

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS  
DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS  
LABORATÓRIO DE MADEIRA E ESTRUTURAS DE MADEIRAS

RAFAEL SANCHES MERCADANTE

PROJETO ESTRUTURAL DE UM EDIFÍCIO RESIDENCIAL EM  
MADEIRA ENGENHEIRADA

São Carlos

2021



RAFAEL SANCHES MERCADANTE

PROJETO ESTRUTURAL DE UM EDIFÍCIO RESIDENCIAL EM  
MADEIRA ENGENHEIRADA

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil, da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientador:

Prof. Dr. Francisco Antonio Rocco Lahr

São Carlos

2021



## FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Rafael Sanches Mercadante

Título do trabalho de conclusão: “Projeto estrutural de um edifício residencial em madeira engenheirada”

Orientador: Prof. Francisco Antonio Rocco Lahr

Data da defesa: 16/12/2021

### **Comissão Julgadora**

### **Resultado**

Prof. Antonio Alves Dias

Aprovado

(Escola de Engenharia de São Carlos – EESC/USP)

Marcos Cesar de Moraes Pereira

Aprovado

(Pós-doutorando Escola de Engenharia de São Carlos – EESC/USP)

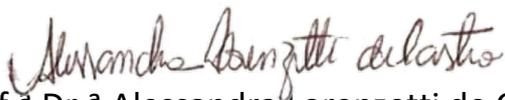
Rodrigo de Souza Nogueira

Aprovado

(Doutorando - Escola de Engenharia de São Carlos – EESC/USP)

Docente responsável pela disciplina 1800094 - Trabalho de Conclusão de Curso

II junto à turma do Departamento de Engenharia de Estruturas (SET):



Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Alessandra Lorenzetti de Castro



*A minha família por todo o suporte e incentivo dados, que me ajudou a ingressar, desenvolver e concluir mais esta etapa da minha vida.*



## **AGRADECIMENTOS**

Em especial ao Dr. Francisco Antonio Rocco Lahr, que me orientou não só durante a elaboração deste projeto, mas também ao longo de minha graduação, sempre com muita dedicação e carinho.

Aos Drs. Carlito Calil Junior e Antonio Alves Dias, monitores pós-graduandos e técnicos do LaMEM que participaram da minha formação como engenheiro civil e contribuíram para o meu crescimento na área de estruturas de madeira.

Aos meus companheiros de trabalho da Stamade, que compartilharam comigo conhecimentos práticos e teóricos do uso da madeira industrializada em projetos de edifícios.

A minha irmã Ana Carolina Mercadante e a minha amiga Julia Rodrigues da Silva, arquitetas que me aconselharam na fase de desenvolvimento da concepção arquitetônica do edifício projetado.



## **RESUMO**

MERCADANTE, R. S. **Projeto estrutural de um edifício residencial em madeira engenheirada**. 2021. 214 f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2021.

O presente trabalho tem como objetivo principal o estudo da utilização da madeira industrializada na construção de edifícios residenciais sustentáveis de médio porte, por meio do dimensionamento de uma edificação de 7 pavimentos com vigas e pilares em Madeira Lamelada Colada, bem como lajes e paredes em painéis de Madeira Lamelada Colada Cruzada. Para a análise estrutural do edifício utiliza-se o software computacional de elementos finitos “Dublal RFEM”, que possibilita a obtenção dos esforços solicitantes na estrutura de maneira mais precisa. Ademais, para as verificações dos elementos estruturais, faz-se uso da ABNT NBR 7190:2022, que contempla atualizações dos métodos de verificação das estruturas de madeira, contribuindo para que o projeto seja elaborado com base nos estudos mais atuais. Com os resultados obtidos neste estudo, pretende-se comprovar a eficiência da madeira como material da estrutura principal de grandes obras e contribuir para a difusão da madeira engenheirada para todo o Brasil.

Palavras-chave: Madeira lamelada colada. Madeira lamelada colada cruzada. Construções sustentáveis. Edifícios altos de madeira.



## **ABSTRACT**

MERCADANTE, R. S. **Structural design of a residential building in mass timber.** 2021. 214 f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2021.

The main objective of this work is to study the use of mass timber in the construction of residential sustainable medium-sized buildings, by means of the structural design of a 7-story building with beams and columns in Glued Laminated Timber, as well as slabs and walls in Cross Laminated Timber panels. Furthermore, for the building structural analysis, the finite element computational software "Dubal RFEM" is used, which allows obtaining the structure loads precisely. Moreover, for the structural elements verification, use is made of ABNT NBR 7190:2022, which includes updates to the timber structures verification methods, contributing to the project being made based on the most current studies. The results obtained in this study, it is intended to prove the efficiency of wood as a material for the main structure of big constructions and contribute to spreading mass timber throughout Brazil.

**Keywords:** Glued Laminated Timber. Cross Laminated Timber. Sustainable Constructions. Tall timber buildings.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Composição da madeira lamelada colada. (Fonte: Madeira Engenheirada, 2021)..	27
Figura 2 – Montagem de um painel de madeira lamelada colada cruzada. (Fonte: adaptado de U.S. Mass Timber Construction Manual, 2021).....	28
Figura 3 – Pavimento tipo do <i>Brock Commons Tallwood House</i> composto por pilares em MLC, lajes em CLT e núcleo rígido em concreto armado. (Fonte: Archdaily, 2017).....	29
Figura 4 – Painéis de fechamento em CLT sendo posicionados na fachada do <i>Brock Commons Tallwood</i> . (Fonte: Archdaily, 2017) .....	29
Figura 5 – Vista aérea da fachada do <i>Brock Commons Tallwood</i> . (Fonte: Archdaily, 2017) ..	30
Figura 6 – Vista da fachada do <i>Mjøstårnet</i> . (Fonte: Archdaily, 2019).....	30
Figura 7 – Finalização da montagem do prédio em <i>Wood frame</i> em Araucária-PR. (Fonte: Tecverde, 2016).....	31
Figura 8 – Vista interior da loja da <i>Dengo</i> em São Paulo-SP. (Fonte: Archdaily, 2021).....	32
Figura 9 – Vista da fachada do terreno de implantação do projeto. (Fonte: Google Street View, 2017).....	33
Figura 10 – Localização do terreno de implantação do projeto. (Fonte: Google Maps, 2021)	33
Figura 11 – Dimensões do terreno de implantação do projeto. (Fonte: Prefeitura de São Carlos, 2021).....	34
Figura 12 – Conceito de “rolling shear”. (Fonte: adaptado de CLT as structural material, 2019) .....	40
Figura 13 – Pré-furação das lajes. (Fonte: naturally:wood, 2017) .....	44
Figura 14 – Encaixe das lajes nos pilares por meio de pré-furações. (Fonte: naturally:wood, 2016).....	44
Figura 15 – Fixação da base do pilar na laje. (Fonte: naturally:wood, 2016) .....	45
Figura 16 – Configuração do sistema de conexão pilar-pilar. (Fonte: adaptado de naturally:wood, 2016).....	45
Figura 17 – Configuração do sistema de conexão pilar-térreo. (Fonte: adaptado de naturally:wood, 2016).....	46
Figura 18 – Ancorante parafusável do tipo SKR para concreto. (Fonte: Catálogo técnico Rothoblaas, 2019).....	46
Figura 19 – Configuração da ligação pilar-cobertura. (Fonte: próprio autor, 2021).....	47
Figura 20 – Cota de nível de cada pavimento do edifício. (Fonte: próprio autor, 2021) .....	48
Figura 21 – Viga de MLC do edifício Tallwood 1. (Fonte: District 56, 2021) .....	49
Figura 22 – Configuração da ligação viga-pilar. (Fonte: Rewood, 2021).....	50
Figura 23 – Processo de montagem da ligação com chapa interna e parafuso SBD: 04 – cortes para a acomodação da chapa; 05 – encaixe da viga apoiada; 06 – inserção dos parafusos SBD; 07 – fechamento do furo com cavilhas de madeira. (Fonte: Catálogo técnico Rothoblaas, 2019) .....	50
Figura 24 – Seção da viga com chapa interna fixa com parafuso SBD embutido. (Fonte: Catálogo técnico Rothoblaas, 2019).....	50
Figura 25 – Parafuso LBS com aço de alta resistência. (Fonte: Catálogo técnico Rothoblaas, 2019).....	51

Figura 26 – Parafuso SBD autoperfurante com aço de alta resistência. (Fonte: Catálogo técnico Rothoblaas, 2019).....	51
Figura 27 – Orientação das lamelas externas para painéis de laje e parede. (Fonte: adaptado de CLT as structural material, 2019).....	52
Figura 28 –Ligação do topo da laje com a viga. (Fonte: adaptado de Processing guideline binderholz CLT BBS, 2018).....	53
Figura 29 – Parafuso HBS com aço de alta resistência. (Fonte: Catálogo técnico Rothoblaas, 2019).....	53
Figura 30 - Emenda entre as lajes de CLT com parafuso VGZ. (Fonte: Catálogo técnico Rothoblaas, 2019).....	54
Figura 31 – Parafuso VGZ totalmente roscado com aço de alta resistência. (Fonte: Catálogo técnico Rothoblaas, 2019) .....	54
Figura 32 – Isolamento acústico no apoio dos painéis de laje e parede. (Fonte: Processing guideline binderholz CLT BBS, 2018).....	55
Figura 33 – Configuração geral das forças resistidas pelos conectores da base das paredes de CLT. (Fonte: adaptado de Connections systems for CLT structures, 2019) .....	56
Figura 34 – Conector angular Titan N para forças de corte e tração adotado para o pavimento térreo. (Fonte: Catálogo técnico Rothoblaas, 2019) .....	57
Figura 35 – Conector angular Titan N com reforço TCW para esforços de tração. (Fonte: Catálogo técnico Rothoblaas, 2019).....	58
Figura 36 – Conector angular Titan V para forças de corte e tração adotado para os pavimentos tipo e cobertura. (Fonte: Catálogo técnico Rothoblaas, 2019) .....	58
Figura 37 – Vista lateral da fixação do conector angular Titan V na parede e na laje. (Fonte: Catálogo técnico Rothoblaas, 2019).....	59
Figura 38 – Parafuso VGS totalmente roscado com cabeça escareada e aço de alta resistência. (Fonte: Catálogo técnico Rothoblaas, 2019) .....	59
Figura 39 –Ligação do topo da parede com a viga. (Fonte: adaptado de Processing guideline binderholz CLT BBS, 2018).....	60
Figura 40 – Conexão entre paredes perpendiculares. (Fonte: adaptado de Processing guideline binderholz CLT BBS, 2018).....	60
Figura 41 – Fixação da base de paredes sem laje abaixo. (Fonte: adaptado de Processing guideline binderholz CLT BBS, 2018).....	61
Figura 42 – Exemplo de um suporte de madeira envolto por uma chapa impermeabilizante para proteção da base da parede do térreo. (Fonte: adaptado de Processing guideline binderholz CLT BBS, 2018) .....	62
Figura 43 – Configuração geral dos lances das escadas e seções das peças. (Fonte: próprio autor, 2021).....	63
Figura 44 – Composição dos acabamentos das lajes e paredes. (Fonte: próprio autor, 2021) ..	65
Figura 45 – Composição da face externa das paredes da fachada. (Fonte: Catálogo técnico Crosslam, 2021).....	66
Figura 46 – Piso elevado do edifício Tallwood 1. (Fonte: District 56, 2021).....	67
Figura 47 – Estrutura de polipropileno reciclado do piso elevado. (Fonte: Remaster, 2021) ..	67
Figura 48 – Composição da laje de cobertura. (Fonte: Catálogo técnico Crosslam, 2021) .....	69
Figura 49 – Camada do arboreto do telhado verde. (Fonte: adaptado de CATUZZO, 2013) ..	70

Figura 50 – Estimativa de produção de energia para a localidade do edifício no ano de 2021. (Fonte: Portal solar, 2021).....	71
Figura 51 – Direções principais do vento analisado. (Fonte: próprio autor, 2021).....	74
Figura 52 – Limites para deslocamentos globais em edifícios com múltiplos pavimentos. (Fonte: ABNT NBR 9062, 2017) .....	88
Figura 53 – Esquemática admitida para o cálculo das inércias e dimensionamento dos painéis de CLT. (Fonte: The CLT Handbook, 2019) .....	89
Figura 54 – Ações atuantes nos painéis de laje. (Fonte: adaptado de CLT as structural material, 2019).....	90
Figura 55 – Consideração do módulo de elasticidade longitudinal para cada camada do painel nas direções forte (mais rígida) e fraca (menos rígida). (Fonte: adaptado de CLT as structural material, 2019).....	91
Figura 56 – Consideração do módulo de elasticidade transversal para cada camada do painel nas direções forte (mais rígida) e fraca (menos rígida). (Fonte: adaptado de CLT as structural material, 2019).....	92
Figura 57 – Distâncias no método Gamma. (Fonte: adaptado de Cross-Laminated Timber Structural Design, 2014).....	95
Figura 58 – Ações atuantes nos painéis de parede. (Fonte: adaptado de CLT as structural material, 2019).....	99
Figura 59 – Cisalhamento no plano, tensão cisalhante nas bordas do painel. (Fonte: adaptado de CLT as structural material, 2019) .....	101
Figura 60 – Configuração de ligações de elementos de madeira com parafusos de rosca soberba em corte simples. (Fonte: ABNT NBR 7190:2022).....	105
Figura 61 – Configurações de ligações de elementos de madeira e aço pinos metálicos. (Fonte: adaptado da ABNT NBR 7190:2022) .....	108
Figura 62 – Espaçamentos em ligações com pinos metálicos. (Fonte: ABNT NBR 7190:2022) .....	114
Figura 63 – Seção residual da madeira em situação de incêndio. (Fonte: adaptado de ABNT NBR 7190:2022) .....	116
Figura 64 – Tipos de carbonização. (Fonte: adaptado de ABNT NBR 7190:2022) .....	117
Figura 65 – Propriedades geométricas dos pilares ocultos. (Fonte: próprio autor, 2021).....	122
Figura 66 – Propriedades geométricas dos pilares aparentes. (Fonte: próprio autor, 2021) ..	122
Figura 67 – Propriedades da madeira dos elementos de MLC ocultos para o ELU. (Fonte: próprio autor, 2021).....	123
Figura 68 – Propriedades da madeira dos elementos de MLC aparentes para o ELU. (Fonte: próprio autor, 2021).....	123
Figura 69 – Propriedades da madeira dos elementos de MLC para o ELS. (Fonte: próprio autor, 2021).....	124
Figura 70 – Sistema de eixos locais das barras utilizado para a inserção da rigidez das ligações. (Fonte: próprio autor, 2021) .....	124
Figura 71 – Valores de rigidez ao deslocamento e ao giro aplicados nas ligações pilar-pilar e pilar-térreo, para o ELU. (Fonte: próprio autor, 2021).....	125
Figura 72 – Valores de rigidez ao deslocamento e ao giro aplicados nas ligações pilar-pilar e pilar-térreo, para o ELS. (Fonte: próprio autor, 2021) .....	125

Figura 73 – Visão geral dos pilares modelados. (Fonte: próprio autor, 2021).....	126
Figura 74 – Propriedades geométricas das vigas ocultas. (Fonte: próprio autor, 2021).....	127
Figura 75 – Propriedades geométricas das vigas aparentes. (Fonte: próprio autor, 2021).....	127
Figura 76 – Valores de rigidez ao deslocamento e ao giro aplicados nas ligações viga-pilar e viga-viga em vigas ocultas, para o ELU. (Fonte: próprio autor, 2021).....	128
Figura 77 – Valores de rigidez ao deslocamento e ao giro aplicados nas ligações viga-pilar e viga-viga em vigas aparentes, para o ELU. (Fonte: próprio autor, 2021) .....	128
Figura 78 – Valores de rigidez ao deslocamento e ao giro aplicados nas ligações viga-pilar e viga-viga em vigas ocultas, para o ELS. (Fonte: próprio autor, 2021).....	129
Figura 79 – Valores de rigidez ao deslocamento e ao giro aplicados nas ligações viga-pilar e viga-viga em vigas aparentes, para o ELS. (Fonte: próprio autor, 2021).....	129
Figura 80 – Visão geral das vigas modeladas. (Fonte: próprio autor, 2021).....	130
Figura 81 – Propriedades geométricas das vigas principais da escada. (Fonte: próprio autor, 2021).....	131
Figura 82 – Valores de rigidez ao deslocamento e ao giro aplicados na ligação viga escada-viga, para o ELU. (Fonte: próprio autor, 2021).....	132
Figura 83 – Valores de rigidez ao deslocamento e ao giro aplicados na ligação viga escada-térreo, para o ELU. (Fonte: próprio autor, 2021) .....	132
Figura 84 – Valores de rigidez ao deslocamento e ao giro aplicados na ligação viga escada-viga, para o ELS. (Fonte: próprio autor, 2021) .....	133
Figura 85 – Valores de rigidez ao deslocamento e ao giro aplicados na ligação viga escada-térreo, para o ELS. (Fonte: próprio autor, 2021) .....	133
Figura 86 – Visão geral das vigas da escada modeladas. (Fonte: próprio autor, 2021) .....	134
Figura 87 – Ampliação das vigas modeladas na região da escada. (Fonte: próprio autor, 2021) .....	134
Figura 88 – Visão geral da modelagem dos pilares e vigas do edifício. (Fonte: próprio autor, 2021).....	135
Figura 89 – Propriedades da madeira das lajes de CLT para o ELU. (Fonte: próprio autor, 2021) .....	136
Figura 90 – Propriedades da madeira das paredes de CLT para o ELU. (Fonte: próprio autor, 2021).....	136
Figura 91 – Propriedades da madeira das lajes de CLT para o ELS. (Fonte: próprio autor, 2021) .....	137
Figura 92 – Propriedades da madeira das paredes de CLT para o ELS. (Fonte: próprio autor, 2021).....	137
Figura 93 – Valores de rigidez ao deslocamento e ao giro aplicados na ligação parede-laje e parede-térreo, para o ELU. (Fonte: próprio autor, 2021) .....	138
Figura 94 – Valores de rigidez ao deslocamento e ao giro aplicados na emenda entre painéis, para o ELU. (Fonte: próprio autor, 2021).....	138
Figura 95 – Valores de rigidez ao deslocamento e ao giro aplicados na ligação laje-viga, para o ELU. (Fonte: próprio autor, 2021) .....	139
Figura 96 – Valores de rigidez ao deslocamento e ao giro aplicados na ligação parede-laje e parede-térreo, para o ELS. (Fonte: próprio autor, 2021).....	139

Figura 97 – Valores de rigidez ao deslocamento e ao giro aplicados na emenda entre painéis, para o ELS. (Fonte: próprio autor, 2021) .....	139
Figura 98 – Valores de rigidez ao deslocamento e ao giro aplicados na ligação laje-viga, para o ELS. (Fonte: próprio autor, 2021) .....	140
Figura 99 – Visão geral dos painéis de laje modelados. (Fonte: próprio autor, 2021).....	140
Figura 100 – Visão geral do edifício com todos os elementos modelados. (Fonte: próprio autor, 2021).....	141
Figura 101 – Peso dos acabamentos aplicado nas paredes do modelo. (Fonte: próprio autor, 2021).....	144
Figura 102 – Peso dos acabamentos aplicado nas lajes do pavimento tipo do modelo. (Fonte: próprio autor, 2021).....	145
Figura 103 – Peso dos acabamentos aplicado nas escadas. (Fonte: próprio autor, 2021).....	147
Figura 104 – Peso dos componentes da cobertura aplicado nos painéis de laje. (Fonte: próprio autor, 2021).....	149
Figura 105 – Peso do telhado verde aplicado nos painéis de laje. (Fonte: próprio autor, 2021) .....	150
Figura 106 – Peso das placas fotovoltaicas aplicado nos painéis de laje. (Fonte: próprio autor, 2021).....	150
Figura 107 – Sobrecarga de uso e ocupação aplicada nos painéis de laje. (Fonte: próprio autor, 2021).....	151
Figura 108 – Peso da casa de máquinas aplicada nos painéis de laje do elevador. (Fonte: próprio autor, 2021).....	152
Figura 109 – Dimensões do reservatório adotado. (Fonte: Fortlev, 2021).....	153
Figura 110 – Peso dos reservatórios aplicado nos painéis de laje da caixa d’água. (Fonte: próprio autor, 2021).....	154
Figura 111 – Coeficientes de pressão externa ( $C_e$ ) da cobertura para os ventos $0^\circ$ e $180^\circ$ . (Fonte: próprio autor, 2021).....	155
Figura 112 – Coeficientes de pressão externa ( $C_e$ ) da cobertura para os ventos $90^\circ$ e $270^\circ$ . (Fonte: próprio autor, 2021).....	155
Figura 113 – Coeficientes de pressão externa ( $C_e$ ) das paredes para os ventos das direções principais. (Fonte: próprio autor, 2021) .....	156
Figura 114 – Pressão do vento atuante na direção $0^\circ$ aplicada no modelo. (Fonte: próprio autor, 2021).....	158
Figura 115 – Pressão do vento atuante na direção $90^\circ$ aplicada no modelo. (Fonte: próprio autor, 2021).....	159
Figura 116 – Diagrama de momentos fletores da viga VT103 para a combinação crítica. (Fonte: próprio autor, 2021).....	161
Figura 117 – Diagrama de forças cortantes da viga VT22 para a combinação crítica. (Fonte: próprio autor, 2021).....	162
Figura 118 – Diagrama de forças cortantes da viga VT58 para a combinação crítica. (Fonte: próprio autor, 2021).....	162
Figura 119 – Diagrama de deformações verticais da viga V03 do 5º pavimento para a combinação crítica. (Fonte: próprio autor, 2021).....	164

Figura 120 – Diagrama de forças normais do pilar PT08 para a combinação crítica. (Fonte: próprio autor, 2021).....	166
Figura 121 – Diagrama de momentos fletores na direção Y do pilar PT08 para a combinação crítica. (Fonte: próprio autor, 2021) .....	167
Figura 122 – Diagrama de momentos fletores na direção Z do pilar PT08 para a combinação crítica. (Fonte: próprio autor, 2021) .....	167
Figura 123 – Diagrama de deslocamentos horizontais na direção Y do pilar PC08 para a combinação crítica. (Fonte: próprio autor, 2021) .....	169
Figura 124 – Diagrama de deslocamentos horizontais na direção X do pilar PC07 para a combinação crítica. (Fonte: próprio autor, 2021) .....	170
Figura 125 – Diagrama de momentos fletores na direção X da laje PL07 do 6º pavimento para a combinação crítica. (Fonte: próprio autor, 2021) .....	177
Figura 126 – Diagrama de momentos fletores na direção Y da laje PLC01 da casa de máquinas do elevador para a combinação crítica. (Fonte: próprio autor, 2021).....	177
Figura 127 – Picos de forças cortantes ocorridos nos nós de ligação entre os pilares e as lajes. (Fonte: próprio autor, 2021) .....	178
Figura 128 – Diagrama de forças cortantes na direção X da laje PLC01 para a combinação crítica. (Fonte: próprio autor, 2021) .....	179
Figura 129 – Diagrama de forças cortantes na direção Y da laje PLC01 para a combinação crítica. (Fonte: próprio autor, 2021) .....	180
Figura 130 – Diagrama de deformações verticais da laje PL03 do 5º pavimento para a combinação crítica. (Fonte: próprio autor, 2021) .....	181
Figura 131 – Picos de esforços normais em trechos curtos de parede com pilares adjacentes. (Fonte: próprio autor, 2021) .....	189
Figura 132 – Diagrama de forças normais de tração da parede PPT03 na direção X para a combinação crítica. (Fonte: próprio autor, 2021).....	190
Figura 133 – Diagrama de forças normais de tração da parede PPT03 na direção Y para a combinação crítica. (Fonte: próprio autor, 2021).....	190
Figura 134 – Diagrama de forças normais de compressão da parede PPT65 na direção X para a combinação crítica. (Fonte: próprio autor, 2021) .....	192
Figura 135 – Diagrama de momentos fletores da parede PPT65 na direção X para a combinação crítica. (Fonte: próprio autor, 2021) .....	192
Figura 136 – Diagrama de forças cortantes da parede PPT16 na direção X para a combinação crítica. (Fonte: próprio autor, 2021) .....	194
Figura 137 – Diagrama de forças cortantes da parede PPT16 na direção Y para a combinação crítica. (Fonte: próprio autor, 2021) .....	194
Figura 138 – Diagrama de forças normais no plano da parede PPT03 para a combinação crítica. (Fonte: próprio autor, 2021) .....	195

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades de resistência, rigidez e densidade da madeira C24, segundo a ABNT NBR 7190:2022.....	38
Tabela 2 – Propriedades de resistência e rigidez dos painéis de CLT com lamelas de madeira C24. ....	39
Tabela 3 – Valores de $k_{mod1}$ . (Fonte: ABNT NBR 7190:2022).....	40
Tabela 4 – Valores de $k_{mod2}$ . (Fonte: ABNT NBR 7190:2022).....	41
Tabela 5 – Classes de umidade. (Fonte: ABNT NBR 7190:2022).....	41
Tabela 6 – Fatores de modificação $C_t$ . (Fonte: ABNT NBR 7190:2022). ....	42
Tabela 7 – Sobrecarga de uso e ocupação em função do ambiente.....	72
Tabela 8 – Coeficientes de ponderação das ações permanentes.....	78
Tabela 9 – Coeficientes de ponderação das ações variáveis. ....	78
Tabela 10 – Valores dos fatores de combinação ( $\Psi_0$ ) e de redução ( $\Psi_1$ e $\Psi_2$ ) para as ações variáveis.....	78
Tabela 11 – Nomenclatura das ações consideradas no projeto. ....	79
Tabela 12 – Combinações últimas normais inseridas no software <i>Dlubal RFEM</i> . ....	79
Tabela 13 – Combinações de serviço inseridas no software <i>Dlubal RFEM</i> . ....	80
Tabela 14 – Coeficiente de fluência, segundo a ABNT NBR 7190:2022.....	84
Tabela 15 – Valores dos coeficientes $K_E$ . (Fonte: ABNT NBR 7190:2022).....	87
Tabela 16 – Modos de falha e equações para ligações de elementos de madeira com pinos metálicos e corte simples. (Fonte: ABNT NBR 7190:2022).....	106
Tabela 17 – Modos de falha e equações para ligações de elementos de madeira e aço com pinos metálicos e corte simples. (Fonte: ABNT NBR 7190:2022).....	108
Tabela 18 – Modos de falha e equações para ligações de elementos de madeira e aço com pinos metálicos, chapa metálica central e corte duplo. (Fonte: ABNT NBR 7190:2022).....	109
Tabela 19 – Espaçamentos mínimos para ligações com parafusos. (Fonte: ABNT NBR 7190:2022).....	113
Tabela 20 – Propriedades de resistência de cálculo e rigidez efetiva dos elementos aparentes de MLC com lamelas de madeira C24. ....	120
Tabela 21 – Propriedades de resistência de cálculo e rigidez efetiva dos elementos ocultos de MLC com lamelas de madeira C24. ....	120
Tabela 22 – Propriedades de resistência de cálculo e rigidez efetiva dos painéis de CLT com lamelas de madeira C24.....	121
Tabela 23 – Peso dos acabamentos de parede por área para as diferentes tipologias. ....	143
Tabela 24 – Pressão do vento na cobertura para os ventos $0^\circ$ e $180^\circ$ . ....	155
Tabela 25 – Pressão do vento na cobertura para os ventos $90^\circ$ e $270^\circ$ . ....	155
Tabela 26 – Pressão de arrasto do vento para as direções principais. ....	156
Tabela 27 – Pressão de sucção nas paredes laterais do edifício para as direções principais..	157
Tabela 28 – Pressão de sucção na parede de sotavento para as direções principais.....	157
Tabela 29 – Propriedades geométricas das vigas analisadas. ....	160
Tabela 30 – Verificação das vigas à flexão simples reta. ....	160
Tabela 31 – Verificação das vigas ao cisalhamento. ....	161

Tabela 32 – Verificação das vigas à estabilidade lateral. ....	163
Tabela 33 – Verificação da deformação das vigas. ....	164
Tabela 34 – Propriedades geométricas dos pilares analisados. ....	165
Tabela 35 – Esforços solicitantes máximos dos pilares analisados. ....	165
Tabela 36 – Verificação dos pilares à flexocompressão. ....	166
Tabela 37 – Cálculo da esbeltez dos pilares. ....	168
Tabela 38 – Verificação da estabilidade dos pilares. ....	168
Tabela 39 – Verificação dos deslocamentos horizontais máximos dos pilares. ....	169
Tabela 40 – Rigidez à flexão fora do plano para a direção X (mais rígida) dos painéis de laje. ....	171
Tabela 41 – Rigidez à flexão fora do plano para a direção Y (menos rígida) dos painéis de laje. ....	171
Tabela 42 – Rigidez ao cisalhamento fora do plano para a direção X (mais rígida) dos painéis de laje. ....	172
Tabela 43 – Rigidez ao cisalhamento fora do plano para a direção Y (menos rígida) dos painéis de laje. ....	173
Tabela 44 – Área efetiva na direção X (mais rígida) dos painéis de laje. ....	174
Tabela 45 – Área efetiva na direção Y (menos rígida) dos painéis de laje. ....	174
Tabela 46 – Propriedades da seção transversal efetiva na direção X (mais rígida) dos painéis de laje. ....	175
Tabela 47 – Propriedades da seção transversal efetiva na direção Y (menos rígida) dos painéis de laje. ....	175
Tabela 48 – Rigidez efetiva na direção X dos painéis de laje calculada pelo Método Gamma. ....	175
Tabela 49 – Rigidez efetiva na direção Y dos painéis de laje calculada pelo Método Gamma. ....	176
Tabela 50 – Verificação dos painéis de laje à flexão fora do plano. ....	176
Tabela 51 – Verificação dos painéis de laje ao cisalhamento longitudinal. ....	179
Tabela 52 – Verificação dos painéis de laje ao cisalhamento <i>rolling shear</i> . ....	179
Tabela 53 – Verificação do deslocamento vertical máximo dos painéis de laje. ....	180
Tabela 54 – Cálculo da frequência de vibração para o painel de laje com maior vão. ....	181
Tabela 55 – Rigidez à flexão fora do plano para a direção X (mais rígida) dos painéis de parede. ....	182
Tabela 56 – Rigidez à flexão fora do plano para a direção Y (menos rígida) dos painéis de parede. ....	183
Tabela 57 – Rigidez ao cisalhamento fora do plano para a direção X (mais rígida) dos painéis de parede. ....	184
Tabela 58 – Rigidez ao cisalhamento fora do plano para a direção Y (menos rígida) dos painéis de parede. ....	185
Tabela 59 – Área efetiva na direção X (mais rígida) dos painéis de parede. ....	186
Tabela 60 – Área efetiva na direção Y (menos rígida) dos painéis de parede. ....	186
Tabela 61 – Propriedades da seção transversal efetiva na direção X (mais rígida) dos painéis de parede. ....	187

Tabela 62 – Propriedades da seção transversal efetiva na direção Y (menos rígida) dos painéis de parede.....	187
Tabela 63 – Rigidez efetiva na direção X dos painéis de parede calculada pelo Método Gamma. ....	187
Tabela 64 – Rigidez efetiva na direção Y dos painéis de parede calculada pelo Método Gamma. ....	188
Tabela 65 – Verificação dos painéis de parede à tração no plano. ....	189
Tabela 66 – Tensões normais atuantes no painel de parede crítico para a flexocompressão. ....	191
Tabela 67 – Verificação dos painéis de parede à flexocompressão e instabilidade lateral. ....	191
Tabela 68 – Verificação dos painéis de parede ao cisalhamento longitudinal. ....	193
Tabela 69 – Verificação dos painéis de parede ao cisalhamento <i>rolling shear</i> . ....	193
Tabela 70 – Verificação dos painéis de parede ao cisalhamento no plano. ....	195
Tabela 71 – Propriedades dos elementos metálicos das ligações aço-madeira com chapa metálica lateral. ....	196
Tabela 72 – Resistência ao embutimento da madeira das ligações aço-madeira com chapa metálica lateral. ....	196
Tabela 73 – Resistências características por modo de falha das ligações aço-madeira com chapa metálica lateral. ....	197
Tabela 74 – Resistência de cálculo dos conectores das ligações aço-madeira com chapa metálica lateral. ....	197
Tabela 75 – Verificação da quantidade de conectores das ligações aço-madeira com chapa metálica lateral. ....	197
Tabela 76 – Propriedades dos elementos metálicos das ligações aço-madeira com chapa metálica central. ....	198
Tabela 77 – Resistência ao embutimento da madeira das ligações aço-madeira com chapa metálica lateral. ....	198
Tabela 78 – Resistências características por modo de falha das ligações aço-madeira com chapa metálica central. ....	198
Tabela 79 – Resistência de cálculo dos conectores das ligações aço-madeira com chapa metálica central. ....	198
Tabela 80 – Verificação da quantidade de conectores das ligações aço-madeira com chapa metálica central. ....	199
Tabela 81 – Propriedades dos elementos metálicos das ligações madeira-madeira. ....	199
Tabela 82 – Resistência ao embutimento da madeira das ligações madeira-madeira. ....	199
Tabela 83 – Resistências características por modo de falha das ligações madeira-madeira. ....	199
Tabela 84 – Resistência de cálculo dos conectores das ligações madeira-madeira. ....	200
Tabela 85 – Verificação da quantidade de conectores das ligações madeira-madeira. ....	200
Tabela 86 – Propriedades dos elementos metálicos das ligações submetidas à tração. ....	200
Tabela 87 – Verificação da quantidade de conectores das ligações submetidas à tração. ....	200
Tabela 88 – Propriedades dos elementos metálicos das ligações aço-concreto. ....	201
Tabela 89 – Verificação dos ancorantes à tração e ao cisalhamento. ....	201
Tabela 90 – Rigidez ao deslocamento das ligações aço-madeira. ....	202
Tabela 91 – Rigidez ao deslocamento das ligações madeira-madeira. ....	202

Tabela 92 – Somatório da quantidade de parafusos pela distância do centro da ligação ao quadrado. ....	202
Tabela 93 – Rigidez ao giro das ligações aço-madeira. ....	203
Tabela 94 – Propriedades da madeira dos elementos de MLC na situação de incêndio. ....	203
Tabela 95 – Propriedades da madeira dos elementos de CLT na situação de incêndio. ....	204
Tabela 96 – Cálculo da espessura efetiva para vigas e pilares ocultos.....	205
Tabela 97 – Cálculo da espessura efetiva para vigas e pilares aparentes. ....	205
Tabela 98 – Propriedades geométricas das seções transversais residuais das vigas. ....	205
Tabela 99 – Verificação das vigas à flexão simples reta com seção residual de incêndio. ....	206
Tabela 100 – Verificação das vigas ao cisalhamento com seção residual de incêndio. ....	206
Tabela 101 – Verificação das vigas à estabilidade lateral com seção residual de incêndio. ..	207
Tabela 102 – Propriedades geométricas das seções transversais residuais dos pilares. ....	208
Tabela 103 – Esforços solicitantes máximos dos pilares analisados para o estado limite de incêndio. ....	208
Tabela 104 – Verificação dos pilares à flexocompressão com seção residual de incêndio....	209
Tabela 105 – Cálculo da esbeltez dos pilares com seção residual de incêndio. ....	209
Tabela 106 – Verificação da estabilidade dos pilares com seção residual de incêndio.....	210
Tabela 107 – Cálculo da espessura efetiva para painéis de laje. ....	210
Tabela 108 – Cálculo do centro de gravidade da seção transversal residual do painel de laje na direção X.....	211
Tabela 109 – Cálculo do centro de gravidade da seção transversal residual do painel de laje na direção Y.....	212
Tabela 110 – Rigidez à flexão fora do plano para a direção X dos painéis de laje residuais. ....	213
Tabela 111 – Rigidez à flexão fora do plano para a direção Y dos painéis de laje residuais. ....	214
Tabela 112 – Área efetiva na direção X dos painéis de laje residuais.....	214
Tabela 113 – Área efetiva na direção Y dos painéis de laje residuais.....	215
Tabela 114 – Propriedades da seção transversal efetiva na direção X dos painéis de laje residuais. ....	215
Tabela 115 – Propriedades da seção transversal efetiva na direção Y dos painéis de laje residuais. ....	215
Tabela 116 – Verificação dos painéis de laje residuais à flexão fora do plano.....	215
Tabela 117 – Verificação dos painéis de laje residuais ao cisalhamento longitudinal.....	216
Tabela 118 – Verificação dos painéis de laje residuais ao cisalhamento <i>rolling shear</i> . ....	216
Tabela 119 – Cálculo da espessura efetiva para painéis de laje. ....	217
Tabela 120 – Rigidez à flexão fora do plano para a direção X dos painéis de parede residuais. ....	217
Tabela 121 – Rigidez à flexão fora do plano para a direção Y dos painéis de laje residuais. ....	218
Tabela 122 – Rigidez ao cisalhamento fora do plano para a direção X dos painéis de parede residuais. ....	219
Tabela 123 – Rigidez ao cisalhamento fora do plano para a direção Y dos painéis de parede residuais. ....	220
Tabela 124 – Área efetiva na direção X dos painéis de laje residuais.....	220
Tabela 125 – Área efetiva na direção Y dos painéis de laje residuais.....	221

Tabela 126 – Propriedades da seção transversal efetiva na direção X dos painéis de laje residuais.....	221
Tabela 127 – Propriedades da seção transversal efetiva na direção Y dos painéis de laje residuais.....	221
Tabela 128 – Verificação dos painéis de parede residuais à tração no plano.....	222
Tabela 129 – Tensões normais atuantes no painel de parede crítico para a flexocompressão na situação de incêndio.....	222
Tabela 130 – Verificação dos painéis de parede residuais à flexocompressão e instabilidade lateral. ....	222
Tabela 131 – Verificação dos painéis de parede residuais ao cisalhamento longitudinal. ....	223
Tabela 132 – Verificação dos painéis de parede residuais ao cisalhamento <i>rolling shear</i> . ....	223
Tabela 133 – Verificação dos painéis de parede residuais ao cisalhamento no plano. ....	223
Tabela 134 – Quantitativo de peças de viga oculta de MLC.....	225
Tabela 135 – Quantitativo de peças de viga aparente de MLC.....	226
Tabela 136 – Quantitativo de elementos da escada em MLC. ....	227
Tabela 137 – Quantitativo de peças de pilar de MLC. ....	227
Tabela 138 – Quantitativo de painéis de laje de CLT. ....	228
Tabela 139 – Quantitativo de painéis de parede de CLT. ....	228
Tabela 140 – Quantitativo de conectores metálicos e estimativa do peso total de aço consumido. ....	230
Tabela 141 – Quantitativo do volume total de madeira consumido. ....	232
Tabela 142 – Relação entre o peso próprio da estrutura de madeira e o peso dos elementos metálicos.....	232



# SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>25</b>
<b>2. OBJETIVO</b> .....	<b>32</b>
<b>3. ESCOPO</b> .....	<b>32</b>
3.1. PROJETO ARQUITETÔNICO.....	32
3.2. PROJETO ESTRUTURAL .....	36
<b>4. METODOLOGIA</b> .....	<b>37</b>
4.1. PROPRIEDADES DA MADEIRA .....	37
4.2. ELEMENTOS ESTRUTURAIS .....	43
4.2.1. <i>PILARES DE MLC</i> .....	43
4.2.2. <i>VIGAS DE MLC</i> .....	48
4.2.3. <i>LAJES DE CLT</i> .....	51
4.2.4. <i>PAREDES DE CLT</i> .....	55
4.2.5. <i>ESCADAS</i> .....	62
4.3. AÇÕES ATUANTES .....	63
4.3.1. <i>AÇÕES PERMANENTES</i> .....	64
4.3.2. <i>AÇÕES VARIÁVEIS</i> .....	72
4.3.3. <i>COMBINAÇÕES DAS AÇÕES</i> .....	76
4.4. MODELAGEM ESTRUTURAL COMPUTACIONAL.....	81
4.5. DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL.....	81
4.5.1. <i>VIGAS</i> .....	82
4.5.2. <i>PILARES</i> .....	84
4.5.3. <i>LAJES</i> .....	89
4.5.4. <i>PAREDES</i> .....	98
4.5.5. <i>LIGAÇÕES</i> .....	102
4.5.6. <i>SEGURANÇA CONTRA INCÊNDIO</i> .....	114
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>119</b>
5.1. PROPRIEDADES DA MADEIRA .....	119
5.2. MODELAGEM ESTRUTURAL COMPUTACIONAL.....	121
5.2.1. <i>PILARES DE MLC</i> .....	121
5.2.2. <i>VIGAS DE MLC</i> .....	126
5.2.3. <i>ESCADAS</i> .....	130
5.2.4. <i>PAINÉIS DE CLT</i> .....	135
5.2.5. <i>AÇÕES ATUANTES</i> .....	141
5.3. DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL.....	159
5.3.1. <i>VIGAS</i> .....	159
5.3.2. <i>PILARES</i> .....	164
5.3.3. <i>LAJES</i> .....	170
5.3.4. <i>PAREDES</i> .....	182
5.3.5. <i>LIGAÇÕES</i> .....	195

5.3.6. <i>SEGURANÇA CONTRA INCÊNDIO</i> .....	203
5.4. QUANTITATIVO DE MATERIAIS .....	224
<b>6. CONCLUSÃO</b> .....	<b>233</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>235</b>
<b>ANEXO A – PROJETO ARQUITETÔNICO: PLANTA BAIXA DO TÉRREO, PLANTA BAIXA DO PAVIMENTO TIPO E PLANTA DE COBERTURA</b> .....	<b>241</b>
<b>ANEXO B – PROJETO ARQUITETÔNICO: ELEVAÇÕES E VISTAS ISOMÉTRICAS</b> .....	<b>243</b>
<b>ANEXO C – PROJETO ESTRUTURAL: PLANTAS DE LOCAÇÃO DE PILARES, VIGAS E PAREDES DO PAVIMENTO TÉRREO E LOCAÇÃO DOS ELEMENTOS ESTRUTURAIS DOS PATAMARES DA ESCADA</b> .....	<b>245</b>
<b>ANEXO D – PROJETO ESTRUTURAL: PLANTAS DE LOCAÇÃO DE PILARES, VIGAS E PAREDES DO PAVIMENTO TIPO E DETALHAMENTO DOS ELEMENTOS ESTRUTURAIS DA ESCADA</b> .....	<b>247</b>
<b>ANEXO E – PROJETO ESTRUTURAL: PLANTAS DE LOCAÇÃO DE PILARES, VIGAS E PAREDES DA COBERTURA E LOCAÇÃO DOS ELEMENTOS ESTRUTURAIS DA CASA DE MÁQUINAS DO ELEVADOR</b> .....	<b>249</b>
<b>ANEXO F – PROJETO ESTRUTURAL: PLANTAS DE LOCAÇÃO DE LAJES E DE ELEMENTOS ESTRUTURAIS DAS COBERTURAS DA ESCADA, ELEVADOR E CAIXA D’ÁGUA E DETALHAMENTO DE LIGAÇÕES</b> .....	<b>251</b>
<b>ANEXO G – PROJETO ESTRUTURAL: DETALHAMENTO DAS ABERTURAS DAS PAREDES DE CLT E DETALHAMENTO DE LIGAÇÕES</b> .....	<b>253</b>



## 1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, a discussão a respeito dos efeitos climáticos ocasionados pela emissão em larga escala de gases poluentes na atmosfera, como o dióxido de carbono, decorrente do crescimento em massa dos grandes centros urbanos, tem sido pauta das principais conferências ambientais do mundo. Com isso, políticas de desenvolvimento sustentável, que visam atenuar esse fenômeno, vêm ganhando força no cenário mundial, aumentando a procura por novas tecnologias ecologicamente limpas e renováveis, que diminuam os impactos ambientais.

Nesse cenário, o setor da construção civil é um dos maiores responsáveis pelos impactos ambientais no mundo, desde o consumo intensivo dos recursos naturais e energéticos para a produção de insumos até a grande quantidade de resíduos gerados durante a execução de obras. A indústria da construção civil é responsável pela emissão de um terço do total das emissões de dióxido de carbono para a atmosfera no mundo (SILVA, 2012). Assim, as construções em madeira surgem como uma alternativa de adequação ambiental, uma vez que a madeira, diferente do aço e do concreto, é natural, renovável, reciclável e capaz de armazenar dióxido de carbono. Esta capacidade de absorver o dióxido de carbono durante seu crescimento e armazená-lo durante sua vida útil, denominada “sequestro de carbono”, aliada a pegada de carbono de fabricação relativamente baixa em comparação com os outros materiais, tornam a madeira uma grande aliada na redução de  $CO_2$  na atmosfera. Além disso, a característica renovável deste material possibilita que a madeira seja produzida de maneira sustentável através de florestas plantadas, que são aquelas criadas artificialmente e destinadas à exploração de seus recursos, para que a madeira possa ser extraída e reabastecida com menos impactos ambientais duradouros.

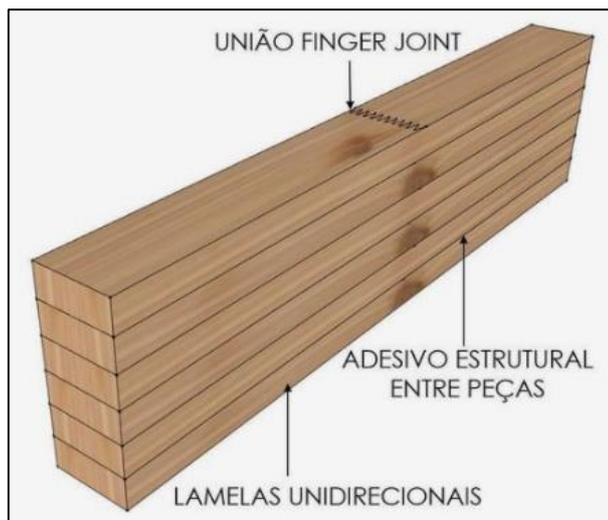
O Brasil possui um potencial florestal enorme, com abundância de recursos e elevadas taxas de produtividade, propiciado por vários fatores como condições climáticas, solo e o amplo espaço territorial, sendo que cerca de 54,4% de todo o território nacional é coberto por florestas, o que o posiciona como o segundo maior em área entre todos os países do mundo (SHIGUE, 2018). Todavia, atualmente, as florestas plantadas representam apenas cerca de 1,5% de sua área total, o que evidencia que a alta capacidade de produção da madeira por meio do manejo florestal não vem sendo bem aproveitada no Brasil. Isto se deve ao fato de que a madeira, na construção civil brasileira, ainda é pouco utilizada como material da estrutura principal e/ou

como vedação das edificações, tendo seu uso limitado a elementos de caráter provisório, como fôrmas e cimbramentos para estruturas de concreto, produtos de acabamento, como pisos e forros, móveis e esquadrias. Este cenário está diretamente relacionado ao histórico da utilização da madeira no Brasil, desde a colonização portuguesa até o estabelecimento hegemônico do concreto como o principal material construtivo ao longo do século XX (SHIGUE, 2018), o que contribuiu para a desinformação e o preconceito da maior parte da população brasileira, que desconhece as propriedades resistentes e duráveis da madeira, bem como seus sistemas construtivos e benefícios intrínsecos. Contudo, apesar dos entraves e do estágio inicial de desenvolvimento das construções em madeira, com o surgimento de novas tecnologias, como a madeira lamelada colada cruzada (MLCC), e o fortalecimento de outras já introduzidas no Brasil, tais como a madeira lamelada colada (MLC) e o *Wood frame*, aliado ao crescimento na busca por construções sustentáveis e ao aumento na divulgação da potencialidade da madeira na construção, a madeira industrializada tem chamado a atenção de novas empresas e vem ganhando espaço no setor da construção civil brasileira.

A valorização do uso da madeira está diretamente vinculada ao desenvolvimento da categoria de produtos classificada como madeira engenheirada, da qual a MLC e a MLCC fazem parte, que corresponde a madeira processada industrialmente para otimizar o seu desempenho estrutural. Os elementos pré-fabricados em indústrias têm se mostrado cada vez mais importantes e vantajosos para a construção civil moderna, pois podem sair da fábrica prontos para serem apenas montados no canteiro, diminuindo o número de operações, permitindo um melhor planejamento e controle das etapas de execução, contribuindo para a diminuição da taxa de geração de resíduos, proporcionando obras secas, com um aumento considerável da velocidade de execução e um maior controle de qualidade dos materiais empregados. A madeira como um elemento pré-fabricado industrialmente se destaca por sua boa relação entre peso e resistência mecânica, bem como sua boa trabalhabilidade, o que facilita seu manuseio, o transporte e o içamento das peças.

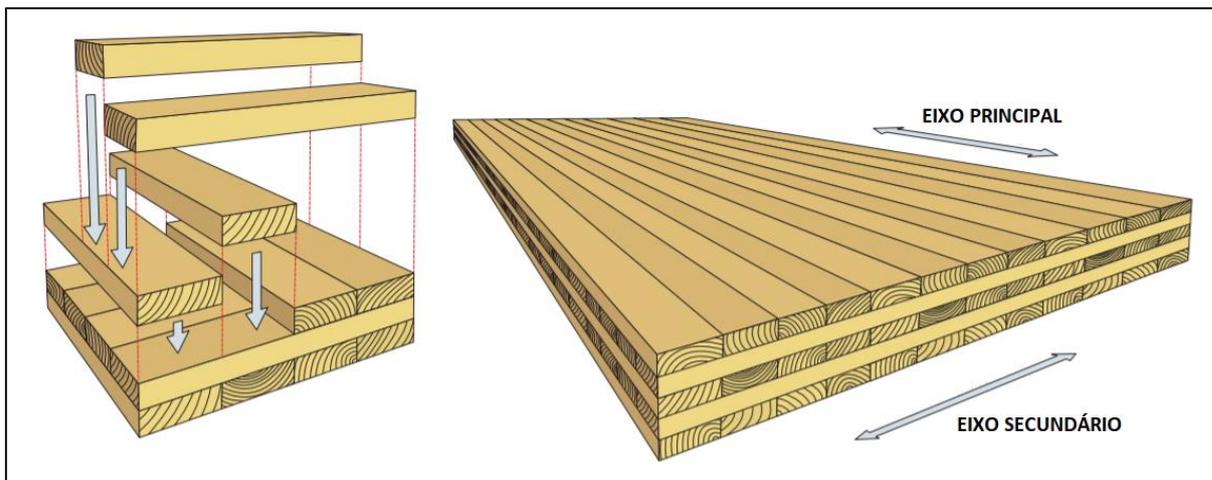
A Madeira Lamelada Colada (MLC), ou em inglês *Glulam (Glue Laminated Timber)*, é um material estrutural pré-fabricado, constituído pela união de várias lamelas de madeira coladas paralelamente por meio de adesivos industriais, formando uma única peça, o que possibilita uma maior diversidade de seções e comprimentos para o elemento estrutural, podendo inclusive obter peças curvadas. Para garantir que funcionamento estrutural seja eficiente, é importante que as lamelas sejam dispostas no sentido longitudinal da peça, com as fibras paralelas entre si. Entre as vantagens proporcionadas por este sistema estrutural, pode-se

citar a possibilidade de otimização das peças através da seleção das lamelas, excluindo ou reposicionando as peças defeituosas, o que garante um melhor desempenho no ponto de vista de resistência do elemento, além disso, pode-se unir as lamelas longitudinalmente através de emendas do tipo *Finger joint* para obter elementos mais compridos e vencer grandes vãos. A Figura 1 apresenta a composição característica da madeira lamelada colada.



**Figura 1 - Composição da madeira lamelada colada. (Fonte: Madeira Engenheirada, 2021)**

Por sua vez, a Madeira Lamelada Colada Cruzada (MLCC), também conhecida no Brasil pela sigla em inglês *CLT* (*Cross Laminated Timber*), é relativamente recente na construção civil, e seu conceito é semelhante ao da MLC, sendo que sua composição também consiste na colagem de várias lamelas de madeira por meio de adesivos industriais, entretanto, no caso da CLT, as camadas sucessivas são dispostas ortogonalmente entre si. Desse modo, as peças em CLT são capazes de atingir níveis de resistência e rigidez elevadas nas duas direções principais, possibilitando a produção de elementos não-lineares, em formato de painéis, tais como paredes e lajes. A Figura 2 apresenta o conceito e a forma de um painel de madeira lamelada colada cruzada.



**Figura 2 – Montagem de um painel de madeira lamelada colada cruzada. (Fonte: adaptado de U.S. Mass Timber Construction Manual, 2021)**

Nesse contexto, com o avanço da tecnologia e a criação de novas técnicas, a utilização da madeira como estrutura principal de obras de grande e médio porte, tal como edifícios de múltiplos pavimentos, vem se comprovando possível e eficiente, sendo aprimorada ano após ano, permitindo cada vez mais um crescimento vertical significativo na construção civil.

No âmbito internacional, principalmente nos países do hemisfério norte, como Estados Unidos, Canadá e na Europa, onde a cultura da construção em madeira é mais forte e as técnicas mais modernas estão mais difundidas, já é possível encontrar exemplos de construções verticais totalmente em madeira com até 18 andares ou edifícios híbridos com 22 andares. Um desses exemplos é o arranha-céu chamado *Brock Commons Tallwood House*, localizado na cidade de Vancouver, Canadá, que possui 18 pavimentos e 53 metros de altura e é destinado a moradia estudantil da *Universidade de British Columbia*. O sistema estrutural adotado para este edifício é híbrido, composto por pilares em MLC, lajes e paredes em CLT, além de dois núcleos rígidos em concreto armado que proporcionam ao edifício maior rigidez. A Figura 3 apresenta os elementos constituintes do pavimento tipo dessa construção, enquanto a Figura 4 apresenta o içamento dos painéis de CLT do fechamento, por fim a Figura 5 apresenta a vista área da fachada do edifício. Em 2019, na Noruega, foi concluída a construção do que se considera atualmente o maior edifício totalmente em madeira do mundo, o *Mjøstårnet* possui 18 pavimentos e atinge 85,4 metros de altura. O sistema estrutural adotado também é o de madeira engenheirada, com vigas e pilares em MLC e lajes em CLT. A Figura 6 apresenta uma foto da fachada do *Mjøstårnet*.



**Figura 3 – Pavimento tipo do *Brock Commons Tallwood House* composto por pilares em MLC, lajes em CLT e núcleo rígido em concreto armado. (Fonte: Archdaily, 2017)**



**Figura 4 – Painéis de fechamento em CLT sendo posicionados na fachada do *Brock Commons Tallwood*. (Fonte: Archdaily, 2017)**



Figura 5 – Vista aérea da fachada do *Brock Commons Tallwood*. (Fonte: Archdaily, 2017)



Figura 6 – Vista da fachada do *Mjøstårnet*. (Fonte: Archdaily, 2019)

No Brasil, o setor da construção em madeira ainda está em estágio inicial, com pouca mão de obra especializada, poucas indústrias de madeira engenheirada e demanda do mercado ainda baixa em relação aos demais sistemas construtivos. Porém, este cenário vem mudando aos poucos e, nos últimos anos, tem-se visto uma evolução da demanda por casas em *Wood frame* e MLC e alguns exemplos de construções de médio porte tem surgido, inclusive com o uso de CLT. O primeiro edifício em madeira do Brasil foi construído no ano de 2016 em Araucária, no estado do Paraná, e o sistema construtivo adotado foi uma adaptação do *Wood frame* alemão, apresentado na Figura 7. No ano de 2021, a marca de chocolates *Dengo* inaugurou uma nova loja na cidade de São Paulo que se tornou o edifício mais alto em madeira construído no Brasil. O prédio possui quatro pavimentos e é composto por pilares e vigas em MLC, além de lajes em CLT. A Figura 8 apresenta uma vista interna do edifício da loja de chocolates, na qual pode-se observar as lajes, vigas e pilares em madeira.



**Figura 7 – Finalização da montagem do prédio em *Wood frame* em Araucária-PR. (Fonte: Tecverde, 2016)**



**Figura 8 – Vista interior da loja da *Dengo* em São Paulo-SP. (Fonte: Archdaily, 2021)**

## **2. OBJETIVO**

Este trabalho tem como objetivo principal o estudo da utilização da madeira engenheirada na construção de edifícios residenciais sustentáveis de médio porte e a comprovação de sua eficiência estrutural por meio da elaboração de um projeto contendo o dimensionamento e o detalhamento de uma edificação de 7 pavimentos com vigas e pilares em Madeira Lamelada Colada (MLC) e lajes e paredes em Madeira Lamelada Colada Cruzada (CLT). Além disso, visando aplicar os conceitos mais modernos disponíveis, este trabalho se propõe a utilizar como base bibliográfica as recomendações da ABNT NBR 7190:2022.

## **3. ESCOPO**

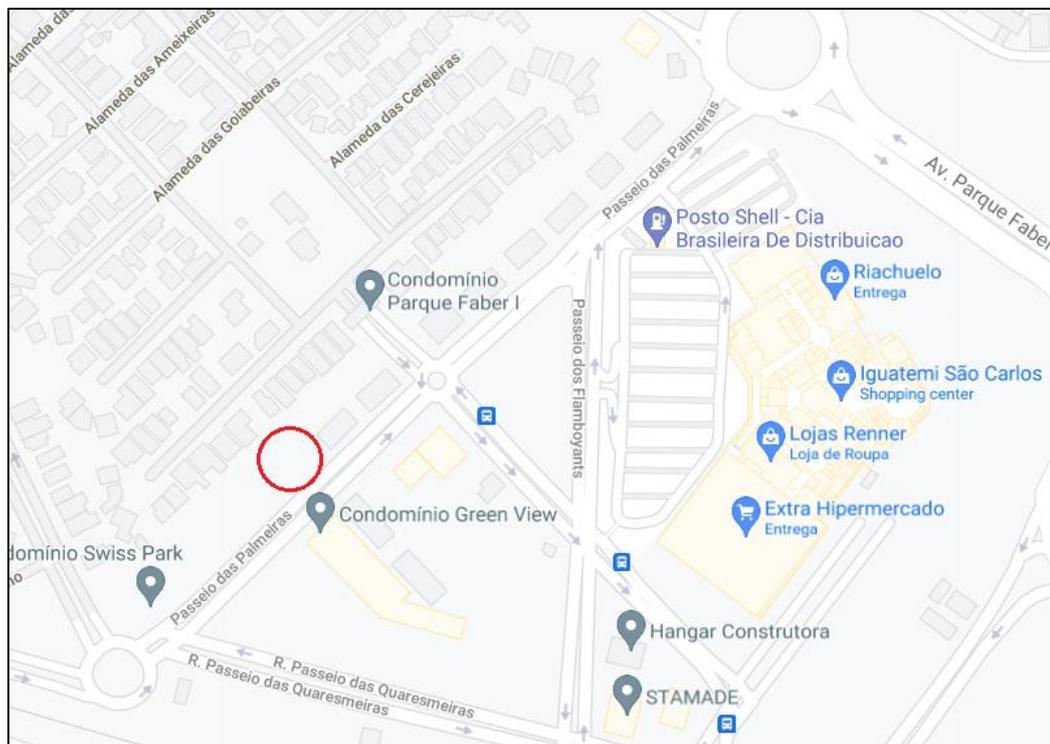
### **3.1. PROJETO ARQUITETÔNICO**

Para a elaboração do projeto arquitetônico, primeiramente, definiu-se a localização da implantação da obra na Rua Passeio das Palmeiras, São Carlos – SP, cujo terreno pode ser

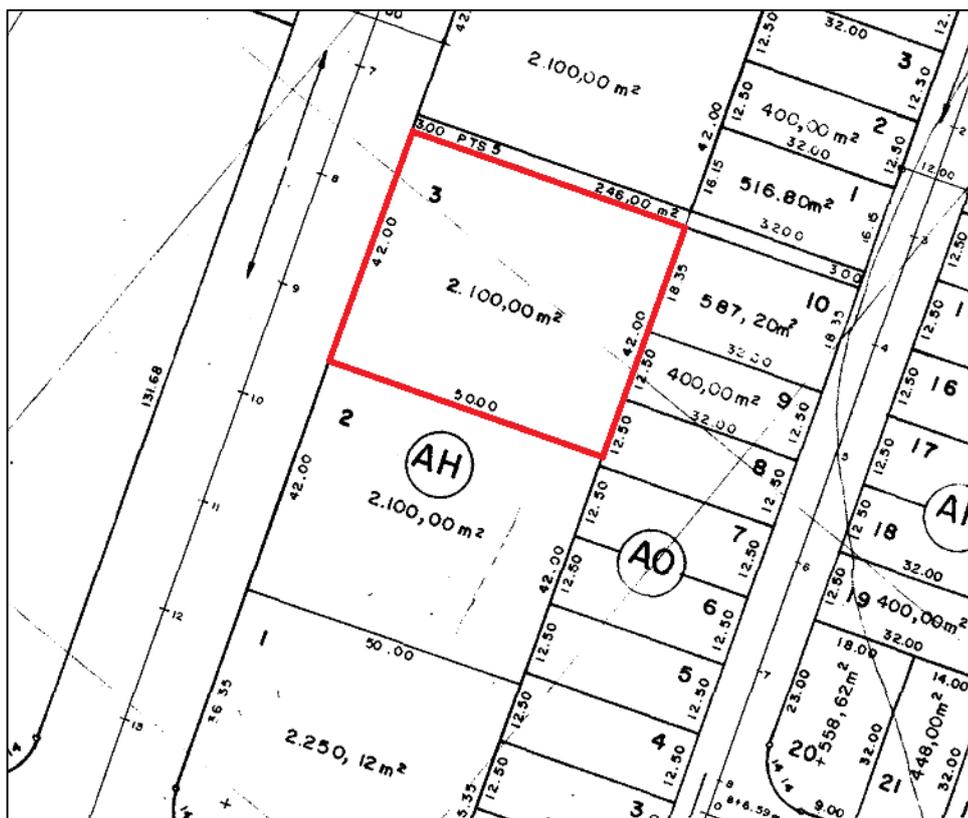
observado na Figura 10, em foto retirada do *Google Street View*, e na Figura 9, em mapa. Assim, consultando o mapa do loteamento Parque Faber I, disponibilizado no site da prefeitura, foi possível obter as dimensões do terreno escolhido, 42 metros de fachada por 50 metros de profundidade, conforme apresentado na Figura 11.



**Figura 9 – Vista da fachada do terreno de implantação do projeto. (Fonte: Google Street View, 2017)**



**Figura 10 – Localização do terreno de implantação do projeto. (Fonte: Google Maps, 2021)**



**Figura 11 – Dimensões do terreno de implantação do projeto. (Fonte: Prefeitura de São Carlos, 2021)**

Dessa forma, a concepção arquitetônica foi desenvolvida sob as premissas de uma construção ambientalmente sustentável de médio porte, com 7 pavimentos, sendo o térreo destinado ao uso comum dos moradores e os demais 6 pavimentos destinados ao uso residencial, com 4 apartamentos por andar, totalizando 24 apartamentos.

A madeira será utilizada nos principais elementos estruturais, como pilares, vigas e lajes, e também nos elementos secundários, como escadas e paredes, sendo fundamental para a identidade do edifício o destaque da madeira como o material mais importante da obra, com o objetivo de comprovar sua versatilidade, resistência, durabilidade e eficiência. Assim, em confluência com essa proposta, a madeira será posta em evidência por meio de elementos em madeira aparente no térreo e alguns pilares e vigas nos apartamentos, marcando presença no cotidiano dos moradores.

No aspecto construtivo, a opção pela utilização de elementos pré-fabricados, como os elementos estruturais de madeira engenheirada, facilita o planejamento da obra e possibilita que essa seja mais ágil, com maior controle de qualidade dos materiais, e limpa, com menor geração de resíduos. Além disso, as características de processamento e as propriedades físicas da

madeira, como a trabalhabilidade e a densidade, favorecem o transporte e a montagem das peças.

Para a melhoria da qualidade de vida dos usuários, serão incorporados às paredes e lajes isolantes termoacústicos, aumentando a eficiência energética e o conforto acústico do prédio. Ademais, tendo em vista a facilidade de manutenção das instalações hidráulicas e elétricas, serão utilizados pisos elevados, forros de gesso e shafts, evitando a passagem de tubulações por dentro dos painéis de CLT.

Quanto a cobertura do prédio, visando o aspecto sustentável do projeto, optou-se pela utilização de um telhado verde semi-intensivo. Esse tipo de telhado é composto por plantas de baixo porte e exige manutenção e irrigação periódica intermediária aos telhados verdes extensivo e intensivo. As coberturas vegetais em telhados de edifícios melhoram a qualidade de vida dos moradores locais, pois geram um impacto positivo no microclima, contribuindo para a redução da temperatura ambiente em dias quentes, a conservação do calor em dias frios e para a elevação da umidade do ar (CATUZZO, 2013). Além disso, esta técnica também é capaz de melhorar o meio urbano do entorno da edificação com a retenção de águas pluviais, o que contribui para a diminuição de enchentes, a redução da poluição do ar, a atenuação do efeito de ilhas de calor e a criação de um ambiente favorável para aves e abelhas, o que ajuda a manter o equilíbrio do ecossistema local (WILLES, 2014). É importante ressaltar a necessidade de que a impermeabilização do telhado verde seja feita de maneira cautelosa para que não ocorra a infiltração da água pluvial e de irrigação nas lajes da cobertura, o que poderia ocasionar o apodrecimento da madeira.

Em conjunto com o telhado verde, na cobertura serão instalados painéis fotovoltaicos para gerar energia elétrica para o prédio, contribuindo para a diminuição da demanda por energia elétrica não renovável. Vale salientar que o alto investimento financeiro inicial aplicado nesta tecnologia é recompensado a médio e longo prazo com a redução de gastos com energia, além dos benefícios ambientais inerentes a geração de energia limpa e renovável.

O pavimento térreo do prédio será composto por um hall de entrada com acesso para a escada e elevadores, 1 depósito, 1 academia, 1 salão de jogos e 1 salão de festas. Os 24 apartamentos projetados possuem a mesma configuração e são compostos por: 1 sala de estar, 1 sala de jantar, 1 cozinha, 1 lavanderia, 1 banheiro, 1 dormitório com varanda, 1 suíte com varanda e 1 terraço. Destaca-se a entrada de iluminação e ventilação natural nos apartamentos garantida pelas amplas aberturas do terraço e varandas.

A área externa do prédio será utilizada para fins de lazer e convívio dos moradores, com espaços abertos, arborizados e bem ventilados, com piscina, *playground* e uma área de estar coberta por um pergolado em MLC. Ademais, a área externa possuirá um estacionamento com 24 vagas para carros e um bicicletário.

Por fim, definidas as diretrizes, elaborou-se o projeto arquitetônico com auxílio dos softwares Autodesk *Revit 2021* e *AutoCAD 2021*. O Anexo A contém as plantas baixas do térreo, do pavimento tipo e da cobertura, enquanto o Anexo B apresenta vistas isométricas e elevações do edifício.

### **3.2. PROJETO ESTRUTURAL**

Para a elaboração do projeto estrutural, foi necessária a realização de um estudo preliminar, no qual analisou-se a viabilidade de execução da obra com os elementos propostos, investigando possíveis restrições de fabricação, transporte e disponibilidade das peças pré-fabricadas na região da construção, bem como seus processos construtivos. Além disso, foram estudadas as ligações entre os elementos estruturais, para que as condições de contorno aplicadas nas vinculações do modelo estrutural fossem coerentes e representassem de maneira satisfatória o efeito real da ligação. Ademais, tendo em vista a garantia da vida útil da edificação, foram estudadas técnicas de conservação da madeira e desempenho em caso de incêndio para aumentar a durabilidade dos elementos estruturais e a segurança dos usuários.

Dessa forma, baseado nas premissas do projeto e no conhecimento adquirido na etapa de estudo preliminar, definiu-se que a estrutura do prédio será composta por pilares e vigas em MLC e lajes e paredes em painéis de CLT.

Assim, a partir do projeto arquitetônico, foram definidas as locações dos elementos estruturais, conforme apresentado nos Anexos B, C, D e E para o pavimento térreo, pavimento tipo e cobertura. Na sequência, com auxílio do software *Dlubal RFEM*, elaborou-se o modelo estrutural computacional para a análise dos esforços solicitantes oriundos das ações aplicadas no edifício. A opção por este software foi feita devido a sua ampla base de dados, que contempla uma biblioteca de elementos em madeira de acordo com as recomendações da ABNT NBR 7190:1997.

Com base na análise estrutural obtida no software *Dlubal RFEM*, foi possível avaliar os esforços solicitantes e dimensionar os elementos em madeira e as ligações de acordo com as normas brasileiras e com referências bibliográficas específicas. Por fim, com os elementos dimensionados, elaborou-se o detalhamento da estrutura com auxílio do software Autodesk *AutoCAD 2021*.

## 4. METODOLOGIA

### 4.1. PROPRIEDADES DA MADEIRA

Para os elementos estruturais em madeira lamelada colada (MLC e CLT) a qualidade da colagem durante o processo de fabricação é essencial para a garantia da durabilidade e do bom funcionamento da peça. Com isso, uma vez que a absorção do adesivo colante ocorre nos poros da madeira, um dos fatores que contribuem para a efetividade da colagem é a densidade das lamelas. Além disso, a densidade da madeira também é importante para facilitar a absorção de produtos químicos de tratamento superficial contra insetos e outras intempéries, o que prolonga a vida útil das peças. Portanto, visando obter melhores resultados de durabilidade para os elementos da obra, fez-se a preferência por madeiras de baixa densidade. Nesse sentido, sabendo que, em geral, as madeiras coníferas são menos densas em relação as folhosas, optou-se pela utilização da espécie *Pinus elliottii*, que, além de possuir baixa densidade, é comumente encontrada na região da obra e provém de reflorestamento.

