial, mas foi adaptado para a construção civil, incluindo a modelagem de estruturas de madeira engenheirada (Dassault Systèmes, 2024).
- Grasshopper - é um *software* de modelagem paramétrica e CAD/CAM amplamente utilizado em projetos de fabricação, incluindo projetos de madeira. Ele também pode ser utilizado para otimização de custo e estrutura de híbridos de Glulam e aço, permitindo a criação de geometrias complexas e *scripts* para fabricação (Grasshopper, 2024).
- REFM - é utilizado para análise estruturais, especialmente para elementos laminados como o CLT. Inclui módulos adicionais para a análise de elementos finitos (Real Estate Financial Modeling, 2024).

Com o aumento do uso de estruturas de madeira na construção civil, os elementos e conexões estruturais estão se tornando mais complexos. Devido a essa complexidade, os *softwares* convencionais, como por exemplo, o AutoCAD, são frequentemente inadequados para prever com precisão o comportamento mecânico dos materiais à base de madeira. Muitos estudos foram conduzidos sobre produtos tradicionais à base de madeira, como madeira serrada. No entanto, há poucas informações sobre produtos de madeira mais novos, como CLT, NLT e DLT. Por isso, pesquisadores têm desenvolvido modelagens numéricas específicas para esses elementos, incluindo métodos analíticos e de elementos finitos (Chen, *et al.* 2023).

Para simulações mais precisas das estruturas de madeira, o uso de *softwares* de Elementos Finitos (FE) com modelos constitutivos abrangentes para materiais à base de madeira é essencial para fornecer resultados mais confiáveis para apoiar os projetos. Com o modelo adequado, é possível investigar e avaliar resistência, estabilidade e deflexão dos componentes de madeira (Chen, *et al.* 2023).

Como a madeira é um material com características únicas, suas condições de anisotropia e ortotropia, assim como fatores de cada espécie e do ambiente onde será inserida, devem ser levados em consideração na elaboração dessas ferramentas computacionais (Chen, *et al.* 2023).

No Brasil, alguns estudos e softwares já foram desenvolvidos para madeira serrada e para pilares de MLC. Recentemente, em 2022, para uma aplicação mais ágil e simplificada visando o dimensionamento e a análise de estruturas de madeira engenheirada simples, a empresa Urbem, em parceria com a empresa TQS, desenvolveu três calculadoras específicas: *CalculaTimber_CLT* para lajes, *CalculaTimber_MLC* para vigas e *CalculaTimber_Column* para pilares. Essas ferramentas foram elaboradas de acordo com as recomendações da norma brasileira ABNT NBR 7190 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2022). E, no caso das verificações de lajes e pilares, as calculadoras também seguem as diretrizes do documento técnico europeu *ProHolz Austria: Cross-laminated timber structural design – Basic design and engineering principles according to Eurocode*.

3 MÉTODO DE PESQUISA

Conforme Gil (2002), Lüdke e André (1986), a presente pesquisa classifica-se como pesquisa qualitativa, caracterizada como um estudo de caso exploratório. Este tipo de pesquisa tem como principal objetivo aprofundar significativamente o conhecimento na área de estudo, permitindo uma análise detalhada e possibilitando uma compreensão mais ampla do assunto.

Após a escolha do tema sobre madeira engenheirada, inicialmente, foi realizada uma pesquisa bibliográfica sobre as palavras-chaves, como: CLT, MLC e *softwares* para madeira engenheirada. Na sequência, para alcançar os objetivos propostos desta pesquisa, foi selecionada uma edificação de uso institucional como estudo de caso para simular a aplicação e o dimensionamento de estrutura de madeira engenheirada, com auxílio de *software* disponibilizado no mercado.

A edificação selecionada para o estudo de caso foi a Ala C (Bloco Central) do Instituto Federal de Santa Catarina, campus Florianópolis (Figura 21). A edificação, construída em alvenaria e concreto armado, conta com um refeitório no pavimento térreo e salas de aula no primeiro, segundo e terceiro pavimentos.

Figura 21: Mapa tridimensional – IFSC

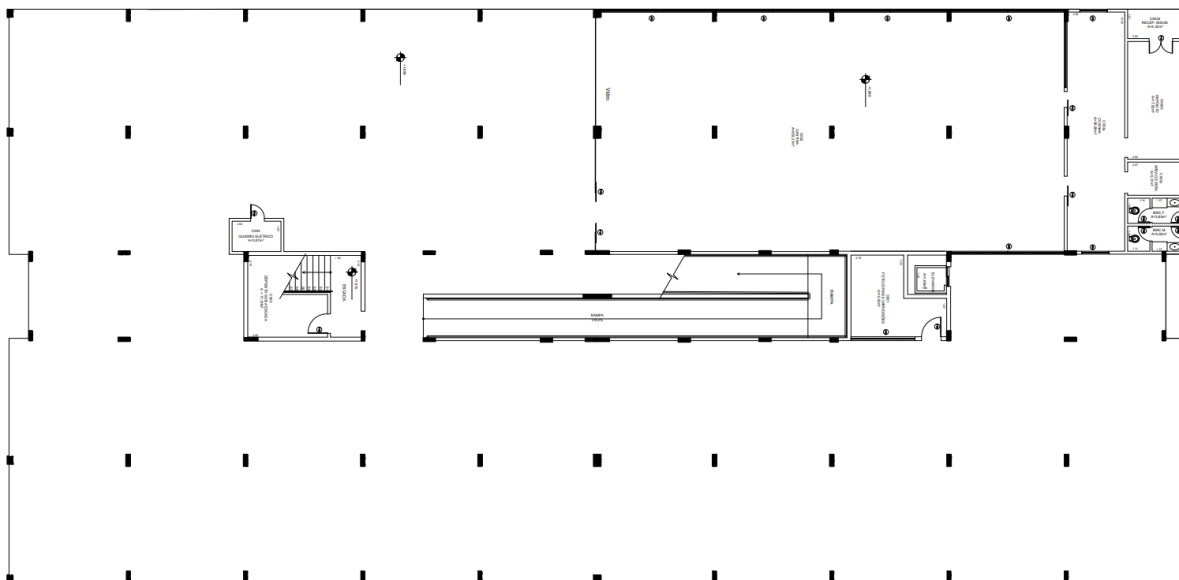


Fonte: Ferreira, *et al.* (2020).

Os projetos arquitetônico e estrutural foram solicitados previamente para a

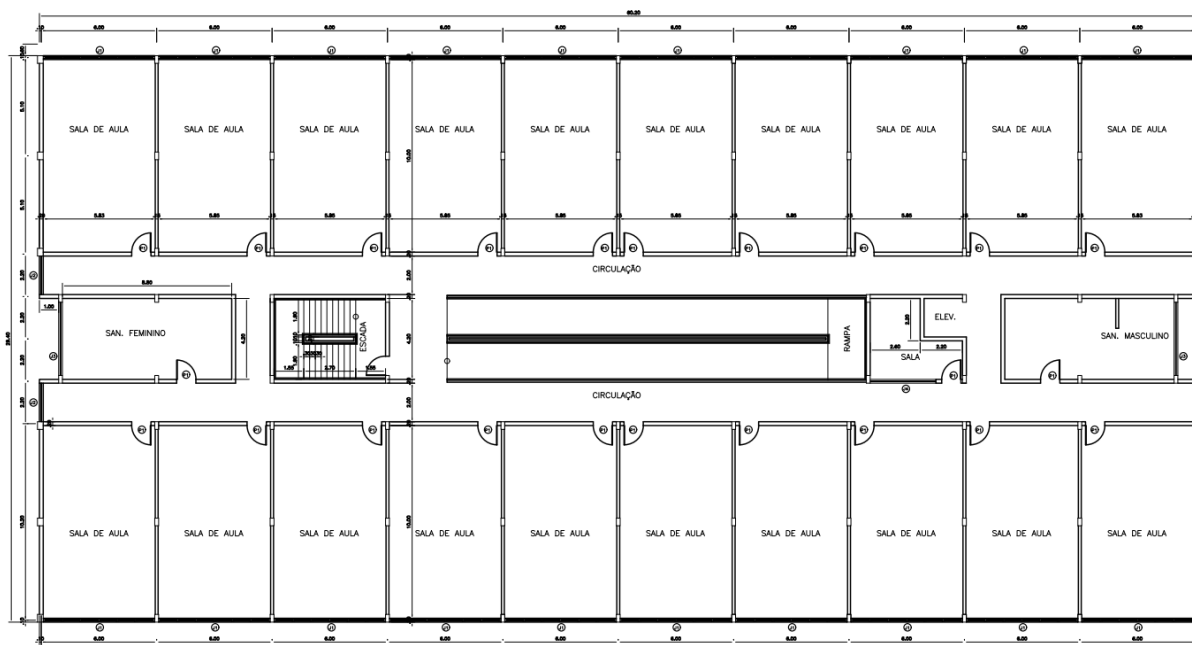
coordenação de engenharia (COENGE) do campus Florianópolis, e disponibilizados em formato *dwg*. Nas Figuras 22, 23 e 24, estão apresentadas: a planta baixa do pavimento térreo, planta baixa do pavimento tipo e um corte da edificação.

Figura 22: Planta Baixa pavimento térreo - Ala C



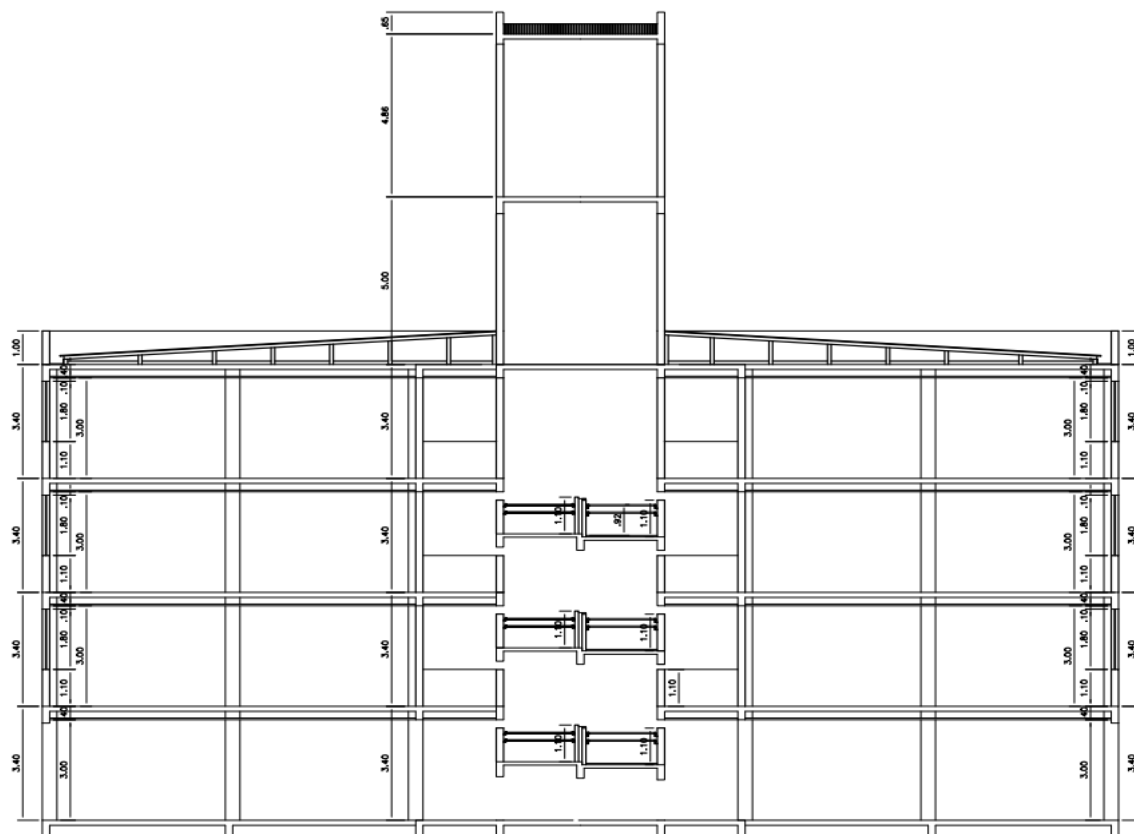
Fonte: Disponibilizado pela Coenge (2009).

Figura 23: Planta Baixa pavimento tipo - Ala C



Fonte: Disponibilizado pela Coenge (2009).

Figura 24: Corte Transversal - Ala C



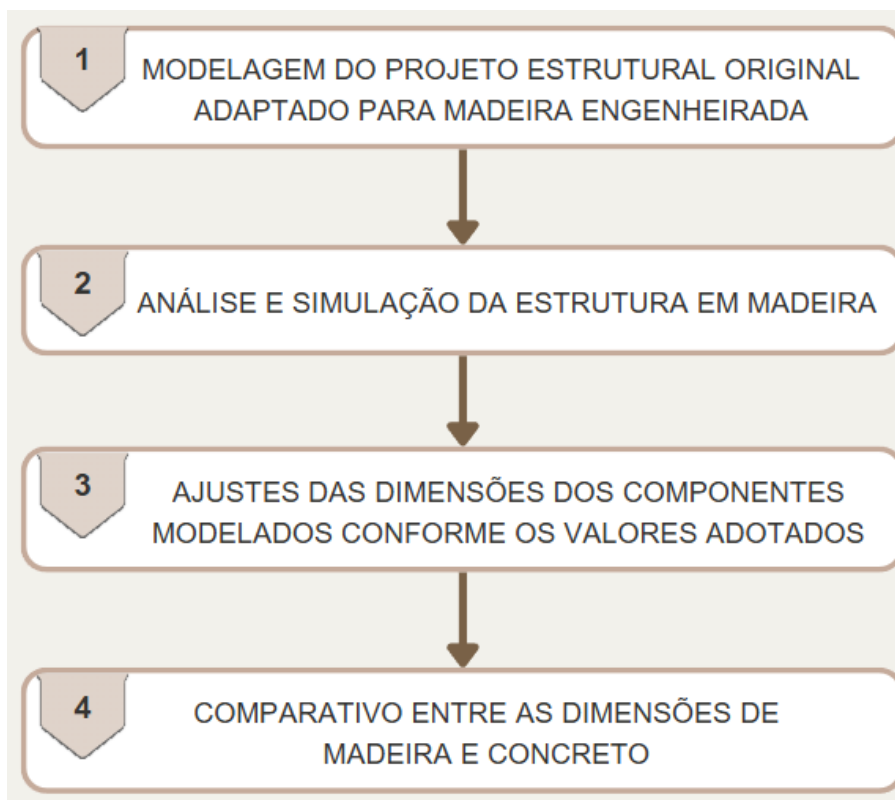
Fonte: Disponibilizado pela Coenge (2009).

O projeto original foi concebido em concreto armado, e, embora os dados da massa específica do concreto utilizado não estejam especificados, adotou-se o valor de 2500 kg/m^3 para os cálculos, conforme a ABNT NBR 6118 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2023). As cargas e ações consideradas no dimensionamento das estruturas seguiram as diretrizes da ABNT NBR 6120, ainda que o ano da norma não esteja especificado no projeto.

As informações disponíveis se restringem ao valor da resistência característica do concreto (f_{ck}) dos pilares, vigas e lajes. Especificamente, as vigas e lajes foram projetadas com concreto de $f_{ck} 25 \text{ MPa}$, enquanto os pilares foram especificados com concreto de $f_{ck} 40 \text{ MPa}$.

Com base nos projetos arquitetônico e estrutural obtidos, foram realizadas as seguintes atividades: (1) modelagem do projeto estrutural original adaptado para madeira engenheirada; (2) análise e simulação da estrutura em madeira; (3) ajustes das dimensões dos componentes modelados conforme os valores adotados; (4) comparativo entre as dimensões de madeira e concreto. (Figura 25).

Figura 25: Fluxograma das atividades desenvolvidas nesta pesquisa



Fonte: Autores (2025).

3.1 Modelagem do projeto estrutural original em BIM

Inicialmente, foi feita uma verificação e comparação entre os projetos arquitetônico e estrutural recebidos. Durante essa avaliação foi constatada uma diferença entre os valores dos níveis dos pavimentos existentes no projeto estrutural e no projeto arquitetônico. Assim, para este trabalho, os níveis utilizados na modelagem correspondem aos valores do projeto estrutural original.

Além disso, o projeto arquitetônico original não apresenta uma sala próxima ao refeitório para fins acadêmicos atualmente existente no pavimento térreo do edifício. Assim, essa alteração posterior ao projeto não foi considerada na modelagem deste trabalho.

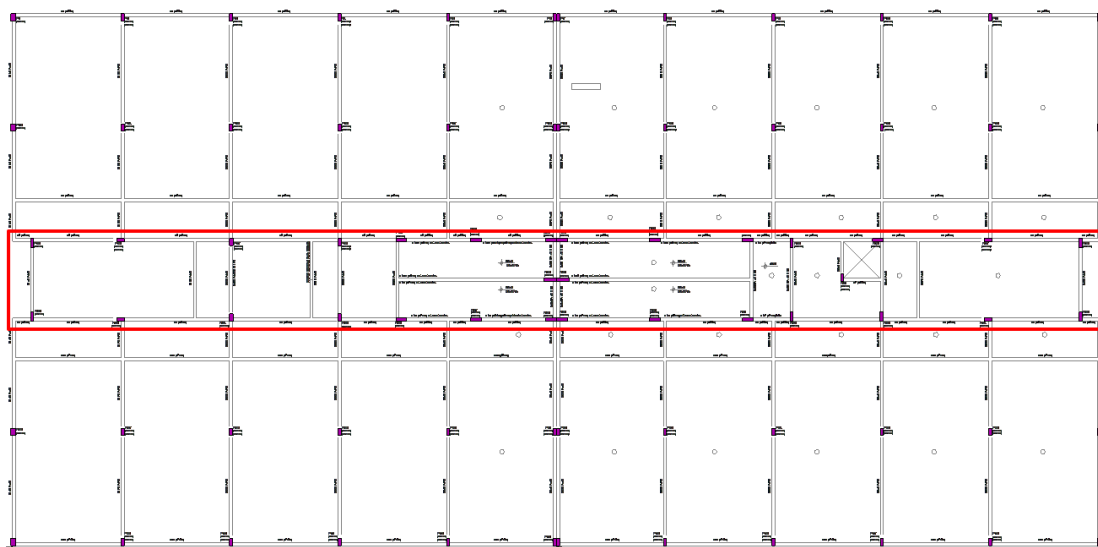
Em relação ao projeto estrutural, as fundações e o tipo de fundação utilizado na construção do edifício, não estão inseridos no projeto fornecido; e por conta disso, não foram incorporadas no projeto realizado em madeira engenheirada.

Na modelagem, as dimensões e as localizações de pilares, vigas e lajes de concreto armado contidas no projeto original foram mantidas no primeiro lançamento

da estrutura. Os materiais de pilares, vigas e lajes foram adaptados para madeira engenheirada.

Entretanto, foi estabelecido que o núcleo da edificação, em destaque na Figura 26, seria mantido em concreto conforme projeto existente, em decorrência da falta de detalhamento dos elementos existentes no núcleo da edificação, como a escada e a rampa, no projeto estrutural original.

Figura 26: Indicação do núcleo da edificação



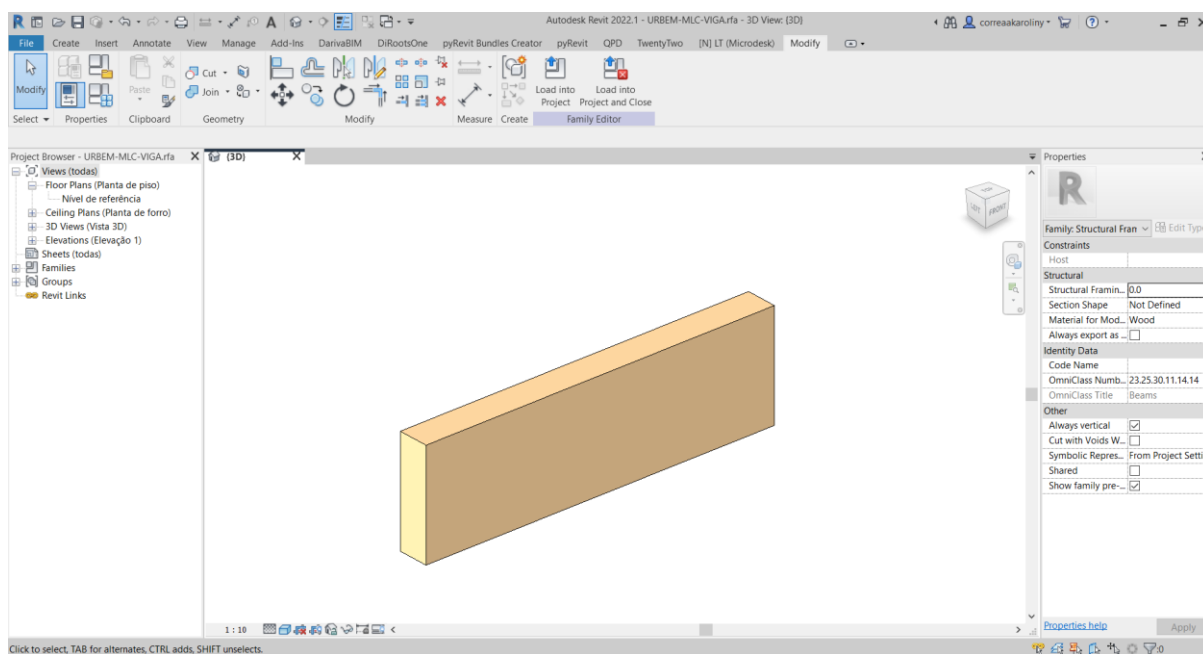
Fonte: Autores (2025).

Para a modelagem do objeto de estudo, fez-se o uso do *software* Autodesk Revit. Essa escolha se deve ao domínio dos autores sobre o *software*, à disponibilidade de licenças estudantis, e, principalmente, à possibilidade de aplicar a metodologia BIM, além da sua popularidade no mercado de trabalho.

Para a modelagem da estrutura em madeira engenheirada foram utilizados o *template* e a biblioteca da empresa Urbem. A seleção desses instrumentos ocorreu devido a disponibilidade de dados fornecidos gratuitamente no site da empresa. Durante o período da pesquisa, no segundo semestre de 2024, não foram encontradas outras bibliotecas de empresas brasileiras com elementos de madeira engenheirada, como CLT e MLC.

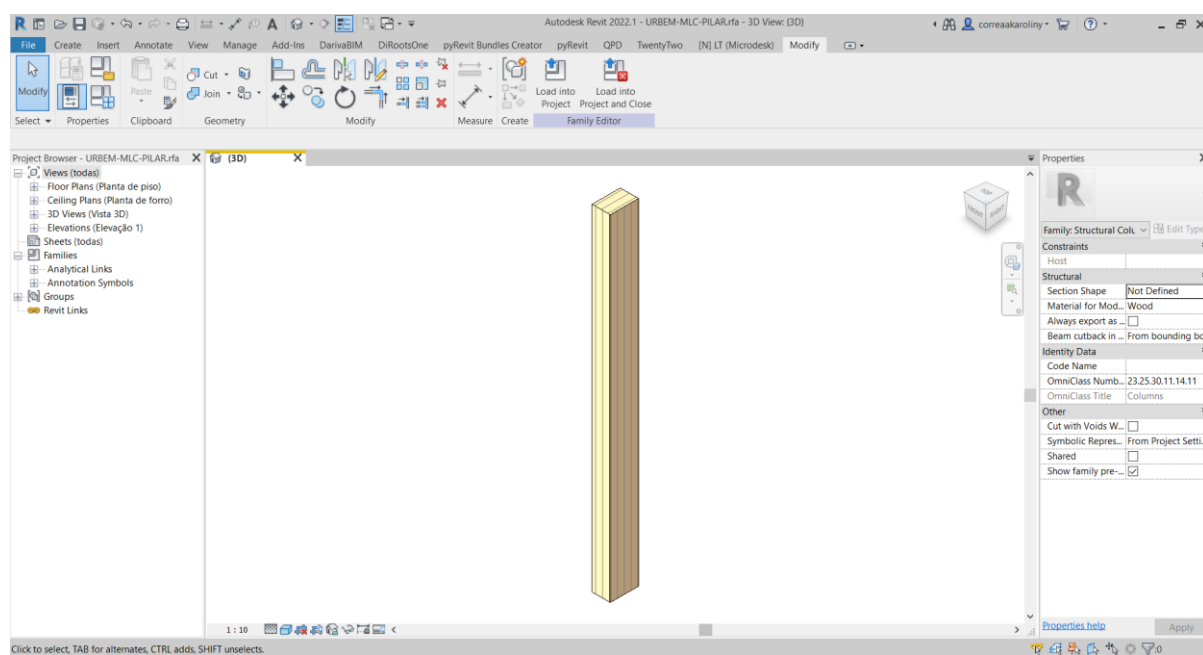
Por sua vez, a biblioteca da empresa Urbem acessada em 2024 conta com elementos de vigas e pilares em MLC, conforme Figuras 27 e 28.

Figura 27: Elemento VIGA - MLC



Fonte: Biblioteca BIM Urbem (2024).

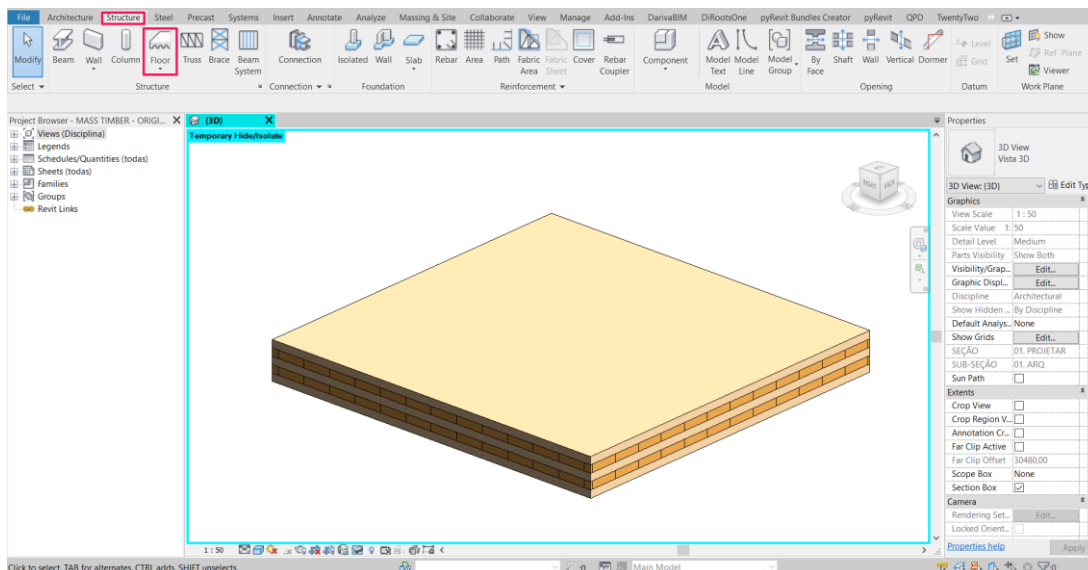
Figura 28: Elemento PILAR - MLC



Fonte: Biblioteca BIM Urbem (2024).

