

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

EDUARDO WEBER DOS REIS

**PROJETO ESTRUTURAL DE UM EDIFÍCIO EM MLCC E MLC COM
MÚLTIPLOS PAVIMENTOS PARA MORADIA POPULAR**

PORTO ALEGRE

Agosto, 2024

EDUARDO WEBER DOS REIS

**PROJETO ESTRUTURAL DE UM EDIFÍCIO EM MLCC E MLC COM
MÚLTIPLOS PAVIMENTOS PARA MORADIA POPULAR**

Trabalho de Diplomação apresentado à Comissão de Graduação do Curso de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Pacheco

PORTO ALEGRE

Agosto, 2024

PORTO ALEGRE
2024

EDUARDO WEBER DOS REIS

**PROJETO ESTRUTURAL DE UM EDIFÍCIO EM MLCC E MLC COM
MÚLTIPLOS PAVIMENTOS PARA MORADIA POPULAR**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pela Banca Examinadora, pelo/a Professor/a Orientador/a e pela Comissão de Graduação do Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, Agosto de 2024

BANCA EXAMINADORA

Prof. Alexandre Rodrigues Pacheco (UFRGS)
Dr. pela Pennsylvania State University, Estados Unidos
Orientador

Prof. Enio Carlos Mesacasa Júnior (UFRGS)
Dr. Pela Universidade de São Paulo

Prof.^a Cristiane Sardin Padilla de Oliveira (UFRGS)
Dra. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Dedico este trabalho aos meus familiares, minha esposa e aos meus amigos que sempre estiveram ao meu lado e me incentivaram nos meus objetivos. Dedico também ao meu professor orientador Alexandre Pacheco e ao Professor Enio Mesacasa que criaram a base de conhecimento para o desenvolvimento deste trabalho.

RESUMO

Projetos de estruturas de madeira lamelada colada (MLC) e lamelada colada cruzada (MLCC) ainda são recentes no cenário brasileiro. Como consequência, existem poucas referências sobre o tema que possam ser encontradas, o que dificulta a adesão do mercado da engenharia civil a essa nova tecnologia, que além de ter uma rápida construção, utiliza materiais renováveis, contribuindo para a sustentabilidade do meio ambiente. Dessa forma, este trabalho tem o objetivo de ampliar o conhecimento a cerca destes novos métodos construtivos apresentando o dimensionamento dos elementos estruturais de MLC e MLCC. Para tanto, desenvolveu-se uma planta arquitetônica para o modelo de cálculo e utilizando de planilhas eletrônicas e *softwares* como FTOOL e Plug ins do TQS, como o CalculaTimber, serão apresentados os métodos utilizados para o dimensionamento das lajes, vigas, pilares e de suas conexões para as verificações de estado limite de serviço, estado limite último e em situação de incêndio. A partir dessa análise, pode-se concluir que ainda são necessárias definições importantes de parâmetros de projeto dentro da norma brasileira, as quais no atual cenário deve-se buscar em normais estrangeiras, e a importância da utilização de *softwares* de análise global baseada em elementos finitos para a determinação precisa das propriedades de resistência e solicitações dos elementos estruturais de MLC e MLCC.

Palavras-chave: NBR 7190; projeto estrutural; análise estrutural; madeira; mlc; mlcc; sustentabilidade.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Projeto arquitetônico do apartamento	16
Figura 2 - Distribuição dos apartamentos no edifício	17
Figura 3 - Castelos da água	19
Figura 4 - Isopletas de velocidade básica do vento	22
Figura 5 - Inclinação do terreno de implantação	23
Figura 6 - Configuração da laje dimensionada.....	28
Figura 7 - Valores de O_i	34
Figura 8 - Área e vãos das vigas críticas consideradas para o dimensionamento	36
Figura 9 - Posição da carga pontual.....	37
Figura 10 - Área de carregamento dos pilares críticos consideradas para o dimensionamento.....	46
Figura 11 - Resistência às solicitações laterais das vigas	54
Figura 12 - Modelo de ligações dimensionado para a conexão vigas-pilares.....	56
Figura 13 - Dimensões em cm do ponto de solda até o eixo geométrico da ligação parafusada	56
Figura 14 - Distâncias em cm entre parafusos.....	57
Figura 15 - Carregamento excêntrico em soldas	58
Figura 16 - Equações dos modos de falhas analisados	61
Figura 17 - Exemplificação dos modos de falhas analisados	61
Figura 18 - Distância entre CG do conjunto e CG dos parafusos.....	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Divisória e Caixilhos	19
Tabela 2 - Alvenarias	21
Tabela 3 - Revestimentos de pisos e impermeabilizações	20
Tabela 4 - Valores característicos nominais das cargas variáveis	21
Tabela 5 - Classes de resistência definidas em ensaios de peças estruturais	21
Tabela 6 - Valores dos parâmetros meteorológicos.....	23
Tabela 7 - Valores do fator de rajada.....	24
Tabela 8 - Valores das cargas de vento atuante no eixo X.....	24
Tabela 9 - Valores das cargas de vento atuante no eixo Y.....	24
Tabela 10 - Valores de K_{mod1}	26
Tabela 11 - Valores de K_{mod2}	26
Tabela 12 - Coeficiente de fluência (ϕ).....	27
Tabela 13 - Valores do módulo gama e momento de inércia efetivo	30
Tabela 14 - Cargas impostas as lajes	31
Tabela 15 - Valores das tensões solicitantes máximas da laje	31
Tabela 16 - Valores das propriedades da placa de MLCC	31
Tabela 17 - Valores das tensões solicitantes máximas e de resistência da laje.....	32
Tabela 18 – Verificações de segurança necessárias.....	32
Tabela 19 - Valores máximos de deslocamento	33
Tabela 20 - Valores das flechas calculadas	33
Tabela 21 - Parâmetros de cálculo das lajes em situação de incêndio.....	34
Tabela 22 - Propriedades de laje em situação de incêndio.....	35
Tabela 23 - Valores das tensões solicitantes máximas e de resistência da laje em situação de incêndio	35
Tabela 24 – Valore determinado para o vão de cálculo da viga.....	37
Tabela 25 - Valores dos carregamentos na viga.....	37
Tabela 26 - Valores das de majoração	38
Tabela 27 - Valores das cargas majoradas das vigas no eixo X dos pavimentos tipo	38
Tabela 28 - Valores das cargas majoradas das vigas no eixo X de cobertura.....	39
Tabela 29 - Valores das cargas majoradas das vigas no eixo Y	39
Tabela 30 - Valores máximos das solicitações nas vigas.....	40
Tabela 31 - Valores das propriedades da viga.....	41

Tabela 32 - Valores das tensões resistentes da viga	41
Tabela 33 - Valores das tensões solicitantes máximas da viga	42
Tabela 34 - Valores das flechas calculadas	42
Tabela 35 - Verificação de estabilidade lateral da viga	43
Tabela 36 - Parâmetros das vigas em situação de incêndio	44
Tabela 37 - Propriedades das vigas em situação de incêndio.....	44
Tabela 38 - Valores das tensões de resistência das vigas em situação de incêndio.....	44
Tabela 39 - Valores das tensões solicitantes das vigas em situação de incêndio	45
Tabela 40 - Valores máximos das solicitações nos pilares	46
Tabela 41 - Valores das propriedades dos pilares	47
Tabela 42 - Valores de Ke para os diferentes tipos de apoios.....	48
Tabela 43 - Valores das tensões solicitantes dos pilares.....	48
Tabela 44 - Valores das tensões resistentes dos pilares	49
Tabela 45 - Verificação da estabilidade e flexo-compressão dos pilares	51
Tabela 46 - Valores das propriedades dos pilares redimensionados	52
Tabela 47 - Propriedades dos pilares em situação de incêndio	52
Tabela 48 - Tensões resistentes em situação de incêndio	52
Tabela 49 - Tensões solicitantes em situação de incêndio	53
Tabela 50 - Verificação de estabilidade em situação de incêndio.....	53
Tabela 51 - Aços de uso frequente especificados pela ASTM para uso estrutural.....	57
Tabela 52 - Propriedades das soldas	59
Tabela 53 - Tensões resistentes das solda	60
Tabela 54 - Espaçamentos entre parafusos e entre parafusos e bordas.....	62