Assim, definida a espécie de madeira utilizada na construção, consultou-se o banco de dados do IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas) para a obtenção das propriedades mecânicas médias da *Pinus elliottii*. Desse modo, admitindo que as peças estruturais utilizadas na construção serão submetidas a ensaios de caracterização completa e controle de qualidade, considerou-se que a madeira da obra possuirá resistência característica igual a cerca de 70% da resistência média fornecida pelo IPT. Portanto, comparando os dados do IPT com a Tabela 3 da ABNT NBR 7190:2022, optou-se pela utilização da madeira com a classe de resistência C24, cujas principais propriedades de resistência, rigidez e densidade, necessárias para a realização do projeto, estão apresentadas na Tabela 1.

**Tabela 1 – Propriedades de resistência, rigidez e densidade da madeira C24, segundo a ABNT NBR 7190:2022.**

<b>Propriedades de resistência - C24</b>		
Flexão	$f_{m,k}$	24,0 MPa
Tração paralela às fibras	$f_{t0,k}$	14,0 MPa
Compressão paralela às fibras	$f_{c0,k}$	21,0 MPa
Compressão perpendicular às fibras	$f_{c90,k}$	2,5 MPa
Cisalhamento paralelo às fibras	$f_{v0,k}$	4,0 MPa
<b>Propriedades de rigidez - C24</b>		
Módulo de elasticidade longitudinal médio paralelo às fibras	$E_{0,med}$	11000 MPa
Módulo de elasticidade longitudinal característico paralelo às fibras	$E_{0,05}$	7400 MPa
Módulo de elasticidade longitudinal médio perpendicular às fibras	$E_{90,med}$	400 MPa
Módulo de elasticidade transversal médio	$G_{med}$	700 MPa
<b>Densidade - C24</b>		
Densidade característica	$\rho_k$	350 kg/m <sup>3</sup>
Densidade média	$\rho_{med}$	420 kg/m <sup>3</sup>

Vale destacar que, no emprego da madeira lamelada colada, a ABNT NBR 7190:2022 admite que as peças tenham as mesmas propriedades da madeira das lamelas, desde de que realizados os devidos ensaios. Desse modo, na ausência de ensaios, as propriedades presentes na Tabela 1 foram admitidas para os pilares e vigas de MLC.

Com relação aos painéis de CLT, os valores das propriedades mecânicas devem ser fornecidos pelo fabricante, obtidos a partir de ensaios do painel submetido a ações no plano e perpendiculares ao plano. Assim, para a definição das propriedades utilizadas no projeto, foram comparados os valores fornecidos pelo manual sueco de CLT (The CLT Handbook, 2019), pela avaliação técnica europeia (ETA 12/0362) e pelo catálogo técnico da fornecedora brasileira “Crosslam” para painéis de CLT produzidos com madeira C24. Dessa forma, visto que os dados fornecidos pela ETA 12/0362 são mais completos e similares às propriedades consideradas para a madeira do projeto, optou-se pela utilização das propriedades mecânicas contidas nesse documento, com o adendo de que o módulo de elasticidade longitudinal admitido para ações dentro e fora do plano é igual ao considerado na Tabela 1, sendo essa uma consideração a favor da segurança que facilita a modelagem estrutural computacional. A Tabela 2 apresenta os

valores adotados para as propriedades mecânicas dos painéis de CLT do projeto, vale destacar que a densidade dos painéis é a mesma apresentada na Tabela 1.

**Tabela 2 – Propriedades de resistência e rigidez dos painéis de CLT com lamelas de madeira C24.**

<b>Propriedades mecânicas para ações perpendiculares ao plano do painel</b>		
Resistência convencional à flexão	$f_{m,k}$	24,0 MPa
Resistência à compressão	$f_{c90,k}$	2,5 MPa
Resistência ao cisalhamento perpendicular às fibras (Rolling shear)	$f_{R,k}$	1,1 MPa
Resistência ao cisalhamento paralelo às fibras	$f_{v0,k}$	3,5 MPa
Módulo de elasticidade longitudinal paralelo às fibras	$E_{0,med}$	11000 MPa
Módulo de elasticidade transversal paralelo às fibras	$G_{0,med}$	690 MPa
Módulo de elasticidade transversal perpendicular às fibras (Rolling shear)	$G_{R,med}$	50 MPa
<b>Propriedades mecânicas para ações no plano do painel</b>		
Resistência convencional à flexão	$f_{m,k}$	24,0 MPa
Resistência à compressão	$f_{c0,k}$	24,0 MPa
Resistência à tração	$f_{t0,k}$	19,2 MPa
Resistência ao cisalhamento paralelo às fibras (5 camadas, h=20cm, a=14cm)	$f_{v,k}$	2,3 MPa
Resistência ao cisalhamento paralelo às fibras (5 camadas, h=15cm, a=14cm)	$f_{v,k}$	3,1 MPa
Módulo de elasticidade longitudinal paralelo às fibras	$E_{0,med}$	11000 MPa
Módulo de elasticidade transversal paralelo às fibras	$G_{0,med}$	690 MPa

O termo em inglês “rolling shear”, presente na Tabela 2, é referente ao efeito de deslizamento relativo das camadas de lamelas longitudinais que gera tensões transversais no painel decorrentes de forças cisalhantes perpendiculares às fibras das lamelas, conforme apresentado na Figura 12.

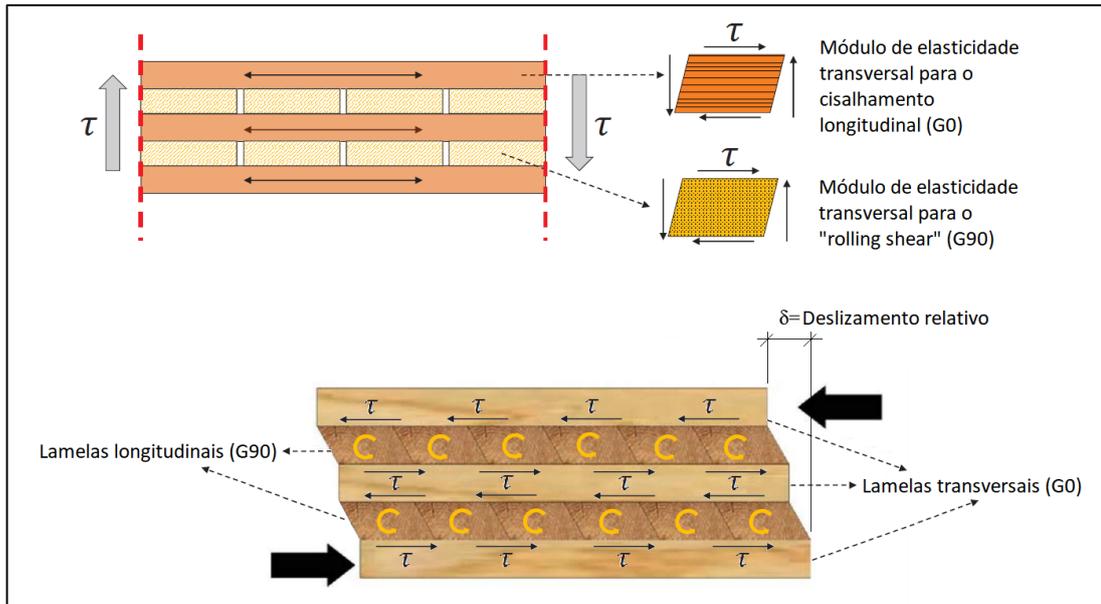


Figura 12 – Conceito de “rolling shear”. (Fonte: adaptado de CLT as structural material, 2019)

Os valores de cálculo das propriedades da madeira foram obtidos conforme as recomendações do item 4.4 da ABNT NBR 7190:2022. Para tal, faz-se necessária a definição dos coeficientes parciais de modificação  $k_{mod1}$  e  $k_{mod2}$ , dados em função da classe de carregamento e da classe de umidade, respectivamente, conforme os valores indicados na Tabela 3 e na Tabela 4. As classes de carregamento estão presentes na Tabela 3, enquanto as classes de umidade estão apresentadas na Tabela 5.

Tabela 3 – Valores de  $k_{mod1}$ . (Fonte: ABNT NBR 7190:2022)

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

Tabela 4 – Valores de  $k_{mod2}$ . (Fonte: ABNT NBR 7190:2022)

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

\*Não é permitido o uso do MLCC para classe de umidade 4.

Tabela 5 – Classes de umidade. (Fonte: ABNT NBR 7190:2022)

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	$\geq 25\%$

Além disso, para peças de MLC as propriedades da madeira devem ser reduzidas pelo coeficiente parcial de modificação  $k_{mod3}$ , dado pela Equação 1.

$$k_{mod3} = C_e \cdot C_c \cdot C_t \quad (1)$$

Tal que,

$C_e$ : coeficiente de modificação de entalhes múltiplos, fator de redução causado pela emenda de entalhes múltiplos, considerado igual a 0,95 para peças com emendas longitudinais e 1,00 para peças sem emendas longitudinais;

$C_c$ : coeficiente de modificação devido à curvatura, considerado igual a 1,00 para peças retas;

$C_t$ : coeficiente de modificação de temperatura, em peças expostas a temperaturas elevadas quando em uso, deve-se adotar os valores apresentados na Tabela 6, devido à natureza intrínseca do material;

**Tabela 6 – Fatores de modificação  $C_t$ . (Fonte: ABNT NBR 7190:2022).**

Tipo de propriedade	Teor de umidade da madeira em serviço	Temperatura ambiente (°C)		
		°C ≤ 38	38 < °C ≤ 52	52 < °C ≤ 66
Tração paralela e módulo de elasticidade	Seca ou úmida	1,0	0,9	0,9
Demais propriedades e ligações	Seca < 16 %	1,0	0,8	0,7
	Úmida ≥ 16 %	1,0	0,7	0,5

Dessa forma, os valores de resistência de cálculo são dados pela Equação 2, enquanto o valor de rigidez efetiva é dado pela Equação 3.

$$f_{x,d} = k_{mod} \cdot \frac{f_{x,k}}{\gamma_w} \quad (2)$$

Onde,

$f_{x,d}$ : valor de resistência de cálculo;

$f_{x,k}$ : valor de resistência característica;

$k_{mod}$ : coeficiente de modificação, dado pela multiplicação dos coeficientes parciais;

$\gamma_w$ : coeficiente de minoração das propriedades da madeira. Sendo que, nos estados limites últimos tem-se o valor básico  $\gamma_w = 1,4$ , para tensões normais, e  $\gamma_w = 1,8$ , para tensões de cisalhamento. Enquanto para os estados limites de serviço, tem-se o valor básico  $\gamma_w = 1,0$ .

$$E_{0,ef} = k_{mod} \cdot E_{0,med} \quad (3)$$

Vale destacar que, diferentemente da norma ABNT NBR 7190:1997, a ABNT NBR 7190:2022 desconsidera a utilização do coeficiente parcial de modificação  $k_{mod3}$  que leva em

conta a categoria da madeira, uma vez que é admitido que o enquadramento de um lote nas classes de resistência só poderá ser feito a partir de ensaios prévios que comprovem sua resistência de acordo com a Legislação Brasileira.

## **4.2. ELEMENTOS ESTRUTURAIS**

### **4.2.1. PILARES DE MLC**

Os pilares de Madeira Lamelada Colada foram idealizados de modo a favorecer a replicabilidade, variando pouco as seções e comprimentos, facilitando o processo de fabricação e montagem. Para tal, considerou-se pilares com seção 25x35 cm e 35x35 cm, sendo a última referente aos pilares aparentes, uma vez que esses pilares serão mais solicitados e exigem maiores dimensões para resistir à ação do fogo em caso de incêndio. Além disso, adotou-se pilares com 2,90 m de comprimento no térreo e nos pavimentos tipo e pilares com 3,90 m de comprimento na cobertura, para atingir a altura necessária para a manutenção e acomodação dos reservatórios da caixa d'água e das máquinas do elevador.

As ligações pilar-pilar (entre pilares de diferentes pavimentos) e pilar-térreo (entre os pilares do térreo e a laje de concreto) foram idealizadas com base no estudo de caso do edifício *Brock Commons Tallwood House*, no qual são utilizados conjuntos de conexão em peças metálicas no estilo “macho e fêmea” embutidos no topo e na base de cada pilar, permitindo que seja realizado o encaixe de um pilar no outro. Esses conjuntos de conexões são compostos por cilindros metálicos ocos soldados a chapas metálicas que, por sua vez, são embutidas na base e no topo de cada pilar por meio de barras roscadas com adesivo epóxi. O cilindro soldado na base de cada pilar possui uma seção com diâmetro inferior ao cilindro soldado no topo, o que possibilita o encaixe entre os pilares, Figura 16. Além disso, a base dos pilares será fixada nos painéis de laje por meio de chapas metálicas parafusadas com barras roscadas pertencentes ao conjunto de conexão do topo do pilar, Figura 15. Para tal, ainda em fábrica, serão realizadas pré-furações nas lajes, Figura 13, facilitando a montagem dos painéis em obra e possibilitando a passagem dos cilindros metálicos da conexão dos pilares, Figura 14. Esse tipo de ligação foi escolhido pois permite que a carga vertical de compressão seja transferida diretamente de um pilar para o outro, evitando, assim, o esmagamento das lajes, que pode ser um problema para edifícios altos com múltiplos pavimentos.



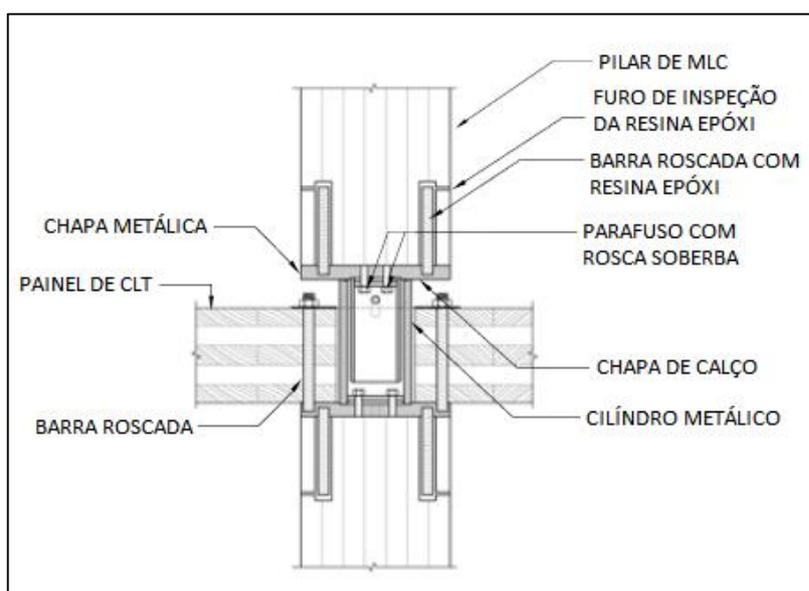
**Figura 13 – Pré-furação das lajes. (Fonte: naturally:wood, 2017)**



**Figura 14 – Encaixe das lajes nos pilares por meio de pré-furações. (Fonte: naturally:wood, 2016)**



**Figura 15 – Fixação da base do pilar na laje. (Fonte: naturally:wood, 2016)**



**Figura 16 – Configuração do sistema de conexão pilar-pilar. (Fonte: adaptado de naturally:wood, 2016)**

O pavimento térreo será composto por uma laje de piso em concreto armado com 20 cm de espessura, evitando, assim, o contato direto da madeira com a umidade do solo, prolongando sua vida útil. Por sua vez, a laje de concreto descarrega os esforços na fundação em estacas pré-moldadas de concreto armado. É importante destacar que o projeto de fundação do edifício foge do escopo deste trabalho, sendo assim, tanto a fundação quanto a laje de concreto do térreo não serão dimensionadas, cabendo apenas como uma proposta inicial de referência.

As ligações pilar-térreo serão feitas de maneira similar a ligação pilar-pilar, com a utilização de um conjunto de conexão fixado na laje de concreto do térreo por meio de ancorantes parafusáveis do tipo SKR da fabricante Rothoblaas, possibilitando o encaixe da base do pilar, Figura 17.

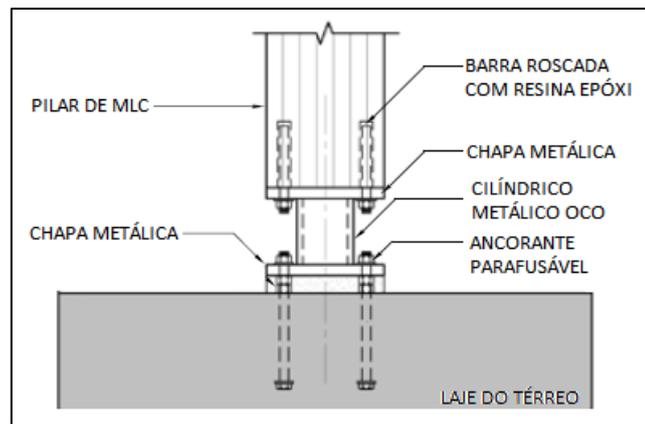


Figura 17 – Configuração do sistema de conexão pilar-térreo. (Fonte: adaptado de naturally:wood, 2016)

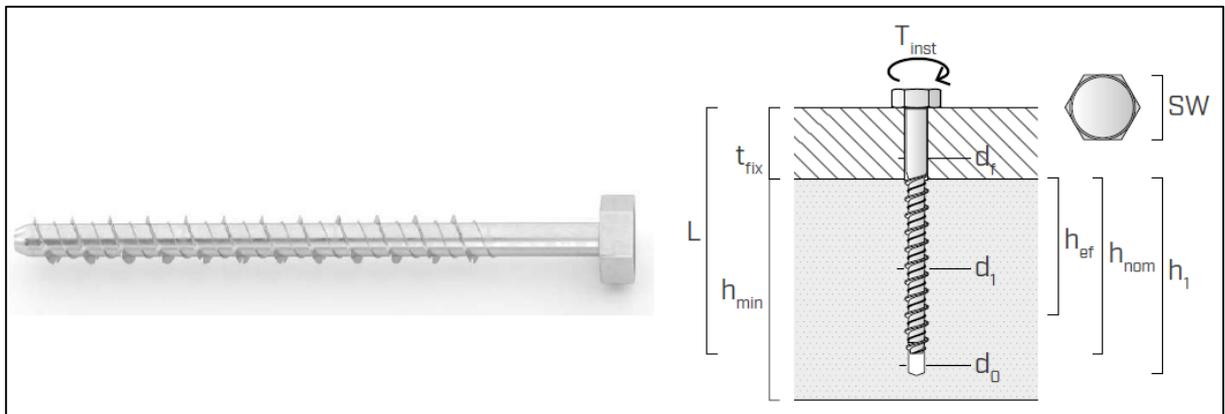
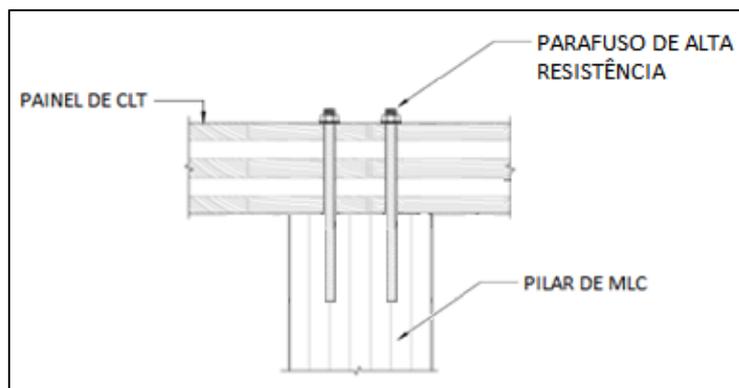


Figura 18 – Ancorante parafusável do tipo SKR para concreto. (Fonte: Catálogo técnico Rothoblaas, 2019)

As ligações pilar-cobertura, onde há a interrupção do pilar, serão feitas a partir da fixação dos painéis da laje de cobertura sobre o topo dos pilares por meio de parafusos com aço de alta resistência semelhantes aos adotados para a ligação da laje com as vigas. Para tal, os pilares sem continuidade serão produzidos sem o conjunto de conexão embutido em seu topo.



**Figura 19 – Configuração da ligação pilar-cobertura. (Fonte: próprio autor, 2021)**

A altura considerada para o conjunto de conexão entre pilares foi de 30 cm, 10 cm a mais que espessura das lajes, possibilitando, assim, a passagem do cilindro através delas com folga suficiente para o manuseio das ferramentas necessárias para a fixação da base do pilar na laje. Para o conjunto de conexão da base dos pilares do térreo, adotou-se uma altura de 15 cm, suficiente para ocultá-lo abaixo do piso elevado, uma vez que esse conjunto de conexão não precisa atravessar nenhuma laje. Dessa forma, com base nas alturas adotadas para os pilares, foram definidas as cotas de nível de cada pavimento do edifício, conforme apresentado em resumo na Figura 20.



**Figura 20 – Cota de nível de cada pavimento do edifício. (Fonte: próprio autor, 2021)**

#### 4.2.2. VIGAS DE MLC

As vigas de Madeira Lamelada Colada, tal como os pilares, foram idealizadas com foco na replicabilidade de produção, sendo assim, para as vigas aparentes foi adotada a seção única de 25x30 cm, enquanto para as demais vigas foi adotada a seção única de 20x30 cm, ressaltando o fato de que os elementos aparentes estarão submetidos à maiores esforços solicitantes e são mais afetados pela ação do fogo por estarem expostos sem a proteção do gesso, justificando,

assim, a necessidade de seções mais robustas. As vigas serão posicionadas entre pilares e entre outras vigas, tendo seu comprimento variado de caso a caso.



**Figura 21 – Viga de MLC do edifício Tallwood 1. (Fonte: District 56, 2021)**

Para as ligações viga-pilar (entre uma viga e um pilar) e viga-viga (entre duas vigas), adotou-se chapas metálicas internas fixadas com parafusos de alta resistência da fabricante Rothoblaas. Primeiramente a chapa será fixa na face do pilar, no caso da ligação viga-pilar, ou na face da viga de apoio, no caso da ligação viga-viga, por meio de parafusos do tipo LBS, na sequência, a viga apoiada será montada com a chapa metálica interna fixa com parafusos autoperfurantes do tipo SBD, que possibilitam a perfuração da chapa metálica interna sem pré-furações, agilizando o processo de execução da obra. Além disso, os parafusos SBD serão embutidos na viga com 15 mm de profundidade de inserção da cabeça do pino, e os furos serão preenchidos com cavilhas de madeira. Esse tipo de ligação é vantajoso pois permite que os elementos metálicos sejam ocultos, o que é favorável tanto no aspecto visual quanto no aspecto de segurança em casos de incêndio, uma vez que a madeira retarda a ação do fogo, protegendo o aço.

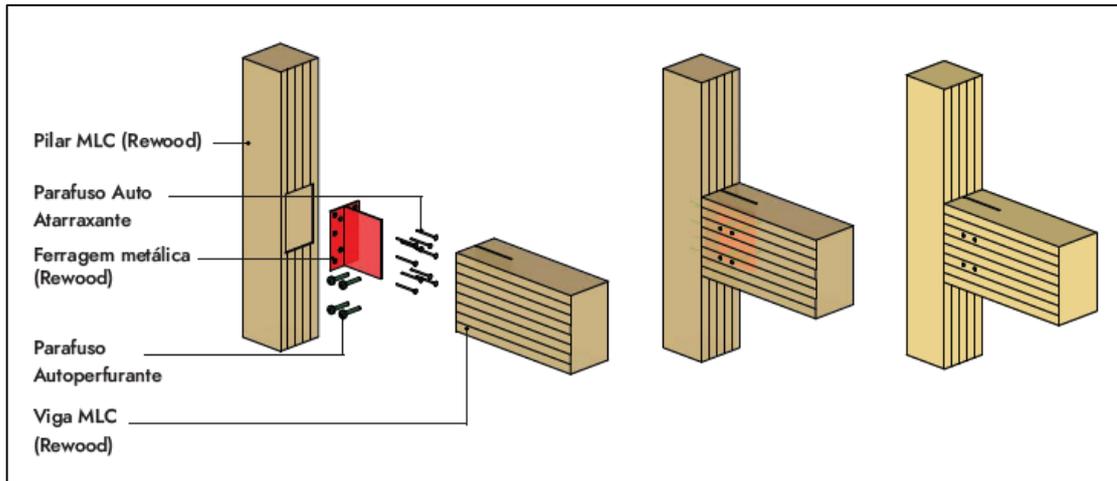


Figura 22 – Configuração da ligação viga-pilar. (Fonte: Rewood, 2021)

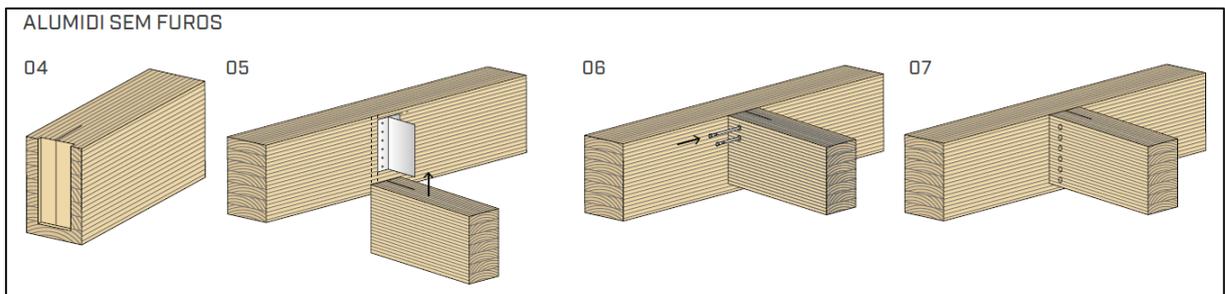


Figura 23 – Processo de montagem da ligação com chapa interna e parafuso SBD: 04 – cortes para a acomodação da chapa; 05 – encaixe da viga apoiada; 06 – inserção dos parafusos SBD; 07 – fechamento do furo com cavilhas de madeira. (Fonte: Catálogo técnico Rothoblaas, 2019)

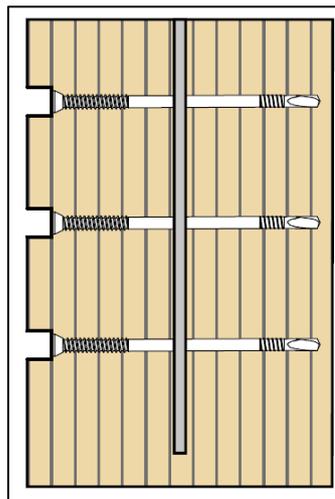
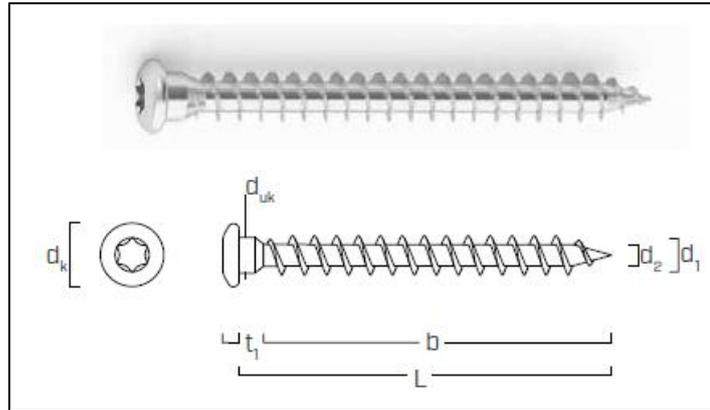
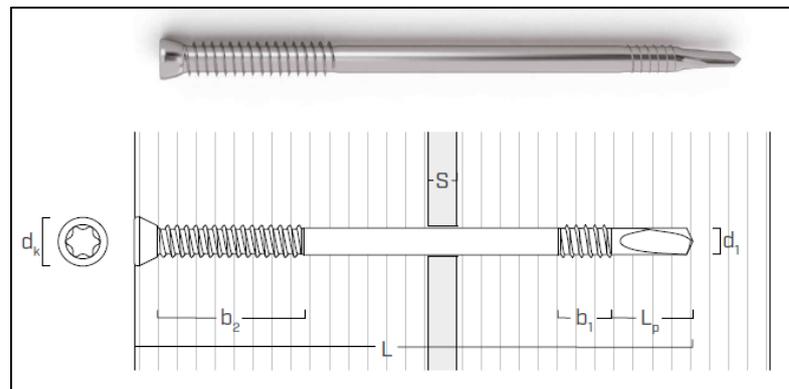


Figura 24 – Seção da viga com chapa interna fixa com parafuso SBD embutido. (Fonte: Catálogo técnico Rothoblaas, 2019)



**Figura 25 – Parafuso LBS com aço de alta resistência. (Fonte: Catálogo técnico Rothoblaas, 2019)**



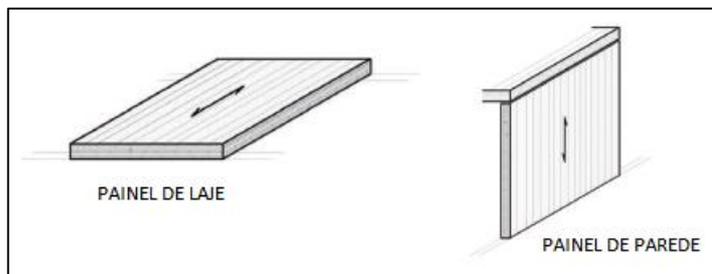
**Figura 26 – Parafuso SBD autoperfurante com aço de alta resistência. (Fonte: Catálogo técnico Rothoblaas, 2019)**

#### 4.2.3. LAJES DE CLT

As dimensões limites dos elementos de CLT estão relacionadas principalmente às dificuldades de transporte das peças, sendo assim, para a elaboração do projeto de locação das lajes e paredes, utilizou-se como base painéis com largura máxima de 3 metros e comprimento máximo de 12 metros, conforme as informações contidas no catálogo técnico da fornecedora CrossLam.

Vale destacar que os painéis de CLT são mais rígidos e resistentes na direção paralela às fibras das lamelas externas. Por isso, para aumentar a eficiência dos elementos, os painéis de laje e parede se diferenciam na orientação das lamelas externas, sendo essas paralelas a direção

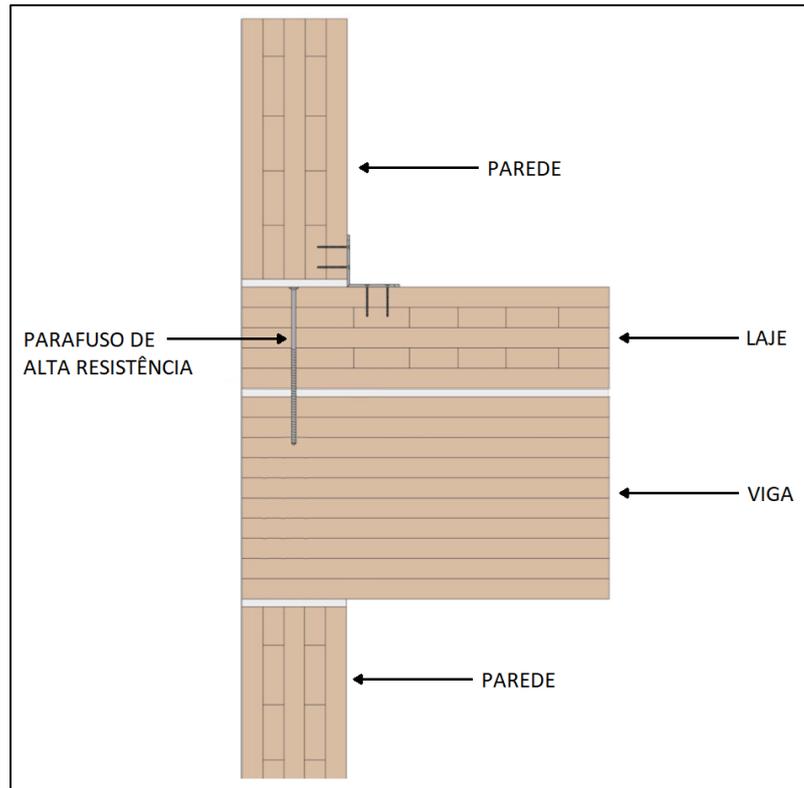
longitudinal das lajes e perpendiculares a direção longitudinal das paredes, conforme apresentado na Figura 27.



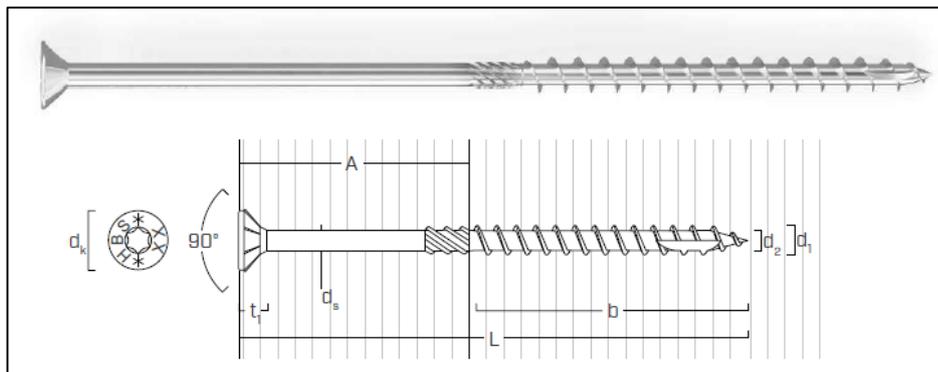
**Figura 27 – Orientação das lamelas externas para painéis de laje e parede. (Fonte: adaptado de CLT as structural material, 2019)**

A fim de padronizar a produção dos painéis de CLT, foram consideradas lajes com a mesma espessura para todos os pavimentos e a distribuição dos painéis no pavimento tipo foi feita visando a uniformização das dimensões. A espessura adotada para os painéis de laje foi de 20 cm, compostos por 5 camadas de 40 mm cada, considerando uma possível perda de seção em caso de incêndio. Vale destacar que os painéis de laje e parede adotados para o projeto possuem lamelas com 14 cm de largura.

Assim, os painéis de laje serão posicionados lado a lado, com a direção da maior inércia paralela a direção longitudinal, e serão fixados sobre as vigas por meio de parafusos de alta resistência do tipo HBS, da fabricante Rothoblaas, distribuídos a cada 20 cm, conforme apresentado na Figura 28.



**Figura 28 –Ligação do topo da laje com a viga. (Fonte: adaptado de Processing guideline binderholz CLT BBS, 2018)**



**Figura 29 – Parafuso HBS com aço de alta resistência. (Fonte: Catálogo técnico Rothoblaas, 2019)**

As emendas entre as lajes de CLT lado a lado serão feitas por meio de parafusos de alta resistência do tipo VGZ, da fabricante Rothoblaas, que permitem que os painéis sejam emendados sem a necessidade de cortes na madeira, agilizando o processo de fabricação e montagem. Os parafusos VGZ serão inseridos com inclinação de 45°, distribuídos a cada 20 cm e embutidos nos painéis, Figura 30.

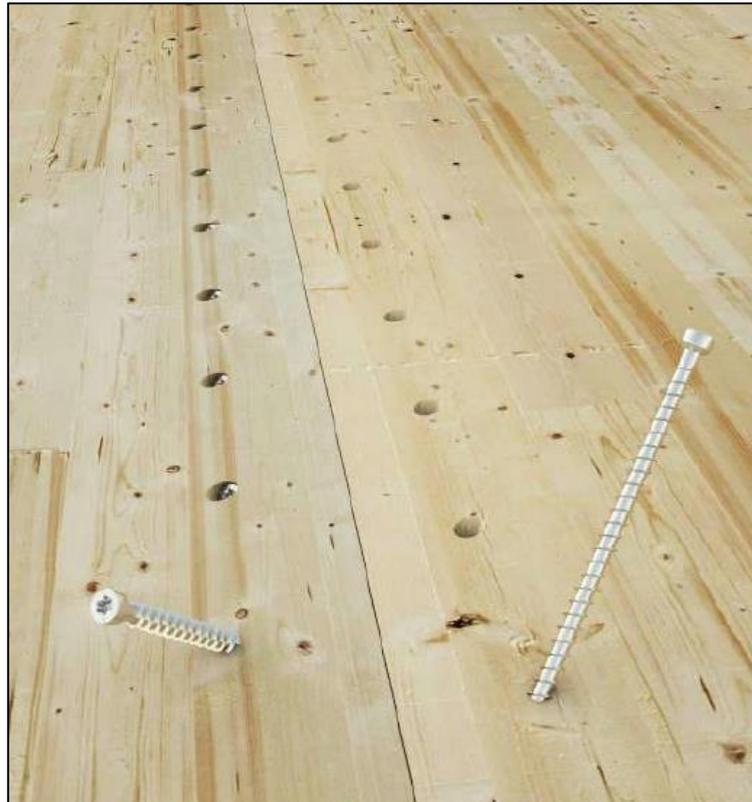


Figura 30 - Emenda entre as lajes de CLT com parafuso VGZ. (Fonte: Catálogo técnico Rothoblaas, 2019)

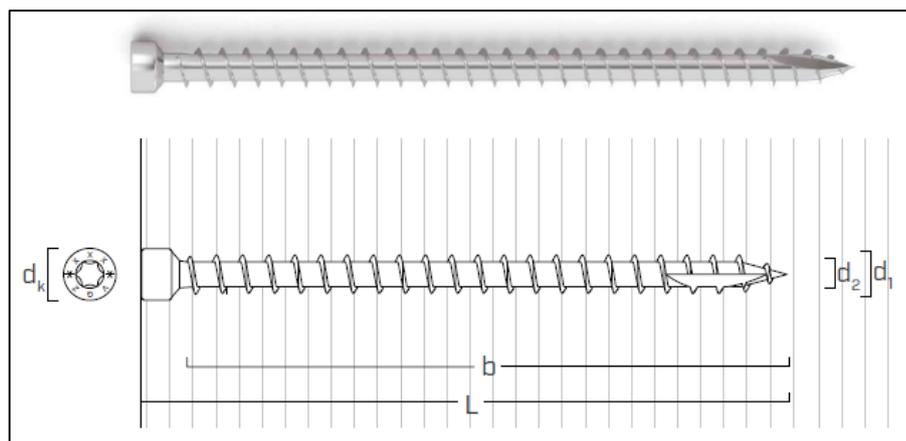


Figura 31 – Parafuso VGZ totalmente roscado com aço de alta resistência. (Fonte: Catálogo técnico Rothoblaas, 2019)

Além disso, tendo em vista aspectos como a durabilidade e o conforto acústico do ambiente, no apoio dos painéis de laje e parede serão utilizados isolantes acústicos, tal como mantas de EPDM e fitas adesivas, Figura 32.



**Figura 32 – Isolamento acústico no apoio dos painéis de laje e parede. (Fonte: Processing guideline binderholz CLT BBS, 2018)**

#### 4.2.4. PAREDES DE CLT

Em termos gerais, para o sistema estrutural adotado para o projeto, as cargas de gravidade são resistidas majoritariamente pelas vigas e pilares e não geram grandes solicitações de momento nas ligações. Entretanto, sobretudo em sistemas estruturais leves como em edifícios de madeira, as cargas horizontais, oriundas principalmente da ação do vento, demandam ligações muito rígidas, que na maioria dos casos tendem a ser inviáveis tecnicamente ou economicamente.

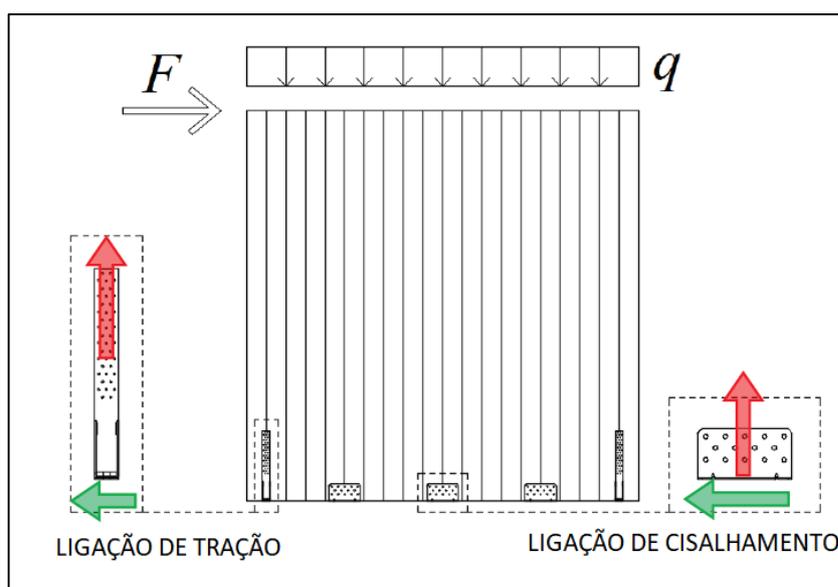
Com isso, surge a necessidade da utilização de elementos que forneçam mais rigidez à estrutura sob a ação dos esforços horizontais, reduzindo a demanda por ligações muito rígidas. Dentre as opções mais utilizadas atualmente para estruturas híbridas, tem-se os núcleos rígidos de concreto armado, aplicados normalmente nas caixas de escadas e elevadores, como é o caso do edifício *Brock Commons Tall House*, apresentado anteriormente. Porém, no caso de estruturas totalmente em madeira, esta rigidez pode ser obtida com a utilização de paredes de CLT que, junto com as lajes, transferem os esforços horizontais por meio das suas ligações. Dessa forma, tendo em vista que uma das premissas deste projeto é a exaltação do uso da

madeira em construções e a comprovação de sua eficiência estrutural, optou-se pela utilização do núcleo rígido em CLT, considerando a contribuição dos painéis de lajes e paredes.

Assim, foram adotados painéis de parede em CLT com 15 cm de espessura, compostos por 5 camadas de 30 mm cada, com a função de travamento dos pórticos de pilares e vigas e absorção dos esforços horizontais. Vale ressaltar que as paredes do edifício devem ser suficientemente espessas de tal modo que garantam que a estrutura principal se mantenha estável em caso de perda de seção transversal em situação de incêndio. Além disso, visando a padronização da produção dos painéis de CLT das paredes, considerou-se que todas as paredes e platibandas possuem a mesma espessura. As alturas dos painéis também serão uniformizadas, exceto por algumas paredes das regiões da escada, do elevador e da cobertura.

Além das paredes e platibandas, os painéis de 15 cm também foram utilizados como enrijecedores distribuídos perpendicularmente ao longo da direção longitudinal da platibanda, com 50 cm de comprimento, aumentando a rigidez.

Com relação às ligações necessárias para as paredes, sabendo que essas serão submetidas a ações verticais e horizontais, os conectores da base da parede devem resistir tanto a esforços de cisalhamento quanto a esforços de tração, sendo que os conectores das extremidades das paredes são os mais exigidos à tração, devido a tendência da parede levantar sob ações horizontais.



**Figura 33 – Configuração geral das forças resistidas pelos conectores da base das paredes de CLT. (Fonte: adaptado de Connections systems for CLT structures, 2019)**

Desse modo, foram adotados dois tipos de conectores angulares para a ligação da base das paredes nas lajes, um para o pavimento térreo (ligação concreto-madeira) e outro para os demais pavimentos (ligação madeira-madeira), ambos distribuídos com espaçamento de 50 cm e resistentes aos esforços de tração e cisalhamento.

Os conectores tipo Titan N da fabricante Rothoblaas, Figura 34, foram adotados para o pavimento térreo com parafusos do tipo LBS, ideias para ligações com chapas metálicas, na chapa vertical e ancorantes parafusáveis do tipo SKR na chapa horizontal. Para aumentar a resistência à tração dos conectores posicionados nas extremidades das paredes, adotou-se um reforço, também da fabricante Rothoblaas, denominado TCW, que corresponde a uma chapa metálica grossa fixa junto à chapa horizontal, Figura 35.

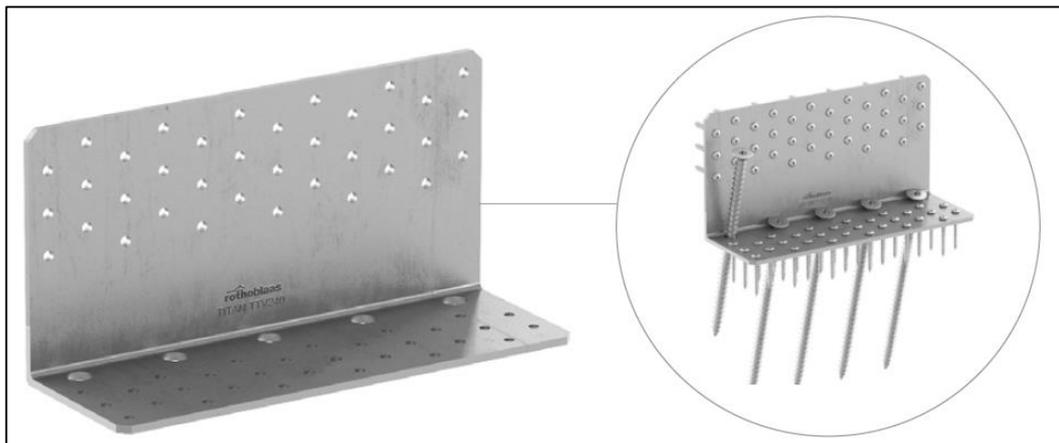


**Figura 34 – Conector angular Titan N para forças de corte e tração adotado para o pavimento térreo.  
(Fonte: Catálogo técnico Rothoblaas, 2019)**

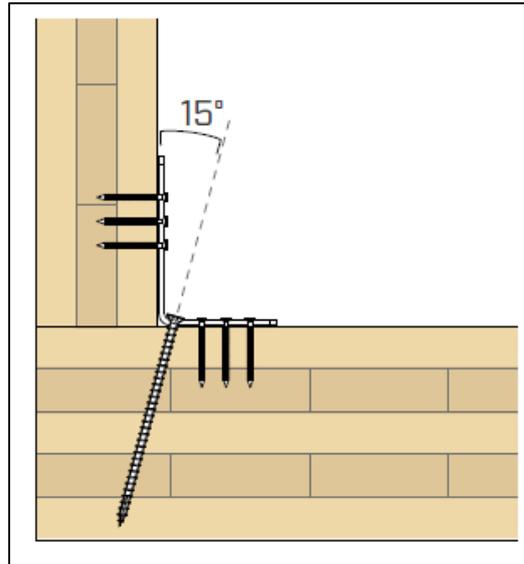


**Figura 35 – Conector angular Titan N com reforço TCW para esforços de tração. (Fonte: Catálogo técnico Rothoblaas, 2019)**

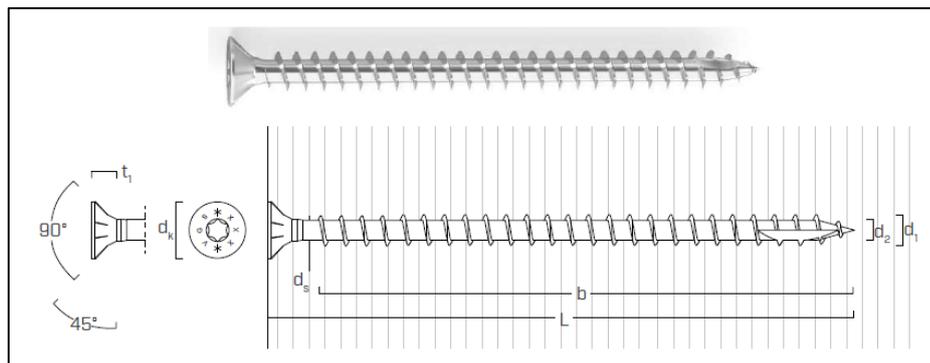
Para os demais pavimentos foram adotados os conectores tipo Titan V da fabricante Rothoblaas, com parafusos LBS nas chapas vertical e horizontal, bem como parafusos de alta resistência do tipo VGS, também da fabricante Rothoblaas, totalmente roscados, fixos com inclinação de 15 graus na chapa horizontal. Nesse caso, os conectores da extremidade da parede serão instalados com mais parafusos VGS para proporcionar o reforço necessário para resistir aos esforços de tração.



**Figura 36 – Conector angular Titan V para forças de corte e tração adotado para os pavimentos tipo e cobertura. (Fonte: Catálogo técnico Rothoblaas, 2019)**



**Figura 37 – Vista lateral da fixação do conector angular Titan V na parede e na laje. (Fonte: Catálogo técnico Rothoblaas, 2019)**

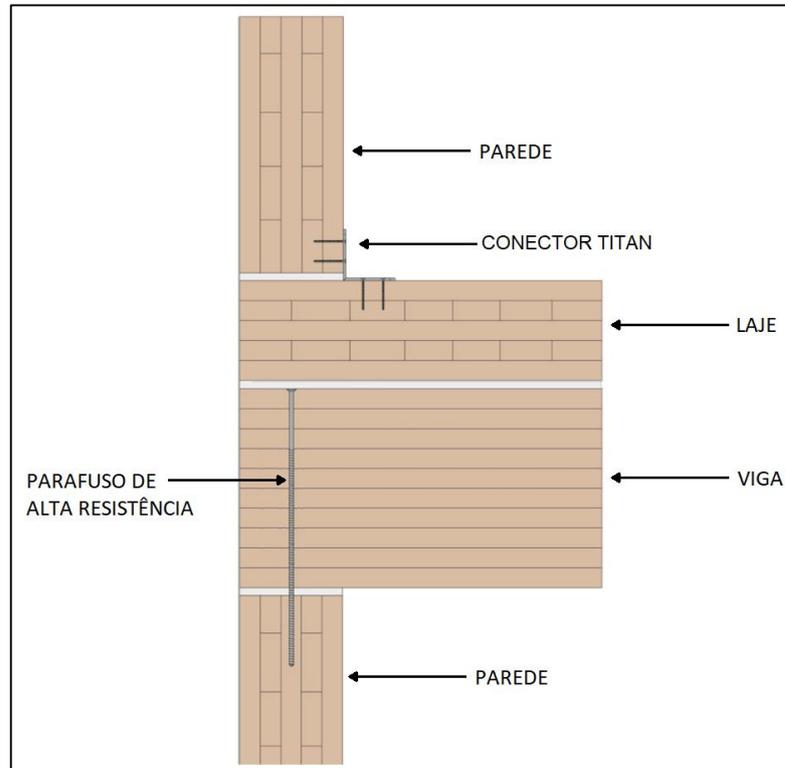


**Figura 38 – Parafuso VGS totalmente roscado com cabeça escareada e aço de alta resistência. (Fonte: Catálogo técnico Rothoblaas, 2019)**

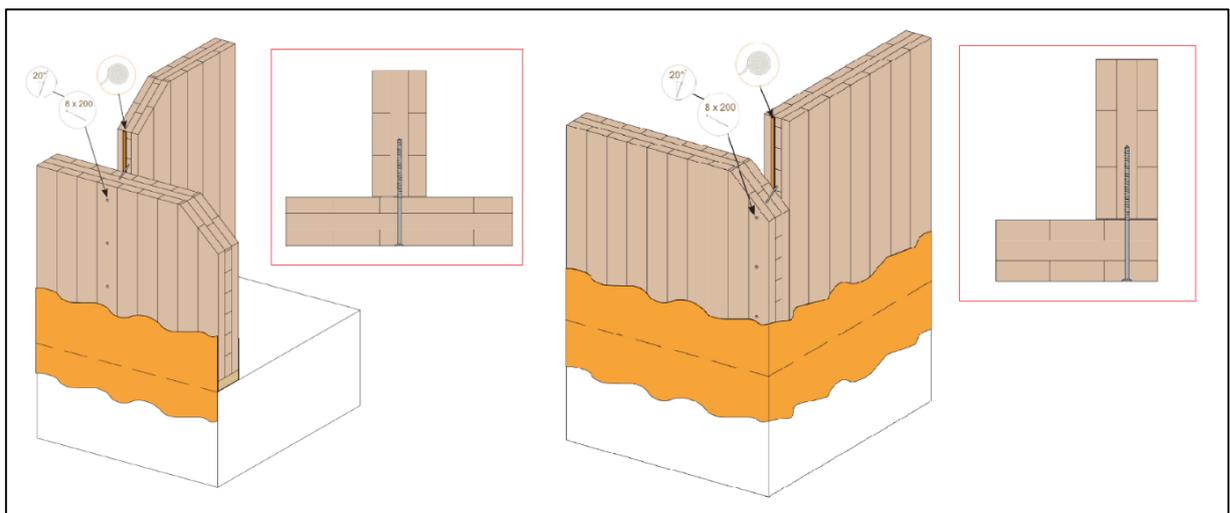
A fixação do topo das paredes nas vigas, bem como a ligação entre painéis de parede perpendiculares, será feita por meio de parafusos HBS, conforme apresentado na Figura 39 e na Figura 40, respectivamente. Porém, nos casos em que se tem paredes perpendicular de ambos os lados, a fixação frontal da parede é inviabilizada, sendo necessária a utilização de parafusos VGZ inclinados.

Além disso, para as regiões em que é necessária a emenda entre painéis de parede lado a lado, como na cobertura, será realizado o mesmo tipo de emenda considerado para as lajes, com parafusos VGZ inclinados. Ainda, para os casos em que se tem paredes sem laje abaixo,

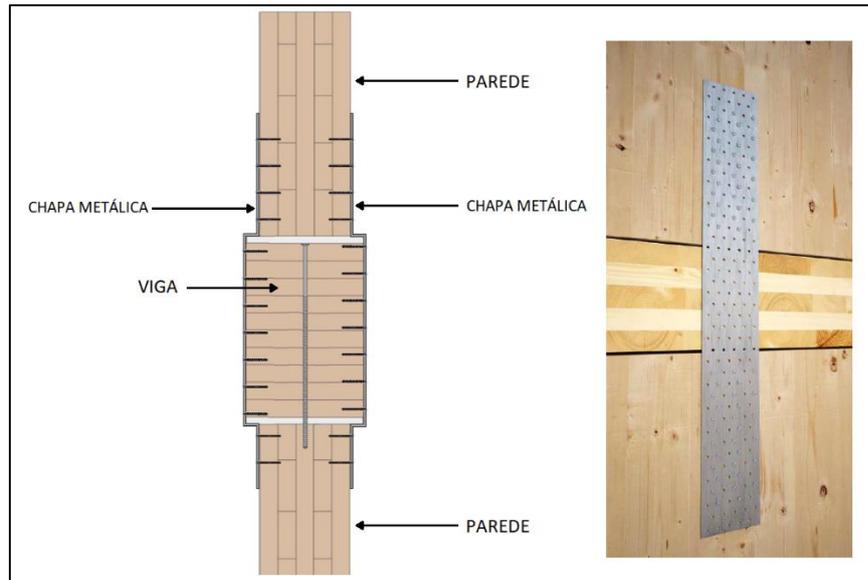
para a fixação de suas bases serão utilizadas chapas metálicas laterais espaçadas a cada metro, fixadas na parede e na viga com parafusos LBS, conforme apresentado na Figura 41.



**Figura 39 –Ligação do topo da parede com a viga. (Fonte: adaptado de Processing guideline binderholz CLT BBS, 2018)**

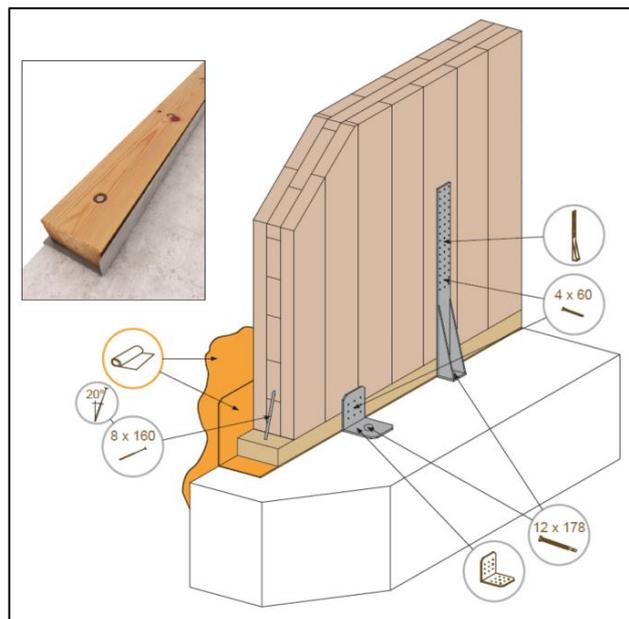


**Figura 40 – Conexão entre paredes perpendiculares. (Fonte: adaptado de Processing guideline binderholz CLT BBS, 2018)**



**Figura 41 – Fixação da base de paredes sem laje abaixo. (Fonte: adaptado de Processing guideline binderholz CLT BBS, 2018)**

Por motivos de durabilidade, as paredes do pavimento térreo deverão ser fixadas sobre uma peça de madeira envolta por um impermeabilizante, Figura 42, buscando evitar o contato direto da parede com a laje de concreto e conseqüente aumento da umidade da madeira. Para este projeto adotou-se uma peça de madeira de suporte com 5 cm de altura envolta por uma camada de manta asfáltica. Ainda no aspecto da durabilidade da madeira, serão utilizadas mantas hidrófugas, que funcionam como uma barreira contra o aumento da umidade da madeira, e as ligações entre painéis devem ser seladas com fitas adesivas isolantes que evitem a passagem de ar.



**Figura 42 – Exemplo de um suporte de madeira envolto por uma chapa impermeabilizante para proteção da base da parede do térreo. (Fonte: adaptado de Processing guideline binderholz CLT BBS, 2018)**

#### 4.2.5. ESCADAS

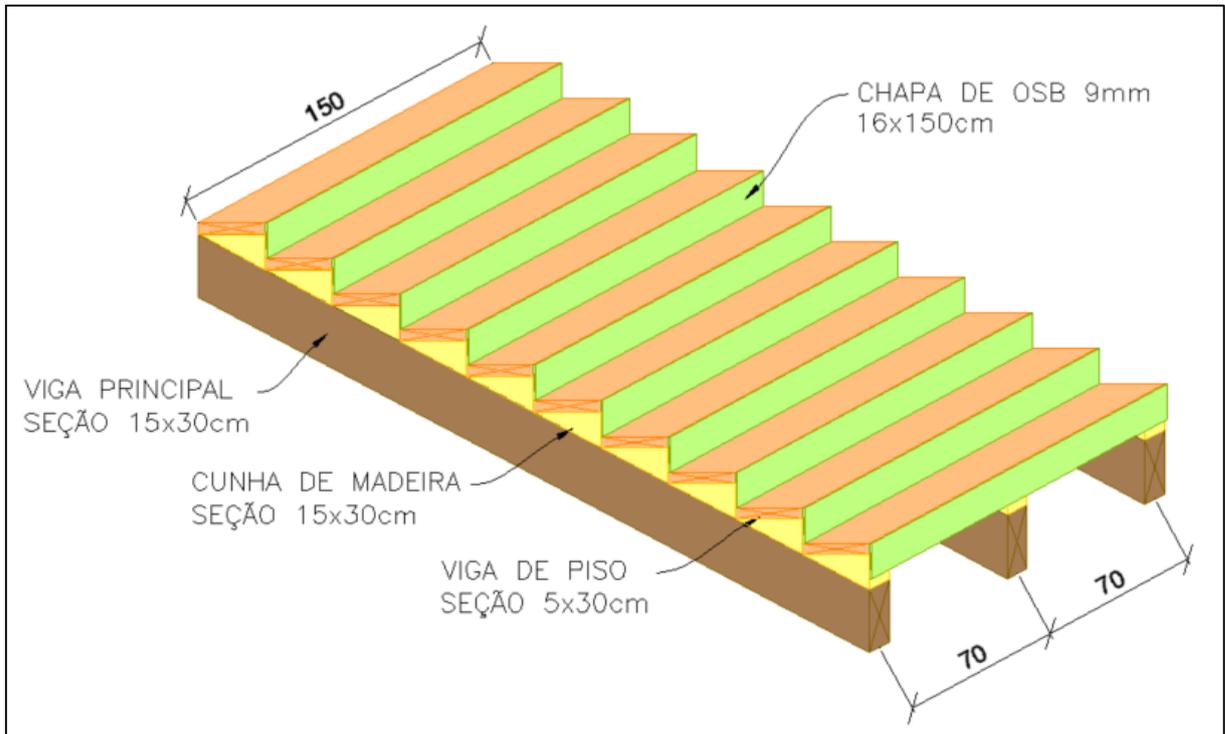
As escadas do edifício serão no formato U, compostas por dois lances de escada similares, com 10 degraus cada, e um patamar intermediário entre pavimentos. A similaridade dos lances de escada contribui para a replicabilidade de produção das peças, facilitando a pré-fabricação e montagem dos elementos.

Cada lance de escada será composto por 3 vigas principais, sobre as quais serão fixas cunhas de madeira para a montagem das vigas de piso, todas em MLC. Além disso, para o fechamento dos degraus, serão utilizadas chapas de OSB de 9 mm como espelho da escada.

Com relação às ligações, as cunhas e vigas de piso serão fixas nas vigas principais através de parafusos HBS. Enquanto as chapas de OSB do espelho serão pregadas nas cunhas e nas vigas de piso com pregos ardox galvanizados. As vigas principais da escada serão fixas nas vigas do pavimento tipo e do patamar por meio de chapas metálicas internas, de maneira similar à solução adotada para as vigas do pavimento tipo, com parafusos HBS e SBD.

Para o apoio das vigas principais no pavimento térreo serão utilizadas peças de madeira similares às adotadas para a base das paredes, com 5 cm de altura envoltas por manta asfáltica, visando evitar o contato direto da madeira com a laje de concreto. Ademais, a fixação da viga

principal na laje do térreo será feita por meio de conectores metálicos do tipo Titan N, semelhantes aos adotados para as paredes do térreo.



**Figura 43 – Configuração geral dos lances das escadas e seções das peças. (Fonte: próprio autor, 2021)**

Os patamares serão constituídos por painéis de CLT, semelhantes aos das lajes, fixados sobre vigas. Outro elemento considerado para o conjunto das escadas foi o degrau de rodapé com seção (10x13) cm, fixado sobre a laje do pavimento tipo logo após o último degrau do lance de escada abaixo da laje, necessário para ocultar a lateral do piso elevado adotado no projeto. Os Anexos C e D apresentam o detalhamento geral da estrutura dos patamares e escadas adotadas para o projeto, respectivamente.

### 4.3. AÇÕES ATUANTES

A seguir serão apresentadas as ações permanentes e variáveis consideradas no projeto, bem como as combinações exigidas pela ABNT NBR 7190:2022. Vale ressaltar que os valores das ações foram definidos com base nas recomendações presentes na ABNT NBR 6120:2019.

### 4.3.1. AÇÕES PERMANENTES

As ações permanentes são aquelas que atuam com valores constantes, ou com pequenas variações, durante a vida da edificação, sendo que o principal carregamento atribuído a este tipo de ação é o peso próprio da estrutura, calculado em função da densidade do material e do volume da peça. Além do peso próprio da madeira, deve-se considerar também o peso das ligações metálicas, o peso dos acabamentos e o peso do telhado verde com painéis fotovoltaicos.

#### 4.3.1.1. *Peso próprio da estrutura*

O *Dlubal RFEM*, software utilizado para a modelagem computacional da estrutura, calcula automaticamente o peso próprio das peças de madeira de acordo com as propriedades inseridas no software, porém, deve-se prever um incremento neste carregamento para simular o peso das ligações metálicas. Assim, uma vez que a etapa de modelagem precede o dimensionamento das ligações, realizou-se uma estimativa da relação entre o peso das ligações e da madeira, adotando o valor de 3%. Desse modo, é importante que ao final do dimensionamento das ligações seja feito o cálculo do peso efetivo e a comparação com o valor estimado, averiguando se há ou não a necessidade de redimensionamento da estrutura.

#### 4.3.1.2. *Peso próprio do acabamento das paredes*

Além do peso próprio dos painéis de CLT das paredes, já considerado no peso próprio da estrutura, deve-se incorporar ao modelo o peso próprio dos acabamentos das paredes. Para tal, definiu-se a composição típica das paredes do prédio, conforme apresentado na Figura 44, com ripas de 1,20 m e espaçadores de 15 cm, ambos de madeira Pinus C24 com seção 2,5x5,0 cm, e camada dupla de placas de gesso tipo F (elevada resistência ao fogo), também conhecido como gesso rosa, com 15 mm de espessura cada.

Além de uniformizar a espessura das paredes, as ripas e espaçadores também criam um vão entre a placa de gesso e o painel de CLT que deve ser utilizado para a passagem de instalações hidráulicas e elétricas, bem como deve ser preenchido com isolante termoacústico para a melhoria do conforto do ambiente interno. O peso próprio das ripas e espaçadores deve

ser calculado em função da sua seção e da densidade da madeira e cada camada de placas de gesso pesa 10 kg/m<sup>2</sup>.

Ademais, a face externa das paredes da fachada será composta por placas cimentícias ao invés de gesso, com peso específico de 22 kg/m<sup>2</sup>. Enquanto as paredes com faces molhadas serão compostas por gesso tipo H (elevada resistência à umidade), também conhecido como gesso verde, com uma camada simples de 12,5 mm de espessura, pesando 10 kg/m<sup>2</sup>, e revestimento cerâmico com peso específico de 25 kg/m<sup>2</sup>, que contribui para o isolamento da parede contra a umidade e na proteção contra o fogo. É importante destacar que tanto as paredes da fachada quanto as paredes molhadas serão protegidas por membranas hidrófugas para evitar o aumento de umidade da madeira.

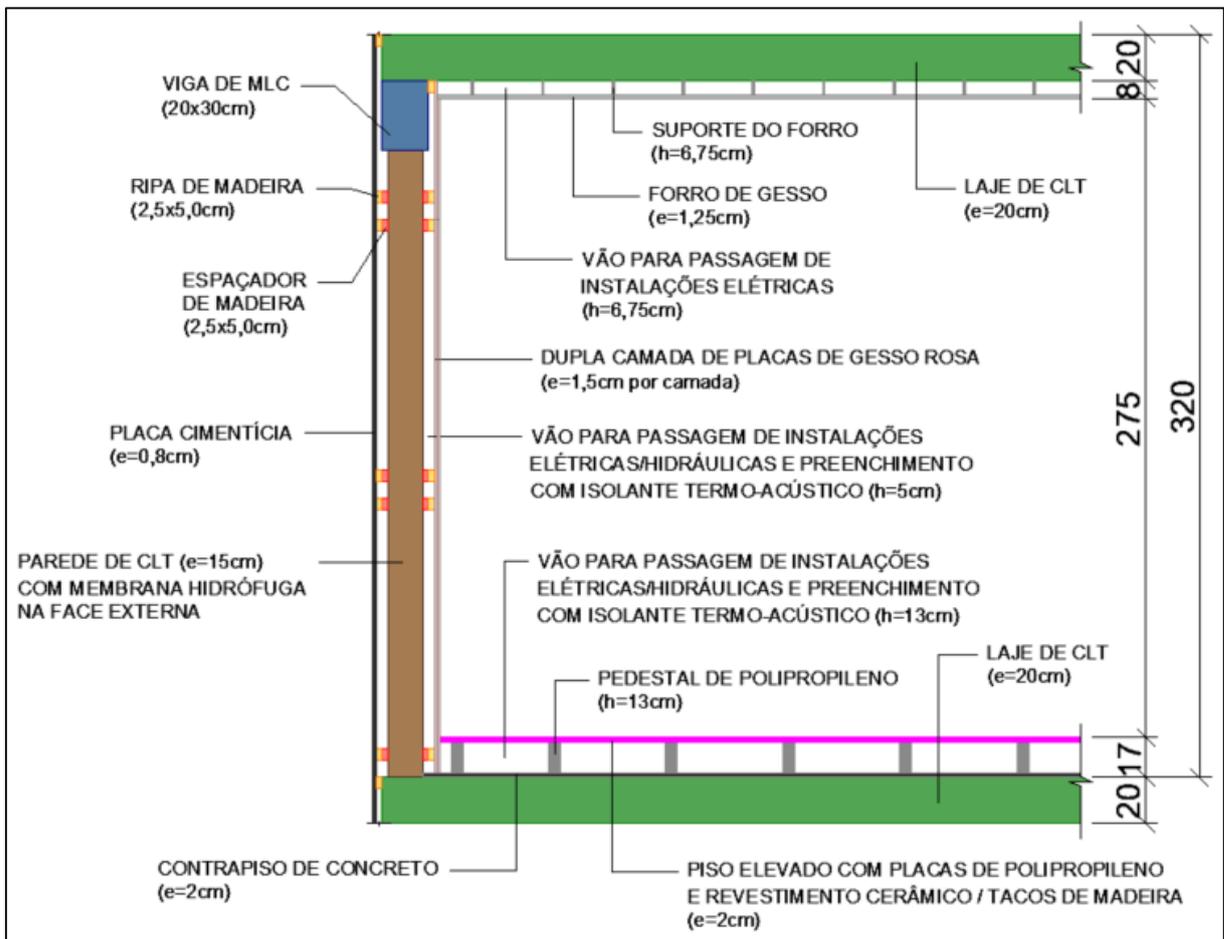
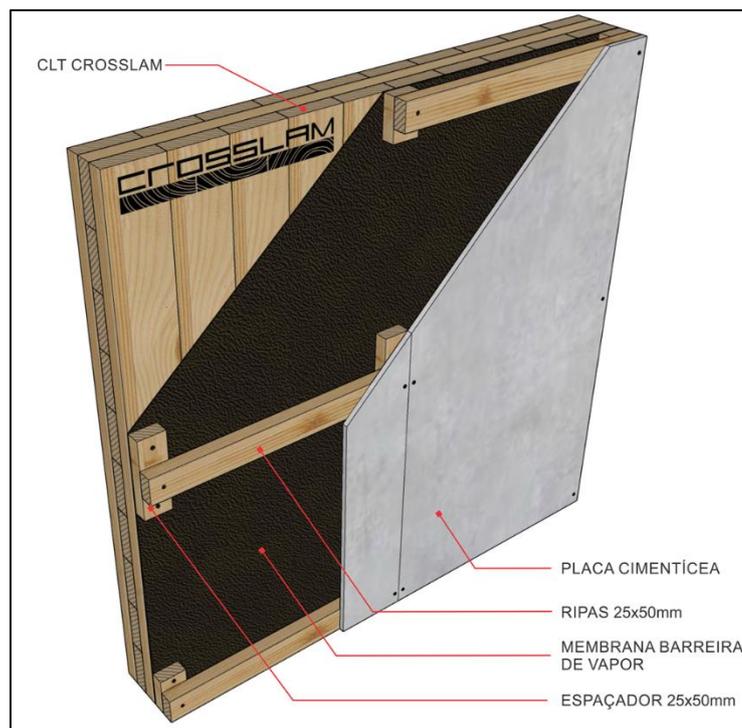


Figura 44 – Composição dos acabamentos das lajes e paredes. (Fonte: próprio autor, 2021)



**Figura 45 – Composição da face externa das paredes da fachada. (Fonte: Catálogo técnico Crosslam, 2021)**

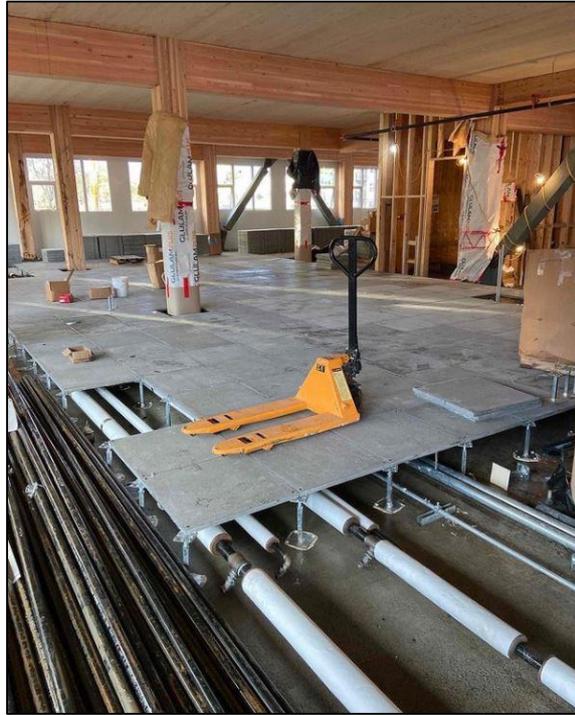
#### 4.3.1.3. *Peso próprio do acabamento das lajes do pavimento tipo*

Tal como citado para as paredes, além do peso próprio dos painéis de CLT das lajes, já considerado no peso próprio da estrutura, deve-se incorporar ao modelo o peso próprio dos acabamentos das lajes. Para tal, a composição adotada para as lajes dos pavimentos tipos corresponde ao apresentado na Figura 44, com forro de gesso tipo A (padrão) de 12,5 mm, contrapiso de concreto de 2 cm e estrutura de piso elevado, com piso cerâmico em áreas comuns e molhadas e piso de madeira nas demais áreas.