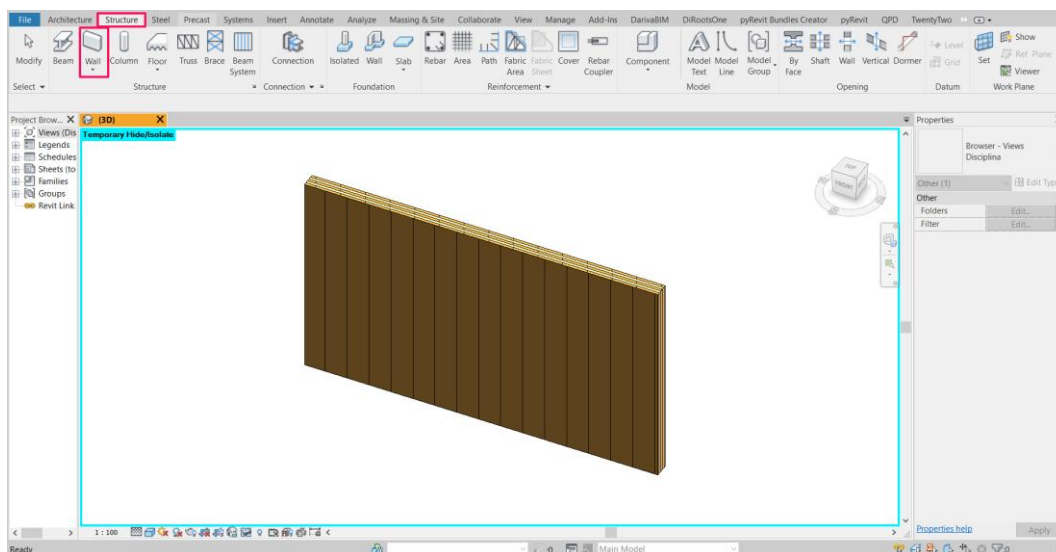
Por fim, os elementos em CLT, sendo eles os painéis utilizados para lajes/pisos e paredes, encontram-se no *template* BIM disponibilizados pela empresa, conforme ilustrados nas Figuras 29 e 30.

Figura 29: Elemento BIM – lajes CLT



Fonte: Template BIM Urbem (2024).

Figura 30: Elemento BIM – paredes CLT



Fonte: Template BIM Urbem (2024).

3.2 Análise estrutural da madeira engenheirada

Após a modelagem adaptando a estrutura original de concreto para madeira engenheirada, iniciou-se a etapa de análise estrutural.

3.2.1 Definições de ações e carregamentos

Inicialmente, as ações e os carregamentos foram definidos conforme a norma

ABNT NBR 6120 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2020). Ressalta-se que nesta análise não foram consideradas as ações do vento, ficando como sugestão para trabalhos futuros.

3.2.2 Ajustes das dimensões originais para as dimensões das Calculadoras Urbem

Em suas calculadoras, a empresa Urbem disponibiliza catálogos de painéis em CLT variando número de camadas e alturas conforme descritos na Tabela 8, e vigas e pilares em MLC conforme as dimensões na Tabela 9.

Tabela 8: Painéis em CLT contidos na Calculadora da empresa Urbem - CalculaTimber_CLT

CÓDIGO DO PAINEL	Nº DE CAMADAS	h0 [cm]
URBEM-CLT-TL-100X3L	3	10
URBEM-CLT-TL-110X3L	3	11
URBEM-CLT-TL-120X3L	3	12
URBEM-CLT-TL-140X5L	5	14
URBEM-CLT-TL-160X5L	5	16
URBEM-CLT-TL-180X5L	5	18
URBEM-CLT-TL-200X5L	5	20
URBEM-CLT-TL-240X7E	7	24
URBEM-CLT-TL-260X7E	7	26
URBEM-CLT-TL-280X7E	7	28

Fonte: Adaptado de Urbem (2025).

Tabela 9: Vigas e pilares em MLC contidos na Calculadora da empresa Urbem - CalculaTimber_MLC e CalculaTimber_Column

BASE [cm]			
15	20	25	30
ALTURA [cm]			
12	48	84	120
16	52	88	124
20	56	92	128
24	60	96	132
28	64	100	136
32	68	104	140
36	72	108	144
40	76	112	148
44	80	116	150

Fonte: Adaptado de Urbem (2025).

Para ajustar as dimensões originais de laje, pilar e viga para as dimensões mais próximas disponíveis para madeira engenheirada disponíveis nas calculadoras da empresa Urbem, foi aplicada uma função no *software* Microsoft Excel. A fórmula inserida permitiu a seleção automatizada da dimensão mais adequada entre o intervalo estimado, garantindo maior precisão na correspondência da medida especificada. A função ABS foi utilizada para calcular a diferença absoluta entre os valores da biblioteca e a dimensão desejada. Em seguida, a função “MÍNIMO” identificou a menor dessas diferenças, enquanto a função “CORRESP” localizou a posição exata desse valor dentro do intervalo. Por fim, a função “ÍNDICE” retornou o valor correspondente, assegurando que a medida representasse a opção mais próxima possível da especificação original do projeto.

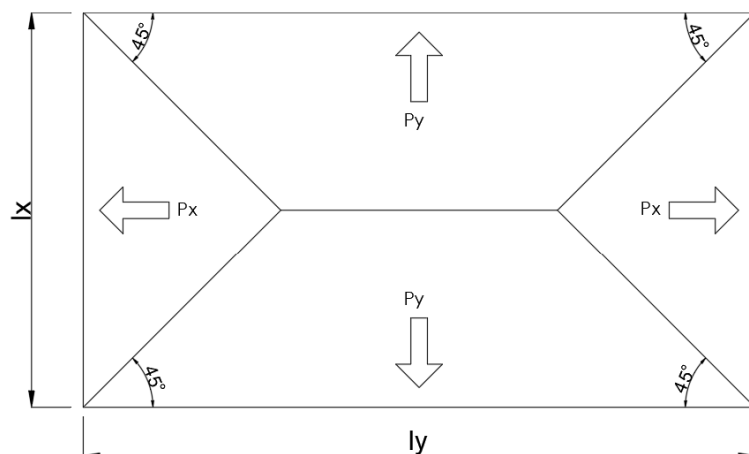
Sabendo que o concreto possui um peso específico quase seis vezes maior que o da madeira adotada, foram realizados ajustes nas dimensões dos elementos estruturais em madeira, por exemplo, as lajes com 22 cm no projeto original passaram a ser de 20 cm, e as vigas e pilares com a menor dimensão de 17cm, passaram a ter 15 cm. No entanto, sempre que possível foram preservadas as dimensões originais do projeto, a fim de garantir as diretrizes existentes.

3.2.3 Verificação das dimensões adotadas e aplicação nas calculadoras

A partir desses valores ajustados para as calculadoras da empresa Urbem mais próximos dos valores originais de concreto, iniciou-se a etapa de verificação estrutural de lajes, pilares e vigas.

As cargas foram determinadas utilizando o método simplificado das áreas de influência conforme a Figura 31. Nas direções l_x e l_y as cargas são distribuídas para as vigas, sendo denominadas em P_x e P_y , respectivamente. As cargas P_x e P_y foram obtidas a partir do produto entre as áreas de influência (m^2) e a carga característica da laje (kN/m^2) de acordo com cada pavimento, sendo posteriormente divididas pelo comprimento da viga (m), seguindo os carregamentos estabelecidos na ABNT NBR 6120 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2020).

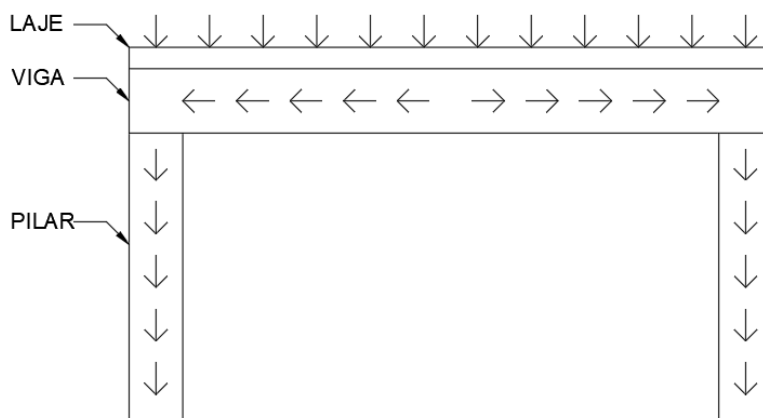
Figura 31: Áreas de influência de cargas



Fonte: Autores (2025).

A Figura 32 apresenta uma demonstração por meio de setas de como cada elemento é carregado, iniciando pela laje que distribui as cargas para a viga e as transmite para os pilares. Essa consideração foi utilizada para o cálculo dos esforços solicitantes em cada elemento.

Figura 32: Distribuição das cargas por elemento estrutural



Fonte: Autores (2025).

Após a caracterização das cargas, iniciou-se a verificação das dimensões adotadas em função dessas cargas, com a utilização de três calculadoras desenvolvidas pela Urbem em parceria com a TQS, disponibilizadas gratuitamente no site das empresas, e já mencionadas anteriormente neste trabalho.

Na Figura 33, está apresentada a tela inicial da CalculaTimber_CLT, onde estão enumerados elementos considerados dados de entrada, em que:

1. Indica o vão de apoio da laje em CLT [cm];

2. A classe de resistência do material, selecionada conforme a norma ABNT NBR 7190 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2022) apresentada na Tabela 10;
3. A altura da laje foi selecionada com base nos tamanhos comerciais disponíveis no catálogo da Urbem, conforme Tabela 8;
4. Foi selecionada a condição de contorno bi apoiada para a realização de todas as verificações;
5. Os carregamentos da laje foram inseridos separadamente, com exceção do peso próprio, que foi calculado automaticamente em função da classe de resistência e altura de laje definida. As cargas permanentes e acidentais foram inseridas manualmente, todas expressas em tf/m^2 ;
6. Foi realizada a configuração dos coeficientes e ponderadores de cálculo.

Figura 33: Tela inicial da CalculaTimber_CLT

The screenshot displays the 'CALCULADORA DE LAJES DE MADEIRA ENGENHEIRADA (CLT) 1.0' interface. It is divided into several sections:

- DADOS DE ENTRADA:** Includes a 'Nome' field with 'L1' and a 'Vão (cm)' field with '720' (marked with a red box and '1').
- MATERIAIS E PROPRIEDADES:** Shows 'Classe de Resistência' set to 'C30' (marked with a red box and '2').
- SEÇÃO TRANSVERSAL:** Features a 'Biblioteca' dropdown (marked with a red box and '3') and a table of layers:

Camada	Espessura (mm)	E0,m (MPa)	G90 (MPa)
L1	40	12000	0
T1	30	0	50
L2	40	12000	0
TOTAL	110		
- CONDIÇÕES DE CONTORNO:** Shows 'Bi-Apoiado' selected (marked with a red box and '4').
- CARGAS:** Includes a diagram of a beam with a point load 'P' and a uniformly distributed load 'q'. A table below (marked with a red box and '5') lists loads:

Caso	Valor (tf/m^2)	Duração
PP	0,0506	PERMANENTE
Perm	0,15	PERMANENTE
Acid	0,3	LONGA
- RESULTADOS:**
 - ELU:** TENSÕES NORMAIS: $\sigma_{Sd(\text{Max})} = 23,74 \text{ MPa}$; $\sigma_{Sd(\text{Max})}/\sigma_{Rd} = 197,82 \%$.
 - TENSÕES DE CISALHAMENTO:** $\tau_{Sd(\text{Max})} = 0,34 \text{ MPa}$; $\tau_{Sd(\text{Max})}/\tau_{Rd} = 154,57 \%$.
 - ELS:** FLECHA INSTANTÂNEA: $d_{\text{Max}(t0)} = 14,05 \text{ cm}$; $L/d_{\text{Max}(t0)} > 500 = 51,26$.
 - FLECHA FINAL:** $d_{\text{Max}(t\infty)} = 21,24 \text{ cm}$.
- INCÊNDIO:** TRRF is set to 60 min.

Fonte: Adaptado de CalculaTimber_CLT (2025).

Tabela 10: Classes de resistências definidas em ensaios de peças estruturais.

		Coníferas											
Símbolo		C14	C16	C18	C20	C22	C24	C27	C30	C35	C40	C45	C50
Propriedades de resistência MPa													
Flexão	$f_{b,k}$	14	16	18	20	22	24	27	30	35	40	45	50
Tração paralela	$f_{t,0,k}$	8	10	11	12	13	14	16	18	21	24	27	30
Tração perpendicular	$f_{t,90,k}$	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Compressão paralela	$f_{c,0,k}$	16	17	18	19	20	21	22	23	25	26	27	29
Compressão perpendicular	$f_{c,90,k}$	2,0	2,2	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3,1	3,2
Cisalhamento	$f_{v,k}$	3,0	3,2	3,4	3,6	3,8	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0

Fonte: ABNT NBR 7190 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2022).

Na Figura 34 está apresentada a tela de configurações, onde foram definidos:

7. Os coeficientes de cálculo para a combinação de ações para edificações comerciais e escritórios;
8. A seleção da classe de umidade 3 para o coeficiente de modificação k_{mod2} , considerando a localização da edificação no município de Florianópolis.
9. Os limites de deslocamento instantâneo e final adotados foram, respectivamente, $L/300$ e $L/150$. A opção foi selecionada na seção de combinações.

Figura 34: Tela de configuração dos coeficientes e ponderadores de cálculo da CalculaTimber_CLT

PODERADORES

COEFICIENTES DE MINORAÇÃO DE RESISTÊNCIA

$\gamma_{wb} =$ $\gamma_{wv} =$

COEFICIENTES DE MODIFICAÇÃO KMOD1

Classe de Carregamento k_{mod1}

Permanente

Longa Duração

Média Duração

Curta Duração

Instantânea

COEFICIENTES DE MODIFICAÇÃO KMOD2 E DE FLUÊNCIA Φ

Classe de Umidade U_{amb} U_{eq} k_{mod2} Φ Seleção

1 $U_{amb} < 65\%$ 12%

2 $65\% < U_{amb} < 75\%$ 15%

3 $75\% < U_{amb} < 85\%$ 18%

LIMITES DE DESLOCAMENTO

$\delta_{inst} = L /$

$\delta_{final} = L /$

COMBINAÇÕES

Valores dos Fatores de Combinação e de Redução

Ações ψ_0 ψ_1 ψ_2 ACIDENTAL

Edificações Residenciais

Edificações Comerciais, Escritórios

Biblioteca, Arquivos, Garagens

Vento

Casos	Peso Próprio	Permanente	Acidental
Peso Próprio	1	0	0
Permanente	0	1	0
Acidental	0	0	1
ELS Inicial	1	1	1
ELS Final	1.8	1.8	1.32
ELU	1.3	1.4	1.5
Incêndio	1.3	1.4	1.5

INCÊNDIO

Considerar Delaminação

$\beta_1 =$

$\beta_2 =$

$k_{fi} =$

$n_{fi} =$

OK

Fonte: Adaptado de CalculaTimber_CLT e CalculaTimber_MLC (2025).

Na Figura 35, está apresentada a CalculaTimber_MLC, utilizada na análise das vigas, a qual demonstra similaridade com a tela inicial da CalculaTimber_CLT. A diferença entre as duas calculadoras está na região destacada em vermelho, na seção transversal, enquanto na laje tem-se apenas a altura a ser definida, neste caso, existem a base e a altura do elemento como variáveis, as cargas foram inseridas em tf/m , ou seja, carga distribuída.

Figura 35: Tela inicial da CalculaTimber_MLC

Fonte: Adaptado de CalculaTimber_MLC (2025).

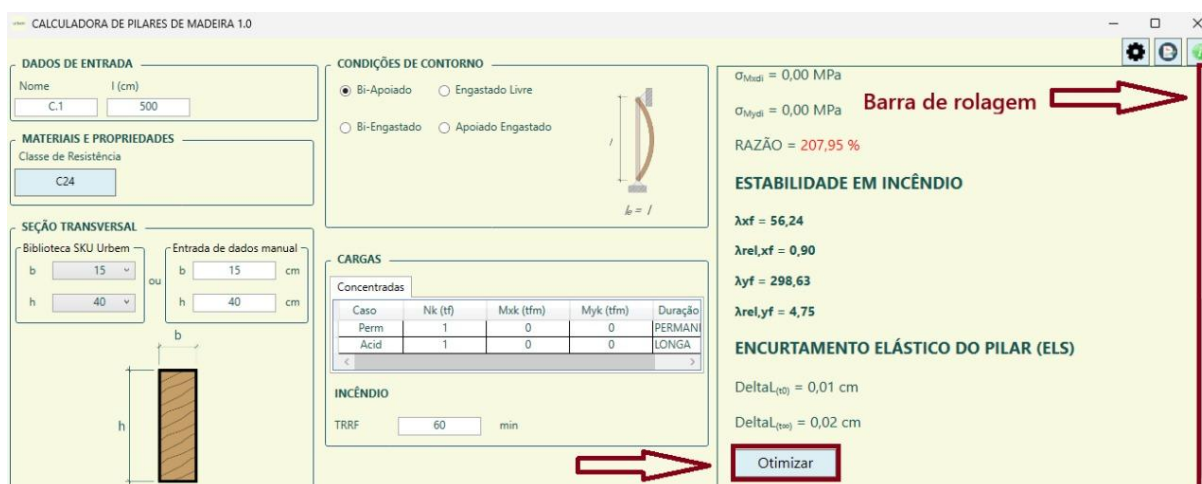
Já na Figura 36, está apresentada a CalculaTimber_Column, utilizada na análise de pilares, a diferença entre a calculadora de vigas e a de pilares, está no tipo de carga, que neste caso é concentrada em tonelada força (tf).

Figura 36: Tela inicial da CalculaTimber_Column

Fonte: Adaptado de CalculaTimber_Column (2025).

Todas as três calculadoras apresentam a função “Otimizar”, localizada no lado direito do cursor inferior, sendo necessário utilizar a barra de rolagem para encontrá-la, conforme demonstrado na Figura 37. Ao ser acionada, a função busca dentro da biblioteca da Urbem existente nas calculadoras a melhor otimização de acordo com os critérios já existentes nas calculadoras.

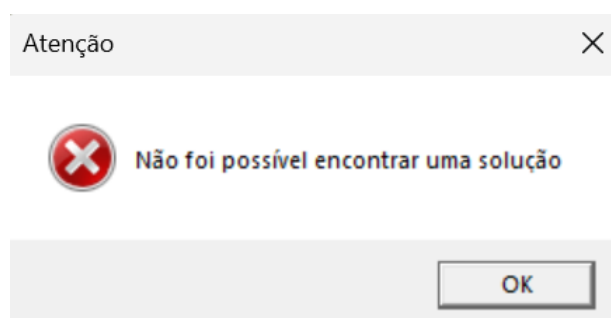
Figura 37: Tela inicial da CalculaTimber_Column com ênfase na localização da função otimizar



Fonte: Adaptado de CalculaTimber_Column (2025).

Para a CalculaTimber_CLT a função procura dimensionar os elementos sem alterar os seguintes itens: vão, classe de resistência, condições de contorno, cargas, coeficientes e ponderadores de cálculo. Neste caso, é apresentada a altura mais otimizada para a cada situação, caso não sejam encontradas soluções dentro das condições impostas será exibida na tela a mensagem presente na Figura 38.

Figura 38: Aviso na função "otimizar"



Fonte: Adaptado de CalculaTimber_Column (2025).

A CalculaTimber_MLC e a CalculaTimber_Column possuem duas dimensões na seção transversal “b” e “h”, base e altura, respectivamente, neste caso, a função “otimizar” avalia qual a menor altura em cada situação, sem alterar os seguintes elementos: base (“b”), vão, classe de resistência, condições de contorno, cargas, coeficientes e ponderadores de cálculo.

Na realização das simulações foram limitadas as dimensões mínimas e máximas disponíveis pelo fabricante, a classe de umidade 3 – selecionada conforme a região de Florianópolis-SC –, os limites de flecha, de acordo com a ABNT NBR 7190

(Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2022), sendo L/300 para a flecha instantânea e L/150 para a flecha final. A condição de contorno “bi apoiada” foi adotada para todos os elementos do projeto estrutural final, mantendo como critério obter a maior aproximação das dimensões do projeto original em concreto armado.

A presente análise foi limitada nos seguintes itens:

- Não foi realizada a verificação minuciosa dos cálculos da calculadora, ou seja, não foram comprovados se os resultados fornecidos pelas ferramentas da Urbem e da empresa TQS estão sendo gerados corretamente em relação a outros métodos de cálculo;
- A presente análise não inclui validação por métodos alternativos, como cálculos manuais ou *softwares* distintos, focando exclusivamente no uso das ferramentas da Urbem e TQS para concepção estrutural;
- A análise se limitará à concepção estrutural e à comparação das dimensões e pesos dos elementos, sem abordar aspectos como: custos, transporte, logística, impactos ambientais ou comportamento a longo prazo.

3.3 Ajuste das dimensões dos componentes modelados conforme os valores adotados

Após a realização das simulações, conforme as limitações impostas pela calculadora. Inicialmente, foram comparadas as informações da biblioteca BIM com a calculadora, onde foram verificadas as informações contidas nos elementos e o nível de detalhamento existente em cada um deles.

Na sequência a modelagem realizada anteriormente foi reajustada para as dimensões existentes na calculadora da Urbem conforme a etapa anterior referente a análise estrutural. Com a modelagem final ajustada foram apresentados detalhes do projeto em vistas 3D.

3.4 Comparativo entre madeira e concreto

Por fim, compararam-se os resultados obtidos do projeto em madeira engenheirada com os do projeto em concreto armado. Para essa análise, avaliaram-se diversos parâmetros, como a seção transversal, a área total da seção, o peso

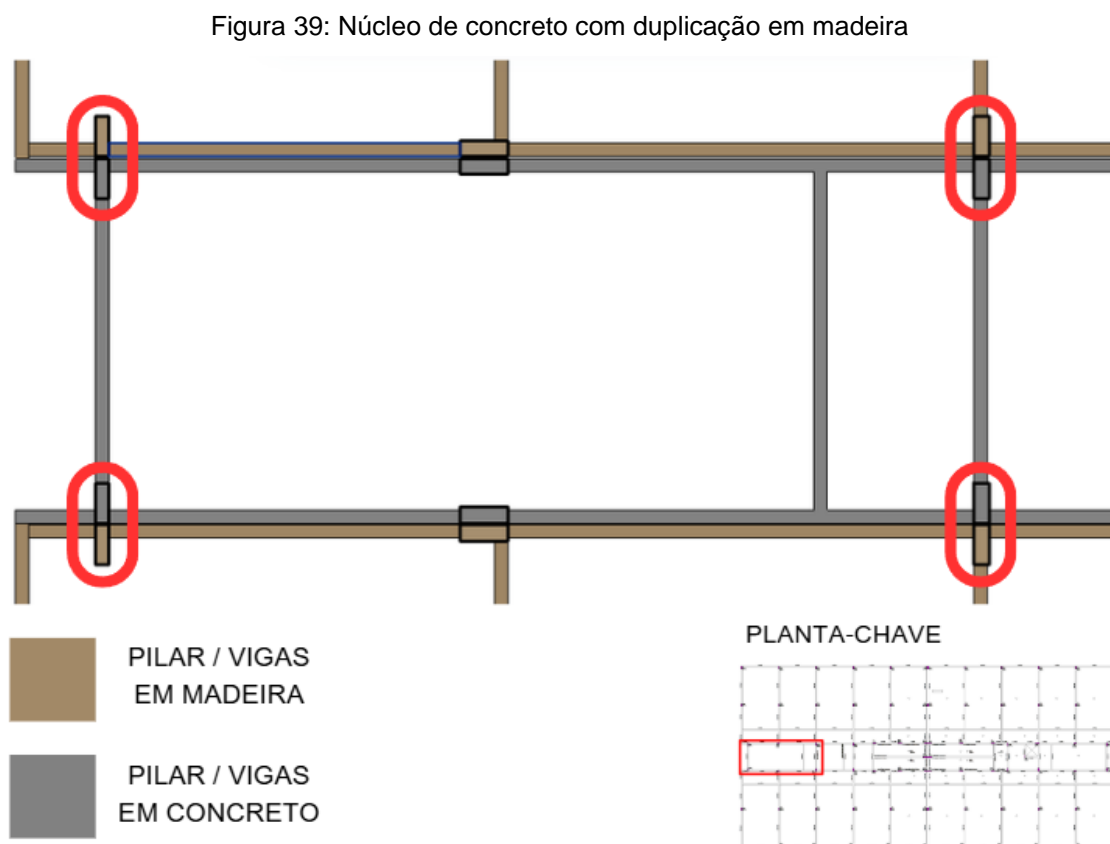
próprio do elemento estrutural e, por fim, a redução das cargas atuantes em cada elemento. Todas as análises foram realizadas com base em uma tabela comparativa, adotando-se o valor padrão da massa específica do concreto conforme estabelecido pela ABNT NBR 6118:2024, correspondente a 2500 kgf/m^3 , enquanto, para a madeira, utilizou-se a massa específica com base na classe de resistência adotada para cada elemento.

4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados provenientes do processo de criação e as definições consideradas no projeto afim de obter uma edificação de madeira engenheirada.