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Ae	Área efetiva
Ag	Área Bruta solicitada
ai	Distância ao centro geométrico
Amb	Área efetiva do metal base
Anv	Área líquida solicitada a cisalhamento
As	Área efetiva da solda
BIM	Modelagem de informação da construção
Bm	Parâmetro meteorológico usado na determinação de S2
Ca	Coefficiente de Arrasto
CBMSP	Corpo de Bombeiros da Brigada Militar de São Paulo
Cc	Coefficiente de modificação devido à curvatura
Ce	Coefficiente de modificação da emenda de entalhes múltiplos
CG	Centro geométrico
Ct	Coefficiente de modificação de temperatura
Cts	Coefficiente de uniformidade da solicitação a tração
Dw	Espessura da chapa de aço
EC	Módulo de elasticidade de referência para o cálculo do centro de gravidade do painel MLCC
Ecarb	Espessura carbonizada
Eef	Espessura efetiva em situação de incêndio
Eef	Valor efetivo do módulo de elasticidade da madeira na flexão
ELS	Estado limite de serviço
ELU	Estado limite de último
Fa	Força de Arrasto
Fax,Rk	Força resistente característica do efeito de confinamento
Fe	Resistência ao embutimento
Fr	Fator de rajada
Fv,Rki	Resistência ao modo de falha das ligações com pinos metálicos
Gvt	Módulo de cisalhamento direção transversal
Ief	Momento de inércia efetivo
Ip	Momento de inércia polar

KE	Coeficiente de condições de vinculação das extremidades dos pilares
Kfi	Parâmetro para dimensionamento em caso de incêndio
Km	Coeficiente de correção para análise de flexão
Kmod	Coeficiente de modificação (kmod1, kmod2, Kmod3)
Kmodfi	Coeficiente de modificação em situação de incêndio
kN	Kilo-newton
Lw	Comprimento da solda
MLC	Madeira Lamelada Colada
MLCC	Madeira Lamelada Colada Cruzada
Mpa	Mega-pascal
Msd	Momento Fletor solicitante
MyR,k	Resistência a flexão do pino
Nsd	Força normal solicitante de cálculo
Perm	Permanente
PP	Peso próprio
Resis	Resistência
S1	Fator Topográfico
S2	Rugosidade do terreno
S3	Fator Estatístico
Tf	Tonelada Força
TRRF	Tempo requerido de resistência ao fogo
Vk	Velocidade Característica do vento
Vo	Velocidade básica do vento
VRd	Força resistente cortante de cálculo
VSd	Solicitação cortante de cálculo
β_e	Coeficiente de proporcionalidade das seções para estabilidade lateral
σ_{NSd}	Tensão normal solicitante
γ_{ai}	Coeficiente de ponderação resistência do aço
γ_w	Coeficiente de minoração da resistência da madeira
γ_g	Coeficientes de ponderação das ações permanentes
γ_q	Coeficientes de ponderação das ações variáveis

LISTA DE SÍMBOLOS

b	Largura
D	Diâmetro do parafuso
dmáx	Flecha máxima
E0	Módulo de elasticidade da madeira na flexão
E0,05	Valor característico inferior (quinto percentil) do módulo de elasticidade da madeira na flexão
Ec0,med	Valor médio do módulo de elasticidade na compressão medido na direção paralela às fibras da madeira
Ec90,med	Valor médio do módulo de elasticidade na compressão medido na direção perpendicular às fibras da madeira
Em,med	Valor médio do módulo de elasticidade da madeira na flexão
Eo	Espessura inicial para dimensionamento em caso de incêndio
F	Ação (Fd, Fk); forças (em geral)
fc,0,k	Tensão resistente à compressão característica
ft,0,k	Tensão resistente à tração característica
fu,k	Resistência última característica à tração do aço do pino metálico
h	Altura
hi	Altura referencial
I	Momento de inércia
L	Vão da viga
M	Momento fletor
Máx	Máximo
N	Força normal
Ø	Diâmetro
P	Expoente da lei potencial da variação de S2
q	Carga
S	Momento estático
t	Espessura
W	Módulo de resistência à flexão
Z	Altura considerada da edificação
α	Ângulo entre a força e a direção das fibras
β	Razão entre a espessura convencional da peça de madeira e o diâmetro do pino

β_i	Taxa de carbonização
θ	Ângulo
ρ_k	Densidade característica
Σ	Somatório
σ_{Rcd}	Tensão resistente de compressão
σ_{Rtd}	Tensão resistente de tração
σ_S	Tensão solicitante de cálculo
τ_{vRd}	Tensão resistente cortante
τ_{VSd}	Tensão solicitante cortante
λ	Índice de esbeltez
ϕ	Coefficiente de fluência

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2 LAYOUT DO EDIFÍCIO.....	16
3 PREMISSAS DO PROJETO.....	18
4 DETERMINAÇÃO DAS CARGAS DE PROJETO	19
4.1 CARGAS VERTICAIS.....	19
4.2 CARGAS HORIZONTAIS	22
5 DIMENSIONAMENTO	26
5.1 PROPRIEDADES DO MATERIAL.....	26
5.2 LAJES	27
5.2.1 Método gama	28
5.2.2 Tensões solicitantes e resistentes.....	30
5.2.3 Verificação do estado limite de serviço.....	32
5.2.4 Verificação da estrutura em situação de incêndio	33
5.3 VIGAS.....	35
5.3.1 Tensões solicitantes e resistentes.....	37
5.3.2 Verificação do estado limite de serviço.....	42
5.3.3 Verificação da estabilidade lateral.....	42
5.3.4 Verificação da estrutura em situação de incêndio	43
5.4 PILARES	45
5.5 LIGAÇÕES.....	53
5.5.1 Conexões laje-viga.....	53
5.5.2 Conexões pilar-viga.....	56
5.5.3 Conexões pilar-pilar	63
6 CONCLUSÃO	65
APÊNDICE A - COMBINAÇÃO 3 ELS FINAL CARGAS X.....	69
APÊNDICE C - COMBINAÇÃO 3 ELS FINAL X FLECHA LIMITANTE DO PILAR REDIMENSIONADO	73
APÊNDICE D – PLANTA BAIXA DO PAVIMENTO TIPO E ISOMÉTRICO DA CONEXÃO VIGA-PILAR E SEÇÕES DAS VIGAS E PILARES.....	75

1 INTRODUÇÃO

As grandes mudanças climáticas motivaram uma busca, no ramo da Engenharia Civil, por materiais sustentáveis que substituam o concreto armado em suas características estruturais e em seu valor de produção.

A madeira lamelada colada cruzada (MLCC), tecnologia criada na década de 1990, no continente europeu, surge como uma possível resposta a esse desafio. Com estudos que indicam uma relação de resistência/peso próprio maior do que a do concreto, a MLCC já está presente em inúmeras edificações e possibilitou a construção, em conjunto com a madeira lamelada colada (MLC), do maior prédio de estrutura de madeira, o Mjøsa Tower, na Noruega. O prédio é composto por dezoito pavimentos e possui vigas e pilares de MLC, lajes de MLCC, ligações em aço e fundação em concreto armado.

Esses materiais provêm do tratamento e transformação da madeira em indústrias de alta tecnologia e sua viabilidade econômica provém da velocidade em que é feita a construção, a diminuição das cargas próprias que resultam em fundações menores, pouca produção de resíduos para descarte e pequena mão de obra necessária como mencionado por Brandner *et al.* (2016) e Leite *et al.* (2018) que para elaboração desses elementos pré-moldados utilizam de metodologias BIM (modelagem de informação da construção).

Em 2022, ambas as classes de madeira, MLC e MLCC, foram incluídas na norma NBR 7190-1: Projeto de estruturas de madeira (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2022a) e suas caracterizações podem ser encontradas nas partes 6 e 7 da mesma. Essa adição reflete na crescente demanda do mercado pela normatização desse material no Brasil.

Devido à necessidade do país em encontrar formas mais sustentáveis para a construção e o grande déficit habitacional existente, o presente trabalho tem o objetivo de demonstrar o dimensionamento de elementos estruturais para edificações de múltiplos pavimentos com a tecnologia de MLCC e MLC visto que é uma técnica construtiva rápida, eficiente e sustentável, apta a suprir a demanda de moradias populares, sem agravar o quadro ambiental brasileiro.