O forro de gesso em placas pesa 15 kg/m<sup>2</sup>, incluindo a estrutura de suporte, e serve tanto para a passagem de instalações elétricas quanto para a proteção da laje contra o fogo. Enquanto o contrapiso de concreto pesa 48 kg/m<sup>2</sup> e contribui para a proteção da laje e atenuação de vibrações.

A estrutura do piso elevado é composta por pedestais e placas de polipropileno reciclado, pesando apenas 12 kg/m<sup>2</sup>. Esse sistema permite a passagem das instalações hidráulicas e elétricas, com fácil acesso para manutenção. Além disso, o vão criado entre o

contrapiso e o piso deve ser preenchido com isolante termoacústico. Por fim, os pisos cerâmicos adotados pesam  $25 \text{ kg/m}^2$ , enquanto os pisos de madeira pesam  $20 \text{ kg/m}^2$ .



**Figura 46 – Piso elevado do edifício Tallwood 1. (Fonte: District 56, 2021)**



**Figura 47 – Estrutura de polipropileno reciclado do piso elevado. (Fonte: Remaster, 2021)**

#### 4.3.1.4. *Peso próprio das escadas*

Para a simplificação da modelagem computacional da estrutura, visando deixar o modelo mais leve, as escadas serão representadas no programa RFEM apenas pelas vigas principais. Desse modo, faz necessário o cálculo manual do peso próprio dos demais elementos de madeira da escada. Assim, deve-se calcular o peso das cunhas e vigas de piso a partir de suas seções e do peso específico da madeira C24, enquanto o peso das chapas de OSB de 9 mm dos espelhos é de  $600 \text{ kg/m}^3$ .

Além disso, considera-se que abaixo das vigas principais serão fixadas duas camadas de placas de gesso tipo F com 15 mm de espessura, pesando  $10 \text{ kg/m}^2$  cada, sem estrutura de suporte, afim de proteger a estrutura em caso de incêndio. Os degraus serão cobertos por uma camada de 2 cm de contrapiso em concreto, pesando  $48 \text{ kg/m}^2$ , e por pisos cerâmicos de  $25 \text{ kg/m}^2$ .

Os patamares serão revestidos pelas mesmas camadas de contrapiso e piso cerâmico, sendo que nos patamares não serão utilizados pisos elevados. Abaixo da laje do patamar será fixado um forro de gesso tipo A em placas, pesando  $15 \text{ kg/m}^2$ , com estrutura de suporte.

#### 4.3.1.5. *Peso próprio das lajes de cobertura*

Para determinar o peso próprio das lajes de cobertura, além do peso do painel de CLT das lajes, já considerado no peso próprio da estrutura, e do peso do forro do último pavimento, igual a  $15 \text{ kg/m}^2$ , deve-se incorporar ao modelo o peso próprio do sistema de isolamento térmico, do telhado verde e dos painéis fotovoltaicos. O mesmo cálculo vale para as lajes de cobertura das regiões de escada, elevador e caixa d'água, exceto pelo peso do telhado verde e dos painéis fotovoltaicos, sendo que para essas áreas, a laje de piso tem seu peso calculado de maneira semelhante às lajes do pavimento tipo.

A configuração adotada para a laje da cobertura pode ser observada na Figura 48, sendo composta por uma membrana de vapor e uma manta de impermeabilização que protegem a laje contra intempéries. O piso da cobertura fica elevado por barrotes de madeira 5 cm x 5 cm espaçados de 1,20 m e chapas de OSB de 18 mm, possibilitando o posicionamento do isolante térmico em placas isofoam com 50 mm de espessura. Os barrotes de madeira também serão de

Pinus C24, podendo ter seu peso calculado em função da seção e da densidade da madeira, as chapas de OSB pesam  $600 \text{ kg/m}^3$  e as placas de isofoam  $1,5 \text{ kg/m}^2$ .

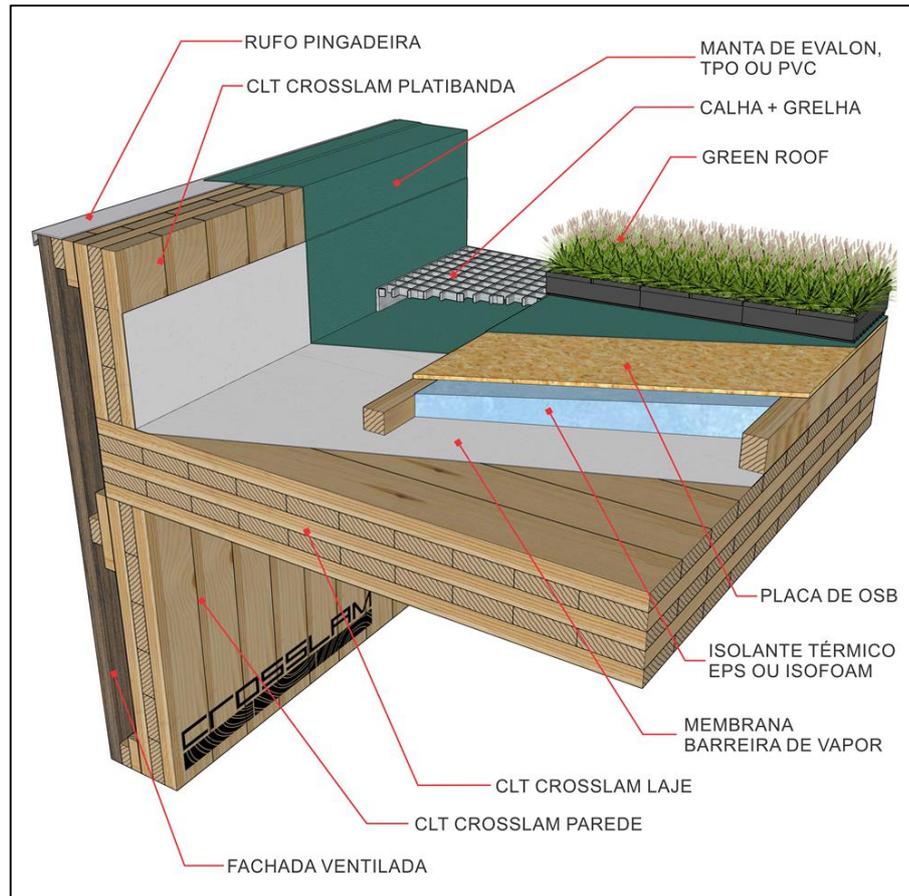


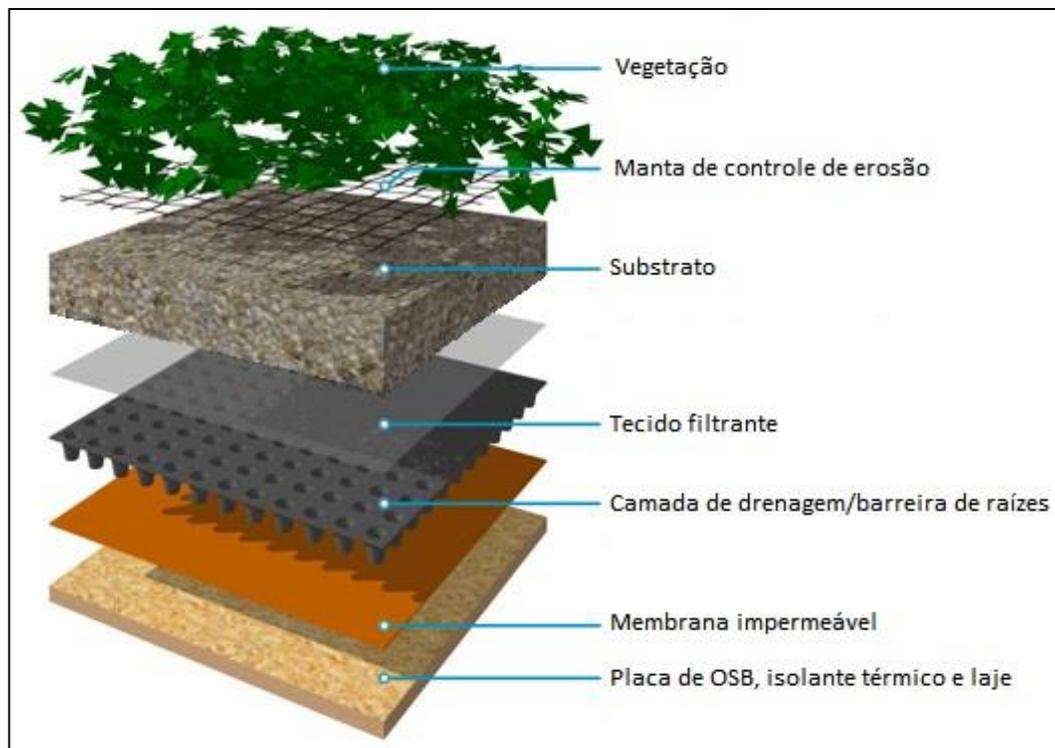
Figura 48 – Composição da laje de cobertura. (Fonte: Catálogo técnico Crosslam, 2021)

- **Telhado verde**

O telhado verde considerado para o projeto é do tipo semi-intensivo, com plantas de até 50 cm de altura, e a composição das suas camadas foi adotada de acordo com (CATUZZO, 2013), conforme seguinte sequência:

1. Suporte, isolamento térmico e proteção contra a água: correspondente à laje, às placas de isofoam e à manta de impermeabilização, respectivamente, já consideradas para toda a laje de cobertura.
2. Drenagem e barreira de raízes: corresponde à camada de geossintético responsável por drenar a água da chuva e de irrigação, bem como resistir à perfuração de raízes.

3. Tecido filtrante: responsável por impedir que pequenas partículas obstruam a drenagem.
4. Substrato: mistura de base mineral contendo areia, cascalho, tijolo triturado, leca, turfa, matéria orgânica e terra.
5. Manta de controle de erosão: protege o adubo das plantas enquanto elas crescem.
6. Vegetação: gramíneas, herbáceas e arbustos.



**Figura 49 – Camada do arboreto do telhado verde. (Fonte: adaptado de CATUZZO, 2013)**

Desse modo, como base em (CATUZZO, 2013) considerou-se o peso total de todas as camadas do telhado verde igual a  $300 \text{ kg/m}^2$ , com uma camada de substrato de 15 cm de espessura e peso específico de  $18 \text{ kN/m}^3$ . O posicionamento do telhado verde na cobertura do edifício pode ser observado no Anexo A.

- **Painéis fotovoltaicos**

A quantidade de placas fotovoltaicas adotadas para o projeto foi definida com auxílio de um simulador disponível no site da instituição Portal Solar, que fornece a área mínima necessária para a instalação das placas e valores estimados de produção mensal e economia anual de energia, a partir da quantidade de painéis, da potência máxima dos painéis e das condições climáticas da região do edifício, obtidas em função de dados históricos.

Dessa forma, tendo como limitação principal a área disponível para a instalação dos painéis solares, visto que esses dividem espaço com o jardim do telhado verde, e também o alto custo inicial de aquisição das placas, optou-se pela utilização de 24 painéis de 405W, o que é insuficiente para suprir toda a demanda de energia dos 24 apartamentos, mas que é capaz de diminuir consideravelmente o consumo de energia não renovável e reduzir os custos anuais de energia elétrica do prédio. Os resultados obtidos para a simulação dos 24 painéis adotados estão apresentados na Figura 50, considerando o preço da energia elétrica para a cidade de São Carlos no ano de 2021. Além disso, para a aplicação do carregamento no modelo estrutural considerou-se os dados fornecidos pela fabricante CanadianSolar para painéis de 405W, com dimensões 2108x1048x40 mm e peso unitário de 24,9 kg, sendo que o posicionamento dos painéis na cobertura pode ser observado no Anexo A.



**Figura 50 – Estimativa de produção de energia para a localidade do edifício no ano de 2021. (Fonte: Portal solar, 2021)**

### 4.3.2. AÇÕES VARIÁVEIS

As ações variáveis são aquelas que apresentam variações significativas ao longo da vida da edificação, sendo que, para este tipo de ação neste projeto, foram considerados os carregamentos de uso e ocupação, a pressão do vento e pesos de componentes como o elevador e os reservatórios de água.

#### 4.3.2.1. *Uso e ocupação*

Os carregamentos referentes a sobrecarga de uso e ocupação foram definidos em função de cada local de acordo com as recomendações da ABNT NBR 6120:2019. A Tabela 7 apresenta em resumo os carregamentos aplicados sobre as lajes de piso de cada ambiente do projeto. Vale destacar que o carregamento considerado para a cobertura do último pavimento foi o de jardins com possibilidade de acesso de pessoas, devido ao telhado verde, enquanto o carregamento considerado para a cobertura do elevador, da escada e da caixa d'água foi o de cobertura com acesso apenas para manutenção. Além disso, os elementos devem ser analisados isoladamente com um carregamento concentrado de 1 kN na posição mais crítica, simulando uma situação de construção ou de manutenção.

**Tabela 7 – Sobrecarga de uso e ocupação em função do ambiente.**

Local		Carga [kN/m <sup>2</sup> ]
Edifícios residenciais	Dormitórios, Sala, Copa, Cozinha, Banheiros	1.50
	Lavanderia	2.00
	Corredores de uso comum	3.00
Escadas	Com acesso ao público	3.00
Varanda e Terraços	Residencial	2.50
Jardins	Com possibilidade de acesso de pessoas	3.00
Cobertura	Com acesso apenas para manutenção	1.00

#### 4.3.2.2. *Elevador*

A carga considerada na projeção do poço do elevador foi de 30 kN/m<sup>2</sup>, conforme recomendado pela ABNT NBR 6120:2019, admitindo uma casa de máquinas para um elevador de passageiros com velocidade inferior a 1,0 m/s.

#### 4.3.2.3. *Caixa d'água*

Com relação a laje de piso da caixa d'água, considerou-se uma carga acidental referente aos reservatórios de água superiores do prédio. Para tal, foi feito o cálculo do volume de água requerido para suprir a demanda do prédio por no mínimo 24 horas, de acordo com as recomendações da ABNT NBR 5626:1998, partindo da estimativa de consumo diário de 200 L por pessoa e admitindo que os reservatórios superiores abrigam 2/3 do volume total calculado. Ademais, é necessário prever um volume extra para a irrigação do jardim do telhado verde e para casos emergenciais, tal como incêndios, por meio de um acréscimo de 50% do volume calculado para o reservatório superior. Dessa maneira, estimado o volume total de água necessário é possível definir a quantidade e volume dos reservatórios superiores instalados na cobertura e, a partir disso, determinar o carregamento aplicado sobre as lajes da caixa d'água.

#### 4.3.2.4. *Pressão do vento*

A análise da ação do vento que incide nas paredes externas e na cobertura do edifício é essencial para o dimensionamento de estruturas leves, como é o caso das estruturas de madeira, uma vez que provoca esforços horizontais consideráveis e, em alguns casos, é capaz de gerar inversão de esforços. Para tal, foram consideradas quatro direções críticas, com o vento incidindo no edifício à 0°, 90°, 180° e 270°, Figura 51. É válido ressaltar que a ação do vento é excludente, sendo considerada a incidência em apenas uma direção por vez.

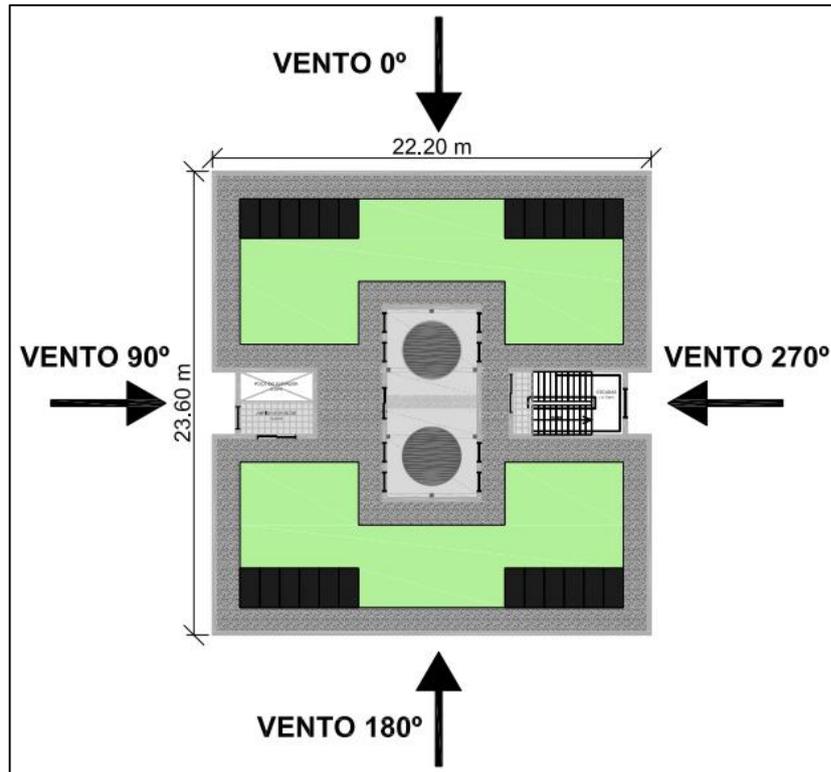


Figura 51 – Direções principais do vento analisado. (Fonte: próprio autor, 2021)

Os cálculos referentes a ação do vento foram realizados com base nas recomendações presentes na ABNT NBR 6123:1988. Assim, para determinar os ventos críticos, primeiramente, deve-se calcular a velocidade característica, obtida a partir da definição de alguns parâmetros relativos ao local, à geometria e ao uso da edificação, conforme a Equação 4.

$$V_k = V_0 \cdot S_1 \cdot S_2 \cdot S_3 \quad (4)$$

Sendo que,

$V_k$ : velocidade característica do vento;

$V_0$ : corresponde à velocidade básica do vento para o local da obra, obtida a partir do mapa de isopletas fornecido pela norma, adotada com valor igual a 45 m/s para a cidade de São Carlos-SP, sendo essa uma estimativa a favor da segurança;

$S_1$ : fator topográfico, referente as variações do relevo do terreno, foi adotado com valor igual 1,00, considerando o terreno da obra como plano ou fracamente acidentado;

$S_2$ : fator de rugosidade do terreno e dimensões da edificação, foi obtido a partir da Equação 5, variando em função da altura analisada, admitindo Classe B para todas as fachadas, visto que a maior dimensão das superfícies frontais é a altura do prédio igual a 28 metros, e considerando a rugosidade do terreno como Categoria IV, pois que a cota média do topo dos obstáculos é inferior a 10 metros;

$S_3$ : fator estatístico, baseado no grau de segurança requerido e a vida útil da edificação, foi obtido a partir da Tabela 3 da norma de ventos, com valor igual a 1,00 para edificações residenciais.

$$S_2 = \mathbf{b} \cdot F_r \cdot \left(\frac{z}{10}\right)^p \quad (5)$$

Tal que,

**b**: parâmetro de correção da classe da edificação, igual a 0,85 para edificações Classe B e Categoria IV;

$F_r$ : fator de rajada, igual a 0,98 para edificações Classe B;

$z$ : altura acima do terreno, valor em metros;

$p$ : parâmetro meteorológico, igual a 0,125 para edificações Classe B e Categoria IV.

Assim, com a velocidade característica do vento em m/s, pode-se calcular a pressão de obstrução ( $q$ ) conforme a Equação 6.

$$q = 0,613 \cdot V_k^2 \cdot 10^{-3} \text{ [kN/m}^2\text{]} \quad (6)$$

O cálculo dos coeficientes de pressão externa na cobertura e nas paredes ( $C_e$ ) foi feito com auxílio do software *Ciclone* para cada uma das direções analisadas em função das dimensões da edificação. Enquanto os coeficientes de pressão interna ( $C_{pi}$ ) foram definidos a partir da análise das hipóteses de permeabilidade previstas pela norma de ventos, adotando apenas a hipótese das quatro faces igualmente permeáveis ( $C_{pi} = -0,3$  ou 0), uma vez que a ocorrência das demais hipóteses é pouco provável. Desse modo, buscando obter os efeitos máximos de sobrepessão e sucção, calculou-se a pressão efetiva do vento ( $\Delta P$ ) para cada direção

analisada, conforme a Equação 7, utilizando as combinações críticas entre os coeficientes de pressão externa e interna.

$$\Delta P = (C_e - C_{pi}) \cdot q \quad (7)$$

Além disso, para as paredes da face de barlavento, a pressão foi calculada considerando o efeito de arrasto previsto pela ABNT NBR 6123:1988, indicado para edifícios de múltiplos pavimentos. A pressão de arrasto ( $P_a$ ) pode ser calculada pela Equação 8, multiplicando a pressão de obstrução ( $q$ ), calculada em função da altura analisada, pelo coeficiente de arrasto ( $C_a$ ), obtido com auxílio do software *Ciclone*, admitindo que o edifício está localizado em uma região de baixa turbulência.

$$P_a = C_a \cdot q(z) \quad (8)$$

Para o cálculo da pressão de arrasto do vento, variou-se a altura analisada a cada 2 pavimentos, ou seja, dividiu-se o edifício em 4 intervalos, determinando a pressão de obstrução a partir da altura  $z$  do ponto mais alto de cada intervalo.

#### 4.3.3. COMBINAÇÕES DAS AÇÕES

Com os carregamentos devidamente aplicados no modelo computacional, faz-se necessária a combinação dos esforços solicitantes para os estados limites últimos e de serviço, de acordo com as recomendações previstas na ABNT NBR 8681:2003 e na ABNT NBR 7190:2022, a fim de obter os efeitos mais desfavoráveis para a estrutura. Para tal, deve-se inserir os coeficientes de ponderação das ações para cada combinação no software *Dlubal RFEM*, que analisa cada caso fornecendo as envoltórias dos esforços solicitantes.

Assim, para a verificação da estrutura nos estados limites últimos (ELU), utilizou-se as combinações últimas normais, dadas pela Equação 9.

$$F_d = \sum_{i=1}^m (\gamma_{gi} \cdot F_{Gi,k}) + \gamma_{q1} \cdot F_{Q1,k} + \sum_{j=2}^n (\gamma_{qj} \cdot \Psi_{0j} \cdot F_{Qj,k}) \quad (9)$$

Onde,

$F_d$ : valor de cálculo da combinação;

$\gamma_g$ : valor do coeficiente de ponderação das ações permanentes;

$F_{G,k}$ : valor característico das ações permanentes;

$\gamma_q$ : valor do coeficiente de ponderação das ações variáveis;

$\Psi_0 \cdot F_{Q,k}$ : é o valor reduzido de combinação das ações variáveis secundárias.

Para a verificação da estrutura no estado limite de serviço (ELS), utilizou-se as combinações raras de serviço, dadas pela Equação 10.

$$F_{d,ser} = \sum_{i=1}^m (F_{Gi,k}) + F_{Q1,k} + \sum_{j=2}^n (\Psi_{1j} \cdot F_{Qj,k}) \quad (10)$$

Dessa forma, com base nas normas citadas e de acordo com cada ação considerada no projeto, elaborou-se a Tabela 8, com os coeficientes de ponderação das ações permanentes, a Tabela 9, com os coeficientes de ponderação das ações variáveis, e a Tabela 10, com os valores dos fatores de combinação e de redução para as ações variáveis. É válido destacar que a ABNT NBR 7190:2022 permite considerar todos os carregamentos como sendo de longa duração desde que, nesse caso, as ações consideradas como principais na combinação e que tenham um tempo de duração muito reduzido (como é o caso da ação do vento) devem ser multiplicadas por 0,75, tendo em vista que a resistência da madeira é maior para carregamentos de curta duração. No caso do dimensionamento das ligações metálicas o coeficiente de minoração 0,75 do vento deve ser desconsiderado.

Tabela 8 – Coeficientes de ponderação das ações permanentes.

Combinação	Tipo de ação	Efeito	
		Desfavorável	Favorável
Normal	Peso próprio dos elementos estruturais industrializados de madeira	1.25	1.00
	Peso próprio dos demais elementos construtivos (placas cimentícias, gesso, acabamentos cerâmicos, pisos, contrapisos, forros, impermeabilização, jardim e painéis fotovoltaicos)	1.50	1.00

Tabela 9 – Coeficientes de ponderação das ações variáveis.

Combinação	Tipo de ação	Coeficiente de ponderação
Normal	Ação do vento	1.40
	Ações variáveis em geral (sobrecarga de uso e ocupação, carga do elevador, carga dos reservatórios de água, carga de manutenção)	1.50

Tabela 10 – Valores dos fatores de combinação ( $\Psi_0$ ) e de redução ( $\Psi_1$  e  $\Psi_2$ ) para as ações variáveis.

Tipo de ação	$\Psi_0$	$\Psi_1$	$\Psi_2$
Cargas acidentais de edifícios residenciais	0.5	0.4	0.3
Pressão dinâmica do vento nas estruturas em geral	0.6	0.3	0

A

Tabela 11 contém a nomenclatura dada para cada ação considerada no projeto, enquanto a Tabela 12 apresenta as combinações últimas normais inseridas no software *Dlubal RFEM* para a análise estrutural.

Tabela 11 – Nomenclatura das ações consideradas no projeto.

Ações	Nomenclatura
Peso próprio dos elementos estruturais de madeira (pilares, vigas, lajes e paredes)	$F_{g1}$ ou $\gamma_{g1}$
Peso próprio dos demais elementos construtivos (acabamentos, telhado verde, painéis fotovoltaicos)	$F_{g2}$ ou $\gamma_{g2}$
Sobrecarga de uso e ocupação	$F_{q1}$ ou $\gamma_{q1}$
Carga do elevador	$F_{q2}$ ou $\gamma_{q2}$
Carga do reservatório de água	$F_{q3}$ ou $\gamma_{q3}$
Carga de manutenção	$F_{q4}$ ou $\gamma_{q4}$
Pressão do vento	$F_{q5}$ ou $\gamma_{q5}$

Tabela 12 – Combinações últimas normais inseridas no software *Dlubal RFEM*.

Combinações	Descrição
1 $1,25 * F_{g1} + 1,5 * F_{g2} + 1,5 * F_{q1} + 1,5 * 0,5 * (F_{q2} + F_{q3}) + 1,4 * 0,6 * F_{q5}$	Sobrecarga como variável principal c/ Vento
2 $1,25 * F_{g1} + 1,5 * F_{g2} + 1,5 * F_{q2} + 1,5 * 0,5 * (F_{q1} + F_{q3}) + 1,4 * 0,6 * F_{q5}$	Carga do elevador como variável principal c/ Vento
3 $1,25 * F_{g1} + 1,5 * F_{g2} + 1,5 * F_{q3} + 1,5 * 0,5 * (F_{q1} + F_{q2}) + 1,4 * 0,6 * F_{q5}$	Carga dos reservatórios de água como variável principal c/ Vento
4 $1,25 * F_{g1} + 1,5 * F_{g2} + 1,5 * F_{q4}$	Carga de manutenção como variável principal
5 $1,25 * F_{g1} + 1,5 * F_{g2} + 1,5 * F_{q1} + 1,5 * 0,5 * (F_{q2} + F_{q3})$	Sobrecarga como variável principal s/ Vento
7 $1,25 * F_{g1} + 1,5 * F_{g2} + 1,5 * F_{q2} + 1,5 * 0,5 * (F_{q1} + F_{q3})$	Carga do elevador como variável principal s/ Vento
8 $1,25 * F_{g1} + 1,5 * F_{g2} + 1,5 * F_{q3} + 1,5 * 0,5 * (F_{q1} + F_{q2})$	Carga dos reservatórios de água como variável principal s/ Vento
9 $1,25 * F_{g1} + 1,5 * F_{g2} + 1,4 * 0,75 * F_{q5} + 1,5 * 0,5 * (F_{q1} + F_{q2} + F_{q3})$	Vento de sobrepressão como variável principal

10	$1,0 \cdot F_{g1} + 1,0 \cdot F_{g2} + 1,4 \cdot 0,75 \cdot F_{q5}$	Vento de sucção como variável principal
----	---	---

As combinações de serviço, referentes a verificação de deslocamentos excessivos, foram realizadas conforme descrito no item 4.5.1, levando em consideração o coeficiente de fluência da madeira. A Tabela 13 apresenta as combinações de serviço inseridas no software *Dlubal RFEM* para a análise estrutural.

**Tabela 13 – Combinações de serviço inseridas no software *Dlubal RFEM*.**

Combinações		Descrição
1	$(\gamma_{g1} + \gamma_{g2}) \cdot (1+0,6) + \gamma_{q1} \cdot (1+0,3 \cdot 0,6) + (\gamma_{q2} + \gamma_{q3}) \cdot (0,4+0,3 \cdot 0,6) + \gamma_{q5} \cdot (0,3)$	Sobrecarga como variável principal c/ Vento
2	$(\gamma_{g1} + \gamma_{g2}) \cdot (1+0,6) + \gamma_{q2} \cdot (1+0,3 \cdot 0,6) + (\gamma_{q1} + \gamma_{q3}) \cdot (0,4+0,3 \cdot 0,6) + \gamma_{q5} \cdot (0,3)$	Carga do elevador como variável principal c/ Vento
3	$(\gamma_{g1} + \gamma_{g2}) \cdot (1+0,6) + \gamma_{q3} \cdot (1+0,3 \cdot 0,6) + (\gamma_{q1} + \gamma_{q2}) \cdot (0,4+0,3 \cdot 0,6) + \gamma_{q5} \cdot (0,3)$	Carga dos reservatórios de água como variável principal c/ Vento
4	$(\gamma_{g1} + \gamma_{g2}) \cdot (1+0,6) + \gamma_{q4} \cdot (1+0,3 \cdot 0,6)$	Carga de manutenção como variável principal
5	$(\gamma_{g1} + \gamma_{g2}) \cdot (1+0,6) + \gamma_{q1} \cdot (1+0,3 \cdot 0,6) + (\gamma_{q2} + \gamma_{q3}) \cdot (0,4+0,3 \cdot 0,6)$	Sobrecarga como variável principal s/ Vento
7	$(\gamma_{g1} + \gamma_{g2}) \cdot (1+0,6) + \gamma_{q2} \cdot (1+0,3 \cdot 0,6) + (\gamma_{q1} + \gamma_{q3}) \cdot (0,4+0,3 \cdot 0,6)$	Carga do elevador como variável principal s/ Vento
8	$(\gamma_{g1} + \gamma_{g2}) \cdot (1+0,6) + \gamma_{q3} \cdot (1+0,3 \cdot 0,6) + (\gamma_{q1} + \gamma_{q2}) \cdot (0,4+0,3 \cdot 0,6)$	Carga dos reservatórios de água como variável principal s/ Vento
9	$(\gamma_{g1} + \gamma_{g2}) \cdot (1+0,6) + \gamma_{q5} + (\gamma_{q1} + \gamma_{q2} + \gamma_{q3}) \cdot (0,4+0,3 \cdot 0,6)$	Vento de sobrepessão como variável principal
10	$(\gamma_{g1} + \gamma_{g2}) \cdot (1+0,6) + \gamma_{q5}$	Vento de sucção como variável principal

#### **4.4. MODELAGEM ESTRUTURAL COMPUTACIONAL**

Com a definição da locação dos elementos estruturais, das propriedades geométricas e mecânicas de cada peça e dos carregamentos aplicados na estrutura, foi possível elaborar o modelo computacional 3D da estrutura do prédio utilizando o software *Dlubal RFEM*.

Para tal, primeiramente, devem ser inseridos os elementos de barra (pilares e vigas) e, então, os elementos de superfície (lajes e paredes), fornecendo ao modelo as dimensões e propriedades mecânicas de cada material. Posicionados os elementos, deve-se atribuir aos nós valores de rigidez em função da ligação adotada, de modo que o comportamento do modelo computacional seja similar ao comportamento real da estrutura. Por fim, devem ser aplicados os carregamentos para que sejam geradas as combinações dos esforços, possibilitando, então, o dimensionamento da estrutura.

Vale destacar que tanto o dimensionamento das seções dos elementos quanto o dimensionamento das ligações, e conseqüentemente da rigidez, são processos iterativos que demandam estimativas preliminares para que seja possível gerar a análise inicial e a partir dessa refinar o dimensionamento até que sejam alcançados resultados satisfatórios.

Além disso, para a análise dos diferentes estados limites, foram realizados 2 modelos, um para o dimensionamento da estrutura no ELU e outro para a verificação no ELS, variando as propriedades dos materiais em cada modelo de acordo com as recomendações da ABNT NBR 7190:2022, sendo que para a verificação da situação de incêndio foram utilizadas as solicitações do modelo do ELU reduzidas conforme descrito no item 4.5.6.

#### **4.5. DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL**

O dimensionamento dos elementos estruturais em madeira e das ligações metálicas foi feito com base nas recomendações presentes na ABNT NBR 7190:2022. A seguir serão apresentados os equacionamentos utilizados para a verificação dos estados limites das vigas, pilares, lajes e paredes, bem como o dimensionamento das ligações, com a determinação da rigidez, e o dimensionamento das seções em caso de incêndio.

#### 4.5.1. VIGAS

As vigas do projeto foram consideradas biapoiadas, tanto em pilares quanto em outras vigas, e dimensionadas para os estados limites últimos, verificando a flexão simples reta, o cisalhamento e a estabilidade lateral, e para o Estado Limite de Serviço de deslocamentos excessivos.

- **Flexão simples reta**

$$\frac{\sigma_{M,d}}{f_{m,d}} = \frac{\frac{M_d}{W}}{f_{m,d}} \leq 1 \quad (11)$$

Sendo,

$\sigma_{M,d}$ : valor máximo de cálculo da tensão atuante de flexão;

$f_{m,d}$ : valor de cálculo da resistência convencional à flexão;

$M_d$ : valor de cálculo do momento fletor máximo;

$W$ : módulo de resistência da seção transversal à direção paralela às fibras, em relação ao eixo central de inércia perpendicular ao plano de ação do momento fletor.

- **Cisalhamento longitudinal**

Para seções retangulares, tem-se:

$$\frac{\tau_d}{f_{v0,d}} = \frac{1,5 \cdot \frac{V_d}{A}}{f_{v0,d}} \leq 1 \quad (12)$$

Tal que,

$\tau_d$ : máxima tensão de cisalhamento atuando no ponto mais solicitado da peça;

$f_{v,0d}$ : valor de cálculo da resistência ao cisalhamento;

$V_d$ : valor de cálculo da força cortante máxima;

$A$ : área da seção transversal retangular da viga.

- **Estabilidade lateral**

A verificação da estabilidade lateral para vigas de seção retangular sujeitas à flexão simples reta pode ser dispensada para peças cujas rotações estejam impedidas nos apoios e que atendam a Expressão 13.

$$\sigma_{c,d} \leq \frac{E_{c0,ef}}{\frac{L_1}{b} \cdot \beta_M} \quad (13)$$

Onde,

$\sigma_{c,d}$ : máxima tensão de compressão atuando na peça;

$E_{c0,ef}$ : módulo de elasticidade efetivo paralelo às fibras;

$L_1$ : distância entre pontos adjacentes da borda comprimida com deslocamentos laterais impedidos;

$b$ : largura da seção transversal;

$\beta_M$ : coeficiente de correção dado em função da relação h/b, conforme a Equação 14.

$$\beta_M = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{\beta_E}{\gamma_f} \cdot \frac{\left(\frac{h}{b}\right)^{3/2}}{\left(\frac{h}{b} - 0,63\right)^{1/2}} \quad (14)$$

Com  $\beta_E = 4$  e  $\gamma_f = 1,4$ .

- **Deslocamentos excessivos**

O cálculo dos deslocamentos finais, considerando os efeitos da fluência da madeira, foi feito a partir das combinações raras de serviço, dado pela Equação 15.

$$\delta_{fin} = \sum_{i=1}^m \delta_{fin,Gi,k} + \delta_{fin,Q1,k} + \sum_{j=2}^n \delta_{fin,Qj,k} \quad (15)$$

Com,

$$\delta_{fin,Gi,k} = \delta_{inst,G,k} \cdot (1 + \emptyset)$$

$$\delta_{fin,Q1,k} = \delta_{inst,Q1,k} \cdot (1 + \psi_2 \cdot \emptyset)$$

$$\delta_{fin,Qj,k} = \delta_{inst,Qj,k} \cdot (\psi_{1,j} + \psi_{2,j} \cdot \emptyset)$$

Onde,

$\delta_{inst,G,k}$ ,  $\delta_{inst,Q1,k}$  e  $\delta_{inst,Qj,k}$ : deslocamentos instantâneos para as ações permanentes, ação variável principal e ações variáveis secundárias, respectivamente;

$\psi_1$  e  $\psi_2$ : fatores de redução das ações variáveis, conforme a Tabela 10;

$\emptyset$ : coeficiente de fluência, dado em função da classe de umidade, conforme a Tabela 14.

**Tabela 14 – Coeficiente de fluência, segundo a ABNT NBR 7190:2022.**

Material	Classe de umidade		
	(1)	(2 e 3)	(4)
Madeira serrada e MLC	0.6	0.8	2.0
MLCC	0.6	0.8	-

Os deslocamentos devem ser calculados considerando os módulos de elasticidade longitudinal médio ( $E_{0,m}$ ) e transversal médio ( $G_m$ ), bem como devem ser levadas em consideração as deformações das ligações, considerando a rigidez ( $K_{ser}$ ).

Para que a verificação seja atendida, os deslocamentos finais devem ser inferiores a  $L/300$ , que corresponde ao limite estipulado pela ABNT NBR 7190:2022 para vigas biapoiadas, sendo L o vão efetivo da viga.

#### 4.5.2. PILARES

Os pilares foram dimensionados para os estados limites últimos, verificando a flexocompressão e estabilidade, e para o estado limite de serviço de deslocamentos excessivos.

- **Flexocompressão**

A condição de segurança relativa a peças submetidas à flexocompressão é dada pela mais rigorosa das Expressões 16 e 17.

$$\left(\frac{\sigma_{Nc,d}}{f_{c0,d}}\right)^2 + \frac{\sigma_{Mx,d}}{f_{m,d}} + k_M \cdot \frac{\sigma_{My,d}}{f_{m,d}} \leq 1 \quad (16)$$

$$\left(\frac{\sigma_{Nc,d}}{f_{c0,d}}\right)^2 + k_M \cdot \frac{\sigma_{Mx,d}}{f_{m,d}} + \frac{\sigma_{My,d}}{f_{m,d}} \leq 1 \quad (17)$$

Sendo,

$\sigma_{Nc,d}$ : valor de cálculo da parcela de tensão normal atuante em virtude apenas da força normal de compressão;

$\sigma_{Mx,d}$  e  $\sigma_{My,d}$ : tensões máximas de cálculo devidas às componentes de flexão atuantes segundo as direções principais;

$f_{c0,d}$ : resistência de cálculo à compressão paralela às fibras;

$f_{m,d}$ : resistência convencional de cálculo na flexão;

$k_M$ : coeficiente de correção igual a 0,7 para seções retangulares.

- **Estabilidade**

A verificação da condição de estabilidade de peças flexocomprimidas depende dos valores dos índices de esbelteza relativa correspondentes à flexão em torno dos eixos x e y ( $\lambda_{rel,x}$  e  $\lambda_{rel,y}$ ), caso ambos sejam menores ou iguais a 0,3, as tensões devem satisfazer apenas às Expressões 16 e 17, não sendo necessária a verificação da estabilidade. Caso contrário, deve-se verificar as condições das Expressões 18 e 19.

$$\frac{\sigma_{Nc,d}}{k_{cx} \cdot f_{c0,d}} + \frac{\sigma_{Mx,d}}{f_{m,d}} + k_M \cdot \frac{\sigma_{My,d}}{f_{m,d}} \leq 1 \quad (18)$$

$$\frac{\sigma_{Nc,d}}{k_{cy} \cdot f_{c0,d}} + k_M \cdot \frac{\sigma_{Mx,d}}{f_{m,d}} + \frac{\sigma_{My,d}}{f_{m,d}} \leq 1 \quad (19)$$

Sendo que,

$$k_{cx} = \frac{1}{k_x + \sqrt{(k_x)^2 - (\lambda_{rel,x})^2}} \quad (20)$$

$$k_{cy} = \frac{1}{k_y + \sqrt{(k_y)^2 - (\lambda_{rel,y})^2}} \quad (21)$$

$$k_x = 0,5 \cdot [1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel,x} - 0,3) + (\lambda_{rel,x})^2] \quad (22)$$

$$k_y = 0,5 \cdot [1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel,y} - 0,3) + (\lambda_{rel,y})^2] \quad (23)$$

$$\lambda_{rel,x} = \frac{\lambda_x}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{c0,k}}{E_{0,05}}} \quad (24)$$

$$\lambda_{rel,y} = \frac{\lambda_y}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{c0,k}}{E_{0,05}}} \quad (25)$$

$$\lambda_x = \frac{L_0}{\sqrt{\frac{I_x}{A}}} \quad (26)$$

$$\lambda_y = \frac{L_0}{\sqrt{\frac{I_y}{A}}} \quad (27)$$

$$L_0 = K_E \cdot L \quad (28)$$

Tal que,

$\lambda_{rel,x}$  e  $\lambda_{rel,y}$ : valores dos índices de esbeltez relativa correspondentes à flexão em torno dos eixos x e y, respectivamente;

$E_{0,05}$ : valor característico do módulo de elasticidade medida na direção paralela às fibras;

$\lambda_x$  e  $\lambda_y$ : índices de esbeltez segundo os eixos x e y, respectivamente;

$I_x$  e  $I_y$ : momentos de inércia relativos aos eixos x e y, respectivamente;

$L_0$ : comprimento de flambagem.

$L$ : comprimento efetivo da peça;

$K_E$ : coeficiente dado em função do modo de flambagem, conforme a Tabela 15, para este projeto considerou-se que os pilares serão biapoiados.

**Tabela 15 – Valores dos coeficientes  $K_E$ . (Fonte: ABNT NBR 7190:2022)**

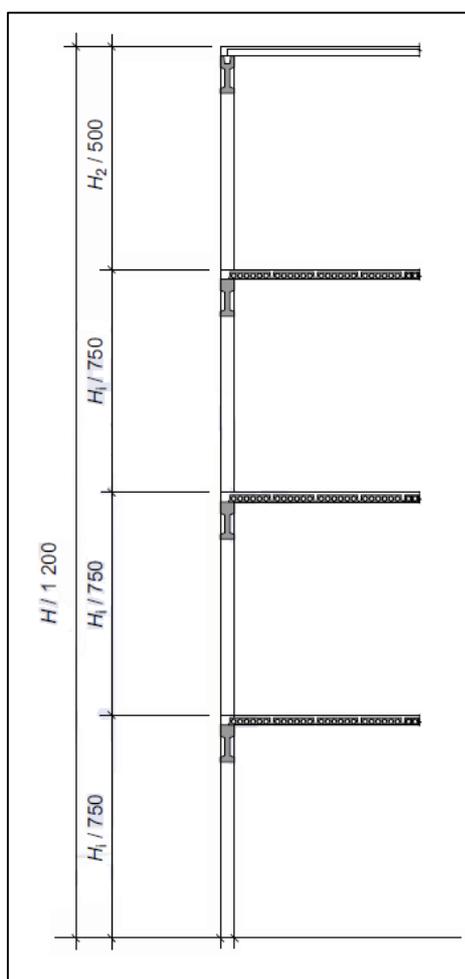
Modos de flambagem						
Valores de projeto para $K_E$	0,65	0,80	1,20	1,00	2,10	2,40
Código das condições de extremidade						
		Rotação e translação lateral impedidas, translação vertical livre	Rotação e translação vertical livres, translação lateral impedida	Rotação livre e translações impedidas	Rotação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

- **Deslocamentos excessivos**

As normas brasileiras de estruturas de madeira ainda não apresentam limites específicos para a verificação de deslocamentos horizontais em edifícios com múltiplos pavimentos. Por essa razão, tendo em vista que os deslocamentos horizontais globais máximos de edifícios com múltiplos pavimentos devem ter limites mais rigorosos que os apresentados pela norma

brasileira de estruturas de madeira, foram utilizados os valores limites indicados pela norma brasileira de estruturas de concreto pré-moldado (ABNT NBR 9062:2017).

Desse modo, os deslocamentos horizontais globais máximos admitidos para o projeto foram de  $H/1200$ ,  $H_i/750$  e  $H_2/500$ . Sendo  $H$  a altura total do edifício,  $H_i$  o desnível entre dois pisos consecutivos e  $H_2$  o desnível entre o último piso e a face inferior da laje da cobertura, conforme mostrado na Figura 52. Os deslocamentos horizontais finais da estrutura foram calculados de acordo com a Equação 15, citada anteriormente.



**Figura 52 – Limites para deslocamentos globais em edifícios com múltiplos pavimentos. (Fonte: ABNT NBR 9062, 2017)**

### 4.5.3. LAJES

Os painéis de CLT das lajes e paredes foram dimensionados de acordo com as recomendações da ABNT NBR 7190:2022 e de documentos específicos sobre o dimensionamento de painéis de CLT, tais como (CLT as structural material, 2019) da Rothoblaas e (Cross-Laminated Timber Structural Design, 2014) da pro:Holz.

Uma consideração importante para o dimensionamento de painéis de CLT é a redução de sua inércia bruta, uma vez que a contribuição das lamelas na direção transversal é tão baixa que pode ser desprezada no cálculo da inércia da seção na direção longitudinal. Assim, os estados limites últimos devem ser analisados considerando o valor da seção transversal efetiva e, além disso, o painel pode ser dimensionado como uma viga de 1 metro de largura. Enquanto os estados limites de serviço devem ser analisados por meio da seção transversal efetiva, calculada a partir do Método Gamma, considerando a deformação por cisalhamento.

Vale destacar que para o dimensionamento dos painéis de CLT foram admitidos os eixos apresentados na Figura 53, considerando a direção mais rígida do painel paralela ao eixo X e a direção menos rígida paralela ao eixo Y.

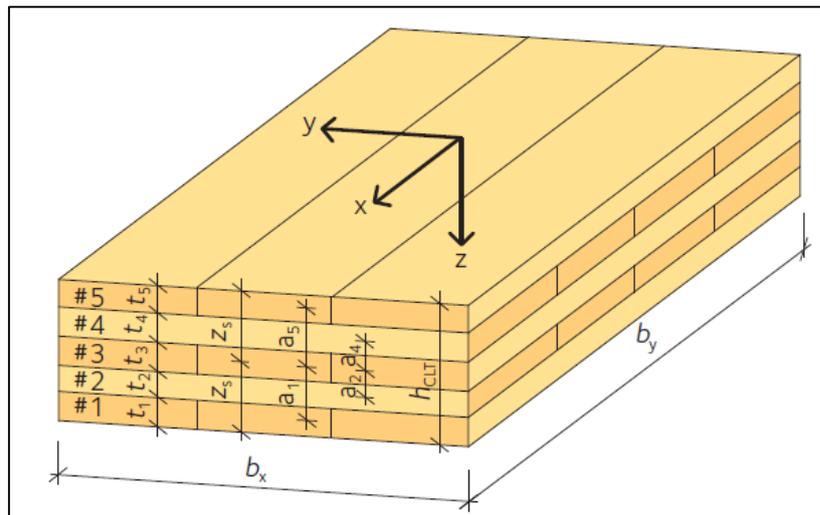


Figura 53 – Esquematização admitida para o cálculo das inércias e dimensionamento dos painéis de CLT.

(Fonte: The CLT Handbook, 2019)

Os painéis de laje foram verificados nos estados limites últimos de flexão e cisalhamento, relativos às ações fora do plano, Figura 54, e nos estados limites de serviço de vibrações e deslocamentos excessivos.

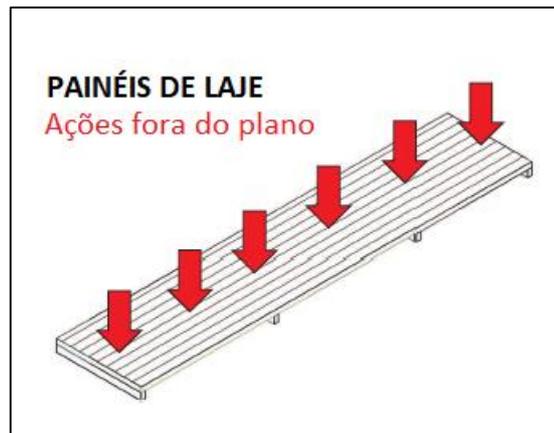


Figura 54 – Ações atuantes nos painéis de laje. (Fonte: adaptado de CLT as structural material, 2019)

- **Centro de gravidade do painel**

$$Z_{sup} = \frac{\sum_{i=1}^n \left( \frac{E_i}{E_C} \cdot b_i \cdot h_i \cdot O_i \right)}{\sum_{i=1}^n \left( \frac{E_i}{E_C} \cdot b_i \cdot h_i \right)} \quad (29)$$

Onde,

$E_i$ : módulo de elasticidade longitudinal da camada, definido conforme a Figura 55;

$E_C$ : módulo de elasticidade de referência. Para este projeto, a seção transversal dos painéis de CLT é composta apenas por camadas com o mesmo módulo de elasticidade, portanto admite-se que o módulo de elasticidade de referência  $E_C$  é igual à  $E_i$ ;

$b_i$ : largura da camada, admitida igual a 1 metro;

$h_i$ : espessura da camada;

$O_i$ : posição do centro de gravidade da camada a partir da superfície superior do painel.

- **Rigidez à flexão fora do plano**

$$K_{CLT} = \sum_{i=1}^n \left( \frac{b \cdot h_i^3}{12} \cdot E_i \right) + \sum_{i=1}^n (b \cdot h_i \cdot a_i^2 \cdot E_i) \quad (30)$$

Tal que,

$K_{CLT}$ : rigidez do painel à flexão fora do plano;

$b$ : largura do painel, igual a 1 metro para o dimensionamento no ELU;

$h_i$ : espessura da camada;

$E_i$ : módulo de elasticidade longitudinal da madeira das lamelas;

$a_i$ : distância entre o centro de gravidade da camada e o centro de gravidade do painel.

Para o cálculo da rigidez à flexão considera-se  $E_i = 0$  para as lamelas orientadas no sentido perpendicular à direção analisada, conforme apresentado na Figura 55.

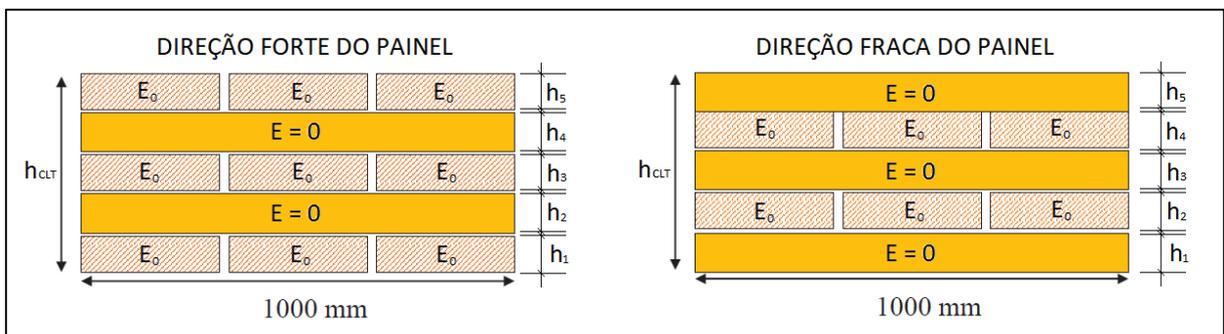


Figura 55 – Consideração do módulo de elasticidade longitudinal para cada camada do painel nas direções forte (mais rígida) e fraca (menos rígida). (Fonte: adaptado de CLT as structural material, 2019)

- **Rigidez ao cisalhamento fora do plano**

$$S_{CLT} = \kappa \cdot \sum_{i=1}^n (b \cdot h_i \cdot G_i) \quad (31)$$

Onde,

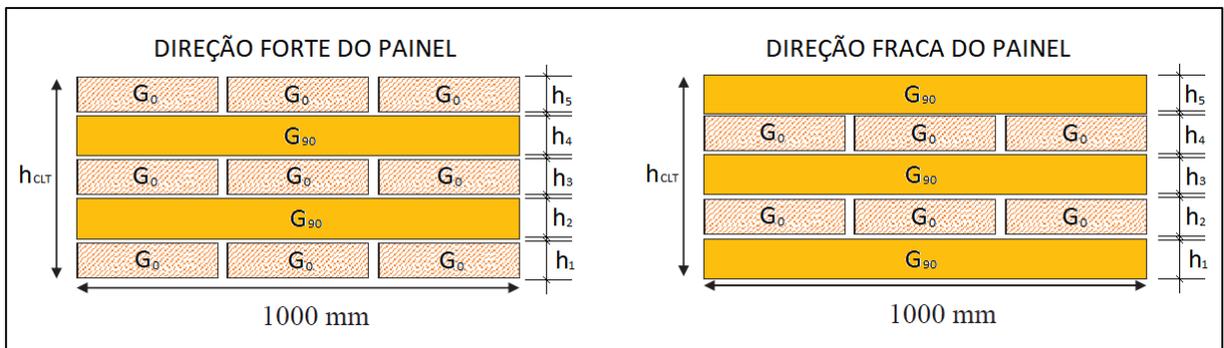
$S_{CLT}$ : rigidez do painel ao cisalhamento fora do plano;

$\kappa$ : fator de correção do cisalhamento, obtido em função do número de camadas do painel,  $\kappa = 0,24$  para painéis com 5 camadas de mesma espessura;

$b$ : largura do painel, igual a 1 metro para o dimensionamento no ELU;

$G_i$ : módulo de elasticidade transversal da madeira das lamelas.

Para o cálculo da rigidez ao cisalhamento considera-se  $G_i = G_{90}$  para as lamelas orientadas no sentido perpendicular à direção analisada, conforme apresentado na Figura 56.



**Figura 56 – Consideração do módulo de elasticidade transversal para cada camada do painel nas direções forte (mais rígida) e fraca (menos rígida). (Fonte: adaptado de CLT as structural material, 2019)**

- **Propriedades da seção transversal efetiva**

$$A_{0,liq} = \sum_{i=1}^n \left( \frac{E_i}{E_C} \cdot b \cdot h_i \right) \quad (32)$$

Sendo que,

$A_{0,liq}$ : área efetiva da seção transversal na direção analisada;

$E_i$ : módulo de elasticidade longitudinal da camada, definido conforme a Figura 55;

$E_C$ : módulo de elasticidade de referência;

$b$ : largura do painel, igual a 1 metro para o dimensionamento no ELU.

$$I_{0,liq} = \frac{K_{CLT}}{E_C} \quad (33)$$

Tal que,

$I_{0,liq}$ : momento de inércia efetivo da seção transversal na direção analisada;

$K_{CLT}$ : rigidez do painel à flexão fora do plano.

Nesse ponto é importante destacar que o software utilizado para a análise computacional dos estados limites últimos calcula automaticamente a inércia da seção transversal em função da geometria bruta do painel. Portanto, para inserir a perda de rigidez gerada pelas camadas transversais é necessário reduzir o valor do módulo de elasticidade longitudinal do painel, conforme a Equação 34.

$$E_{0,liq} = E_0 \cdot \frac{I_{0,liq}}{I_{bruto}} = E_0 \cdot \frac{I_{0,liq}}{\frac{b \cdot h_{CLT}^3}{12}} \quad (34)$$

Onde,

$b$ : largura do painel, igual a 1 metro para o dimensionamento no ELU.

Sabendo que a seção transversal dos painéis é simétrica, tem-se que a distância da borda inferior da primeira camada até o centro de gravidade do painel é igual a metade da espessura do painel, tal como a distância da borda superior da última camada até o centro de gravidade do painel. Assim, o módulo de resistência à flexão efetivo pode ser calculado pela Equação 35.

$$W_{0,liq} = \frac{I_{0,liq}}{z} \quad (35)$$

Onde,

$W_{0,liq}$ : módulo de resistência à flexão efetivo da seção transversal na direção analisada;

$z$ : distância do centro de gravidade da camada analisada para o centro de gravidade do painel;  $z_x = h_{CLT}/2$ , no topo da última camada, e  $z_y = h_3/2 + h_4$ , no topo da camada transversal.

- **Momento de inércia efetivo (Método Gamma)**

Para a determinação da inércia efetiva do painel no ELS, utiliza-se o Método Gamma, Equação 37, que consiste no cálculo da rigidez efetiva do conjunto a partir da aplicação de um fator redutor gamma ( $\gamma$ ) calculado para cada camada da seção composta. Além disso, deve-se incorporar ao cálculo do fator gamma uma parcela referente a deformação por cisalhamento, considerando o módulo de elasticidade transversal referente ao deslizamento entre as lamelas, “rolling shear”.

O fator redutor gamma ( $\gamma$ ) tem seu valor determinado em função da posição de cada lamela, sendo  $\gamma_i = 1,0$  para a camada central e para as camadas transversais à direção analisada, enquanto para as camadas longitudinais à direção analisada, tem-se o valor de gamma dado pela Equação 36.

$$\gamma_i = \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 \cdot E_i \cdot b \cdot h_i}{L_{ef}^2} \cdot \frac{h_j}{G_{R,j} \cdot b}} \quad (36)$$

Onde,

$\gamma_i$ : fator redutor da lamela;

$E_i$ : módulo de elasticidade longitudinal da camada, definido conforme a Figura 55;

$b$ : largura do painel;

$h_i$ : espessura da lamela;

$L_{ef}$ : comprimento do painel na direção analisada;

$h_j$ : espessura da lamela adjacente à lamela analisada, que provoca o deslizamento;

$G_{R,j}$ : módulo de elasticidade transversal da lamela adjacente ( $G_{R,j} = G_{90}$ ).

Uma vez que o cálculo do fator redutor gamma ( $\gamma$ ) varia de acordo com as dimensões dos painéis, buscando facilitar a modelagem computacional, optou-se por adotar para todos os painéis a menor rigidez efetiva entre as lajes e entre as paredes, sendo essa uma consideração a favor da segurança.

$$I_{0,ef} = \sum_{i=1}^n \left( \frac{b \cdot h_i^3}{12} \cdot \frac{E_i}{E_C} \right) + \sum_{i=1}^n \left( \gamma_i \cdot b \cdot h_i \cdot a_i^2 \cdot \frac{E_i}{E_C} \right) \quad (37)$$

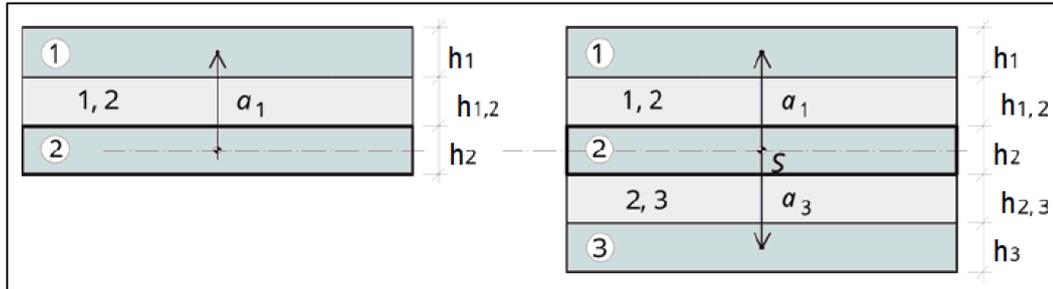


Figura 57 – Distâncias no método Gamma. (Fonte: adaptado de Cross-Laminated Timber Structural Design, 2014)

$$a_2 = \frac{\gamma_1 \cdot \frac{E_1}{E_C} \cdot b \cdot h_1 \cdot \left( \frac{h_1}{2} + h_{1,2} + \frac{h_2}{2} \right) - \gamma_3 \cdot \frac{E_3}{E_C} \cdot b \cdot h_3 \cdot \left( \frac{h_2}{2} + h_{2,3} + \frac{h_3}{2} \right)}{\sum_{i=1}^3 \left( \gamma_i \cdot \frac{E_i}{E_C} \cdot b \cdot h_i \right)} \quad (38)$$

$$a_1 = \left( \frac{h_1}{2} + h_{1,2} + \frac{h_2}{2} \right) - a_2 \quad (39)$$

$$a_3 = \left( \frac{h_2}{2} + h_{2,3} + \frac{h_3}{2} \right) - a_2 \quad (40)$$

- **Flexão fora do plano**

A verificação da tensão provocada pela flexão fora do plano dada pela Expressão 41.

$$\sigma_{m,d} = \frac{M_d}{W_{0,liq}} \leq f_{m,d} \quad (41)$$

Tal que,

$\sigma_{m,d}$ : tensão normal oriunda do momento fletor atuante no painel;

$M_d$ : momento fletor de cálculo;

$f_{m,d}$ : resistência convencional à flexão de cálculo do painel.

- **Cisalhamento fora do plano**

A verificação da tensão de cisalhamento longitudinal é dada pela Expressão 42.

$$\tau_{máx,d} = \frac{V_d \cdot S}{I_{0,liq} \cdot b} \leq f_{v0,d} \quad (42)$$

Sendo que,

$\tau_{máx,d}$ : tensão de cisalhamento máxima atuante no painel;

$V_d$ : força cortante de cálculo;

$I_{0,liq}$ : momento de inércia efetivo da seção transversal na direção analisada;

$b$ : largura do painel igual a 1 metro para o dimensionamento no ELU;

$S$ : momento estático da seção efetiva, calculado para a direção longitudinal;

$f_{v0,d}$ : resistência ao cisalhamento longitudinal de cálculo do painel.

$$S = \sum_{i=1}^{m_L} \frac{E_i}{E_C} \cdot b \cdot h_i \cdot a_i \quad (43)$$

$m_L$ : índice da camada longitudinal mais próxima do centro de gravidade do painel a partir da borda superior da seção transversal;

A verificação da tensão de cisalhamento no “rolling shear” é dada pela Expressão 44.

$$\tau_{R,máx,d} = \frac{V_d \cdot S_R}{I_{0,liq} \cdot b} \leq f_{v,R,d} \quad (44)$$

Onde,

$\tau_{R,máx,d}$ : tensão de cisalhamento do “rolling shear”;

$S_R$ : momento estático da seção efetiva, calculado para a direção transversal;

$f_{v,R,d}$ : resistência ao cisalhamento perpendicular às fibras de cálculo do painel.

$$S_R = \sum_{i=1}^{m_T} \frac{E_i}{E_C} \cdot b \cdot h_i \cdot a_i \quad (45)$$

$m_T$ : índice da camada transversal mais próxima do centro de gravidade do painel a partir da borda superior da seção transversal;

- **Deslocamentos excessivos**

Para o cálculo dos deslocamentos das lajes deve-se atribuir ao modelo computacional a rigidez efetiva calculada pelo Método Gamma. Assim, tendo em vista que o software Dlubal RFEM calcula automaticamente a inércia da seção transversal, a rigidez efetiva pode ser atribuída através do módulo de elasticidade longitudinal do painel nas direções principais, calculando um módulo de elasticidade efetivo, conforme a Equação 46.

$$E_{0,ef} = E_0 \cdot \frac{I_{0,ef}}{I_{bruto}} = E_0 \cdot \frac{I_{0,ef}}{\frac{b \cdot h_{CLT}^3}{12}} \quad (46)$$

Onde,

$b$ : largura do painel.

Os deslocamentos finais das lajes devem ser calculados a partir da Equação 15, e os deslocamentos limites admitidos são os mesmos considerados para as vigas do projeto ( $L/300$ ).

- **Vibrações excessivas**

Para lajes de piso é importante que sejam analisadas as vibrações geradas pela estrutura, buscando evitar níveis de vibrações que tragam desconforto aos usuários. Visto isso, de acordo com a ABNT NBR 7190:2022, para pisos sobre os quais as pessoas andem regularmente, como os de edifícios residenciais, a menor frequência natural de vibração dos painéis de laje não deve ser inferior a 8 Hz, tal que a frequência natural de vibração pode ser calculada pela Equação 47.

$$f_1 = \frac{\pi}{2 \cdot L^2} \cdot \sqrt{\frac{(EI)_L}{m}} \quad (47)$$

Onde,

$f_1$ : frequência natural de vibração [Hz];

$L$ : vão da laje [m];

$(EI)_L$ : rigidez à flexão equivalente da laje na direção longitudinal [N.m<sup>2</sup>/m], ou seja, igual a  $K_{CLT}$  calculada para o eixo X;

$m$ : massa da laje por metro [kg/m], pode ser calculada multiplicando a densidade do painel por sua área de seção transversal (espessura da laje x largura).

#### 4.5.4. PAREDES

As definições gerais de dimensionamento de painéis de CLT citadas no item 4.2.3 também servem para as paredes. Sendo assim, devem ser calculadas às rigidezes dos painéis à flexão e ao cisalhamento, bem como as propriedades da seção efetiva, com base nos equacionamentos apresentados no item 4.2.3.

Os painéis de parede foram verificados nos estados limites últimos de flexão, cisalhamento, tração, compressão, instabilidade lateral e flexocompressão, relativos às ações dentro e fora do plano, Figura 58. Vale destacar que as verificações para as ações fora do plano já foram descritas no item 4.5.3.

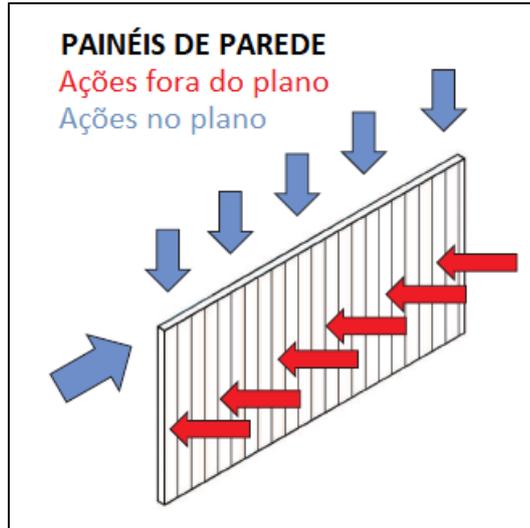


Figura 58 – Ações atuantes nos painéis de parede. (Fonte: adaptado de CLT as structural material, 2019)

- **Tração no plano**

$$\sigma_{t0,d} = \frac{N_{t,d}}{A_{0,x,liq}} \leq f_{t0,d} \quad (48)$$

Sendo que,

$\sigma_{t0,d}$ : tensão normal de tração máxima atuante no painel;

$N_{t,d}$ : força normal de tração de cálculo;

$A_{0,x,liq}$ : área efetiva da seção transversal na direção paralela ao eixo X;

$f_{t0,d}$ : resistência à tração paralela às fibras de cálculo do painel.