4.1 Modelagem do projeto estrutural conforme valores do projeto original

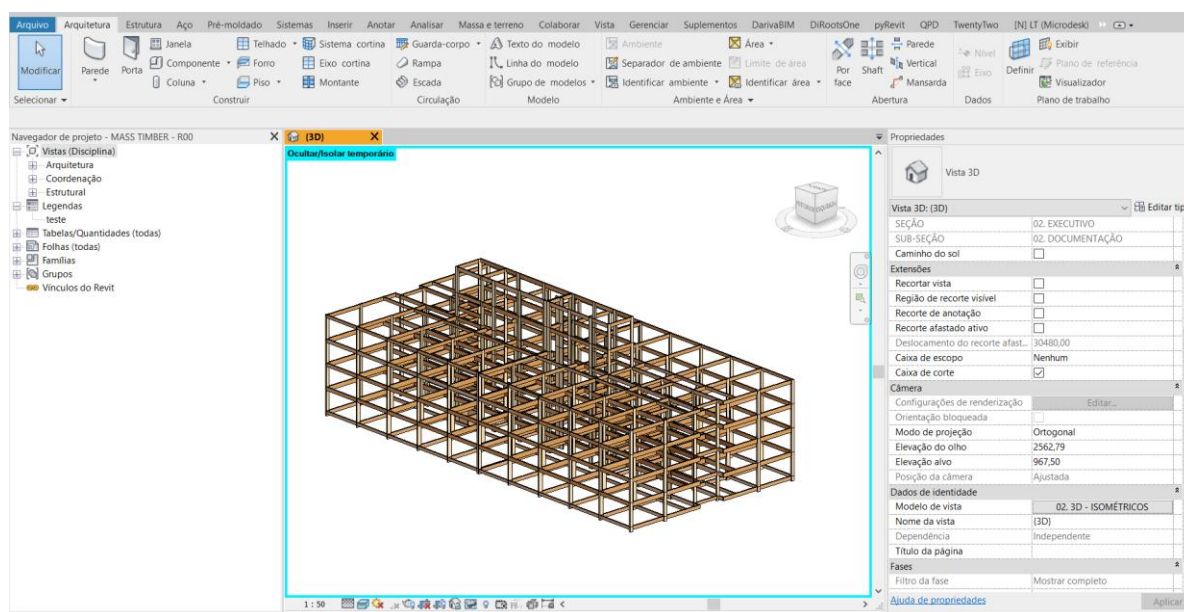
Para considerar o núcleo da edificação em concreto, conforme premissas de projeto, foi realizada a duplicação das vigas (V5, V6, V8 e V9) e pilares (P27, P28, P29, P30, P31, P32, P33, P34, P35, P36, P37, P38, P42, P43, P44, P45, P46, P47, P48, P49, P50, P51 e P52) de concreto para vigas e pilares em madeira, conforme Figura 39. Além disso, os pilares que se encontravam na vertical, como os indicados na imagem, foram rotacionados para não obstruírem a passagem na circulação dos pavimentos.



Fonte: Autores (2025).

Após a primeira tomada de decisões, iniciou-se o processo de modelagem com o lançamento de vigas e pilares, neste primeiro momento as dimensões dos elementos estruturais permanecem conforme os apresentados no projeto estrutural. Para a modelagem utilizou-se o *template* BIM da Urbem disponível no site, a Figura 40 ilustra a modelagem inicial realizada.

Figura 40: Modelagem inicial



Fonte: Autores (2024).

4.2 Concepção estrutural em madeira engenheirada

4.2.1 Ações e carregamentos

As cargas adotadas para cada pavimento estão apresentadas na Tabela 11.

Tabela 11: Ações e carregamentos

PAVTO	LOCAL/MATERIAL	CARGA UNIFORMEMENTE DISTRIBUÍDA [KN/M ²]	TIPO DE CARGA
1º, 2º E 3º TIPO	Escolas, instituições de ensino	3,0	Acidental
	Revestimentos de pisos de edifícios residenciais e comerciais – espessura de 5 cm	1,0	Permanente
	<i>Drywall</i> – espessura de 7 a 30 cm	0,5	Permanente
Cobertura	Cobertura com placas fotovoltaicas	1,5	Permanente

Fonte: ABNT NBR 7190 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2022).

4.2.2 Ajustes de dimensões conforme Calculadoras Urbem

Após a definição das cargas atuantes na estrutura, com uma fórmula de aproximação no Excel, realizou-se a adaptação das dimensões originais dos elementos em concreto armado para as dimensões de madeira engenheirada contidas nas calculadoras da empresa Urbem, conforme já apresentados nas Tabelas 8 e 9.

As Tabelas 12, 13 e 14 apresentam os valores ajustados de concreto para madeira engenheirada, considerando as dimensões mais próximas às disponíveis nas calculadoras da empresa.

Tabela 12: Ajuste das dimensões das lajes de concreto para CLT

PAVIMENTO	ELEMENTO	CÓDIGO	H [cm] concreto	H [cm] CLT
1º, 2º e 3º TIPO	LAJE	L1 a L10 e L39 a L48	22	20
		L11 a L20 e L29 a L38	9	10
COBERTURA		L1 a L10 e L39 a L48	22	20
		L11 a L20 e L39 a L38	9	10

Fonte: Autores (2025).

Tabela 13: Ajuste das dimensões das vigas de concreto para MLC

PAVIMENTO	ELEMENTO	CÓDIGO	B [cm] concreto	H [cm] concreto	B [cm] MLC	H [cm] MLC
1º, 2º, 3º TIPO E COBERTURA	VIGAS	V1, V2, V12 e V13	17	50	15	48
		V3, V4, V10 e V11	17	60	15	60
		V5, V6, V8 e V9	17	60	15	60
		V14, V15, V26 a V29, V41 e V42	17	60	15	60
		V17, V18, V24, V25, V30 a V33, V38 e V39	17	70	15	68

Fonte: Autores (2025).

Tabela 14: Ajuste das dimensões dos pilares de concreto para MLC

(continua)

PAVIMENTO	ELEMENTO	CÓDIGO	B [cm] concreto	H [cm] concreto	B [cm] MLC	H [cm] MLC
1º, 2º, 3º TIPO E COBERTURA	PILAR	P1	27	40	25	40
		P2	17	60	15	60
		P3	17	60	15	60
		P4	17	60	15	60
		P5	17	60	15	60
		P6	17	40	15	40
		P7	17	40	15	40
		P8	17	60	15	60
		P9	17	60	15	60
		P10	17	60	15	60
		P11	17	60	15	60
		P12	27	40	25	40
		P13	27	40	25	40
		P14	20	60	20	60
		P15	20	60	20	60
		P16	20	60	20	60
		P17	20	60	20	60
		P18	17	60	15	60
		P19	17	60	15	60
		P20	20	60	20	60
		P21	20	60	20	60
		P22	20	60	20	60
		P23	20	60	20	60
		P24	27	40	25	40
		P25	17	50	15	48
		P26	20	60	20	60
		P27	20	60	20	60
		P28	20	40	20	40

Fonte: Autores (2025).

Tabela 14: Ajuste das dimensões dos pilares de concreto para MLC

(continuação)

PAVIMENTO	ELEMENTO	CÓDIGO	B [cm] concreto	H [cm] concreto	B [cm] MLC	H [cm] MLC
1º, 2º, 3º TIPO E COBERTURA	PILAR	P29	17	60	15	60
		P30	20	60	20	60
		P31	17	60	15	60
		P32	17	60	15	60
		P33	20	60	20	60
		P34	17	60	15	60
		P35	17	50	15	48
		P36	17	70	15	68
		P37	20	60	20	60
		P38	17	60	15	60
		P42	20	60	20	60
		P43	20	60	20	60
		P44	20	40	20	40
		P45	17	60	15	60
		P46	17	60	15	60
		P47	20	60	20	60
		P48	17	60	15	60
		P49	17	60	15	60
		P50	20	60	20	60
		P51	17	60	15	60
		P52	17	50	15	48
		P53	20	50	20	48
		P54	20	60	20	60
		P55	17	50	15	48
		P56	27	40	25	40
		P57	20	60	20	60
		P58	20	60	20	60
		P59	20	60	20	60
		P60	20	60	20	60
		P61	17	60	15	60
		P62	17	60	15	60
		P63	20	60	20	60
P64	20	60	20	60		
P65	20	60	20	60		
P66	20	60	20	60		
P67	27	40	25	40		
P68	27	40	25	40		
P69	17	60	15	60		
P70	17	60	15	60		
P71	17	60	15	60		
P72	17	60	15	60		

Fonte: Autores (2025).

Tabela 14: Ajuste das dimensões dos pilares de concreto para MLC

(conclusão)

PAVIMENTO	ELEMENTO	CÓDIGO	B [cm] concreto	H [cm] concreto	B [cm] MLC	H [cm] MLC
1º, 2º, 3º TIPO E COBERTURA	PILAR	P73	17	40	15	40
		P74	17	60	15	60
		P75	17	60	15	60
		P76	17	60	15	60
		P77	17	60	15	60
		P78	27	40	25	40
		P79	27	40	25	40

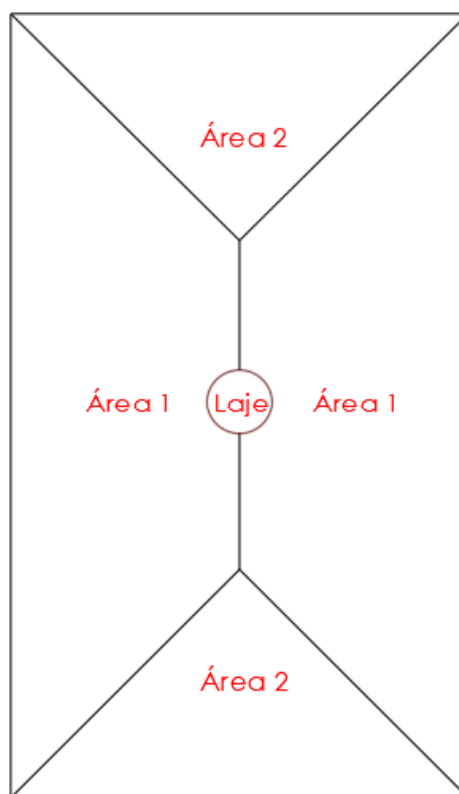
Fonte: Autores (2025).

Após esses ajustes das dimensões, para calcular as reações e os esforços solicitantes na estrutura, inicialmente, considerou-se que todos os elementos de madeira engenheirada poderiam ser atendidos pela classe C22, a qual possui resistência característica à compressão de 20 MPa e massa específica de 410 kgf/m³, conforme a ABNT NBR 7190 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2022).

Com essa premissa, calcularam-se as reações que as lajes transmitem às vigas, considerando-as como cargas distribuídas. Para essa etapa, utilizou-se o modelo da Figura 41, no qual a divisão das áreas foi feita em partes proporcionais, compreendendo dois triângulos e dois trapézios. Em seguida, determinaram-se as reações de apoio das vigas sobre os pilares, possibilitando a obtenção do esforço normal característico de cada pilar.

A partir dos resultados da análise estrutural, identificou-se que a laje L1, a viga V18 e o pilar P14 eram os elementos mais solicitados. Dessa forma, esses componentes foram detalhados na sequência, servindo como referência para a avaliação dos demais elementos estruturais.

Figura 41: Distribuição de áreas



Fonte: Autores (2025).

Os resultados dos esforços normais na estrutura em madeira engenheirada estão apresentados no Apêndice 01.

4.2.3 Verificação estrutural aplicando as Calculadoras da empresa Urbem

Nesta etapa, verificou-se se as dimensões de madeira engenheirada mais próximas às originais de concreto, apresentadas nas Tabelas 12, 13 e 14, atendiam os Estados Limites Últimos e de Utilização conforme as Calculadoras Urbem seguindo a NBR 7190 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2022).

Na Figura 42, observam-se os ponderadores utilizados nessas verificações. Para o estudo de caso, foram selecionados a classe de umidade 3, de acordo com o município de Florianópolis, e o uso de “Edificações Comerciais, Escritório” para os fatores de combinação e redução conforme o uso do estudo de caso. Os demais valores já foram preenchidos automaticamente pela calculadora.

Figura 42: Ponderações para verificação de dimensões

PODERADORES

COEFICIENTES DE MINORAÇÃO DE RESISTÊNCIA

$\gamma_{wb} =$ $\gamma_{wv} =$

COEFICIENTES DE MODIFICAÇÃO KMOD1

Classe de Carregamento	kmod1
Permanente	<input type="text" value="0.6"/>
Longa Duração	<input type="text" value="0.7"/>
Média Duração	<input type="text" value="0.8"/>
Curta Duração	<input type="text" value="0.9"/>
Instantânea	<input type="text" value="1.1"/>

COEFICIENTES DE MODIFICAÇÃO KMOD2 E DE FLUÊNCIA Φ

Classe de Umidade	Uamb	Ueq	kmod2	Φ	Seleção
1	Uamb < 65%	12%	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="0.6"/>	<input type="radio"/>
2	65% < Uamb < 75%	15%	<input type="text" value="0.9"/>	<input type="text" value="0.8"/>	<input type="radio"/>
3	75% < Uamb < 85%	18%	<input type="text" value="0.8"/>	<input type="text" value="0.8"/>	<input checked="" type="radio"/>

LIMITES DE DESLOCAMENTO

$\delta_{inst} = L /$

$\delta_{final} = L /$

COMBINAÇÕES

Valores dos Fatores de Combinação e de Redução

Ações	ψ_0	ψ_1	ψ_2	ACIDENTAL
Edificações Residenciais	<input type="text" value="0.5"/>	<input type="text" value="0.4"/>	<input type="text" value="0.3"/>	<input type="radio"/>
Edificações Comerciais, Escritórios	<input type="text" value="0.7"/>	<input type="text" value="0.6"/>	<input type="text" value="0.4"/>	<input checked="" type="radio"/>
Biblioteca, Arquivos, Garagens	<input type="text" value="0.8"/>	<input type="text" value="0.7"/>	<input type="text" value="0.6"/>	<input type="radio"/>
Vento	<input type="text" value="0.6"/>	<input type="text" value="0.3"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="radio"/>

Casos	Peso Próprio	Permanente	Acidental
Peso Próprio	1	0	0
Permanente	0	1	0
Acidental	0	0	1
ELS Inicial	1	1	1
ELS Final	1.8	1.8	1.32
ELU	1.3	1.4	1.5
Incêndio	1.3	1.4	1.5

INCÊNDIO

Considerar Delaminação

$\beta_1 =$

$\beta_2 =$

kfi =

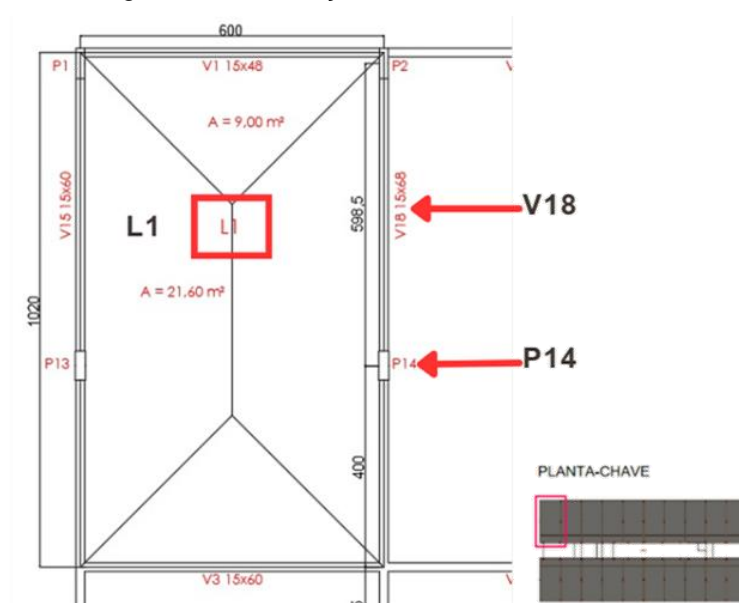
nfi =

OK

Fonte: Adaptado da CalculaTimber_CLT e CalculaTimber_MLC (2025).

Foram realizadas simulações com todos os elementos da estrutura para verificar as diferentes possibilidades de dimensões, classes de resistência e condições de contorno. Na sequência, apresentam-se apenas os resultados obtidos das simulações realizadas para os mais carregados: laje L1, viga V18 e pilar P14, localizados em planta conforme ilustra Figura 43.

Figura 43: Localização dos elementos analisados



Fonte: Autores (2025)

4.2.3.1 Simulação Laje L1

Para a verificação da laje, foram utilizados os seguintes dados de entrada:

- Vão de 600 cm;
- Carga permanente de 0,1 tf/m²;
- Carga acidental de 0,3 tf/m²;
- Condições de contorno: vigas bi apoiadas;
- Classe de resistência: C22.

Após a inserção dos dados, verificou-se que as dimensões adotadas eram adequadas, uma vez que, ao utilizar-se a função “otimizar”, não foram alteradas as medidas ou apresentadas alternativas à situação já condicionada (Figura 44).

Figura 44: Dados da primeira simulação da laje L1 em CLT aplicando classe C22

DADOS DE ENTRADA

Nome: L1 Vão (cm): 600

MATERIAIS E PROPRIEDADES

Classe de Resistência: C22

SEÇÃO TRANSVERSAL

Biblioteca ou Número de Camadas: 5

Camada	Espessura (mm)	E0,m (MPa)	G90 (MPa)
L1	40	10000	0
T1	40	0	50
L2	40	10000	0
T2	40	0	50
L3	40	10000	0
TOTAL	200		

CONDIÇÕES DE CONTORNO

Bi-Apoiado Engastado Livre

Bi-Engastado Apoiado Engastado

CARGAS

Distribuidas: Concentradas

Caso	Valor (tf/m ²)	Duração
PP	0,082	PERMANENTE
Perm	0,1	PERMANENTE
Acid	0,3	LONGA

INCÊNDIO

TRRF: 60 min

Fonte: Adaptado de CalculaTimber_CLT (2025).

Para a segunda simulação referente a laje L1 foram utilizados os mesmos resultados demonstrados na primeira simulação, exceto pela classe de resistência, agora estabelecida para C24. Neste caso, apresentado na Figura 45, por meio da função “otimizar” obteve-se uma laje com 18 cm de altura, a qual possuía uma altura anterior de 20 cm. Isso demonstra que a variação de classe de resistência obteve uma melhora na resistência da estrutura com redução na altura da peça.

Figura 45: Dados da segunda simulação da laje L1 em CLT aplicando classe C24

CALCULADORA DE LAJES DE MADEIRA ENGENHEIRADA (CLT) 1.0

DADOS DE ENTRADA

Nome: Vão (cm):

MATERIAIS E PROPRIEDADES

Classe de Resistência:

SEÇÃO TRANSVERSAL

Biblioteca ou Número de Camadas: 3 5 7

Camada	Espessura (mm)	E0,m (MPa)	G90 (MPa)
L1	40	11000	0
T1	30	0	50
L2	40	11000	0
T2	30	0	50
L3	40	11000	0
TOTAL	180		

CONDIÇÕES DE CONTORNO

Bi-Apoiado Engastado Livre

Bi-Engastado Apoiado Engastado

CARGAS

Distribuídas Concentradas

Caso	Valor (tf/m ²)	Duração
PP	0.0756	PERMANENTE
Perm	0.1	PERMANENTE
Acid	0.3	LONGA

INCÊNDIO

TRRF: min

Fonte: Adaptado de CalculaTimber_CLT (2025).

Em seguida, foram realizadas simulações alterando a classe de resistência do elemento até apresentarem uma altura inferior a anterior de 18 cm. Contudo, a altura da laje só obteve alteração a partir da classe C45, apresentando 16 cm de altura, conforme Figura 46.

Figura 46: Simulação com classe de resistência C45 da laje L1 em CLT aplicando classe C45

urban CALCULADORA DE LAJES DE MADEIRA ENGENHEIRADA (CLT) 1.0

DADOS DE ENTRADA

Nome: Vão (cm):

MATERIAIS E PROPRIEDADES

Classe de Resistência:

SEÇÃO TRANSVERSAL

Biblioteca ou Número de Camadas: 3 5 7

Camada	Espessura (mm)	E0,m (MPa)	G90 (MPa)
L1	40	15000	0
T1	20	0	50
L2	40	15000	0
T2	20	0	50
L3	40	15000	0
TOTAL	160		

CONDIÇÕES DE CONTORNO

Bi-Apoiado Engastado Livre

Bi-Engastado Apoiado Engastado

CARGAS

Distribuídas Concentradas

Caso	Valor (tf/m ²)	Duração
PP	0.0832	PERMANENTE
Perm	0.1	PERMANENTE
Acid	0.3	LONGA

INCÊNDIO

TRRF: min

Fonte: Adaptado de CalculaTimber_CLT (2025).

Em contrapartida, realizaram-se simulações onde a condição de contorno foi alterada para bi-engastada, variando a classe de resistência de C22 a C50. Para verificar se as condições de contorno são um dos critérios que influenciam na variação na altura do elemento.

Na condição de contorno bi-engastado, os resultados obtidos para todas as classes de resistência não variaram entre si e permaneceram com 14 cm de altura, conforme apresentado nas Figuras 47 e 48. Isso mostra que, em relação a condição bi-apoiada houve uma diminuição de 4 cm de altura na laje mencionada.

Figura 47: Simulação da laje L1 em CLT com condição bi-engastada e classe C22

CALCULADORA DE LAJES DE MADEIRA ENGENHEIRADA (CLT) 1.0

DADOS DE ENTRADA

Nome: L1 Vão (cm): 600

MATERIAIS E PROPRIEDADES

Classe de Resistência: C22

SEÇÃO TRANSVERSAL

Biblioteca ou Número de Camadas: 3 5 7

Camada	Espessura (mm)	E0,m (MPa)	G90 (MPa)
L1	40	10000	0
T1	20	0	50
L2	20	10000	0
T2	20	0	50
L3	40	10000	0
TOTAL	140		

CONDIÇÕES DE CONTORNO

Bi-Apoiado Engastado Livre

Bi-Engastado Apoiado Engastado

CARGAS

Distribuidas Concentradas

Caso	Valor (tf/m ²)	Duração
PP	0.0574	PERMANENTE
Perm	0.1	PERMANENTE
Acid	0.3	LONGA

INCÊNDIO

TRRF: 60 min

Fonte: Adaptado de CalculaTimber_CLT (2025).

Figura 48: Simulação da laje L1 em CLT com condição bi-engastada e classe C50

CALCULADORA DE LAJES DE MADEIRA ENGENHEIRADA (CLT) 1.0

DADOS DE ENTRADA

Nome: L1 Vão (cm): 600

MATERIAIS E PROPRIEDADES

Classe de Resistência: C50

SEÇÃO TRANSVERSAL

Biblioteca ou Número de Camadas: 3 5 7

Camada	Espessura (mm)	E0,m (MPa)	G90 (MPa)
L1	40	16000	0
T1	20	0	50
L2	20	16000	0
T2	20	0	50
L3	40	16000	0
TOTAL	140		

CONDIÇÕES DE CONTORNO

Bi-Apoiado Engastado Livre

Bi-Engastado Apoiado Engastado

CARGAS

Distribuidas Concentradas

Caso	Valor (tf/m ²)	Duração
PP	0.077	PERMANENTE
Perm	0.1	PERMANENTE
Acid	0.3	LONGA

INCÊNDIO

TRRF: 60 min

Fonte: Adaptado de CalculaTimber_CLT (2025).

Com base nos resultados, foi realizado um comparativo entre as simulações apresentadas na Tabela 15. Concluiu-se que a classe de resistência C24, com altura de 18 cm, na condição de contorno bi-apoiada, atende aos requisitos de projeto impostos e apresenta o menor peso próprio, de 0,756 tf/m², adotando-a para o estudo de caso.

Além disso, a tabela também apresenta os valores da laje L1 na situação de bi-engastamento para as classes de resistência verificadas. Observou-se que não houve alterações nas alturas da laje nos casos de bi-engastados.

Tabela 15: Alturas obtidas para a laje L1 conforme classes de resistência e condição de contorno

Classe de resistência	Bi-apoiado	Bi-engastado
C22	h = 20 cm	h = 14 cm
C24	h = 18 cm	h = 14 cm
C45	h = 16 cm	h = 14 cm

Fonte: Autores (2025).

4.2.3.2 Simulação da viga V18

Inicialmente, a viga V18 foi definida conforme o os ajustes iniciais de concreto para madeira com seção de 15 x 68 cm e vão de 599 cm. Os carregamentos impostos a esta viga estão presentes na Tabela 16 e a inserção de dados na calculadora encontra-se na Figura 49.

Tabela 16: Carregamento da V18

Tipo de carga	Reação da Laje	Parede
Permanente	0,744 tf/m	0,135 tf/m
Acidental	1,271 tf/m	-

Fonte: Autores (2025).

Figura 49: Dados de entrada da primeira simulação da viga V18

urtem CALCULADORA DE VIGAS DE MADEIRA ENGENHEIRADA (MLC) 0.4

DADOS DE ENTRADA

Nome Vão (cm)

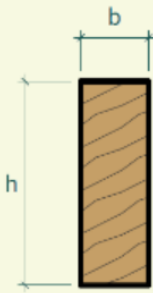
MATERIAIS E PROPRIEDADES

Classe de Resistência

SEÇÃO TRANSVERSAL

Biblioteca SKU Urbem ou Entrada de dados manual cm

ou cm

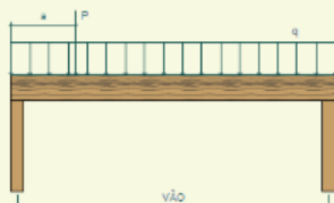


CONDIÇÕES DE CONTORNO

Bi-Apoiado Engastado Livre

Bi-Engastado Apoiado Engastado

CARGAS



Distribuídas Concentradas

Caso	Valor (tf/m)	Duração
PP	0.04182	PERMANENTE
Perm	0.879	PERMANENTE
Acid	1.271	LONGA

INCÊNDIO

TRRF min

Fonte: Adaptado da CalculaTimber_MLC (2025).

Conforme apresentado na Figura 50, na seção de resultados, as tensões normais, de cisalhamento e as flechas instantâneas e finais não foram atendidas nas dimensões dos dados de entrada. As tensões solicitadas estavam maiores do que as resistentes, e os limites de flecha, de mesmo modo, se utilizado os ponderadores mais altos estabelecidos em norma, as medidas ainda não seriam satisfeitas.

Figura 50: Resultado da primeira simulação da viga V18.