Não foram abordados os projetos de hidráulica, prevenção contra incêndio, elétrica, revestimento e habitabilidade. Além disso, como não há premissa de uma escada de madeira para a legalização do projeto junto ao corpo de bombeiros do Rio Grande do Sul, foi determinado que a escada deve ser de concreto armado e não entrará no escopo do projeto. Assim dispõe a Resolução Técnica n.º 11/2016:

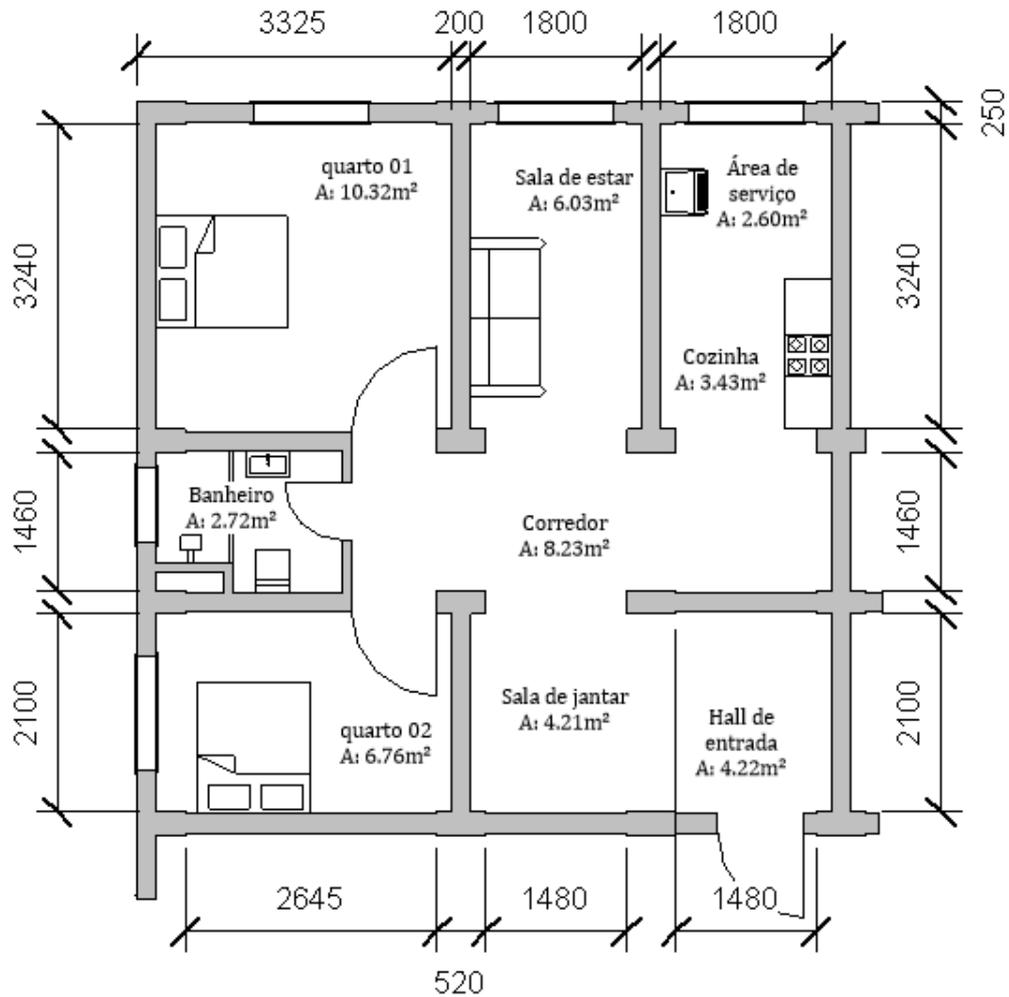
5.7.1.1 Em qualquer edificação, os pavimentos sem saída em nível para o espaço livre exterior térreo deverão ser dotados de escadas, enclausuradas ou não, as quais

deverão: a) ser constituídas de material incombustível, classe I, ou classe II-A com $D_m < 100$, conforme a Instrução Técnica n.º 10/2011, do Corpo de Bombeiros da Polícia Militar do Estado de São Paulo e demais especificações desta, até a entrada em vigor de Resolução Técnica específica do CBMRS; Nota: Serão aceitas escadas não enclausuradas construídas em madeira quando a edificação possuir até dois pavimentos (São Paulo, 2019).

2 PROJETO ARQUITETÔNICO

Com o intuito de tornar a edificação o mais acessível possível, foi criado um projeto arquitetônico com apartamentos com 2 quartos, 1 banheiro, sala de estar, sala de jantar, cozinha e área de serviço com distribuição de 4 apartamentos por andar do prédio, totalizando 20 apartamentos no edifício de 5 andares.

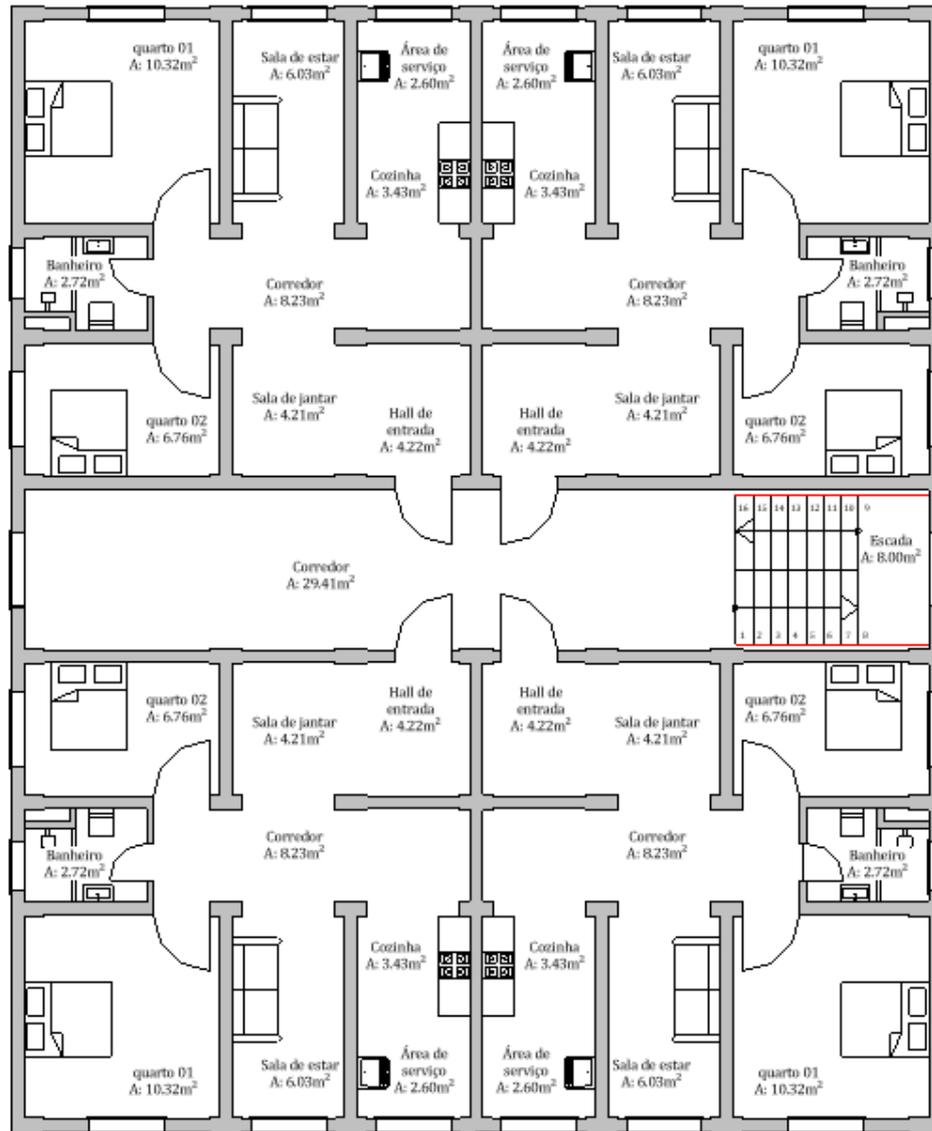
Figura 1 – Projeto arquitetônico do apartamento



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Cada apartamento tem uma parede geminada e tem saída para o centro do corredor do prédio, com a escada de um lado e a porta de entrada do edifício no outro.