- **Compressão e instabilidade lateral**

A tensão de compressão pode ser calculada pela Equação 49, enquanto a instabilidade lateral pode ser verificada pela Expressão 50.

$$\sigma_{c0,d} = \frac{N_{c,d}}{A_{0,liq}} \quad (49)$$

Onde,

$\sigma_{c0,d}$ : tensão normal de compressão máxima atuante no painel;

$N_{c,d}$ : força normal de compressão de cálculo;

$A_{0,liq}$ : área efetiva da seção transversal na direção analisada;

$$\frac{\sigma_{c0,d}}{k_{cx}} \leq f_{c0,d} \quad (50)$$

Sendo que,

$f_{c0,d}$ : resistência à compressão paralela às fibras de cálculo do painel;

$$k_{cx} = \frac{1}{k_x + \sqrt{k_x^2 + \lambda_{rel,x}^2}} \quad (51)$$

$$k_x = 0,5 \cdot \left( 1 + 0,1 \cdot (\lambda_{rel,x} - 0,3) + \lambda_{rel,x}^2 \right) \quad (52)$$

$$\lambda_{rel,x} = \sqrt{\frac{A_{0,x,liq} \cdot f_{c0,k}}{N_{cr}}} \quad (53)$$

$$N_{cr} = \frac{K_{CLT,x} \cdot \pi^2}{L_0^2 \cdot \left( 1 + \frac{K_{CLT,x}}{S_{CLT,x} \cdot L_0^2} \right)} \quad (54)$$

$\lambda_{rel,x}$ : esbeltez relativa da parede no eixo X;

$N_{cr}$ : força crítica de flambagem;

$f_{c0,k}$ : resistência à compressão paralela às fibras característica do painel;

$K_{CLT,x}$ : rigidez do painel à flexão fora do plano para a direção X;

$S_{CLT,x}$ : rigidez do painel ao cisalhamento fora do plano para a direção X;

$L_0$ : altura da parede.

- **Flexocompressão**

A verificação da flexocompressão é dada pela combinação da instabilidade lateral com a flexão, sendo assim a solicitação mais crítica. Desse modo, para que sejam atendidos os estados limites últimos de compressão e instabilidade lateral, basta que a verificação da flexocompressão seja atendida.

$$\frac{\sigma_{c0,d}}{k_{cx} \cdot f_{c0,d}} + \frac{\sigma_{m,d}}{f_{m,d}} \leq 1 \quad (55)$$

A tensão de flexão deve ser calculada de acordo com o equacionamento apresentado no item 4.2.3.

- **Cisalhamento no plano**

A verificação da tensão transversal máxima no final da seção das fibras do painel gerada pelo cisalhamento no plano, representada pela Figura 59, é dada pela Expressão 56.

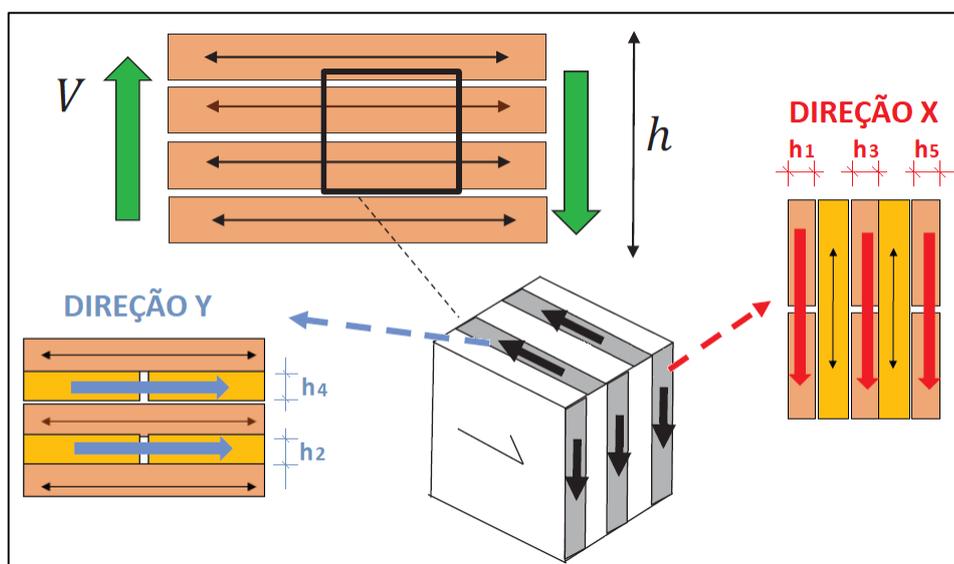


Figura 59 – Cisalhamento no plano, tensão cisalhante nas bordas do painel. (Fonte: adaptado de CLT as structural material, 2019)

$$\tau_{y,d} = \frac{v}{\sum h_{i,y}} \leq f_{v,d} \quad (56)$$

Tal que,

$h_{i,y}$ : espessura das lamelas longitudinais à direção Y;

$v$ : esforço cisalhante dado pela Equação 57, onde  $h$  é igual a 100 cm.

$$v = 1,5 \cdot \frac{V_d}{h} \quad (57)$$

#### 4.5.5. LIGAÇÕES

O dimensionamento das ligações foi feito a partir dos tipos de conexão adotados para cada elemento estrutural, descritos no item 4.2. Para tal, as propriedades de resistência e as dimensões comerciais dos conectores metálicos foram obtidas por meio do catálogo técnico da fabricante Rothoblaas e das recomendações presentes na ABNT NBR 7190:2022.

Assim, de acordo com o catálogo da Rothoblaas, os parafusos de alta resistência adotados para o projeto (HBS, SBD, VGZ, LBS, VGS) possuem resistência à ruptura ( $f_{u,k}$ ) igual a 1000 MPa. As barras roscadas utilizadas nos pilares foram consideradas de aço A307 com tensão de escoamento ( $f_{y,k}$ ) igual a 250 MPa e tensão de ruptura ( $f_{u,k}$ ) igual a 415 MPa, de acordo com a Tabela 13 da ABNT NBR 7190:2022.

A fim de direcionar o estudo deste trabalho para pontos específicos, nem todas as conexões citadas serão dimensionadas. Dessa forma, as ligações cujo dimensionamento será abordado neste projeto são: pilar-térreo; pilar-pilar; viga-pilar; viga-viga; viga principal da escada; laje-viga; parede-laje. Vale destacar ainda que, por simplificação, o dimensionamento dos parafusos será feito visando a padronização dos conectores, ou seja, as ligações serão dimensionadas para o elemento mais crítico e replicadas para os demais.

#### 4.5.5.1. Dimensionamento dos parafusos

O dimensionamento dos parafusos foi feito com base nas recomendações da ABNT NBR 7190:2022 para ligações por pinos metálicos. Assim, a condição de segurança para os estados limites últimos é garantida quando a Expressão 58 é satisfeita.

$$S_d \leq R_d \quad (58)$$

Onde,

$S_d$ : valor de cálculo dos esforços solicitantes;

$R_d$ : valor de cálculo da resistência da ligação, dado pela Equação 59.

$$R_d = k_{mod} \cdot \frac{R_k}{\gamma_{lig}} \quad (59)$$

Tal que,

$k_{mod}$ : coeficiente de modificação da madeira;

$\gamma_{lig}$ : coeficiente de minoração das propriedades de resistência da ligação igual a 1,4;

$R_k$ : valor característico da resistência da ligação.

- **Parafusos solicitados ao corte**

Para a situação em que o parafuso for solicitado ao corte, o valor característico da resistência da ligação deve ser calculado pela Equação 60.

$$R_k = F_{v,Rk} \cdot n_{sp} \cdot n_{ef} \quad (60)$$

Sendo,

$F_{v,Rk}$ : resistência característica de um pino, correspondente a uma dada seção de corte, determinada a partir dos modos de falha;

$n_{sp}$ : número de seções de corte de um pino metálico;

$n_{ef}$ : número total de pinos metálicos da ligação.

De acordo com a ABNT NBR 7190:2022, o estado limite último da ligação pode ser atingido por deficiência de resistência da madeira da peça estrutural ou do elemento metálico de ligação. Dessa forma, a resistência da ligação deve ser calculada em função da resistência de embutimento da madeira e do momento resistente do pino metálico, dados pelas Equações 61 e 64, respectivamente.

$$f_{e\alpha,k} = \frac{f_{e0,k}}{k_{90} \cdot \text{sen}^2(\alpha) + \text{cos}^2(\alpha)} \quad (61)$$

Onde,

$f_{e\alpha,k}$ : valor característico da resistência ao embutimento à  $\alpha$  graus das fibras [N/mm<sup>2</sup>];

$f_{e0,k}$ : valor característico da resistência ao embutimento paralelo às fibras, dado pela Equação 62 em [N/mm<sup>2</sup>];

$\alpha$ : ângulo entre a força e a direção das fibras;

$k_{90}$ : coeficiente determinado em função do tipo de madeira e do diâmetro do pino metálico, calculado pela Equação 63 para madeiras de coníferas.

$$f_{e0,k} = 0,082 \cdot (1 - 0,01 \cdot d) \cdot \rho_k \quad (62)$$

$$k_{90} = 1,35 + 0,015 \cdot d \quad (63)$$

Tal que,

$\rho_k$ : densidade característica da madeira [kg/m<sup>3</sup>];

$d$ : diâmetro efetivo do pino metálico [mm].

$$M_{yR,k} = 0,3 \cdot f_{u,k} \cdot d^{2,6} \quad (64)$$

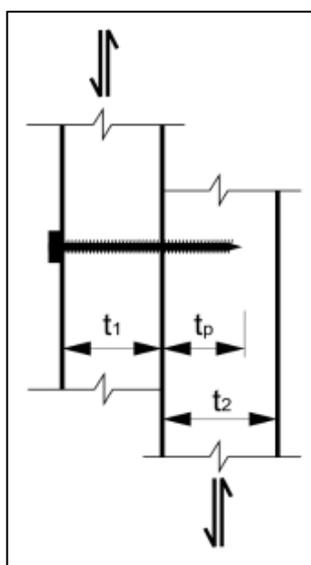
Sendo,

$M_{yR,k}$ : momento resistente característico do pino metálico [N.mm];

$f_{u,k}$ : resistência última característica a tração do aço do pino metálico [MPa].

- **Resistência característica de um pino metálico de uma ligação entre elementos de madeira**

A resistência característica de uma seção de corte de um pino metálico ( $F_{v,Rk}$ ) para a situação ilustrada na Figura 60 deve ser determinada a partir do menor valor obtido pelas equações indicadas na Tabela 16 para os diferentes modos de falha.



**Figura 60 – Configuração de ligações de elementos de madeira com parafusos de rosca soberba em corte simples. (Fonte: ABNT NBR 7190:2022)**

**Tabela 16 – Modos de falha e equações para ligações de elementos de madeira com pinos metálicos e corte simples. (Fonte: ABNT NBR 7190:2022)**

Modo de falha	Força característica calculada por plano de corte e por pino utilizado
(Ia)	$F_{v,Rk1} = f_{e1,k} t_1 d$
(Ib)	$F_{v,Rk2} = f_{e1,k} t_2 d \beta$
(Ic)	$F_{v,Rk3} = \frac{f_{e1,k} t_1 d}{1 + \beta} \left[ \sqrt{\beta + 2\beta^2 \left[ 1 + \frac{t_2}{t_1} + \left( \frac{t_2}{t_1} \right)^2 \right]} + \beta^3 \left( \frac{t_2}{t_1} \right)^2 - \beta \left( 1 + \frac{t_2}{t_1} \right) \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$
(IIa)	$F_{v,Rk4} = 1,05 \frac{f_{e1,k} t_1 d}{2 + \beta} \left[ \sqrt{2\beta(1 + \beta) + \frac{4\beta(2 + \beta)M_{y,k}}{f_{e1,k} d t_1^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$
(IIb)	$F_{v,Rk5} = 1,05 \frac{f_{e1,k} t_2 d}{1 + 2\beta} \left[ \sqrt{2\beta^2(1 + \beta) + \frac{4\beta(1 + 2\beta)M_{y,k}}{f_{e1,k} d t_2^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$
(III)	$F_{v,Rk6} = 1,15 \sqrt{\frac{2\beta}{1 + \beta}} \sqrt{2 M_{y,k} f_{e1,k} d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$
<b><math>F_{v,Rk}</math> é o menor valor dentre os resultados dos seis modos de falha.</b>	

Tal que,

$f_{e1,k}$ : resistência de embutimento do elemento de madeira 1 [N/mm<sup>2</sup>];

$f_{e2,k}$ : resistência de embutimento do elemento de madeira 2 [N/mm<sup>2</sup>];

$t_1$ : espessura do elemento de madeira 1 [mm], conforme apresentado na Figura 60;

$t_2$ : profundidade de penetração do parafuso no elemento de madeira 2 [mm], corresponde ao comprimento  $t_p$  da Figura 60;

$d$ : diâmetro efetivo do pino metálico [mm];

$M_{yR,k}$ : momento resistente característico do pino metálico [N.mm];

$F_{ax,Rk}/4$ : contribuição do efeito de confinamento provocada pela compressão das arruelas nas laterais externas da ligação, ou pela resistência ao arrancamento [N];

$\beta$ : razão entre as resistências de embutimento das peças de madeira interligadas, conforme a Equação 65.

$$\beta = \frac{f_{e2,k}}{f_{e1,k}} \quad (65)$$

O efeito de confinamento dos parafusos adotados para o projeto ( $F_{ax,Rk}/4$ ) será desconsiderado do cálculo, sendo essa uma consideração a favor da segurança, devido à ausência de ensaios experimentais que comprovem este fenômeno para o caso estudado.

○ **Resistência característica de um pino metálico de uma ligação entre elementos de madeira e aço**

A resistência característica de uma seção de corte de um pino metálico ( $F_{v,Rk}$ ) para as situações ilustradas na Figura 61 deve ser determinada a partir do menor valor obtido pelas equações indicadas na Tabela 17, para corte simples, e na Tabela 18, para chapa metálica central com corte duplo, considerando os diferentes modos de falha. Para tal, segundo a ABNT NBR 7190:2022, as ligações em madeira realizadas com chapas de aço possuem modos de falha caracterizados pela espessura  $t_s$  da chapa metálica, sendo dividida em dois grupos: as chapas finas, cuja espessura é menor ou igual a metade do diâmetro do pino metálico da ligação; e as chapas grossas, cuja espessura é maior ou igual ao diâmetro do pino e/ou o diâmetro de pré-furação é menor ou igual a 1,2 vezes o diâmetro do pino. Ademais, para chapas intermediárias, com espessura compreendida entre os limites estabelecidos, a resistência característica da ligação deve ser obtida através da interpolação linear dos valores resultantes para chapas finas e grossas. Por fim, deve-se destacar que a espessura mínima permitida por norma para as chapas metálicas das ligações é de 6 mm.

Além disso, tal como para as ligações entre elementos de madeira o efeito de confinamento dos parafusos foi desprezado dos cálculos pela mesma justificativa dada anteriormente.

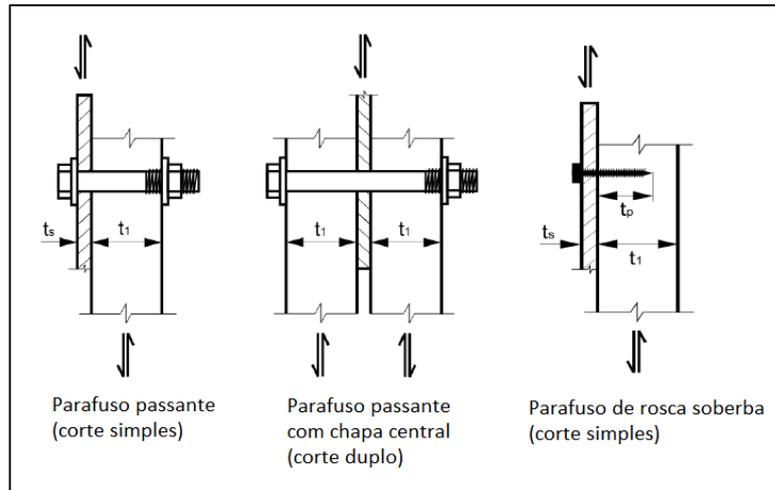


Figura 61 – Configurações de ligações de elementos de madeira e aço com pinos metálicos. (Fonte: adaptado da ABNT NBR 7190:2022)

Tabela 17 – Modos de falha e equações para ligações de elementos de madeira e aço com pinos metálicos e corte simples. (Fonte: ABNT NBR 7190:2022)

chapas finas em corte simples		chapas grossas em corte simples	
<p>— Para ligações com chapas finas em corte simples</p>			
<b>Modo de falha</b>	<b>Força característica calculada por plano de corte e por pino utilizado</b>		
(a)	$F_{v,Rk} = 0,4 \cdot f_{e1,k} \cdot t_1 \cdot d$		
(b)	$F_{v,Rk} = 1,15 \cdot \left[ \sqrt{2 \cdot M_{y,Rk} \cdot f_{e1,k} \cdot d} \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$		
<b><math>F_{v,Rk}</math> é o menor valor dentre os resultados dos quatro modos de falha.</b>			
<p>— Para ligações com chapas grossas em corte simples</p>			
<b>Modo de falha</b>	<b>Força característica calculada por plano de corte e por pino utilizado</b>		
(c)	$F_{v,Rk} = f_{e1,k} \cdot t_1 \cdot d$		
(d)	$F_{v,Rk} = f_{e1,k} \cdot t_1 \cdot d \left[ \sqrt{2 + \frac{4 \cdot M_{y,Rk}}{f_{e1,k} \cdot d \cdot t_1^2} - 1} \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$		
(e)	$F_{v,Rk} = 2,3 \cdot \left[ \sqrt{M_{y,Rk} \cdot f_{e1,k} \cdot d} \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$		
<b><math>F_{v,Rk}</math> é o menor valor dentre os resultados dos quatro modos de falha.</b>			

**Tabela 18 – Modos de falha e equações para ligações de elementos de madeira e aço com pinos metálicos, chapa metálica central e corte duplo. (Fonte: ABNT NBR 7190:2022)**

chapa metálica central de qualquer espessura, em dupla seção de corte:

Modo de falha	Força característica calculada por plano de corte e por pino utilizado
(f)	$F_{v,Rk} = f_{e1,k} \cdot t_1 \cdot d$
(g)	$F_{v,Rk} = f_{e1,k} \cdot t_1 \cdot d \left[ \sqrt{2 + \frac{4 \cdot M_{y,Rk}}{f_{e1,k} \cdot d \cdot t_1^2} - 1} \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$
(h)	$F_{v,Rk} = 2,3 \cdot \left[ \sqrt{M_{y,Rk} \cdot f_{e1,k} \cdot d} \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$

$F_{v,Rk}$  é o menor valor dentre os resultados dos quatro modos de falha.

- **Parafusos solicitados à tração**

Para a situação em que o parafuso for solicitado à tração, ou seja ao arrancamento, o valor característico da resistência da ligação deve ser calculado pela Equação 66, que considera a resistência ao cisalhamento da madeira, elemento frágil da ligação, a partir da área de contato entre a madeira e a parte roscada do parafuso.

$$R_k = f_{v0,k} \cdot L_{rosca} \cdot \pi \cdot d \cdot n_{ef} \quad (66)$$

Sendo,

$f_{v0,k}$ : resistência ao cisalhamento característico da madeira;

$L_{rosca}$ : comprimento roscado do parafuso;

$d$ : diâmetro do parafuso;

$n_{ef}$ : número efetivo de parafusos na ligação.

#### 4.5.5.2. Dimensionamento dos ancorantes

O dimensionamento dos ancorantes parafusáveis SKR foi feito com base nas recomendações do catálogo técnico da Rothoblaas, uma vez que essa é uma ligação aço-concreto que foge do equacionamento proposto pela norma de madeira. Assim, a condição de segurança para os estados limites últimos é garantida quando a Expressão 67 é satisfeita.

$$S_d \leq \frac{R_k}{\gamma_M} \quad (67)$$

Onde,

$S_d$ : valor de cálculo dos esforços solicitantes obtidos para a combinação última;

$R_k$ : valor característico da força resistente do ancorante, obtida por meio de tabelas presentes no catálogo da fabricante em função do diâmetro do conector e do grau de fissuração do concreto;

$\gamma_M$ : fator de segurança obtido por meio de tabelas presentes no catálogo da fabricante, dado em função do modo de ruptura.

Para o dimensionamento dos ancorantes considerou-se a situação crítica, com o concreto da laje do pavimento térreo fissurada, e classe de resistência do concreto igual a C25.

#### 4.5.5.3. Rigidez das ligações

Para a elaboração do modelo estrutural, é essencial que as ligações sejam definidas como rotuladas, rígidas ou semirrígidas. Visto isso, de acordo com as recomendações presentes na ABNT NBR 7190:2022, na ausência de ensaios experimentais, a rigidez axial das ligações do projeto foi estimada a partir da Equação 68, válida apenas para parafusos instalados perpendicularmente às seções de corte.

$$K_{ser} = \rho_{med}^{1,5} \cdot \frac{d}{23} \quad (68)$$

Sendo,

$K_{ser}$ : rigidez de serviço de uma seção de corte de um pino metálico [N/mm];

$\rho_{med}$ : densidade específica média [kg/m<sup>3</sup>];

$d$ : diâmetro efetivo do pino metálico [mm].

A norma cita ainda que a rigidez de serviço  $K_{ser}$  deve ser utilizada para a verificação dos estados limites de serviço e, para os estados limites últimos deve-se utilizar a rigidez última  $K_u$ , calculada pela Equação 69.

$$K_u = \frac{2}{3} \cdot K_{ser} \quad (69)$$

Além disso, a norma recomenda que, para ligações em elementos de madeira e aço, pode-se considerar a rigidez com valor igual ao dobro do calculado, utilizando a Equação 68 e considerando  $\rho_{med}$  igual a densidade do elemento de madeira.

A determinação da rigidez rotacional da ligação, segundo (RACHER, 1995), pode ser feita através da Equação 70, que leva em consideração a rigidez e distância de cada parafuso ao centro da ligação.

$$K_{r,ser} = \sum_{i=1}^n K_{ser,i} \cdot r_i^2 \quad (70)$$

Onde,

$r_i$ : distância do centro do pino ao centro de rotação da peça.

Dessa forma, conhecendo a configuração das ligações, ou seja, quantidade, diâmetro e disposição dos parafusos, é possível calcular a rigidez conforme as Equações 71 e 72, para o deslocamento e o giro, respectivamente.

$$\mu = K_i \cdot n_{sp} \cdot n_{ef} \quad (71)$$

$$\varphi = \sum_{i=1}^n (K_i \cdot r_i^2) \cdot n_{sp} \cdot n_{ef} \quad (72)$$

Tal que,

$\mu$ : rigidez axial da ligação;

$K_i$ : rigidez de serviço ou última correspondente a um pino metálico para uma seção de corte. Em caso de ligações em elementos de madeira e aço, considerar  $2 \cdot K_i$ ;

$n_{sp}$ : número de seções de corte de um pino metálico;

$n_{ef}$ : número total de pinos metálicos da ligação;

$\varphi$ : rigidez rotacional da ligação.

#### 4.5.5.4. *Espaçamentos entre elementos de ligação*

Os espaçamentos mínimos recomendados pela ABNT NBR 7190:2022 para ligações com parafusos estão apresentados na Tabela 19 e na Figura 62. Vale destacar os parafusos de rosca soberba devem ser instalados com pré-furação de aproximadamente 70% do diâmetro do parafuso, enquanto a pré-furação adotada para os parafusos passantes coincide com o diâmetro da barra roscada utilizada para a ligação.

Tabela 19 – Espaçamentos mínimos para ligações com parafusos. (Fonte: ABNT NBR 7190:2022)

Espaçamento ou distância	Ângulo $\alpha$	Parafusos passantes, parafusos de rosca soberba e parafusos ajustados
Espaçamento $a_1$ (paralelo às fibras)	$0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$	$(4 +  \cos \alpha ) \cdot d$
Espaçamento $a_2$ (perpendicular às fibras)	$0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$	4.d
Distância $a_{3,t}$ (extremidade carregada)	$-90^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$	Maior entre 7.d e 80 mm
Distância $a_{3,c}$ (extremidade não carregada)	$90^\circ \leq \alpha < 150^\circ$	$(1 + 6 \cdot \sin \alpha) \cdot d$
	$150^\circ \leq \alpha < 210^\circ$	4.d
	$210^\circ \leq \alpha \leq 270^\circ$	$(1 + 6 \cdot  \sin \alpha ) \cdot d$
Distância $a_{4,t}$ (borda lateral carregada)	$0^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$	Maior entre $(2 + 2 \cdot \sin \alpha) \cdot d$ e 3.d
Distância $a_{4,c}$ (borda lateral não carregada)	$180^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$	3.d

Sendo que,

$d$ : diâmetro do parafuso;

$\alpha$ : ângulo entre a força e a direção das fibras;

$a_1$ : espaçamento entre os centros de dois pinos situados em uma mesma linha paralela à direção das fibras;

$a_2$ : espaçamento entre os centros de dois pinos situados em duas linhas perpendiculares à direção das fibras;

$a_{3,c}$ : distância do centro do pino à extremidade não carregada da peça;

$a_{3,t}$ : distância do centro do pino à extremidade carregada da peça;

$a_{4,c}$ : distância do centro do pino à borda lateral não carregada da peça;

$a_{4,t}$ : distância do centro do pino à borda lateral carregada da peça.

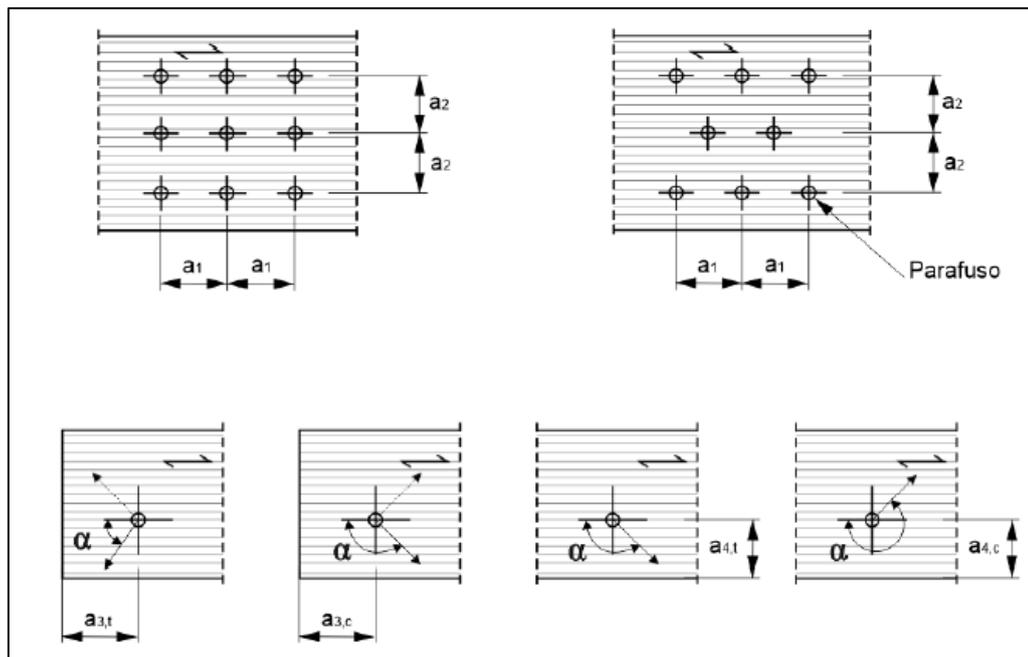


Figura 62 – Espaçamentos em ligações com pinos metálicos. (Fonte: ABNT NBR 7190:2022)

O espaçamento mínimo entre o parafuso e a borda da chapa metálica recomendado pelo catálogo de chapas e conectores da fabricante Rothoblaas é de  $1,2x d_0$ , sendo que  $d_0$  corresponde ao diâmetro do furo.

#### 4.5.6. SEGURANÇA CONTRA INCÊNDIO

Para garantir a estabilidade da estrutura em caso de incêndio optou-se pela utilização de elementos estruturais com seções transversais mais robustas, admitindo, assim, a redução da seção transversal devido à carbonização da madeira e a consequente perda das propriedades mecânicas. A verificação da capacidade resistente considerando essa perda foi feita por meio do método simplificado da seção reduzida, conforme as recomendações da ABNT NBR 7190:2022.

A segurança da estrutura nos estados limites de incêndio é garantida caso a condição apresentada pela Expressão 73 seja atendida. Vale destacar que a verificação dos estados limites de serviço em incêndio não é necessária, cabendo apenas a verificação dos estados limites últimos de cada elemento, conforme os equacionamentos apresentados ao longo do item 4.5.

$$S_{fi,d} \leq R_{fi,d} \quad (73)$$

Sendo que,

$S_{fi,d}$ : corresponde aos esforços solicitantes de cálculo na situação de incêndio, obtidos a partir das combinações últimas excepcionais de ações definidas na ABNT NBR 8681, ou podem ser calculados admitindo-os iguais a 60% das solicitações de cálculo em situação normal,  $S_{fi,d} = 0,6 \cdot S_d$ ;

$R_{fi,d}$ : corresponde aos esforços resistentes de cálculo na situação de incêndio, calculados de acordo com a Equação 74.

$$R_{fi,d} = k_{mod,fi} \cdot \frac{R_{0,2}}{\gamma_{w,fi}} \quad (74)$$

Onde,

$k_{mod,fi}$ : é igual a 1,0 e inclui os efeitos da redução de resistência e rigidez da madeira;

$\gamma_{w,fi}$ : é igual a 1,0;

$R_{0,2}$ : deve ser calculado pelos critérios estabelecidos pela ABNT NBR 7190:2022 referentes ao dimensionamento em temperatura normal, desde que a área resistente seja adequadamente reduzida e as propriedades mecânicas substituídas por aquelas referentes ao quantil de 20%, conforme as Equações 75 e 76.

$$f_{0,2} = k_{fi} \cdot f_k \quad (75)$$

$$E_{0,2} = k_{fi} \cdot E_{0,05} \quad (76)$$

Tal que,

$k_{fi}$ : coeficiente dado pela Tabela 21 da ABNT NBR 7190:2022, igual a 1,15 para madeira lamelada colada e madeira lamelada colada cruzada.

O cálculo da seção transversal residual da madeira deve ser feito desprezando a espessura efetiva ( $e_{ef}$ ), calculada pela Equação 77, para cada face do elemento estrutural exposta ao fogo, conforme representado na Figura 63. É válido destacar que a metodologia de cálculo da seção transversal residual adotada para este projeto abrange o dimensionamento dos painéis de CLT, levando em consideração que esses serão produzidos com adesivos estruturais resistentes ao fogo, evitando assim a possibilidade de deslocamento das lamelas de madeira.

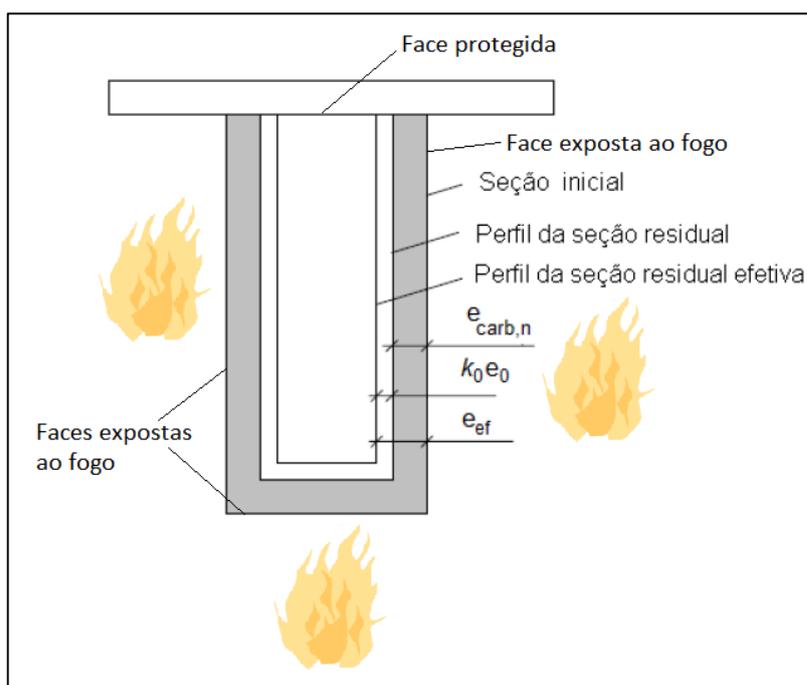


Figura 63 – Seção residual da madeira em situação de incêndio. (Fonte: adaptado de ABNT NBR 7190:2022)

$$e_{ef} = e_{carb,n} + k_0 \cdot e_0 \quad (77)$$

Onde,

$e_0$ : igual a 7 mm;

$k_0$ : coeficiente para superfícies sem proteção, seu valor é tabelado pela ABNT NBR 7190:2022 em função do tempo de exposição ao fogo, igual a 1,0 para tempos maiores que 20 minutos;

$e_{carb,n}$ : espessura carbonizada considerando o efeito do arredondamento dos cantos e fissuras, deve ser considerada constante e calculada pela Equação 78, para pilares e

vigas, enquanto para elementos planos, lajes e paredes,  $e_{carb,n}$  deve ser substituída por  $e_{carb,0}$ , calculada pela Equação 79.

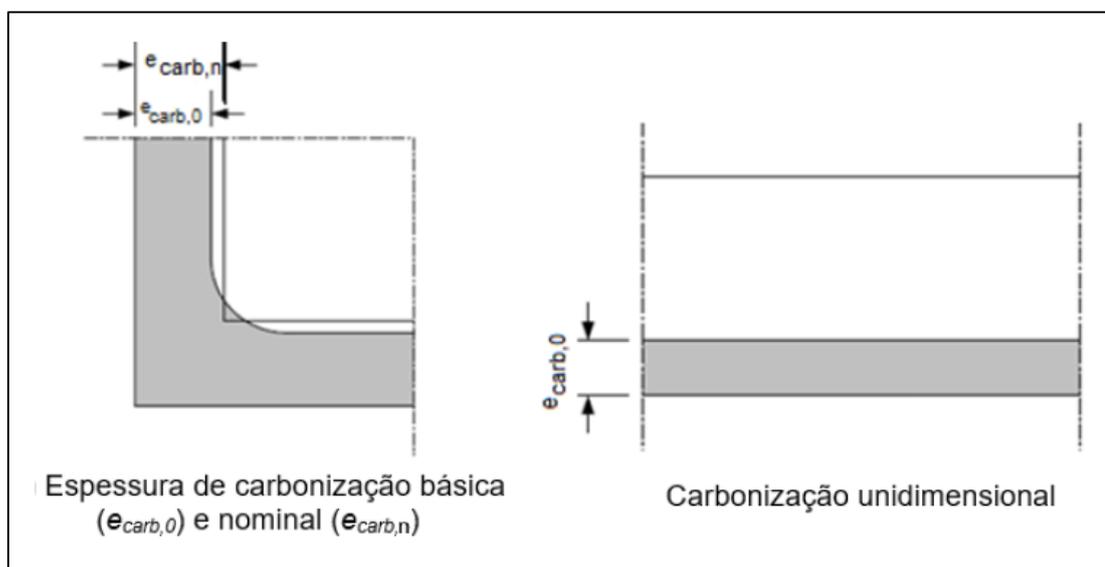
$$e_{carb,n} = \beta_n \cdot t \quad (78)$$

$$e_{carb,0} = \beta_0 \cdot t \quad (79)$$

Tal que,

t: tempo de exposição ao fogo;

$\beta_n$  e  $\beta_0$ : correspondem às taxas de carbonização da madeira para superfícies sem revestimento, obtidas a partir da Tabela 23 da ABNT NBR 7190:2022. Assim, para elementos de madeira lamelada colada e madeira lamelada colada cruzada feitos com lamelas de coníferas pode-se adotar  $\beta_n = 0,70 \text{ mm/min}$  e  $\beta_0 = 0,65 \text{ mm/min}$ .



**Figura 64 – Tipos de carbonização. (Fonte: adaptado de ABNT NBR 7190:2022)**

Para a verificação do dimensionamento dos elementos estruturais nos estados limites de incêndio, o tempo de exposição ao fogo adotado para os cálculos deve ser igual ao tempo requerido de resistência ao fogo (TRRF), que corresponde ao tempo mínimo que a estrutura

deve resistir à situação de incêndio, possibilitando a fuga dos ocupantes da edificação em condições de segurança, a segurança das operações de combate ao incêndio e a minimização dos danos causados à edificações adjacentes e à infraestrutura pública. Visto isso, o TRRF foi definido com base nas recomendações da ABNT NBR 14432:2001 a partir do uso/ocupação e altura do edifício. Desse modo, a edificação deste projeto pode ser classificada como residencial com habitações multifamiliares e altura total entre 23 metros e 30 metros, sendo assim, o TRRF exigido pela norma é de 90 minutos.

Os elementos metálicos das ligações adotadas para o projeto, quando possível, foram ocultados, evitando as faces expostas ao fogo. Porém, para os casos em que isso não foi possível, considerou-se que os conectores metálicos recebem revestimento contra fogo adequados ao TRRF do projeto.

O tempo necessário para iniciar a carbonização ( $t_{carb}$ ), de acordo com a ABNT NBR 7190:2022, corresponde ao momento em que a estrutura de madeira inicia o processo de queima, que ocorre após o colapso dos revestimentos. Assim, admitindo que alguns elementos estruturais serão encapsulados por placas de gesso do tipo A, H e F, conforme explicitado ao longo do item 4.3.1, considerou-se o cálculo de  $t_{carb}$  dado pela Equação 80. Dessa forma, para os elementos protegidos por placas de gesso o tempo de exposição ao fogo utilizado para a verificação da segurança deve ser igual ao TRRF reduzido de  $t_{carb}$ .

$$t_{carb} = 2,8 \cdot h_p - 14 \quad (80)$$

Onde,

$h_p$ : espessura da camada de gesso [mm], varia de acordo com o tipo de gesso e número de camadas:

- Uma camada de placa de gesso do tipo A, F ou H  $\rightarrow h_p$  igual a espessura da camada;
- Duas camadas de placa de gesso do tipo A ou H  $\rightarrow h_p$  igual a espessura da camada externa e 50% da espessura da camada interna;
- Duas camadas de placa de gesso do tipo F  $\rightarrow h_p$  igual a espessura da camada externa e 80% da espessura da camada interna;

$t_{carb}$ : tempo de início da carbonização [min].

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1. PROPRIEDADES DA MADEIRA

Conforme a metodologia descrita no item 4.1, determinou-se as resistências de cálculo e a rigidez efetiva da madeira para os elementos em MLC e CLT, por meio das Equações 2 e 3, respectivamente, a partir dos valores característicos apresentados na Tabela 1, para o MLC, e na Tabela 2, para o CLT, e dos coeficientes de minoração. Para tal, primeiramente, definiu-se os valores dos coeficientes de modificação parciais:

- **Coefficiente de modificação parcial devido à classe de carregamento ( $k_{mod1}$ ):**

O  $k_{mod1}$  foi adotado com o valor de 0,7, considerando a classe de carregamento de longa duração e madeira industrializada (MLC e CLT).

- **Coefficiente de modificação parcial devido à classe de umidade ( $k_{mod2}$ ):**

A classe de umidade adotada para os elementos estruturais em madeira industrializada (MLC e CLT) variou em função do grau de exposição. Sendo assim, para os pilares e vigas em madeira aparente adotou-se Classe 2, com umidade de equilíbrio igual a 15% e  $k_{mod2}$  igual a 0,9. Enquanto para os demais elementos em madeira protegidos da umidade, adotou-se Classe 1, com umidade de equilíbrio igual a 12% e  $k_{mod2}$  igual a 1,0.

- **Coefficiente de modificação parcial da madeira lamelada colada ( $k_{mod3}$ ):**

O  $k_{mod3}$  foi calculado pela Equação 1, com:  $C_e = 0,95$ , considerando a existência de emendas longitudinais nos elementos de madeira lamelada colada;  $C_c = 1,0$ , visto que todos os elementos são retos; e  $C_t = 1,0$ , sabendo que a temperatura média anual de São Carlos é inferior a 38°C e admitindo que a temperatura ambiente nos apartamentos também será inferior a este valor, considera-se que em geral os elementos estruturais não estarão submetidos a temperaturas maiores que 38°C. Portanto, adotou-se  $k_{mod3}$  igual a 0,95.

Dessa forma, multiplicando os coeficientes parciais, o coeficiente de modificação ( $k_{mod}$ ) resultou em 0,60, para peças aparentes, e 0,67, para os demais elementos. Assim, com os coeficientes de minoração citados no item 4.1 ( $\gamma_w = 1,4$ , para tensões normais, e  $\gamma_w = 1,8$ , para tensões de cisalhamento), foram obtidos os valores de cálculo apresentados na Tabela 20 para os elementos de MLC aparentes, na e na

Tabela 22 para os painéis de CLT.

**Tabela 20 – Propriedades de resistência de cálculo e rigidez efetiva dos elementos aparentes de MLC com lamelas de madeira C24.**

Coeficiente de modificação (madeira aparente)	$k_{mod}$	0,60
Resistência convencional à flexão de cálculo	$f_{m,d}$	10,26 MPa
Resistência à tração paralela às fibras de cálculo	$f_{t0,d}$	5,99 MPa
Resistência à compressão paralela às fibras de cálculo	$f_{c0,d}$	8,98 MPa
Resistência à compressão perpendicular às fibras de cálculo	$f_{c90,d}$	1,07 MPa
Resistência ao cisalhamento de cálculo	$f_{v0,d}$	1,33 MPa
Módulo de elasticidade efetivo	$E_{0,ef}$	6584 MPa

**Tabela 21 – Propriedades de resistência de cálculo e rigidez efetiva dos elementos ocultos de MLC com lamelas de madeira C24.**

Coeficiente de modificação (madeira protegida da umidade)	$k_{mod}$	0,67
Resistência convencional à flexão de cálculo	$f_{m,d}$	11,40 MPa
Resistência à tração paralela às fibras de cálculo	$f_{t0,d}$	6,65 MPa
Resistência à compressão paralela às fibras de cálculo	$f_{c0,d}$	9,98 MPa
Resistência à compressão perpendicular às fibras de cálculo	$f_{c90,d}$	1,19 MPa
Resistência ao cisalhamento de cálculo	$f_{v0,d}$	1,48 MPa
Módulo de elasticidade efetivo	$E_{0,ef}$	7315 MPa

**Tabela 22 – Propriedades de resistência de cálculo e rigidez efetiva dos painéis de CLT com lamelas de madeira C24.**

<b>Propriedades mecânicas para ações perpendiculares ao plano do painel</b>		
Resistência convencional à flexão de cálculo	$f_{m,d}$	11,40 MPa
Resistência à compressão perpendicular às fibras de cálculo	$f_{c90,d}$	1,19 MPa
Resistência ao cisalhamento perpendicular às fibras (Rolling shear) de cálculo	$f_{R,d}$	0,41 MPa
Resistência ao cisalhamento paralelo às fibras de cálculo	$f_{v0,d}$	1,29 MPa
Módulo de elasticidade longitudinal paralelo às fibras efetivo	$E_{0,ef}$	7315 MPa
<b>Propriedades mecânicas para ações no plano do painel</b>		
Resistência convencional à flexão de cálculo	$f_{m,d}$	11,40 MPa
Resistência à compressão paralelo às fibras de cálculo	$f_{c0,d}$	11,40 MPa
Resistência à tração paralela às fibras de cálculo	$f_{t0,d}$	9,12 MPa
Resistência ao cisalhamento paralelo às fibras de cálculo (5 camadas, h=20cm, a=14cm)	$f_{v,d}$	0,85 MPa
Resistência ao cisalhamento paralelo às fibras de cálculo (5 camadas, h=15cm, a=14cm)	$f_{v,d}$	1,15 MPa
Módulo de elasticidade longitudinal paralelo às fibras efetivo	$E_{0,ef}$	7315 MPa

## **5.2. MODELAGEM ESTRUTURAL COMPUTACIONAL**

### **5.2.1. PILARES DE MLC**

A modelagem computacional dos pilares partiu da inserção da seção transversal prevista para o projeto, com suas propriedades geométricas calculadas automaticamente pelo software *Dlubal RFEM*.

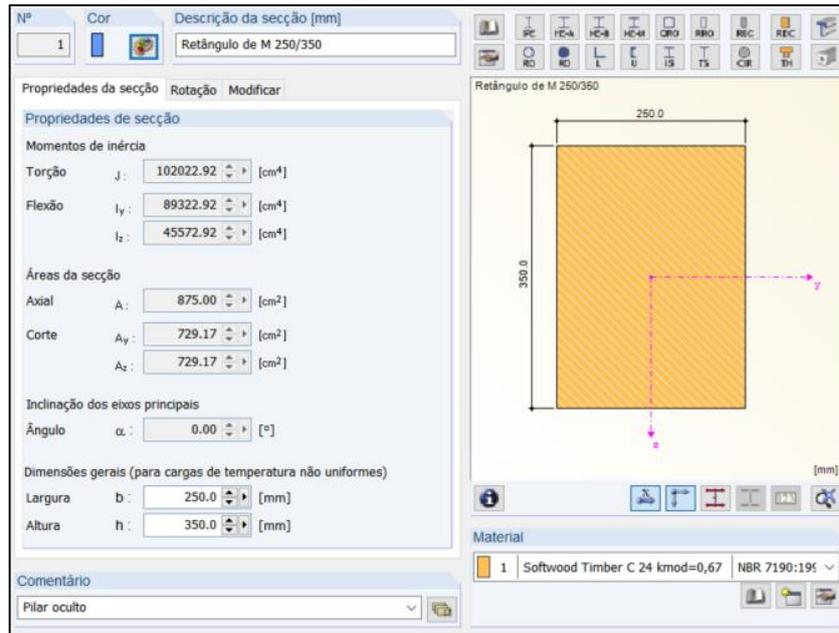


Figura 65 – Propriedades geométricas dos pilares ocultos. (Fonte: próprio autor, 2021)

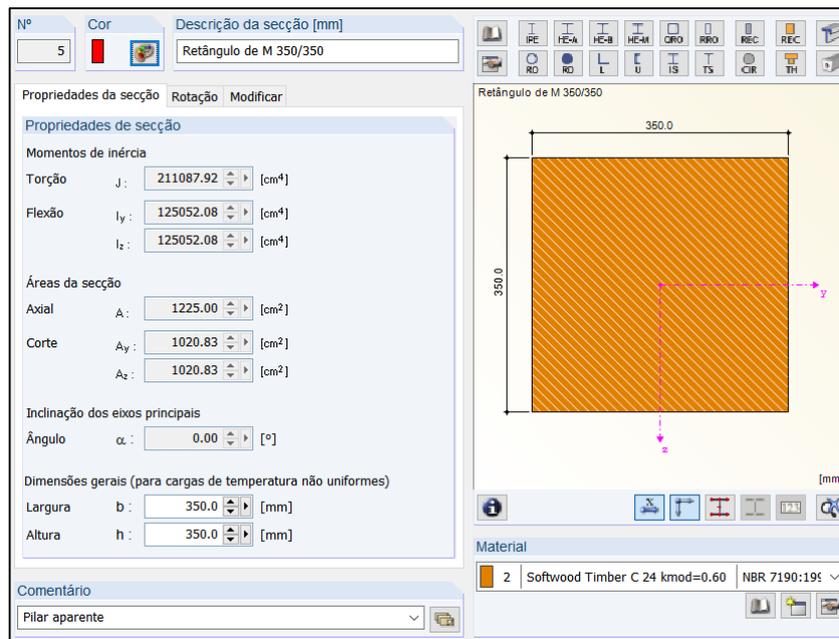


Figura 66 – Propriedades geométricas dos pilares aparentes. (Fonte: próprio autor, 2021)

Além disso, incorporou-se ao modelo as propriedades da madeira C24 dos elementos de MLC, como o módulo de elasticidade longitudinal, o módulo de elasticidade transversal e o peso específico.

Nº	Cor	Descrição
1		Softwood Timber C 24 kmod=0,67

**Constantes do material**

Módulo de elasticidade E : 731.50 [kN/cm<sup>2</sup>]

Módulo de corte G : 70.00 [kN/cm<sup>2</sup>]

Coefficiente de Poisson ν : 4.225 [-]

Peso específico γ : 4.20 [kN/m<sup>3</sup>]

Coefficiente de dilatação térmica α : 5.0000E-06 [1/°C]

Coefficiente de segurança parcial γ<sub>M</sub> : 1.00 [-]

**Modelo de material**  
Isotrópico linear elástico

**Comentário**  
MLC vigas e pilares ocultos

Figura 67 – Propriedades da madeira dos elementos de MLC ocultos para o ELU. (Fonte: próprio autor, 2021)

Nº	Cor	Descrição
2		Softwood Timber C 24

**Constantes do material**

Módulo de elasticidade E : 658.40 [kN/cm<sup>2</sup>]

Módulo de corte G : 70.00 [kN/cm<sup>2</sup>]

Coefficiente de Poisson ν : 3.703 [-]

Peso específico γ : 4.20 [kN/m<sup>3</sup>]

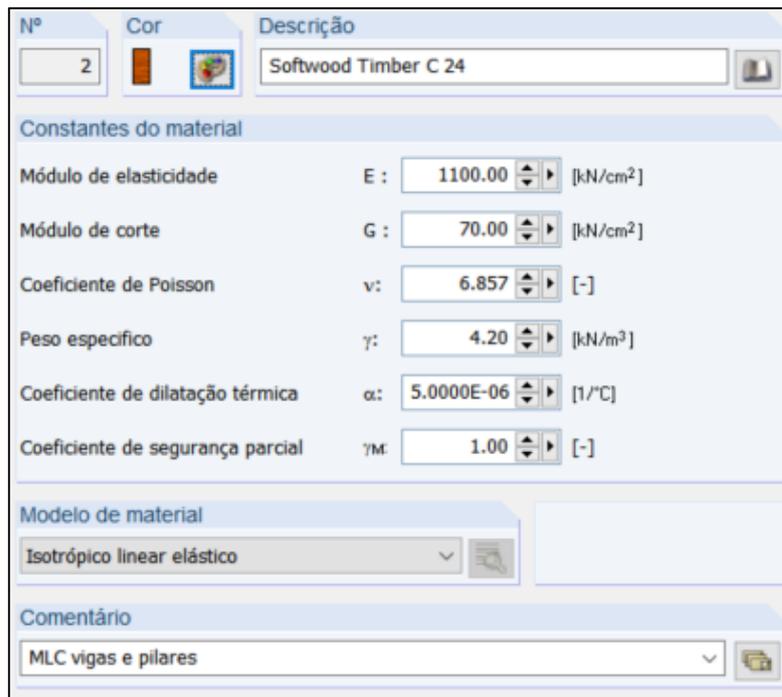
Coefficiente de dilatação térmica α : 5.0000E-06 [1/°C]

Coefficiente de segurança parcial γ<sub>M</sub> : 1.00 [-]

**Modelo de material**  
Isotrópico linear elástico

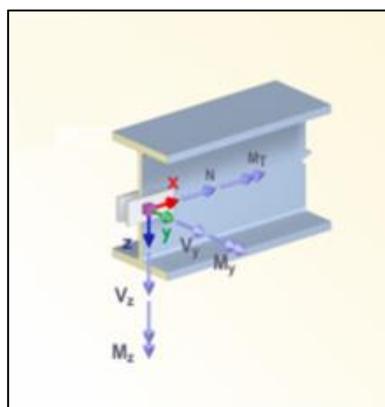
**Comentário**  
MLC vigas e pilares

Figura 68 – Propriedades da madeira dos elementos de MLC aparentes para o ELU. (Fonte: próprio autor, 2021)



**Figura 69 – Propriedades da madeira dos elementos de MLC para o ELS. (Fonte: próprio autor, 2021)**

Para a inserção no modelo, os pilares foram segmentados por pavimento, considerando a rigidez das ligações pilar-pilar e pilar-térreo calculadas no item 5.3.5.2. A Figura 71 apresenta os valores de rigidez últimos aplicados nas ligações entre os pilares dos diferentes pavimentos e na base dos pilares do térreo, para o modelo do ELU. O mesmo foi feito para o modelo do ELS, considerando a rigidez de serviço, conforme apresentado na Figura 72. É importante destacar que a rigidez das ligações foi adotada considerando o sistema de eixos locais das barras, conforme mostrado na Figura 70.



**Figura 70 – Sistema de eixos locais das barras utilizado para a inserção da rigidez das ligações. (Fonte: próprio autor, 2021)**

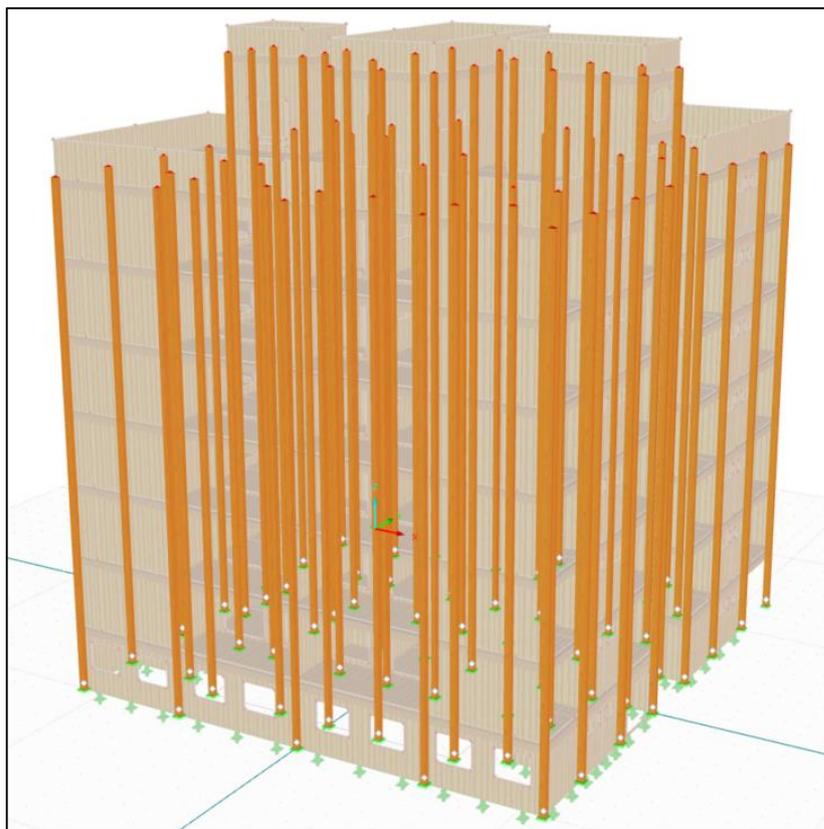
Condições de articulação	
<b>Articulação</b>	
<input type="checkbox"/> $u_x$	$C_{u_x}$ : [ ] [kN/m]
<input checked="" type="checkbox"/> $u_y$	$C_{u_y}$ : 31934.800 [kN/m]
<input checked="" type="checkbox"/> $u_z$	$C_{u_z}$ : 31934.800 [kN/m]
<b>Articulação</b>	
<input checked="" type="checkbox"/> $\varphi_x$	$C_{\varphi_x}$ : 812.400 [kNm/rad]
<input type="checkbox"/> $\varphi_y$	$C_{\varphi_y}$ : [ ] [kNm/rad]
<input type="checkbox"/> $\varphi_z$	$C_{\varphi_z}$ : [ ] [kNm/rad]

**Figura 71 – Valores de rigidez ao deslocamento e ao giro aplicados nas ligações pilar-pilar e pilar-térreo, para o ELU. (Fonte: próprio autor, 2021)**

Condições de articulação	
<b>Articulação</b>	
<input type="checkbox"/> $u_x$	$C_{u_x}$ : [ ] [kN/m]
<input checked="" type="checkbox"/> $u_y$	$C_{u_y}$ : 47902.300 [kN/m]
<input checked="" type="checkbox"/> $u_z$	$C_{u_z}$ : 47902.300 [kN/m]
<b>Articulação</b>	
<input checked="" type="checkbox"/> $\varphi_x$	$C_{\varphi_x}$ : 1218.600 [kNm/rad]
<input type="checkbox"/> $\varphi_y$	$C_{\varphi_y}$ : [ ] [kNm/rad]
<input type="checkbox"/> $\varphi_z$	$C_{\varphi_z}$ : [ ] [kNm/rad]

**Figura 72 – Valores de rigidez ao deslocamento e ao giro aplicados nas ligações pilar-pilar e pilar-térreo, para o ELS. (Fonte: próprio autor, 2021)**

Assim, os pilares foram alocados no modelo conforme a distribuição prevista nas plantas de locação, Anexos C, D e E, considerando os eixos das vigas. A altura admitida para os pilares do térreo e dos pavimentos tipos foi igual a 3,20 metros, considerando a distância de eixo a eixo entre as lajes, aplicando a semirrigidez no nó inferior e deixando o nó superior totalmente rígido. O mesmo método foi adotado para os pilares da cobertura, segmentando-os nos eixos das lajes, com altura igual a 4,20 metros.



**Figura 73 – Visão geral dos pilares modelados. (Fonte: próprio autor, 2021)**

### 5.2.2. VIGAS DE MLC

A modelagem computacional das vigas foi feita de maneira similar a dos pilares, criando primeiramente a seção transversal prevista no projeto, com suas propriedades geométricas calculadas automaticamente pelo software *Dlubal RFEM* e as propriedades da madeira sendo as mesmas aplicadas para os pilares.

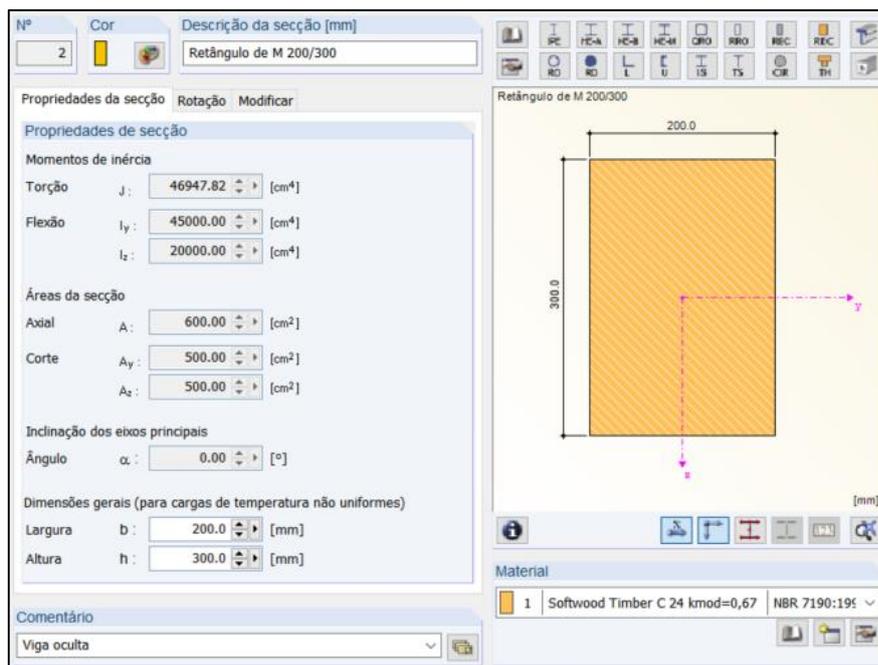


Figura 74 – Propriedades geométricas das vigas ocultas. (Fonte: próprio autor, 2021)

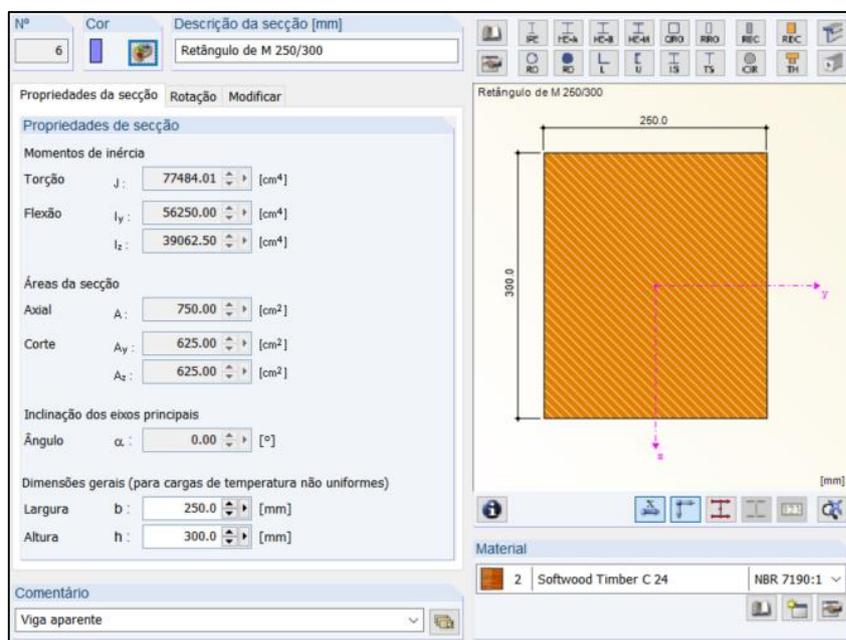


Figura 75 – Propriedades geométricas das vigas aparentes. (Fonte: próprio autor, 2021)

As vigas foram inseridas conforme a distribuição prevista nas plantas de locação, Anexos C, D e E, considerando a posição dos seus eixos, sendo posicionadas no topo dos pilares do modelo, exceto pelas vigas da casa de máquinas e das escadas, posicionadas de acordo com a altura de seus eixos, conforme apresentado nos Anexo C e E. Posteriormente, com a inserção

das lajes, aplicou-se uma excentricidade nas vigas para que essas ficassem com seu topo paralelo à base das lajes. As rigidezes das ligações viga-pilar e viga-viga foram aplicadas nos nós das vigas do modelo de acordo com o cálculo realizado no item 5.3.5.2, conforme apresentado da Figura 76, para o modelo do ELU, e na Figura 78, para o modelo do ELS.

Condições de articulação	
<b>Articulação</b>	<b>Constante da mola</b>
<input checked="" type="checkbox"/> $u_x$	$C_{u_x}$ : 37423.600 [kN/m]
<input type="checkbox"/> $u_y$	$C_{u_y}$ : [kN/m]
<input checked="" type="checkbox"/> $u_z$	$C_{u_z}$ : 37423.600 [kN/m]
<b>Articulação</b>	
<input type="checkbox"/> $\varphi_x$	$C_{\varphi_x}$ : [kNm/rad]
<input checked="" type="checkbox"/> $\varphi_y$	$C_{\varphi_y}$ : 67.400 [kNm/rad]
<input type="checkbox"/> $\varphi_z$	$C_{\varphi_z}$ : [kNm/rad]

**Figura 76 – Valores de rigidez ao deslocamento e ao giro aplicados nas ligações viga-pilar e viga-viga em vigas ocultas, para o ELU. (Fonte: próprio autor, 2021)**

Condições de articulação	
<b>Articulação</b>	<b>Constante da mola</b>
<input checked="" type="checkbox"/> $u_x$	$C_{u_x}$ : 44908.400 [kN/m]
<input type="checkbox"/> $u_y$	$C_{u_y}$ : [kN/m]
<input checked="" type="checkbox"/> $u_z$	$C_{u_z}$ : 44908.400 [kN/m]
<b>Articulação</b>	
<input type="checkbox"/> $\varphi_x$	$C_{\varphi_x}$ : [kNm/rad]
<input checked="" type="checkbox"/> $\varphi_y$	$C_{\varphi_y}$ : 117.900 [kNm/rad]
<input type="checkbox"/> $\varphi_z$	$C_{\varphi_z}$ : [kNm/rad]

**Figura 77 – Valores de rigidez ao deslocamento e ao giro aplicados nas ligações viga-pilar e viga-viga em vigas aparentes, para o ELU. (Fonte: próprio autor, 2021)**

Condições de articulação	
<b>Articulação</b>	<b>Constante da mola</b>
<input checked="" type="checkbox"/> $u_x$	$C_{u_x}$ : 56135.500 [kN/m]
<input type="checkbox"/> $u_y$	$C_{u_y}$ : [kN/m]
<input checked="" type="checkbox"/> $u_z$	$C_{u_z}$ : 56135.500 [kN/m]
<b>Articulação</b>	
<input type="checkbox"/> $\varphi_x$	$C_{\varphi_x}$ : [kNm/rad]
<input checked="" type="checkbox"/> $\varphi_y$	$C_{\varphi_y}$ : 101.000 [kNm/rad]
<input type="checkbox"/> $\varphi_z$	$C_{\varphi_z}$ : [kNm/rad]

**Figura 78 – Valores de rigidez ao deslocamento e ao giro aplicados nas ligações viga-pilar e viga-viga em vigas ocultas, para o ELS. (Fonte: próprio autor, 2021)**

Condições de articulação	
<b>Articulação</b>	<b>Constante da mola</b>
<input checked="" type="checkbox"/> $u_x$	$C_{u_x}$ : 67362.600 [kN/m]
<input type="checkbox"/> $u_y$	$C_{u_y}$ : [kN/m]
<input checked="" type="checkbox"/> $u_z$	$C_{u_z}$ : 67362.600 [kN/m]
<b>Articulação</b>	
<input type="checkbox"/> $\varphi_x$	$C_{\varphi_x}$ : [kNm/rad]
<input checked="" type="checkbox"/> $\varphi_y$	$C_{\varphi_y}$ : 176.800 [kNm/rad]
<input type="checkbox"/> $\varphi_z$	$C_{\varphi_z}$ : [kNm/rad]

**Figura 79 – Valores de rigidez ao deslocamento e ao giro aplicados nas ligações viga-pilar e viga-viga em vigas aparentes, para o ELS. (Fonte: próprio autor, 2021)**

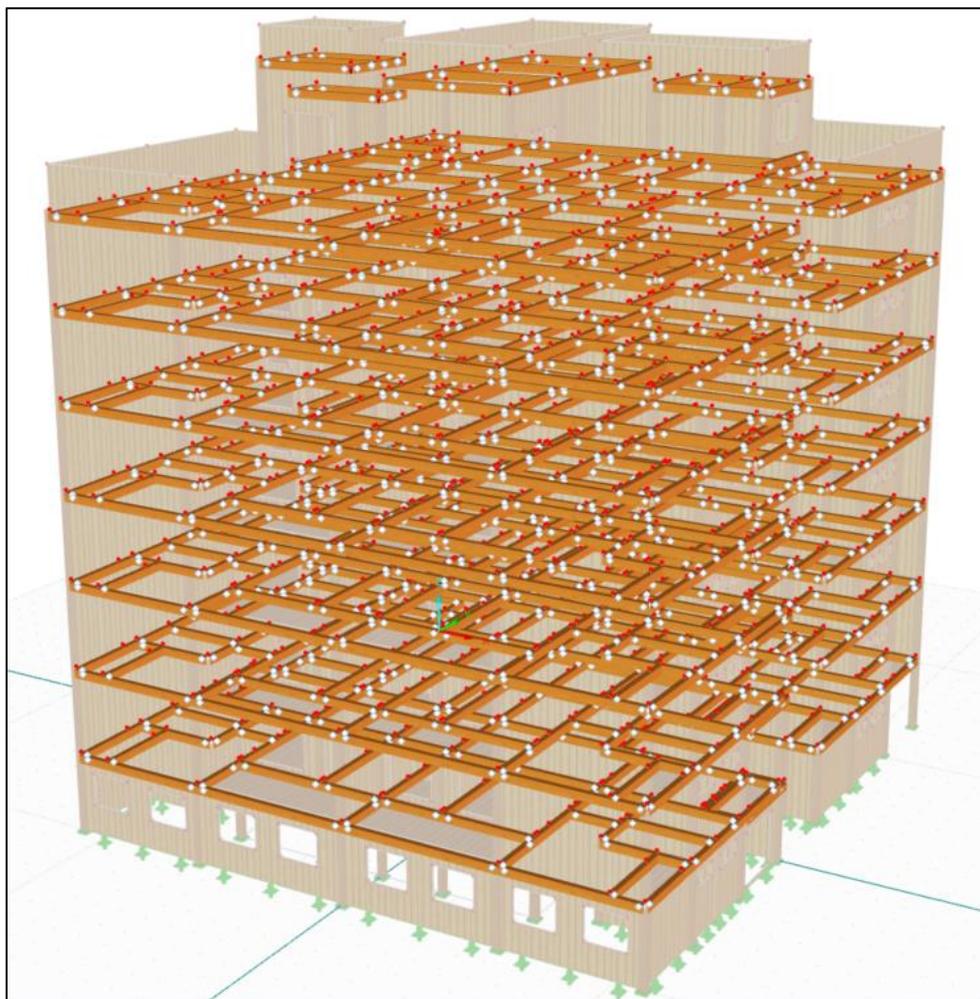


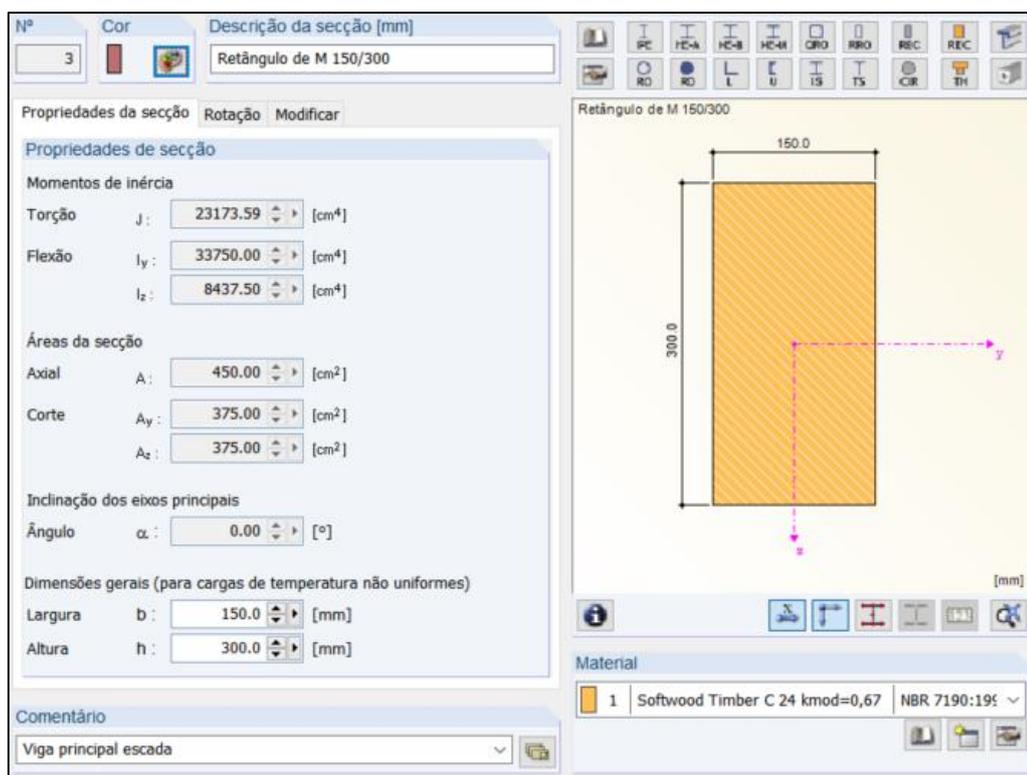
Figura 80 – Visão geral das vigas modeladas. (Fonte: próprio autor, 2021)

### 5.2.3. ESCADAS

A modelagem das escadas foi feita de maneira simplificada, visando aliviar o modelo computacional, facilitando o cálculo dos esforços solicitantes. Nesse sentido, os elementos denominados secundários, como as cunhas, as vigas de piso e os espelhos, não foram inseridos como elementos no modelo, devido aos baixos esforços solicitantes aos quais estão submetidos. Assim, os elementos secundários foram considerados apenas na aplicação dos esforços solicitantes, a partir dos seus pesos próprios.