CALCULADORA DE VIGAS DE MADEIRA ENGENHEIRADA (MLC) 0.4

DADOS DE ENTRADA

Nome: V.18 | Vão (cm): 599

MATERIAIS E PROPRIEDADES

Classe de Resistência: C22

SEÇÃO TRANSVERSAL

Biblioteca SKU Urbem: b=15, h=68

Entrada de dados manual: b=15, h=68

CONDIÇÕES DE CONTORNO

Bi-Apoiado | Engastado Livre

Bi-Engastado | Apoiado Engastado

CARGAS

Caso	Valor (tf/m)	Duração
PP	0.04182	PERMANENTE
Perm	0.879	PERMANENTE
Acid	1.271	LONGA

INCÊNDIO

TRRF: 60 min

RESULTADOS

ELU

TENSÕES NORMAIS

$\sigma_{Sd(Max)} = 12,38 \text{ MPa}$

$\sigma_{Sd(Max)}/\sigma_{Rd} = 172,80 \%$

TENSÕES DE CISALHAMENTO

$\tau_{Sd(Max)} = 1,41 \text{ MPa}$

$\tau_{Sd(Max)}/\tau_{Rd} = 146,02 \%$

ELS

FLECHA INSTANTÂNEA

$d_{Max(t0)} = 3,25 \text{ cm}$

$L/d_{Max(t0)} > 300 = 184,43$

FLECHA FINAL

$d_{Max(toe)} = 4,94 \text{ cm}$

$L/d_{Max(toe)} > 150 = 121,20$

Fonte: Adaptado da CalculaTimber_MLC (2025).

Utilizando-se a função otimizar, foi possível obter uma nova dimensão, sendo de 15 x 104 cm, obtendo um aumento de 36 cm em relação a solução inicial, conforme Figura 51.

Figura 51: Resultado da segunda simulação da V18 com a função otimizar

CALCULADORA DE VIGAS DE MADEIRA ENGENHEIRADA (MLC) 0.4

DADOS DE ENTRADA

Nome: V.18 | Vão (cm): 599

MATERIAIS E PROPRIEDADES

Classe de Resistência: C22

SEÇÃO TRANSVERSAL

Biblioteca SKU Urbem: b=15, h=104

Entrada de dados manual: b=15, h=104

CONDIÇÕES DE CONTORNO

Bi-Apoiado | Engastado Livre

Bi-Engastado | Apoiado Engastado

CARGAS

Caso	Valor (tf/m)	Duração
PP	0.06396	PERMANENTE
Perm	0.879	PERMANENTE
Acid	1.271	LONGA

INCÊNDIO

TRRF: 60 min

ELU

TENSÕES NORMAIS

$\sigma_{Sd(Max)} = 5,34 \text{ MPa}$

$\sigma_{Sd(Max)}/\sigma_{Rd} = 74,54 \%$

TENSÕES DE CISALHAMENTO

$\tau_{Sd(Max)} = 0,93 \text{ MPa}$

$\tau_{Sd(Max)}/\tau_{Rd} = 96,33 \%$

ELS

FLECHA INSTANTÂNEA

$d_{Max(t0)} = 1,79 \text{ cm}$

$L/d_{Max(t0)} > 300 = 334,34$

FLECHA FINAL

$d_{Max(toe)} = 2,73 \text{ cm}$

$L/d_{Max(toe)} > 150 = 219,32$

Fonte: Adaptado da CalculaTimber_MLC (2025).

Foram realizadas outras simulações alterando a classe de resistência do elemento de C22 até C50. A partir de C24 até C50 (Figuras 52 e 53) as dimensões da viga permaneceram com a mesma seção de 15 x 96 cm. Isso demonstra novamente que, embora a classe de resistência da madeira tenha sido modificada, as condições impostas na calculadora influenciam o dimensionamento, impedindo uma variação na altura do elemento.

Figura 52: Simulação base (b) igual a 15 cm para classe C24.

Calculadora de Vigas de Madeira Engenheirada (MLC) 0.4

DADOS DE ENTRADA

Nome: V.18 Vão (cm): 599

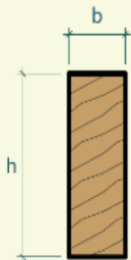
MATERIAIS E PROPRIEDADES

Classe de Resistência: C24

SEÇÃO TRANSVERSAL

Biblioteca SKU Urbem: b: 15, h: 96

Entrada de dados manual: b: 15 cm, h: 96 cm

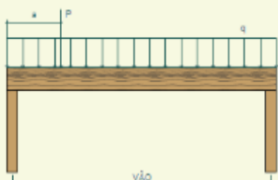


CONDIÇÕES DE CONTORNO

Bi-Apoiado Engastado Livre

Bi-Engastado Apoiado Engastado

CARGAS



Distribuidas: Concentradas:

Caso	Valor (tf/m)	Duração
PP	0.06048	PERMANENTE
Perm	0.879	PERMANENTE
Acid	1.271	LONGA

INCÊNDIO

TRRF: 60 min

Fonte: Adaptado da CalculaTimber_MLC (2025).

Figura 53: Simulação base (b) igual a 15 cm para classe C50.

CALCULADORA DE VIGAS DE MADEIRA ENGENHEIRADA (MLC) 0.4

DADOS DE ENTRADA

Nome: Vão (cm):

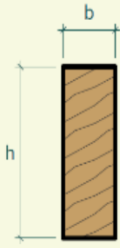
MATERIAIS E PROPRIEDADES

Classe de Resistência:

SEÇÃO TRANSVERSAL

Biblioteca SKU Urbem: b: h:

ou Entrada de dados manual: b: cm h: cm

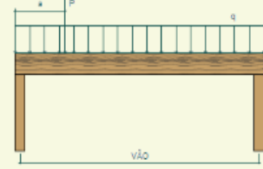


CONDIÇÕES DE CONTORNO

Bi-Apoiado Engastado Livre

Bi-Engastado Apoiado Engastado

CARGAS



Distribuidas Concentradas

Caso	Valor (tf/m)	Duração
PP	0.0792	PERMANENTE
Perm	0.879	PERMANENTE
Acid	1.271	LONGA

INCÊNDIO

TRRF: min

Fonte: Adaptado da CalculaTimber_MLC (2025).

Conforme a Figura 54, na próxima análise foi considerada a classe de resistência C22, a base “b” foi alterada para 20 cm, com o intuito de verificar se a condição imposta influenciaria na diminuição da altura, apresentando uma solução mais adequada ao estudo de caso. Após os ajustes de dimensões e classes de resistências nos dados da calculadora utilizou-se a função “otimizar”, obtendo como resultado uma viga de seção de 20 x 80 cm.

Figura 54: Simulação base (b) igual a 20 cm para classe C22.

CALCULADORA DE VIGAS DE MADEIRA ENGENHEIRADA (MLC) 0.4

DADOS DE ENTRADA

Nome: Vão (cm):

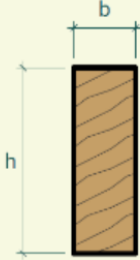
MATERIAIS E PROPRIEDADES

Classe de Resistência:

SEÇÃO TRANSVERSAL

Biblioteca SKU Urbem: b: h:

ou Entrada de dados manual: b: cm h: cm

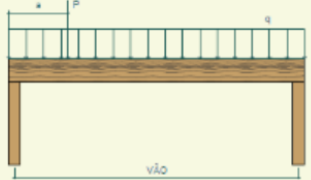


CONDIÇÕES DE CONTORNO

Bi-Apoiado Engastado Livre

Bi-Engastado Apoiado Engastado

CARGAS



Distribuídas Concentradas

Caso	Valor (tf/m)	Duração
PP	0.0656	PERMANENTE
Perm	0.879	PERMANENTE
Acid	1.271	LONGA

INCÊNDIO

TRRF: min

Fonte: Adaptado da CalculaTimber_MLC (2025).

Ao variar a classe de resistência, foi verificado que, a partir da classe C35, a altura da viga analisada não foi reduzida (Figura 55). As demais classes, assim como a C35, resultavam nas mesmas dimensões de 20 x 76 cm demonstrando que seria necessário realizar a variação de outras condições impostas como a realizada anteriormente na base, que poderia resultar em uma diminuição na altura do elemento.

Figura 55: Simulação base (b) igual a 20 cm para classe C35.

CALCULADORA DE VIGAS DE MADEIRA ENGENHEIRADA (MLC) 0.4

DADOS DE ENTRADA

Nome: V.18 Vão (cm): 599

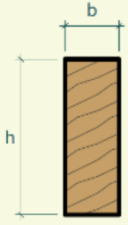
MATERIAIS E PROPRIEDADES

Classe de Resistência: C35

SEÇÃO TRANSVERSAL

Biblioteca SKU Urbem: b: 20, h: 76

ou Entrada de dados manual: b: 20 cm, h: 76 cm

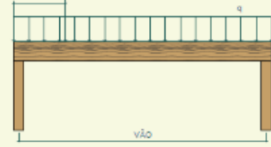


CONDIÇÕES DE CONTORNO

Bi-Apoiado Engastado Livre

Bi-Engastado Apoiado Engastado

CARGAS



Distribuídas: Concentradas

Caso	Valor (tf/m)	Duração
PP	0.07296	PERMANENTE
Perm	0.879	PERMANENTE
Acid	1.271	LONGA

INCÊNDIO

TRRF: 60 min

Fonte: Adaptado da CalculaTimber_MLC (2025).

Desse modo, foi alterada novamente a seção “b” para 25 cm, reiniciando a análise com a classe C22, para verificar se a condição imposta otimizaria o elemento. A Figura 56, demonstra a simulação descrita, onde foi obtida uma viga de 25 x 72 cm.

Figura 56: Simulação base (b) igual a 25 cm para classe C22.

CALCULADORA DE VIGAS DE MADEIRA ENGENHEIRADA (MLC) 0.4

DADOS DE ENTRADA

Nome: V.18 Vão (cm): 599


MATERIAIS E PROPRIEDADES

Classe de Resistência: C22

SEÇÃO TRANSVERSAL

Biblioteca SKU Urbem: b: 25, h: 72

ou Entrada de dados manual: b: 25 cm, h: 72 cm

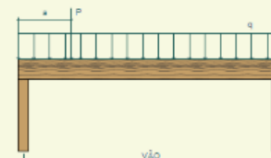


CONDIÇÕES DE CONTORNO

Bi-Apoiado Engastado Livre

Bi-Engastado Apoiado Engastado

CARGAS



Distribuídas: Concentradas

Caso	Valor (tf/m)	Duração
PP	0.0738	PERMANENTE
Perm	0.879	PERMANENTE
Acid	1.271	LONGA

INCÊNDIO

TRRF: 60 min

Fonte: Adaptado da CalculaTimber_MLC (2025).

A partir da classe C24 a viga apresentou dimensões 25 x 68 cm (Figura 57). Esse resultado permaneceu para todas as classes de resistências até a C35. Observou-se que dentro das condições impostas, foi necessário seguir com a variação da classe de resistência para que fossem encontradas alturas menores.

Figura 57: Simulação base (b) igual a 25 cm para classe C24.

urben CALCULADORA DE VIGAS DE MADEIRA ENGENHEIRADA (MLC) 0.4

DADOS DE ENTRADA

Nome: Vão (cm):

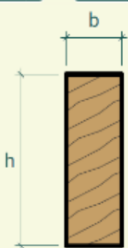
MATERIAIS E PROPRIEDADES

Classe de Resistência:

SEÇÃO TRANSVERSAL

Biblioteca SKU Urbem: b: h:

ou Entrada de dados manual: b: cm h: cm

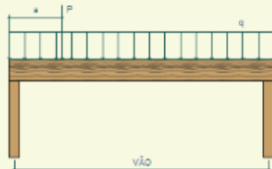


CONDIÇÕES DE CONTORNO

Bi-Apoiado Engastado Livre

Bi-Engastado Apoiado Engastado

CARGAS



Distribuidas Concentradas

Caso	Valor (tf/m)	Duração
PP	0.0714	PERMANENTE
Perm	0.879	PERMANENTE
Acid	1.271	LONGA

INCÊNDIO

TRRF: min

Fonte: Adaptado da CalculaTimber_MLC (2025).

Já as variações das classes de resistência de C40 até C50 resultaram em uma viga com seção de 25 x 64 cm, apresentado na Figura 58. No entanto, embora essas classes de resistência tenham apresentado uma diminuição na seção, para o dimensionamento optou-se pela menor classe de resistência, pois essa opção resulta no menor peso próprio.

Figura 58: Resultado da simulação b igual a 25 cm para classe C40.

CALCULADORA DE VIGAS DE MADEIRA ENGENHEIRADA (MLC) 0.4

DADOS DE ENTRADA

Nome: V.18 Vão (cm): 599

MATERIAIS E PROPRIEDADES

Classe de Resistência: C40

SEÇÃO TRANSVERSAL

Biblioteca SKU Urbem: b: 25, h: 64

ou Entrada de dados manual: b: 25 cm, h: 64 cm

CONDIÇÕES DE CONTORNO

Bi-Apoiado Engastado Livre

Bi-Engastado Apoiado Engastado

CARGAS

Distribuídas | Concentradas

Caso	Valor (tf/m)	Duração
PP	0.08	PERMANENTE
Perm	0.879	PERMANENTE
Acid	1.271	LONGA

INCÊNDIO

TRRF: 60 min

Fonte: Adaptado da CalculaTimber_MLC (2025).

Os resultados obtidos nas simulações das vigas estão apresentados na Tabela 17. A dimensão selecionada para a viga V18 a partir dessas análises foi a de 25 x 68 cm, classe C24. A escolha se baseia principalmente nas dimensões originais do projeto em concreto armado, onde tem-se as dimensões de 17 x 70 cm, e o cobrimento do reboco de 2,5 cm, obtêm-se uma dimensão de 22 x 72,5 cm. Dessa forma, para manter os critérios semelhantes ao projeto original de concreto, a utilização de uma classe de resistência maior para que ocorra uma diminuição na altura da viga em madeira engenheirada não se faz necessário. Mas ressalta-se que é mais interessante pensar nas melhores possibilidades para os componentes estruturais em madeira quando o projeto é concebido desde o princípio conforme as especificidades deste material.

Tabela 17: Resultado das simulações bi-apoiadas para a viga V18 em MLC

Seções da viga [cm]		Classe de resistência
b	h	
15	104	C22
15	96	C24
20	80	C22
20	76	C35
25	72	C22
25	68	C24
25	64	C40

Fonte: Autores (2025).

Além disso, as vigas presentes na Tabela 17, foram reanalisadas considerando a condição de contorno bi-engastada. Esses resultados estão apresentados na Tabela 18, em que, visualiza-se uma redução da seção, e conforme os resultados obtidos verifica-se que entre as classes C24 e C40 para a viga com base (“b”) igual a 25 cm as dimensões não possuem alterações.

Tabela 18: Resultado das simulações bi-engastadas para a viga V18 em MLC

Seções da viga [cm]		Classe de resistência
b	h	
15	100	C22
15	96	C24
20	76	C22
20	72	C35
25	64	C22
25	60	C24
25	60	C40

Fonte: Autores (2025)

4.2.3.3 Simulações do pilar P14

O pilar P14 foi identificado como o pilar com maior carregamento existente no projeto. A Tabela 19 apresenta os carregamentos apontados para a análise do P14. A altura considerada para as simulações foi de 272 cm, e as dimensões iniciais de 20 x 60 cm para a sua seção.

Tabela 19: Carregamento do pilar P14

Permanente	68,384 tf
Acidental	15,005 tf

Fonte: Autores (2025).

Ao inserir os dados mencionados na primeira simulação e utilizar a função “otimizar” para verificar a dimensão inserida, não foi possível encontrar soluções para o elemento, conforme Figura 59.

Figura 59: Simulação base (b) igual a 20 cm para classe C22

CALCULADORA DE PILARES DE MADEIRA 1.0

DADOS DE ENTRADA
 Nome: P14, l (cm): 272

MATERIAIS E PROPRIEDADES
 Classe de Resistência: C22

SEÇÃO TRANSVERSAL
 Biblioteca SKU Urbem: b: 20, h: 150
 ou Entrada de dados manual: b: 20 cm, h: 150 cm

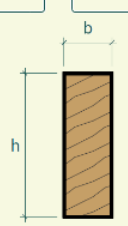
CONDIÇÕES DE CONTORNO
 Bi-Apoiado, Engastado Livre
 Bi-Engastado, Apoiado Engastado

Atenção: Não foi possível encontrar uma solução

CARGAS
 Concentradas

Caso	Nk (tf)	Mxk (tfm)	Myk (tfm)	Duração
Perm	68.384	0	0	PERMANENTE
Acid	15.005	0	0	LONGA

INCÊNDIO
 TRRF: 60 min



Fonte: Adaptado da CalculaTimber_MLC (2025).

Então, foram verificadas se com o aumento das dimensões seria possível atender os requisitos estabelecidos pela ABNT NBR 7190 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2022). No entanto, mesmo com o pilar obtendo dimensões de 20 x 150 cm não foi possível atender com a classe C22. Em decorrência disso, foram avaliadas as outras classes de resistências, onde obtiveram-se soluções quando a classe de resistência atingiu C45 e C50, conforme as Figuras 60 e 61.

Figura 60 Simulação base (b) igual a 20 cm para classe C45

CALCULADORA DE PILARES DE MADEIRA 1.0

DADOS DE ENTRADA
 Nome: P14, l (cm): 272

MATERIAIS E PROPRIEDADES
 Classe de Resistência: C45

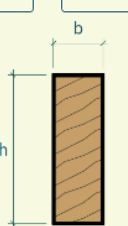
SEÇÃO TRANSVERSAL
 Biblioteca SKU Urbem: b: 20, h: 148
 ou Entrada de dados manual: b: 20 cm, h: 148 cm

CONDIÇÕES DE CONTORNO
 Bi-Apoiado, Engastado Livre
 Bi-Engastado, Apoiado Engastado

CARGAS
 Concentradas

Caso	Nk (tf)	Mxk (tfm)	Myk (tfm)	Duração
Perm	68.384	0	0	PERMANENTE
Acid	15.005	0	0	LONGA

INCÊNDIO
 TRRF: 60 min



Fonte: Adaptado da CalculaTimber_MLC (2025).

Figura 61: Simulação base (b) igual a 20 cm para classe C50

CALCULADORA DE PILARES DE MADEIRA 1.0

DADOS DE ENTRADA

Nome: P14 l (cm): 272

MATERIAIS E PROPRIEDADES

Classe de Resistência: C50

SEÇÃO TRANSVERSAL

Biblioteca SKU Urbem: b: 20, h: 140
 ou Entrada de dados manual: b: 20 cm, h: 140 cm

CONDIÇÕES DE CONTORNO

Bi-Apoiado Engastado Livre
 Bi-Engastado Apoiado Engastado

$l_e = l$

CARGAS

Concentradas

Caso	Nk (tf)	Mxk (tfm)	Myk (tfm)	Duração
Perm	68.384	0	0	PERMANENTE
Acid	15.005	0	0	LONGA

INCÊNDIO

TRRF: 60 min

Fonte: Adaptado da CalculaTimber_MLC (2025).

Contudo, as dimensões obtidas para C45 e C50 foram respectivamente 20 x 148 cm e 20 x 140 cm, valores além do esperado para a solução deste estudo de caso. De tal modo, trocou-se a seção “b” de 20 para 25 cm, e por fim, a análise foi refeita com a classe de resistência C22, conforme Figura 62.

Figura 62: Simulação base (b) igual a 25 cm para classe C22.

CALCULADORA DE PILARES DE MADEIRA 1.0

DADOS DE ENTRADA

Nome: P14 l (cm): 272

MATERIAIS E PROPRIEDADES

Classe de Resistência: C22

SEÇÃO TRANSVERSAL

Biblioteca SKU Urbem: b: 25, h: 92
 ou Entrada de dados manual: b: 25 cm, h: 92 cm

CONDIÇÕES DE CONTORNO

Bi-Apoiado Engastado Livre
 Bi-Engastado Apoiado Engastado

$l_e = l$

CARGAS

Concentradas

Caso	Nk (tf)	Mxk (tfm)	Myk (tfm)	Duração
Perm	68.384	0	0	PERMANENTE
Acid	15.005	0	0	LONGA

INCÊNDIO

TRRF: 60 min

Fonte: Adaptado da CalculaTimber_MLC (2025).

Em seguida foram realizadas análises com variações nas classes de resistências de C24 até C50, os resultados obtidos descritos na Tabela 20.

Tabela 20: Resultado das análises b igual a 25 cm bi-apoiado para o pilar P14 em MLC

Seções do pilar [cm]		Classe de resistência
b	h	
25	84	C24
25	80	C27
25	80	C30
25	76	C35
25	72	C40
25	68	C45
25	64	C50

Fonte: Autores (2025).

Para o pilar P14 em madeira engenheirada, foi selecionada a classe C35, com uma resistência à compressão paralela às fibras de 25 MPa, com seção de 25 x 76 cm, bi-apoiado. E, para avaliar se as seções do pilar diminuem conforme a condição de contorno, comparou-se o P14: bi-apoiado, apoiado engastado e bi-engastado. Os resultados dessa análise estão presentes na Tabela 21.

Tabela 21: Comparativo do pilar P14 classe C35 bi-apoiado X apoiado engastado X bi-engastado

	Bi-Apoiado		Apoiado Engastado		Bi-Engastado	
	b [cm]	h [cm]	b [cm]	h [cm]	b [cm]	h [cm]
C35	25	76	25	60	25	52
Área [cm²]	1900		1500		1300	

Fonte: Autores (2025).

De acordo com a Tabela 21, se houver a possibilidade de garantir, por meio de ligações, o engaste em pelo menos um dos dois apoios do pilar é possível obter uma redução significativa da área da madeira utilizada para a resistência dos esforços normais.

4.2.4 Valores finais adotados para o estudo de caso em madeira engenheirada

Após as simulações, conforme a premissa inicial estabelecida de manter os

elementos estruturais como bi-apoiados, adotaram-se para o estudo de caso as seguintes dimensões finais:

- laje L1 em CLT: classe C24, altura 18 cm;
- viga V18 em MLC: classe C24, seção 25 x 68 cm;
- pilar P14 em MLC: classe C35, seção 25 x 76 cm;

Os memoriais de cálculo para a laje L1, viga V18 e pilar P14 gerados nas calculadoras Urbem estão nos Apêndices 02 ao 04.

Os Apêndices 05 ao 07 apresentam as dimensões dos ajustes dessas dimensões feitos no Excel conforme dimensões do catálogo da empresa Urbem e as dimensões finais adotadas após análise estrutural nas calculadoras da empresa Urbem. Essas dimensões finais adotadas foram utilizadas na elaboração da modelagem final do projeto.

Observou-se que, na maioria dos casos, houve um aumento no volume da madeira, evidenciando a inviabilidade de uma conversão direta dos elementos em concreto armado para madeira engenheirada em um projeto. O potencial da madeira precisa ser explorado conhecendo e aplicando as características do material desde o início do projeto, sem adaptações entre materiais.

Por fim, realizou-se uma comparação entre os elementos de madeira ajustados conforme o catálogo das calculadoras Urbem e os elementos efetivamente adotados no projeto. Observou-se que a variação das cargas totais nos pilares de madeira engenheirada variou entre 0,19% e 2,20%. Esses dados podem ser verificados no Apêndice 08, onde são apresentados os valores de N_{k1i} (inicial - ajustado) e N_{k1f} (final - adotado).

4.3 Ajuste das dimensões dos componentes modelados conforme os valores adotados na análise estrutural

Nesta etapa da pesquisa, primeiro, foram comparados os níveis de detalhes e os níveis de informações dos elementos estruturais contidos nas Calculadoras Urbem com os da biblioteca e do *template* da Urbem. Se estes eram iguais, mantinha-se o valor adotado. Se eram diferentes, foram feitos ajustes na modelagem para aplicar os valores adotados na análise estrutural. Os níveis de detalhamento na modelagem deste estudo não foram alterados, ou seja, foram mantidos os detalhamentos que a

empresa Urbem disponibilizou no *template* e na biblioteca.

4.3.1 Comparação entre Calculadora Urbem x *Template* Urbem: elementos em CLT

A calculadora Urbem utilizada para análise estrutural das lajes em CLT foi a CalculaTimber_CLT. As informações de números de camadas e alturas de painéis contidas nesta calculadora foram apresentadas na Tabela 08.

O *template* da Urbem utilizado para a modelagem do projeto no *software* Revit apresenta algumas famílias de painéis de CLT com 3 e 5 camadas. No *template*, além da dimensão total e do número de camadas, estes elementos apresentam as espessuras de cada camada e a orientação referencial a cada uma delas, sendo horizontal ou vertical, conforme Figura 63. A partir das famílias existentes, é possível duplicar um elemento para ter um novo painel com as camadas e as dimensões necessárias de projeto e/ou de fabricação.

Figura 63: Composição do painel em CLT no *template* Revit da empresa Urbem

AS CONFIGURAÇÕES PRESENTES NA LAJE SÃO AS MESMAS USADAS NA PAREDE DE CLT

ITEM 01 - CAMADAS EXISTENTES NO ELEMENTO

Function	Material	Thickness
1 Core Boundary	Layers Above Wrap	0,00
2 Structure [1]	URBEM - Cross Laminated Timber (CLT) Horizontal	4,00
3 Structure [1]	URBEM - Cross Laminated Timber (CLT) Vertical	4,00
4 Structure [1]	URBEM - Cross Laminated Timber (CLT) Horizontal	4,00
5 Structure [1]	URBEM - Cross Laminated Timber (CLT) Vertical	4,00
6 Structure [1]	URBEM - Cross Laminated Timber (CLT) Horizontal	4,00
7 Core Boundary	Layers Below Wrap	0,00

PREENCHIMENTO MANUAL CONFORME AS CAMADAS DEFINIDAS NO ITEM 01

PAREDE CLT

LAJE CLT

Fonte: Adaptado de CalculaTimber_CLT e Biblioteca BIM da empresa Urbem (2025).

Ao comparar os dados da CalculaTimber_CLT com os dados do *template* Urbem, verificou-se que existem painéis que estão presentes e em conformidade nas duas ferramentas. Mas existem outros painéis, ora destacados em vermelho na Figura 64, que só estão contidos na calculadora ou no *template*. Ainda, existem painéis que,

além de estarem apenas na calculadora, também não têm suas informações completas, como os painéis de 7 camadas destacados em alaranjado nas Figuras 64 e 65.