Figura 2 - Distribuição dos apartamentos no edifício



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Todas as características da edificação como número de pavimentos, quantidade de apartamentos por pavimento e cômodos dentro do apartamento foram baseadas no modelo para residências multifamiliares de interesse social da NBR 12721 (ABNT, 2021).

3 PREMISSAS DO PROJETO

Ao dimensionar um prédio com lajes em MLCC sem algum estudo experimental das peças estruturais que serão utilizadas, devemos optar por considerar elas biapoiadas, ou seja, serão consideradas 2 vigas de apoio para cada laje. Isso se deve a complexidade do dimensionamento de lajes de MLCC em 2 direções e o favorecimento pela segurança da estrutura, visto que muitas propriedades da laje continuam em estudo e não possuem valor referencial padrão entre normas. Nesse sentido, Karacabeyli e Gagnon, (2019) complementam:

“A complexidade do dimensionamento em muitos casos pode superar os benefícios de considerar a distribuição das cargas em duas direções. Em muitos casos o dimensionamento de uma placa em MLCC considerando carregamento em uma direção vai resultar em uma solução mais conservadora” (tradução nossa).

Não foi dimensionado telhado para o edifício, sendo considerado uma camada de 15 cm de impermeabilização com manta asfáltica e proteção mecânica para a cobertura do prédio. Também não foi dimensionado espaço para a caixa d'água do prédio, visto que a implantação do projeto visa condomínios de moradia popular que utilizam frequentemente o sistema de castelos de água para economia de projeto.

Os sistemas de castelo de água são torres compartimentadas em células, que podem armazenar grandes volumes de água. São recorrentemente usadas em condomínios em razão da sua rápida montagem e custo-benefício.

Figura 3 – Castelos de água



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

4 DETERMINAÇÃO DAS CARGAS DE PROJETO

As ações para o cálculo das cargas solicitantes de projeto foram definidas conforme NBR 7190-1: Projeto de estruturas de madeira (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2022a) e NBR 6120: Ações para o cálculo de estruturas de edificações (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2019) e suas combinações através do disposto na NBR 8681: Ações e segurança nas estruturas – procedimento (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2004).

Os valores de ponderação para o peso próprio da estrutura de madeira foram obtidas através do item 6.1 da NBR 7190-1 (ABNT, 2022a), das cargas permanentes nas Tabelas 1 e 2 da NBR 8681 (ABNT, 2004). e das cargas acidentais nas Tabelas 4 e 5, já os fatores de combinação e redução que levam em consideração a probabilidade de ocorrer uma ou mais ações acidentais conjuntamente estão contidos na Tabela 6.

4.1 CARGAS VERTICAIS

Para as paredes internas definiu-se a utilização de *drywall* que tem a carga definida na Tabela 1, as paredes externas usou-se a carga de blocos de concreto celular autoclavado sem revestimento na face conforme tabela 2.

A camada impermeabilizante utilizada na cobertura e nos apartamentos, assim como o revestimento dos pisos tem sua carga estabelecida pela Tabela 3 e as demais cargas de ações variáveis podem ser encontradas na Tabela 4.

Tabela 1 - Divisórias e Caixilhos

Material	Espessura nominal do elemento cm	Peso kN/m ²
<i>Drywall</i> (composição: montantes metálicos, quatro chapas com 12,5 mm de espessura cada e isolamento acústico com lã de rocha ou lã de vidro com 50 mm de espessura)	7 a 30	0,5
Divisórias retráteis (exceto divisórias com vidro)	7 a 12	0,6
Caixilhos, incluindo vidro simples (espessura 4 mm):		
— de alumínio,	—	0,2
— de ferro,		0,3
— que vão de piso a piso, com $h \leq 4,0$ m		0,5
Fachadas com pele de vidro, fachadas unitizadas	Validar conforme o caso	

Fonte: NBR 6120 (2019).

Tabela 2 - Alvenarias

Alvenaria	Espessura nominal do elemento cm	Peso - Espessura de revestimento por face kN/m ²		
		0 cm	1 cm	2 cm
ALVENARIA DE VEDAÇÃO				
Bloco de concreto vazado (Classe C – ABNT NBR 6136)	6,5	1,0	1,4	1,8
	9	1,1	1,5	1,9
	11,5	1,3	1,7	2,1
	14	1,4	1,8	2,2
	19	1,8	2,2	2,6
Bloco cerâmico vazado (Furo horizontal - ABNT NBR 15270-1)	9	0,7	1,1	1,6
	11,5	0,9	1,3	1,7
	14	1,1	1,5	1,9
	19	1,4	1,8	2,3
Bloco de concreto celular autoclavado (Classe C25 – ABNT NBR 13438)	7,5	0,5	0,9	1,3
	10	0,6	1,0	1,4
	12,5	0,8	1,2	1,6
	15	0,9	1,3	1,7
	17,5	1,1	1,5	1,9
20	1,2	1,6	2,0	
Bloco de vidro (decorativo, sem resistência ao fogo)	8	0,8	–	–

Fonte: NBR 6120 (2019).

Tabela 3 - Revestimentos de pisos e impermeabilizações

Material	Espessura cm	Peso kN/m ²
Impermeabilização com manta asfáltica simples (apenas manta com 15 % de sobreposição e pintura asfáltica, sem camada de regularização nem proteção mecânica)	0,3	0,08
	0,4	0,10
	0,5	0,11
Piso elevado interno com placas de aço, sem revestimento (até 30 cm de altura)	–	0,5
Piso elevado interno com placas de polipropileno, sem revestimento (até 30 cm de altura)	–	0,15
Revestimentos de pisos de edifícios residenciais e comerciais ($\gamma_{ap-m} = 20 \text{ kN/m}^3$)	5	1,0
	7	1,4
Revestimentos de pisos de edifícios industriais ($\gamma_{ap-m} = 34 \text{ kN/m}^3$)	5	1,7
	7	2,4
Impermeabilizações em coberturas com manta asfáltica e proteção mecânica, sem revestimento ($\gamma_{ap-m} = 18 \text{ kN/m}^3$)	10	1,8
	15	2,7
NOTA Calcular caso a caso, considerando a espessura dos componentes do revestimento de pisos e seus respectivos pesos específicos. Na falta de informações mais precisas, podem ser considerados os pesos específicos médios indicados.		

Fonte: NBR 6120 (2019).

Tabela 4 - Valores característicos nominais das cargas variáveis

Edifícios residenciais	Dormitórios	1,5	—
	Sala, copa, cozinha	1,5	—
	Sanitários	1,5	—
	Despensa, área de serviço e lavanderia	2	—
	Quadras esportivas	5 ^a	—
	Salão de festas, salão de jogos	3 ^a	—
	Áreas de uso comum	3 ^a	—
	Academia	3 ^a	—
	Forro acessíveis apenas para manutenção e sem estoque de materiais	0,1 ^{a,r}	—
	Sótão	2 ^a	—
	Corredores dentro de unidades autônomas	1,5	—
	Corredores de uso comum	3	—
	Depósitos	3	—
	Áreas técnicas (ver item nesta Tabela)		
	Jardins (ver item nesta Tabela)		

Fonte: NBR 6120 (2019).

O valor da densidade da madeira utilizada na estrutura do prédio foi obtido da Tabela 5 optando por uma madeira conífera de classe C50. Essa é a classe com as maiores resistências padronizadas pela NBR 7190-1 (ABNT, 2022a) para madeiras coníferas. A opção de utilizar a classe de maior resistência tem o objetivo de diminuir as seções necessárias dos elementos estruturais.