Desse modo, a modelagem das escadas ficou por conta das vigas principais, posicionadas entre as vigas dos patamares e as vigas dos pavimentos tipos, de acordo com o detalhamento apresentado no Anexo C. O material aplicado para as vigas de escada foi o mesmo

das demais vigas do projeto. Além disso, seguindo o mesmo método de modelagem, criou-se a seção transversal das vigas principais da escada de acordo com as dimensões previstas para o projeto, com suas propriedades geométricas calculadas automaticamente pelo software *Dlubal RFEM*.



**Figura 81 – Propriedades geométricas das vigas principais da escada. (Fonte: próprio autor, 2021)**

A rigidez da ligação entre as vigas principais da escada e as demais vigas (viga escada-viga) foi aplicada nos nós das vigas principais da escada com o valor igual ao calculado no item 5.3.5.2, tal como a rigidez da ligação entre as vigas principais da escada e a laje do térreo (viga escada-térreo), conforme apresentado da Figura 82 à Figura 85, para os modelos do ELU e do ELS.

Condições de articulação	
<b>Articulação</b>	<b>Constante da mola</b>
<input checked="" type="checkbox"/> $u_x$	$C_{u_x}$ : 22454.200 [kN/m]
<input type="checkbox"/> $u_y$	$C_{u_y}$ : [kN/m]
<input checked="" type="checkbox"/> $u_z$	$C_{u_z}$ : 22454.200 [kN/m]
<b>Articulação</b>	
<input type="checkbox"/> $\varphi_x$	$C_{\varphi_x}$ : [kNm/rad]
<input checked="" type="checkbox"/> $\varphi_y$	$C_{\varphi_y}$ : 32.800 [kNm/rad]
<input type="checkbox"/> $\varphi_z$	$C_{\varphi_z}$ : [kNm/rad]

Figura 82 – Valores de rigidez ao deslocamento e ao giro aplicados na ligação viga escada-viga, para o ELU. (Fonte: próprio autor, 2021)

Condições de articulação	
<b>Articulação</b>	<b>Constante da mola</b>
<input checked="" type="checkbox"/> $u_x$	$C_{u_x}$ : 24949.100 [kN/m]
<input type="checkbox"/> $u_y$	$C_{u_y}$ : [kN/m]
<input checked="" type="checkbox"/> $u_z$	$C_{u_z}$ : 24949.100 [kN/m]
<b>Articulação</b>	
<input type="checkbox"/> $\varphi_x$	$C_{\varphi_x}$ : [kNm/rad]
<input checked="" type="checkbox"/> $\varphi_y$	$C_{\varphi_y}$ : 0.000 [kNm/rad]
<input type="checkbox"/> $\varphi_z$	$C_{\varphi_z}$ : [kNm/rad]

Figura 83 – Valores de rigidez ao deslocamento e ao giro aplicados na ligação viga escada-térreo, para o ELU. (Fonte: próprio autor, 2021)

Condições de articulação	
<b>Articulação</b>	<b>Constante da mola</b>
<input checked="" type="checkbox"/> $u_x$	$C_{u_x}$ : 33681.300 [kN/m]
<input type="checkbox"/> $u_y$	$C_{u_y}$ : [kN/m]
<input checked="" type="checkbox"/> $u_z$	$C_{u_z}$ : 33681.300 [kN/m]
<b>Articulação</b>	
<input type="checkbox"/> $\varphi_x$	$C_{\varphi_x}$ : [kNm/rad]
<input checked="" type="checkbox"/> $\varphi_y$	$C_{\varphi_y}$ : 32.800 [kNm/rad]
<input type="checkbox"/> $\varphi_z$	$C_{\varphi_z}$ : [kNm/rad]

Figura 84 – Valores de rigidez ao deslocamento e ao giro aplicados na ligação viga escada-viga, para o ELS. (Fonte: próprio autor, 2021)

Condições de articulação	
<b>Articulação</b>	<b>Constante da mola</b>
<input checked="" type="checkbox"/> $u_x$	$C_{u_x}$ : 37423.600 [kN/m]
<input type="checkbox"/> $u_y$	$C_{u_y}$ : [kN/m]
<input checked="" type="checkbox"/> $u_z$	$C_{u_z}$ : 37423.600 [kN/m]
<b>Articulação</b>	
<input type="checkbox"/> $\varphi_x$	$C_{\varphi_x}$ : [kNm/rad]
<input checked="" type="checkbox"/> $\varphi_y$	$C_{\varphi_y}$ : 0.000 [kNm/rad]
<input type="checkbox"/> $\varphi_z$	$C_{\varphi_z}$ : [kNm/rad]

Figura 85 – Valores de rigidez ao deslocamento e ao giro aplicados na ligação viga escada-térreo, para o ELS. (Fonte: próprio autor, 2021)

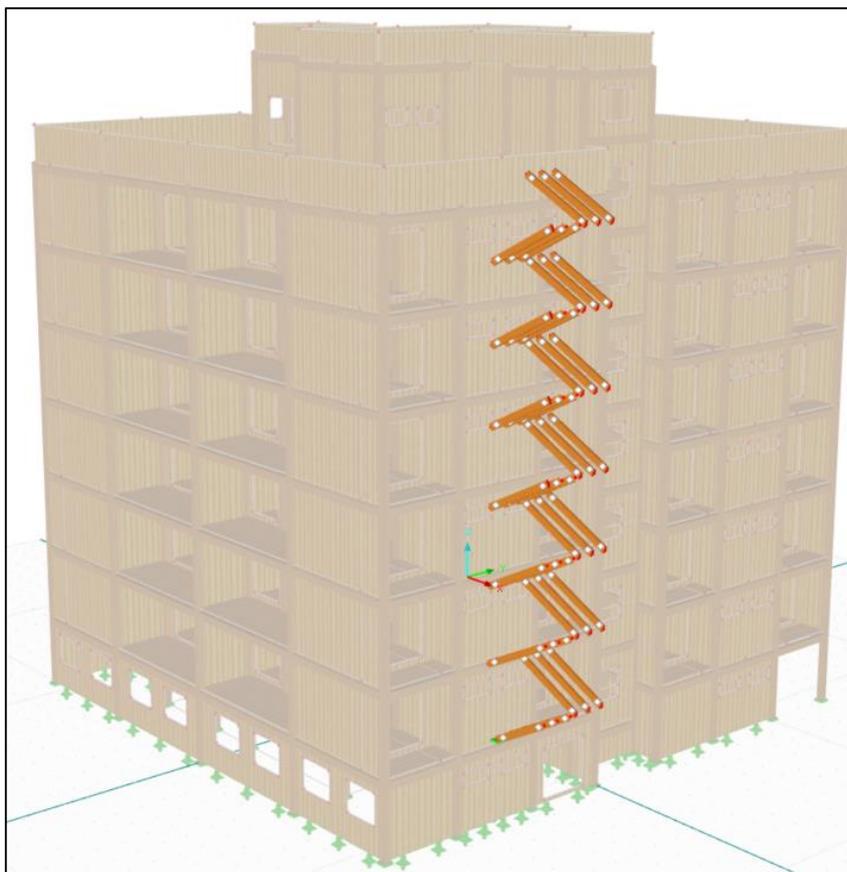


Figura 86 – Visão geral das vigas da escada modeladas. (Fonte: próprio autor, 2021)

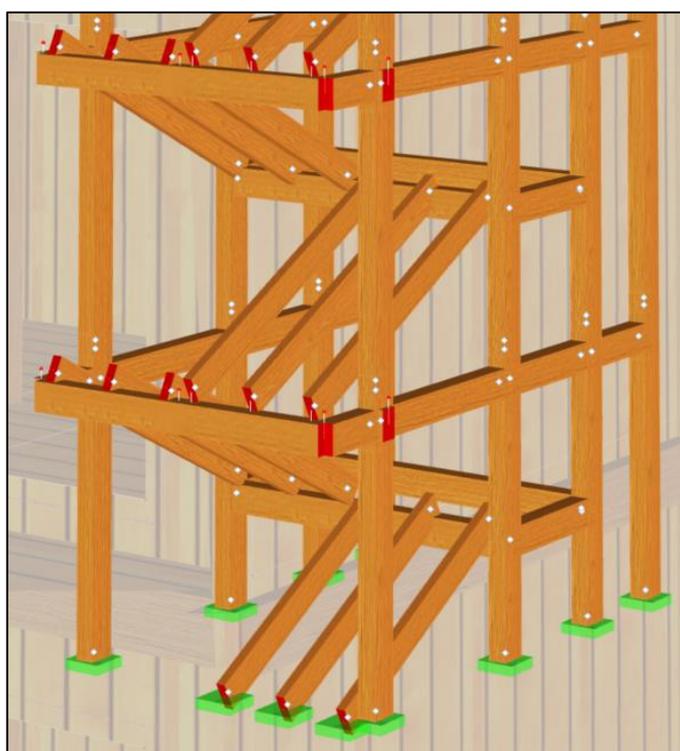
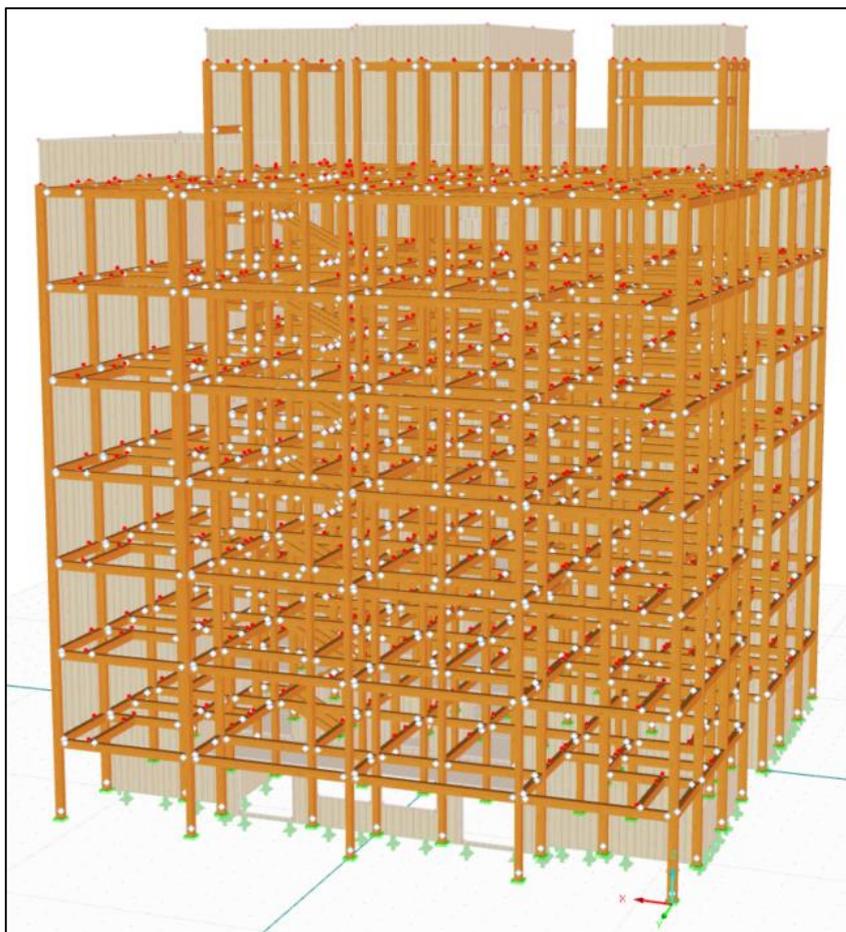


Figura 87 – Ampliação das vigas modeladas na região da escada. (Fonte: próprio autor, 2021)



**Figura 88 – Visão geral da modelagem dos pilares e vigas do edifício. (Fonte: próprio autor, 2021)**

#### 5.2.4. PAINÉIS DE CLT

Os painéis das lajes e paredes foram inseridos como superfícies no modelo computacional, partindo da criação de um material ortotrópico, com a espessura prevista para cada painel do projeto e considerando a rigidez equivalente calculada nos itens 5.3.3 e 5.3.4, para as direções X e Y.

Nº	Cor	Descrição
7		CLT C24 - Laje

Modelo de material  
Ortotrópico elástico 2D...

Espessura:  
d : 200.0 [mm]

Propriedades do material

Módulo de elasticidade		Peso específico	
Ex :	871.20 [kN/cm <sup>2</sup> ]	γ :	4.20 [kN/m <sup>3</sup> ]
Ey :	228.80 [kN/cm <sup>2</sup> ]	Coeficiente de dilatação térmica	
Módulo de corte		α :	0.00 [1/°C]
Gyz :	69.00 [kN/cm <sup>2</sup> ]	Coeficiente de Poisson	
Gxz :	5.00 [kN/cm <sup>2</sup> ]	vxy :	0.400 [-]
Gxy :	5.00 [kN/cm <sup>2</sup> ]	vyx :	0.105 [-]

Figura 89 – Propriedades da madeira das lajes de CLT para o ELU. (Fonte: próprio autor, 2021)

Nº	Cor	Descrição
54		CLT C24 - Parede

Modelo de material  
Ortotrópico elástico 2D...

Espessura:  
d : 150.0 [mm]

Propriedades do material

Módulo de elasticidade		Peso específico	
Ex :	871.20 [kN/cm <sup>2</sup> ]	γ :	4.20 [kN/m <sup>3</sup> ]
Ey :	228.80 [kN/cm <sup>2</sup> ]	Coeficiente de dilatação térmica	
Módulo de corte		α :	0.00 [1/°C]
Gyz :	69.00 [kN/cm <sup>2</sup> ]	Coeficiente de Poisson	
Gxz :	5.00 [kN/cm <sup>2</sup> ]	vxy :	0.400 [-]
Gxy :	5.00 [kN/cm <sup>2</sup> ]	vyx :	0.105 [-]

Figura 90 – Propriedades da madeira das paredes de CLT para o ELU. (Fonte: próprio autor, 2021)

Nº	Cor	Descrição
7		CLT C24 - Laje

Modelo de material  
Ortotrópico elástico 2D...

Espessura:  
d : 200.0 [mm]

Propriedades do material

Módulo de elasticidade	Peso específico
Ex : 775.02 [kN/cm <sup>2</sup> ]	γ : 4.20 [kN/m <sup>3</sup> ]
Ey : 104.72 [kN/cm <sup>2</sup> ]	Coefficiente de dilatação térmica
Módulo de corte	α : 0.00 [1/°C]
Gyz : 69.00 [kN/cm <sup>2</sup> ]	Coefficiente de Poisson
Gxz : 5.00 [kN/cm <sup>2</sup> ]	vxy : 0.400 [-]
Gxy : 5.00 [kN/cm <sup>2</sup> ]	vyx : 0.105 [-]

Figura 91 – Propriedades da madeira das lajes de CLT para o ELS. (Fonte: próprio autor, 2021)

Nº	Cor	Descrição
54		CLT C24 - Parede

Modelo de material  
Ortotrópico elástico 2D...

Espessura:  
d : 150.0 [mm]

Propriedades do material

Módulo de elasticidade	Peso específico
Ex : 692.61 [kN/cm <sup>2</sup> ]	γ : 4.20 [kN/m <sup>3</sup> ]
Ey : 403.77 [kN/cm <sup>2</sup> ]	Coefficiente de dilatação térmica
Módulo de corte	α : 0.00 [1/°C]
Gyz : 69.00 [kN/cm <sup>2</sup> ]	Coefficiente de Poisson
Gxz : 5.00 [kN/cm <sup>2</sup> ]	vxy : 0.400 [-]
Gxy : 5.00 [kN/cm <sup>2</sup> ]	vyx : 0.105 [-]

Figura 92 – Propriedades da madeira das paredes de CLT para o ELS. (Fonte: próprio autor, 2021)

Com isso, os painéis foram criados especificando a espessura das lajes e paredes e definindo a orientação do eixo principal, igual a direção do vão para as lajes e igual a direção

da altura para as paredes. Assim, as superfícies das lajes e paredes foram inseridas conforme as plantas de locação presentes nos Anexos C, D, E e F. Ainda de acordo com o detalhamento do projeto, Anexo G, foram modeladas as aberturas dos painéis de parede onde serão instaladas portas e janelas.

Para simular a rigidez da ligação dos painéis foram inseridas articulações em linha na base das paredes do pavimento tipo e da cobertura (ligação parede-laje) e apoios na base das paredes do térreo (ligação parede-térreo), na junção de painéis lado a lado (emenda entre painéis) e entre as lajes e as vigas (ligação laje-viga), com os valores de rigidez calculados no item 5.3.5.2 para os modelos do ELU e do ELS. É importante destacar que a rigidez foi aplicada no eixo X, correspondente ao deslizamento dos painéis.

Articulação translacional		
Constante da mola		
<input checked="" type="checkbox"/> $u_x$	$C_{u_x}$ :	59877.800 [kN/m <sup>2</sup> ]
<input type="checkbox"/> $u_y$	$C_{u_y}$ :	[kN/m <sup>2</sup> ]
<input type="checkbox"/> $u_z$	$C_{u_z}$ :	[kN/m <sup>2</sup> ]
Articulação rotacional		
Constante da mola		
<input checked="" type="checkbox"/> $\varphi_x$	$C_{\varphi_x}$ :	0.000 [kNm/rad/m]

**Figura 93 – Valores de rigidez ao deslocamento e ao giro aplicados na ligação parede-laje e parede-térreo, para o ELU. (Fonte: próprio autor, 2021)**

Articulação translacional		
Constante da mola		
<input checked="" type="checkbox"/> $u_x$	$C_{u_x}$ :	8732.200 [kN/m <sup>2</sup> ]
<input type="checkbox"/> $u_y$	$C_{u_y}$ :	[kN/m <sup>2</sup> ]
<input type="checkbox"/> $u_z$	$C_{u_z}$ :	[kN/m <sup>2</sup> ]
Articulação rotacional		
Constante da mola		
<input checked="" type="checkbox"/> $\varphi_x$	$C_{\varphi_x}$ :	0.000 [kNm/rad/m]

**Figura 94 – Valores de rigidez ao deslocamento e ao giro aplicados na emenda entre painéis, para o ELU. (Fonte: próprio autor, 2021)**

Articulação translacional		
Constante da mola		
<input checked="" type="checkbox"/> $u_x$	$C_{ux}$ :	12474.500 [kN/m <sup>2</sup> ]
<input type="checkbox"/> $u_y$	$C_{uy}$ :	[kN/m <sup>2</sup> ]
<input type="checkbox"/> $u_z$	$C_{uz}$ :	[kN/m <sup>2</sup> ]
Articulação rotacional		
Constante da mola		
<input checked="" type="checkbox"/> $\varphi_x$	$C_{\varphi x}$ :	0.000 [kNm/rad/m]

Figura 95 – Valores de rigidez ao deslocamento e ao giro aplicados na ligação laje-viga, para o ELU.

(Fonte: próprio autor, 2021)

Articulação translacional		
Constante da mola		
<input checked="" type="checkbox"/> $u_x$	$C_{ux}$ :	89816.800 [kN/m <sup>2</sup> ]
<input type="checkbox"/> $u_y$	$C_{uy}$ :	[kN/m <sup>2</sup> ]
<input type="checkbox"/> $u_z$	$C_{uz}$ :	[kN/m <sup>2</sup> ]
Articulação rotacional		
Constante da mola		
<input checked="" type="checkbox"/> $\varphi_x$	$C_{\varphi x}$ :	0.000 [kNm/rad/m]

Figura 96 – Valores de rigidez ao deslocamento e ao giro aplicados na ligação parede-laje e parede-térreo, para o ELS. (Fonte: próprio autor, 2021)

Articulação translacional		
Constante da mola		
<input checked="" type="checkbox"/> $u_x$	$C_{ux}$ :	13098.300 [kN/m <sup>2</sup> ]
<input type="checkbox"/> $u_y$	$C_{uy}$ :	[kN/m <sup>2</sup> ]
<input type="checkbox"/> $u_z$	$C_{uz}$ :	[kN/m <sup>2</sup> ]
Articulação rotacional		
Constante da mola		
<input checked="" type="checkbox"/> $\varphi_x$	$C_{\varphi x}$ :	0.000 [kNm/rad/m]

Figura 97 – Valores de rigidez ao deslocamento e ao giro aplicados na emenda entre painéis, para o ELS.

(Fonte: próprio autor, 2021)

Articulação translacional		
Constante da mola		
<input checked="" type="checkbox"/> $u_x$	$C_{ux}$ :	18711.800 [kN/m <sup>2</sup> ]
<input type="checkbox"/> $u_y$	$C_{uy}$ :	[kN/m <sup>2</sup> ]
<input type="checkbox"/> $u_z$	$C_{uz}$ :	[kN/m <sup>2</sup> ]

Articulação rotacional		
Constante da mola		
<input checked="" type="checkbox"/> $\varphi_x$	$C_{\varphi x}$ :	0.000 [kNm/rad/m]

Figura 98 – Valores de rigidez ao deslocamento e ao giro aplicados na ligação laje-viga, para o ELS.  
(Fonte: próprio autor, 2021)

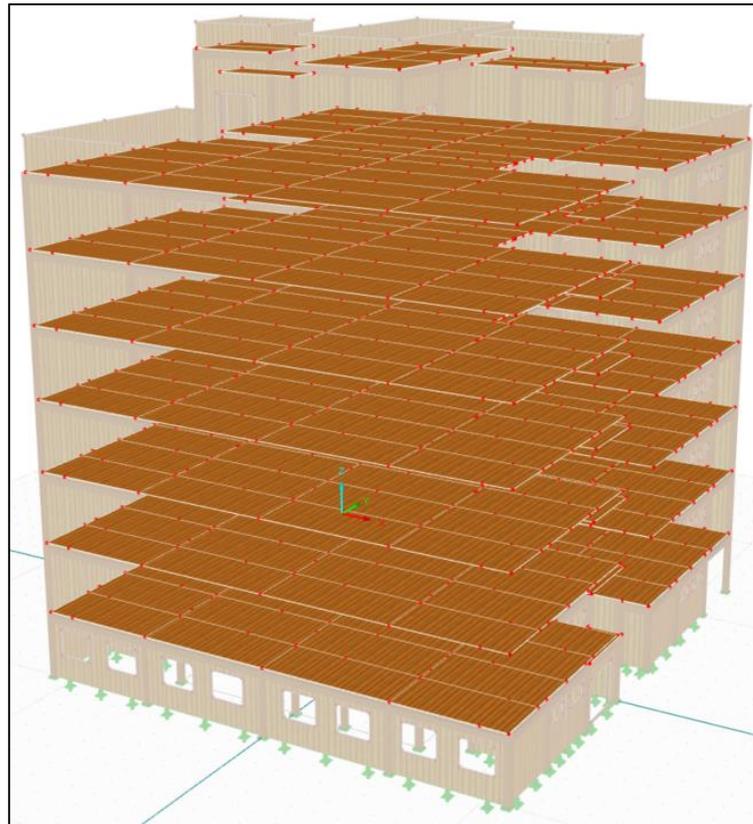


Figura 99 – Visão geral dos painéis de laje modelados. (Fonte: próprio autor, 2021)



Figura 100 – Visão geral do edifício com todos os elementos modelados. (Fonte: próprio autor, 2021)

## 5.2.5. AÇÕES ATUANTES

Realizada a modelagem dos elementos, com a inserção das propriedades geométricas e mecânicas, faz-se necessária a determinação das ações atuantes, para a aplicação dos carregamentos no modelo computacional, e a geração das combinações de estados limites últimos e de serviço, para o dimensionamento dos elementos estruturais.

### 5.2.5.1. Ações permanentes

#### 5.2.5.1.1. Peso próprio da estrutura

O cálculo do peso próprio da estrutura no software *Dlubal RFEM* é realizado a partir do volume das peças e de seu peso específico inserido, no caso utilizou-se a densidade média aparente da madeira do projeto ( $420 \text{ kg/m}^3$ ). Assim, conforme apresentado no item 5.4, o peso

próprio total da estrutura de madeira do prédio é de 769,10 tf, desprezando o peso de elementos secundários e as aberturas nas paredes. A partir disso, para simular o peso das ligações metálicas, aplicou-se no modelo um aumento de 3% do peso próprio da estrutura, totalizando 23,07 tf, valor que deve ser verificado após o dimensionamento das ligações.

#### 5.2.5.1.2. *Peso próprio do acabamento das paredes*

O peso próprio dos acabamentos das paredes foi inserido no modelo através de carregamentos em área aplicados nas superfícies das paredes. Para tal, deve-se calcular o peso próprio das diferentes combinações de acabamentos para as faces das paredes presentes no projeto, considerando as composições citadas no item 4.3.1.2 para faces secas, molhadas e externas.

O peso das ripas e espaçadores pode ser calculado considerando a distribuição das peças em 1,20 m de largura de parede e, em seguida, dividindo o peso pela área de parede, obtendo o peso por área. Assim, para as paredes do térreo e dos pavimentos tipos, tem-se:

- Peso das ripas  $\rightarrow 0,05 \text{ m} \cdot 0,025 \text{ m} \cdot 1,20 \text{ m} \cdot 5 \text{ peças} \cdot 420 \text{ kg/m}^3 = 3,15 \text{ kg}$
- Peso dos espaçadores  $\rightarrow 0,05 \text{ m} \cdot 0,025 \text{ m} \cdot 0,15 \text{ m} \cdot 10 \text{ peças} \cdot 420 \text{ kg/m}^3 = 0,79 \text{ kg}$
- Peso total por área  $\rightarrow (3,15 \text{ kg} + 0,79 \text{ kg}) / (1,20 \text{ m} \cdot 2,70 \text{ m}) = 1,22 \text{ kgf/m}^2$

Desse modo, visto que o peso das ripas e espaçadores é baixo em relação aos demais componentes, por simplificação, adotou-se 1,25 kgf/m<sup>2</sup> para todas as faces de paredes do térreo, do pavimento tipo e da cobertura.

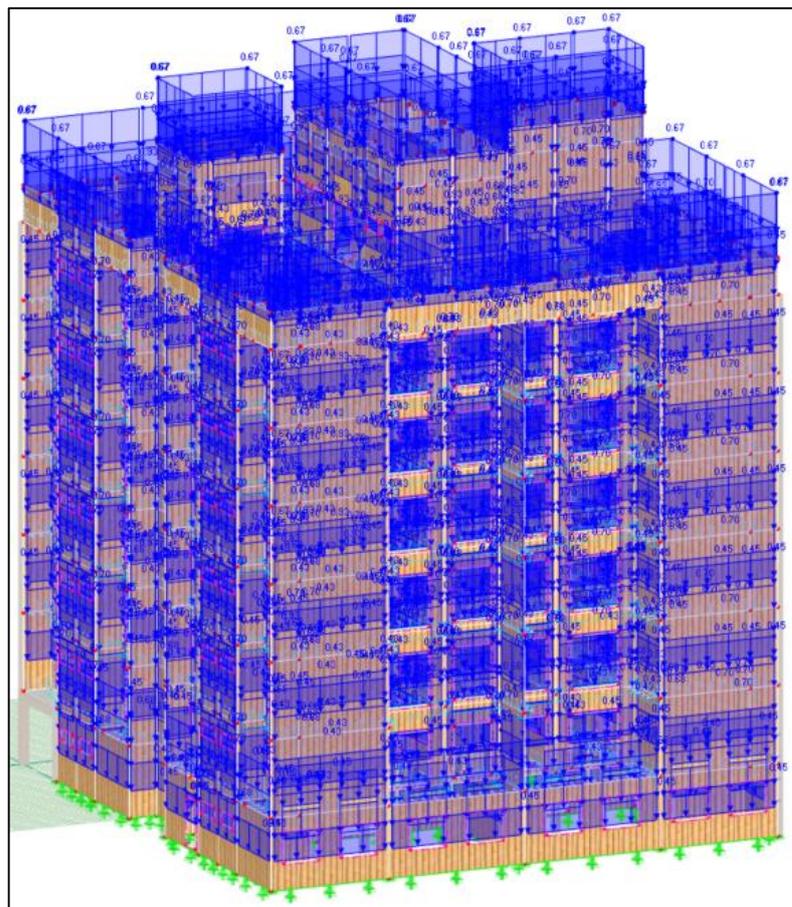
- **Face seca**
  - Ripas e espaçadores de madeira  $\rightarrow 1,25 \text{ kgf/m}^2$
  - Placas de gesso tipo F com 2 camadas de 15 mm  $\rightarrow 20 \text{ kgf/m}^2$
  - Peso total face seca  $\rightarrow 21,25 \text{ kgf/m}^2 = 0,21 \text{ kN/m}^2$
- **Face molhada**
  - Ripas e espaçadores de madeira  $\rightarrow 1,25 \text{ kgf/m}^2$

- Placas de gesso tipo H com 1 camada de 12,5 mm → 10 kgf/m<sup>2</sup>
  - Revestimento cerâmico → 25 kgf/m<sup>2</sup>
  - Peso total face molhada → **36,25 kgf/m<sup>2</sup> = 0,36 kN/m<sup>2</sup>**
- **Face externa**
    - Ripas e espaçadores de madeira → 1,25 kgf/m<sup>2</sup>
    - Placas cimentícias → 22 kgf/m<sup>2</sup>
    - Peso total face externa → **23,25 kgf/m<sup>2</sup> = 0,23 kN/m<sup>2</sup>**

Calculados os pesos por face, elaborou-se as combinações existentes no projeto, considerando as faces das paredes dos banheiros, cozinhas e lavanderias como molhadas e as faces das paredes de fachada como externas. A Tabela 23 apresenta em resumo os pesos dos acabamentos das paredes do projeto considerando a tipologia de cada face. Enquanto a Figura 101 apresenta os carregamentos aplicados nas paredes do modelo computacional.

**Tabela 23 – Peso dos acabamentos de parede por área para as diferentes tipologias.**

Parede com ambas as faces secas	0.43 kN/m <sup>2</sup>
Parede com ambas as faces molhadas	0.73 kN/m <sup>2</sup>
Parede com uma face seca e outra molhada	0.58 kN/m <sup>2</sup>
Parede com uma face externa e outra seca	0.45 kN/m <sup>2</sup>
Parede com uma face externa e outra molhada	0.60 kN/m <sup>2</sup>
Parede com ambas as faces externas	0.67 kN/m <sup>2</sup>



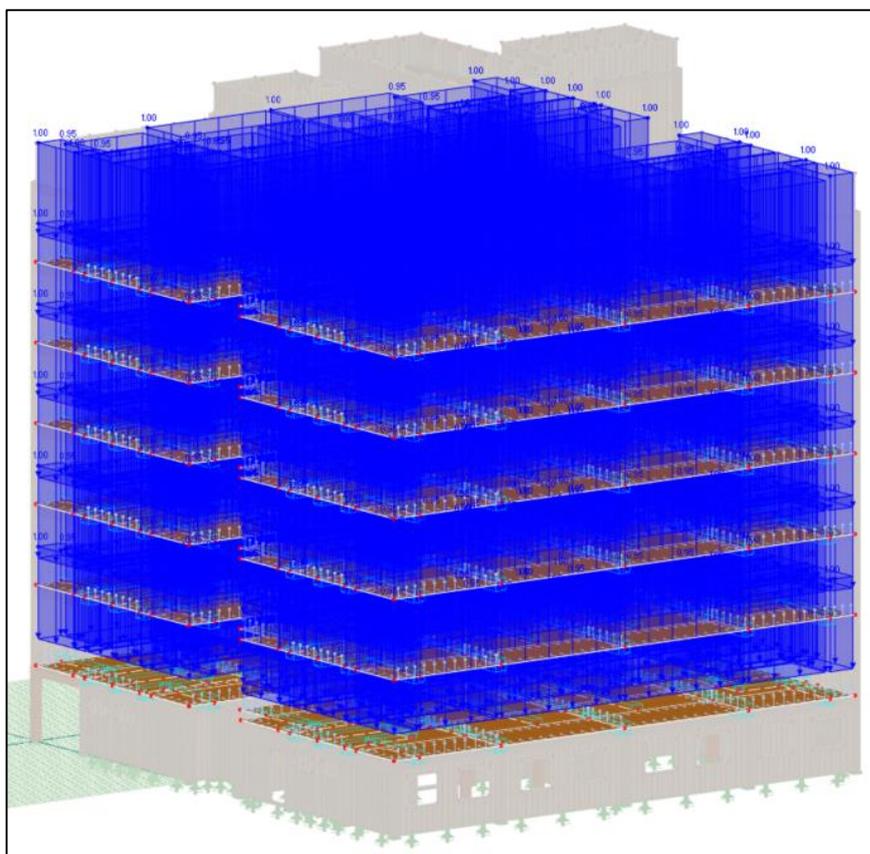
**Figura 101 – Peso dos acabamentos aplicado nas paredes do modelo. (Fonte: próprio autor, 2021)**

#### 5.2.5.1.3. *Peso próprio do acabamento das lajes do pavimento tipo*

O peso próprio dos acabamentos das lajes do pavimento tipo foi inserido no modelo através de carregamentos em área aplicados nas superfícies das lajes. Para tal, calculou-se o peso dos acabamentos em função do tipo de piso do ambiente, conforme as composições apresentadas no item 4.3.1.3, considerando piso cerâmico para as áreas comuns, banheiros, cozinhas, lavanderias e varandas, e piso de madeira para os demais ambientes do apartamento.

- **Laje com piso cerâmico**
  - Forro de gesso em placas tipo A de 12,5 mm com estrutura de suporte → 15 kgf/m<sup>2</sup>
  - Contrapiso de concreto 2 cm → 48 kgf/m<sup>2</sup>
  - Estrutura do piso elevado → 12 kgf/m<sup>2</sup>
  - Piso cerâmico → 25 kgf/m<sup>2</sup>

- Peso total do acabamento com piso cerâmico →  $100 \text{ kgf/m}^2 = 1,00 \text{ kN/m}^2$
  
- **Laje com piso de madeira**
  - Forro de gesso em placas tipo A de 12,5 mm com estrutura de suporte →  $15 \text{ kgf/m}^2$
  - Contrapiso de concreto 2 cm →  $48 \text{ kgf/m}^2$
  - Estrutura do piso elevado →  $12 \text{ kgf/m}^2$
  - Piso de madeira →  $20 \text{ kgf/m}^2$
  - Peso total do acabamento com piso de madeira →  $95 \text{ kgf/m}^2 = 0,95 \text{ kN/m}^2$



**Figura 102 – Peso dos acabamentos aplicado nas lajes do pavimento tipo do modelo. (Fonte: próprio autor, 2021)**

#### 5.2.5.1.4. *Peso próprio das escadas*

O peso próprio dos componentes estruturais da escada (cunhas, vigas de piso e espelhos) e dos acabamentos, foram aplicados sobre as vigas principais das escadas no modelo

computacional, considerando a configuração descrita nos itens 4.2.5 e 4.3.1.4. Assim, calcula-se o peso por área distribuído sobre as vigas principais das escadas, considerando a área de aplicação igual a distância de eixo a eixo das vigas principais da borda da escada multiplicada pelo comprimento da viga principal:

$$A_{escada} = 1,40 \text{ m} \cdot 3,40 \text{ m} = 4,76 \text{ m}^2$$

- **Peso próprio dos acabamentos das escadas**

- 2 camadas de forro de gesso em placas tipo F sem estrutura de suporte → 20 kgf/m<sup>2</sup>

- Cunhas de madeira → 4,24 kgf/m<sup>2</sup>

Cada lance de escada possui 20 cunhas de madeira:

$$(0,10 \text{ m} \cdot 0,30 \text{ m} \cdot 0,16 \text{ m}) / 2 \cdot 20 \text{ peças} \cdot 420 \text{ kg/m}^3 = 20,16 \text{ kgf}$$

Dividindo pela área da escada, tem-se:

$$20,16 \text{ kgf} / 4,76 \text{ m}^2 = 4,24 \text{ kgf/m}^2$$

- Vigas de piso → 19,85 kgf/m<sup>2</sup>

Cada lance de escada possui 10 vigas de piso:

$$(0,05 \text{ m} \cdot 0,30 \text{ m} \cdot 1,50 \text{ m}) \cdot 10 \text{ peças} \cdot 420 \text{ kg/m}^3 = 94,50 \text{ kgf}$$

Dividindo pela área da escada, tem-se:

$$94,50 \text{ kgf} / 4,76 \text{ m}^2 = 19,85 \text{ kgf/m}^2$$

- Chapa de espelho → 2,72 kgf/m<sup>2</sup>

Cada lance de escada possui 10 espelhos com chapa de OSB de 9 mm:

$$(0,009 \text{ m} \cdot 0,16 \text{ m} \cdot 1,50 \text{ m}) \cdot 10 \text{ peças} \cdot 600 \text{ kg/m}^3 = 12,96 \text{ kgf}$$

Dividindo pela área da escada, tem-se:

$$12,96 \text{ kgf} / 4,76 \text{ m}^2 = 2,72 \text{ kgf/m}^2$$

- Contrapiso de concreto 2 cm → 69,58 kgf/m<sup>2</sup>

Considerou-se que os pisos e espelhos da escada serão cobertos pelo contrapiso:

$$(0,16 \text{ m} + 0,30 \text{ m}) \cdot 1,50 \text{ m} \cdot 10 \text{ degraus} \cdot 48 \text{ kg/m}^2 = 331,20 \text{ kgf}$$

Dividindo pela área da escada, tem-se:

$$331,20 \text{ kgf} / 4,76 \text{ m}^2 = 69,58 \text{ kgf/m}^2$$

- Piso cerâmico → 36,24 kgf/m<sup>2</sup>

Considerou-se piso cerâmico nos pisos e espelhos da escada:

$$(0,16 \text{ m} + 0,30 \text{ m}) \cdot 1,50 \text{ m} \cdot 10 \text{ degraus} \cdot 25 \text{ kg/m}^2 = 172,50 \text{ kgf}$$

Dividindo pela área da escada, tem-se:

$$172,50 \text{ kgf} / 4,76 \text{ m}^2 = 36,24 \text{ kgf/m}^2$$

- Peso total do acabamento das escadas → **153 kgf/m<sup>2</sup> = 1,53 kN/m<sup>2</sup>**
  
- **Peso próprio dos acabamentos dos patamares**
  - 1 camada de forro de gesso em placas tipo A com estrutura de suporte → 15 kgf/m<sup>2</sup>
  - Contrapiso de concreto 2 cm → 48 kgf/m<sup>2</sup>
  - Piso cerâmico → 25 kgf/m<sup>2</sup>
  - **Peso total do acabamento dos patamares → 88 kgf/m<sup>2</sup> = 0,88 kN/m<sup>2</sup>**



**Figura 103 – Peso dos acabamentos aplicado nas escadas. (Fonte: próprio autor, 2021)**

#### 5.2.5.1.5. *Peso próprio das lajes de cobertura*

O peso próprio dos acabamentos das lajes da cobertura foi inserido no modelo através de carregamentos em área aplicados nas superfícies das lajes, considerando as regiões previstas pela planta arquitetônica para o posicionamento do telhado verde e dos painéis fotovoltaicos.

As lajes de piso das regiões de escada, elevador e caixa d'água foram admitidas com o mesmo peso das lajes do pavimento tipo com piso cerâmico. Por simplificação, considerou-se o mesmo peso para a laje da casa de máquinas do elevador. Enquanto o peso das lajes de cobertura dessas regiões é igual ao restante da cobertura do edifício.

Dessa forma, conforme a composição citada no item 4.3.1.5, calculou-se o peso da laje de cobertura do edifício, do telhado verde e dos painéis fotovoltaicos:

- **Laje de cobertura**

- 1 camada de forro de gesso em placas tipo A com estrutura de suporte → 15 kgf/m<sup>2</sup>
- Barrotes de madeira → 1,75 kgf/m<sup>2</sup>

Peso dos barrotes distribuídos a cada 1,20m:

$$2 \text{ peças} \cdot (0,05 \text{ m} \cdot 0,05 \text{ m}) \cdot 420 \text{ kg/m}^3 / 1,20 \text{ m} = 1,75 \text{ kgf/m}^2$$

- Chapas de OSB 18 mm → 0,018 m · 600 kg/m<sup>3</sup> = 10,80 kgf/m<sup>2</sup>
- Isolante térmico → 1,50 kgf/m<sup>2</sup>
- Peso total dos componentes da laje de cobertura → **29,05 kgf/m<sup>2</sup> = 0,29 kN/m<sup>2</sup>**

- **Telhado verde**

- Peso total estimado no item 4.3.1.5 → **300 kgf/m<sup>2</sup> = 3,00 kN/m<sup>2</sup>**

- **Painéis fotovoltaicos**

Os 24 painéis estão divididos em 4 regiões da cobertura com 6 painéis, cada uma ocupando uma área aproximada de 14 m<sup>2</sup>. Como cada painel pesa 24,9 kg, é possível calcular o peso aproximado por metro quadrado de cada região.

- Peso em área de cada região de painéis fotovoltaicos  $\rightarrow 11 \text{ kgf/m}^2 = 0,11 \text{ kN/m}^2$

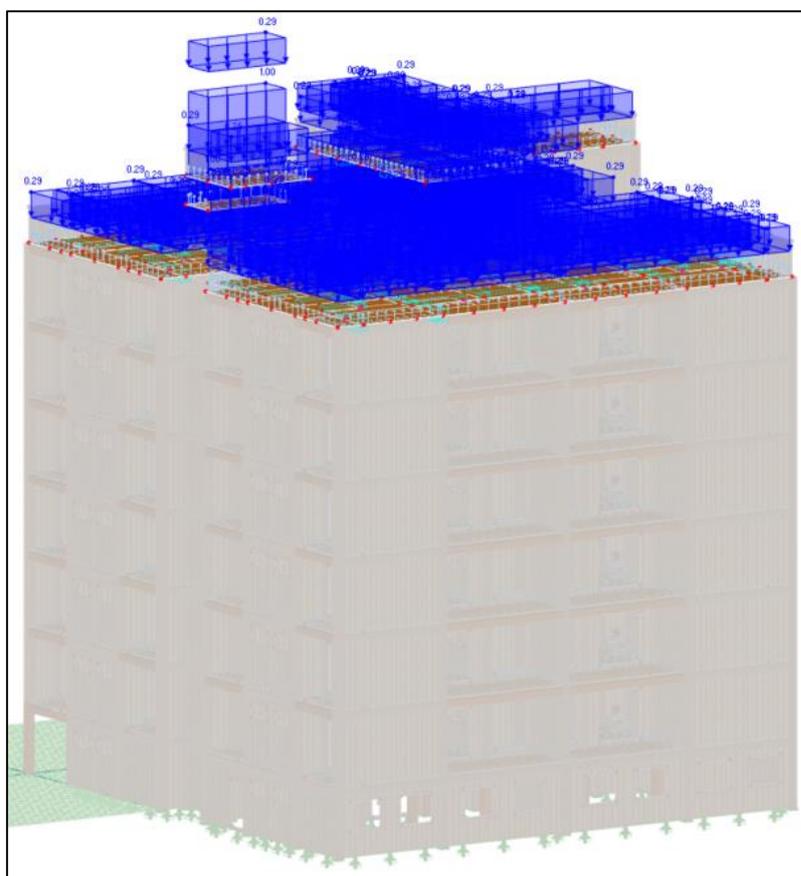


Figura 104 – Peso dos componentes da cobertura aplicado nos painéis de laje. (Fonte: próprio autor, 2021)

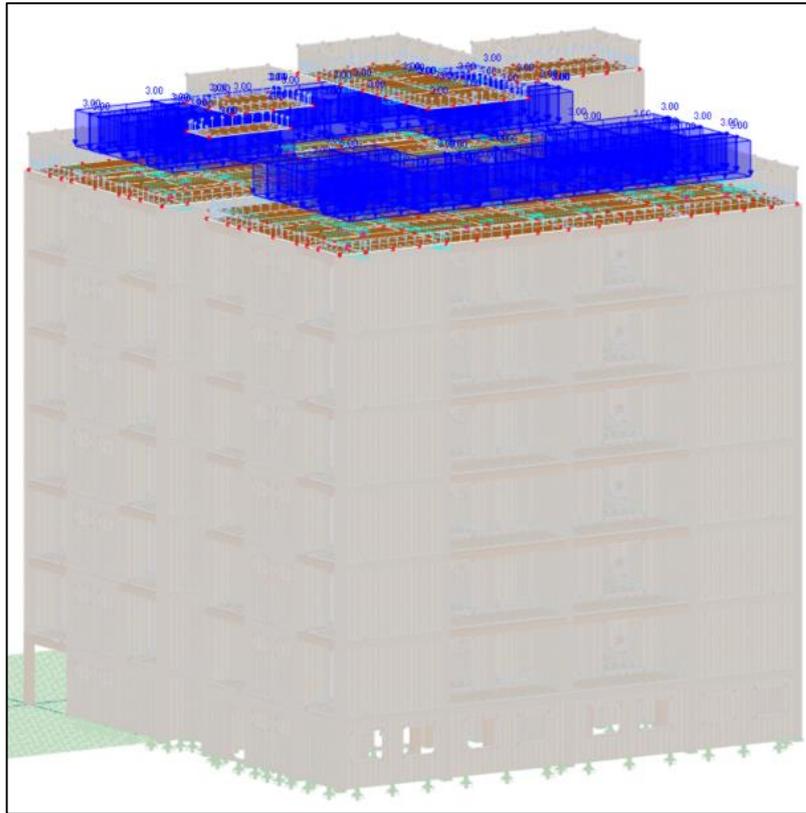


Figura 105 – Peso do telhado verde aplicado nos painéis de laje. (Fonte: próprio autor, 2021)

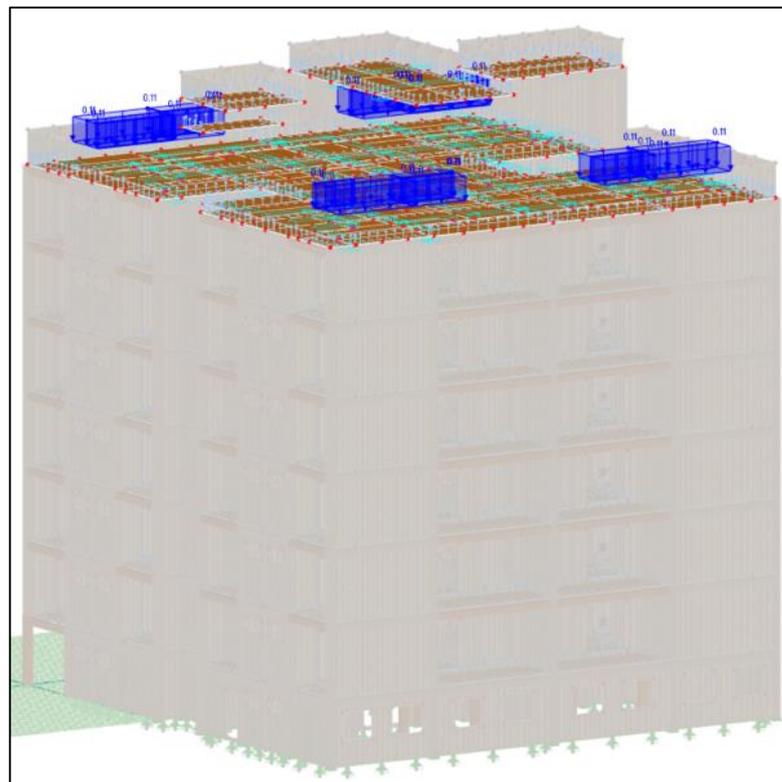
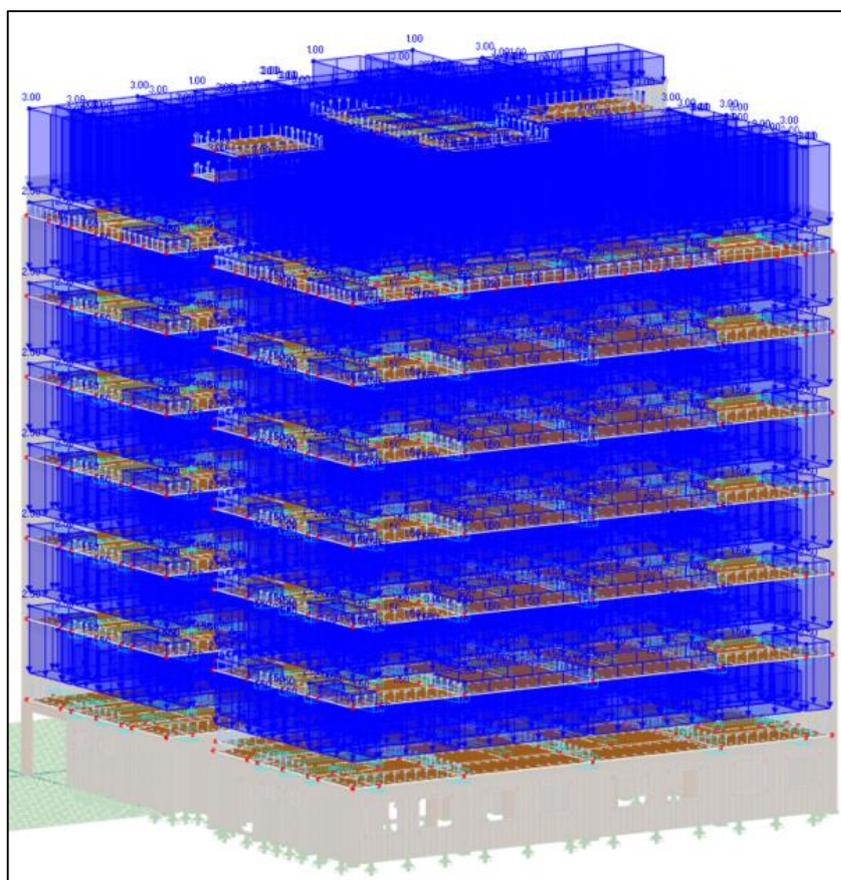


Figura 106 – Peso das placas fotovoltaicas aplicado nos painéis de laje. (Fonte: próprio autor, 2021)

### 5.2.5.2. Ações variáveis

#### 5.2.5.2.1. Uso e ocupação

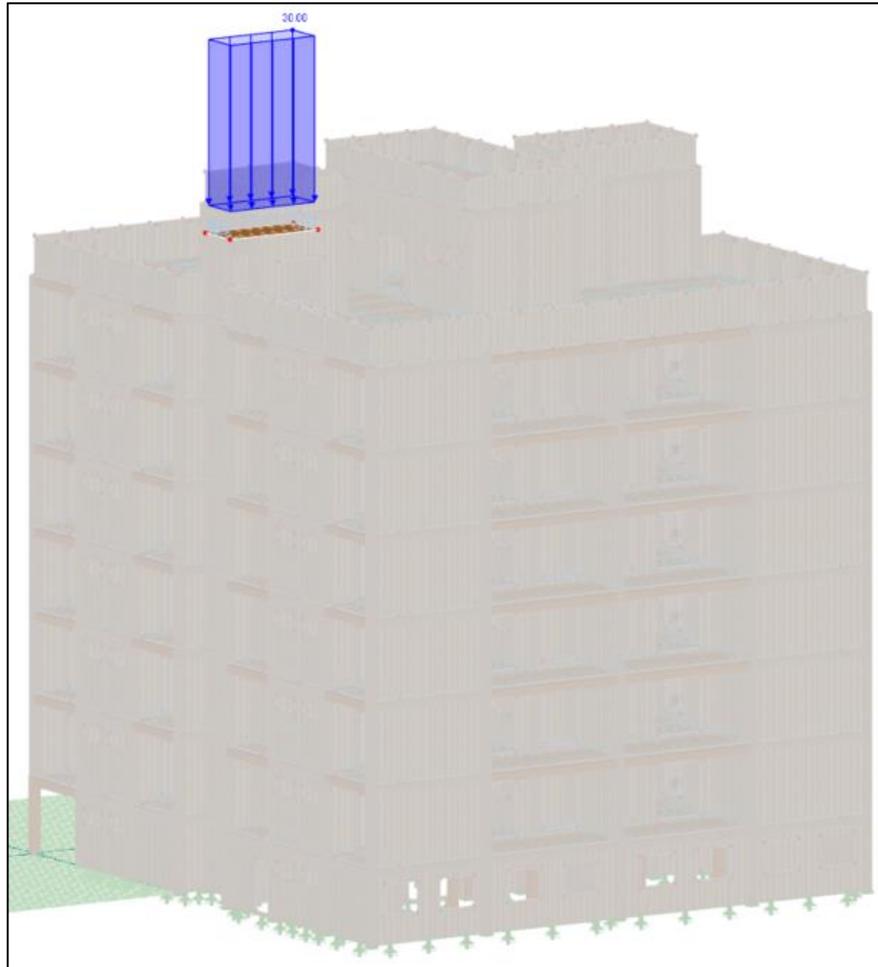
Os carregamentos de uso e ocupação descritos no item 4.3.2.1 foram aplicados nas lajes de piso do modelo de acordo com o ambiente, conforme apresentado na Tabela 7.



**Figura 107 – Sobrecarga de uso e ocupação aplicada nos painéis de laje. (Fonte: próprio autor, 2021)**

#### 5.2.5.2.2. Elevador

De acordo com o que foi apresentado no item 4.3.2.2, o peso da casa de máquinas aplicado sobre a laje do elevador foi de 30 kN/m².



**Figura 108 – Peso da casa de máquinas aplicada nos painéis de laje do elevador. (Fonte: próprio autor, 2021)**

#### 5.2.5.2.3. Caixa d'água

Para determinar o carregamento aplicado sobre a laje de piso da caixa d'água devido ao peso dos reservatórios, primeiramente estimou-se o volume de água requerido para os reservatórios superiores, de acordo com o item 4.3.2.3.

- **Estimativa do volume de água requerido**
  - 200 L/hab/dia;
  - 24 horas (1 dia);
  - 4 hab/apartamento;
  - 24 apartamentos;

- Armazenamento de 2/3 do volume de água nos reservatórios superiores;
- Acréscimo de 50% do volume para irrigação do jardim e para casos emergenciais;

$$V_{req} = 200 \cdot 4 \cdot 24 \cdot \frac{2}{3} \cdot 1,5 = 19200 \text{ L}$$

Dessa forma, optou-se pela utilização de 2 reservatórios de polietileno com capacidade de 10 mil litros cada. A Figura 109 apresenta as dimensões do reservatório adotado.



**Figura 109 – Dimensões do reservatório adotado. (Fonte: Fortlev, 2021)**

Assim, definido o reservatório utilizado no projeto, para a aplicação da sobrecarga na laje da caixa d'água, considerou-se os reservatórios cheios ao mesmo tempo, e seu peso distribuído em duas áreas de 2,5 m x 2,5 m, onde foi previsto o posicionamento dos reservatórios segundo o projeto arquitetônico, conforme apresentado no Anexo A.

$$q_{reserv} = \frac{10\text{m}^3 \cdot 1000\text{kgf/m}^3}{(2,5\text{m} \cdot 2,5\text{m})} = 1600\text{kgf/m}^2 = 16 \text{ kN/m}^2$$



**Figura 110 – Peso dos reservatórios aplicado nos painéis de laje da caixa d’água. (Fonte: próprio autor, 2021)**

#### *5.2.5.2.4. Pressão do vento*

A pressão do vento na cobertura do edifício foi determinada conforme descrito no item 4.3.2.4. Assim, os coeficientes de pressão externa da cobertura, obtidos a partir do software *Ciclone*, estão apresentados na Figura 111, para ventos à 0° e à 180°, e na Figura 112, para ventos à 90° e 270°. Enquanto a Tabela 24 mostra os resultados obtidos para a pressão na cobertura com o vento incidindo nas direções 0° e 180° e a Tabela 25 mostra os resultados para as direções 90° e 270°.

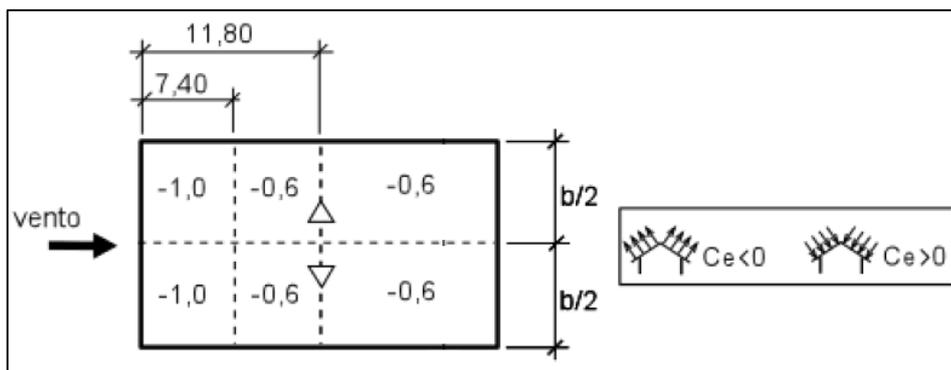


Figura 111 – Coeficientes de pressão externa ( $C_e$ ) da cobertura para os ventos  $0^\circ$  e  $180^\circ$ . (Fonte: próprio autor, 2021)

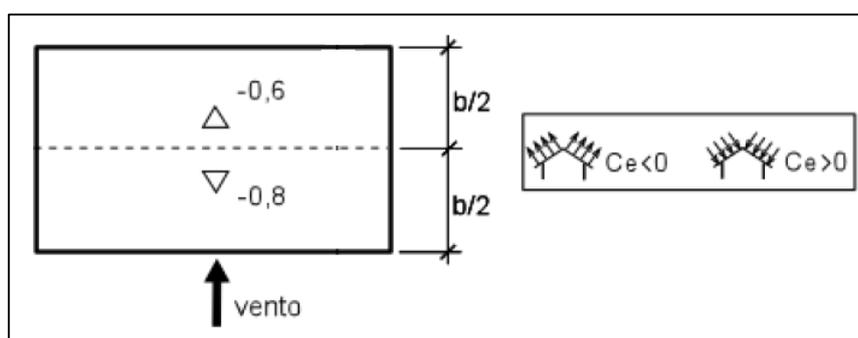


Figura 112 – Coeficientes de pressão externa ( $C_e$ ) da cobertura para os ventos  $90^\circ$  e  $270^\circ$ . (Fonte: próprio autor, 2021)

Tabela 24 – Pressão do vento na cobertura para os ventos  $0^\circ$  e  $180^\circ$ .

$V_0$ [m/s]	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$V_k$ [m/s]	$q$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$C_e$	$C_{pi}$	$\Delta P$ [kN/m <sup>2</sup> ]
45	1.00	0.947	1.00	42.63	1.11	-1.00	0.00	-1.11
45	1.00	0.947	1.00	42.63	1.11	-0.60	0.00	-0.67

Tabela 25 – Pressão do vento na cobertura para os ventos  $90^\circ$  e  $270^\circ$ .

$V_0$ [m/s]	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$V_k$ [m/s]	$q$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$C_e$	$C_{pi}$	$\Delta P$ [kN/m <sup>2</sup> ]
45	1.00	0.947	1.00	42.63	1.11	-0.80	0.00	-0.89
45	1.00	0.947	1.00	42.63	1.11	-0.60	0.00	-0.67

Os coeficientes de arrasto determinados a partir do software *Ciclone* e as pressões de arrasto calculadas para cada intervalo de altura do edifício estão apresentadas na Tabela 26 para todas as direções principais analisadas na face de barlavento.

Tabela 26 – Pressão de arrasto do vento para as direções principais.

Intervalo de altura			Pressão dinâmica do vento			Pressão de arrasto Vento 0° e 180°		Pressão de arrasto Vento 90° e 270°	
Descrição	$h_i$ [m]	$h_f$ [m]	$S_2$	$V_k$ [m/s]	$q$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$C_{a,0}$	$P_{a,0}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$C_{a,90}$	$P_{a,90}$ [kN/m <sup>2</sup> ]
Térreo - 1º pav.	0.00	6.65	0.792	35.62	0.78	1.16	0.90	1.19	0.93
2º pav. - 3º pav.	6.65	13.05	0.861	38.75	0.92	1.16	1.07	1.19	1.10
4º pav. - 5º pav.	13.05	19.45	0.905	40.74	1.02	1.16	1.18	1.19	1.21
6º pav. - Cobertura	19.45	28.00	0.947	42.63	1.11	1.16	1.29	1.19	1.33

Os coeficientes de pressão externa das paredes do edifício, obtidos com auxílio do software *Ciclone*, estão apresentados na Figura 113. Enquanto as pressões de sucção nas paredes estão apresentadas na Tabela 27, para as faces laterais, e na

Tabela 28, para a face sotavento, ambos calculados em função da pressão dinâmica do vento determinada para cada intervalo de altura, semelhante ao apresentado na Tabela 26.

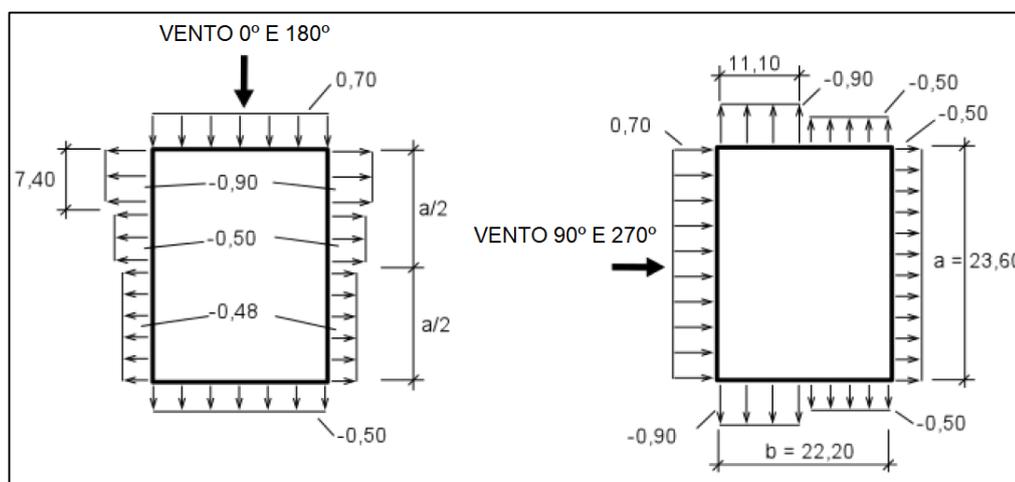


Figura 113 – Coeficientes de pressão externa ( $C_e$ ) das paredes para os ventos das direções principais.

(Fonte: próprio autor, 2021)

Tabela 27 – Pressão de sucção nas paredes laterais do edifício para as direções principais.

Intervalo de altura	Pressão interna	Pressão do Vento 0° e 180°						Pressão do Vento 90° e 270°			
		1º quarto		2º quarto		Última metade		Primeira metade		Última metade	
Descrição	C <sub>pi</sub>	C <sub>e</sub>	ΔP [kN/m <sup>2</sup> ]	C <sub>e</sub>	ΔP [kN/m <sup>2</sup> ]	C <sub>e</sub>	ΔP [kN/m <sup>2</sup> ]	C <sub>e</sub>	ΔP [kN/m <sup>2</sup> ]	C <sub>e</sub>	ΔP [kN/m <sup>2</sup> ]
Térreo - 1º pav.	0.00	-0.90	-0.70	-0.50	-0.39	-0.48	-0.37	-0.90	-0.70	-0.50	-0.39
2º pav. - 3º pav.	0.00	-0.90	-0.83	-0.50	-0.46	-0.48	-0.44	-0.90	-0.83	-0.50	-0.46
4º pav. - 5º pav.	0.00	-0.90	-0.92	-0.50	-0.51	-0.48	-0.49	-0.90	-0.92	-0.50	-0.51
6º pav. - Cobertura	0.00	-0.90	-1.00	-0.50	-0.56	-0.48	-0.53	-0.90	-1.00	-0.50	-0.56

Tabela 28 – Pressão de sucção na parede de sotavento para as direções principais.

Intervalo de altura	Pressão interna	Pressão do vento 0°, 90°, 180° e 270°	
		C <sub>e</sub>	ΔP [kN/m <sup>2</sup> ]
Descrição	C <sub>pi</sub>	C <sub>e</sub>	ΔP [kN/m <sup>2</sup> ]
Térreo - 1º pav.	0.00	-0.50	-0.39
2º pav. - 3º pav.	0.00	-0.50	-0.46
4º pav. - 5º pav.	0.00	-0.50	-0.51
6º pav. - Cobertura	0.00	-0.50	-0.56

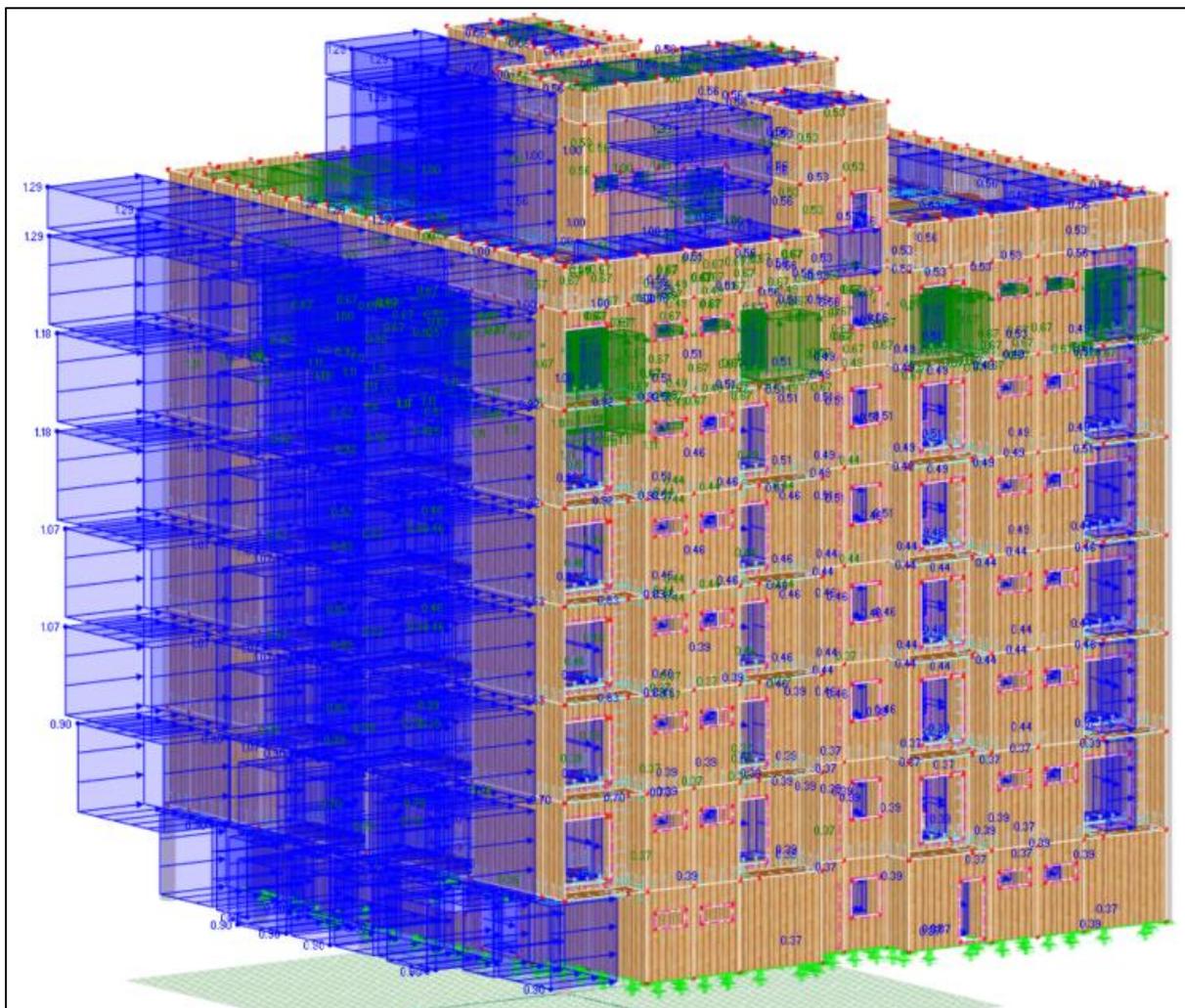


Figura 114 – Pressão do vento atuante na direção 0° aplicada no modelo. (Fonte: próprio autor, 2021)

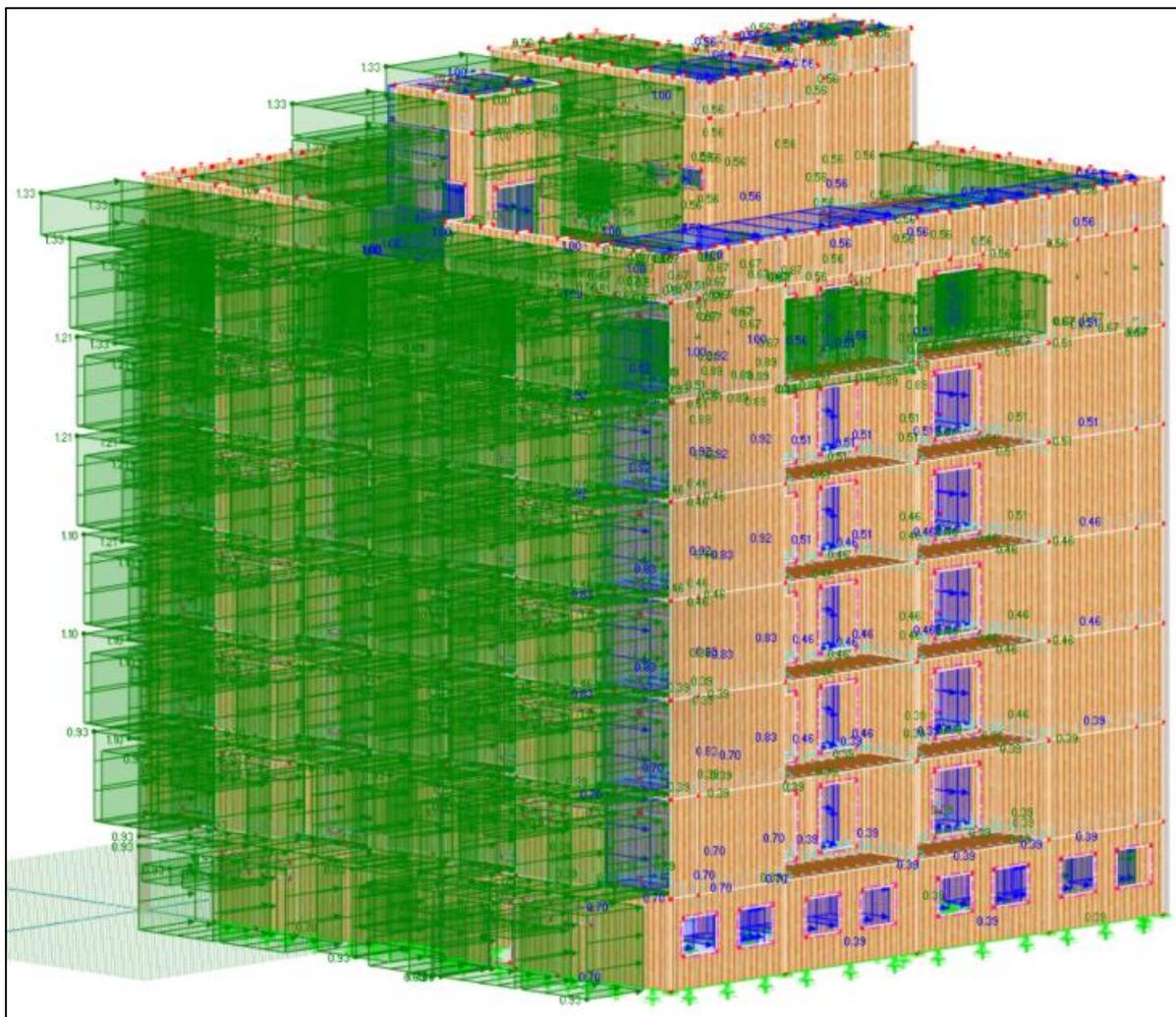


Figura 115 – Pressão do vento atuante na direção 90° aplicada no modelo. (Fonte: próprio autor, 2021)

### 5.3. DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL

#### 5.3.1. VIGAS

O dimensionamento das vigas foi feito de acordo com o procedimento descrito no item 4.5.1. Desse modo, a seguir serão apresentados os resultados obtidos para os elementos críticos em cada verificação para cada seção transversal presente no projeto. Assim, serão verificadas tanto as vigas principais das escadas quanto vigas ocultas e aparentes do pavimento tipo, térreo e cobertura.