Figura 64: Comparativo entre painéis em CLT contidos na calculadora *CalculaTimber_CLT* e no *template Urbem*

CALCULADORA URBEM	TEMPLATE REVIT URBEM
CATÁLOGO DE PAINÉIS	URBEM - CLT 5 - 200 mm
Painel	Genérico 150 mm
URBEM-CLT-TL-100X3L	Laje 10 cm
URBEM-CLT-TL-110X3L	URBEM - CLT 3 - 80 mm
URBEM-CLT-TL-120X3L	URBEM - CLT 3 - 100 mm
URBEM-CLT-TL-140X5L	URBEM - CLT 3 - 120 mm
URBEM-CLT-TL-160X5L	URBEM - CLT 5 - 100 mm
URBEM-CLT-TL-180X5L	URBEM - CLT 5 - 130 mm
URBEM-CLT-TL-200X5L	URBEM - CLT 5 - 150 mm
URBEM-CLT-TL-240X7E	URBEM - CLT 5 - 160 mm
URBEM-CLT-TL-260X7E	URBEM - CLT 5 - 180 mm
URBEM-CLT-TL-280X7E	URBEM - CLT 5 - 200 mm

Fonte: Adaptado de *CalculaTimber_CLT* (2025).

Figura 65: Destaque aos painéis em CLT com 7 camadas contidos na calculadora *CalculaTimber_CLT*

CATÁLOGO DE PAINÉIS							
ESPESSURA DAS LAMELAS (mm)							
Painel	Long.	Transv.	Long.	Transv.	Long.	Transv.	Long.
URBEM-CLT-TL-100X3L	40	20	40	0	0	0	0
URBEM-CLT-TL-110X3L	40	30	40	0	0	0	0
URBEM-CLT-TL-120X3L	40	40	40	0	0	0	0
URBEM-CLT-TL-140X5L	40	20	20	20	40	0	0
URBEM-CLT-TL-160X5L	40	20	40	20	40	0	0
URBEM-CLT-TL-180X5L	40	30	40	30	40	0	0
URBEM-CLT-TL-200X5L	40	40	40	40	40	0	0
URBEM-CLT-TL-240X7E	80	20	40	20	80	0	0
URBEM-CLT-TL-260X7E	80	30	40	30	80	0	0
URBEM-CLT-TL-280X7E	80	40	40	40	80	0	0
	1ª CAMADA	2ª CAMADA	3ª CAMADA	4ª CAMADA	5ª CAMADA	6ª CAMADA	7ª CAMADA

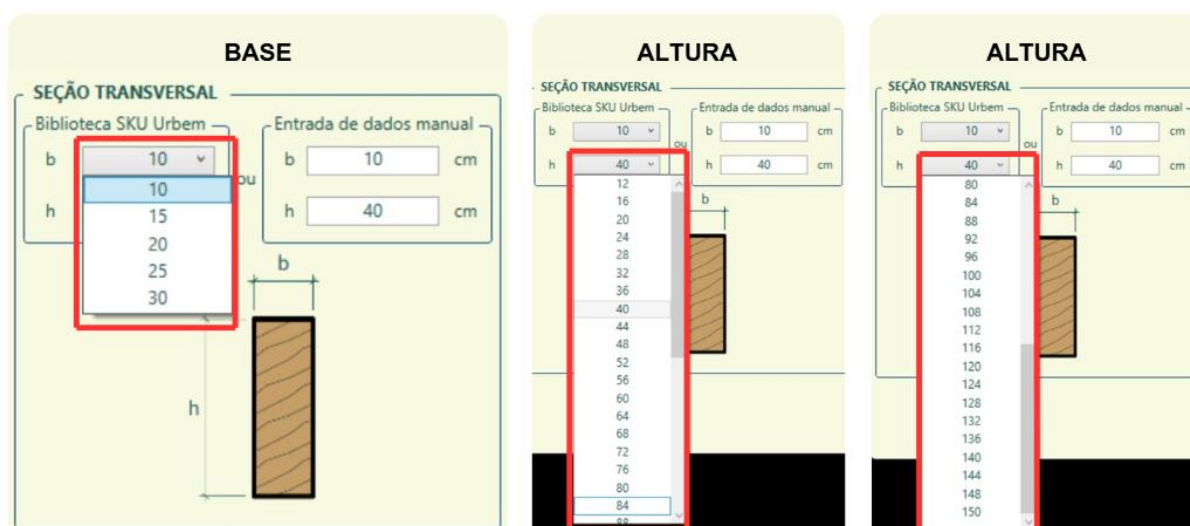
Fonte: Adaptado de Biblioteca BIM da empresa Urbem (2025).

Para o estudo de caso, foram selecionados apenas painéis de laje com 5 camadas, os quais foram verificados na calculadora e posteriormente aplicados na modelagem. Portanto, as inconsistências entre calculadora e *template* para painéis de CLT não interferiram neste estudo.

4.3.2 Comparação entre Calculadora Urbem x Biblioteca Revit Urbem: elementos em MLC

A análise comparativa para os elementos em MLC foi baseada nas especificações apresentadas nas ferramentas *CalculaTimber_Column* e *CalculaTimber_MLC*, utilizadas para o dimensionamento de pilares e vigas de MLC, respectivamente. As dimensões das seções de pilares e vigas contidas nestas calculadoras foram apresentadas com valores inteiros em centímetros na Tabela 09. Estas dimensões para a seção (base x altura) também podem ser observadas na Figura 66.

Figura 66: Dimensões para seções de vigas e pilares contidas nas calculadoras Urbem para MLC

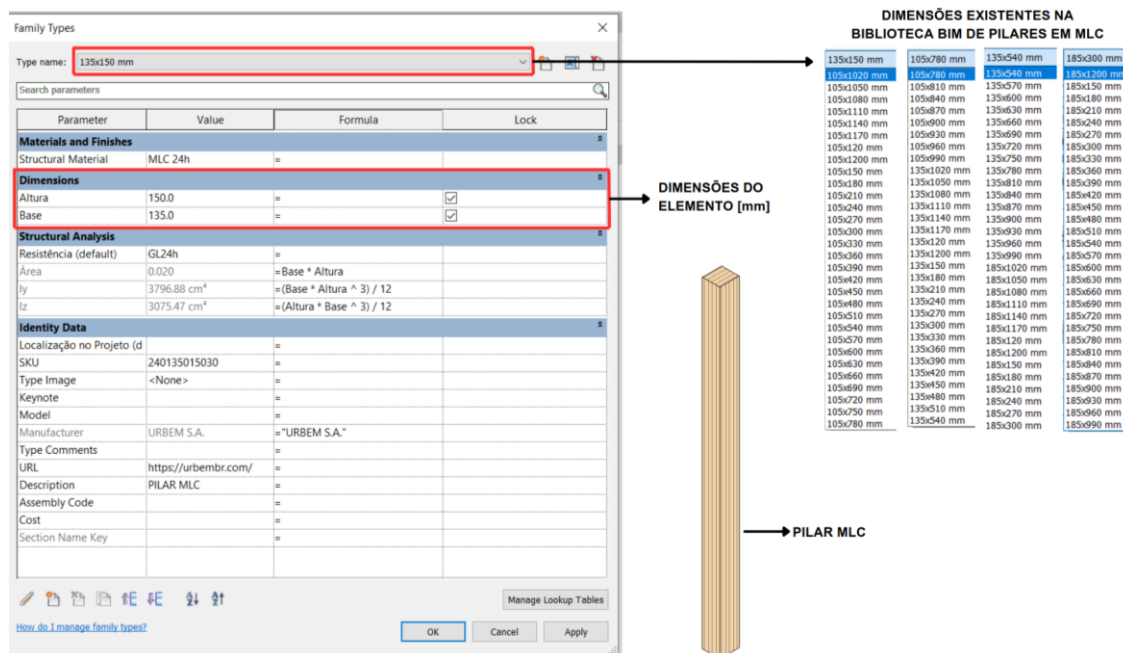


Fonte: Adaptado de *CalculaTimber_Column* e *CalculaTimber_MLC* (2025).

Por sua vez, o arquivo *template* da Urbem não possuía famílias para os elementos de vigas e pilares em MLC. Contudo, a empresa disponibiliza, em seu site, uma biblioteca com estes elementos, os quais foram inseridos no arquivo de modelagem no *software* Revit.

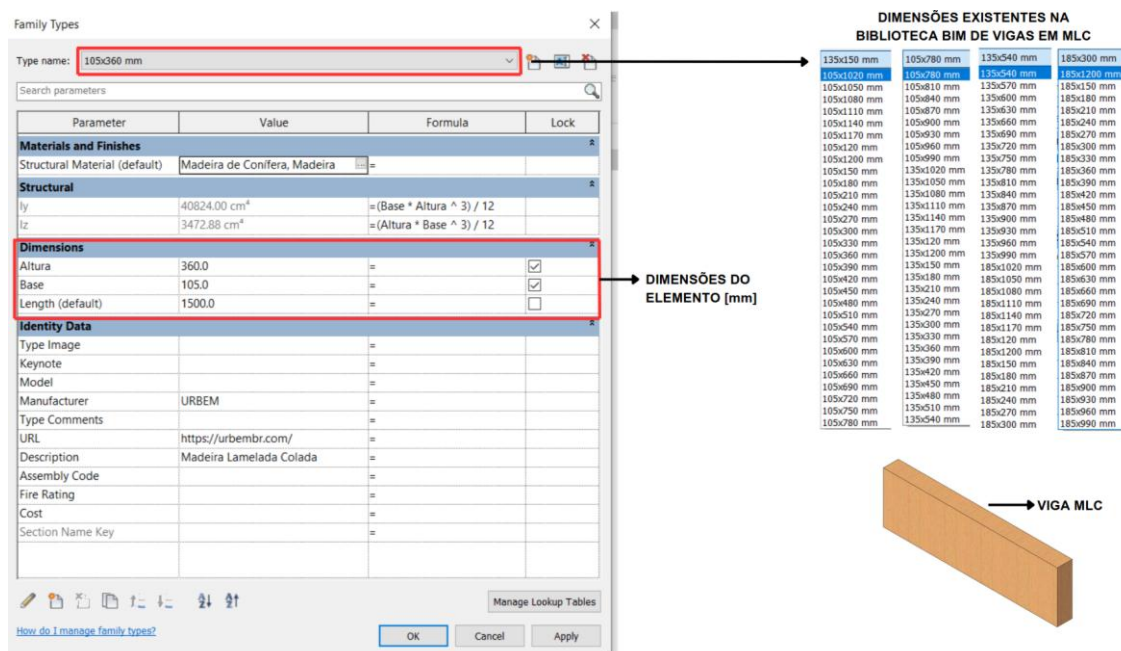
Entretanto, diferente do painel em CLT, as famílias de pilar e viga em MLC não fornecem informações sobre as camadas. Os componentes em MLC apresentam apenas dados das dimensões totais, ou seja, das seções transversais para pilar e viga. A Figura 67 apresenta as dimensões existentes em valores inteiros em milímetros contidos na biblioteca BIM da Urbem para pilares em MLC. E a Figura 68 apresenta os valores para as vigas em MLC na biblioteca BIM Urbem.

Figura 67: Dimensões existentes na biblioteca BIM da Urbem para pilares em MLC



Fonte: Adaptado de Biblioteca BIM da empresa Urbem (2025).

Figura 68: Dimensões existentes na biblioteca BIM da Urbem para vigas em MLC



Fonte: Adaptado de Biblioteca BIM da empresa Urbem (2025).

Ao comparar os valores existentes para vigas e pilares nas calculadoras Urbem com os valores presentes na biblioteca Urbem, observou-se, primeiramente, uma diferença de unidades – centímetros versus milímetros – o que afeta a precisão das dimensões no projeto. Além disso, as dimensões disponíveis na calculadora,

utilizadas para a análise estrutural, não estavam presentes na biblioteca para a modelagem no Revit. Assim, foi necessário duplicar os componentes de pilar e viga da biblioteca para criar novos elementos, de acordo com as dimensões existentes e analisadas na calculadora Urbem.

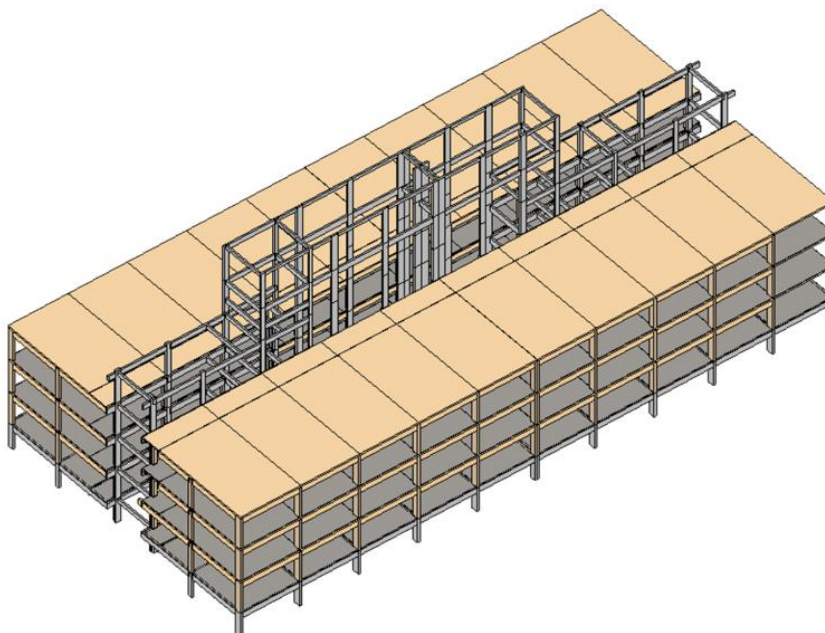
Por fim, como nem calculadora, nem a biblioteca Urbem apresentaram informações para as camadas de pilares e vigas, com suas espessuras, optou-se por deixar sem estas informações no estudo de caso.

4.3.3 Ajuste de modelagem com as dimensões finais

Após os comparativos entre os dados das calculadoras e os dados dos componentes no Revit, os elementos da modelagem 3D foram ajustados conforme estabelecidos na análise estrutural. Na Figura 69 está apresentada uma perspectiva 3D do estudo de caso com as dimensões ajustadas.

Por exemplo, para a laje L1, foi aplicada a família existente no *template* Urbem de laje em CLT com 5 camadas, com altura total de 18 cm, conforme verificada estruturalmente na calculadora. Para a viga V18, foi duplicado um elemento de viga em MLC existente na biblioteca Urbem e seus valores foram editados para seção 25 x 68 cm, conforme análise estrutural na calculadora. E, por fim, para o pilar P14, também ocorreu a necessidade de duplicar e ajustar a dimensão do elemento existente na biblioteca Urbem para a seção 25 x 76 cm conforme análise na calculadora.

Figura 69: Edifício em madeira engenheirada



Fonte: Autores (2025).

Cada componente de pilar, viga e laje foi modelado no 1º pavimento, conforme as dimensões adotadas na análise estrutural, e, posteriormente, foram replicados para os pavimentos tipo do estudo de caso.

Ainda, durante a modelagem da estrutura, verificou-se que, para a concepção de modelos bi-apoiados, todos os elementos deveriam possuir a mesma altura de pilar e viga, garantindo um apoio adequado nos elementos de descarga de carga. No entanto, constatou-se que esse modelo não é sustentável nem aplicável quando há a necessidade de variação de altura dos elementos por razões econômicas ou arquitetônicas. Dessa forma, o modelo bi-apoiado mostrou-se impraticável para a complexidade do caso estudado, sendo mais adequado para construções menores e menos complexas.

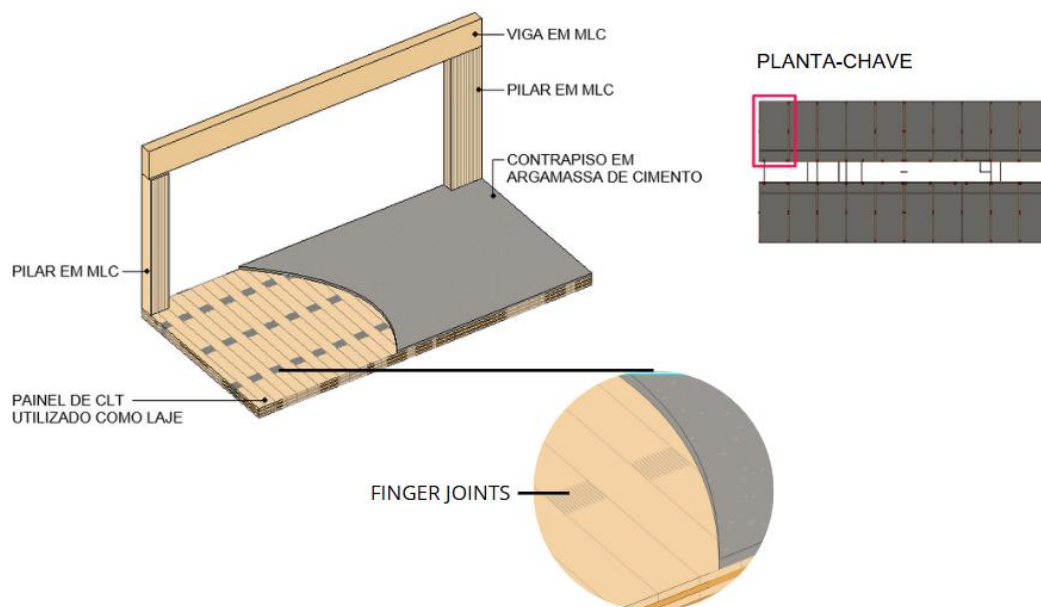
Diante desse contexto, observou-se que o modelo estrutural se concebido considerando algumas ligações entre viga e pilar como bi-engastadas resultariam em uma estrutura mais otimizada. Essa abordagem contribuiria para reduzir problemas de compatibilização dentro do modelo arquitetônico, promovendo uma melhor integração entre os elementos estruturais e arquitetônicos e otimizando o desempenho da estrutura.

Para verificar essas possíveis inconsistências entre elementos estruturais, é importante elevar o número de detalhamentos, incluindo, por exemplo, os conectores

metálicos entre as peças.

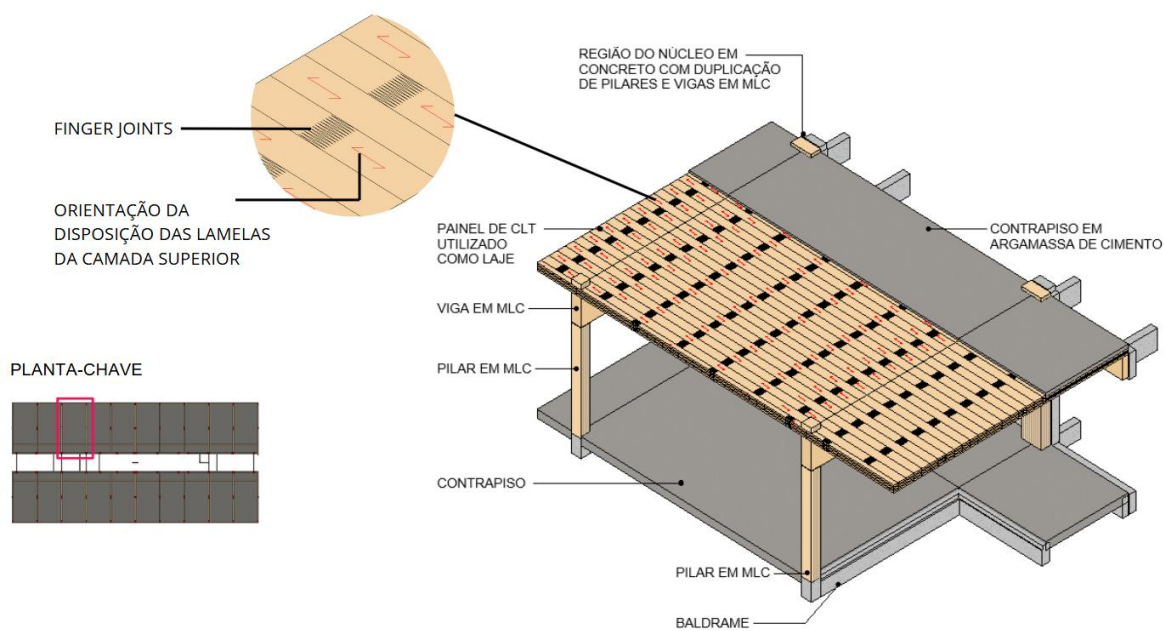
Nas Figuras 70 e 71, estão apresentadas duas ampliações da edificação com detalhamentos realizados conforme projeto em madeira engenheirada.

Figura 70: Detalhe construtivo 01



Fonte: Autores (2025).

Figura 71: Detalhe construtivo 02



Fonte: Autores (2025).

4.4 Comparativo entre Estrutura de concreto armado e Estrutura de madeira engenheirada

A Tabela 22 apresenta um comparativo para as dimensões das seções das vigas e pilares originais em concreto armado com as seções das vigas e pilares adotados em MLC.

Tabela 22: Comparativo entre dimensões dos pilares e vigas em concreto armado e MLC

Elemento	Vão [cm]	Concreto Armado				Madeira engenheirada final adotado (MLC)			
		B [cm]	H [cm]	Massa específica [tf/m ³]	Peso próprio [tf]	B [cm]	H [cm]	Massa específica [tf/m ³]	Peso próprio [tf]
Viga – V18	599	17	70	2,5	1,782	25	68	0,42	0,427
Pilar – P14	272	20	60	2,5	0,816	25	76	0,48	0,248

Fonte: Autores (2025).

No caso da viga V18, o peso próprio do concreto armado de 1,782 tf reduziu para 0,427 tf na madeira engenheirada, representando uma diminuição de 76%. Entretanto, o volume de material aumentou de 0,712 m³ de concreto para 1,018 m³ de madeira, um acréscimo de 43%.

Para o pilar P14, o peso próprio do concreto armado reduziu de 0,816 tf para 0,248 tf em madeira engenheirada, uma redução de 69%. No entanto, o volume de material aumentou de 0,326 m³ de concreto para 0,516 m³ de madeira, correspondendo a um acréscimo de 58%.

Essa análise evidencia a vantagem da madeira engenheirada em relação ao concreto armado no que diz respeito à redução do peso próprio dos elementos estruturais.

A mesma comparação não foi realizada para a laje devido à falta de dados específicos sobre a laje nervurada original do projeto em concreto armado. Os materiais disponibilizados apresentam apenas a especificação de uma laje nervurada com altura total de 22 cm, sem informações sobre a altura das nervuras, impossibilitando o cálculo do volume e, conseqüentemente, do peso próprio.

Estes resultados reforçam a argumentação de Lotufo Oliveira (2023), ao afirmar que não se trata apenas da simples substituição de elementos tradicionais por madeira engenheirada. É fundamental que a concepção do projeto arquitetônico seja

pensada desde o início considerando esse material, pois, apesar da redução no peso próprio dos elementos estruturais, o aumento do volume pode impactar diretamente a configuração do projeto arquitetônico. Dessa forma, torna-se essencial a integração dessa abordagem desde as fases iniciais do desenvolvimento.

No Apêndice 09, apresenta-se a comparação entre os esforços característicos entre concreto armado e madeira engenheirada com os valores finais adotados para madeira engenheirada. Observou-se que a redução percentual dos esforços nos pilares variou de 27,26% a 65,89%, indicando uma possível economia na concepção da fundação da edificação.

Cabe ressaltar que os pilares duplicados P27, P28, P29, P30, P31, P32, P33, P34, P35, P36, P37, P38, P42, P43, P44, P45, P46, P47, P48, P49, P50, P51 e P52 não foram incluídos nesta análise comparativa, devido a não estarem submetidos ao mesmo carregamento.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Durante esta pesquisa, observou-se que a Urbem era a única empresa brasileira que disponibilizava gratuitamente em seu site calculadoras para análise estrutural da madeira engenheirada e componentes com informações para painel em CLT (*template*) e para pilar e viga em MLC (biblioteca) para a modelagem da construção no *software* Revit.

As calculadoras disponibilizadas pela empresa Urbem para a análise estrutural de madeira engenheirada possibilitaram uma avaliação mais rápida das seções estruturais de CLT e MLC para o estudo de caso. A compatibilidade de uma ferramenta computacional de análise estrutural com os produtos disponíveis no mercado pode otimizar a concepção do projeto, tornando-o mais eficiente e acessível, incentivando o uso da madeira engenheirada que ainda é desconhecida por muitos.

As calculadoras utilizadas, além de facilitarem o dimensionamento dos elementos estruturais, permitiram a realização de verificações essenciais para garantir a segurança e viabilidade do projeto, conforme os critérios para Estado Limite Último (ELU) e Estado Limite de Serviço (ELS) segundo as normas para estruturas de madeira. Além disso, a função “otimizar” permite realizar várias simulações que são importantes para definições iniciais de projeto. Dessa forma, essas ferramentas proporcionam um fluxo de projeto confiável, contribuindo para a expansão do uso da madeira engenheirada no Brasil.

Entretanto, ao comparar os componentes em CLT e MLC contidos nas calculadoras Urbem com aqueles presentes na biblioteca Urbem e no *template* Urbem para modelagem, foram identificadas algumas diferenças, como ausência de componentes, variação nas dimensões das seções, dados incompletos para as camadas dos painéis e diferentes níveis de informação para as camadas de CLT e MLC. Portanto, para que a ferramenta seja mais eficaz no uso diário por projetistas, é necessário compatibilizar os dados da biblioteca BIM com os dados das calculadoras, e vice-versa. Também, é importante manter esses valores mais evidentes e atualizados, conforme a disponibilidade comercial da empresa para estes produtos. Assim, o projetista pode compreender com mais facilidade alguns critérios colocados pela empresa nas suas ferramentas.

Em geral, durante a análise estrutural e a modelagem do estudo de caso para

madeira engenheirada, concluiu-se que projetar uma construção em concreto e depois adaptá-la para madeira não é aconselhável. A concepção deve considerar as características específicas da madeira desde o início.

Por exemplo, neste estudo de caso adaptado para madeira engenheirada, foi observado que no pilar e na viga mais carregados houve um aumento no volume de material quando comparadas as estruturas de concreto armado e madeira, sendo de 58% e 43%, respectivamente, o que influencia significativamente nas intenções do projetista.

Nesse estudo, toda a análise foi conduzida considerando os elementos como simplesmente apoiados. Mas, as simulações realizadas modificando as ligações entre peças para bi-engastadas ou engastadas demonstraram como é possível reduzir as dimensões da estrutura em madeira engenheirada com a adoção de diferentes tipos de ligação.

No entanto, mesmo com ganho de volume no estudo de caso, a madeira ainda apresentou vantagem em relação ao peso. Nas simulações finais, o pilar de concreto armado reduziu de 0,816 tf para 0,248 tf com a madeira engenheirada, resultando em uma redução de 69%. E a viga obteve uma redução de 1,782 tf do concreto armado para 0,427 tf na madeira engenheirada, representando uma diminuição de 76%.