Tabela 5 - Classes de resistência definidas em ensaios de peças estruturais

		Coníferas													Folhosas						
Símbolo		C14	C16	C18	C20	C22	C24	C27	C30	C35	C40	C45	C50	D18	D24	D30	D35	D40	D50	D60	D70
Propriedades de resistência MPa																					
Flexão	$f_{b,k}$	14	16	18	20	22	24	27	30	35	40	45	50	18	24	30	35	40	50	60	70
Tração paralela	$f_{t,0,k}$	8	10	11	12	13	14	16	18	21	24	27	30	11	14	18	21	24	30	36	42
Tração perpendicular	$f_{t,90,k}$	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
Compressão paralela	$f_{c,0,k}$	16	17	18	19	20	21	22	23	25	26	27	29	18	21	23	25	26	29	32	34
Compressão perpendicular	$f_{c,90,k}$	2,0	2,2	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3,1	3,2	7,5	7,8	8,0	8,1	8,3	9,3	11	13,5
Cisalhamento	$f_{v,k}$	3,0	3,2	3,4	3,6	3,8	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	3,4	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,5	5,0
Propriedades de rigidez GPa																					
Módulo de elasticidade a 0° médio	$E_{0,m}$	7	8	9	9,5	10	11	12	12	13	14	15	16	9,5	10	11	12	13	14	17	20
Módulo de elasticidade a 0° característico	$E_{0,05}$	4,7	5,4	6,0	6,4	6,7	7,4	7,7	8,0	8,7	9,4	10	11	8	8,5	9,2	10	11	12	14	16,8
Módulo de elasticidade a 90° médio	$E_{90,m}$	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5	0,6	0,7	0,7	0,8	0,9	0,9	1,1	1,33
Módulo de elasticidade transversal médio	G_m	0,4	0,5	0,6	0,6	0,6	0,7	0,7	0,8	0,8	0,9	0,9	1,0	0,6	0,6	0,7	0,8	0,8	0,9	1,1	1,25
Densidade kg/m ³																					
Densidade característica	ρ_k	290	310	320	330	340	350	370	380	400	420	440	460	475	485	530	540	560	620	700	900
Densidade média	ρ_m	350	370	380	390	410	420	450	460	480	500	520	550	570	580	640	650	660	750	840	1080
Nota 1		Valores obtidos conforme a ABNT NBR 7190-4.																			
Nota 2		Valores referentes ao teor de umidade igual a 12 %																			

Fonte: NBR 7190-1 (2022a).

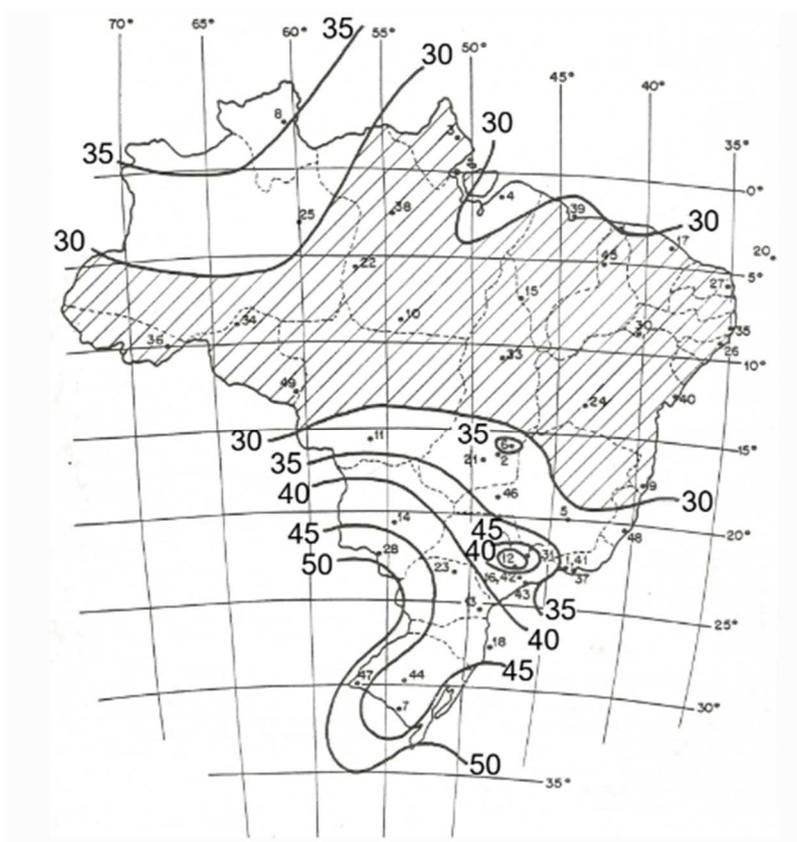
4.2 CARGAS HORIZONTAIS

As cargas de vento podem ser dimensionadas através da NBR 6123, forças devidas ao vento em edificações. Para o cálculo, é necessário localizar a edificação geograficamente, de forma que possa se entender as características do terreno e do clima que influenciam na atividade do vento (Associação Brasileira de Normas técnicas, 2023).

Foi definido um espaço na Rua TV Outeiro, Bairro Coronel Aparício Borges, em Porto Alegre/RS. O local foi escolhido visando à melhoria das condições de habitação da população do bairro, visto que o percentual de domicílios em áreas de moradia precária é de aproximadamente 45%, conforme dados da Prefeitura Municipal de Porto Alegre (Observa Poa, 2010).

Através do mapa de isopletas, exibido na Figura 4, foi possível identificar o valor referente da velocidade básica do vento (V_0) na região de Porto Alegre, com o valor de 50 m/s.

Figura 4 - Isopletas de velocidade básica do vento

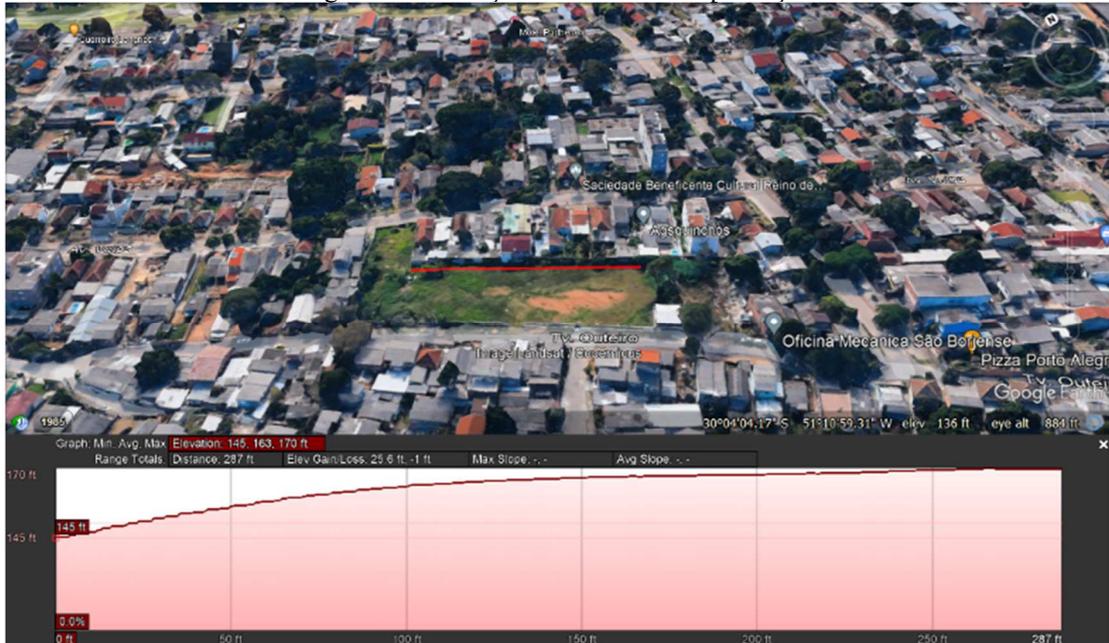


Fonte: NBR 6123 (2023).

O fator S1 considera variações do relevo do terreno. Como se pode observar na Figura 4, obtida por análise do google earth, existe uma inclinação de aproximadamente 5° no terreno,

assim devemos utilizar a equação exposta no item 5.2 b da NBR 6123, possuindo um valor diferente para cada altura do prédio analisada (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2023).

Figura 5 - Inclinação do terreno de implantação



Fonte: Elaborada pelo autor (2024).