Tabela 29 – Propriedades geométricas das vigas analisadas.

Identificação	Base	Altura	Momento de inércia		Altura de inspeção		Módulo de resistência		Área da seção
			$I_z$ [cm <sup>4</sup> ]	$I_y$ [cm <sup>4</sup> ]	$y_z$ [cm]	$y_y$ [cm]	$W_z$ [cm <sup>3</sup> ]	$W_y$ [cm <sup>3</sup> ]	
Elemento	b [cm]	h [cm]	$I_z$ [cm <sup>4</sup> ]	$I_y$ [cm <sup>4</sup> ]	$y_z$ [cm]	$y_y$ [cm]	$W_z$ [cm <sup>3</sup> ]	$W_y$ [cm <sup>3</sup> ]	A [cm <sup>2</sup> ]
Viga oculta	20	30	45000.00	20000.00	15.00	10.00	3000.00	2000.00	600.00
Viga aparente	25	30	56250.00	39062.50	15.00	12.50	3750.00	3125.00	750.00
Viga principal escada	15	30	33750.00	8437.50	15.00	7.50	2250.00	1125.00	450.00

- **Flexão simples reta**

A viga crítica em relação à flexão simples reta corresponde a VT103, que é uma viga aparente do térreo que serve de apoio para as vigas da escada. O diagrama de momentos fletores dessa viga para a combinação crítica está apresentado na Figura 116 e o momento máximo ocorre em um ponto de apoio da viga da escada.

Tabela 30 – Verificação das vigas à flexão simples reta.

Identificação	Momento fletor máximo	Tensão normal máxima	Requisição	Verificação
Elemento	$M_z$ [kN.m]	$\sigma_{M_z,d,máx}$ [MPa]	$\sigma_{M_z,d,máx}/f_{m,d}$	Flexão simples reta
Viga oculta (V102 - 6º pav)	9.24	3.08	27.02%	OK
Viga aparente (VT103)	15.34	4.09	39.87%	OK
Viga principal escada	8.90	3.96	34.70%	OK

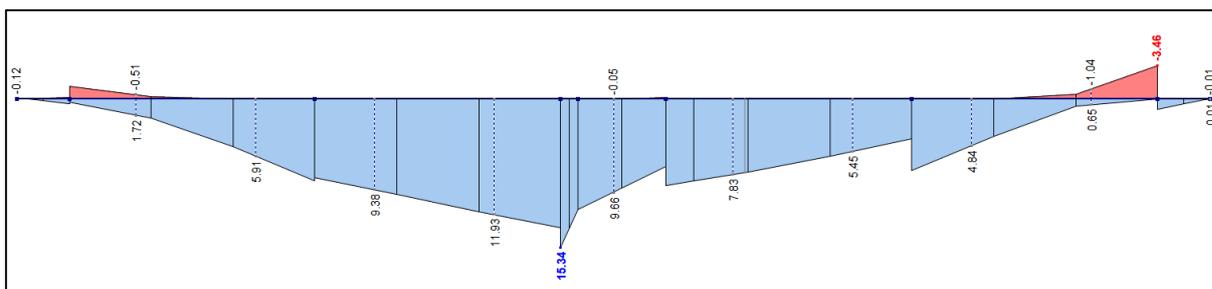


Figura 116 – Diagrama de momentos fletores da viga VT103 para a combinação crítica. (Fonte: próprio autor, 2021)

- **Cisalhamento longitudinal**

As vigas críticas em relação ao cisalhamento correspondem a VT22, que é uma viga oculta do térreo que serve de apoio a viga aparente VT114, e a VT58, que é uma viga aparente do térreo que recebe os carregamentos de varanda, lavanderia e da parede superior. Os diagramas de forças cortantes dessas vigas para a combinação crítica estão apresentados na Figura 117, na qual a força de cisalhamento máxima ocorre no ponto de apoio da viga VT114 na viga VT22, e na Figura 118, na qual a força de cisalhamento máxima ocorre no apoio onde está localizado o pilar aparente PT62.

Tabela 31 – Verificação das vigas ao cisalhamento.

Identificação	Força cortante máxima		Tensão cisalhante máxima	Requisição	Verificação
	$V_{y,máx}$ [kN]	$V_{z,máx}$ [kN]	$\tau_{d,máx}$ [MPa]	$\tau_{d,máx}/f_{v,d}$	Cisalhamento
Viga oculta (VT22)	24.91	12.29	0.62	42.14%	OK
Viga aparente (VT58)	28.12	14.33	0.56	42.29%	OK
Viga principal escada	10.25	0.78	0.34	23.12%	OK

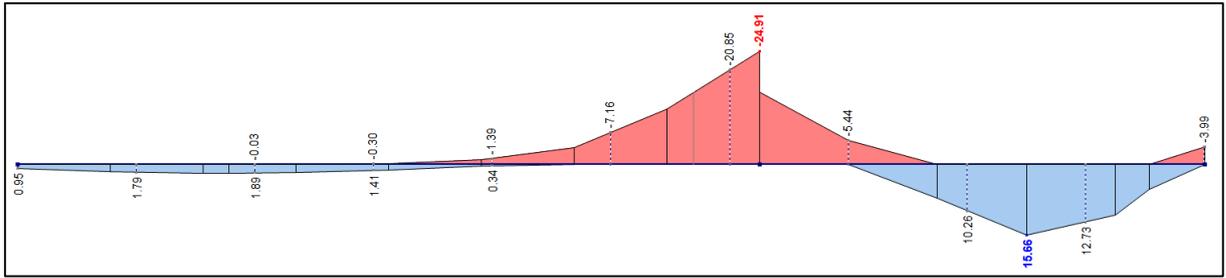


Figura 117 – Diagrama de forças cortantes da viga VT22 para a combinação crítica. (Fonte: próprio autor, 2021)

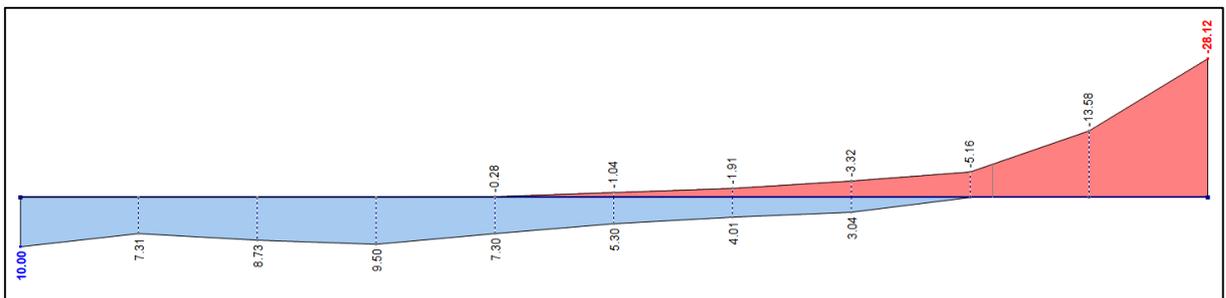


Figura 118 – Diagrama de forças cortantes da viga VT58 para a combinação crítica. (Fonte: próprio autor, 2021)

- **Estabilidade lateral**

A estabilidade lateral das vigas foi verificada para os maiores vãos e para as maiores tensões de compressão. Dessa forma, constatou-se que a viga principal da escada é o elemento crítico para esta verificação.

Tabela 32 – Verificação das vigas à estabilidade lateral.

Identificação	Momento fletor máximo	Vão entre travamentos	Coefficiente de correção	Tensão de compressão	Tensão limite de estabilidade	Requisição	Verificação
Elemento	$M_z$ [kN.m]	$L_1$ [cm]	$\beta_M$	$\sigma_{c,d}$ [MPa]	$\sigma_{estabilidade}$ [MPa]	$\sigma_{c,d}/\sigma_{estabilidade}$	Estabilidade lateral
Viga oculta (V102 - 6º pav)	9.24	412.5	7.17	3.08	49.50	6.22%	OK
Viga aparente (VT103)	15.34	322.5	6.33	4.09	80.57	5.08%	OK
Viga principal escada	8.90	340	8.79	3.96	36.71	10.77%	OK
Viga oculta (VT63)	4.51	472.5	7.17	1.50	45.99	3.48%	OK
Viga aparente (V62 - 5º pav)	10.24	565	6.33	2.73	51.10	5.94%	OK

- **Deslocamentos excessivos**

A viga crítica em relação ao deslocamento vertical corresponde à V03 do 5º pavimento, que é a viga aparente com maior vão no projeto. O diagrama de deformações verticais dessa viga para a combinação crítica está apresentado na Figura 119.

Tabela 33 – Verificação da deformação das vigas.

Identificação	Vão efetivo	Classificação	Flecha máxima	Flecha limite	Requisição	Verificação
Elemento	L [cm]	Tipo de vinculação	$\delta_{fin,m\acute{a}x}$ [mm]	$\delta_{fin,lim}$ [mm]	$\delta_{fin,m\acute{a}x}/\delta_{fin,lim}$	Flecha final
Viga oculta (V102 - 6ºpav)	412.5	Viga biapoiada	6.70	8.25	78.79%	OK
Viga principal escada	340	Viga biapoiada	5.90	6.80	86.76%	OK
Viga aparente (V03 - 5ºpav)	565	Viga biapoiada	10.30	11.30	91.15%	OK

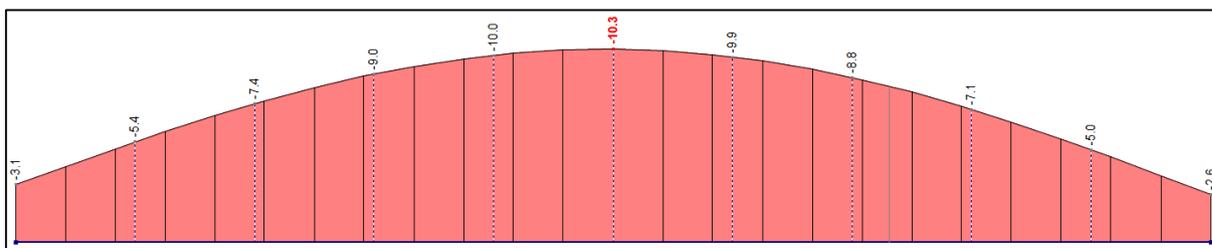


Figura 119 – Diagrama de deformações verticais da viga V03 do 5º pavimento para a combinação crítica.

(Fonte: próprio autor, 2021)

### 5.3.2. PILARES

O dimensionamento dos pilares foi feito de acordo com o procedimento descrito no item 4.5.2. Desse modo, a seguir serão apresentados os resultados obtidos para os elementos críticos em cada verificação para cada seção transversal presente no projeto. Assim, serão verificados os pilares ocultos e aparentes do pavimento tipo, térreo e cobertura.

Tabela 34 – Propriedades geométricas dos pilares analisados.

Identificação	Vão efetivo	Base	Altura	Momento de inércia		Altura de inspeção		Módulo de resistência		Área da seção
				$I_z$	$I_y$	$y_z$	$y_y$	$W_z$	$W_y$	
Elemento	L [cm]	b [cm]	h [cm]	$I_z$ [cm <sup>4</sup> ]	$I_y$ [cm <sup>4</sup> ]	$y_z$ [cm]	$y_y$ [cm]	$W_z$ [cm <sup>3</sup> ]	$W_y$ [cm <sup>3</sup> ]	A [cm <sup>2</sup> ]
Pilar oculto	290	25	35	89322.9	45572.9	17.5	12.5	5104.2	3645.8	875.0
Pilar aparente	290	35	35	125052.1	125052.1	17.5	17.5	7145.8	7145.8	1225.0
Pilar oculto cobertura	390	25	35	89322.9	45572.9	17.5	12.5	5104.2	3645.8	875.0

A partir dos valores máximos de força normal e momento fletor obtidos nas combinações, foram definidos os pilares críticos do projeto, apresentados na Tabela 35 com os valores dos esforços solicitantes e das tensões normais oriundas dos mesmos. Vale destacar que os esforços de tração e cisalhamento também foram verificados, porém, devido à baixa requisição em comparação com os esforços de compressão, optou-se por apresentar apenas as verificações críticas de flexocompressão e estabilidade.

Tabela 35 – Esforços solicitantes máximos dos pilares analisados.

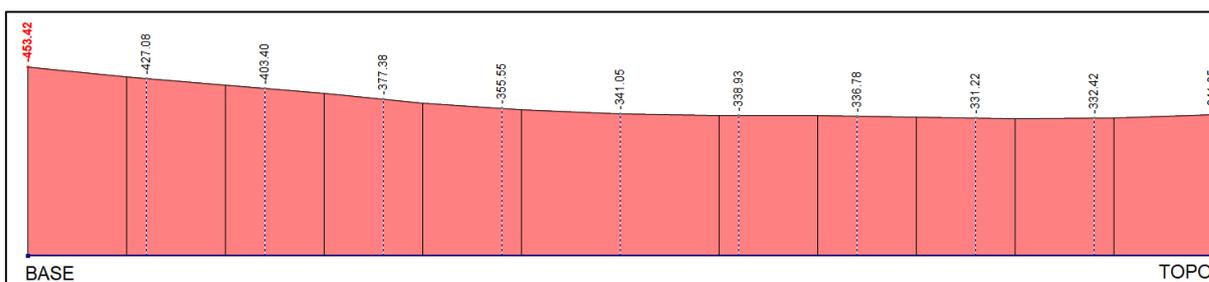
Identificação	Esforços solicitantes			Tensões normais		
	$N_{c,d}$ [kN]	$M_{z,d}$ [kN.m]	$M_{y,d}$ [kN.m]	$\sigma_{N_{c,d}}$ [MPa]	$\sigma_{M_{z,d}}$ [MPa]	$\sigma_{M_{y,d}}$ [MPa]
Pilar oculto (PT08)	-453.42	12.58	3.87	5.18	2.46	1.06
Pilar aparente (PT19)	-559.27	14.57	8.70	4.57	2.04	1.22
Pilar oculto (PC07)	-68.81	8.35	2.13	0.79	1.64	0.58

- **Flexocompressão**

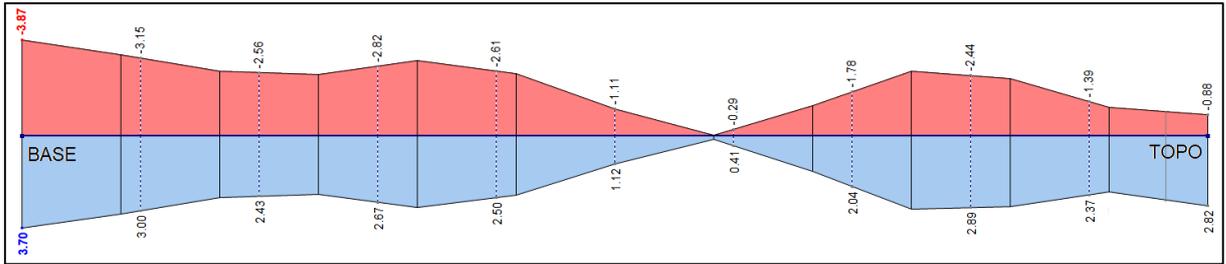
O pilar crítico em relação à flexocompressão corresponde ao PT08, que é um pilar oculto do térreo posicionado ao lado de dois pilares aparentes. No alinhamento desses pilares, no pavimento tipo, existem paredes de CLT, o que não ocorre no térreo, sendo essa uma justificativa para os esforços críticos que ocorrem neste pilar, uma vez que ele passa a absorver certa parcela dos esforços oriundos das paredes.

**Tabela 36 – Verificação dos pilares à flexocompressão.**

Identificação	Condição 1 (My,máx)	Condição 2 (Mz,máx)	Verificação	
Elemento	Requisição condição 1	Requisição condição 2	Requisição máxima	Flexocompressão
Pilar oculto (PT08)	0.55	0.51	55.12%	OK
Pilar aparente (PT19)	0.54	0.52	54.04%	OK
Pilar oculto (PC07)	0.19	0.16	18.56%	OK

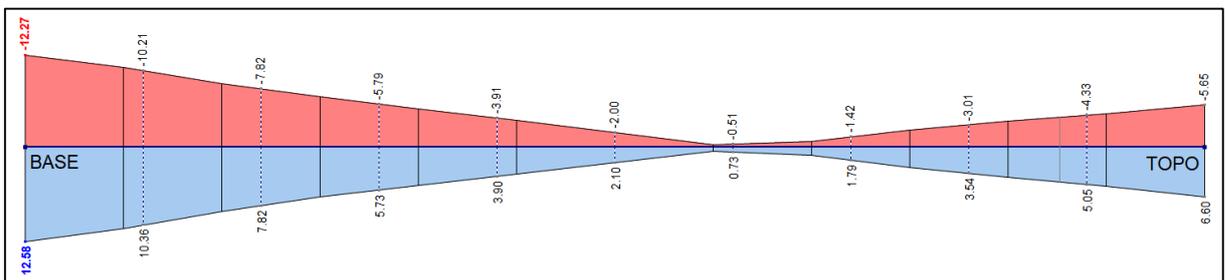


**Figura 120 – Diagrama de forças normais do pilar PT08 para a combinação crítica. (Fonte: próprio autor, 2021)**



**Figura 121 – Diagrama de momentos fletores na direção Y do pilar PT08 para a combinação crítica.**

(Fonte: próprio autor, 2021)



**Figura 122 – Diagrama de momentos fletores na direção Z do pilar PT08 para a combinação crítica.**

(Fonte: próprio autor, 2021)

- **Estabilidade**

Assim como observado na verificação da flexocompressão, para a verificação da estabilidade o pilar PT08 foi o crítico. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 37, para o cálculo da esbeltez, e na Tabela 38 para a verificação da estabilidade.

Tabela 37 – Cálculo da esbeltez dos pilares.

Identificação	Comprimento de flambagem		Esbeltez		Verificação	Esbeltez relativa		
	$K_E$	$L_0$ [cm]	$\lambda_z$	$\lambda_y$		Esbeltez	$\lambda_{rel,z}$	$\lambda_{rel,y}$
Pilar oculto (PT08)	1.00	290	28.7	40.2	OK	0.49	0.68	Esbelta
Pilar aparente (PT19)	1.00	290	28.7	28.7	OK	0.49	0.49	Esbelta
Pilar oculto (PC07)	1.00	390	38.6	54.0	OK	0.65	0.92	Esbelta

Tabela 38 – Verificação da estabilidade dos pilares.

Identificação	Coeficientes				Condição 1 ( $M_y, \text{máx}$ )	Condição 2 ( $M_z, \text{máx}$ )	Verificação	
	$k_z$	$k_y$	$k_{cz}$	$k_{cy}$	Requisição condição 1	Requisição condição 2	Requisição máxima	Estabilidade peças comprimidas
Pilar oculto (PT08)	0.63	0.75	0.98	0.94	0.93	0.91	92.66%	OK
Pilar aparente (PT19)	0.63	0.63	0.98	0.98	0.80	0.78	80.27%	OK
Pilar oculto (PC07)	0.73	0.95	0.94	0.83	0.29	0.27	29.45%	OK

- **Deslocamentos excessivos**

O deslocamento horizontal máximo ocorre no topo do pilar PC08, conforme apresentado na Figura 123. Esse pilar está localizado na cobertura na região das escadas e não possui parede na direção Y para seu travamento, o que pode justificar o deslocamento crítico. Vale destacar que o deslocamento horizontal crítico é oriundo das combinações de deformação devido ao vento.

Tabela 39 – Verificação dos deslocamentos horizontais máximos dos pilares.

Deslocamento máximo global - altura total do edifício				
H [m]	$\delta_{fin,lim}$ [mm]	$\delta_{fin,máx}$ [mm]	Requisição	Verificação
28	23.3	21.5	92.14%	OK
Deslocamento máximo local - desnível entre pavimentos				
H <sub>i</sub> [m]	$\delta_{fin,lim}$ [mm]	$\delta_{fin,máx}$ [mm]	Requisição	Verificação
3.2	4.3	3.4	79.07%	OK
Deslocamento máximo local - desnível da cobertura				
H <sub>2</sub> [m]	$\delta_{fin,lim}$ [mm]	$\delta_{fin,máx}$ [mm]	Requisição	Verificação
4.2	8.4	5.1	60.71%	OK

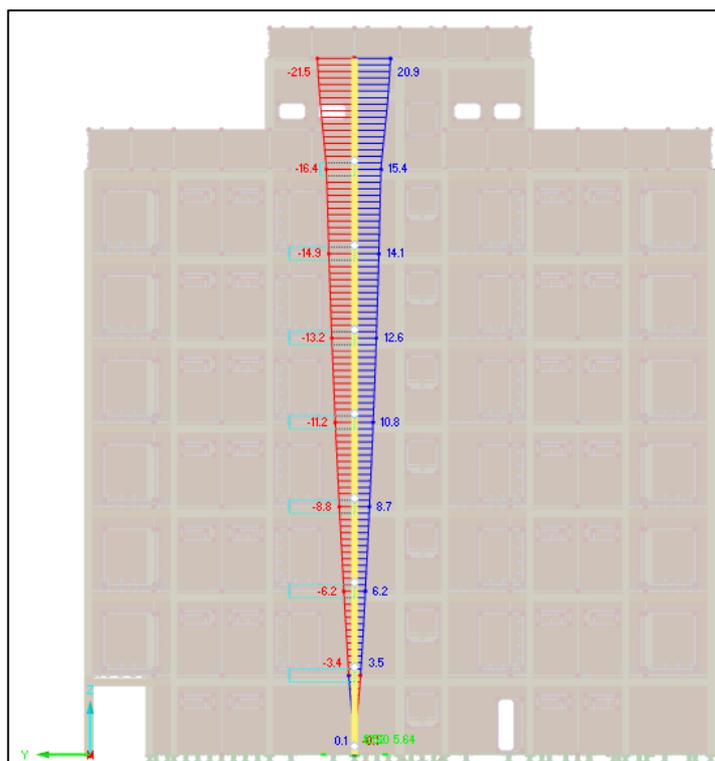


Figura 123 – Diagrama de deslocamentos horizontais na direção Y do pilar PC08 para a combinação crítica. (Fonte: próprio autor, 2021)

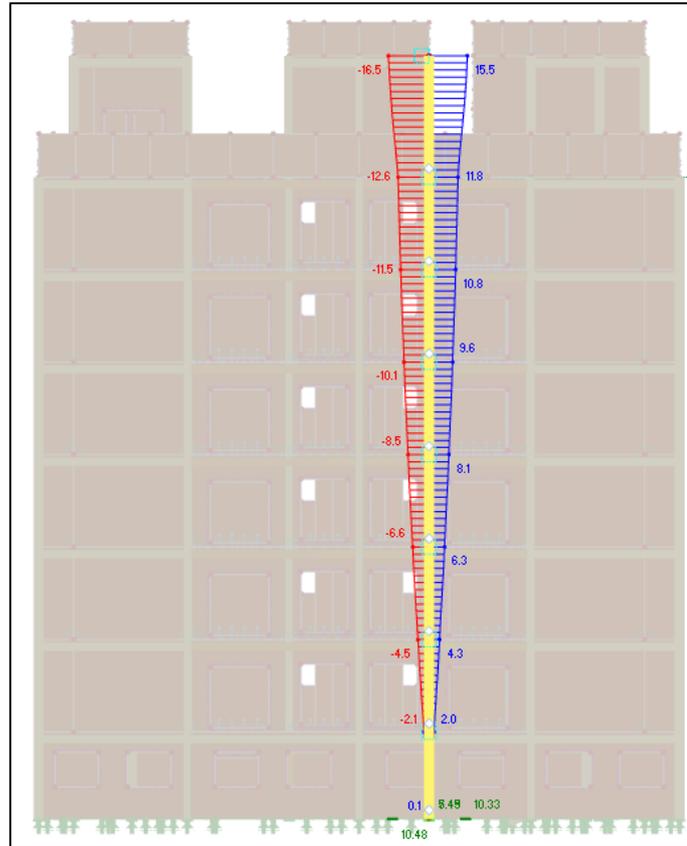


Figura 124 – Diagrama de deslocamentos horizontais na direção X do pilar PC07 para a combinação crítica. (Fonte: próprio autor, 2021)

### 5.3.3. LAJES

O dimensionamento das lajes foi feito de acordo com o procedimento descrito no item 4.5.3. Desse modo, a seguir serão apresentados os resultados obtidos para os elementos críticos em cada verificação.

- **Rigidez à flexão fora do plano**

Tabela 40 – Rigidez à flexão fora do plano para a direção X (mais rígida) dos painéis de laje.

Camada ( i )	Espessura (h <sub>i</sub> ) [mm]	E <sub>i</sub> [MPa]	a <sub>i</sub> [mm]	E <sub>i</sub> .b <sub>i</sub> .h <sub>i</sub> <sup>3</sup> /12 [kN.cm <sup>2</sup> ]	E <sub>i</sub> .b <sub>i</sub> .h <sub>i</sub> .a <sub>i</sub> <sup>2</sup> [kN.cm <sup>2</sup> ]
1 (Longitudinal)	40	11000	-80	5.87E+05	2.82E+07
2 (Transversal)	40	0	-40	0	0
3 (Longitudinal)	40	11000	0	5.87E+05	0
4 (Transversal)	40	0	40	0	0
5 (Longitudinal)	40	11000	80	5.87E+05	2.82E+07
<b>h<sub>CLT</sub> [mm]</b>	200		<b>Σ</b>	1.76E+06	5.63E+07
				<b>K<sub>x,CLT</sub> [kN.cm<sup>2</sup>]</b>	<b>5.81E+07</b>

Tabela 41 – Rigidez à flexão fora do plano para a direção Y (menos rígida) dos painéis de laje.

Camada ( i )	Espessura (h <sub>i</sub> ) [mm]	E <sub>i</sub> [MPa]	a <sub>i</sub> [mm]	E <sub>i</sub> .b <sub>i</sub> .h <sub>i</sub> <sup>3</sup> /12 [kN.cm <sup>2</sup> ]	E <sub>i</sub> .b <sub>i</sub> .h <sub>i</sub> .a <sub>i</sub> <sup>2</sup> [kN.cm <sup>2</sup> ]
1 (Transversal)	40	0	-80	0	0
2 (Longitudinal)	40	11000	-40	5.87E+05	7.04E+06
3 (Transversal)	40	0	0	0	0
4 (Longitudinal)	40	11000	40	5.87E+05	7.04E+06
5 (Transversal)	40	0	80	0	0
<b>h<sub>CLT</sub> [mm]</b>	200		<b>Σ</b>	1.17E+06	1.41E+07
				<b>K<sub>y,CLT</sub> [kN.cm<sup>2</sup>]</b>	<b>1.53E+07</b>

- Rigidez ao cisalhamento fora do plano

Tabela 42 – Rigidez ao cisalhamento fora do plano para a direção X (mais rígida) dos painéis de laje.

Camada ( i )	Espessura (h <sub>i</sub> ) [mm]	G <sub>i</sub> [MPa]	A <sub>i</sub> [cm <sup>2</sup> ]	G <sub>i</sub> ·A <sub>i</sub> [kN]
1 (Longitudinal)	40	690	400	27600
2 (Transversal)	40	50	400	2000
3 (Longitudinal)	40	690	400	27600
4 (Transversal)	40	50	400	2000
5 (Longitudinal)	40	690	400	27600
<b>h<sub>CLT</sub> [mm]</b>	200		<b>Σ</b>	86800
			<b>κ</b>	0.24
			<b>S<sub>x,CLT</sub> [kN]</b>	<b>2.08E+04</b>

Tabela 43 – Rigidez ao cisalhamento fora do plano para a direção Y (menos rígida) dos painéis de laje.

Camada ( i )	Espessura (h <sub>i</sub> ) [mm]	G <sub>i</sub> [MPa]	A <sub>i</sub> [cm <sup>2</sup> ]	G <sub>i</sub> .A <sub>i</sub> [kN]
1 (Transversal)	40	50	400	2000
2 (Longitudinal)	40	690	400	27600
3 (Transversal)	40	50	400	2000
4 (Longitudinal)	40	690	400	27600
5 (Transversal)	40	50	400	2000
<b>h<sub>CLT</sub> [mm]</b>	200		<b>Σ</b>	61200
			<b>κ</b>	0.24
			<b>S<sub>y,CLT</sub> [kN]</b>	<b>1.47E+04</b>

- **Propriedades da seção transversal efetiva**

**Tabela 44 – Área efetiva na direção X (mais rígida) dos painéis de laje.**

<b>Camada ( i )</b>	<b>Espessura (hi) [mm]</b>	<b>E<sub>i</sub> [MPa]</b>	<b>A<sub>0,x,liq</sub> [cm<sup>2</sup>]</b>
1 (Longitudinal)	40	11000	400
2 (Transversal)	40	0	0
3 (Longitudinal)	40	11000	400
4 (Transversal)	40	0	0
5 (Longitudinal)	40	11000	400
<b>E<sub>c</sub> [MPa]</b>	11000	<b>Σ</b>	1200

**Tabela 45 – Área efetiva na direção Y (menos rígida) dos painéis de laje.**

<b>Camada ( i )</b>	<b>Espessura (hi) [mm]</b>	<b>E<sub>i</sub> [MPa]</b>	<b>A<sub>i</sub> [cm<sup>2</sup>]</b>
1 (Transversal)	40	0	0
2 (Longitudinal)	40	11000	400
3 (Transversal)	40	0	0
4 (Longitudinal)	40	11000	400
5 (Transversal)	40	0	0
<b>E<sub>c</sub> [MPa]</b>	11000	<b>Σ</b>	800

Tabela 46 – Propriedades da seção transversal efetiva na direção X (mais rígida) dos painéis de laje.

$A_{0,x,liq}$ [cm <sup>2</sup> ]	$I_{0,x,liq}$ [cm <sup>4</sup> ]	$E_{0,x,liq}$ [kN/cm <sup>2</sup> ]	$W_{0,x,liq}$ [cm <sup>3</sup> ]
1200	5.28E+04	871.20	5280,0

Tabela 47 – Propriedades da seção transversal efetiva na direção Y (menos rígida) dos painéis de laje.

$A_{0,y,liq}$ [cm <sup>2</sup> ]	$I_{0,y,liq}$ [cm <sup>4</sup> ]	$E_{0,y,liq}$ [kN/cm <sup>2</sup> ]	$W_{0,y,liq}$ [cm <sup>3</sup> ]
800	1.39E+04	228.80	2311.1

- **Momento de inércia efetivo - Método Gamma**

A rigidez efetiva dos painéis de laje para o ELS foi determinada pelo Método Gamma, conforme descrito no item 4.5.3. Para tal, utilizou-se as dimensões do painel de laje PL01 2550 x 5200 mm.

Tabela 48 – Rigidez efetiva na direção X dos painéis de laje calculada pelo Método Gamma.

b	2550 mm
$L_{ef}$	5200 mm
$\gamma_1$	0.89
$\gamma_2$	1.00
$\gamma_3$	0.89
$a_1$	80 mm
$a_2$	0 mm
$a_3$	80 mm
$I_{x,ef}$	1.20E+05 cm <sup>4</sup>
$I_{x,bruto}$	1.70E+05 cm <sup>4</sup>
$E_{x,ef}$	775.02 kN/cm <sup>2</sup>

**Tabela 49 – Rigidez efetiva na direção Y dos painéis de laje calculada pelo Método Gamma.**

b	5200 mm
L <sub>ef</sub>	2550 mm
γ <sub>1</sub>	0.89
γ <sub>2</sub>	1.00
γ <sub>3</sub>	0.89
a <sub>1</sub>	40 mm
a <sub>2</sub>	0 mm
a <sub>3</sub>	40 mm
I <sub>y,ef</sub>	3.30E+04 cm <sup>4</sup>
I <sub>y,bruto</sub>	3.47E+05 cm <sup>4</sup>
E <sub>y,ef</sub>	104.72 kN/cm <sup>2</sup>

- **Flexão fora do plano**

A laje crítica em relação à flexão fora do plano é a PLC01 que corresponde à laje que sustenta as máquinas do elevador do edifício. A seguir estão apresentadas as verificações das lajes submetidas aos momentos máximos na direção X e Y.

**Tabela 50 – Verificação dos painéis de laje à flexão fora do plano.**

Identificação	Momentos [kN.m/m]		Tensões [MPa]		Requisição	Verificação
	m <sub>x</sub>	m <sub>y</sub>	σ <sub>m,x,d</sub>	σ <sub>m,y,d</sub>		
Painel de laje						<b>Flexão fora do plano</b>
PL07 (6º pav)	15.46	-	2,93	-	25.68%	OK
PLC01 (elevador)	-	16.74	-	7,24	63,54%	OK

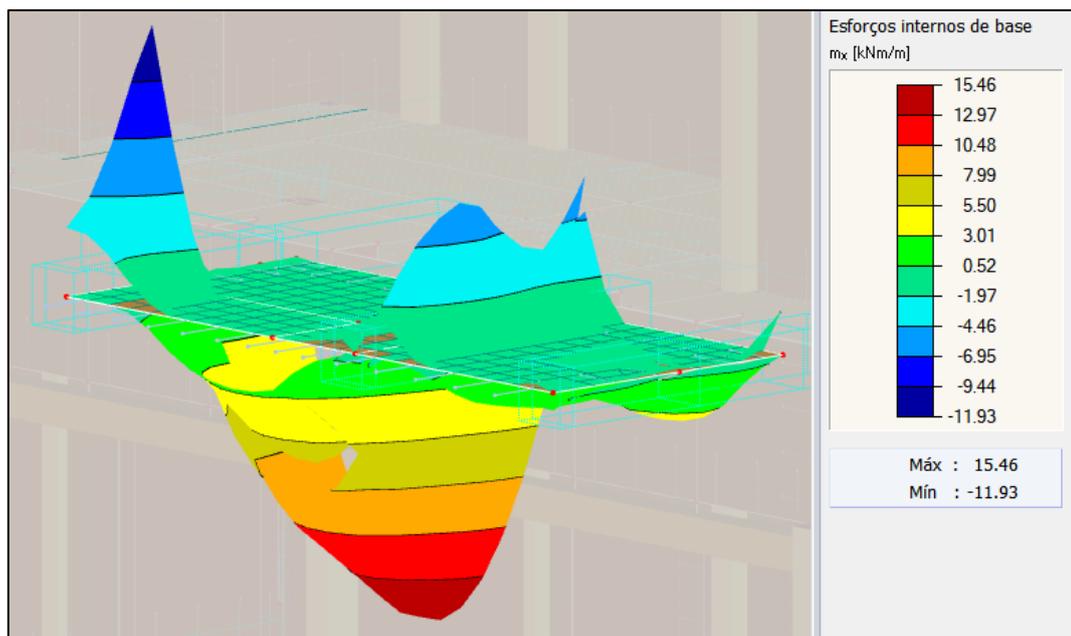


Figura 125 – Diagrama de momentos fletores na direção X da laje PL07 do 6º pavimento para a combinação crítica. (Fonte: próprio autor, 2021)

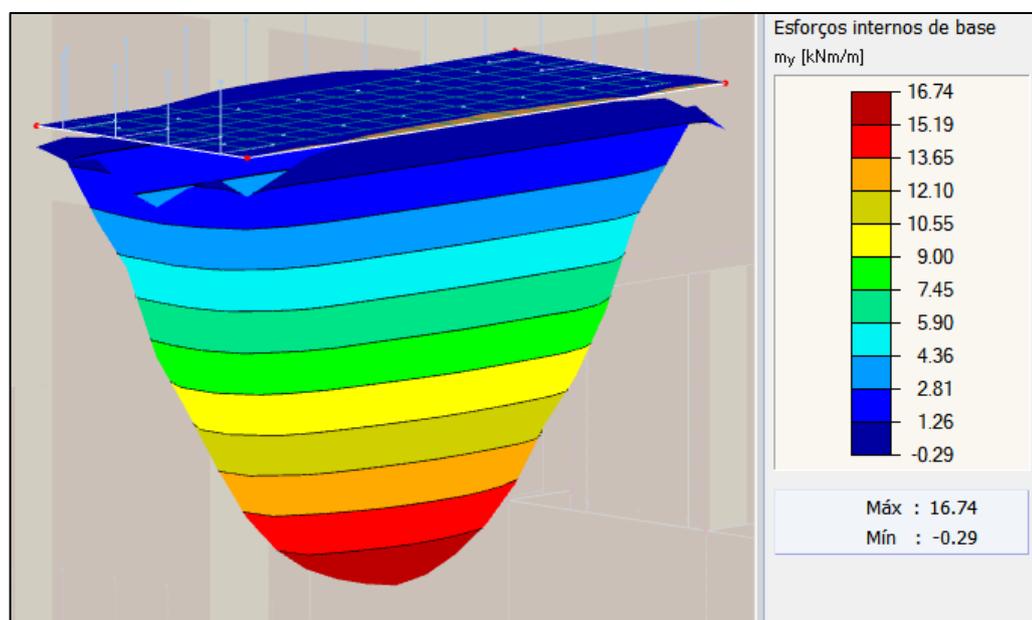
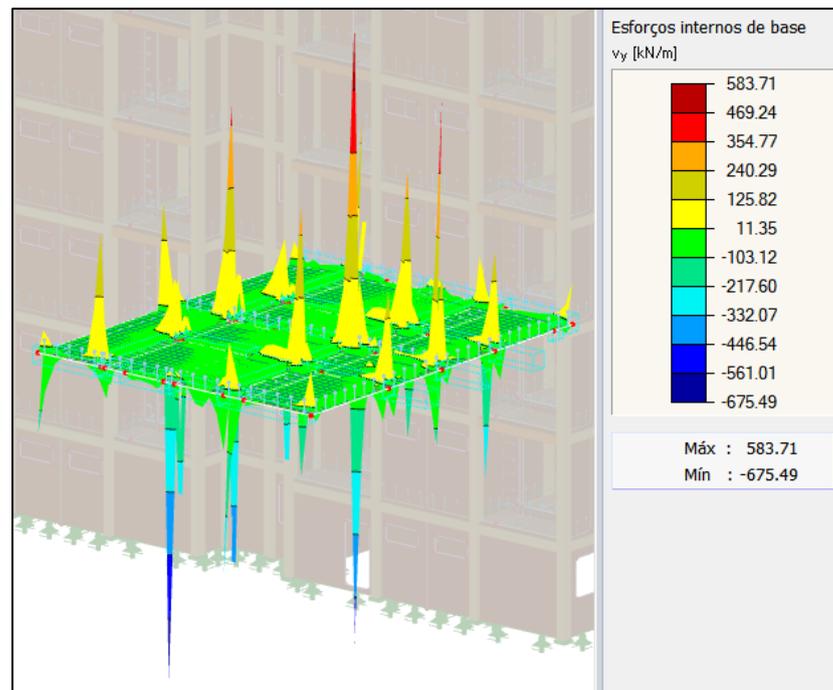


Figura 126 – Diagrama de momentos fletores na direção Y da laje PLC01 da casa de máquinas do elevador para a combinação crítica. (Fonte: próprio autor, 2021)

- **Cisalhamento fora do plano**

Os resultados obtidos no software *Dlubal RFEM* para as forças cortantes atuantes nas lajes foram distorcidos por alguns picos pontuais de solicitações nos nós entre pilares e lajes,

ocasionados pela força de compressão oriunda do pilar. Porém, na situação real, devido a configuração adotada para a ligação entre pilares, este pico não deve ocorrer, uma vez que o dispositivo de conexão entre pilares passa pelo furo da laje e evita a ocorrência do esmagamento.



**Figura 127 – Picos de forças cortantes ocorridos nos nós de ligação entre os pilares e as lajes. (Fonte: próprio autor, 2021)**

Dessa forma, para obter o esforço cisalhante máximo predominante na laje, desprezando os valores de pico, utilizou-se a ferramenta de filtro do software, regulando os limites máximos e mínimos da isobanda em escala de cores. Assim, a laje crítica em relação ao cisalhamento longitudinal e ao *rolling shear* é a PLC01 que corresponde à laje que sustenta as máquinas do elevador do edifício.

Tabela 51 –Verificação dos painéis de laje ao cisalhamento longitudinal.

Identificação		Força cortante	Momento estático	Tensão cisalhante	Requisição	Verificação
Painel de laje	Direção	$v$ [kN/m]	$S$ [cm <sup>3</sup> ]	$\tau_d$ [MPa]	$\tau_d/f_{v,d}$	Cisalhamento longitudinal
PLC01	X	29.15	3400.0	0.19	14.52%	OK
	Y	44.21	1600.0	0.51	39.45%	OK

Tabela 52 –Verificação dos painéis de laje ao cisalhamento *rolling shear*.

Identificação		Força cortante	Momento estático	Tensão cisalhante	Requisição	Verificação
Painel de laje	Direção	$v$ [kN/m]	$S_R$ [cm <sup>3</sup> ]	$\tau_{R,d}$ [MPa]	$\tau_{R,d}/f_{R,d}$	Rolling shear
PLC01	X	29.15	1600.0	0.09	21.74%	OK
	Y	44.21	200.0	0.06	15.69%	OK

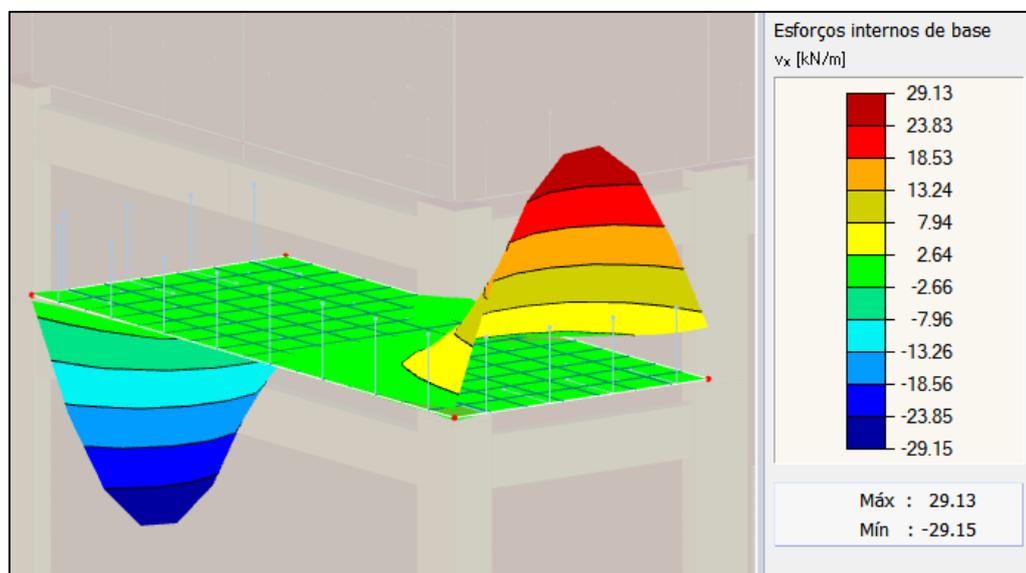
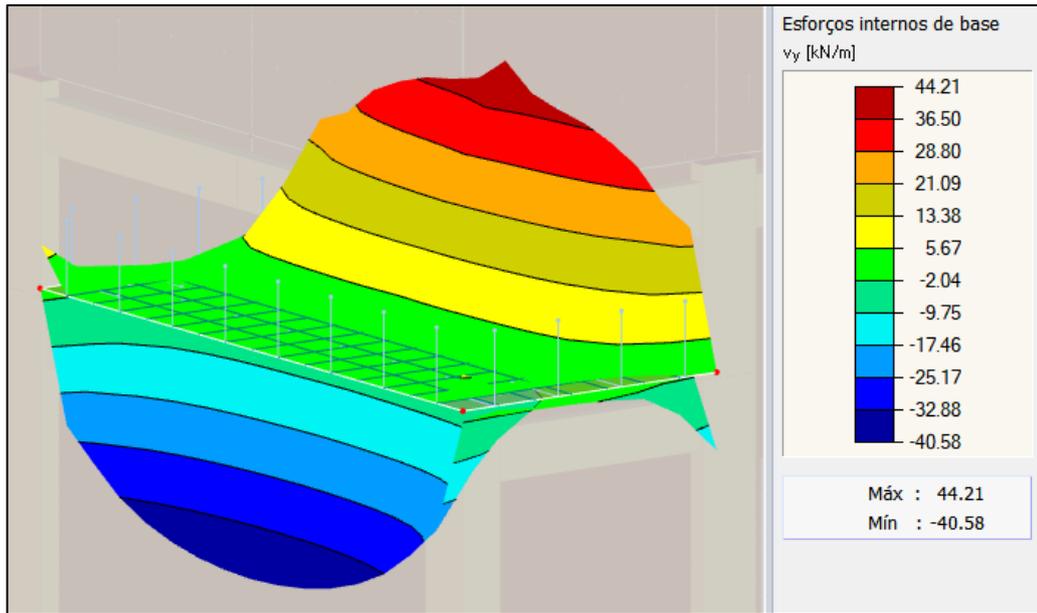


Figura 128 – Diagrama de forças cortantes na direção X da laje PLC01 para a combinação crítica. (Fonte: próprio autor, 2021)



**Figura 129 – Diagrama de forças cortantes na direção Y da laje PLC01 para a combinação crítica. (Fonte: próprio autor, 2021)**

- **Deslocamentos excessivos**

O deslocamento vertical máximo ocorre na laje PL03 do 5º pavimento, conforme apresentado na Figura 130. Essa laje está localizada na varanda do apartamento e, além do grande vão a ser vencido, a região em que o deslocamento máximo ocorre corresponde a borda da laje sem parede de apoio, o que justifica a condição crítica.

**Tabela 53 –Verificação do deslocamento vertical máximo dos painéis de laje.**

Painel	L [cm]	$\delta_{fin,lim}$ [mm]	$\delta_{fin,máx}$ [mm]	Requisição	Verificação
L03 (5º pav)	590	19.7	10.3	52.37%	OK

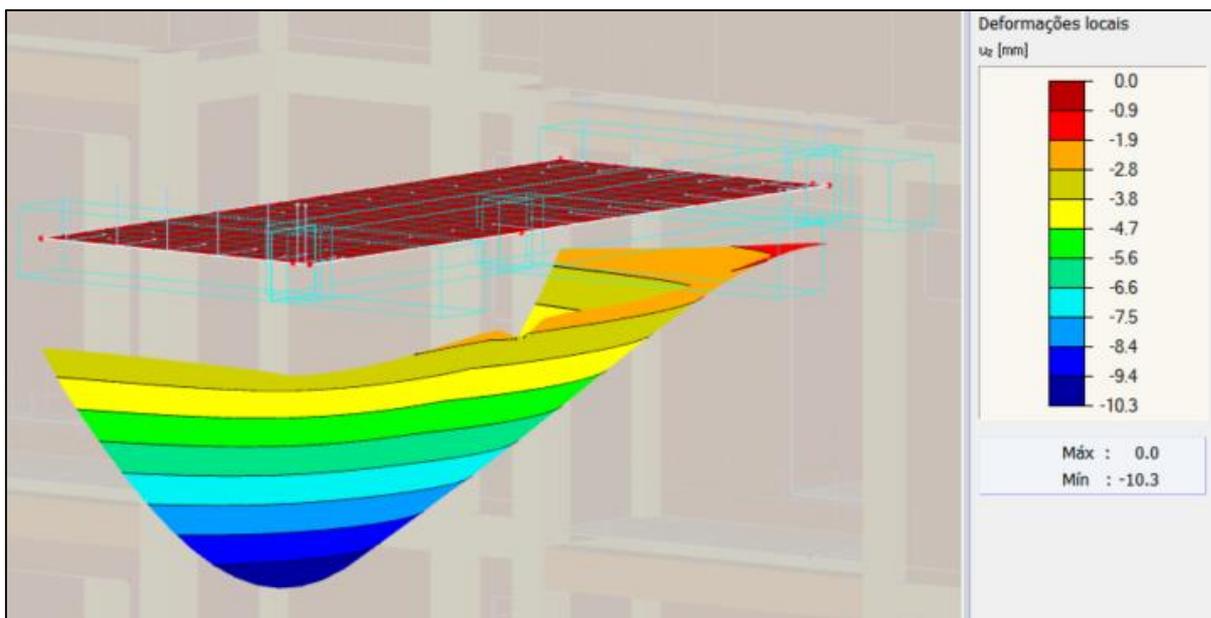


Figura 130 – Diagrama de deformações verticais da laje PL03 do 5º pavimento para a combinação crítica.  
(Fonte: próprio autor, 2021)

- **Vibrações excessivas**

A verificação de vibrações excessivas foi feita para a laje com maior vão no projeto e os resultados obtidos no cálculo estão apresentados na Tabela 54.

Tabela 54 – Cálculo da frequência de vibração para o painel de laje com maior vão.

L [m]	5.90
$K_{x,CLT}$ [N.m <sup>2</sup> /m]	5.81E+06
$\rho_{med}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	420
$h_{CLT}$ [m]	0.20
m [kg/m]	84
<b><math>f_1</math> [Hz]</b>	<b>11.87</b>

Assim, tem-se que a menor frequência de vibração que ocorre para as lajes do projeto é de 11,87 Hz, ou seja, maior que o limite de 8 Hz, portanto, a verificação é satisfeita.

## 5.3.4. PAREDES

- Rigidez à flexão fora do plano

Tabela 55 – Rigidez à flexão fora do plano para a direção X (mais rígida) dos painéis de parede.

Camada ( i )	Espessura (h <sub>i</sub> ) [mm]	E <sub>i</sub> [MPa]	a <sub>i</sub> [mm]	E <sub>i</sub> .b <sub>i</sub> .h <sub>i</sub> <sup>3</sup> /12 [kN.cm <sup>2</sup> ]	E <sub>i</sub> .b <sub>i</sub> .h <sub>i</sub> .a <sub>i</sub> <sup>2</sup> [kN.cm <sup>2</sup> ]
1 (Longitudinal)	30	11000	-60	2.48E+05	1.19E+07
2 (Transversal)	30	0	-30	0	0
3 (Longitudinal)	30	11000	0	2.48E+05	0
4 (Transversal)	30	0	30	0	0
5 (Longitudinal)	30	11000	60	2.48E+05	1.19E+07
<b>h<sub>CLT</sub> [mm]</b>	150		<b>Σ</b>	7.43E+05	2.38E+07
				<b>K<sub>x,CLT</sub> [kN.cm<sup>2</sup>]</b>	<b>2.45E+07</b>

Tabela 56 – Rigidez à flexão fora do plano para a direção Y (menos rígida) dos painéis de parede.

Camada ( i )	Espessura (h <sub>i</sub> ) [mm]	E <sub>i</sub> [MPa]	a <sub>i</sub> [mm]	E <sub>i</sub> .b <sub>i</sub> .h <sub>i</sub> <sup>3</sup> /12 [kN.cm <sup>2</sup> ]	E <sub>i</sub> .b <sub>i</sub> .h <sub>i</sub> .a <sub>i</sub> <sup>2</sup> [kN.cm <sup>2</sup> ]
1 (Transversal)	30	0	-60	0	0
2 (Longitudinal)	30	11000	-30	2.48E+05	2.97E+06
3 (Transversal)	30	0	0	0	0
4 (Longitudinal)	30	11000	30	2.48E+05	2.97E+06
5 (Transversal)	30	0	60	0	0
<b>h<sub>CLT</sub> [mm]</b>	150		<b>Σ</b>	4.95E+05	5.94E+06
				<b>K<sub>y,CLT</sub> [kN.cm<sup>2</sup>]</b>	<b>6.44E+06</b>

- Rigidez ao cisalhamento fora do plano

Tabela 57 – Rigidez ao cisalhamento fora do plano para a direção X (mais rígida) dos painéis de parede.

Camada ( i )	Espessura (h <sub>i</sub> ) [mm]	G <sub>i</sub> [MPa]	A <sub>i</sub> [cm <sup>2</sup> ]	G <sub>i</sub> .A <sub>i</sub> [kN]
1 (Longitudinal)	30	690	300	20700
2 (Transversal)	30	50	300	1500
3 (Longitudinal)	30	690	300	20700
4 (Transversal)	30	50	300	1500
5 (Longitudinal)	30	690	300	20700
<b>h<sub>CLT</sub> [mm]</b>	150		<b>Σ</b>	65100
			<b>κ</b>	0.24
			<b>S<sub>x,CLT</sub> [kN]</b>	<b>1.56E+04</b>

Tabela 58 – Rigidez ao cisalhamento fora do plano para a direção Y (menos rígida) dos painéis de parede.

Camada ( i )	Espessura (h <sub>i</sub> ) [mm]	G <sub>i</sub> [MPa]	A <sub>i</sub> [cm <sup>2</sup> ]	G <sub>i</sub> .A <sub>i</sub> [kN]
1 (Transversal)	30	50	300	1500
2 (Longitudinal)	30	690	300	20700
3 (Transversal)	30	50	300	1500
4 (Longitudinal)	30	690	300	20700
5 (Transversal)	30	50	300	1500
<b>h<sub>CLT</sub> [mm]</b>	150		<b>∑</b>	45900
			<b>κ</b>	0.24
			<b>S<sub>y,CLT</sub> [kN]</b>	<b>1.10E+04</b>

- **Propriedades da seção transversal efetiva**

**Tabela 59 – Área efetiva na direção X (mais rígida) dos painéis de parede.**

<b>Camada ( i )</b>	<b>Espessura (hi) [mm]</b>	<b>E<sub>i</sub> [MPa]</b>	<b>A<sub>i</sub> [cm<sup>2</sup>]</b>
1 (Longitudinal)	30	11000	300
2 (Transversal)	30	0	0
3 (Longitudinal)	30	11000	300
4 (Transversal)	30	0	0
5 (Longitudinal)	30	11000	300
<b>E<sub>c</sub> [MPa]</b>	11000	<b>Σ</b>	900

**Tabela 60 – Área efetiva na direção Y (menos rígida) dos painéis de parede.**

<b>Camada ( i )</b>	<b>Espessura (hi) [mm]</b>	<b>E<sub>i</sub> [MPa]</b>	<b>A<sub>i</sub> [cm<sup>2</sup>]</b>
1 (Transversal)	30	0	0
2 (Longitudinal)	30	11000	300
3 (Transversal)	30	0	0
4 (Longitudinal)	30	11000	300
5 (Transversal)	30	0	0
<b>E<sub>c</sub> [MPa]</b>	11000	<b>Σ</b>	600

Tabela 61 – Propriedades da seção transversal efetiva na direção X (mais rígida) dos painéis de parede.

$A_{0,x,liq}$ [cm <sup>2</sup> ]	$I_{0,x,liq}$ [cm <sup>4</sup> ]	$E_{0,x,liq}$ [kN/cm <sup>2</sup> ]	$W_{0,x,liq}$ [cm <sup>3</sup> ]
900	2.23E+04	871.20	2970.0

Tabela 62 – Propriedades da seção transversal efetiva na direção Y (menos rígida) dos painéis de parede.

$A_{0,y,liq}$ [cm <sup>2</sup> ]	$I_{0,y,liq}$ [cm <sup>4</sup> ]	$E_{0,y,liq}$ [kN/cm <sup>2</sup> ]	$W_{0,y,liq}$ [cm <sup>3</sup> ]
600	5.85E+03	228.80	1300.0

- **Momento de inércia efetivo - Método Gamma**

A rigidez efetiva dos painéis de parede para o ELS foi determinada pelo Método Gamma, conforme descrito no item 4.5.3. Para tal, utilizou-se as dimensões do painel de parede PPT41 (5650 x 2700) mm.

Tabela 63 – Rigidez efetiva na direção X dos painéis de parede calculada pelo Método Gamma.

b	5650 mm
$L_{ef}$	2700 mm
$\gamma_1$	0.79
$\gamma_2$	1.00
$\gamma_3$	0.79
$a_1$	60 mm
$a_2$	0 mm
$a_3$	60 mm
$I_{x,ef}$	1.00E+05 cm <sup>4</sup>
$I_{x,bruto}$	1.59E+05 cm <sup>4</sup>
$E_{x,ef}$	692.61 kN/cm <sup>2</sup>

**Tabela 64 – Rigidez efetiva na direção Y dos painéis de parede calculada pelo Método Gamma.**

b	2700 mm
L <sub>ef</sub>	5650 mm
$\gamma_1$	0.79
$\gamma_2$	1.00
$\gamma_3$	0.79
a <sub>1</sub>	30 mm
a <sub>2</sub>	0 mm
a <sub>3</sub>	30 mm
I <sub>y,ef</sub>	2.79E+04 cm <sup>4</sup>
I <sub>y,bruto</sub>	7.59E+04 cm <sup>4</sup>
E <sub>y,ef</sub>	403.77 kN/cm <sup>2</sup>

- **Tração no plano**

Assim como observado para as lajes, nos painéis de parede ocorreram picos de solicitações de esforços normais e cisalhantes que não representam o comportamento real esperado para a estrutura. Os picos de solicitações surgiram em trechos curtos de parede, decorrentes da presença de grandes aberturas, e perto de pilares. Dessa forma, por meio da ferramenta de filtragem de resultados do software, regulou-se os limites máximos e mínimos da isobada em escala de cores desprezando os picos de esforços.

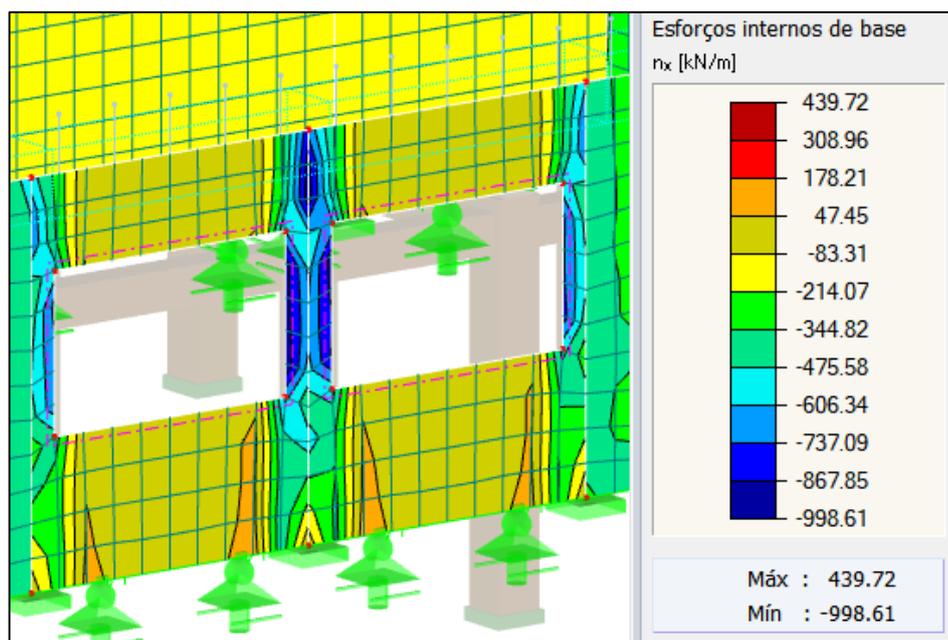


Figura 131 – Picos de esforços normais em trechos curtos de parede com pilares adjacentes. (Fonte: próprio autor, 2021)

Analisando os resultados obtidos com o modelo filtrado, notou-se que as forças axiais de tração no plano dos painéis de parede se concentram nas aberturas. Desse modo, os painéis críticos para esta verificação foram os painéis do térreo com aberturas, conforme exemplificado na Figura 132 para a direção X e na Figura 133 para a direção Y, onde as forças solicitantes de tração ficam entorno de 50 kN/m.

Tabela 65 – Verificação dos painéis de parede à tração no plano.

Identificação	Forças normais [kN/m]		Tensões normais de tração [MPa]		Requisição $\sigma_{t,d}/f_{t,d}$	Verificação
	$n_x$	$n_y$	$\sigma_{t0,x,d}$	$\sigma_{t0,y,d}$		
Painel de parede PPT03	50.00	-	0.56	-	6.09%	OK
	-	50.00	-	0.83	9.14%	OK

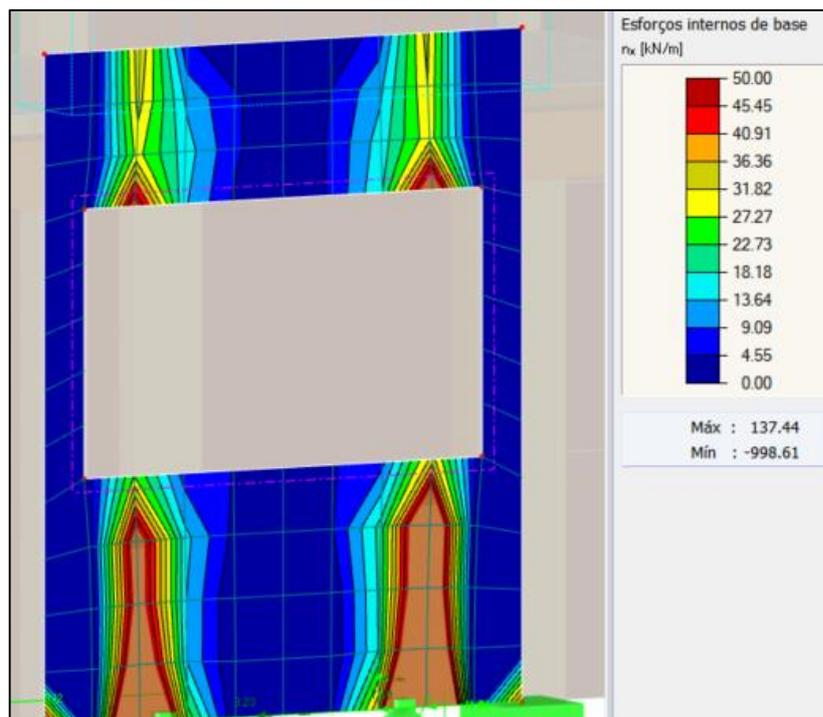


Figura 132 – Diagrama de forças normais de tração da parede PPT03 na direção X para a combinação crítica. (Fonte: próprio autor, 2021)

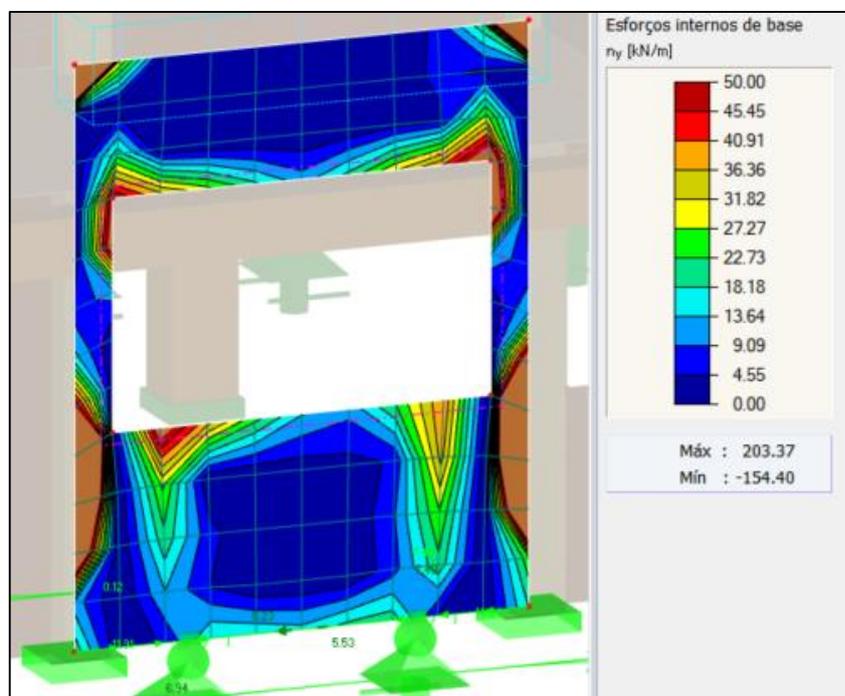


Figura 133 – Diagrama de forças normais de tração da parede PPT03 na direção Y para a combinação crítica. (Fonte: próprio autor, 2021)

- **Flexocompressão e instabilidade lateral**

A verificação de flexocompressão e instabilidade lateral foi regida pelos painéis com maiores forças normais de compressão. Assim, o painel crítico para esta verificação foi o PPT65, localizado em uma região onde no pavimento superior se tem mais uma parede perpendicular, o que não ocorre no térreo, sendo essa uma possível justificativa para o esforço crítico.