E, ao comparar as cargas características do projeto estrutural em madeira com as do projeto original em concreto armado, percebe-se uma diminuição considerável das cargas atuantes que variaram de 27,26% a 65,89%. Essa redução de cargas pode significar uma economia nas fundações.

Portanto, modelos estruturais que funcionam para concreto podem não ser sustentáveis ou aplicáveis para madeira. Diferentes abordagens, que devem incluir o projeto e a análise das ligações metálicas, podem otimizar o desempenho estrutural quando se projeta em madeira. Integrar a madeira engenheirada na fase inicial do projeto é essencial para uma estrutura mais eficiente e bem-sucedida.

Para trabalhos futuros, sugere-se analisar aspectos não considerados neste estudo, como o custo, a influência do vento na estrutura, a logística de montagem da obra e as condições de acesso para caminhões e peças no local, as ligações estruturais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, Amanda Ceinoti de; HIROSAWA, Jessica Lie; MARIANO, Isabela Messias; SILVA, Ricardo Dias. **Panorama internacional e nacional do uso e aplicação do sistema construtivo Cross Laminated Timber – CLT.** *Conjecturas*, v. 22, p. 672-701, 2022. DOI: 10.53660/CONJ-1713-2H56.

AMERICAN NATIONAL STANDARD. **Standard for Performance-Rated Cross-Laminated Timber.** ANSI/APA PRG 320-2019. Tacoma: APA – The Engineered Wood Association, 2020. Disponível em: <http://www.apawood.org>. Acesso em: 13 ago. 2024.

APA - The Engineered Wood Association **Glulam Product Guide.** 2023. Disponível em: <https://www.apawood.org/glulam>. Acesso em: 18 abr. 2024.

APA – The Engineered Wood Association. **Engineered Wood Construction Guide.** Edição E30X. Tacoma, WA: APA, 2019. Disponível em: <https://www.apawood.org/publication-search?q=construction+guide&tid=1>. Acesso em: 18 abr. 2024.

APA – The Engineered Wood Association (ed.). **Glulam: versatile engineered wood product delivers strength, beauty, and reliability.** Versatile Engineered Wood Product Delivers Strength, Beauty, and Reliability. 2022. Disponível em: <https://www.apawood.org/glulam>. Acesso em: 18 abr. 2024.

AUTODESK. **hsbTimber for Autodesk® Revit®** | Revit | Autodesk App Store. Disponível em: <https://apps.autodesk.com/RVT/en/Detail/Index?id=5467993452554699249&appLanguage=en&os=Win64>. Acesso em: 30 jul. 2024.

BARBOSA, Victor Wanderley. **Modelagem Paramétrica e Análise Estrutural de Malha de Madeira.** 2018. 44 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande,

Campina Grande, 2018.

Brandner, R., Flatscher, G., Ringhofer, A. *et al.* **Cross laminated timber (CLT): overview and development.** *Eur. J. Wood Prod.* **74**, 331–351 (2016). Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00107-015-0999-5>. Acesso em: 11 fev. 2025.

CADWORK. Disponível em: <https://cadwork.ca/en/>. Acesso em: 08 ago. 2024.

CALIL JUNIOR, Carlito *et al.* **SET 406 - Estruturas de Madeira.** São Carlos: Universidade de São Paulo, 1998. Notas de aula.

CALIL NETO, Carlito. **Madeira Laminada Colada (MLC): controle de qualidade em combinações espécie-adesivo-tratamento preservativo.** 2011. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011. doi:10.11606/D.88.2011.tde-19042011-171909. Acesso em: 18 abr. 2024.

CALIL NETO, Carlito. **O primeiro prédio de madeira massiva (Massive Timber) do Brasil.** 2022. Disponível em: <https://rewood.com.br/artigo/entenda-o-processo-de-acabamento-de-madeira-engenheirada-2>. Acesso em: 3 abr. 2024.

CALIL NETO, Carlito; BASTOS, Paulo. **Madeira laminada colada vence grandes vãos e permite estruturas curvas: pré-fabricado, material conhecido pela sigla mlc se destaca pela alta capacidade de carga e baixo peso próprio. pouco usada no brasil, a solução apresenta custo elevado. Pré-fabricado, material conhecido pela sigla MLC se destaca pela alta capacidade de carga e baixo peso próprio. Pouco usada no Brasil, a solução apresenta custo elevado.** 2017. Texto: Redação AECweb/e-Consturmarket. Disponível em: <https://www.aecweb.com.br/revista/materias/madeira-laminada-colada-vence-grandes-vaos-e-permite-estruturas-curvas/15174>. Acesso em: 18 abr. 2024.

COSTA, Ana Alexandra Pontes da. **Construção de edifícios com cross laminated timber (CLT).** 2013. Dissertação de Mestrado. Universidade do Porto (Portugal).

COUNCIL ON TALL BUILDING AND URBAN HABITAT. **Tall Timber: Mass Timber for High-Rise Buildings**. Chicago: CBTUH, 2023. Disponível em: https://store.ctbuh.org/index.php?controller=attachment&id_attachment=186. Acesso em: 11 fev. 2025.

CHEN, Zhiyong; TUNG, Dorian; KARACABEYLI, Erol. *Modelling of Timber Structures*. In: **WORLD CONFERENCE ON TIMBER ENGINEERING (WCTE 2023)**, 2023, Oslo. *Proceedings [...]*. Oslo: WCTE 2023, 2023. p. 2288-2297. DOI: 10.52202/069179-0303.

CRESPELL, Pablo ; GAGNON, Sylvain. **Cross-Laminated Timber : a Primer**. 2010. Pointe-Claire FPInovations, 2010. Disponível em : <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://www.tboake.com/2018/CLT%20primer.pdf>. Acesso em: 10 fev. 2025.

CROSSLAM. **CONHECENDO SOBRE O CROSS LAMINATED TIMBER (CLT)**. 2020. Disponível em: https://issuu.com/alandias/docs/manual_do_clt. Acesso em: 9 fev. 2025.

DASSAULT SYSTÈMES. **Building Design Software for Construction | CATIA**. Disponível em: <https://www.3ds.com/products/catia/construction>. Acesso em: 30 jul. 2024.

DAYKIN, Tom. **The construction of an unusual downtown Milwaukee apartment tower, the mass timber Ascent, has achieved a key milestone**. 2021. Disponível em: <https://www.jsonline.com/story/money/real-estate/commercial/2021/12/21/downtown-milwaukee-mass-timber-high-rise-ascent-reaches-key-milestone/8970456002/>. Acesso em: 3 abr. 2024.

DAWSON, Emily; ANDERSON, Roy; MUSZYNSKI, Lech. *International Mass Timber Report*. Missoula: Forest Business Network, 2022. Disponível em: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://timberfinance.ch/wp->

content/uploads/2023/05/2023-International-Mass-Timber-Report_Faster-Download-1.pdf. Acesso em: 10 fev. 2025

DE OLIVEIRA, Fabiana Lopes; LOTUFO OLIVEIRA, Gabriela; BRAZOLIN, Sérgio. **A Madeira Industrializada na Arquitetura Contemporânea Brasileira**. São Paulo, 2023.

DE SOUSA, Ivan Fernando Barbosa Gomes. **Construção de um edifício em madeira (CLT)**. 2020. Tese de Doutorado. link: <https://recipp.ipp.pt/handle/10400.22/16820>

DEMERCHANT, Christine. **Resorcinol Adhesives Characteristics and uses**. Disponível em: <https://www.christinedemerchant.com/adhesive-glue-resorcinol.html>. Acesso em: 25 jul. 2024.

DEPIERI, Rafael; SANTOS, Andressa Carolina Elvino; COSTA, Odilon Antonio Leme da. **O uso sustentável do Pinus elliottii para a fabricação do MLC – Madeira Laminada Colada**. FOCO: Caderno de Estudos e Pesquisas, v. 15, 2018. Disponível em: <https://www.revistafoco.inf.br/index.php/FocoFimi/article/view/668>. Acesso em: 11 jul. 2024.

DIAS, Alan. **COMO A MADEIRA VAI SE TRANSFORMAR NO PRINCIPAL MATERIAL DE CONSTRUÇÃO DE EDIFÍCIOS DE MÚLTIPLOS ANDARES**. São Paulo: [S.I.], 2018. 176 p

DIETRICH'S. **Applications**. Disponível em: <https://www.dietrichs.com/en/applications/>. Acesso em: 30 jul. 2024.

EASTMAN, C. et al. **Manual BIM: um guia de modelagem da informação da construção para arquitetos, engenheiros, gerentes, construtores e incorporadores**. Porto Alegre: Bookman, 2014.

ENGENHEIRO MADEIREIRO. **A madeira laminada colada e suas curvas**. 2018.

Disponível em: <https://engenheiromadeireiro.blogspot.com/2018/07/a-madeira-laminada-colada-e-suas-curvas.html>. Acesso em: 04 ago. 2024.

FERREIRA, Felipe; LUZETTI, Julia; RUBERTI, Joice Paulina. **Mapa de acesso ao Programa de Gestão de Manutenção Preventiva do IFSC - Florianópolis**. 2020. Disponível em: <https://drive.google.com/file/d/1I3nhnYko-x7F6vrkBuyR6hArbQZ4NPSm/view>. Acesso em: 04 ago. 2024.

FRIHART, C. R.; HUNT, C. G. **Adhesives with wood materials bond formation and performance**. Madison: Forest Service, 2010, Chap. 10 (USDA FPL General Technical Report, 190).

GIL, Antônio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002.

GRAPHISOFT. **Archiframe** – **Graphisoft**. Disponível em: <https://graphisoft.com/partner-solutions/archiframe>. Acesso em: 30 jul. 2024.

GRASSHOPPER. **Grasshopper - algorithmic modeling for Rhino**. Disponível em: <https://www.grasshopper3d.com/>. Acesso em: 30 jul. 2024.

IBÁ. **Relatório Anual. 2023**. Disponível em: <https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-anual-iba2023-r.pdf>. Acesso em: 19 jul. 2024.

INO, Akemi; SHIMBO, Lucia. **Projetar e construir com madeira**. São Paulo: Blucher; 2024.

KANEHIRA, Caroline. **USO DA MADEIRA NA CONSTRUÇÃO CIVIL NO MUNDO E NO BRASIL**. 2022. Disponível em: <https://eescjr.com.br/blog/o-uso-da-madeira-na-construcao-civil-tudo-o-que-voce-precisa-saber-sobre-o-tema/>. Acesso em: 17 abr. 2024.

KINDER, Erin; KINGSLEY, Greg. **Mass Timber Connections: Optimal Connection Considerations.** KL&A Engineers & Builders, 2021. Disponível em: <https://www.dropbox.com/scl/fi/uk5xspk8cvrav6sbff0/Mass-Timber-Connections.pdf?e=2&rlkey=ljg8cr51xl16fvxs75xjkfp6d&dl=0>. Acesso em: 29 jul. 2024.

KREMER, Paul D; SYMMONS, Mark A. **Perceived barriers to the widespread adoption of Mass Timber Construction: An Australian construction industry case study.** 2018. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/326837631_Perceived_barriers_to_the_widespread_adoption_of_Mass_Timber_Construction_An_Australian_construction_industry_case_study. Acesso em: 25 mar. 2024.

LEITE, Mônica Batista. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição.** 2001.

LOBOS CALQUIN, Danny; MATA, Ramón; CORREA, Cláudio; NUÑEZ, Eduardo; BUSTAMANTE, Guillermo; CAICEDO, Natália; FERNÁNDEZ, David Blanco; DÍAZ, Marcos; PULGAR-RUBILAR, Pablo; ROA, Leonardo. **Implementation of Building Information Modeling Technologies in Wood Construction: A Review of the State of the Art from a Multidisciplinary Approach.** Buildings, v. 14, n. 584, p. 1-32, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/buildings14030584>. Acesso em: 09 jul. 2024.

LOTUFO OLIVEIRA, Gabriela. **Cross Laminated Timber (CLT) no Brasil: processo construtivo e desempenho.** Recomendações para o processo do projeto atualizado 2018. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

LOTUFO OLIVEIRA, Gabriela. **Estruturas de madeira engenheirada: a concepção arquitetônica orientada à racionalização do processo construtivo.** 2023. Tese (Doutorado) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2023.

LÜDKE, Menga; ANDRÉ, Marli E. D. A. **Pesquisa em educação: abordagens qualitativas**. 3. ed. São Paulo: E.P.U., 1986.

MACÊDO, Alcebiades Negrão. **Fadiga em Emendas Dentadas em Madeira Laminada Colada**. 2000. 201 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Engenharia de Estruturas, Universidade de São Carlos, São Carlos, 2000. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-18052018-202939/publico/Tese_Macedo_AlcebiadesN.pdf. Acesso em: 18 abr. 2024.

MASS TIMBER INSTITUTE (Canada). **Mass Timber Building Science Primer**. Toronto: [S.I.], 2021.

MHM THERMAL INSULATION AND TIMBER CONSTRUCTION GMBH. **Engineered Glulam**. Disponível em: <https://www.mm-holz.com/en/products/engineered-glulam#gallery-5>. Acesso em: 7 ago. 2024.

MIOTTO, J. L.; DIAS, A. A. **Produção e avaliação de vigas de madeira laminada colada confeccionadas com lâminas de eucalipto**. Revista Tecnológica, Maringa, Edição Especial, p. 35-45, 2009.

MULTIPLACAS. **Kerto LVL**: vigas lvl ideias para vãos longos. Vigas LVL ideias para vãos longos. s.d. Disponível em: <https://multiplacas.pt/produto/kerto-lvl-s/>. Acesso em: 15 fev. 2025.

NATURALLY WOOD. **Mass timber**. [s.d.]. Disponível em: [https://www.naturallywood.com/topics/mass-timber/#:~:text=Products%20in%20the%20mass%20timber,%20laminated%20timber%20\(NLT\)](https://www.naturallywood.com/topics/mass-timber/#:~:text=Products%20in%20the%20mass%20timber,%20laminated%20timber%20(NLT)). Acesso em: 25 mar. 2024.

PEREIRA, Marcos Cesar de Moraes. **Painel estrutural de madeira maciça tipo DCLT: estudo experimental, analítico e numérico de dois painéis de lamelas cruzadas com ligações cavilhadas**. 2019. Tese (Doutorado em Desenvolvimento, Caracterização e Aplicação de Materiais) - Escola de Engenharia de São Carlos,

Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019. doi:10.11606/T.18.2019.tde-20082019-141710. Acesso em: 2025-01-15.

PFEIL, Walter; PFEIL, Michèle. **Estruturas de Madeira**. 6. ed. Rio de Janeiro: Ltc - Livros Técnico e Científicos Editora S.A., 2003. 241 p.

REAL ESTATE FINANCIAL MODELING. **Commercial Real Estate Financial Modeling Training and Software**. Disponível em: <https://getrefm.com/>. Acesso em: 30 jul. 2024.

RITTER, Michael A. **Timber Bridges: Design, Construction, Inspection, and Maintenance**. Washington, DC: United States Department of Agriculture, Forest Service, 1990. 944 p.

SECRETARIA DE ESTADO DE INFRAESTRUTURA, MOBILIDADE E PARCERIAS - SEINFRA; DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DE MINAS GERAIS - DER-MG. Caderno Técnico de Especificações de Escopo de Projetos BIM de Edificações. 1. ed. Belo Horizonte, nov. 2024. 206 p. Disponível em: <https://www.der.mg.gov.br/obras/plataforma-bim-der-mg/cadernos-bim>. Acesso em: 17 dez. 2024.

SHIGUE, Erich Kazuo. **Difusão da construção em madeira no Brasil: agentes, ações e produtos**. 2018. Dissertação (Mestrado em Arquitetura, Urbanismo e Tecnologia) - Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018. doi:10.11606/D.102.2018.tde-03092018-094051. Acesso em: 10 de fev. 2025.

SILVA, Bianca Bairros Rabello da. **Desenvolvimento de Adesivos de Poliuretano a Base de Óleo de Mamona**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/8352>. Acesso em: 25 jul. 2024.

SILVA, José Eduardo Estevam da. **Estudo da influência das resinas termofixas**

ureia formaldeído (UF) e melamina formaldeído (MF) nas características físicas e mecânicas de painéis MDF. 2013. Trabalho de conclusão de curso (Licenciatura em Química) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências, 2013. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/121218>. Acesso em: 25 jul. 2024.

STAUB-FRENCH, S. *et al.* **Building Information Modeling (BIM) and Design for Manufacturing and Assembly (DfMA) for Mass Timber Construction.** Bim Topics Research Lab, University of British Columbia, Vancouver, 2018. Disponível em: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.naturallywood.com/wp-content/uploads/bim-dfma-for-mass-timber-construction_report_bim-topics-research-lab.pdf. Acesso em: 11 jul. 2024.

TIMPONI, Rafael Ros. **Análise do processo de manutenção em Madeira Laminada Colada: estudo de caso em Brasília.** 2017. 63 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Faculdade de Tecnologia e Ciência Sociais Aplicadas, Centro Universitário de Brasília, Brasília, 2017. Disponível em: <https://repositorio.uniceub.br/jspui/bitstream/prefix/13197/1/21214351.pdf>. Acesso em: 19 abr. 2024.

URBEM. ASCENT, **O MAIOR PRÉDIO DE MADEIRA DO MUNDO.** 2024. Disponível em: <https://urbembr.com/ascent-o-maior-predio-em-mass-timber-do-mundo/>. Acesso em: 4 abr. 2024.

URBEM. **BROCK COMMONS: UM GIGANTE EM MASS TIMBER.** 2023. Disponível em: <https://urbembr.com/brock-commons-um-gigante-em-mass-timber/>. Acesso em: 4 abr. 2024.

URBEM. **CONHEÇA O GLULAM, GLUED LAMINATED TIMBER.** 2022. Disponível em: <https://urbembr.com/conheca-o-glulam-glued-laminated-timber/>. Acesso em: 10 ago. 2024.

URBEM. **CONHEÇA O GLULAM, GLUED LAMINATED TIMBER.** 2022. Disponível em: <https://urbembr.com/conheca-o-glulam-glued-laminated-timber/>. Acesso em: 3 abr. 2024.

URBEM. **Que tal comer um Big Mac em um prédio sustentável construído em mass timber?** 2023. Disponível em: https://www.instagram.com/p/Cwnriptvp0n/?img_index=1. Acesso em: 3 abr. 2024.

URBEM. **VOCÊ CONHECE O CROSS LAMINATED TIMBER?** 2022. Disponível em: <https://urbembr.com/voce-conhece-o-cross-laminated-timber/>. Acesso em: 18 abr. 2024.

URBEM. **ESTÁ NO AR A PRIMEIRA CALCULADORA DE LAJES DE CLT ALINHADA ÀS NORMAS BRASILEIRAS.** 2021. Disponível em: <https://urbembr.com/esta-no-ar-a-primeira-calculadora-de-lajes-de-clt-alinhada-as-normas-brasileiras/>. Acesso em: 15 nov. 2024.

URBEM. **CALCULA TIMBER | GLULAM PARA VIGAS.** 2022. Disponível em: <https://urbembr.com/biblioteca/calcula-timber-glulam-para-vigas/>. Acesso em: 15 nov. 2024.

URBEM. **CALCULA TIMBER | GLULAM PARA PILARES.** 2022. Disponível em: <https://urbembr.com/biblioteca/calcula-timber-glulam-para-pilares/>. Acesso em: 15 nov. 2024

VALOR ECONÔMICO. **Madeira ganha protagonismo em grandes construções.** 2024. Disponível em: <https://valor.globo.com/patrocinado/imoveis-de-valor/noticia/2024/07/05/madeira-ganha-protagonismo-em-grandes-construcoes.ghtml>. Acesso em: 06 ago. 2024.

VILELA, Ramon; MASCIA, Nilson Tadeu. **Avaliação de propriedades mecânicas da madeira de Pinus taeda provenientes de placas de cross laminated timber.** Disponível em:

<https://www.scielo.br/ij/ac/a/D8yCq4F9G7yfTRwBZb3mQfG/?lang=pt&format=pdf>.

Acesso em: 17 abr. 2024.

VIOLIN, Gustavo Rosa. **Concepção Estrutural Paramétrica de Projetos em Madeira Lamelada Colada e Madeira Lamelada Cruzada**. 2019. 130 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2019.

WOODWORKS. **Mass Timber Connection Indices**. 2021. Disponível em: <https://www.woodworks.org>. Acesso em: 01 ago. 2024.

WOODWORKS. **Mass Timber Design Manual – Volume 2**. 2022. Disponível em: <https://www.woodworks.org/resources/mass-timber-design-manual/>. Acesso em: 18 abr. 2024.

ANEXO 01 - TIPOS DE MADEIRA ENGENHEIRADA À BASE DE LAMELAS (TÁBUAS) DE MADEIRA

Nome	Sigla	Aplicação	Descrição
Madeira Lamelada Colada <i>Glued Laminated Timber</i>	MLC ou Glulam (em inglês)	Vigas, arcos, pórticos e pilares	Elemento produzido com lamelas com as fibras dispostas paralelamente entre si, coladas com adesivos estruturais e prensadas conforme normas. As peças podem ser feitas com curvaturas em até dois eixos (ABNT 7190, 2022; Ino; Shimbo, 2024, APA, 2019)
Madeira Lamelada Colada Cruzada <i>Cross Laminated Timber</i>	MLCC ou CLT (em inglês)	Painéis de piso/laje e de parede	Painel composto por um número ímpar de camadas, geralmente três, cinco ou sete camadas, que são dispostas com as fibras perpendicularmente entre si. Cada camada é composta por lamelas, isto é, tábuas, dispostas lado a lado na horizontal, formando grandes planos. As peças são coladas com adesivos estruturais e prensadas conforme normas (ABNT NBR 7190, 2022; Ino; Shimbo, 2024, APA – The Engineered Wood Association, 2020).
Madeira Lamelada Pregada <i>Nail-Laminated Timber</i>	MLP ou NLT (em inglês)	Vigas, painéis de piso/laje e de paredes	Elemento produzido com lamelas posicionadas na vertical, dispostas com as fibras paralelas entre si e unidas com pregos ou parafusos formando estruturas retas ou curvilíneas (Mass Timber Institute, 2021; Ino; Shimbo, 2024).
Madeira Lamelada Cavilhada <i>Dowel-Laminated Timber</i>	DLT (em inglês)	Painéis de piso/laje e de parede	Elemento constituído por lamelas dispostas na vertical com as fibras paralelas entre si, unidas por cavilhas. As lamelas são do tipo <i>softwood</i> e as cavilhas são de <i>hardwood</i> . As cavilhas devem estar secas com teor de umidade menor que as lamelas. Assim, com a umidade do ambiente, as cavilhas incham, e, em contato com as lamelas, garante a fricção das peças. Não são recomendadas para ambientes com muita variação de temperatura e umidade (Mass Timber Institute, 2021; Aflalo, 2020 apud Ino; Shimbo, 2024).
Madeira Lamelada Cavilhada Cruzada <i>Dowel Cross-Laminated Timber</i>	DCLT	Painéis de piso/laje e de parede	Painéis compostos por camadas de lamelas dispostas lado a lado horizontalmente. As camadas alternam ortogonalmente o sentido das fibras e são unidas por cavilhas ao invés de adesivos (Ino; Shimbo, 2024).

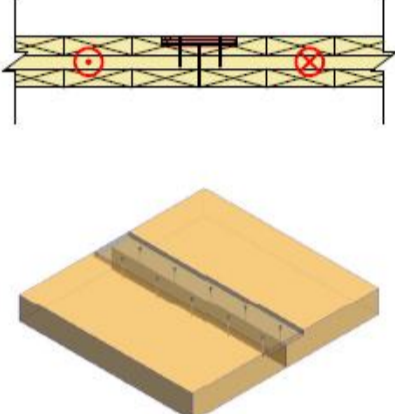
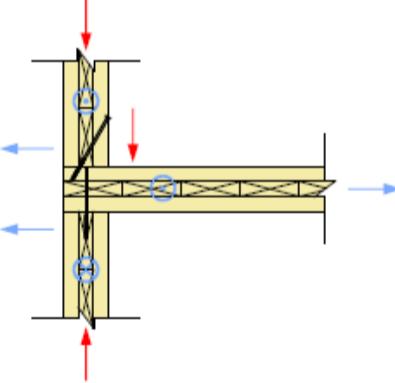
Fonte: Autores (2025).

ANEXO 02 - TIPOS DE MADEIRA ENGENHEIRADA À BASE DE LÂMINAS, TIRAS E LASCAS DE MADEIRA

Nome	Sigla	Aplicação	Descrição
Madeira Micro Laminada <i>Laminated Veneer Lumber</i>	LVL	Vigas, mesas de vigas I compostas	Elemento composto por finas lâminas de madeira, na mesma direção, com as fibras paralelas ao sentido longitudinal da peça, unidas com adesivos estruturais. Possui propriedades ortotrópicas (APA – The Engineered Wood Association, 2019; Mass Timber Institute, 2021).
<i>Parallel Strand Lumber</i>	PSL	Pilares e vigas	Elemento composto por tiras longas e finas recortadas de lâminas de madeira, com relação comprimento-espessura de 300, alinhadas paralelamente ao sentido longitudinal das peças, revestidas com adesivo estrutural e unidas em prensa (APA – The Engineered Wood Association, 2019, NaturallyWood, s.d.).
<i>Laminated Strand Lumber</i>	LSL	Montantes, travessas, vigas, elementos da estrutura da cobertura	O LSL é semelhante ao LVL, mas, na sua composição usa tiras ou lascas longas, com relação comprimento-espessura de 150, unidas em flocos, e não em camadas de lâminas. As tiras são misturadas com um adesivo à prova d'água e prensadas com calor para formar placas ou blocos que podem ser cortados em diversos tamanhos (APA – The Engineered Wood Association, 2019, NaturallyWood, s.d.).
<i>Oriented Strand Lumber</i>	OSL	Placas, Montantes, travessas, vigas, elementos da estrutura da cobertura	No OSL, as tiras são mais curtas que as do LSL, com relação comprimento-espessura de 75, e são orientadas para formar grandes placas ou blocos. E, diferente do <i>Oriented Strand Board</i> (OSB), as camadas das lascas são dispostas em paralelo e não perpendicularmente entre si (APA – The Engineered Wood Association, 2019).

Fonte: Autores (2025).