O fator S2 é determinado pelas características da edificação e das edificações ao redor, a rugosidade do terreno se encaixa na categoria 3, tendo a cota média dos obstáculos igual a 3 metros e o prédio por não possuir nenhuma dimensão maior que 20 metros, se enquadra na classe A, conforme Tabelas 6 e 7.

Tabela 6 - Valores dos parâmetros meteorológicos

Categoria	Z_g (m)	Parâmetro	Classes		
			A	B	C
I	250	b_m	1,10	1,11	1,12
		p	0,06	0,065	0,07
II	300	b_m	1,00	1,00	1,00
		p	0,085	0,09	0,10
III	350	b_m	0,94	0,94	0,93
		p	0,10	0,105	0,115
IV	420	b_m	0,86	0,85	0,84
		p	0,12	0,125	0,135
V	500	b_m	0,74	0,73	0,71
		p	0,15	0,16	0,175

Fonte: NBR 6123 (2023).

Tabela 7 - Valores do fator de rajada

F_r	Classes		
	A	B	C
	1,00	0,98	0,95

Fonte: NBR 6123 (2023).

O fator S_2 é obtido então através da equação 1, variando os valores de z (altura considerada da edificação).

$$S_2 = b_m F_r \left(\frac{z}{10}\right)^p \quad \text{Equação 1}$$

Baseado em coeficientes estatísticos e de utilização da edificação, o valor de S_3 é definido pela Tabela 4 da NBR 6123, que, para edificações residências, caso do presente estudo, equivale a 1,0 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2023). Os valores obtidos para cada ponto analisado da edificação são exibidos na Tabela 7 e 8, referentes às cargas atuantes no eixo X e Y da edificação, respectivamente.

Tabela 8 - Valores das cargas de vento atuante no eixo X

i	h_i (m)	Δh_i (m)	V_o (m/s)	S_1	S_2 (z)	S_3 (z)	V_k (m/s)	q (Kg/m ²)	A_e (m ²)	$F = Ca.$ $q.A_e$ (Kgf)	F (kN)	$F_{h,i}$ (kN)	$F_{h,i}$ $* 1,4$ (kN)
1	3,00	3,00	50	1,078	0,83	1	44,90	126,01	54,3	7868,47	78,68	9,84	13,77
2	6,00	3,00	50	1,063	0,89	1	47,49	140,98	54,3	8803,53	88,04	11,00	15,41
3	9,00	3,00	50	1,049	0,93	1	48,80	148,86	54,3	9295,72	92,96	11,62	16,27
4	12,00	3,00	50	1,035	0,96	1	49,55	153,47	54,3	9583,45	95,83	11,98	16,77
5	15,00	3,00	50	1,021	0,98	1	49,98	156,13	27,15	4874,88	48,75	6,09	8,53

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Tabela 9 - Valores das cargas de vento atuante no eixo Y

i	h_i (m)	Δh_i (m)	V_o (m/s)	S_1	S_2 (z)	S_3 (z)	V_k (m/s)	q (Kg/m ²)	A_e (m ²)	$F = Ca.$ $q.A_e$ (Kgf)	F (kN)	$F_{h,i}$ (kN)	$F_{h,i}$ $* 1,4$ (kN)
1	3,00	3,00	50	1,078	0,83	1	44,90	126,01	44,55	6455,62	64,56	9,22	12,91
2	6,00	3,00	50	1,063	0,89	1	47,49	140,98	44,55	7222,79	72,23	10,32	14,45
3	9,00	3,00	50	1,049	0,93	1	48,80	148,86	44,55	7626,60	76,27	10,90	15,25
4	12,00	3,00	50	1,035	0,96	1	49,55	153,47	44,55	7862,67	78,63	11,23	15,73
5	15,00	3,00	50	1,021	0,98	1	49,98	156,13	22,275	3999,56	40,00	5,71	8,00

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

As cargas de vento foram utilizadas para análise no *ftool*, sendo aplicadas nos pontos correspondentes ao início de cada pavimento, como pode ser observado nos anexos com apresentação das cargas.

5 DIMENSIONAMENTO

5.1 PROPRIEDADES DO MATERIAL

A madeira considerada para o dimensionamento é da classe de resistência C50 definida na NBR 7190-1 (ABNT, 2022a) e possui as propriedades de resistência e rigidez apresentadas na Tabela 4 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2022a). Como a madeira é um material anisotrópico, sua resistência difere para solicitações normais à fibra do que a mesma solicitação paralela à fibra.

Além disso, suas propriedades podem variar com a umidade do ambiente, a duração do carregamento e a fluência da peça. Para avaliar isso utiliza-se os coeficientes de modificação K_{mod1} , K_{mod2} e ϕ , determinados pelas Tabelas 9, 10 e 11.

Tabela 10 - Valores de K_{mod1}

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

Fonte: NBR 7190-1 (2022a).

Tabela 11 - Valores de K_{mod2}

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

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

Fonte: NBR 7190-1 (2022a).

Tabela 12 - Coeficiente de fluência (ϕ)

Material	Classes de umidade		
	(1)	(2 e 3)	(4)
Madeira serrada, MLC, MLCC, LVL e roliça	0,6	0,8	2,0 ^a
Compensado estrutural	0,8	1,0	2,5
OSB estrutural	1,5	2,25	-
^a Não é permitido o uso de MLCC para a classe de umidade 4.			

Fonte: NBR 7190-1 (2022a).

Para o presente estudo, a classe de carregamento é permanente e a localização do edifício é em Porto Alegre, cuja umidade ambiente se encontra entre 75% e 85% segundo dados do atlas climático do Rio Grande do Sul, o que pela Tabela 1 da NBR 7190-1 (ABNT, 2022a) indica uma classe de umidade tipo 3 (Rio Grande do Sul, 2020).

Além disso, para alguns tipos de madeiras, como a MLC, que utiliza-se para dimensionar as vigas e pilares, tem-se um terceiro coeficiente de modificação, K_{mod3} definido pelo item 6.7.4.9 da NBR 7190-1 (ABNT, 2022a) como $K_{mod3} = C_e \cdot C_c \cdot C_t$.

$$C_e = 0,95 \text{ para peças sem emendas longitudinais}$$

$$C_c = 1 \text{ para peças retas}$$

$$C_t = 1 \text{ para temperaturas ambientes abaixo de } 38^\circ\text{C}$$

Dessa forma, tem-se o seguinte:

$$K_{mod1} = 0,6$$

$$K_{mod2} = 0,8$$

$$K_{mod3} = 0,95$$

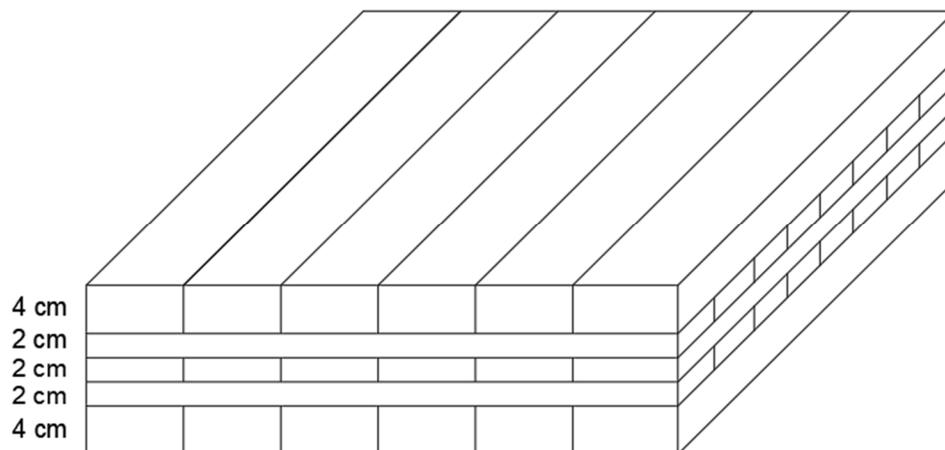
Importante ressaltar que esses são os valores típicos dos cálculos que serão efetuados, entretanto, os valores de K_{mod} podem ser alterados para determinação de solicitações de cargas excepcionais.