**Tabela 66 – Tensões normais atuantes no painel de parede crítico para a flexocompressão.**

Identificação	Esforços solicitantes		Tensões normais	
	$n_x$ [kN/m]	$m_x$ [kN.m/m]	$\sigma_{m,x,d}$ [MPa]	$\sigma_{c0,x,d}$ [MPa]
PPT65	-300.00	2.06	0.69	3.33

**Tabela 67 – Verificação dos painéis de parede à flexocompressão e instabilidade lateral.**

Identificação	Instabilidade lateral				Requisição $\sigma_{c0,x,d}/k_{c,x}/f_{c,0,d}$ + $\sigma_{m,x,d}/f_{m,d}$	Verificação Flexocompressão + Instabilidade lateral
	$N_{cr,x}$ [kN]	$\lambda_{rel,x}$	$k_x$	$k_{c,x}$		
PPT65	3247.42	0.82	0.86	0.49	65.80%	OK

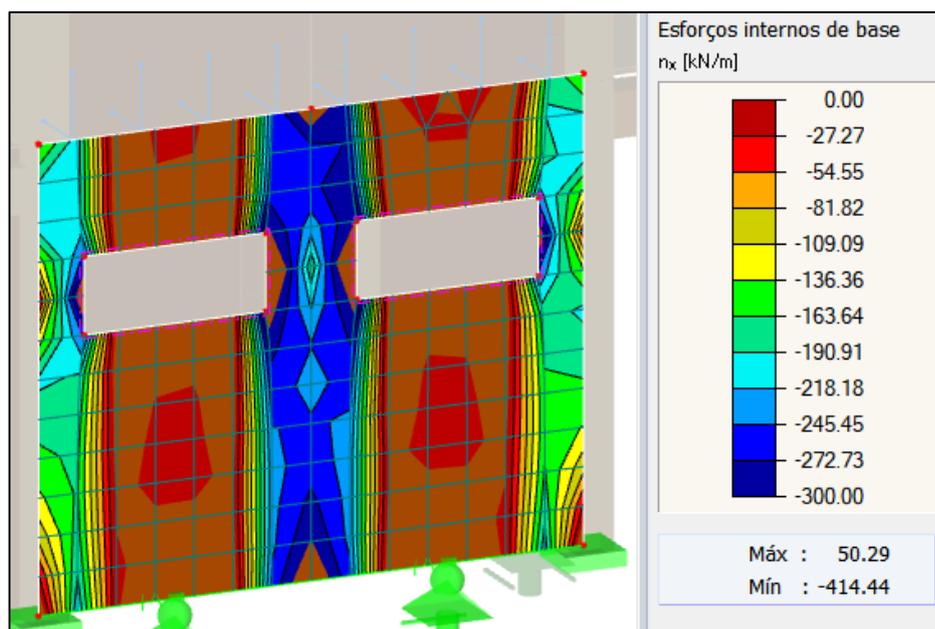


Figura 134 – Diagrama de forças normais de compressão da parede PPT65 na direção X para a combinação crítica. (Fonte: próprio autor, 2021)

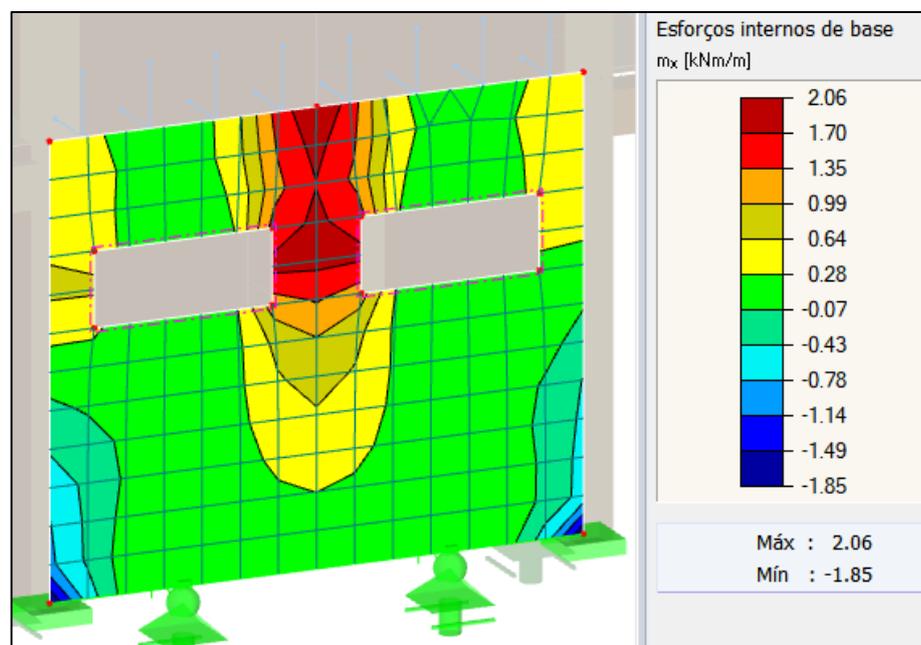


Figura 135 – Diagrama de momentos fletores da parede PPT65 na direção X para a combinação crítica. (Fonte: próprio autor, 2021)

- **Cisalhamento fora do plano**

A parede crítica em relação ao cisalhamento longitudinal e ao *rolling shear* é a PPT16 que está localizada no térreo em uma região sem paredes perpendiculares, mas que no pavimento superior existem, sendo essa uma possível justificativa para o esforço cisalhante crítico.

**Tabela 68 –Verificação dos painéis de parede ao cisalhamento longitudinal.**

Identificação		Força cortante	Momento estático	Tensão cisalhante	Requisição	Verificação
Painel de laje	Direção	$v$ [kN/m]	$S$ [cm <sup>3</sup> ]	$\tau_d$ [MPa]	$\tau_d/f_{v,d}$	Cisalhamento longitudinal
PPT16	X	5.00	1912.5	0.04	3.32%	OK
	Y	10.00	900.0	0.15	11.90%	OK

**Tabela 69 –Verificação dos painéis de parede ao cisalhamento *rolling shear*.**

Identificação		Força cortante	Momento estático	Tensão cisalhante	Requisição	Verificação
Painel de laje	Direção	$v$ [kN/m]	$S_R$ [cm <sup>3</sup> ]	$\tau_{R,d}$ [MPa]	$\tau_{R,d}/f_{R,d}$	Rolling shear
PPT16	X	5.00	900.0	0.02	4.97%	OK
	Y	10.00	112.5	0.02	4.73%	OK

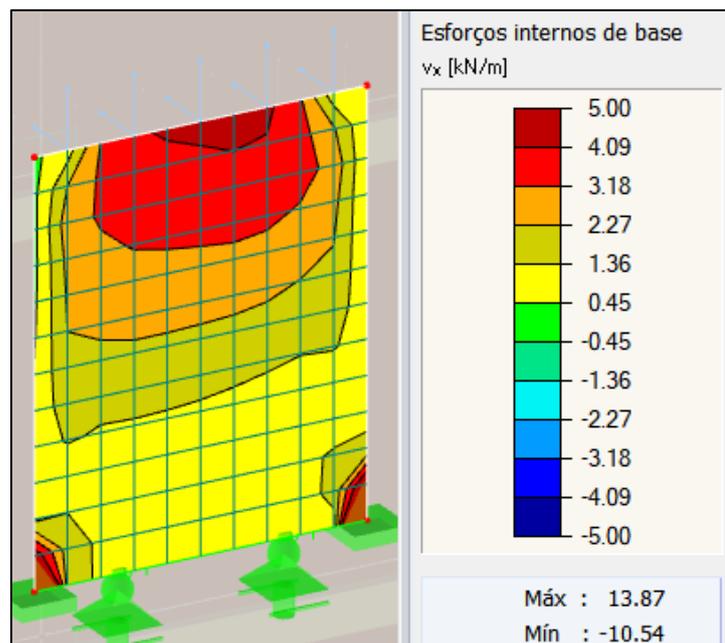


Figura 136 – Diagrama de forças cortantes da parede PPT16 na direção X para a combinação crítica.

(Fonte: próprio autor, 2021)

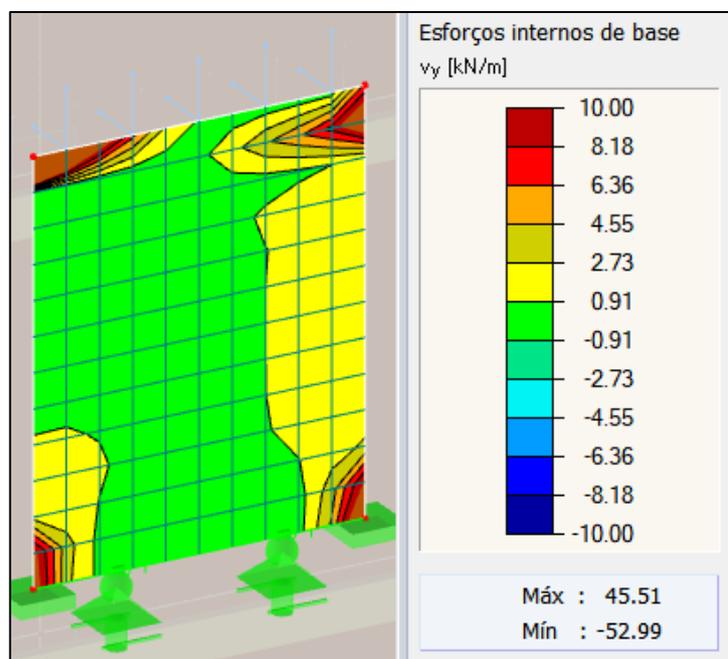


Figura 137 – Diagrama de forças cortantes da parede PPT16 na direção Y para a combinação crítica.

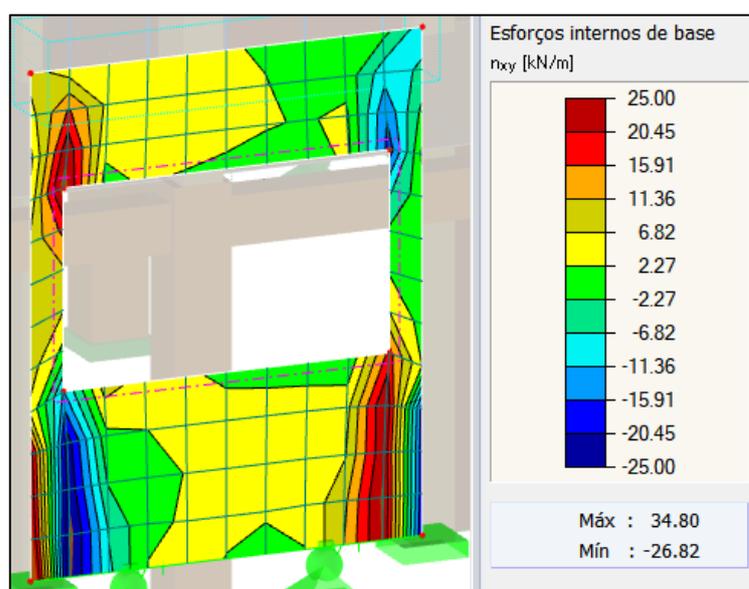
(Fonte: próprio autor, 2021)

- **Cisalhamento no plano**

A parede crítica em relação ao cisalhamento no plano é a PPT03 que está localizada no térreo em uma região em que algumas paredes do pavimento superior são descontínuas, sendo essa uma possível justificativa para o esforço cisalhante crítico.

**Tabela 70 – Verificação dos painéis de parede ao cisalhamento no plano.**

Identificação	Esforços solicitantes		Tensões cisalhantes		Requisição	Verificação
	$n_{xy}$ [kN/m]	$v$ [kN/cm]	$\tau_{x,d}$ [MPa]	$\tau_{y,d}$ [MPa]		
PPT03	25.00	0.38	0.42	0.63	$\tau_{d,máx}/f_{v,d}$ 54.57%	<b>Cisalhamento no plano</b> OK



**Figura 138 – Diagrama de forças normais no plano da parede PPT03 para a combinação crítica. (Fonte: próprio autor, 2021)**

### 5.3.5. LIGAÇÕES

Na sequência serão apresentados os cálculos referentes ao dimensionamento dos parafusos e a determinação da rigidez das ligações. Os Anexos F e G apresentam o detalhamento das ligações com as configurações finais adotadas, quantidade, diâmetro e comprimento dos parafusos e chapas metálicas.

### 5.3.5.1. Dimensionamento dos parafusos

- **Ligações Aço-Madeira com chapa metálica lateral e corte simples**

Uma vez que, por simplificação, optou-se por dimensionar as ligações a partir dos elementos críticos, a seguir estão apresentados os resultados obtidos para cada tipo de ligação aço-madeira com chapa metálica lateral e corte simples. Os esforços solicitantes considerados para a verificação foram obtidos a partir dos diagramas de forças cortantes de cada elemento.

Vale destacar que as chapas metálicas da base das paredes foram adotadas conforme as configurações padrões recomendadas pelo catálogo da fabricante Rothoblaas e dimensionadas através dos esforços solicitantes dos apoios das paredes do térreo. Desse modo, adotou-se chapas metálicas com 12 parafusos LBS cada, tanto para o térreo quanto para o pavimento tipo. Além disso, como as chapas metálicas estão distribuídas a cada 50 cm e os esforços solicitantes foram obtidos por metro linear, sendo assim, para a verificação considerou-se 24 parafusos por metro.

**Tabela 71 – Propriedades dos elementos metálicos das ligações aço-madeira com chapa metálica lateral.**

Ligação	Tipo de conector	d [mm]	$f_{u,k}$ [MPa]	$M_{yR,k}$ [N.mm]	$t_1$ [mm]	$t_s$ [mm]
Pilar-pilar e pilar-térreo	Barra rosca $\phi 16$ mm	16	415	300501.98	100	10
Viga-pilar e viga-viga	LBS 5x70	5	1000	19698.96	64	6
Viga escada-viga	LBS 5x70	5	1000	19698.96	64	6
Viga escada-térreo	LBS 5x70	5	1000	19698.96	67	3
Base da parede	LBS 5x70	5	1000	19698.96	67	3

**Tabela 72 – Resistência ao embutimento da madeira das ligações aço-madeira com chapa metálica lateral.**

Ligação	$\alpha$ [graus]	$\rho_k$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$f_{e0,k}$ [MPa]	$k_{90}$	$f_{e\alpha,k}$ [MPa]
Pilar-pilar e pilar-térreo	90	350	24.11	1.59	15.16
Viga-pilar e viga-viga	90	350	27.27	1.43	19.13
Viga escada-viga	90	350	27.27	1.43	19.13
Viga escada-térreo	90	350	27.27	1.43	19.13
Base da parede	90	350	27.27	1.43	19.13

**Tabela 73 – Resistências características por modo de falha das ligações aço-madeira com chapa metálica lateral.**

Ligação	(a) [kN]	(b) [kN]	(c) [kN]	(d) [kN]	(e) [kN]
Pilar-pilar e pilar-térreo	9.70	10.39	24.26	12.35	14.69
Viga-pilar e viga-viga	2.45	2.23	6.12	2.96	3.16
Viga escada-viga	2.45	2.23	6.12	2.96	3.16
Viga escada-térreo	2.56	2.23	6.41	3.06	3.16
Base da parede	2.56	2.23	6.41	3.06	3.16

**Tabela 74 – Resistência de cálculo dos conectores das ligações aço-madeira com chapa metálica lateral.**

Ligação	Tipo de chapa	$F_{v,Rk}$ [kN]	$n_{sp}$ [seções]	$k_{mod}$	$\gamma_{lig}$	$F_{v,Rd}$ [kN/conector]
Pilar-pilar e pilar-térreo	Chapa grossa	12.35	1	0.60	1.40	5.28
Viga-pilar e viga-viga	Chapa grossa	2.96	1	0.60	1.40	1.27
Viga escada-viga	Chapa grossa	2.96	1	0.60	1.40	1.27
Viga escada-térreo	Chapa grossa	3.06	1	0.67	1.40	1.45
Base da parede	Chapa grossa	3.06	1	0.67	1.40	1.45

**Tabela 75 – Verificação da quantidade de conectores das ligações aço-madeira com chapa metálica lateral.**

Ligação	$F_{v,Rd}$ [kN/conector]	$n_{ef}$ [conectores]	$R_{v,d}$ [kN]	$V_{Sd}$ [kN]	Verificação
Pilar-pilar e pilar-térreo	5.28	4	21.12	21.03	OK
Viga-pilar e viga-viga	1.27	24	30.38	28.12	OK
Viga escada-viga	1.27	10	12.66	10.25	OK
Viga escada-térreo	1.45	10	14.54	13.01	OK
Base da parede	1.45	24	34,90	29,33	OK

- **Ligações Aço-Madeira com chapa metálica central e corte duplo**

Para a verificação das ligações aço-madeira com chapa metálica central os elementos aparentes e ocultos foram dimensionados separadamente, visto que para as peças mais largas foram utilizados parafusos com comprimentos maiores. Os esforços solicitantes considerados para a verificação foram obtidos a partir dos diagramas de esforços cortantes nas vigas.

Tabela 76 – Propriedades dos elementos metálicos das ligações aço-madeira com chapa metálica central.

Ligação	Tipo de conector	d [mm]	$f_{u,k}$ [MPa]	$M_{yR,k}$ [N.mm]	$t_1$ [mm]	$t_s$ [mm]
Viga-pilar e viga-viga (aparente)	SBD 7.5x175	7.50	1000	56530.20	82	6
Viga-pilar e viga-viga (oculto)	SBD 7.5x215	7.50	1000	56530.20	102	6
Viga escada-viga	SBD 7.5x115	7.50	1000	56530.20	52	6

Tabela 77 – Resistência ao embutimento da madeira das ligações aço-madeira com chapa metálica lateral.

Ligação	$\alpha$ [graus]	$\rho_k$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$f_{e0,k}$ [MPa]	$k_{90}$	$f_{e\alpha,k}$ [MPa]
Viga-pilar e viga-viga (aparente)	90	350	26.55	1.46	18.15
Viga-pilar e viga-viga (oculto)	90	350	26.55	1.46	18.15
Viga escada-viga	90	350	26.55	1.46	18.15

Tabela 78 – Resistências características por modo de falha das ligações aço-madeira com chapa metálica central.

Ligação	(f) [kN]	(g) [kN]	(h) [kN]
Viga-pilar e viga-viga (aparente)	11.16	5.57	6.38
Viga-pilar e viga-viga (oculto)	13.89	6.52	6.38
Viga escada-viga	7.08	4.37	6.38

Tabela 79 – Resistência de cálculo dos conectores das ligações aço-madeira com chapa metálica central.

Ligação	$F_{V,Rk}$ [kN]	$n_{sp}$ [seções]	$k_{mod}$	$\gamma_{lig}$	$F_{V,Rd}$ [kN]
Viga-pilar e viga-viga (aparente)	5.57	2	0.60	1.40	4.76
Viga-pilar e viga-viga (oculto)	6.38	2	0.67	1.40	6.06
Viga escada-viga	4.37	2	0.67	1.40	4.15

**Tabela 80 – Verificação da quantidade de conectores das ligações aço-madeira com chapa metálica central.**

Ligação	$F_{v,Rd}$ [kN]	$n_{ef}$ [conectores]	$R_{v,d}$ [kN]	$V_{sd}$ [kN]	Verificação
Viga-pilar e viga-viga (aparente)	4.76	6	28.58	28.12	OK
Viga-pilar e viga-viga (oculto)	6.06	5	30.31	24.91	OK
Viga escada-viga	4.15	3	12.45	10.25	OK

- **Ligações Madeira-Madeira com corte simples**

Para a verificação da ligação laje-viga foram utilizados os esforços normais atuantes nas lajes nas intersecções com vigas. Além disso, considerou-se a quantidade de parafusos distribuídos em 1 metro de laje, uma vez que os esforços obtidos são dados por metro linear.

**Tabela 81 – Propriedades dos elementos metálicos das ligações madeira-madeira.**

Ligação	Tipo de conector	d [mm]	$f_{u,k}$ [MPa]	$M_{yR,k}$ [N.mm]	$t_1$ [mm]	$t_2$ [mm]	$t_2/t_1$
Pilar-cobertura	HBS 8x300	8	1000	66858.28	200	100	0.50
Laje-viga	HBS 10x300	10	1000	119432.15	200	100	0.50

**Tabela 82 – Resistência ao embutimento da madeira das ligações madeira-madeira.**

Ligação	$\alpha$ [graus]	$\rho_k$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$f_{e0,k}$ [MPa]	$k_{90}$	$f_{e\alpha,k}$ [MPa]	$\beta$
Pilar-cobertura	90	350	26.40	1.47	17.96	1.00
Laje-viga	90	350	25.83	1.50	17.22	1.00

**Tabela 83 – Resistências características por modo de falha das ligações madeira-madeira.**

Ligação	(Ia) [kN]	(Ib) [kN]	(Ic) [kN]	(IIa) [kN]	(IIb) [kN]	(III) [kN]
Pilar-cobertura	28.74	14.37	9.76	10.41	5.71	5.04
Laje-viga	34.44	17.22	11.70	12.67	7.22	7.38

Tabela 84 – Resistência de cálculo dos conectores das ligações madeira-madeira.

Ligação	$F_{v,Rk}$ [kN]	$n_{sp}$ [seções]	$k_{mod}$	$\gamma_{lig}$	$F_{v,Rd}$ [kN]
Pilar-cobertura	5.04	1	0.60	1.40	2.16
Laje-viga	7.22	1	0.60	1.40	3.09

Tabela 85 – Verificação da quantidade de conectores das ligações madeira-madeira.

Ligação	$F_{v,Rd}$ [kN]	$n_{ef}$ [parafusos]	$R_{v,d}$ [kN]	$V_{Sd}$ [kN]	Verificação
Pilar-cobertura	2.16	4	8.62	3.85	OK
Laje-viga	3.09	5	15.44	15.00	OK

- **Parafusos solicitados à tração**

A verificação da tração nos pinos metálicos foi feita para as ligações entre pilares e para as ligações com ancorantes, como na base de paredes, pilares e vigas de escada, abordadas no item de ligação aço-concreto. Os esforços solicitantes de tração nos pilares foram obtidos através do diagrama de esforços normais.

Tabela 86 – Propriedades dos elementos metálicos das ligações submetidas à tração.

Ligação	Tipo de conector	$L_{rosca}$ [mm]	$d$ [mm]	$n_{ef}$ [conectores]
Pilar-pilar e Pilar-térreo	Barra rosca $\phi 16\text{mm}$	100	16	4

Tabela 87 – Verificação da quantidade de conectores das ligações submetidas à tração.

Ligação	$f_{v0,k}$ [MPa]	$R_{t,k}$ [kN]	$k_{mod}$	$\gamma_{lig}$	$R_{t,d}$ [kN]	$N_{St,d}$ [kN]	Verificação
Pilar-pilar e Pilar-térreo	4.00	80.42	0.60	1.40	34.38	24.95	OK

- **Ligações Aço-Concreto (Ancorantes)**

Assim como descrito anteriormente na verificação das ligações aço-madeira, para a verificação dos ancorantes da base das paredes, foi considerada a distribuição das chapas

metálicas a cada 50 cm. Desse modo, adotando 2 ancorantes para cada chapa metálica, para a verificação da ligação considerou-se 4 ancorantes por metro. Além disso, as ligações da base dos pilares e da base das vigas principais da escada foram feitas a partir das reações de apoio obtidas no modelo computacional, bem como as reações de apoio linear da base das paredes.

**Tabela 88 – Propriedades dos elementos metálicos das ligações aço-concreto.**

Ligação	Tipo de conector	d [mm]	L <sub>conector</sub> [mm]	N <sub>Rk,p</sub> [kN]	$\gamma_{Mp}$	V <sub>Rk,s/Rk,cp</sub> [kN]	$\gamma_{Ms,MC}$	n <sub>ef</sub> [conectores]
Pilar - laje térreo	SKR 16mm	16	130	16.00	2.1	56.40	1.5	4
Viga escada - laje térreo	SKR 8mm	8	110	4.00	2.1	9.40	1.5	2
Parede - laje térreo	SKR 16mm	16	130	16.00	2.1	56.40	1.5	4

**Tabela 89 – Verificação dos ancorantes à tração e ao cisalhamento.**

Ligação	R <sub>t,d</sub> [kN]	N <sub>St,d</sub> [kN]	Verificação à tração	R <sub>v,d</sub> [kN]	V <sub>Sd</sub> [kN]	Verificação ao cisalhamento
Pilar - laje térreo	30.48	25.79	OK	150.40	18.78	OK
Viga escada - laje térreo	3.81	2.34	OK	12.53	9.29	OK
Parede - laje térreo	30.48	29.33	OK	150.40	17.66	OK

### 5.3.5.2. Rigidez das ligações

Definidas as configurações das ligações com quantidades de parafusos e espaçamentos, conforme o detalhamento das ligações contido nos Anexos F e G, calcula-se, então, a rigidez associada a cada ligação. A Tabela 90 e a Tabela 91 apresentam o cálculo da rigidez ao deslocamento das ligações aço-madeira e madeira-madeira, respectivamente, enquanto a Tabela 92 apresenta o cálculo da rigidez ao giro das ligações aço-madeira. Vale destacar que as considerações de rigidez das ligações aplicadas aos nós do modelo estão expressas no item 5.2.

Tabela 90 – Rigidez ao deslocamento das ligações aço-madeira.

Ligação	Parafusos adotados	$\phi$ [mm]	$n_{ef}$ [parafusos]	$n_{sp}$ [seções]	$\rho_{med}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$K_{ser}$ [N/mm]	$K_u$ [N/mm]	$\mu_{ser}$ [kN/m]	$\mu_u$ [kN/m]
Pilar-Pilar e pilar-térreo (oculto e aparente)	4 barras roscadas $\phi 16\text{mm}$	16	4	1	420	5987.8	3991.9	47902.3	31934.8
Viga-pilar e viga-viga (aparente)	6 SBD $\phi 7.5$	7.5	6	2	420	2806.8	1871.2	67362.6	44908.4
Viga-pilar e viga-viga (oculto)	5 SBD $\phi 7.5$	7.5	5	2	420	2806.8	1871.2	56135.5	37423.6
Viga escada-viga	3 SBD $\phi 7.5$	7.5	3	2	420	2806.8	1871.2	33681.3	22454.2
Viga escada-térreo	10 LBS $\phi 5$	5	10	1	420	1871.2	1247.5	37423.6	24949.1
Base da parede	24 LBS $\phi 5$	5	24	1	420	1871.2	1247.5	89816.8	59877.8

Tabela 91 – Rigidez ao deslocamento das ligações madeira-madeira.

Ligação	Parafusos adotados	$\phi$ [mm]	$n_{ef}$ [parafusos por metro]	$n_{sp}$ [seções]	$\rho_{med}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$K_{ser}$ [N/mm]	$K_u$ [N/mm]	$\mu_{ser}$ [kN/m]	$\mu_u$ [kN/m]
Emenda entre painéis	VGZ $\phi 7\text{mm}$ c/ 20cm	7	5	1	420	2619.7	1746.4	13098.3	8732.2
Laje-viga	HBS $\phi 10\text{mm}$ c/ 20cm	10	5	1	420	3742.4	2494.9	18711.8	12474.5

Tabela 92 – Somatório da quantidade de parafusos pela distância do centro da ligação ao quadrado.

Ligação	Parafusos adotados	$n_1$ [parafusos]	$r_1$ [mm]	$n_2$ [parafusos]	$r_2$ [mm]	$n_3$ [parafusos]	$r_3$ [mm]	$\sum(n_i \times r_i^2)$ [mm <sup>2</sup> ]
Pilar-Pilar e pilar-térreo (oculto e aparente)	4 barras roscadas $\phi 16\text{mm}$	4	159.5	-	-	-	-	101761
Viga-pilar e viga-viga (aparente)	6 SBD $\phi 7.5$	2	75.0	2	45.0	2	15.0	15750
Viga-pilar e viga-viga (oculto)	5 SBD $\phi 7.5$	2	60.0	2	30.0	1	0.0	9000
Viga escada-viga	3 SBD $\phi 7.5$	3	31.2	-	-	-	-	2920.32

**Tabela 93 – Rigidez ao giro das ligações aço-madeira.**

Ligação	$\phi_{ser}$ [kN.m/rad]	$\phi_u$ [kN.m/rad]
Pilar-Pilar e pilar-térreo (oculto e aparente)	1218.6	812.4
Viga-pilar e viga-viga (aparente)	176.8	117.9
Viga-pilar e viga-viga (oculto)	101.0	67.4
Viga escada-viga	32.8	21.9

### 5.3.6. SEGURANÇA CONTRA INCÊNDIO

A verificação da segurança dos elementos estruturais nos estados limites de incêndio foi feita de acordo com o método apresentado no item 4.5.6. Assim, as verificações do ELU das vigas, pilares, lajes e paredes foram refeitas com esforços reduzidos de 60% e perdas das seções transversais devido à carbonização da madeira. Além disso, as propriedades da madeira sob ação do fogo foram majoradas como mostrado na Tabela 94, para vigas e pilares de MLC, e na Tabela 95, para lajes e paredes de CLT.

**Tabela 94 – Propriedades da madeira dos elementos de MLC na situação de incêndio.**

Coefficiente de incêndio	$k_{fi}$	1,15
Resistência convencional à flexão sob incêndio	$f_{m,fi,d}$	27,60 MPa
Resistência à tração paralela às fibras sob incêndio	$f_{t0,fi,d}$	16,10 MPa
Resistência à compressão paralela às fibras sob incêndio	$f_{c0,fi,d}$	24,15 MPa
Resistência à compressão perpendicular às fibras sob incêndio	$f_{c90,fi,d}$	2,88 MPa
Resistência ao cisalhamento sob incêndio	$f_{v0,fi,d}$	4,60 MPa
Módulo de elasticidade sob incêndio	$E_{0,2}$	8510 MPa

Tabela 95 – Propriedades da madeira dos elementos de CLT na situação de incêndio.

<b>Propriedades mecânicas para ações perpendiculares ao plano do painel</b>		
Coeficiente de incêndio	$k_{fi}$	1.15
Resistência convencional à flexão sob incêndio	$f_{m,fi,d}$	27.60 MPa
Resistência à compressão perpendicular às fibras sob incêndio	$f_{c90,fi,d}$	2.88 MPa
Resistência ao cisalhamento perpendicular às fibras (Rolling shear) sob incêndio	$f_{R,fi,d}$	1.27 MPa
Resistência ao cisalhamento paralelo às fibras sob incêndio	$f_{v0,fi,d}$	4.03 MPa
Módulo de elasticidade longitudinal paralelo às fibras sob incêndio	$E_{0,2}$	12650 MPa
Módulo de elasticidade transversal paralelo às fibras sob incêndio	$G_0$	690 MPa
Módulo de elasticidade transversal perpendicular às fibras (Rolling shear) sob incêndio	$G_R$	50 MPa
<b>Propriedades mecânicas para ações no plano do painel</b>		
Coeficiente de incêndio	$k_{fi}$	1.15
Resistência convencional à flexão sob incêndio	$f_{m,fi,d}$	27.60 MPa
Resistência à compressão paralelo às fibras sob incêndio	$f_{c0,fi,d}$	27.60 MPa
Resistência à tração paralela às fibras sob incêndio	$f_{t0,fi,d}$	22.08 MPa
Resistência ao cisalhamento paralelo às fibras sob incêndio	$f_{v,fi,d}$	2.65 MPa
Módulo de elasticidade longitudinal paralelo às fibras sob incêndio	$E_{0,2}$	12560 MPa
Módulo de elasticidade transversal paralelo às fibras sob incêndio	$G_0$	690 MPa

### 5.3.6.1. Vigas

A seção transversal residual das vigas foi calculada considerando que 3 faces serão expostas ao fogo: as faces laterais e a face inferior. Ademais, os cálculos foram separados entre as vigas aparentes e ocultas, admitindo que a dupla camada de gesso tipo F de 15 mm faz o papel de encapsulamento das vigas ocultas, prolongando o tempo de início da carbonização. Vale salientar que as vigas principais da escada também serão protegidas por uma camada dupla de gesso tipo F.

Tabela 96 – Cálculo da espessura efetiva para vigas e pilares ocultos.

$e_0$	7	mm
$k_0$	1.00	
$\beta_n$	0.70	mm/min
TRRF	90	min
$h_p$	22.5	mm
$t_{carb}$	49.0	min
$t$	41.0	min
$e_{carb,n}$	28.7	mm
<b><math>e_{ef}</math></b>	<b>35.7</b>	<b>mm</b>

Tabela 97 – Cálculo da espessura efetiva para vigas e pilares aparentes.

$e_0$	7	mm
$k_0$	1.00	
$\beta_n$	0.70	mm/min
TRRF	90	min
$t$	90	min
$e_{carb,n}$	63	mm
<b><math>e_{ef}</math></b>	<b>70</b>	<b>mm</b>

Tabela 98 – Propriedades geométricas das seções transversais residuais das vigas.

Identificação	Base inicial	Altura inicial	Base residual	Altura residual	Momento de inércia		Altura de inspeção		Módulo de resistência		Área da seção
	$b$ [cm]	$h$ [cm]	$b_{fi}$ [cm]	$h_{fi}$ [cm]	$I_z$ [cm <sup>4</sup> ]	$I_y$ [cm <sup>4</sup> ]	$y_z$ [cm]	$y_y$ [cm]	$W_z$ [cm <sup>3</sup> ]	$W_y$ [cm <sup>3</sup> ]	$A$ [cm <sup>2</sup> ]
Viga oculta	20	30	12.86	26.43	19785.69	4684.24	13.22	6.43	1497.21	728.50	339.89
Viga aparente	25	30	11	23	11153.08	2551.08	11.50	5.50	969.83	463.83	253.00
Viga principal escada	15	30	7.86	26.43	12092.96	1069.51	13.22	3.93	915.09	272.14	207.74

- Flexão simples reta

Tabela 99 – Verificação das vigas à flexão simples reta com seção residual de incêndio.

Identificação	Momento fletor máximo	Tensão normal máxima	Requisição	Verificação
Elemento	$M_z$ [kN.m]	$\sigma_{Mz,d}$ [MPa]	$\sigma_{Mz,d,m\acute{a}x}/f_{m,d}$	Flexão simples reta
Viga oculta (V102 - 6ºpav)	5.54	3.70	13.42%	OK
Viga aparente (VT103)	9.20	9.49	34.39%	OK
Viga principal escada	5.34	5.84	21.14%	OK

- Cisalhamento longitudinal

Tabela 100 – Verificação das vigas ao cisalhamento com seção residual de incêndio.

Identificação	Força cortante máxima		Tensão cisalhante máxima	Requisição	Verificação
Elemento	$V_{y,m\acute{a}x}$ [kN]	$V_{z,m\acute{a}x}$ [kN]	$\tau_{d,m\acute{a}x}$ [MPa]	$\tau_{d,m\acute{a}x}/f_{v,d}$	Cisalhamento
Viga oculta (V102 - 6ºpav)	14.95	7.37	0.66	14.34%	OK
Viga aparente (VT103)	16.87	8.60	1.00	21.75%	OK
Viga principal escada	6.15	0.47	0.44	9.65%	OK

- **Estabilidade lateral**

**Tabela 101 – Verificação das vigas à estabilidade lateral com seção residual de incêndio.**

Identificação	Momento fletor máximo	Vão entre travamentos	Coefficiente de correção	Tensão de compressão	Tensão limite de estabilidade	Requisição	Verificação
Elemento	$M_z$ [kN.m]	$L_1$ [cm]	$\beta_M$	$\sigma_{c,d}$ [MPa]	$\sigma_{estabilidade}$ [MPa]	$\sigma_{c,d}/\sigma_{estabilidade}$	Estabilidade lateral
Viga oculta (V102 - 6º pav)	5.54	412.5	8.98	3.70	29.55	12.53%	OK
Viga aparente (V62 - 5º pav)	6.14	565	9.10	6.34	18.21	34.79%	OK
Viga principal escada	5.34	340	13.57	5.84	14.50	40.25%	OK

### 5.3.6.2. Pilares

A seção transversal residual dos pilares foi calculada considerando que as 4 faces serão expostas ao fogo. Ademais, os cálculos foram separados entre os pilares aparentes e ocultos, admitindo que a dupla camada de gesso tipo F de 15 mm faz o papel de encapsulamento dos pilares ocultos, prolongando o tempo de início da carbonização. O cálculo realizado no item 5.3.6.1 para a determinação da espessura efetiva também vale para os pilares, sendo assim, a

Tabela 96 apresenta os resultados para pilares ocultos e a Tabela 97 para pilares aparentes.

Tabela 102 – Propriedades geométricas das seções transversais residuais dos pilares.

Identificação	Base inicial	Altura inicial	Base residual	Altura residual	Momento de inércia		Altura de inspeção		Módulo de resistência		Área da seção
	b [cm]	h [cm]	b <sub>fi</sub> [cm]	h <sub>fi</sub> [cm]	I <sub>z</sub> [cm <sup>4</sup> ]	I <sub>y</sub> [cm <sup>4</sup> ]	y <sub>z</sub> [cm]	y <sub>y</sub> [cm]	W <sub>z</sub> [cm <sup>3</sup> ]	W <sub>y</sub> [cm <sup>3</sup> ]	A [cm <sup>2</sup> ]
Pilar oculto	25	35	17.86	27.86	32184.26	13226.48	13.93	8.93	2310.43	1481.13	497.58
Pilar aparente	35	35	21	21	16206.75	16206.75	10.50	10.50	1543.50	1543.50	441.00

Tabela 103 – Esforços solicitantes máximos dos pilares analisados para o estado limite de incêndio.

Identificação	Esforços solicitantes			Tensões normais		
	N <sub>c,d</sub> [kN]	M <sub>z,d</sub> [kN.m]	M <sub>y,d</sub> [kN.m]	σ <sub>Nc,d</sub> [MPa]	σ <sub>Mz,d</sub> [MPa]	σ <sub>My,d</sub> [MPa]
Pilar oculto (PT08)	-277.42	7.70	2.37	5.58	3.33	1.60
Pilar aparente (PT19)	-342.18	8.91	5.32	7.76	5.78	3.45
Pilar oculto (PC07)	-42.10	5.11	1.30	0.85	2.21	0.88

- **Flexocompressão**

**Tabela 104 – Verificação dos pilares à flexocompressão com seção residual de incêndio.**

Identificação	Condição 1 ( $M_y, \text{máx}$ )	Condição 2 ( $M_z, \text{máx}$ )	Verificação	
Elemento	Requisição condição 1	Requisição condição 2	Requisição máxima	Flexocompressão
Pilar oculto (PT08)	0.21	0.20	21.45%	OK
Pilar aparente (PT19)	0.40	0.37	39.99%	OK
Pilar oculto (PC07)	0.10	0.09	10.37%	OK

- **Estabilidade**

**Tabela 105 – Cálculo da esbeltez dos pilares com seção residual de incêndio.**

Identificação	Comprimento de flambagem		Esbeltez		Verificação	Esbeltez relativa		
	$K_E$	$L_0$ [cm]	$\lambda_z$	$\lambda_y$		Esbeltez	$\lambda_{rel,z}$	$\lambda_{rel,y}$
Pilar oculto (PT08)	1.00	290	36.1	56.2	OK	0.57	0.89	Esbelta
Pilar aparente (PT19)	1.00	290	47.8	47.8	OK	0.76	0.76	Esbelta
Pilar oculto (PC07)	1.00	390	48.5	75.6	OK	0.77	1.20	Esbelta

Tabela 106 – Verificação da estabilidade dos pilares com seção residual de incêndio.

Identificação	Coeficientes				Condição 1 (My,máx)	Condição 2 (Mz,máx)	Verificação	
	$k_z$	$k_y$	$k_{cz}$	$k_{cy}$	Requisição condição 1	Requisição condição 2	Requisição máxima	Estabilidade peças comprimidas
Pilar oculto (PT08)	0.68	0.92	0.96	0.85	0.40	0.41	41.46%	OK
Pilar aparente (PT19)	0.81	0.81	0.91	0.91	0.65	0.62	64.87%	OK
Pilar oculto (PC07)	0.82	1.26	0.91	0.60	0.14	0.15	14.60%	OK

### 5.3.6.3. Lajes

A seção transversal residual das lajes foi calculada considerando que apenas a face inferior será exposta ao fogo, admitindo que a face superior é protegida pelo piso e contrapiso. Ademais, considerou-se o encapsulamento das lajes pela camada simples de gesso tipo A de 12,5 mm, prolongando o tempo de início da carbonização.

Tabela 107 – Cálculo da espessura efetiva para painéis de laje.

$e_0$	7	mm
$k_0$	1.00	
$\beta_0$	0.65	mm/min
TRRF	90	min
$h_p$	12.5	mm
$t_{carb}$	21	min
$t$	69	min
$e_{carb,n}$	44.85	mm
<b><math>e_{ef}</math></b>	<b>51.85</b>	<b>mm</b>

- **Centro de gravidade do painel – Seção transversal residual**

Assim, para o cálculo da rigidez efetiva do painel, faz-se necessária a determinação da posição do centro de gravidade, uma vez que a seção residual é assimétrica.

**Tabela 108 – Cálculo do centro de gravidade da seção transversal residual do painel de laje na direção X.**

Camada (i)	h <sub>i</sub> [mm]	O <sub>i</sub> [mm]	E <sub>i</sub> /E <sub>c</sub> .b <sub>i</sub> .h <sub>i</sub> .O <sub>i</sub>	E <sub>i</sub> /E <sub>c</sub> .b <sub>i</sub> .h <sub>i</sub>
1 (Longitudinal)	40	20	800000	40000
2 (Transversal)	40	60	0	0
3 (Longitudinal)	40	100	4000000	40000
4 (Transversal)	28.15	134.075	0	0
5 (Longitudinal)	0	-	-	-
<b>h<sub>CLT</sub> [mm]</b>	148.15	<b>Σ</b>	4800000	80000
			<b>Z<sub>sup</sub> [mm]</b>	60

Tabela 109 – Cálculo do centro de gravidade da seção transversal residual do painel de laje na direção Y.

Camada (i)	h <sub>i</sub> [mm]	O <sub>i</sub> [mm]	E <sub>i</sub> /E <sub>c</sub> .b <sub>i</sub> .h <sub>i</sub> .O <sub>i</sub>	E <sub>i</sub> /E <sub>c</sub> .b <sub>i</sub> .h <sub>i</sub>
1 (Transversal)	40	20	0	0
2 (Longitudinal)	40	60	2400000	40000
3 (Transversal)	40	100	0	0
4 (Longitudinal)	28.15	134.075	3774211.25	28150
5 (Transversal)	0	-	-	-
<b>h<sub>CLT</sub> [mm]</b>	148.15	<b>Σ</b>	6174211.25	68150
			<b>Z<sub>sup</sub> [mm]</b>	90.60

- Rigidez à flexão fora do plano – Seção transversal residual

Tabela 110 – Rigidez à flexão fora do plano para a direção X dos painéis de laje residuais.

Camada ( i )	Espessura (h <sub>i</sub> ) [mm]	E <sub>i</sub> [MPa]	a <sub>i</sub> [mm]	E <sub>i</sub> .b <sub>i</sub> .h <sub>i</sub> <sup>3</sup> /12 [kN.cm <sup>2</sup> ]	E <sub>i</sub> .b <sub>i</sub> .h <sub>i</sub> .a <sub>i</sub> <sup>2</sup> [kN.cm <sup>2</sup> ]
1 (Longitudinal)	40	11000	-40	5.87E+05	7.04E+06
2 (Transversal)	40	0	0	0	0
3 (Longitudinal)	40	11000	40	5.87E+05	7.04E+06
4 (Transversal)	28.15	0	74.08	0	0
5 (Longitudinal)	0	-	-	-	-
<b>h<sub>CLT</sub> [mm]</b>	148.15		<b>Σ</b>	1.17E+06	1.41E+07
				<b>K<sub>x,CLT</sub> [kN.cm<sup>2</sup>]</b>	<b>1.53E+07</b>

Tabela 111 – Rigidez à flexão fora do plano para a direção Y dos painéis de laje residuais.

Camada ( i )	Espessura (h <sub>i</sub> ) [mm]	E <sub>i</sub> [MPa]	a <sub>i</sub> [mm]	E <sub>i</sub> .b <sub>i</sub> .h <sub>i</sub> <sup>3</sup> /12 [kN.cm <sup>2</sup> ]	E <sub>i</sub> .b <sub>i</sub> .h <sub>i</sub> .a <sub>i</sub> <sup>2</sup> [kN.cm <sup>2</sup> ]
1 (Transversal)	40	0	-70.60	0	0
2 (Longitudinal)	40	11000	-30.60	5.87E+05	4.12E+06
3 (Transversal)	40	0	9.40	0	0
4 (Longitudinal)	28.15	11000	43.48	2.04E+05	5.85E+06
5 (Transversal)	0	-	-	-	-
<b>h<sub>CLT</sub> [mm]</b>	148.15		<b>Σ</b>	7.91E+05	9.97E+06
				<b>K<sub>y,CLT</sub> [kN.cm<sup>2</sup>]</b>	<b>1.08E+07</b>

- Propriedades da seção transversal efetiva – Seção transversal residual

Tabela 112 – Área efetiva na direção X dos painéis de laje residuais.

Camada ( i )	Espessura (h <sub>i</sub> ) [mm]	E <sub>i</sub> [MPa]	A <sub>0,x,liq</sub> [cm <sup>2</sup> ]
1 (Longitudinal)	40	11000	400
2 (Transversal)	40	0	0
3 (Longitudinal)	40	11000	400
4 (Transversal)	28.15	0	0
5 (Longitudinal)	0	-	-
<b>E<sub>c</sub> [MPa]</b>	11000	<b>Σ</b>	800

Tabela 113 – Área efetiva na direção Y dos painéis de laje residuais.

Camada (i)	Espessura (h <sub>i</sub> ) [mm]	E <sub>i</sub> [MPa]	A <sub>i</sub> [cm <sup>2</sup> ]
1 (Transversal)	40	0	0
2 (Longitudinal)	40	11000	400
3 (Transversal)	40	0	0
4 (Longitudinal)	28.15	11000	281.5
5 (Transversal)	0	-	-
<b>E<sub>c</sub> [MPa]</b>	11000	<b>Σ</b>	681.5

Tabela 114 – Propriedades da seção transversal efetiva na direção X dos painéis de laje residuais.

A <sub>0,x,liq</sub> [cm <sup>2</sup> ]	I <sub>0,x,liq</sub> [cm <sup>4</sup> ]	W <sub>0,x,liq</sub> [cm <sup>3</sup> ]
800	1.39E+04	2311.1

Tabela 115 – Propriedades da seção transversal efetiva na direção Y dos painéis de laje residuais.

A <sub>0,y,liq</sub> [cm <sup>2</sup> ]	I <sub>0,y,liq</sub> [cm <sup>4</sup> ]	W <sub>0,y,liq</sub> [cm <sup>3</sup> ]
681.5	9.79E+03	1700.2

- **Flexão fora do plano**

Tabela 116 – Verificação dos painéis de laje residuais à flexão fora do plano.

Identificação	Momentos [kN.m/m]		Tensões [MPa]		Requisição σ <sub>m,d</sub> /f <sub>m,d</sub>	Verificação Flexão fora do plano
	m <sub>x</sub>	m <sub>y</sub>	σ <sub>m,x,d</sub>	σ <sub>m,y,d</sub>		
PL07 (6º pav)	9.28	-	4.01	-	14.54%	OK
PLC01 (elevador)	-	10.04	-	5.91	21.40%	OK

- **Cisalhamento fora do plano**

**Tabela 117 –Verificação dos painéis de laje residuais ao cisalhamento longitudinal.**

Identificação		Força cortante	Momento estático	Tensão cisalhante	Requisição	Verificação
Painel de laje	Direção	$v$ [kN/m]	$S$ [cm <sup>3</sup> ]	$\tau_d$ [MPa]	$\tau_d/f_{v,d}$	Cisalhamento longitudinal
PLC01	X	17.49	1600.0	0.20	5.01%	OK
	Y	26.53	1223.9	0.33	8.24%	OK

**Tabela 118 –Verificação dos painéis de laje residuais ao cisalhamento *rolling shear*.**

Identificação		Força cortante	Momento estático	Tensão cisalhante	Requisição	Verificação
Painel de laje	Direção	$v$ [kN/m]	$S_R$ [cm <sup>3</sup> ]	$\tau_{R,d}$ [MPa]	$\tau_{R,d}/f_{R,d}$	Rolling shear
PLC01	X	17.49	1223.9	0.15	12.20%	OK
	Y	26.53	1600.0	0.43	34.29%	OK

#### 5.3.6.4. Paredes

A seção transversal residual das paredes foi calculada considerando que as duas faces serão expostas ao fogo. Ademais, considerou-se o encapsulamento das paredes pela dupla camada de gesso tipo F de 15 mm, prolongando o tempo de início da carbonização. É importante destacar que o centro de gravidade do painel foi admitido no meio da camada central, considerando que a carbonização será a mesma para as duas faces, mantendo a seção transversal simétrica.

Tabela 119 – Cálculo da espessura efetiva para painéis de laje.

$e_0$	7	mm
$k_0$	1.00	
$\beta_0$	0.65	mm/min
TRRF	90	min
$h_p$	27	mm
$t_{carb}$	61.6	min
$t$	28.4	min
$e_{carb,n}$	18.46	mm
<b><math>e_{ef}</math></b>	<b>25.46</b>	<b>mm</b>

- **Rigidez à flexão fora do plano – Seção transversal residual**

Tabela 120 – Rigidez à flexão fora do plano para a direção X dos painéis de parede residuais.

Camada (i)	Espessura ( $h_i$ ) [mm]	$E_i$ [MPa]	$a_i$ [mm]	$E_i \cdot b_i \cdot h_i^3 / 12$ [kN.cm <sup>2</sup> ]	$E_i \cdot b_i \cdot h_i \cdot a_i^2$ [kN.cm <sup>2</sup> ]
1 (Longitudinal)	4.54	11000	-47.27	8.58E+02	1.12E+06
2 (Transversal)	30	0	-30	0	0
3 (Longitudinal)	30	11000	0	2.48E+05	0
4 (Transversal)	30	0	30	0	0
5 (Longitudinal)	4.54	11000	47.27	8.58E+02	1.12E+06
<b><math>h_{CLT}</math> [mm]</b>	99.08		<b><math>\Sigma</math></b>	2.49E+05	2.23E+06
				<b><math>K_{x,CLT}</math> [kN.cm<sup>2</sup>]</b>	<b>2.48E+06</b>

Tabela 121 – Rigidez à flexão fora do plano para a direção Y dos painéis de laje residuais.

Camada ( i )	Espessura (h <sub>i</sub> ) [mm]	E <sub>i</sub> [MPa]	a <sub>i</sub> [mm]	E <sub>i</sub> .b <sub>i</sub> .h <sub>i</sub> <sup>3</sup> /12 [kN.cm <sup>2</sup> ]	E <sub>i</sub> .b <sub>i</sub> .h <sub>i</sub> .a <sub>i</sub> <sup>2</sup> [kN.cm <sup>2</sup> ]
1 (Transversal)	4.54	0	-47.27	0	0
2 (Longitudinal)	30	11000	-30	2.48E+05	2.97E+06
3 (Transversal)	30	0	0	0	0
4 (Longitudinal)	30	11000	30	2.48E+05	2.97E+06
5 (Transversal)	4.54	0	47.27	0	0
<b>h<sub>CLT</sub> [mm]</b>	99.08		<b>Σ</b>	4.95E+05	5.94E+06
				<b>K<sub>y,CLT</sub> [kN.cm<sup>2</sup>]</b>	<b>6.44E+06</b>

- **Rigidez ao cisalhamento fora do plano – Seção residual**

**Tabela 122 – Rigidez ao cisalhamento fora do plano para a direção X dos painéis de parede residuais.**

<b>Camada ( i )</b>	<b>Espessura (h<sub>i</sub>) [mm]</b>	<b>G<sub>i</sub> [MPa]</b>	<b>A<sub>i</sub> [cm<sup>2</sup>]</b>	<b>G<sub>i</sub>.A<sub>i</sub> [kN]</b>
1 (Longitudinal)	4.54	690	45.4	3132.6
2 (Transversal)	30	50	300	1500
3 (Longitudinal)	30	690	300	20700
4 (Transversal)	30	50	300	1500
5 (Longitudinal)	4.54	690	45.4	3132.6
<b>h<sub>CLT</sub> [mm]</b>	99.08		<b>Σ</b>	29965.2
			<b>κ</b>	0.18
			<b>S<sub>x,CLT</sub> [kN]</b>	<b>5.39E+03</b>

Tabela 123 – Rigidez ao cisalhamento fora do plano para a direção Y dos painéis de parede residuais.

Camada ( i )	Espessura (h <sub>i</sub> ) [mm]	G <sub>i</sub> [MPa]	A <sub>i</sub> [cm <sup>2</sup> ]	G <sub>i</sub> .A <sub>i</sub> [kN]
1 (Transversal)	4.54	50	45.4	227
2 (Longitudinal)	30	690	300	20700
3 (Transversal)	30	50	300	1500
4 (Longitudinal)	30	690	300	20700
5 (Transversal)	4.54	50	45.4	227
<b>h<sub>CLT</sub> [mm]</b>	99.08		<b>Σ</b>	43354
			<b>κ</b>	0.18
			<b>S<sub>y,CLT</sub> [kN]</b>	<b>7.80E+03</b>

- Propriedades da seção transversal efetiva – Seção transversal residual

Tabela 124 – Área efetiva na direção X dos painéis de laje residuais.

Camada ( i )	Espessura (h <sub>i</sub> ) [mm]	E <sub>i</sub> [MPa]	A <sub>0,x,liq</sub> [cm <sup>2</sup> ]
1 (Longitudinal)	4.54	11000	45.4
2 (Transversal)	30	0	0
3 (Longitudinal)	30	11000	300
4 (Transversal)	30	0	0
5 (Longitudinal)	4.54	11000	45.4
<b>E<sub>c</sub> [MPa]</b>	11000	<b>Σ</b>	390.8

Tabela 125 – Área efetiva na direção Y dos painéis de laje residuais.

Camada (i)	Espessura (h <sub>i</sub> ) [mm]	E <sub>i</sub> [MPa]	A <sub>i</sub> [cm <sup>2</sup> ]
1 (Transversal)	4.54	0	0
2 (Longitudinal)	30	11000	300
3 (Transversal)	30	0	0
4 (Longitudinal)	30	11000	300
5 (Transversal)	4.54	0	0
<b>E<sub>c</sub> [MPa]</b>	11000	<b>Σ</b>	600

Tabela 126 – Propriedades da seção transversal efetiva na direção X dos painéis de laje residuais.

A <sub>0,x,liq</sub> [cm <sup>2</sup> ]	I <sub>0,x,liq</sub> [cm <sup>4</sup> ]	W <sub>0,x,liq</sub> [cm <sup>3</sup> ]
390.8	2.26E+03	455.3

Tabela 127 – Propriedades da seção transversal efetiva na direção Y dos painéis de laje residuais.

A <sub>0,y,liq</sub> [cm <sup>2</sup> ]	I <sub>0,y,liq</sub> [cm <sup>4</sup> ]	W <sub>0,y,liq</sub> [cm <sup>3</sup> ]
600	5.85E+03	1300.0

- **Tração no plano**

Tabela 128 – Verificação dos painéis de parede residuais à tração no plano.

Identificação	Forças normais [kN/m]		Tensões normais de tração [MPa]		Requisição	Verificação
	$n_x$	$n_y$	$\sigma_{t0,x,d}$	$\sigma_{t0,y,d}$		
Painel de parede					$\sigma_{t,d}/f_{t,d}$	Tração no plano
PPT03	30.00	-	0.77	-	3.48%	OK
	-	30.00	-	0.50	2.26%	OK

- **Flexocompressão e instabilidade lateral**

Tabela 129 – Tensões normais atuantes no painel de parede crítico para a flexocompressão na situação de incêndio.

Identificação	Esforços solicitantes		Tensões normais	
	$n_x$ [kN/m]	$m_x$ [kN.m/m]	$\sigma_{m,x,d}$ [MPa]	$\sigma_{c0,x,d}$ [MPa]
PPT65	-180.00	1.24	2.71	4.61

Tabela 130 – Verificação dos painéis de parede residuais à flexocompressão e instabilidade lateral.

Identificação	Instabilidade lateral				Requisição	Verificação
	$N_{cr,x}$ [kN]	$\lambda_{rel,x}$	$k_x$	$k_{c,x}$		
Painel de parede					$\sigma_{c0,x,d}/k_{c,x}/f_{c,0,d}$ + $\sigma_{m,x,d}/f_{m,d}$	Flexocompressão + Instabilidade lateral
PPT65	333.78	1.68	1.97	0.22	85.99%	OK

- **Cisalhamento fora do plano**

Tabela 131 –Verificação dos painéis de parede residuais ao cisalhamento longitudinal.

Identificação		Força cortante	Momento estático	Tensão cisalhante	Requisição	Verificação
Painel de laje	Direção	$v$ [kN/m]	$S$ [cm <sup>3</sup> ]	$\tau_d$ [MPa]	$\tau_d/f_{v,d}$	Cisalhamento longitudinal
PPT16	X	3.00	327.1	0.04	1.08%	OK
	Y	6.00	900.0	0.09	2.29%	OK

Tabela 132 –Verificação dos painéis de parede residuais ao cisalhamento *rolling shear*.

Identificação		Força cortante	Momento estático	Tensão cisalhante	Requisição	Verificação
Painel de laje	Direção	$v$ [kN/m]	$S_R$ [cm <sup>3</sup> ]	$\tau_{R,d}$ [MPa]	$\tau_{R,d}/f_{R,d}$	Rolling shear
PPT16	X	3.00	900.0	0.12	9.46%	OK
	Y	6.00	112.5	0.01	0.91%	OK

- **Cisalhamento no plano**

Tabela 133 –Verificação dos painéis de parede residuais ao cisalhamento no plano.

Identificação	Esforços solicitantes		Tensões cisalhantes		Requisição	Verificação
	$n_{xy}$ [kN/m]	$v$ [kN/cm]	$\tau_{x,d}$ [MPa]	$\tau_{y,d}$ [MPa]		
PPT03	15.00	0.23	0.58	0.38	$\tau_{d,máx}/f_{v,d}$ 21.77%	OK

## **5.4. QUANTITATIVO DE MATERIAIS**

Com o detalhamento do projeto estrutural, definidas as dimensões dos elementos e as configurações das ligações, pode-se quantificar as peças de madeira da estrutura principal e elementos metálicos, calculando o volume de madeira consumido e o peso de aço necessário, afim de facilitar análises de custo, comparar com outras soluções e verificar o peso estimado para os elementos metálicos no início do dimensionamento estrutural. Vale a ressalva de que o quantitativo elaborado contempla apenas os elementos estruturais de madeira e ligações metálicas dimensionadas neste projeto.

Tabela 134 – Quantitativo de peças de viga oculta de MLC.

PEÇA	QUANTIDADE TOTAL	SEÇÃO TRANSVERSAL [cm x cm]	COMPRIMENTO UNITÁRIO [cm]	COMPRIMENTO TOTAL [m]	VOLUME [m³]
VIGA OCULTA	2	20x30	565	11.30	0.68
	26	20x30	472.5	122.85	7.37
	26	20x30	422.5	109.85	6.59
	36	20x30	412.5	148.50	8.91
	1	20x30	410	4.10	0.25
	9	20x30	362.5	32.63	1.96
	17	20x30	342.5	58.23	3.49
	55	20x30	335	184.25	11.06
	26	20x30	325	84.50	5.07
	19	20x30	320	60.80	3.65
	26	20x30	315	81.90	4.91
	51	20x30	297.5	151.73	9.10
	18	20x30	295	53.10	3.19
	6	20x30	292.5	17.55	1.05
	29	20x30	285	82.65	4.96
	12	20x30	275	33.00	1.98
	56	20x30	272.5	152.60	9.16
	30	20x30	215	64.50	3.87
	28	20x30	205	57.40	3.44
	16	20x30	202.5	32.40	1.94
	37	20x30	192.5	71.23	4.27
	24	20x30	170	40.80	2.45
	27	20x30	165	44.55	2.67
	9	20x30	150	13.50	0.81
	18	20x30	135	24.30	1.46
	36	20x30	105	37.80	2.27
28	20x30	85	23.80	1.43	
<b>Σ</b>	<b>636</b>			<b>VOLUME TOTAL [m³]</b>	<b>107.99</b>

Tabela 135 – Quantitativo de peças de viga aparente de MLC.

PEÇA	QUANTIDADE TOTAL	SEÇÃO TRANSVERSAL [cm x cm]	COMPRIMENTO UNITÁRIO [cm]	COMPRIMENTO TOTAL [m]	VOLUME [m³]
VIGA APARENTE	24	25x30	565	135.60	10.17
	2	25x30	555	11.10	0.83
	2	25x30	467.5	9.35	0.70
	2	25x30	435	8.70	0.65
	2	25x30	417.5	8.35	0.63
	3	25x30	412.5	12.38	0.93
	2	25x30	410	8.20	0.62
	1	25x30	335	3.35	0.25
	6	25x30	325	19.50	1.46
	1	25x30	322.5	3.23	0.24
	48	25x30	320	153.60	11.52
	3	25x30	315	9.45	0.71
	2	25x30	310	6.20	0.47
	2	25x30	297.5	5.95	0.45
	7	25x30	295	20.65	1.55
	48	25x30	292.5	140.40	10.53
	29	25x30	285	82.65	6.20
	5	25x30	282.5	14.13	1.06
	1	25x30	275	2.75	0.21
	26	25x30	210	54.60	4.10
	4	25x30	205	8.20	0.62
	3	25x30	192.5	5.78	0.43
	2	25x30	187.5	3.75	0.28
	1	25x30	170	1.70	0.13
	3	25x30	167.5	5.03	0.38
	1	25x30	165	1.65	0.12
7	25x30	150	10.50	0.79	
<b>Σ</b>	<b>237</b>			<b>VOLUME TOTAL</b> [m³]	<b>56.00</b>

Tabela 136 – Quantitativo de elementos da escada em MLC.

PEÇA	QUANTIDADE TOTAL	SEÇÃO TRANSVERSAL [cm x cm]	COMPRIMENTO UNITÁRIO [cm]	COMPRIMENTO TOTAL [m]	VOLUME [m <sup>3</sup> ]
VIGA PRINCIPAL	42	15x30	356	149.52	6.73
VIGA DE PISO	140	5x30	150	210.00	3.15
CUNHA	420	15x30	16	33.60	1.51
				<b>VOLUME TOTAL</b> [m <sup>3</sup> ]	<b>11.39</b>

Tabela 137 – Quantitativo de peças de pilar de MLC.

PEÇA	QUANTIDADE TOTAL	SEÇÃO TRANSVERSAL [cm x cm]	COMPRIMENTO UNITÁRIO [cm]	COMPRIMENTO TOTAL [m]	VOLUME [m <sup>3</sup> ]
PILAR OCULTO	435	25x35	290	1261.50	110.38
	22	25x35	390	85.80	7.51
PILAR APARENTE	41	35x35	290	118.90	14.57
<b>Σ</b>	<b>498</b>			<b>VOLUME TOTAL</b> [m <sup>3</sup> ]	<b>132.45</b>

Tabela 138 – Quantitativo de painéis de laje de CLT.

PEÇA	QUANTIDADE	ESPESSURA [cm]	DIMENSÕES [cm x cm]	VOLUME [m³]
	TOTAL			
LAJE	112	20	255x520	297.02
	112	20	255x590	337.01
	7	20	150x600	12.60
	7	20	150x515	10.82
	7	20	170x400	9.52
	7	20	170x590	14.04
	7	20	170x515	12.26
	7	20	175x370	9.07
	1	20	195x412.5	1.61
	2	20	185x412.5	3.05
	2	20	185x600	4.44
	4	19	252.5x332.5	6.38
	2	20	252.5x345	3.48
	<b>Σ</b>	<b>277</b>		<b>VOLUME TOTAL [m³]</b>

Tabela 139 – Quantitativo de painéis de parede de CLT.

PEÇA	QUANTIDADE	ESPESSURA [cm]	B [cm]	L [cm]	DIMENSÕES [cm x cm]	VOLUME [m³]
	TOTAL					
PAREDE	14	15	110	105	110x105	2.43
	7	15	270	320	270x320	9.07
	1	15	70	342.5	70x342.5	0.36
	1	15	70	362.5	70x362.5	0.38
	2	15	70	135	70x135	0.28
	2	15	115	342.5	115x342.5	1.18
	2	15	115	150	115x150	0.52
	2	15	115	135	115x135	0.47
	2	15	115	570	115x570	1.97
	2	15	115	370	115x370	1.28
	2	15	115	505	115x505	1.74
	4	15	115	490	115x490	3.38
	26	15	270	315	270x315	33.17
	26	15	270	215	270x215	22.64

	56	15	270	272.5	270x272.5	61.80
	2	15	300	170	300x170	1.53
	51	15	270	302.5	270x302.5	62.48
PAREDE	55	15	270	335	270x335	74.62
	26	15	270	422.5	270x422.5	44.49
	27	15	270	165	270x165	18.04
	6	15	270	292.5	270x292.5	7.11
	28	15	270	85	270x85	9.64
	14	15	270	342.5	270x342.5	19.42
	26	15	270	325	270x325	34.22
	28	15	270	205	270x205	23.25
	2	15	270	202.5	270x202.5	1.64
	2	15	110	105	110x105	0.35
	1	15	110	320	110x320	0.53
	7	15	270	362.5	270x362.5	10.28
	2	15	270	135	270x135	1.09
	1	15	270	150	270x150	0.61
	25	15	270	285	270x285	28.86
	2	15	270	320	270x320	2.59
	1	15	270	410	270x410	1.66
	37	15	270	192.5	270x192.5	28.85
	26	15	270	472.5	270x472.5	49.75
	2	15	270	565	270x565	4.58
	24	15	300	90	300x90	9.72
	24	15	300	150	300x150	16.20
	6	15	290	135	290x135	3.52
	24	15	270	175	270x175	17.01
	36	15	270	412.5	270x412.5	60.14
	24	15	270	297.5	270x297.5	28.92
	12	15	270	275	270x275	13.37
	36	15	270	192.5	270x192.5	28.07
	4	15	150	505	150x505	4.55
	4	15	150	590	150x590	5.31
	4	15	150	510	150x510	4.59
	4	15	150	495	150x495	4.46
	4	15	150	120	150x120	1.08
1	15	250	342.5	250x342.5	1.28	

	2	15	250	135	250x135	1.01
	1	15	250	362.5	250x362.5	1.36
	2	15	370	150	370x150	1.67
	3	15	370	50	370x50	0.83
	1	15	370	292.5	370x292.5	1.62
	4	15	370	215	370x215	4.77
	4	15	370	285	370x285	6.33
	2	15	370	270	370x270	3.00
	1	15	400	50	400x50	0.30
	1	15	400	280	400x280	1.68
	2	15	400	187.5	400x187.5	2.25
	2	15	370	202.5	370x202.5	2.25
	2	15	370	105	370x105	1.17
	1	15	230	320	230x320	1.10
ENRIJECADOR	28	15	50	115	50x115	2.42
	52	15	50	150	50x150	5.85
<b>Σ</b>	<b>835</b>				<b>VOLUME TOTAL [m³]</b>	<b>802.05</b>

Tabela 140 – Quantitativo de conectores metálicos e estimativa do peso total de aço consumido.

PEÇA	DESCRIÇÃO	QUANTIDADE TOTAL	VOLUME UNITÁRIO ESTIMADO [m³]	VOLUME TOTAL [m³]	PESO ESPECÍFICO [kg/m³]	PESO TOTAL [ton]
Chapa metálica (e=6mm)	Chapa embutida no topo e na base do pilar oculto	808	4.14E-04	0.33	7850	2.63
	Chapa embutida no topo e na base do pilar aparente	82	6.24E-04	0.05	7850	0.40
	Conector da ligação entre a viga oculta e o pilar ou outra viga	1336	2.20E-04	0.29	7850	2.31
	Conector da ligação entre a viga aparente e o pilar ou outra viga	474	2.20E-04	0.10	7850	0.82
	Conector da ligação entre a viga principal da escada e outras vigas	84	1.76E-04	0.01	7850	0.12
	Fixação do pilar na laje	498	4.66E-04	0.23	7850	1.82

Chapa metálica (e=3mm)	Fixação da parede na laje (estimado)	5250	1.46E-04	0.77	7851	6.02
	Fixação da parede no térreo (estimado)	750	1.75E-04	0.13	7851	1.03
	Fixação da viga principal da escada no térreo	3	1.75E-04	0.00	7850	0.00
Cilindro metálico φ150mm (e=3mm)	Cilindro oco embutido no topo do pilar	430	4.24E-04	0.18	7850	1.43
	Cilindro oco embutido na laje do térreo	68	4.24E-04	0.03	7850	0.23
Cilindro metálico φ138mm (e=3mm)	Cilindro oco embutido na base do pilar	498	3.90E-04	0.19	7850	1.53
Barra roscada φ16mm x 110mm	Fixação da chapa metálica na base e no topo do pilar	3440	2.21E-05	0.08	7850	0.60
Parafuso HBS φ8mm x 300mm	Fixação do pilar na cobertura	272	1.51E-05	0.00	7850	0.03
Parafuso HBS φ10mm x 300mm	Fixação da laje na viga (estimado)	15230	2.36E-05	0.36	7850	2.82
Parafuso LBS φ5mm x 70mm	Fixação da viga no pilar ou em outra viga	21720	1.37E-06	0.03	7850	0.23
	Fixação da viga principal da escada em outras vigas	420	1.37E-06	0.00	7850	0.00
	Fixação da viga principal da escada no térreo	30	1.37E-06	0.00	7850	0.00
	Fixação da parede na laje	144000	1.37E-06	0.20	7850	1.55
Ancorante parafusável SKR φ16mm x 130mm	Fixação do pilar no térreo	272	2.61E-05	0.01	7850	0.06
	Fixação da parede no térreo	1500	2.61E-05	0.04	7851	0.31
Ancorante parafusável SKR φ8mm x 110mm	Fixação da viga principal da escada no térreo	6	5.53E-06	0.00	7852	0.00
Parafuso SBD φ7.5mm x 215mm	Fixação da viga aparente no pilar ou em outra viga	1422	9.50E-06	0.01	7850	0.11
Parafuso SBD φ7.5mm x 175mm	Fixação da viga oculta no pilar ou em outra viga	3340	7.73E-06	0.03	7850	0.20
Parafuso SBD φ7.5mm x 115mm	Fixação da viga principal da escada em outras vigas	126	5.08E-06	0.00	7850	0.01
Parafuso VGS φ11mm x 150mm	Fixação da parede na laje	10500	1.43E-05	0.15	7850	1.17
			<b>Σ</b>	<b>3.24</b>	<b>Σ</b>	<b>25.42</b>

**Tabela 141 – Quantitativo do volume total de madeira consumido.**

PEÇA	VOLUME TOTAL [m <sup>3</sup> ]	PESO ESPECÍFICO [kg/m <sup>3</sup> ]	PESO TOTAL [ton]
VIGAS OCULTAS DE MLC	107.99	420	45.35
VIGAS APARENTES DE MLC	56.00	420	23.52
ELEMENTOS DA ESCADA	11.39	420	4.78
PILARES OCULTOS DE MLC	117.89	420	49.51
PILARES APARENTES DE MLC	14.57	420	6.12
LAJES DE CLT	721.30	420	302.94
PAREDES DE CLT	802.05	420	336.86
<b>Σ</b>	<b>1831.19</b>	<b>Σ</b>	<b>769.10</b>

**Tabela 142 – Relação entre o peso próprio da estrutura de madeira e o peso dos elementos metálicos.**

Peso total dos elementos de madeira [ton]	769.10
Peso total dos elementos metálicos [ton]	25.42
Relação aço/madeira	3.31%

Desse modo, visto que no início do dimensionamento estrutural estimou-se que o peso dos elementos metálicos correspondia a 3% do peso próprio da estrutura de madeira e que a relação calculada a partir do quantitativo de materiais corresponde a 3,31%, conclui-se que a estimativa é válida e que a diferença pode ser abatida pelos coeficientes de segurança adotados para os cálculos. Todavia, no caso de um projeto executivo, o ideal seria refazer o dimensionamento baseado no peso real dos elementos metálicos, averiguando a necessidade de aumento das seções transversais ou mudanças na configuração das ligações. Além disso, o peso dos elementos metálicos foi obtido através de estimativas de volume e quantidade, inclusive desconsiderando a existência de alguns conectores, e o peso dos elementos de madeira foi calculado desprezando a existência de aberturas nas paredes.