ANEXO 03 – LIGAÇÕES ENTRE PAINÉIS CLT

LIGAÇÕES DE PAINÉIS CLT COMO LAJES OU PAREDES	
Ligação entre painéis de CLT com encaixe de superfície única	
	<p>Objetivo: Transferência de cisalhamento no plano ao longo da junta entre painéis.</p> <p>Descrição: Painéis de piso adjacentes com superfícies fresadas são encostados um ao outro. Uma espiga de compensado é fixada a ambos os painéis usando parafusos parcialmente roscados ou pregos.</p> <p>Notas:</p> <ul style="list-style-type: none"> • A capacidade da conexão é controlada pela capacidade de cisalhamento dos fixadores do tipo pino. • Pode-se usar uma espiga de superfície dupla ou uma espiga de aço para aumentar a capacidade. • A espiga pode estar totalmente acima dos painéis sem superfície fresada, onde as coberturas de piso ou teto permitirem. • Ao usar pregos, considere especificar pregos de pistola de pregos em vez de pregos comuns de arame para facilitar a construção, ou parafusos colados em fita em vez de parafusos individuais. • Onde parafusos são usados em vez de pregos, o custo aumenta e a facilidade de construção é moderada. • A espessura mínima típica do compensado é nominalmente de 1/2". • Coordene a largura e a espessura da espiga e do fresamento com o fornecedor do painel. • No projeto de diafragma, considere que, para flexão extrema no plano, ocorrerá o apoio na conexão. É preferível que os painéis se apoiem uns nos outros antes de apoiarem-se na espiga, o que é alcançado especificando uma folga maior entre a espiga e o painel do que entre os dois painéis.
Ligação de painel de piso de CLT apoiado em parede CLT	
	<p>Objetivo: Transferência de carga vertical do painel de piso e do painel de parede acima para o painel de parede abaixo. Também pode transferir cargas no plano e fora do plano entre os painéis de parede e o painel de piso.</p> <p>Descrição: O painel de piso apoia-se no painel de parede abaixo. O painel de parede acima apoia-se no painel de piso. Uma conexão positiva é feita entre os painéis com parafusos parcialmente roscados.</p> <p>Notas:</p> <ul style="list-style-type: none"> • A capacidade do caminho de carga primário é controlada pela capacidade de apoio perpendicular às fibras do painel de piso. • Os parafusos fornecem o caminho de carga para as cargas no plano e fora do plano. • Parafusos diagonais são usados nessa conexão para fixação positiva da parede superior. Deve-se tomar cuidado para não penetrar a face externa do painel de parede.

Fonte: Adaptado de Woodworks (tradução nossa, 2021).

ANEXO 04 - LIGAÇÕES ENTRE PAINEL CLT E CONCRETO (CONTINUA)

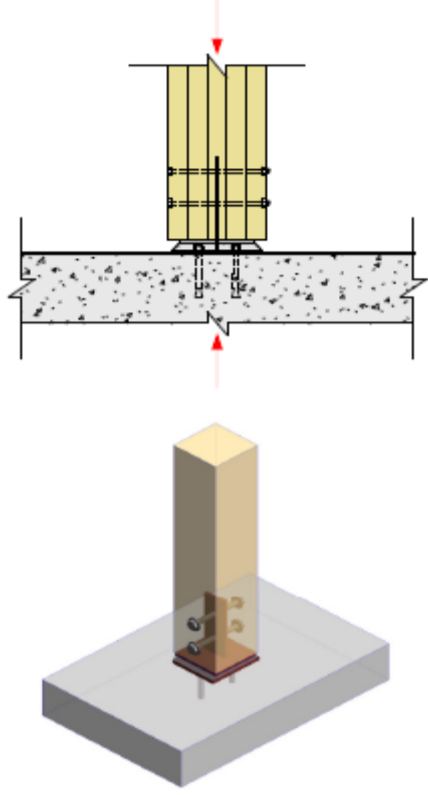
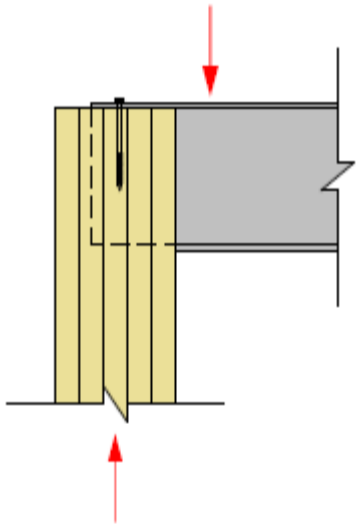
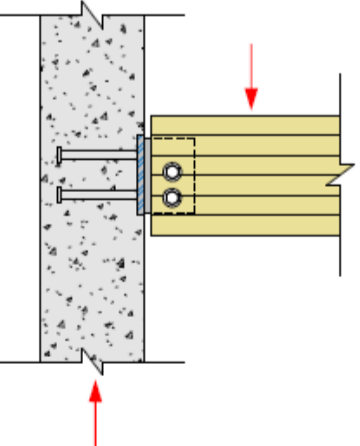
LIGAÇÕES DE PAINÉIS CLT COMO LAJES OU PAREDES	
Ligação de painel piso de CLT em parede ou fundação de concreto	
	<p>Objetivo: Transferência de cargas gravitacionais do painel de telhado ou piso para a parede ou fundação. Também pode transferir cargas no plano entre a parede e o painel de telhado ou piso.</p> <p>Descrição: O painel de telhado ou piso apoia-se no topo da parede com uma placa de madeira tratada sob pressão ou suporte. A fixação positiva entre o painel e a placa de apoio ou suporte é alcançada usando parafusos parcialmente roscados. A placa de apoio ou suporte é conectada à parede com barras de ancoragem ou âncoras instaladas posteriormente. A argamassa é aplicada abaixo do painel para acomodar variações nas tolerâncias de construção de diferentes materiais e transferir cargas gravitacionais.</p> <p>Notas:</p> <ul style="list-style-type: none"> • A capacidade do caminho de carga primário é controlada pela capacidade de apoio perpendicular às fibras do painel. • O suporte permite acomodar variações na elevação do topo da parede. A argamassa é instalada após a instalação do painel. • A argamassa mostrada entre o topo da parede e a parte inferior do painel no detalhe inferior pode ser omitida se a capacidade de suporte da conexão angular for suficiente. • O suporte pode ser fixado à parede usando uma inserção soldada em vez de uma âncora instalada posteriormente.
Ligação de painel parede de CLT em fundação de concreto	
	<p>Objetivo: Transferência de carga vertical do painel para o concreto.</p> <p>Descrição: O painel apoia-se em uma placa de base tratada sob pressão. A placa é conectada ao painel com pregos inclinados e ao concreto com parafusos de ancoragem embutidos ou instalados posteriormente. A argamassa é aplicada abaixo da placa para controle de elevação.</p> <p>Notas:</p> <ul style="list-style-type: none"> • A capacidade da conexão depende da capacidade da placa perpendicular às fibras. • Um suporte ou placa lateral pode ser fornecido para a transferência de cargas no plano e fora do plano entre o painel e o concreto. • A conexão pode ser instalada sem argamassa. Sem a argamassa, a conexão não acomoda as variações prováveis nas elevações do topo do concreto, mesmo dentro da faixa de tolerâncias adequadas do concreto.

Fonte: Adaptado de Woodworks (tradução nossa, 2021).

ANEXO 04 - LIGAÇÕES ENTRE PAINEL CLT E CONCRETO (CONCLUSÃO)

LIGAÇÕES DE PAINES CLT COMO LAJES OU PAREDES	
Ligação de painel piso de CLT em parede de concreto	
	<p>Objetivo: Transferência de cargas gravitacionais do painel de telhado ou piso para a parede. Também pode transferir cargas no plano entre a parede e o painel de telhado ou piso.</p> <p>Descrição: O painel apoia-se em um conector customizado com fixação positiva entre o painel e o conector usando parafusos parcialmente roscados. O conector de aço é fixado à parede com âncoras instaladas posteriormente ou embutidas.</p> <p>Notas:</p> <ul style="list-style-type: none"> • A capacidade da conexão depende da capacidade do painel perpendicular às fibras e da capacidade de cisalhamento e tração do conector de parede. • Considere a excentricidade do painel ao apoiar-se no conector. • A conexão deve acomodar diferentes tolerâncias esperadas entre a construção em concreto e a construção em madeira. • A conexão pode ser necessária para transferir cargas fora do plano da parede para o diafragma. • Um suporte pode ser adicionado ao topo do painel onde for necessário transferir cargas adicionais no plano. • A inspeção é difícil se o suporte inferior estiver voltado para cima na borda do painel.
Ligação de painel piso de CLT em viga de aço	
	<p>Objetivo: Transferência de carga vertical do painel de telhado ou piso para a viga de aço. Também pode transferir cisalhamento ao longo do comprimento da viga.</p> <p>Descrição: O painel de telhado ou piso apoia-se na parte superior da viga de aço. A fixação positiva é feita com parafusos parcialmente roscados.</p> <p>Notas:</p> <ul style="list-style-type: none"> • A capacidade do caminho de carga primário é controlada pela capacidade de apoio perpendicular às fibras do painel de piso. • Os parafusos fornecem o caminho de carga para cargas no plano. • A flange da viga de aço é pré-perfurada para acomodar os parafusos. • A profundidade da viga de aço deve ser suficiente para a instalação dos parafusos.

ANEXO 05 - LIGAÇÕES ENTRE ESTRUTURAS EM MLC COM CONCRETO OU AÇO (CONTINUA)

LIGAÇÕES DE VIGAS OU PILARES DE MLC	
Ligação entre base de concreto e pilar de MLC	
	<p>Objetivo: Transferir a carga vertical da coluna de madeira para o concreto.</p> <p>Descrição: A coluna se apoia em uma conexão de aço personalizada, consistindo em uma placa de faca e uma placa de apoio. A placa de faca é conectada positivamente à coluna com fixadores do tipo pino. A placa de apoio é conectada ao concreto com âncoras pós-instaladas. Argamassa é aplicada abaixo da placa de apoio para controle de elevação.</p> <p>Notas:</p> <ul style="list-style-type: none"> • A capacidade da conexão depende da capacidade de carga paralela à fibra da coluna. • O corte vertical na coluna para a placa de faca pode ser visível.
Ligação entre coluna de MLC e viga de aço	
	<p>Objetivo: Transferir a carga vertical de uma viga de aço para uma coluna de madeira maciça.</p> <p>Descrição: As flanges superiores da viga se apoiam no topo da coluna. As flanges inferiores da viga são recortadas na coluna. A viga é conectada positivamente à coluna com parafusos parcialmente roscados.</p> <p>Notas:</p> <ul style="list-style-type: none"> • A capacidade da conexão depende da capacidade de carga paralela à fibra da coluna nas flanges superiores. • A coluna pode ser entalhada nas flanges superiores para um acabamento alinhado.
Ligação de viga em MLC com parede de concreto	
	<p>Objetivo: Transferir a carga vertical da viga para a parede.</p> <p>Descrição: A viga é conectada a uma placa de faca de aço com fixadores do tipo pino. A placa de faca é conectada a uma placa embutida.</p> <p>Notas:</p> <ul style="list-style-type: none"> • A capacidade da conexão depende da capacidade de cisalhamento dos fixadores. • Considere a excentricidade da carga da viga. • Na conexão com pinos, o projetista deve considerar a retração da viga com a localização e espaçamento adequados dos pinos. • O corte para a placa de faca pode ter a altura total da viga e será visível. • A viga não pode ser desconectada do içamento até que esteja conectada à placa de faca.

ANEXO 05 - LIGAÇÕES ENTRE ESTRUTURAS EM MLC COM CONCRETO OU AÇO (CONCLUSÃO)

LIGAÇÕES DE VIGAS OU PILARES DE MLC	
Ligação metálica de vigas de MLC a pilar de MLC.	
	<p>Objetivo: Transferir cargas verticais das vigas para a coluna ou viga mestra.</p> <p>Descrição: As vigas se apoiam em um conector de aço fabricado sob medida, que proporciona apoio ao elemento abaixo. O elemento abaixo pode ser uma coluna ou uma viga mestra. O conector de aço é conectado aos elementos de madeira com parafusos ou conectores do tipo pino.</p> <p>Notas:</p> <ul style="list-style-type: none"> • A conexão apresentada é apenas uma opção; existem muitas variações dessa conexão onde as vigas são suportadas por um conjunto personalizado de capitel de coluna e suporte de viga. • A capacidade da conexão depende da capacidade de carga perpendicular à fibra da viga e da capacidade de carga paralela à fibra da coluna abaixo. • Pode haver uma coluna acima da conexão. • Considere a retração diferencial dos diferentes elementos nessa conexão. • A laje não está mostrada para maior clareza. A viga pode necessitar de contraventamento para evitar flambagem lateral-torcional. <p>Outras aplicações:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Suporte de viga de madeira maciça na face de um painel de parede de madeira maciça.

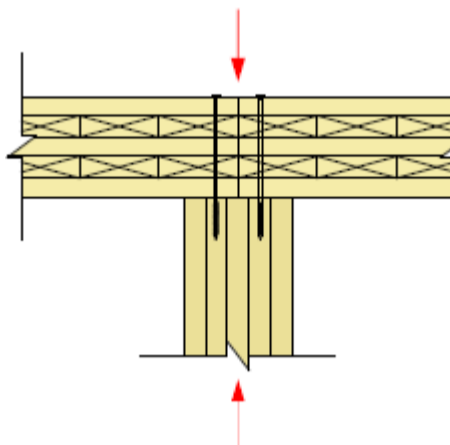
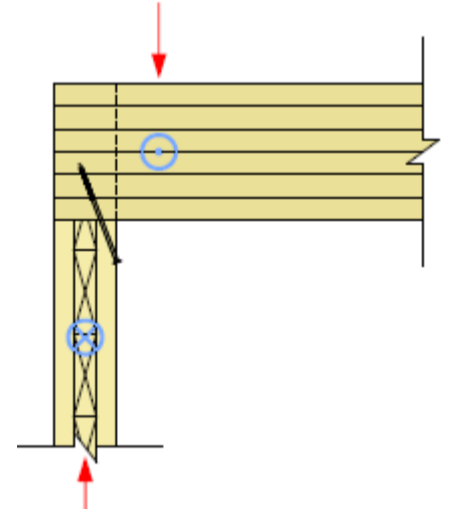
Fonte: Adaptado de Woodworks (tradução nossa, 2021).

ANEXO 06 - LIGAÇÕES ENTRE PAINÉIS EM CLT E PILARES EM MLC (CONTINUA)

LIGAÇÕES PAINÉIS CLT EM VIGAS OU PILARES DE MLC	
Ligação entre painel piso de CLT e coluna de MLC através de espaçador metálico	
	<p>Objetivo: Transferir a carga vertical dos painéis de piso e da coluna superior para a coluna de madeira abaixo.</p> <p>Descrição: A coluna superior e os painéis se apoiam em um espaçador. O espaçador se apoia na coluna abaixo. O espaçador consiste em uma placa de apoio superior soldada a um guia de alinhamento e uma placa de apoio inferior soldada a um espaçador. O guia de alinhamento se encaixa dentro do espaçador. A conexão positiva das placas de apoio às colunas é feita com hastes roscadas epoxidadas ou parafusos parcialmente roscados. A conexão positiva do painel à placa de apoio é feita com hastes roscadas soldadas.</p> <p>Notas:</p> <ul style="list-style-type: none"> • A capacidade é controlada pela capacidade de suporte perpendicular à fibra ou de cisalhamento por rolamento do painel de piso ou telhado, ou conforme especificado pelo fabricante. • Esta conexão é única para suportes de ponto único de painéis de madeira maciça com capacidade de vão em duas direções, como CLT ou SCL-CLT. • A construtibilidade pode ser afetada pela necessidade de escoramento temporário da coluna. • As peças da montagem da conexão de aço são pré-instaladas nas colunas. • Considere que pode ser necessária uma conexão mecânica entre o guia de alinhamento e o espaçador se houver elevação líquida na coluna superior.

Fonte: Adaptado de Woodworks (tradução nossa, 2021).

ANEXO 06 - LIGAÇÕES ENTRE PAINÉIS EM CLT E PILARES EM MLC (CONCLUSÃO)

LIGAÇÕES PAINÉIS CLT EM VIGA E PILAR DE MLC	
Ligação de painel CLT com coluna de MLC através de parafusos	
	<p>Objetivo: Transferir a carga vertical de painéis de telhado ou piso para a coluna de madeira.</p> <p>Descrição: O painel de telhado ou piso se apoia no topo da coluna de madeira. A fixação positiva é feita com parafusos parcialmente rosçados.</p> <p>Notas:</p> <ul style="list-style-type: none"> • A capacidade é controlada pela capacidade de suporte perpendicular à fibra do painel de piso ou telhado. • Esta conexão é única para suportes de ponto único de painéis de madeira maciça com capacidade de vão em duas direções, como CLT ou SCL-CLT. • Se houver qualquer elevação líquida na conexão, os parafusos devem ser angulados. • A construtibilidade pode ser afetada pela necessidade de escoramento temporário da coluna. • O painel pode ser contínuo sobre a coluna.
Ligação de viga de MLC com painel parede de CLT através de parafusos	
	<p>Objetivo: Transferência de carga vertical da viga para o painel de parede de madeira maciça. Também pode transferir cargas fora do plano do painel de parede para a viga.</p> <p>Descrição: A viga apoia-se no painel de parede de madeira maciça em um encaixe na parede. A viga é conectada ao painel de parede com parafusos parcialmente rosçados.</p> <p>Notas:</p> <ul style="list-style-type: none"> • A capacidade da conexão depende da capacidade da viga perpendicular às fibras. • Parafusos e suportes fornecem o caminho de carga para cargas no plano e fora do plano. • Os parafusos podem ser instalados diagonalmente do painel de parede para a viga (como mostrado) ou verticalmente do topo da viga para o painel de parede. • O deck não é mostrado para maior clareza. A viga pode necessitar de contraventamento para evitar flambagem lateral-torcional.

Fonte: Adaptado de Woodworks (tradução nossa, 2021).

APÊNDICE 01 – ESFORÇOS CARACTERÍSTICOS PARA OS PILARES DE MADEIRA ENGENHEIRADA EM MLC

CÓDIGO	N _{ko} [tf] concreto	N _{k1} [tf] MLC
P1	52,00	22,14
P2	93,00	66,78
P3	93,00	66,78
P4	93,00	66,78
P5	93,00	66,78
P6	46,00	21,92
P7	46,00	21,92
P8	93,00	66,78
P9	93,00	66,78
P10	93,00	66,78
P11	93,00	66,78
P12	52,00	22,14
P13	86,00	29,20
P14	153,00	83,85
P15	142,00	83,85
P16	143,00	83,85
P17	162,00	83,85
P18	76,00	29,14
P19	76,00	29,14
P20	176,00	83,85
P21	148,00	83,85
P22	143,00	83,85
P23	149,00	83,85
P24	86,00	29,20
P25	80,00	31,04
P26	135,00	53,19
P27	148,00	49,66
P28	140,00	48,81
P29	103,00	28,01
P30	94,00	29,32
P31	61,00	44,27
P32	65,00	44,27
P33	120,00	29,32
P34	102,00	28,01
P35	105,00	48,76
P36	139,00	49,56
P37	135,00	53,19
P38	83,00	31,14

Fonte: Autores (2025).

CÓDIGO	N _{ko} [tf] concreto	N _{k1} [tf] MLC
P42	80,00	31,31
P43	135,00	53,19
P44	148,00	49,44
P45	140,00	48,86
P46	103,00	28,01
P47	94,00	29,32
P48	61,00	44,27
P49	65,00	44,27
P50	120,00	29,32
P51	102,00	28,01
P52	105,00	48,76
P53	146,00	49,53
P54	135,00	53,19
P55	83,00	31,04
P56	86,00	29,20
P57	153,00	83,85
P58	142,00	83,85
P59	143,00	83,85
P60	162,00	83,85
P61	76,00	29,14
P62	76,00	29,14
P63	176,00	83,85
P64	148,00	83,85
P65	143,00	83,85
P66	149,00	83,85
P67	86,00	29,20
P68	52,00	22,14
P69	93,00	66,78
P70	93,00	66,78
P71	93,00	66,78
P72	93,00	66,78
P73	46,00	21,92
P74	46,00	22,09
P75	93,00	66,78
P76	93,00	66,78
P77	93,00	66,78
P78	93,00	66,83
P79	52,00	22,14

Fonte: Autores (2025).

APÊNDICE 02 – MEMORIAL DE CÁLCULO PARA LAJE L1 COM CLASSE C24, ALTURA 18 CM, BI-APIOADA

MEMORIAL DE CÁLCULO PARA CLT

Para o cálculo deste elemento foi utilizada a teoria presente no trabalho: ABNT NBR 7190 / 2021.

DADOS DE ENTRADA

Elemento Analisado: L1

Vão do Elemento: 600 cm

Condição de Contorno do elemento: Bi Apoiado

COEFICIENTES

Kmod1 Permanente: 0,6	Ψ_2 : 0,4
Kmod1 Longa Duração: 0,7	β_1 : 0,65
Kmod1 Média Duração: 0,8	β_2 : 1,3
Kmod1 Curta Duração: 0,9	Kfi: 1,15
Kmod1 Instantânea: 1,1	nfi: 0,6
Kmod2: 0,8	TRRF: 60
Φ : 0,8	γ_{wb} : 1,4
Ψ_0 : 0,7	γ_{wv} : 1,8
Ψ_1 : 0,6	γ_m : 1

GEOMETRIA

Camada	Espessura (mm)	E0 (MPa)	G0 (MPa)
L1	40,0	11000	0
T1	30,0	0	50
L2	40,0	11000	0
T2	30,0	0	50
L3	40,0	11000	0

CARREGAMENTO (tf,m)

Caso	qyk (tf/m)	Fyk (tf)	X_F (m)
PP	0,0756	0	0
Perm	0,1	0	0
Acid	0,3	0	0

COMBINAÇÕES

Nome	PP	Perm	Acid
Peso Próprio	1,00	0,00	0,00
Permanente	0,00	1,00	0,00
Acidental	0,00	0,00	1,00
ELS Inicial	1,00	1,00	1,00
ELS Final	1,80	1,80	1,32
ELU	1,30	1,40	1,50
Incêndio	1,30	1,40	1,50

MATERIAL

σ_{rk} : 24 (MPa)	$\tau_{vrd} = \tau_{vrk} \cdot k_{mod} / \gamma_{wb}$
$\sigma_{rd} = \sigma_{rk} \cdot k_{mod} / \gamma_{wb}$	p : 420 (kgf/m ³)
τ_{vrk} : 0,7 (MPa)	

RESULTADOS PARCIAIS

Ycg: 9,00 (cm)	Wc Líquido: 4.533,33 (cm ³)
Area Líquida: 1.200,00 (cm ²)	Wt Líquido: 4.533,33 (cm ³)
Ic Líquido: 40.800,00 (cm ⁴)	Sr Líquido: 2.800,00 (cm ³)
It Líquido: 40.800,00 (cm ⁴)	I Efetivo: 38.154,31 (cm ⁴)
Zo: 9,00 (cm)	I Efetivo / Ic Líquido: 0,94
Zu: 9,00 (cm)	

ESFORÇOS SOLICITANTES - Msd (tfm/m)

Caso	MSd(0)	MSd(L/2)	MSd(L)	Duração
Peso Próprio	0,00	0,34	0,00	PERMANENTE
Permanente	0,00	0,45	0,00	PERMANENTE
Acidental	0,00	1,35	0,00	LONGA
ELS Inicial	0,00	2,14	0,00	LONGA
ELS Final	0,00	3,20	0,00	LONGA
ELU	0,00	3,10	0,00	LONGA
Incêndio	0,00	3,10	0,00	LONGA

ESFORÇOS SOLICITANTES - Vsd (tf/m)

Caso	Vsd(0)	Vsd(L/2)	Vsd(L)	Duração
Peso Próprio	0,23	0,00	-0,23	PERMANENTE
Permanente	0,30	0,00	-0,30	PERMANENTE
Acidental	0,90	0,00	-0,90	LONGA
ELS Inicial	1,43	0,00	-1,43	LONGA
ELS Final	2,14	0,00	-2,14	LONGA
ELU	2,06	0,00	-2,06	LONGA
Incêndio	2,06	0,00	-2,06	LONGA

VERIFICAÇÃO ELU

$k_{mod} = k_{mod1} \cdot k_{mod2}$

k_{mod} utilizado em função do caso e duração do carregamento

Caso	Kmod	σ_{rd} (Mpa)	τ_{vrd} (Mpa)	Duração
Peso Próprio	0,48	8,23	0,19	PERMANENTE
Permanente	0,48	8,23	0,19	PERMANENTE
Acidental	0,56	9,60	0,22	LONGA
ELS Inicial	1,00	17,14	0,39	LONGA
ELS Final	1,00	17,14	0,39	LONGA
ELU	0,56	9,60	0,22	LONGA

VERIFICAÇÃO MOMENTO FLETOR ELU

Caso	MSd(Max)	$\sigma_{Sd}(\text{Max})$ MPa	$\sigma_{Sd}(\text{Max})/\sigma_{Rd}$	Situação
Peso Próprio	0,34	0,75	0,09	Ok
Permanente	0,45	0,99	0,12	Ok
Acidental	1,35	2,97	0,31	Ok
ELU	3,09	6,81	0,71	Ok

$\sigma_{sd} = M_{sk} \cdot \gamma_f / W_t \cdot L_{iq}$

VERIFICAÇÃO FORÇA CORTANTE ELU

Caso	Vsd(Max)	$\tau_{Sd}(\text{Max})$ Mpa	$\tau_{Sd}(\text{Max})/\tau_{Rd}$	Situação
Peso Próprio	0,23	0,02	0,08	Ok
Permanente	0,30	0,02	0,11	Ok
Acidental	0,90	0,06	0,28	Ok
ELU	2,06	0,14	0,65	Ok

$\tau_{vsd} = V_{sk} \cdot \gamma_f \cdot S_r / I_t \cdot L_{iq}$

ELS

Ψ_2 : 0,4	I Efetivo: 38.154,31 (cm ⁴)
Vão: 600 (cm)	I Efetivo / I Líq: 0,94

VERIFICAÇÃO ELS

Verificação no estado Inicial (t0): L/dmax(t0) > 300

Verificação no estado final (t ∞): L/dmax(t ∞) > 40

Caso	dMax(t)	L/dMax(t)	Situação
Peso Próprio(t0)	0,30	1.980,47	OK
Permanente(t0)	0,40	1.497,23	OK
Acidental(t0)	1,20	499,08	OK
ELS Inicial(t0)	1,91	314,81	OK
ELS Final(t ∞)	2,85	210,26	OK

INCÊNDIO

kfi: 1,15 (mm/min)	β_1 : 0,65 (mm/min)	def: 46,00 (mm)
nfi: 0,6 (mm/min)	β_2 : 1,3 (mm/min)	Considerar
TRRF: 60 (min)	dchar: 39,00 (mm)	delaminação: Não

GEOMETRIA EM INCÊNDIO

Camada	Espessura (mm)	E0 (MPa)	G0 (MPa)
L1	40,0	11000	0
T1	30,0	0	50
L2	40,0	11000	0
T2	24,0	0	50
L3	0,0	0	0

RESULTADOS PARCIAIS EM INCÊNDIO

Ycg: 5,50 (cm)	Zu: 5,50 (cm)
Area Líquida: 800,00 (cm ²)	Wc Líquido: 1.975,76 (cm ³)
Ic Líquido: 10.866,67 (cm ⁴)	Wt Líquido: 1.975,76 (cm ³)
It Líquido: 10.866,67 (cm ⁴)	Sr Líquido: 1.400,00 (cm ³)
Zo: 5,50 (cm)	

TENSÕES RESISTENTES

$\sigma_{rd} = \sigma_{rk} \cdot k_{mod} \cdot k_{fi} / \gamma_m$: 27,60 (MPa) $\tau_{vrd} = \tau_{vrk} \cdot k_{mod} \cdot k_{fi} / \gamma_m$: 0,81 (MPa)

TENSÕES SOLICITANTES

$\sigma_{sdf} = M_{sk} \cdot \gamma_f \cdot n_{fi} / W_t \cdot L_{iq}$: 9,38 (MPa)

$\tau_{vsdf} = V_{sk} \cdot \gamma_f \cdot n_{fi} \cdot S_r / I_t \cdot L_{iq}$: 0,16 (MPa)

VERIFICAÇÃO

$\sigma_{sdf} / \sigma_{rd}$: 0,34 - Ok τ_{vsdf} / τ_{vrd} : 0,20 - Ok

APÊNDICE 03 – MEMORIAL DE CÁLCULO PARA VIGA V18 COM CLASSE C24, SEÇÃO 25 X 68 CM, BI-APIOADA

MEMORIAL DE CÁLCULO PARA MLC

Para o cálculo deste elemento foi utilizada a teoria presente no trabalho: ABNT NBR 7190 / 2021.