5.2 LAJES

O dimensionamento das lajes foi determinado considerando o maior vão entre vigas do eixo Y com 3,59 metros (carga de peso próprio distribuído, também foi considerado o maior valor de carga de uso utilizado - 3 kN/m²), a carga permanente de impermeabilização da cobertura (2,7 kN/m²) e um tempo requerido de resistência ao fogo de 60 minutos.

Optou-se por trabalhar com uma laje de 5 lâminas obtendo-se uma configuração otimizada através do pré-dimensionamento com o programa calcula timber CLT da URBEM para as cargas impostas (Wetterholt, 2019), conforme imagem abaixo:

Figura 6 - Configuração da laje dimensionada



Fonte: Elaborada pelo autor (2024).

5.2.1 Método gama

O dimensionamento das lajes foi feito através do método gama, um modelo proposto a partir da análise da deformação das lamelas da laje de madeira. Considerou-se que as lamelas se comportam como barras de Bernoulli-Euler, mas com a rigidez à flexão reduzida por um coeficiente γ . Esse coeficiente leva em consideração a deformação por cisalhamento das lamelas. Esse método é indicado na NBR 7190-1 (ABNT, 2022a) e foi considerado como uma aproximação satisfatória quando comparados com os testes práticos (Pereira; Calil Junior, 2019).

A fórmula é uma adaptação do anexo B do Eurocódigo 5, também exposto no item 6.7.2 da NBR 7190-1 (ABNT, 2022a), onde é definido um coeficiente gama para obtenção de um momento de inércia efetivo para a peça (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2022a).

Dessa forma, pode-se calcular o nível de solidarização entre as barras longitudinais e transversais da laje, levando em conta as deformações por cisalhamento ou *rolling shear*.

A equação original foi elaborada para dimensionamento de peças compostas T, I ou caixão, considerando parâmetros como espaçamento dos pregos na interface dos elementos e módulo de deslizamento da ligação entre os elementos. Sua adaptação para as placas de MLCC leva em consideração a espessura das lâminas transversais e o módulo de elasticidade transversal de forma a determinar a deformação por cisalhamento.

$$\gamma_1 = \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 E_1 A_i h_j}{L_{ref}^2 G_{vt} b}}$$

Onde:

L_{ref}	é o vão de referência
E_1	é módulo de elasticidade da lâmina longitudinal
A_i	é a área da seção transversal da camada longitudinal
t_l	é a espessura da lâmina longitudinal
b	é a largura do painel
h_j	é a espessura da lâmina transversal
G_{vt}	é o módulo de cisalhamento transversal

O módulo de cisalhamento transversal (G_{vt}) não tem valores pré estabelecidos na norma brasileira e varia conforme as propriedades de cada espécie de madeira, crescimento da árvore, método de fabricação das placas, ambiente do local em que foi plantada, entre outros. O *Canadian CLT Handbook*, assim como outros estudos, indica uma estimativa de que G_{vt} pode ser considerado como um décimo do valor do módulo de cisalhamento paralelo (Karacabeyli; Gagnon, 2019).

Para valores de projeto a NBR 7190-7 (ABNT, 2022a) apresenta alguns ensaios para determinação dessa propriedade, contudo ela adverte que os testes não levam a resultados precisos. Para análise do seguinte caso optou-se por uma aproximação de 50 MPa que é utilizada de forma abrangente na literatura como um valor a favor da segurança, visto que os estudos práticos demonstram um valor maior (Aicher; Dill-Langer, 2000).

Com o valor de gama, pode-se então definir o momento de inércia efetivo de forma semelhante à determinação de peças compostas, tendo única alteração a multiplicação pelo valor de gama, como pode ser visto através da seguinte equação:

$$I_{ef} = \sum \frac{b_i * h_i^3}{12} + \gamma * b_i * t_i * z^2$$

Os valores obtidos através dos cálculos estão apresentados na Tabela 12.

Tabela 13 - Valores do módulo gama e momento de inércia efetivo

<i>b cm</i>	100
<i>A_i cm²</i>	400
<i>L_{ref} cm</i>	359
<i>G_{vt} Mpa</i>	50
<i>h_j cm</i>	2
<i>h_i cm</i>	4
<i>Ex,1 e Ex,5 cm⁴</i>	533,33
<i>Y1 e Y5</i>	0,836
<i>Y3</i>	1
<i>I_{ef} cm⁴</i>	17855,14

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Outro fator com valor não encontrado na norma brasileira é o valor de resistência a esse cisalhamento perpendicular às linhas dos anéis. Conforme a EN 16351, um valor de referência que pode ser adotado é de 0,7 MPa, mas independente do valor adotado, deve ser comprovado o valor deste parâmetro pelo fabricante dos painéis de MLCC através de comprovação experimental (Torneport, 2021).

5.2.2 Tensões solicitantes e resistentes

Para a determinação das cargas solicitantes das lajes, apresentadas na tabela 14, considerou-se um carregamento contínuo sobre a laje, considerando-a como uma viga de largura de 1 metro. As combinações de cálculo são feitas conforme NBR 8681 (ABNT, 2004), tendo como única alteração por especificação da norma 7190-1 (ABNT, 2022a), a verificação do ELS Final, que leva em consideração o coeficiente de fluência em razão do comportamento da madeira ao longo de sua vida útil.

Tabela 14 - Cargas impostas as lajes

Caso	qyk (kN/m)
PP	0,77
Perm	2,70
Acid	3,00

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Para a determinação dos valores da Tabela 15 foram utilizadas as seguintes equações:

$$\sigma_{td} = \frac{MSd}{Wt}$$

como a seção da peça é simétrica $\rightarrow Wt = Wc \rightarrow \sigma_{Std} = \sigma_{Stc}$

$$\frac{P \cdot L^2}{8} = MSd_{\text{máx}}$$

$$\frac{P \cdot L}{2} = VSd_{\text{máx}}$$

Tabela 15 - Valores das tensões solicitantes máximas da laje

Combinações	PP	PERMANENTE	ACIDENTAL	MSd _{máx} (Kn.cm)	<u>VSd_{máx}</u> (Kn)	σ_{Scd} (MPa)	σ_{Std} (MPa)
ELS Inicial	1,00	1,00	1,00	1039,96	11,59	3,44	3,44
ELS Final	1,80	1,80	1,24	1601,29	17,84	5,30	5,30
ELU	1,30	1,40	1,50	1492,12	16,63	4,94	4,94
Incêndio	1,30	1,40	1,50	1492,12	16,63	16,44	16,44

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Para o somatório do momento de inércia da peça, só são considerados os momentos de inércia das camadas longitudinais, logo para o cálculo de I líquido da peça deve-se somar somente os valores ressaltados em verde na Tabela 16. Para a determinação dos demais valores da Tabela 16 foram utilizadas as seguintes equações:

$$I = \frac{bi \cdot ti}{12} + bi \cdot ti \cdot ai^2$$

$$S = ai \cdot ti \cdot bi$$

Tabela 16 - Valores das propriedades da placa de MLCC

I líquido(cm^4)	bi (cm)	ti (cm)	ai (cm)	S (cm^3)	I líquido da peça(cm^4)	W líquido(cm^4)
10533,33	100	4	5	2000	2 x 10533,33 + 66,66 = 21133,33	21133,33/7 (Ycg) = 3019,05
866,66	100	2	2	400		
66,66	100	2	0	0		
866,66	100	2	2	400		
10533,33	100	4	5	2000		

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Os valores de resistência do material são obtidos da Tabela 3 da NBR 7190-1 (ABNT, 2022a), multiplicando estes valores por K_{mod} que é determinado conforme descrito no item 5.1 deste trabalho. Além disso, devemos dividir o valor de resistência pelo coeficiente de minoração, sendo:

$y_w = 1,4$; para estados de limites últimos decorrentes de tensões normais

$y_w = 1,8$; para estados de limites últimos decorrentes de tensões de cisalhamento

$$\begin{aligned}\tau_{vRd} &= f_{v,k} \times \frac{K_{mod}}{y_w} = 0,7 \times \frac{0,48}{1,8} = 0,187 \text{ MPa} \\ \sigma_{Sd} &= \frac{M_{sd,máx}}{W} = \frac{1039,96}{3019,05} \times 10 = 3,445 \text{ MPa} \\ \tau_{Sd} &= \frac{V_{Sd,máx}}{I_{líquido} \times largura} = 11,59 \times \frac{2000}{21133,33 \times 100} \times 10 = 0,110 \text{ MPa} \\ \sigma_{Rcd} &= f_{c,0,k} \times \frac{K_{mod}}{y_w} = 29 \times \frac{0,48}{1,4} = 9,942 \\ \sigma_{Rtd} &= f_{t,0,k} \times \frac{K_{mod}}{y_w} = 30 \times \frac{0,48}{1,4} = 10,285\end{aligned}$$

As tensões máximas solicitantes e as tensões de resistência obtidas para as diferentes combinações do dimensionamento da laje são exibidas na Tabela 17.