## 6. CONCLUSÃO

Com os resultados obtidos no item 5.3 é possível afirmar que a segurança da estrutura do edifício como um todo é garantida, uma vez que as verificações de ELU, ELS e incêndio exigidas pela ABNT NBR7190:2022 foram atendidas. Dessa forma, pode-se concluir que as seções transversais, classe de resistência da madeira e ligações metálicas adotadas para o projeto são adequadas. Ainda com relação aos resultados obtidos, as verificações críticas que guiaram o dimensionamento dos elementos estruturais foram as de estabilidade em situação de incêndio. A proteção proporcionada pelo encapsulamento dos painéis com gesso se mostrou necessária para viabilizar o TRRF, e a utilização de vigas sobre as paredes proporcionou maior segurança contra o fogo, uma vez que as vigas são mais largas que as paredes e por esse motivo suportam mais tempo expostas ao fogo sem perder a estabilidade. Todavia, é importante destacar a possibilidade de refinamento dos cálculos para maior economia de materiais, por exemplo variando a configuração das ligações de acordo com os esforços solicitantes de cada elemento e não a partir dos elementos críticos ou mesmo variando as seções de mais elementos estruturais.

Além disso, fugindo do escopo deste trabalho, no contexto de um projeto executivo outras verificações de segurança seriam necessárias para o projeto, tal como a verificação da situação de içamento de peças, essencial para garantir que os elementos pré-fabricados não sofram desgastes ou até rompimento na etapa de construção da obra. Outra verificação necessária diz respeito ao dimensionamento de todas as ligações presentes no projeto, uma vez que para este trabalho apenas algumas ligações foram abordadas, garantindo, assim, a segurança e a durabilidade da estrutura. Por fim, uma análise aprofundada da situação de incêndio, com a criação de modelos computacionais específicos para esse estado limite e a realização de ensaios que comprovem a resistência dos componentes à ação do fogo, contribuiria para a comprovação da segurança do edifício e refinamento dos cálculos.

Neste projeto optou-se pelo uso dos painéis de parede com funções secundárias como travamento de outros elementos e distribuição dos esforços horizontais, o que se comprovou efetivo durante a análise estrutural. Porém, tendo em vista exemplos reais de obras em madeira engenheirada ao redor do mundo, este projeto poderia ser reavaliado com o estudo de viabilidade da estrutura sem a utilização de vigas sobre as paredes.

Com relação as dificuldades atuais de implementação de edifícios altos em madeira no Brasil, pode-se citar o preconceito atrelado ao desconhecimento do público em geral com a respeito das qualidades da madeira, o alto custo dos materiais e a baixa disponibilidade de mão de obra qualificada. Entretanto, o uso da madeira como estrutura principal de edifícios com múltiplos pavimentos, além do aspecto sustentável descrito ao longo deste trabalho, também é vantajoso para a diminuição do custo com fundações, uma vez que um elemento de madeira conífera pesa cerca de 5 vezes menos que um elemento em concreto armado, aliviando assim os esforços sobre a fundação, fato comprovado neste projeto.

Em suma, este trabalho comprova a eficiência estrutural da madeira engenheirada quando empregada em obras de edifícios de médio porte, mesmo na ausência de um núcleo rígido em aço ou concreto. As dimensões finais obtidas para os elementos ficaram dentro de uma margem esperada, sem seções transversais de madeira exageradamente robustas e quantidades excessivas de pinos metálicos nas ligações. Desse modo, com o avanço da tecnologia, a instalação de novas fábricas e a difusão do conceito das construções sustentáveis em madeira pelo Brasil, são positivas as perspectivas de aumento da demanda por obras de médio e grande porte em madeira, desenvolvimento de mão de obra qualificada e consequente diminuição do custo de implementação do sistema construtivo, viabilizando progressivamente a concorrência com outros materiais já consolidados no cenário brasileiro.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190**: Projeto de Estruturas de Madeira. Rio de Janeiro, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190**: Projeto de Estruturas de Madeira. Rio de Janeiro, 2022

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6120**: Ações para o cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6123**: Forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro, 1988.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8681**: Ações e segurança nas estruturas - Procedimento. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14432**: Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9062**: Projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5626**: Instalação predial de água fria. Rio de Janeiro, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13714**: Sistema de hidrantes e de mangotinhos para combate a incêndio. Rio de Janeiro, 2000.

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

EUROPEAN TECHNICAL ASSESSMENT. **ETA 12/0362**. Finlândia, 2020.

COSTA, A.A.P. **Construção de edifícios com Cross Laminated Timber (CLT)**. 2013. 129f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Portugal, 2013.

SHIGUE, E.K. **Difusão da Construção em Madeira no Brasil**. 2018. 250f. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.

AZAMBUJA, M.A. **Estudo experimental de adesivos para fabricação de madeira laminada colada: avaliação da resistência de emendas dentadas, da durabilidade e de vigas**. 2006. 159f. Tese (Doutorado) – Área Interunidades em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

RACHER, P. (1995). **Moment resisting connections**. Timber Engineering. STEP 1. C16/1-C16/10.

LEE, L.E.J. **O estudo do sistema construtivo de dois edifícios verticais contemporâneos de madeira.** 2018. 19f. Tese (Iniciação Científica) – Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, 2018.

CARVALHO, G.M. **Proposta técnica e econômica da implantação de um sistema de telhado verde.** 2017. 70f. TCC (Graduação) – Curso de Engenharia Civil da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

CATUZZO, H. **Telhado verde: impacto positivo na temperatura e umidade do ar. O caso da cidade de São Paulo.** 2013. 207f. Tese (Doutorado) – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

WILLES, J.A. **Tecnologias em telhados verdes extensivos: meios de cultura, caracterização hidrológica e sustentabilidade do sistema.** 2014. 70f. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2014.

SILVA, C.; BRANCO, J.M.; LOURENCO, P.B. **MLCC na construção em altura. Construction and Building Materials**, ResearchGate, Dez. 2012.

OLIVEIRA, G.L. **Cross Laminated Timber (CLT) no Brasil: processo construtivo e desempenho.** 2018. 194f. Tese (Mestrado) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.

SWEDISH WOOD. **The CLT Handbook: CLT structures – facts and planning.** 2019. 188f.

WOOD WORKS. **U.S. Mass Timber Construction Manual.** 2021. 81f.

WOOD WORKS. **Structural CLT Floor and Roof Design**. 2017. 58f.

ROTHOBLAAS. **Connections systems for CLT structures**. 2019. 50f.

BINDERHOLZ. **Processing guideline binderholz CLT BBS**. 2018. 80f.

ROTHOBLAAS. **CLT as structural material**. 2019. 40f.

PRO:HOLZ. **Cross-Laminated Timber Structural Design**. 2014. 191f.

ROTHOBLAAS. **Parafusos e conectores para madeira: Carpintaria, Estruturas e Exterior**. 2019. 369f.

ROTHOBLAAS. **Chapas e conectores para madeira: edifícios, estruturas e exterior**. 2019. 576f.

NATURALLY:WOOD. **Brock Commons Tallwood House: Design and preconstruction overview**. 2016. 24f.

REWOOD. **Caderno de detalhes construtivos: Madeira Laminada Colada (MLC)**. 2021. 45f.

CROSSLAM. **Informações técnicas**. 2019. 19f.

ALWITRA. **Evalon: Mantas impermeabilizantes**. 2021. 16f.

ISORECORT. **Catálogo técnico**. 2021. 12f.

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas. **Informações sobre madeiras**. Disponível em: <[http://www.ipt.br/consultas\\_online/informacoes\\_sobre\\_madeira/busca](http://www.ipt.br/consultas_online/informacoes_sobre_madeira/busca)>. Acesso em: 26 Jun. 2021.

CARPINTERIA – Madeira inteligente. **Mass timber**. Disponível em: <<https://carpinteria.com.br/tag/mass-timber/>>. Acesso em: 26 Jun. 2021.

ARCHDAILY. **Maior arranha-céu de madeira do mundo é concluído em Vancouver**. Disponível em: <<https://www.archdaily.com.br/br/879671/maior-arranha-ceu-de-madeira-do-mundo-e-concluido-em-vancouver>>. Acesso em: 26 Jun. 2021.

PREFEITURA DE SÃO CARLOS. **Mapas de loteamentos em São Carlos**. Disponível em: <<http://www.saocarlos.sp.gov.br/index.php/habitacao-morar/154835-mapas-loteamentos-cidade-districtos.html>>. Acesso em: 26 Jun. 2021.

PORTAL SOLAR. **Simulador de energia solar**. Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/calculo-solar>>. Acesso em: 26 Jun. 2021.

TECVERDE. **Residências tecverde possuem maior isolamento térmico e acústico**. Disponível em: <<https://www.tecverde.com.br/2021/03/25/casas-tecverde-possuem-maior-isolamento-termico-e-acustico/>>. Acesso em: 26 Jun. 2021.

NATURALLY:WOOD. **Brock Commons Tallwood House**. Disponível em: <[https://www.youtube.com/watch?v=ABQHbNwvU\\_s&ab\\_channel=naturally%3Awood](https://www.youtube.com/watch?v=ABQHbNwvU_s&ab_channel=naturally%3Awood)>. Acesso em: 26 Jun. 2021.

FORTLEV. **Especificações técnicas: caixa d'água de polietileno 10000 L.** Disponível em: <<https://www.fortlev.com.br/produtos/reservatorios/solucoes-fortlev-caixa-dagua-grandes-volumes/caixas-dagua/caixa-dagua-de-polietileno-10000l/>>. Acesso em: 26 Jun. 2021.

CIPEM – Centro das Indústrias Produtoras e Exportadoras de Madeira do Estado do Mato Grosso. **Madeira em alta.** Disponível em: <<https://cipem.org.br/madeira-em-alta/>>. Acesso em: 26 Jun. 2021.

CROSSLAM BRASIL. **Cross Laminated Timber.** Disponível em: <<https://www.crosslam.com.br/site/clt/>>. Acesso em: 06 Set. 2021.

REMASTER TECNOLOGIA. **Sistemas construtivos de pisos elevados.** Disponível em <<https://www.remaster.com.br/piso-elevado-interno>>. Acesso em: 20 Set. 2021.

SIENGE PLATAFORMA. **Piso elevado: conheça aplicações, vantagens e desvantagens.** Disponível em <<https://www.sienge.com.br/blog/piso-elevado/>>. Acesso em: 20 Set. 2021.

ENERGIA TOTAL. **Painel solar 405W – Canadian Hiku – Bipartida.** Disponível em <<https://www.energiatotal.com.br/painel-solar-405w-canadian-hiku>>. Acesso em: 20 Set. 2021.

FORTLEV. **Caixa d'água de polietileno 10000L.** Disponível em <<https://www.fortlev.com.br/produtos/reservatorios/caixa-dagua-de-polietileno-10000l/>>. Acesso em: 23 Out. 2021.

**ANEXO A – PROJETO ARQUITETÔNICO: PLANTA BAIXA  
DO TÉRREO, PLANTA BAIXA DO PAVIMENTO TIPO E  
PLANTA DE COBERTURA**



**ANEXO B – PROJETO ARQUITETÔNICO: ELEVAÇÕES E  
VISTAS ISOMÉTRICAS**



ELEVAÇÃO 1  
ESCALA 1:125



ELEVAÇÃO 2  
ESCALA 1:125



ELEVAÇÃO 3  
ESCALA 1:125



ELEVAÇÃO 4  
ESCALA 1:125

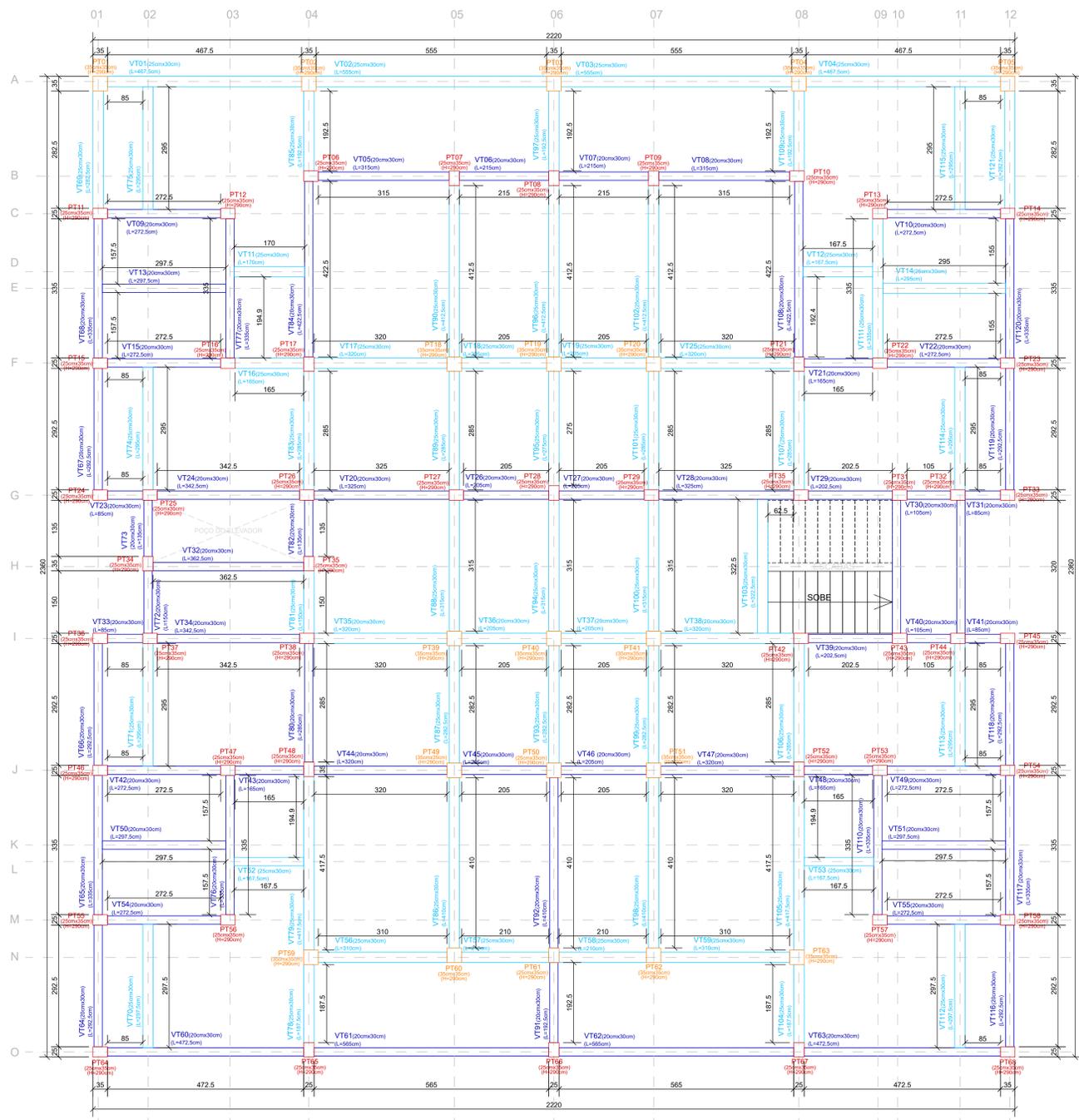


VISTA ISOMÉTRICA 1  
SEM ESCALA

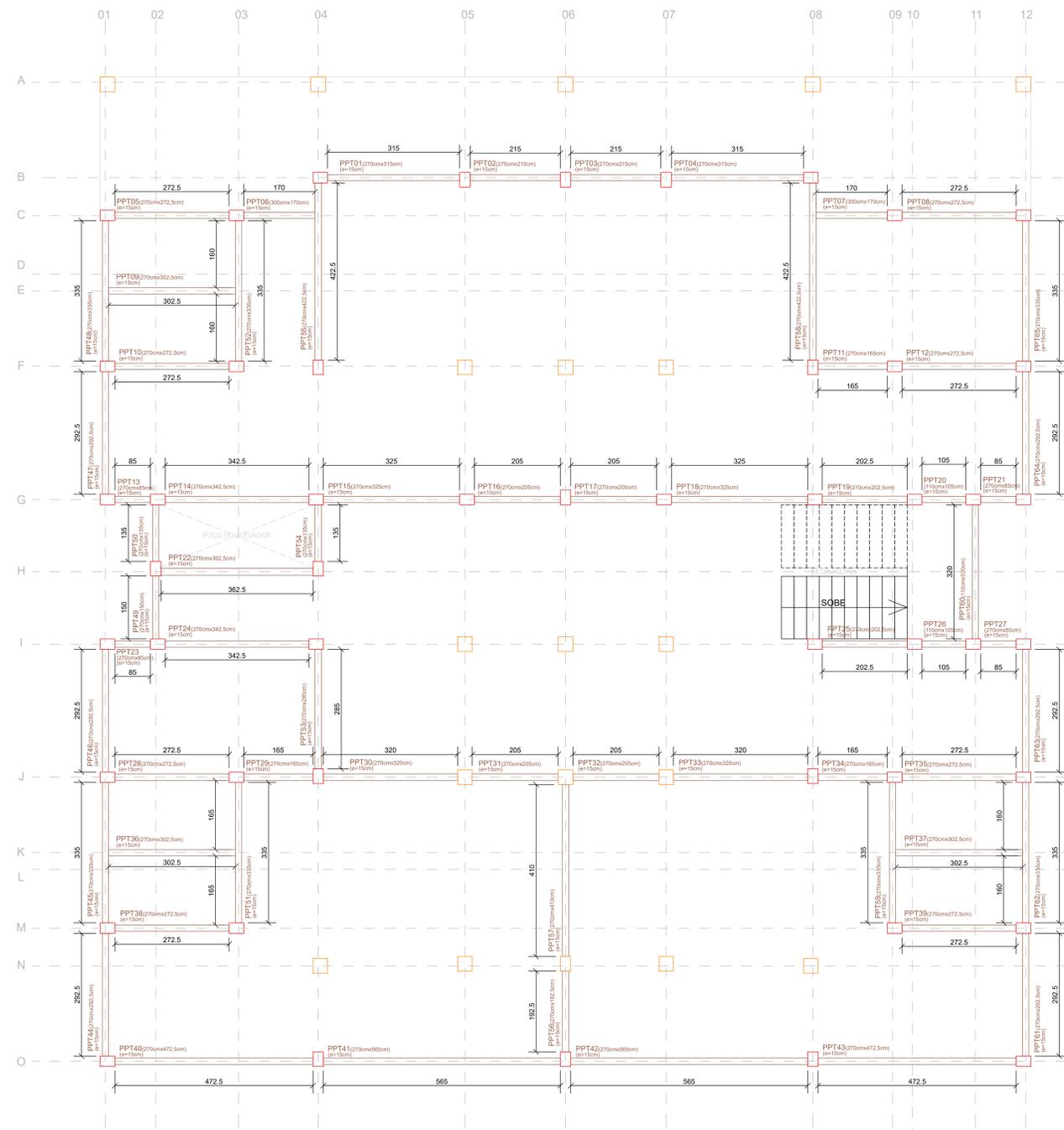


VISTA ISOMÉTRICA 2  
SEM ESCALA

**ANEXO C – PROJETO ESTRUTURAL: PLANTAS DE  
LOCAÇÃO DE PILARES, VIGAS E PAREDES DO  
PAVIMENTO TÉRREO E LOCAÇÃO DOS ELEMENTOS  
ESTRUTURAIS DOS PATAMARES DA ESCADA**

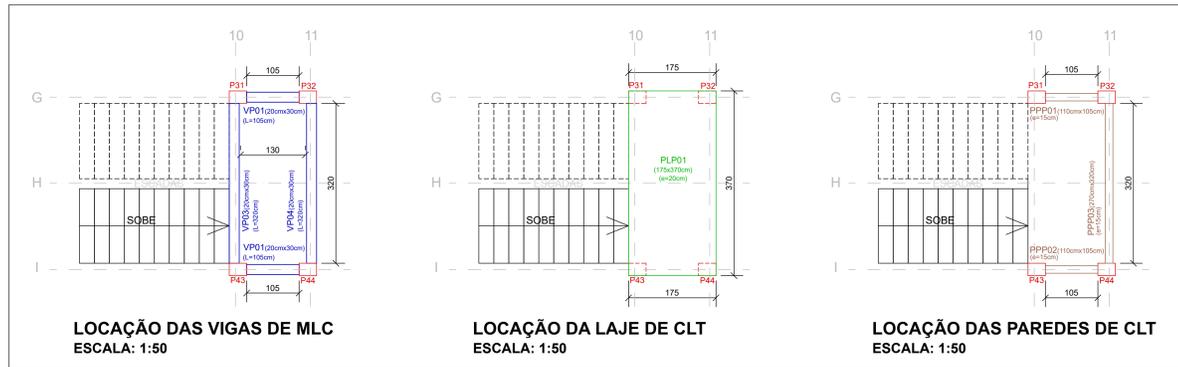


PLANTA DE LOCAÇÃO DAS VIGAS E PILARES DE MLC - TÉRREO  
ESCALA: 1:50



PLANTA DE LOCAÇÃO DOS PAINÉIS DE CLT DAS PAREDES - TÉRREO  
ESCALA: 1:50

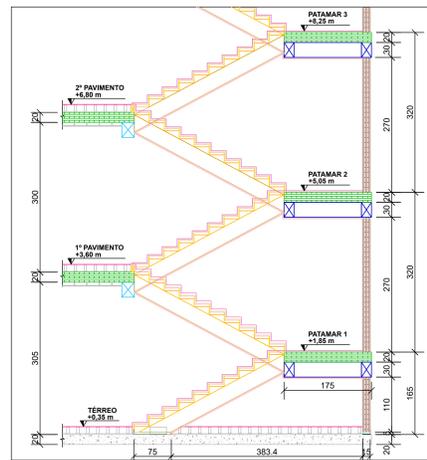
ELEMENTOS ESTRUTURAIS DO PATAMAR DA ESCADA



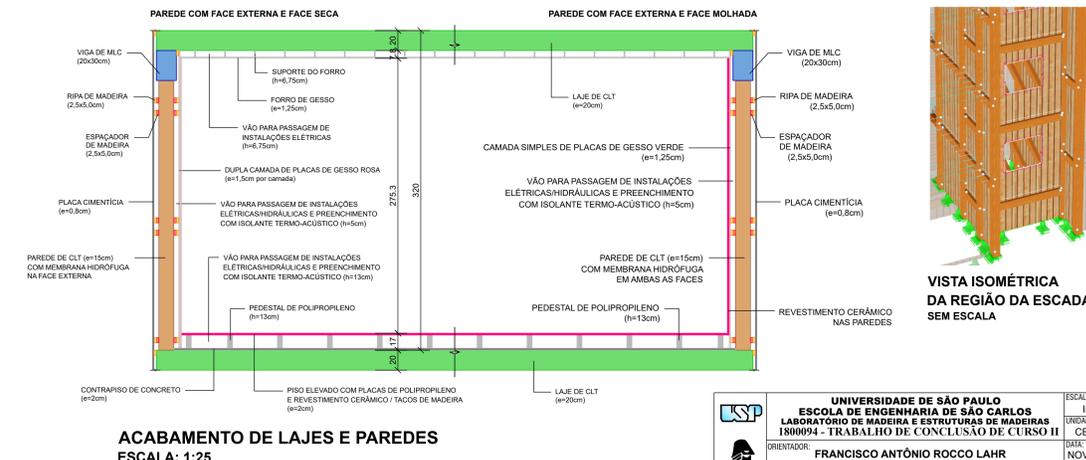
LOCAÇÃO DAS VIGAS DE MLC  
ESCALA: 1:50

LOCAÇÃO DA LAJE DE CLT  
ESCALA: 1:50

LOCAÇÃO DAS PAREDES DE CLT  
ESCALA: 1:50



VISTA LATERAL DA REGIÃO DA ESCADA  
ESCALA: 1:50



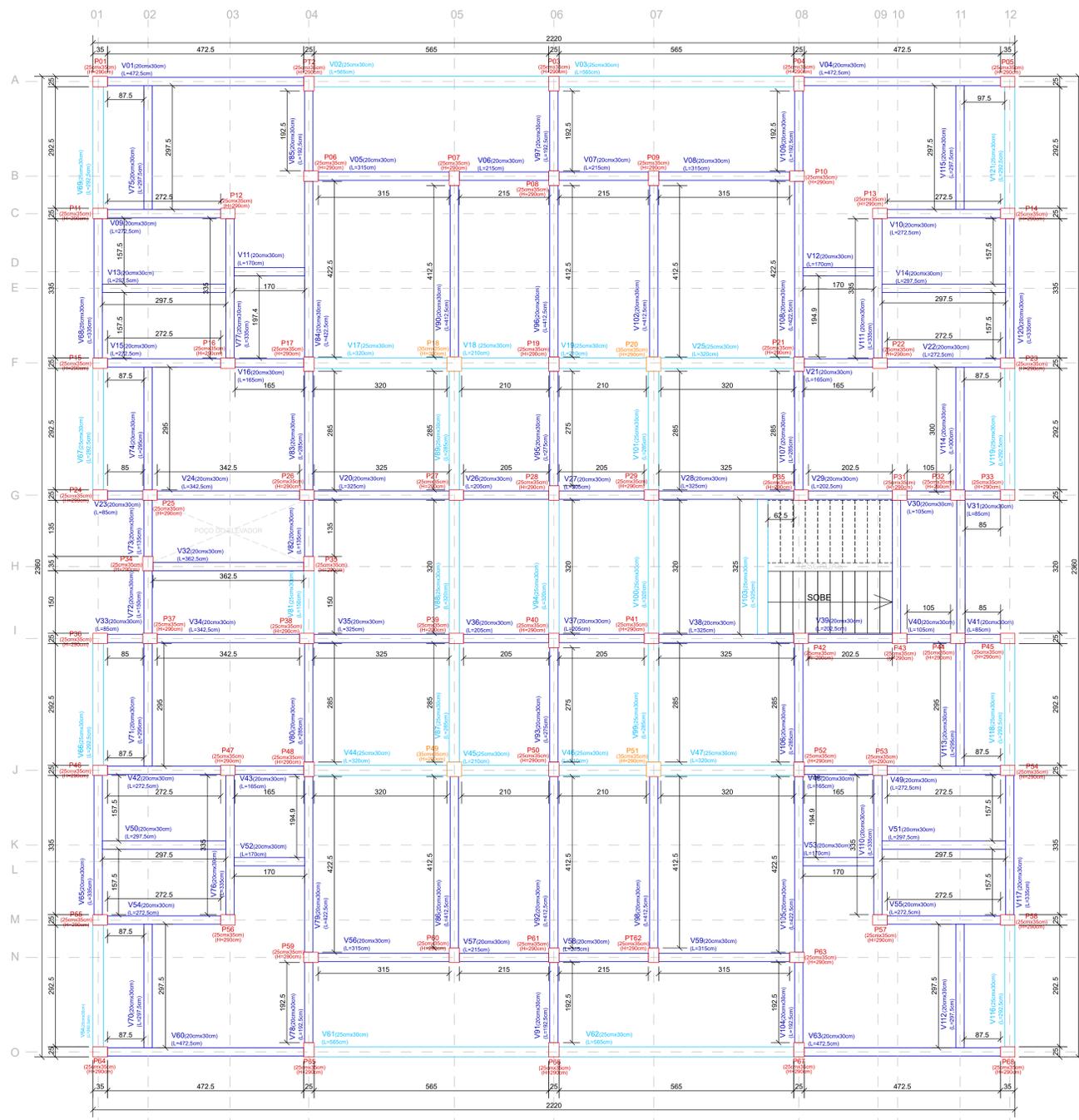
ACABAMENTO DE LAJES E PAREDES  
ESCALA: 1:25



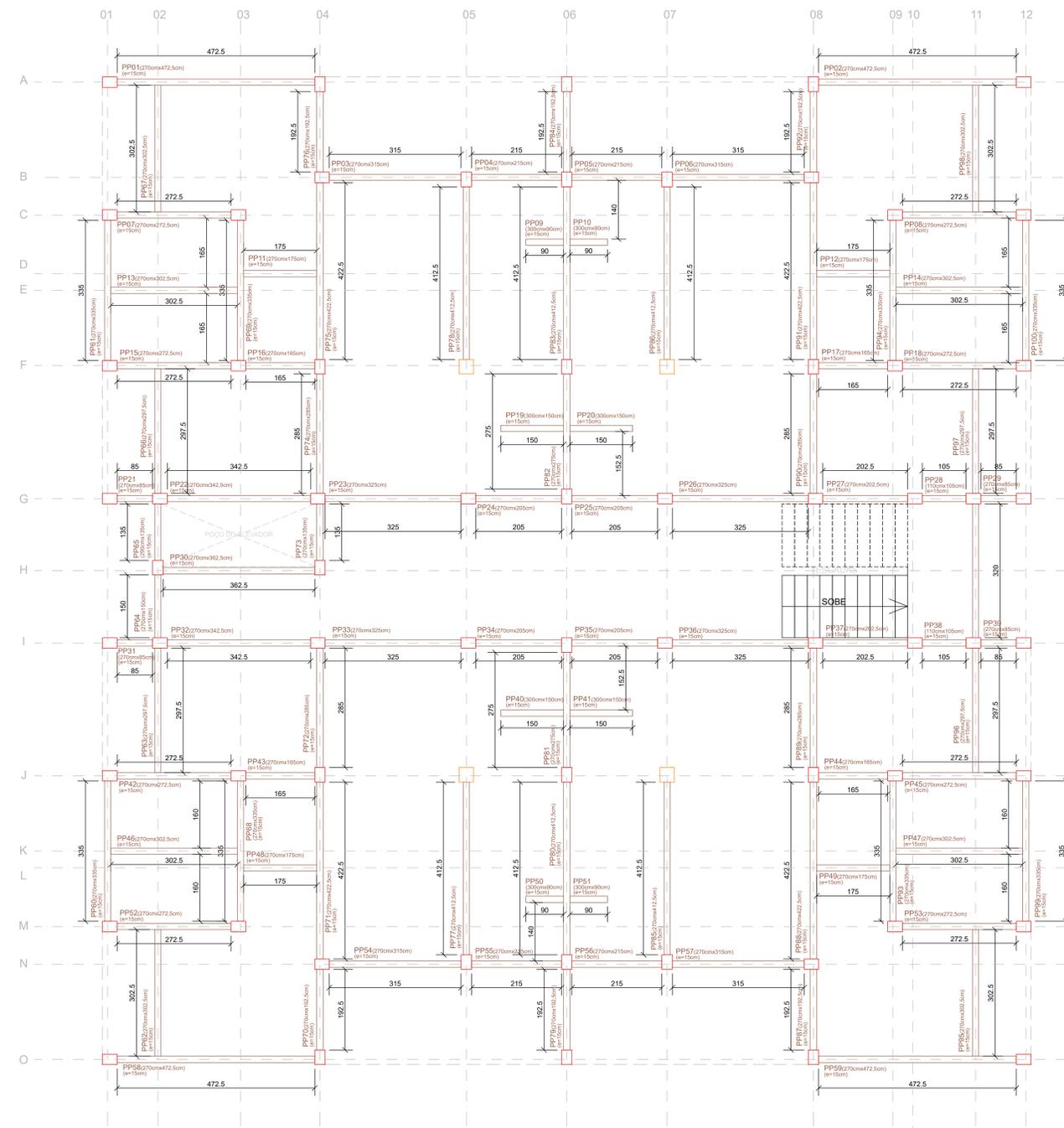
VISTA ISOMÉTRICA DA REGIÃO DA ESCADA SEM ESCADA

	UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS LABORATÓRIO DE MADEIRA E ESTRUTURAS DE MADEIRAS 180094 - TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO II	ESCALA: INDICADA
	ORIENTADOR: FRANCISCO ANTÔNIO ROCCO LAHR	UNIDADE: CENTÍMETROS
DESENHO: RAFAEL SANCHES MERCADANTE	DATA: NOVEMBRO/2021	FOLHA: 10311677
PROJETO: EDIFÍCIO RESIDENCIAL EM MADEIRA ENGENHEIRADA PROJETO ESTRUTURAL: PLANTAS DE LOCAÇÃO DE PILARES, VIGAS E PAREDES DO PAVIMENTO TÉRREO E LOCAÇÃO DOS ELEMENTOS ESTRUTURAIS DOS PATAMARES DA ESCADA		DATA: 03/07

**ANEXO D – PROJETO ESTRUTURAL: PLANTAS DE  
LOCAÇÃO DE PILARES, VIGAS E PAREDES DO  
PAVIMENTO TIPO E DETALHAMENTO DOS ELEMENTOS  
ESTRUTURAIS DA ESCADA**

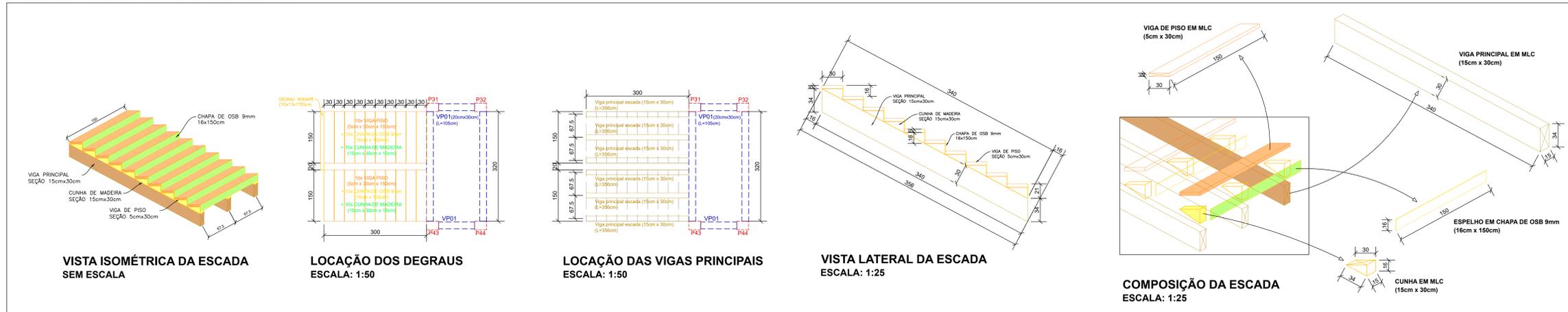


PLANTA DE LOCAÇÃO DAS VIGAS E PILARES DE MLC - PAVIMENTO TIPO  
ESCALA: 1:50

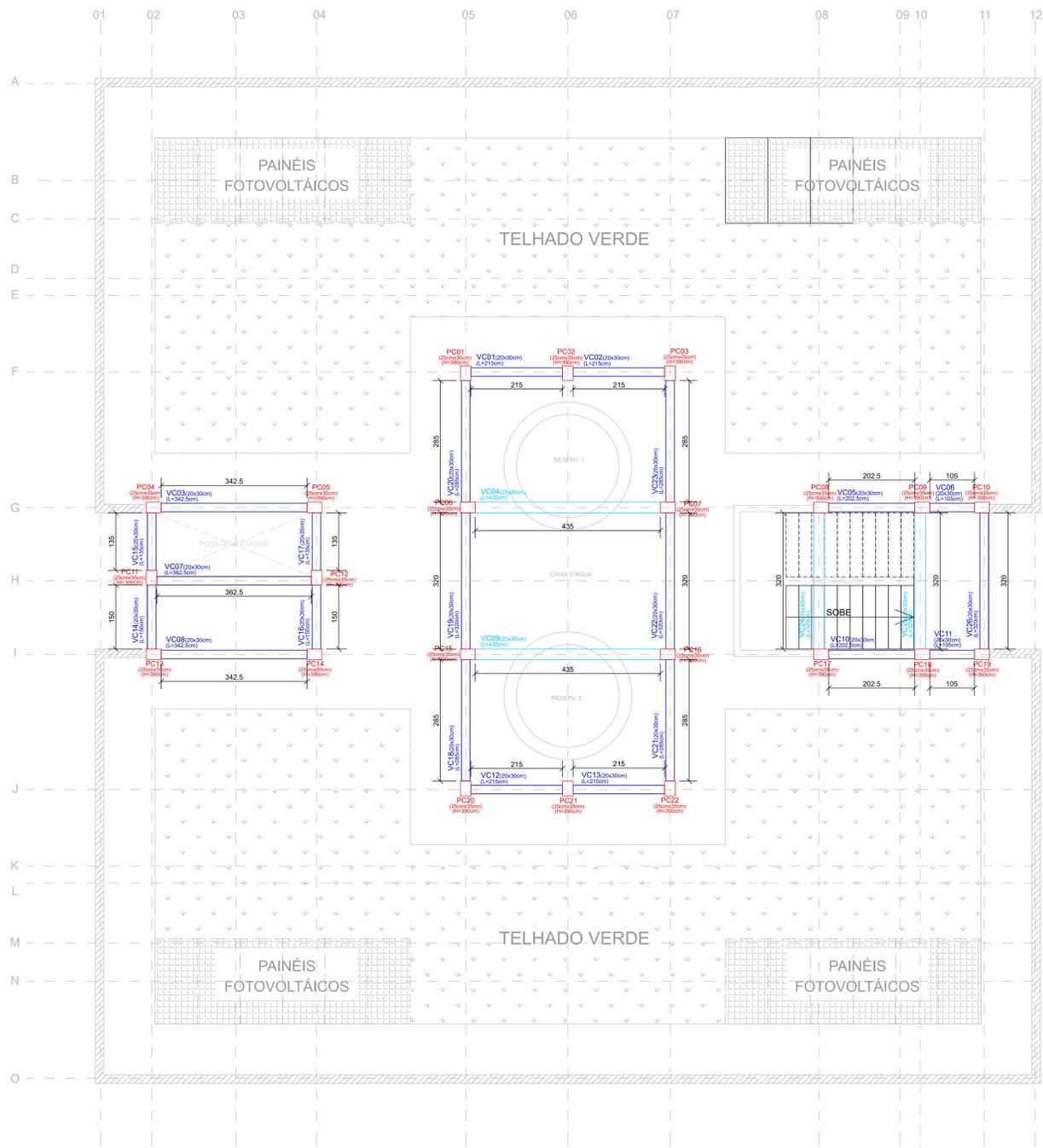


PLANTA DE LOCAÇÃO DOS PAINÉIS DE CLT DAS PAREDES - PAVIMENTO TIPO  
ESCALA: 1:50

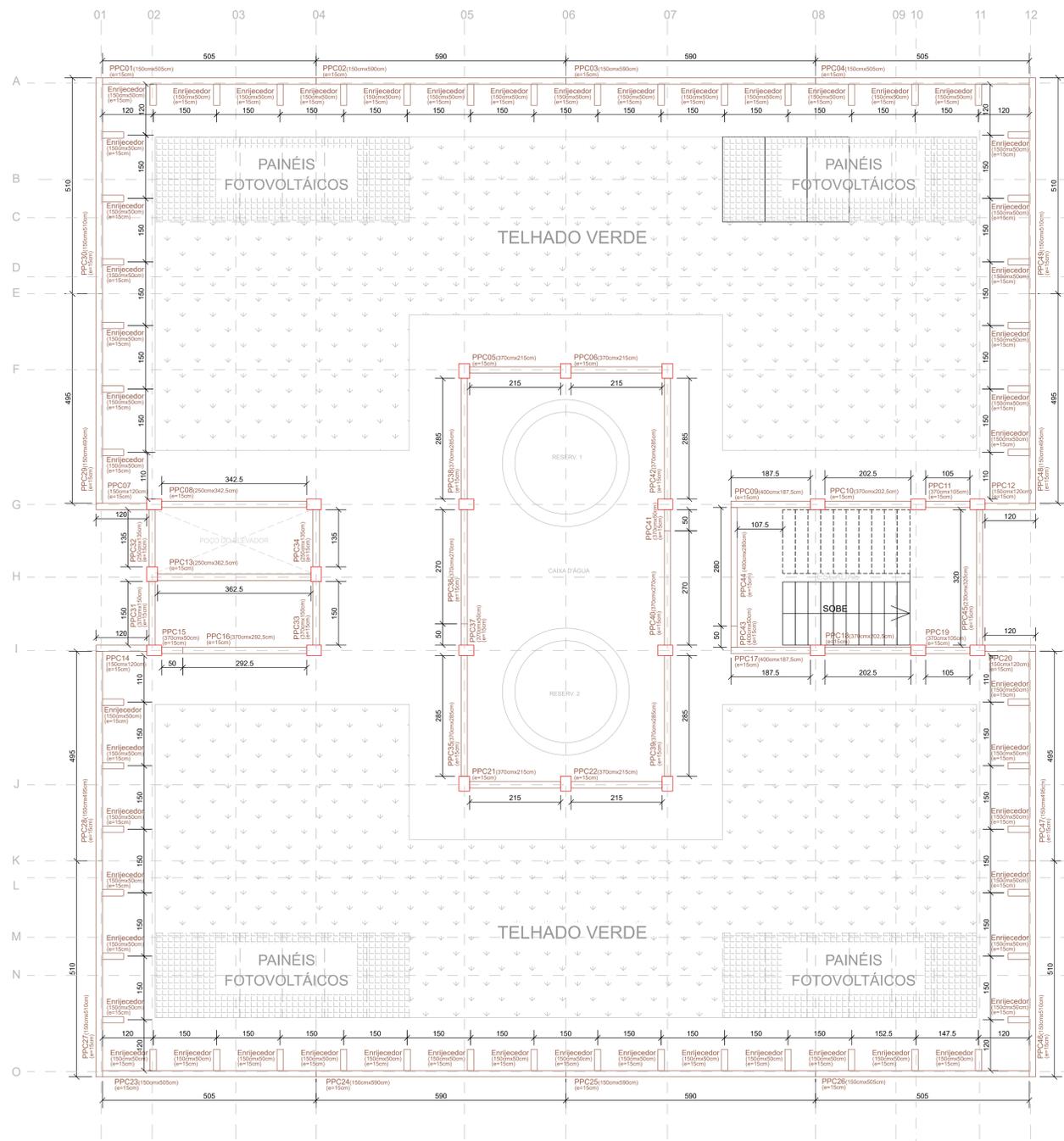
ELEMENTOS ESTRUTURAIS DA ESCADA



**ANEXO E – PROJETO ESTRUTURAL: PLANTAS DE  
LOCAÇÃO DE PILARES, VIGAS E PAREDES DA  
COBERTURA E LOCAÇÃO DOS ELEMENTOS  
ESTRUTURAIS DA CASA DE MÁQUINAS DO ELEVADOR**

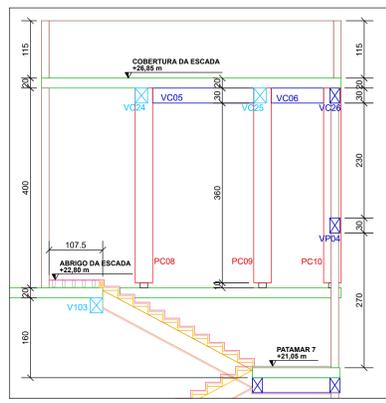
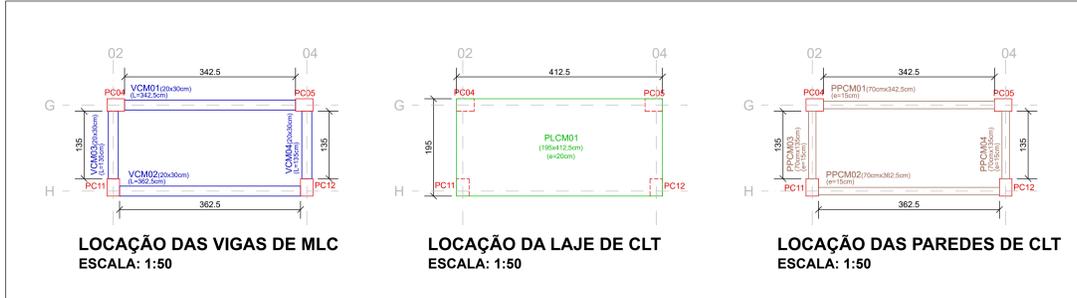


PLANTA DE LOCAÇÃO DAS VIGAS E PILARES DE MLC - COBERTURA  
ESCALA: 1:50

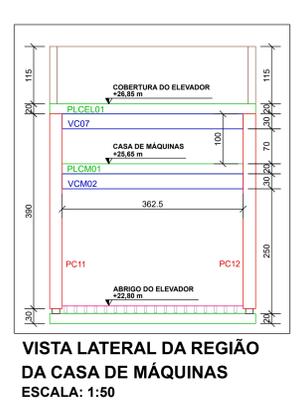


PLANTA DE LOCAÇÃO DOS PAINÉIS DE CLT DAS PAREDES - COBERTURA  
ESCALA: 1:50

ELEMENTOS ESTRUTURAIS DA CASA DE MÁQUINAS DO ELEVADOR



VISTA LATERAL DA REGIÃO DA ESCADA NA COBERTURA  
ESCALA: 1:50



VISTA LATERAL DA REGIÃO DA CASA DE MÁQUINAS  
ESCALA: 1:50

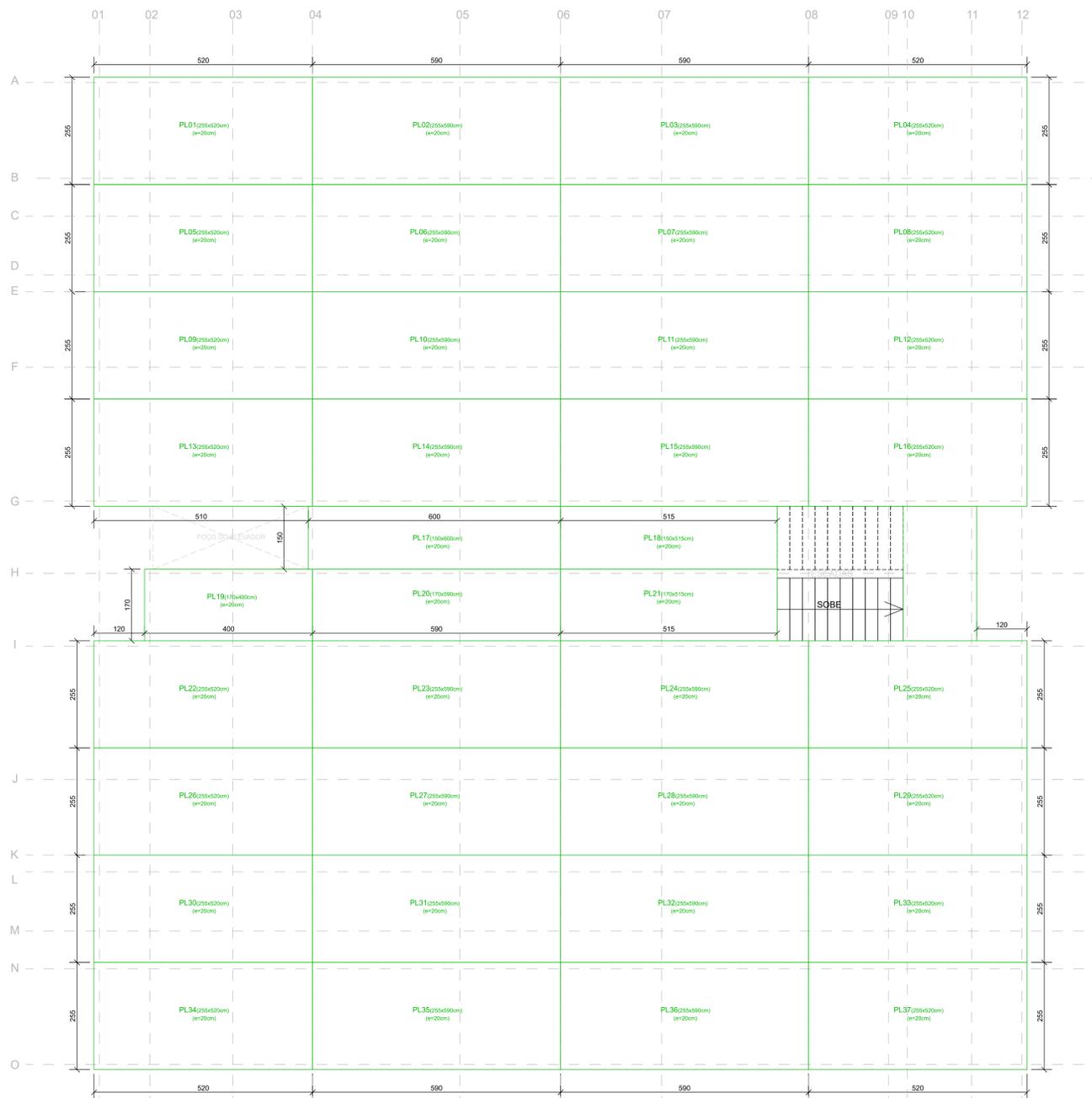


VISTA ISOMÉTRICA DA REGIÃO DA CASA DE MÁQUINAS DO ELEVADOR SEM ESCALA



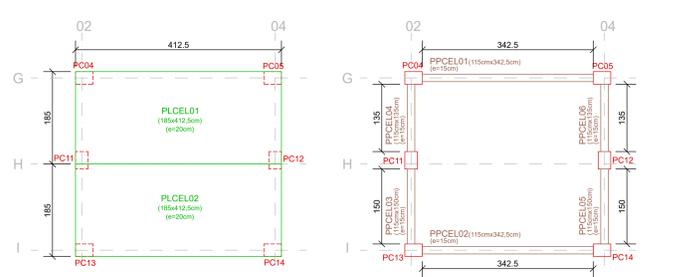
VISTA ISOMÉTRICA DA COBERTURA DA ESCADA SEM ESCALA

**ANEXO F – PROJETO ESTRUTURAL: PLANTAS DE  
LOCAÇÃO DE LAJES E DE ELEMENTOS ESTRUTURAIS  
DAS COBERTURAS DA ESCADA, ELEVADOR E CAIXA  
D'ÁGUA E DETALHAMENTO DE LIGAÇÕES**



**PLANTA DE LOCAÇÃO DOS PAINÉIS DE CLT DAS LAJES - PAVIMENTO TIPO**  
ESCALA: 1:50

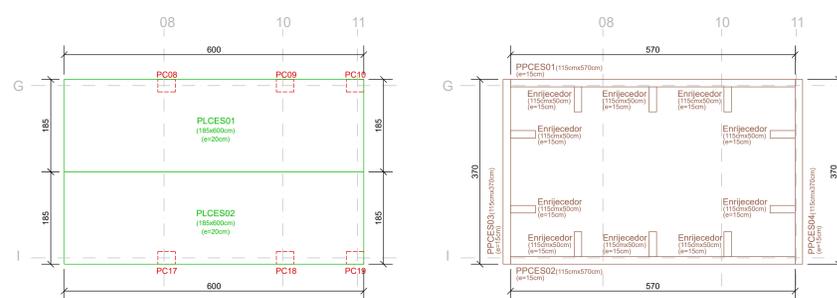
**ELEMENTOS ESTRUTURAIS DA COBERTURA DO ELEVADOR**



**LOCAÇÃO DAS LAJES DE CLT**  
ESCALA: 1:50

**LOCAÇÃO DAS PLATIBANDAS DE CLT**  
ESCALA: 1:50

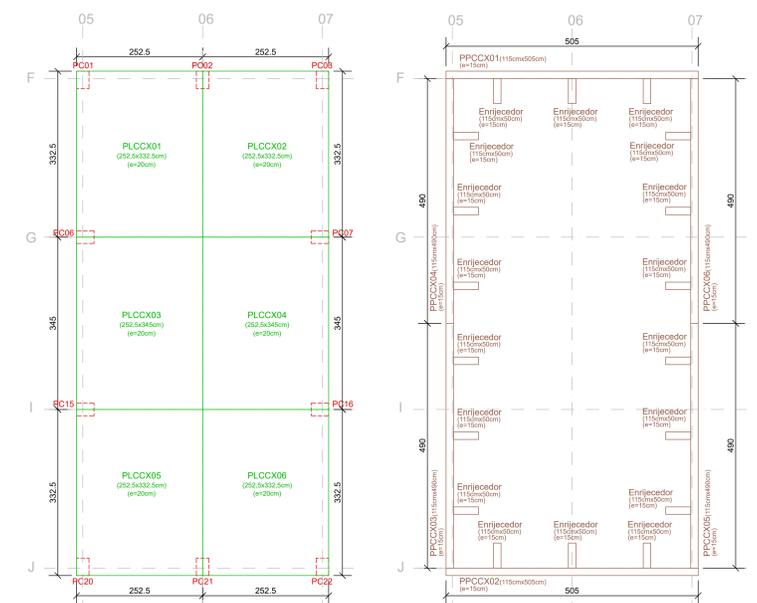
**ELEMENTOS ESTRUTURAIS DA COBERTURA DA ESCADA**



**LOCAÇÃO DAS LAJES DE CLT**  
ESCALA: 1:50

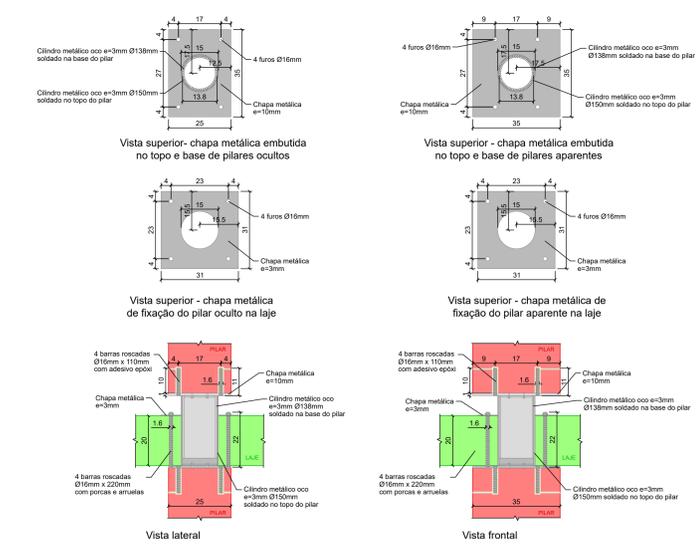
**LOCAÇÃO DAS PLATIBANDAS DE CLT**  
ESCALA: 1:50

**ELEMENTOS ESTRUTURAIS DA COBERTURA DA CAIXA D'ÁGUA**

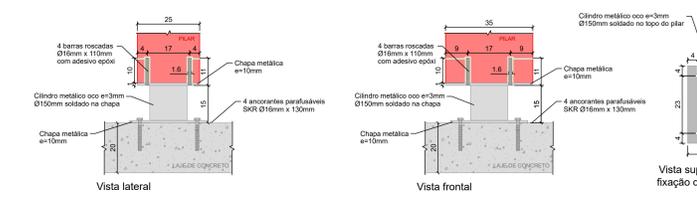


**LOCAÇÃO DAS LAJES DE CLT**  
ESCALA: 1:50

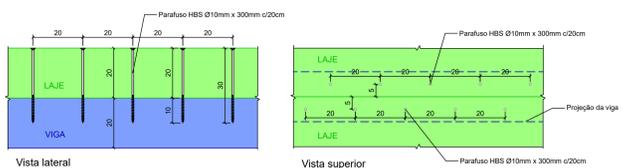
**LOCAÇÃO DAS PLATIBANDAS DE CLT**  
ESCALA: 1:50



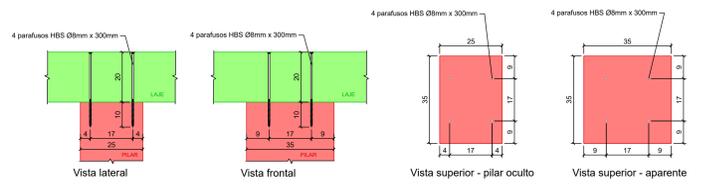
**DETALHE 01: LIGAÇÃO PILAR-PILAR**  
ESCALA: 1:10



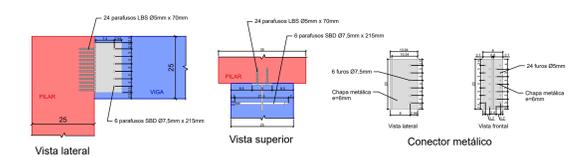
**DETALHE 02: LIGAÇÃO PILAR-TÉRREO**  
ESCALA: 1:10



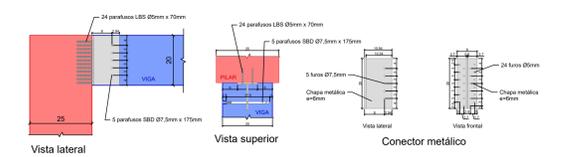
**DETALHE 06: LIGAÇÃO LAJE-VIGA**  
ESCALA: 1:10



**DETALHE 03: LIGAÇÃO PILAR-COBERTURA**  
ESCALA: 1:10

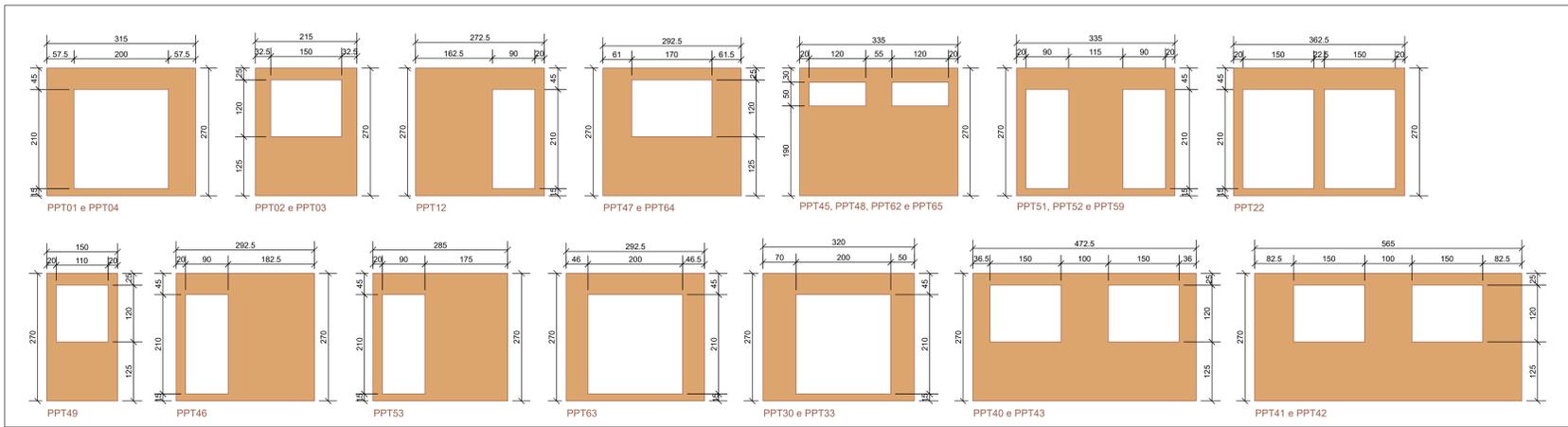


**DETALHE 04: LIGAÇÃO VIGA APARENTE-PILAR/VIGA**  
ESCALA: 1:10

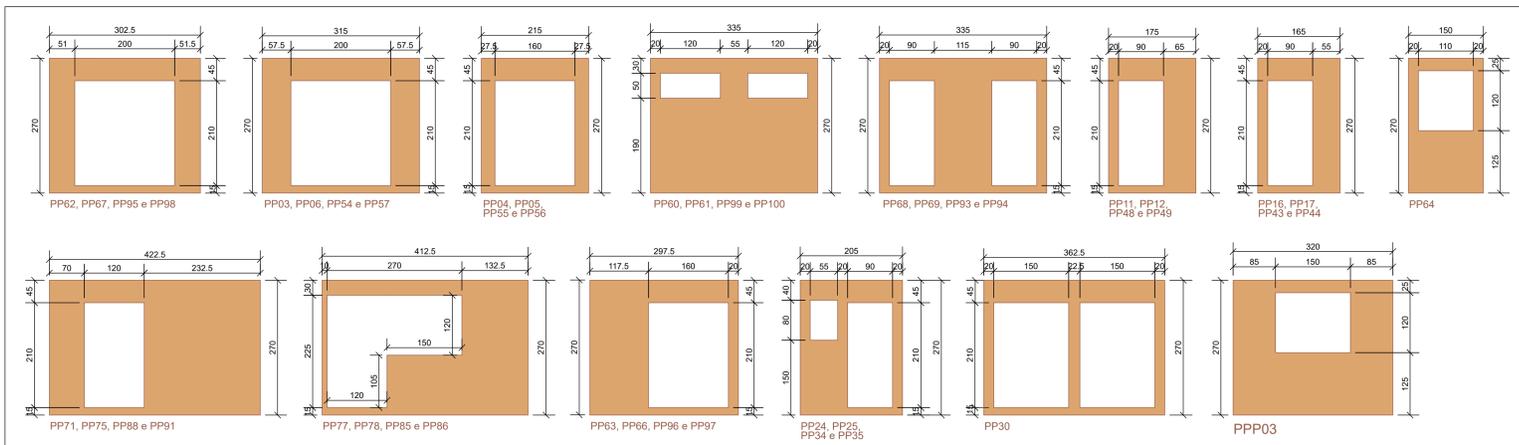


**DETALHE 05: LIGAÇÃO VIGA OCULTA-PILAR/VIGA**  
ESCALA: 1:10

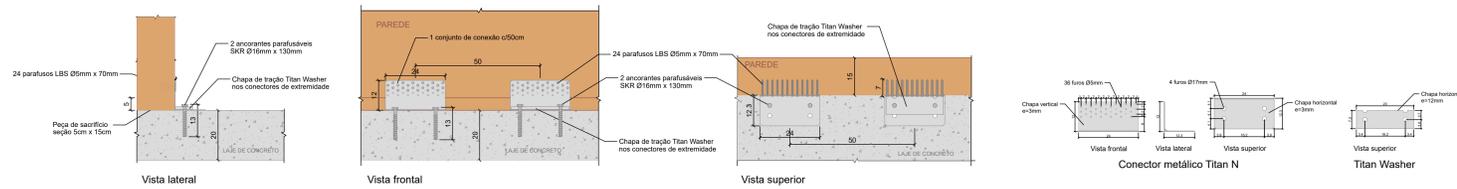
**ANEXO G – PROJETO ESTRUTURAL: DETALHAMENTO  
DAS ABERTURAS DAS PAREDES DE CLT E  
DETALHAMENTO DE LIGAÇÕES**



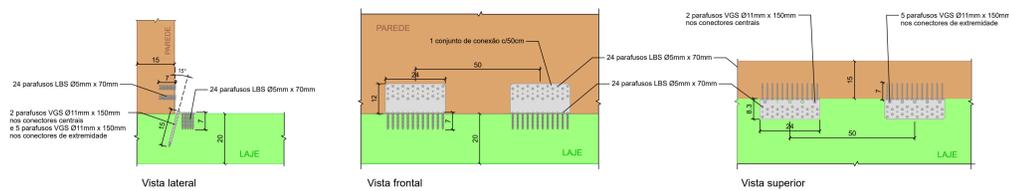
**DETALHAMENTO DAS ABERTURAS DOS PAINÉIS DE CLT DAS PAREDES - TÉRREO**  
**ESCALA: 1:50**



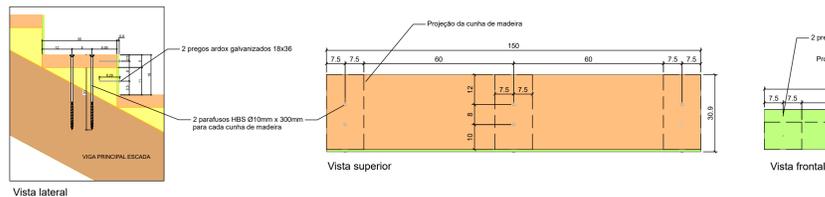
**DETALHAMENTO DAS ABERTURAS DOS PAINÉIS DE CLT DAS PAREDES - PAVIMENTO TIPO**  
**ESCALA: 1:50**



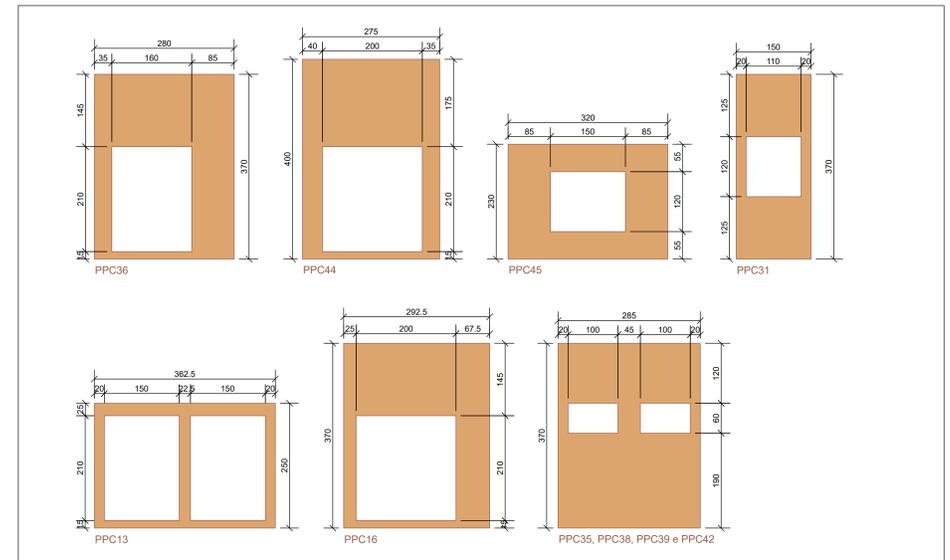
**DETALHE 07: LIGAÇÃO PAREDE-TÉRREO**  
**ESCALA: 1:10**



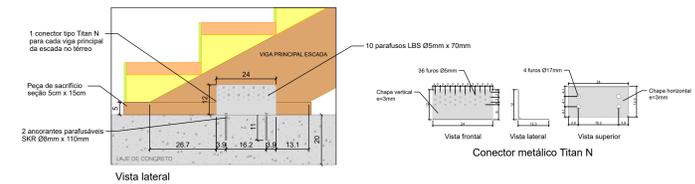
**DETALHE 08: LIGAÇÃO PAREDE-LAJE**  
**ESCALA: 1:10**



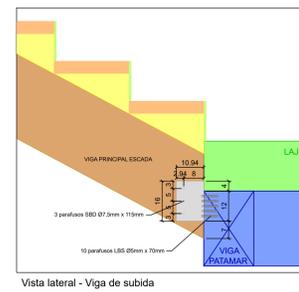
**DETALHE 12: LIGAÇÃO DOS DEGRAUS DA ESCADA**  
**ESCALA: 1:10**



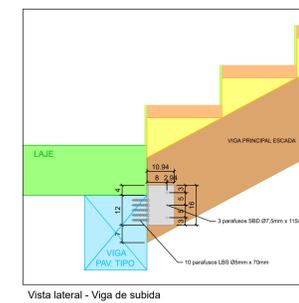
**DETALHAMENTO DAS ABERTURAS DOS PAINÉIS DE CLT DAS PAREDES - COBERTURA**  
**ESCALA: 1:50**



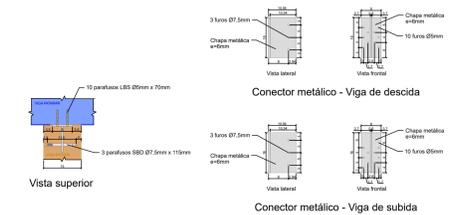
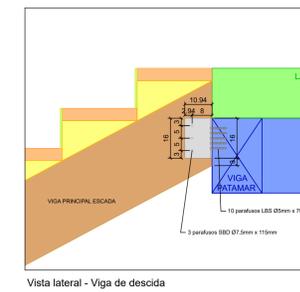
**DETALHE 09: LIGAÇÃO VIGA PRINCIPAL ESCADA-TÉRREO**  
**ESCALA: 1:10**



**DETALHE 10: LIGAÇÃO VIGA PRINCIPAL ESCADA-VIGA PATAMAR**  
**ESCALA: 1:10**

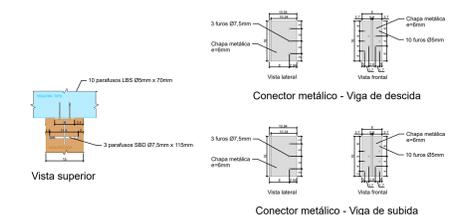
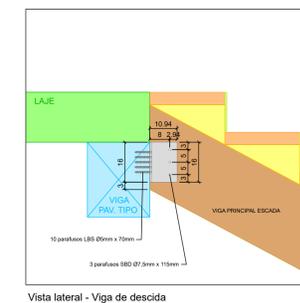
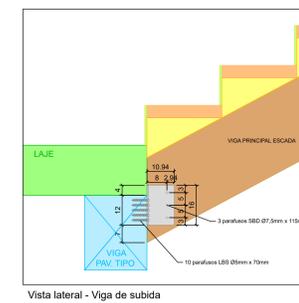


**DETALHE 11: LIGAÇÃO VIGA PRINCIPAL ESCADA-VIGA PAVIMENTO TIPO**  
**ESCALA: 1:10**



**Conector metálico - Viga de descida**

**Conector metálico - Viga de subida**



**Conector metálico - Viga de subida**