DADOS DE ENTRADA

Elemento Analisado: V.18

Vão do Elemento: 599 cm

Condição de Contorno do elemento: Bi Apoiado

COEFICIENTES

Kmod1 Permanente: 0,6	Ψ1: 0,7
Kmod1 Longa Duração: 0,7	Ψ2: 0,6
Kmod1 Média Duração: 0,8	βn: 0,65
Kmod1 Curta Duração: 0,9	Kfi: 1,15
Kmod1 Instantânea: 1,1	nfi: 0,6
Kmod2: 0,8	TRRF: 60
Kmod3: 0,95	γwb: 1,4
Φ: 0,8	γwv: 1,8
Ψ0: 0,8	γm: 1

GEOMETRIA

B: 25

H: 68

CARREGAMENTO (tf,m)

Caso	qyk (tf/m)	Fyk (tf)	X_F (m)
PP	0,0714	0	0
Perm	0,879	0	0
Acid	1,271	0	0

COMBINAÇÕES

Nome	PP	Perm	Acid
Peso Próprio	1,00	0,00	0,00
Permanente	0,00	1,00	0,00
Acidental	0,00	0,00	1,00
ELS Inicial	1,00	1,00	1,00
ELS Final	1,80	1,80	1,48
ELU	1,30	1,40	1,50
Incêndio	1,30	1,40	1,50

MATERIAL

σrk: 24 (MPa)

σrd = σrk*kmod/γwb

τvrk: 4 (MPa)

τvrđ = τvrk*kmod/γwv

p: 420 (kgf/m³)

RESULTADOS PARCIAIS

Ycg: 34,00 (cm)

Area Líquida: 1.700,00 (cm²)

Ic Líquido: 655.066,67 (cm⁴)

It Líquido: 655.066,67 (cm⁴)

Wc Líquido: 19.266,67 (cm³)

Wt Líquido: 19.266,67 (cm³)

Sh/2 Líquido: 14.450,00 (cm³)

ESFORÇOS SOLICITANTES - Msđ (tfm/m)

Caso	MSđ(0)	MSđ(L/2)	MSđ(L)	Duração
Peso Próprio	0,00	0,32	0,00	PERMANENTE
Permanente	0,00	3,94	0,00	PERMANENTE
Acidental	0,00	5,70	0,00	PERMANENTE
ELS Inicial	0,00	9,96	0,00	PERMANENTE
ELS Final	0,00	16,11	0,00	PERMANENTE
ELU	0,00	14,49	0,00	PERMANENTE
Incêndio	0,00	14,49	0,00	PERMANENTE

XMMax: 299,50 cm

ESFORÇOS SOLICITANTES - Vsd (tf/m)

Caso	Vsd(0)	Vsd(L/2)	Vsd(L)	Duração
Peso Próprio	0,21	0,00	-0,21	PERMANENTE
Permanente	2,63	0,00	-2,63	PERMANENTE
Acidental	3,81	0,00	-3,81	PERMANENTE
ELS Inicial	6,65	0,00	-6,65	PERMANENTE
ELS Final	10,76	0,00	-10,76	PERMANENTE
ELU	9,67	0,00	-9,67	PERMANENTE
Incêndio	9,67	0,00	-9,67	PERMANENTE

XVMax: 0,00 cm

VERIFICAÇÃO ELU

kmod = kmod1 * kmod2 * kmod3

kmod utilizado em função do caso e duração do carregamento

Caso	Kmod	σrd (Mpa)	τvrđ (Mpa)	Duração
Peso Próprio	0,46	7,82	1,01	PERMANENTE
Permanente	0,46	7,82	1,01	PERMANENTE
Acidental	0,46	7,82	1,01	PERMANENTE
ELS Inicial	1,00	17,14	2,22	PERMANENTE
ELS Final	1,00	17,14	2,22	PERMANENTE
ELU	0,46	7,82	1,01	PERMANENTE

VERIFICAÇÃO MOMENTO FLETOR ELU

Caso	MSđ(Max)	σSđ(Max) MPa	σSđ(Max)/σRđ	Situação
Peso Próprio	0,32	0,17	0,02	Ok
Permanente	3,94	2,05	0,26	Ok
Acidental	5,70	2,96	0,38	Ok
ELU	14,49	7,52	0,96	Ok

σsd = Msk*γf/Wt_Liq

VERIFICAÇÃO FORÇA CORTANTE ELU

Caso	VSD(Max)	τSđ(Max) Mpa	τSđ(Max)/τRđ	Situação
Peso Próprio	0,21	0,02	0,02	Ok
Permanente	2,63	0,23	0,23	Ok
Acidental	3,81	0,34	0,33	Ok
ELU	9,67	0,85	0,84	Ok

τvsđ = Vsk*γf*Sh/2/It_Liq

ELS

Ψ2: 0,6

Vão: 599 (cm)

I Total: 655.066,67 (cm⁴)

VERIFICAÇÃO ELS

Verificação no estado Inicial (t0): L/dmax(t0) > 300

Verificação no estado final (t∞): L/dmax(t∞) > 150

Caso	dMax(t)	L/dMax(t)	Situação
Peso Próprio(t0)	0,06	9.689,61	OK
Permanente(t0)	0,76	787,07	OK
Acidental(t0)	1,10	544,33	OK
ELS Inicial(t0)	1,92	311,44	OK
ELS Final(t∞)	3,11	192,62	OK

XdMax: 299,50 cm

INCÊNDIO

kfi: 1,15 (mm/min)

βn: 0,65 (mm/min)

nfi: 0,6 (mm/min)

ecarb: 39,00 (mm)

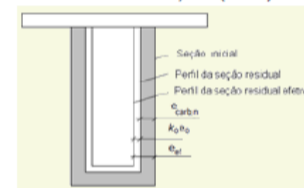
TRRF: 60 (min)

eef: 46,00 (mm)

GEOMETRIA EM INCÊNDIO

H incêndio: 63,40 (mm)

B incêndio: 15,80 (mm)



RESULTADOS PARCIAIS EM INCÊNDIO

Ycg: 31,70 (cm)

Wc Líquido: 10.584,84 (cm³)

Area Líquida: 1.001,72 (cm²)

Wt Líquido: 10.584,84 (cm³)

Ic Líquido: 335.539,47 (cm⁴)

Sh/2: 7.938,63 (cm³)

It Líquido: 335.539,47 (cm⁴)

TENSÕES RESISTENTES

σrd = σrk*kmod*kfi/γm: 27,60 (MPa)

τvrđ = τvrk*kmod*kfi/γm: 4,60 (MPa)

TENSÕES SOLICITANTES

σsdf = Msk*γf*nfi/Wt_Liq: 8,21 (MPa)

τvsdf = Vsk*γf*nfi*Sh/2/It_Liq: 0,87 (MPa)

VERIFICAÇÃO

σsdf / σrd: 0,30 - Ok

τvsdf / τvrđ: 0,19 - Ok

ESTABILIDADE LATERAL

Ec0f: 5016 (MPa)

γf: 1,4

Ec0m: 11000 (MPa)

βM: 11,2881374061853

kmod: 0,456

L1<: 14,21 (m)

fbd: 7,81714285714286 (MPa)

Vão: 5,99 (m)

βE: 4

NÚMERO DE TRAVAMENTOS = 0

APÊNDICE 04 – MEMORIAL DE CÁLCULO PARA PILAR P14 COM CLASSE C35, SEÇÃO 25 X 76 CM, BI-APIOADO

MEMORIAL DE CÁLCULO PARA PILARES

Para o cálculo deste elemento foi utilizada a Teoria presente no trabalho: ABNT NBR 7190 / 2021.

DADOS DE ENTRADA

Elemento Analisado: P14

Altura do Elemento: 272 cm

Condição de Contorno do elemento: Bi Apoiado

Comprimento Equivalente Leq: 272 cm

Ke: 1

COEFICIENTES

Kmod1 Permanente: 0,6

Ψ_2 : 0,6

Kmod1 Longa Duração: 0,7

β_n : 0,65

Kmod1 Média Duração: 0,8

Kfi: 1,15

Kmod1 Curta Duração: 0,9

nfi: 0,6

Kmod1 Instantânea: 1,1

TRRF: 60

Kmod2: 0,8

γ_{wc} : 1,4

Kmod3: 0,95

γ_{wt} : 1,8

Φ : 0,8

γ_m : 1

Ψ_0 : 0,8

km: 0,7

Ψ_1 : 0,7

β_c : 1

GEOMETRIA

B : 25

H : 76

MATERIAL

$f_{c,0,k}$: 25 (MPa)

$f_{t,0,d} = f_{c,0,k} \cdot k_{mod} / \gamma_{wt}$

$f_{c,0,d} = f_{c,0,k} \cdot k_{mod} / \gamma_{wc}$

p : 480 (kgf/m³)

RESULTADOS PARCIAIS

Area Líquida : 1.900,00 (cm²)

W_x : 24.066,67 (cm³)

I_x : 914.533,33 (cm⁴)

W_y : 7.916,67 (cm³)

I_y : 98.958,33 (cm⁴)

CARREGAMENTO (tf,m)

Caso	Nk (tf)	Mxk (tfm)	Myk (tfm)
Perm	68,384	0	0
Acid	15,005	0	0

COMBINAÇÕES

Nome	Perm	Acid
Permanente	1,00	0,00
Acidental	0,00	1,00
ELS Inicial	1,00	1,00
ELS Final	1,80	1,48
ELU	1,40	1,50
Incêndio	1,40	1,50

VERIFICAÇÃO ELU

ESFORÇOS SOLICITANTES (tf/TFM)

Caso	NSd (tf)	MxSd (tfm)	MySd (tfm)	Duração
Permanente	68,38	0,00	0,00	PERMANENTE
Acidental	15,01	0,00	0,00	LONGA
ELS Inicial	83,39	0,00	0,00	LONGA
ELS Final	145,30	0,00	0,00	LONGA
ELU	118,25	0,00	0,00	LONGA
Incêndio	118,25	0,00	0,00	LONGA

TENSÕES RESISTENTES

$f_{c,0,d} = f_{c,0,k} \cdot k_{mod} / \gamma_{wc}$

$f_{t,0,d} = f_{c,0,k} \cdot k_{mod} / \gamma_{wt}$

Kmod

$k_{mod} = k_{mod1} \cdot k_{mod2} \cdot k_{mod3}$

kmod utilizado em função do caso e duração do carregamento

Caso	Kmod	$f_{c,0,d}$ (Mpa)	$f_{t,0,d}$ (Mpa)	Duração
Permanente	0,46	8,14	6,33	PERMANENTE
Acidental	0,53	9,50	7,39	LONGA
ELU	0,53	9,50	7,39	LONGA

Tensões

Caso	σ_{Nd} (Mpa)	σ_{Mxd} (Mpa)	σ_{Myd} (Mpa)
Permanente	3,60	0,00	0,00
Acidental	0,79	0,00	0,00
ELU	6,22	0,00	0,00

$\sigma_{Nd} = N_{sk} \cdot \gamma_f / A$

$\sigma_{Mxd} = M_{xsk} \cdot \gamma_f / W_x$

$\sigma_{Myd} = M_{ysk} \cdot \gamma_f / W_y$

ESTABILIDADE

$\lambda_x = 12,40$

$\lambda_y = 37,69$

$\lambda_{rel,x} = 0,21$

$\lambda_{rel,y} = 0,63$

Verificação

Caso	Razão	Situação
Permanente	0,47	Ok
Acidental	0,09	Ok
ELU	0,72	Ok

INCÊNDIO

kfi : 1,15 (mm/min)

β_n : 0,65 (mm/min)

nfi : 0,6 (mm/min)

ecarb : 39,00 (mm)

TRRF : 60 (min)

eef : 46,00 (mm)

GEOMETRIA EM INCÊNDIO

H incêndio : 66,80 (mm)

B incêndio : 15,80 (mm)

RESULTADOS PARCIAIS EM INCÊNDIO

Areai : 1.055,44 (cm²)

I_{xi} : 392.468,88 (cm⁴)

I_{yi} : 21.956,67 (cm⁴)

W_{xi} : 11.750,57 (cm³)

W_{yi} : 2.779,33 (cm³)

TENSÕES RESISTENTES EM INCÊNDIO

$f_{c,0,di} = f_{c,0,k} \cdot k_{mod} \cdot k_{fi} / \gamma_m$: 28,75 (MPa)

$f_{t,0,di} = f_{c,0,k} \cdot k_{mod} \cdot k_{fi} / \gamma_m$: 28,75 (MPa)

TENSÕES SOLICITANTES

$\sigma_{Ndf} = N_{kk} \cdot \gamma_f \cdot n_{fi} / A$: 11,20 (MPa)

$\sigma_{Mxdf} = M_{yk} \cdot \gamma_f \cdot n_{fi} / W_x$: 0,00 (MPa)

$\sigma_{Mydf} = M_{xk} \cdot \gamma_f \cdot n_{fi} / W_y$: 0,00 (MPa)

ESTABILIDADE

$\lambda_{xf} = 14,11$

$\lambda_{rel,xf} = 0,24$

$\lambda_{yf} = 59,64$

$\lambda_{rel,yf} = 0,99$

Verificação

Razão = 0,95 - Ok

ENCURTAMENTO ELÁSTICO DO PILAR (ELS)

DeltaL = NL/EA

DeltaL (t0) = 0,09 cm

DeltaL (t[∞]) = 0,16 cm

APÊNDICE 05 – DIMENSÕES AJUSTADAS E ADOTADAS PARA AS LAJES EM CLT

PAVIMENTO	CÓDIGO	H [cm] AJUSTADO	H [cm] ADOTADO
1º, 2º e 3º TIPO	L1 a L10 e L39 a L48	20	18
	L11 a L20 e L29 a L38	10	14
COBERTURA	L1 a L10 e L39 a L48	20	16
	L11 a L20 e L39 a L38	10	10

Fonte: Autores (2025).

APÊNDICE 06 – DIMENSÕES AJUSTADAS E ADOTADAS PARA AS VIGAS EM MLC

PAVIMENTO	CÓDIGO	B [cm] AJUSTADO	H [cm] AJUSTADO	B [cm] ADOTADO	H [cm] ADOTADO
1º, 2º, 3º TIPO E COBERTURA	V1, V2, V12 e V13	15	48	15	56
	V3, V4, V10 e V11	15	60	20	64
	V5, V6, V8 e V9	15	60	15	52
	V14, V15, V26 a V29, V41 e V42	15	60	20	56
	V17, V18, V24, V25, V30 a V33, V38 e V39	15	68	25	68

Fonte: Autores (2025).

APÊNDICE 07 – DIMENSÕES AJUSTADAS E ADOTADAS PARA OS PILARES EM MLC

CÓDIGO	B [cm] AJUSTADO	H [cm] AJUSTADO	B [cm] ADOTADO	H [cm] ADOTADO
P1	25	40	20	60
P2	15	60	25	64
P3	15	60	25	64
P4	15	60	25	64
P5	15	60	25	64
P6	15	40	20	60
P7	15	40	20	60
P8	15	60	25	64
P9	15	60	25	64
P10	15	60	25	64
P11	15	60	25	64
P12	25	40	20	60
P13	25	40	25	36
P14	20	60	25	76
P15	20	60	25	76
P16	20	60	25	76
P17	20	60	25	76
P18	15	60	25	36
P19	15	60	25	36
P20	20	60	25	76
P21	20	60	25	76
P22	20	60	25	76
P23	20	60	25	76
P24	25	40	25	36
P25	15	48	25	36
P26	20	60	25	56
P27	20	60	25	52
P28	20	40	25	52
P29	15	60	25	36
P30	20	60	25	36
P31	15	60	25	48
P32	15	60	25	48
P33	20	60	25	36
P34	15	60	25	36
P35	15	48	25	52
P36	15	68	25	52
P37	20	60	25	56
P38	15	60	25	36

Fonte: Autores (2025).

CÓDIGO	B [cm] AJUSTADO	H [cm] AJUSTADO	B [cm] ADOTADO	H [cm] ADOTADO
P42	20	60	25	48
P43	20	60	25	56
P44	20	40	25	52
P45	15	60	25	52
P46	15	60	25	36
P47	20	60	25	36
P48	15	60	25	48
P49	15	60	25	48
P50	20	60	25	36
P51	15	60	25	36
P52	15	48	25	52
P53	20	48	25	52
P54	20	60	25	56
P55	15	48	25	36
P56	25	40	25	36
P57	20	60	25	76
P58	20	60	25	76
P59	20	60	25	76
P60	20	60	25	76
P61	15	60	25	36
P62	15	60	25	36
P63	20	60	25	76
P64	20	60	25	76
P65	20	60	25	76
P66	20	60	25	76
P67	25	40	25	36
P68	25	40	20	60
P69	15	60	25	64
P70	15	60	25	64
P71	15	60	25	64
P72	15	60	25	64
P73	15	40	20	60
P74	15	40	20	60
P75	15	60	25	64
P76	15	60	25	64
P77	15	60	25	64
P78	15	60	25	64
P79	25	40	20	60

Fonte: Autores (2025).

APÊNDICE 08 – ESFORÇOS CARACTERÍSTICOS EM MADEIRA ENGENHEIRADA COM PERCENTUAL DE VARIAÇÃO

CÓDIGO	N_{k1i} – inicial [tf]	N_{k1f} – final [tf]	Variação - N_{k1i}/N_{k1f} [%]
P1	22,14	22,40	1,17%
P2	66,78	67,65	1,30%
P3	66,78	67,65	1,30%
P4	66,78	67,65	1,30%
P5	66,78	67,65	1,30%
P6	21,92	22,40	2,20%
P7	21,92	22,40	2,20%
P8	66,78	67,65	1,30%
P9	66,78	67,65	1,30%
P10	66,78	67,65	1,30%
P11	66,78	67,65	1,30%
P12	22,14	22,40	1,17%
P13	29,20	29,34	0,48%
P14	83,85	85,01	1,38%
P15	83,85	85,01	1,38%
P16	83,85	85,01	1,38%
P17	83,85	85,01	1,38%
P18	29,14	29,34	0,67%
P19	29,14	29,34	0,67%
P20	83,85	85,01	1,38%
P21	83,85	85,01	1,38%
P22	83,85	85,01	1,38%
P23	83,85	85,01	1,38%
P24	29,20	29,34	0,48%
P25	31,04	31,34	0,98%
P26	53,19	53,73	1,01%
P27	49,66	50,13	0,94%
P28	48,81	49,5	1,41%
P29	28,01	28,23	0,78%
P30	29,32	29,37	0,19%
P31	44,27	44,76	1,11%
P32	44,27	44,76	1,11%
P33	29,32	29,37	0,19%
P34	28,01	28,23	0,78%
P35	48,76	49,5	1,50%
P36	49,56	50,13	1,14%
P37	53,19	53,73	1,01%
P38	31,14	31,34	0,66%

Fonte: Autores (2025).

CÓDIGO	N_{k1i} – inicial [tf]	N_{k1f} – final [tf]	Variação - N_{k1i}/N_{k1f} [%]
P42	31,31	31,34	0,65%
P43	53,19	53,73	1,01%
P44	49,44	50,13	1,40%
P45	48,86	49,50	1,29%
P46	28,01	28,23	0,78%
P47	29,32	29,37	0,19%
P48	44,27	44,76	1,11%
P49	44,27	44,76	1,11%
P50	29,32	29,37	0,19%
P51	28,01	28,23	0,78%
P52	48,76	49,50	1,50%
P53	49,53	50,13	1,21%
P54	53,19	53,73	1,01%
P55	31,04	31,34	0,98%
P56	29,20	29,34	0,48%
P57	83,85	85,01	1,38%
P58	83,85	85,01	1,38%
P59	83,85	85,01	1,38%
P60	83,85	85,01	1,38%
P61	29,14	29,34	0,67%
P62	29,14	29,34	0,67%
P63	83,85	85,01	1,38%
P64	83,85	85,01	1,38%
P65	83,85	85,01	1,38%
P66	83,85	85,01	1,38%
P67	29,20	29,34	0,48%
P68	22,14	22,40	1,17%
P69	66,78	67,65	1,30%
P70	66,78	67,65	1,30%
P71	66,78	67,65	1,30%
P72	66,78	67,65	1,30%
P73	21,92	22,40	2,20%
P74	22,09	22,40	1,42%
P75	66,78	67,65	1,30%
P76	66,78	67,65	1,30%
P77	66,78	67,65	1,30%
P78	66,83	67,65	1,22%
P79	22,14	22,40	1,17%

Fonte: Autores (2025).

APÊNDICE 09 – COMPARAÇÃO ENTRE ESFORÇOS CARACTERÍSTICOS PARA OS PILARES ORIGINAIS DE CONCRETO ARMADO E PILARES FINAIS ADOTADOS DE MADEIRA ENGENHEIRADA (MLC)

CÓDIGO	N _{k0} concreto [tf]	N _{k1f} MLC [tf]	Variação {(1 - N _{k0} /N _{k1f})*100%}
P1	52,00	22,40	56,92%
P2	93,00	67,65	27,26%
P3	93,00	67,65	27,26%
P4	93,00	67,65	27,26%
P5	93,00	67,65	27,26%
P6	46,00	22,40	51,30%
P7	46,00	22,40	51,30%
P8	93,00	67,65	27,26%
P9	93,00	67,65	27,26%
P10	93,00	67,65	27,26%
P11	93,00	67,65	27,26%
P12	52,00	22,40	56,92%
P13	86,00	29,34	65,89%
P14	153,00	85,01	44,44%
P15	142,00	85,01	40,13%
P16	143,00	85,01	40,55%
P17	162,00	85,01	47,53%
P18	76,00	29,34	61,40%
P19	76,00	29,34	61,40%
P20	176,00	85,01	51,70%
P21	148,00	85,01	42,56%
P22	143,00	85,01	40,55%
P23	149,00	85,01	42,95%
P24	86,00	29,34	65,89%
P25	80,00	31,34	60,82%
P26	135,00	53,73	60,20%
P27	148,00	50,13	66,13%
P28	140,00	49,5	64,65%
P29	103,00	28,23	72,59%
P30	94,00	29,37	68,75%
P31	61,00	44,76	26,62%
P32	65,00	44,76	31,14%
P33	120,00	29,37	75,52%
P34	102,00	28,23	72,32%
P35	105,00	49,5	52,86%
P36	139,00	50,13	63,94%
P37	135,00	53,73	60,20%
P38	83,00	31,34	62,24%

Fonte: Autores (2025).

CÓDIGO	N _{k0} concreto [tf]	N _{k1f} MLC [tf]	Variação {(1 - N _{k0} /N _{k1f})*100%}
P42	80,00	31,34	60,61%
P43	135,00	53,73	60,20%
P44	148,00	50,13	66,13%
P45	140,00	49,50	64,65%
P46	103,00	28,23	72,59%
P47	94,00	29,37	68,75%
P48	61,00	44,76	26,62%
P49	65,00	44,76	31,14%
P50	120,00	29,37	75,52%
P51	102,00	28,23	72,32%
P52	105,00	49,50	52,86%
P53	146,00	50,13	65,67%
P54	135,00	53,73	60,20%
P55	83,00	31,34	62,24%
P56	86,00	29,34	65,89%
P57	153,00	85,01	44,44%
P58	142,00	85,01	40,13%
P59	143,00	85,01	40,55%
P60	162,00	85,01	47,53%
P61	76,00	29,34	61,40%
P62	76,00	29,34	61,40%
P63	176,00	85,01	51,70%
P64	148,00	85,01	42,56%
P65	143,00	85,01	40,55%
P66	149,00	85,01	42,95%
P67	86,00	29,34	65,89%
P68	52,00	22,40	56,92%
P69	93,00	67,65	27,26%
P70	93,00	67,65	27,26%
P71	93,00	67,65	27,26%
P72	93,00	67,65	27,26%
P73	46,00	22,40	51,30%
P74	46,00	22,40	51,30%
P75	93,00	67,65	27,26%
P76	93,00	67,65	27,26%
P77	93,00	67,65	27,26%
P78	93,00	67,65	27,26%
P79	52,00	22,40	56,92%

Fonte: Autores (2025).