Tabela 17 - Valores das tensões solicitantes máximas e de resistência da laje

Combinações	K_{mod}	σ_{Rd} (Mpa)	τ_{vRd} (Mpa)	σ_{Sd} (Max) MPa	τ_{Sd} (Max) Mpa	σ_{Rtd}
ELS Inicial	0,480	9,943	0,187	3,445	0,110	10,285
ELS Final	0,480	9,943	0,187	5,304	0,169	10,285
ELU	0,480	9,943	0,187	4,942	0,157	10,285

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Sendo obedecidas as condições da Tabela 18 pode-se concluir que a laje atende às solicitações impostas a ela.

Tabela 18 – Verificações de segurança necessárias

$\sigma_{Rd} > \sigma_{Sd}$;
$\tau_{vRd} > \tau_{vSd}$;
$R_{cd} > S_{cd}$
$R_{td} > S_{td}$

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

5.2.3 Verificação do estado limite de serviço

Para o estado limite de serviço, é necessário fazer a verificação das flechas. Como deslocamento máximo adotamos $L/500$ para flecha inicial e $L/300$ para flecha final, conforme a Tabela 19.

Tabela 19 - Valores máximos de deslocamento

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

Fonte: NBR 7190-1 (2022a).

A determinação das flechas impostas as lajes é feita através da seguinte equação para um carregamento uniforme:

$$dMáx = \frac{5 \times q \times L^4}{384 \times E \times I} = \frac{5 \times 0,09966 \times 359^4}{384 \times 1600 \times 17855,14} = 0,753$$

$$L/dMáx = \frac{359}{0,753} = 476,76 > 300$$

As flechas para estado limite de serviço inicial e final são apresentadas na Tabela 20.

Tabela 20 - Valores das flechas calculadas

Combinações	dMax(cm)	L/dMax
ELS Inicial	0,489	734,58 > 500
ELS Final	0,753	476,76 > 300

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

5.2.4 Verificação da estrutura em situação de incêndio

Por final, é preciso realizar as verificações da laje em casos de incêndio, para isso foi considerado uma taxa de carbonização bilinear, levando em conta o deslocamento das lamelas. A taxa de carbonização bilinear deve ser considerada em razão da camada carbonizada de madeira funcionar como um isolante térmico para o elemento estrutural.

Como indica a NBR 7190-1 (ABNT, 2022a), a primeira lamela queima a uma taxa de carbonização constante, as demais devem considerar o dobro da velocidade da taxa de carbonização para os primeiros 25mm de espessura, após consideramos o valor tabelado, repetindo-se o processo para cada lamela afetada.

No dimensionamento em situação de incêndio, considera-se alguns parâmetros que indicam qual espessura da estrutura vai ser afetada e desconsiderando ela dos cálculos de resistência. Esses parâmetros estão contidos na Tabela 21.

Tabela 21 - Parâmetros de cálculo das lajes em situação de incêndio

β_2 : (mm/min)	1,3
β_1 : (mm/min)	0,65
TRRF (min)	60
Eo (mm)	7
Ecarb (mm)	39
Eef (mm)	46
kfi	1,15

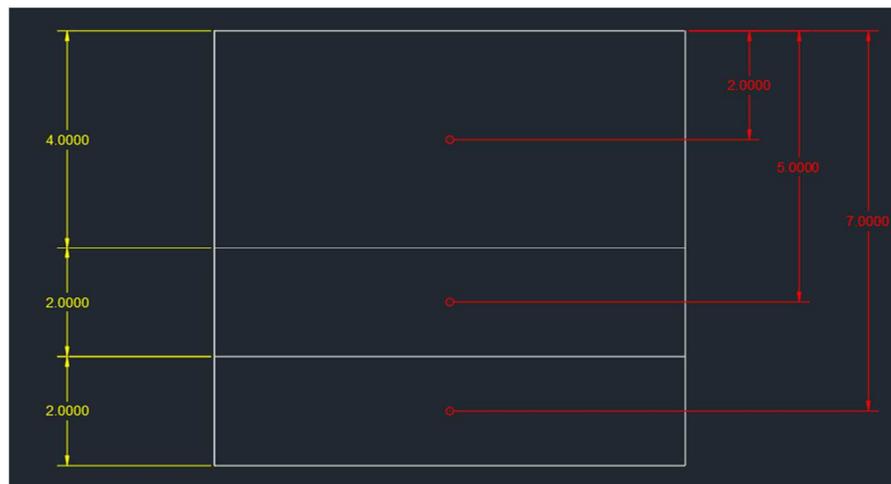
Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Sendo β_1 e β_2 as taxas de carbonização por minuto, TRRF o tempo requerido de resistência ao fogo, Eo e Ko parâmetros da camada não carbonizada, mas que foi comprometida pelo fogo, Ecarb a espessura carbonizada após o TRRF, Eef a espessura efetiva que deve ser desconsiderada no cálculo de resistência da peça e Kfi um parâmetro para determinação da resistência e módulo de elasticidade em caso de incêndio.

A verificação do centro geométrico da peça é feito conforme item 6.7.4.10 da NBR 7190-1 (ABNT, 2022a), exemplificado na seguinte equação:

$$Y_{cg} = \frac{\sum E_i \times b_i \times h_i \times O_i}{\sum E_i \times b_i \times h_i} = \frac{(16000 \times 100 \times 4 \times 2) + (0 \times 100 \times 2 \times 5) + (16000 \times 100 \times 2 \times 7)}{(16000 \times 100 \times 4) + (0 \times 100 \times 2) + (16000 \times 100 \times 2)} = 3,67$$

Para a equação não é considerada a camada que está sofrendo carbonização e o valor de O_i é referente a camada superior até o centro geométrico de cada lâmina, como a Figura 6 apresenta.

Figura 7 - Valores de O_i 

Fonte: Elaborada pelo autor (2024).

As propriedades geométricas e de rigidez da laje em situação de incêndio, onde

desconsideramos a camada afetada pelo fogo, são apresentadas na Tabela 22.

Tabela 22 - Propriedades de laje em situação de incêndio

Camada	Espessura (mm)	E0 (MPa)	Gvt (MPa)	Ycg : 3,67 (cm)
L1	40.0	16000	0	Área Líquida : 600,00 (cm ²)
T1	20.0	0	50	Ic Líquido : 3,933.33 (cm ⁴)
L2	20.0	16000	0	Wc Líquido : 1,072.73 (cm ³)
T2	14.0	0	50	Wt Líquido : 907,69 (cm ³)
L3	0.0	0	0	Sr Líquido : 666,67 (cm ³)

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

As tensões resistentes em situação de incêndio devem considerar um $K_{mod,fi}$, com valor igual a 1 e serem multiplicadas por K_{fi} , com valor de 1,15 para MLCC e MLC. O resultado das tensões resistentes e solicitantes estão na Tabela 23.

$$\sigma_{rd} = K_{mod,fi} \times K_{fi} \times f_{c,k} = 1 \times 1,15 \times 29 = 33,35$$

Tabela 23 - Valores das tensões solicitantes máximas e de resistência da laje em situação de incêndio

TENSÕES RESISTENTES	TENSÕES SOLICITANTES
$\sigma_{rd} = 33,35$ (MPa)	$\sigma_{sdf} = 16,44$ (MPa)
$\tau_{vrd} = 0,81$ (MPa)	$\tau_{vsdf} = 0,17$ (MPa)

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

5.3 VIGAS

O pré - dimensionamento das seções das vigas e dos pilares de MLC do projeto foram feitos através dos programas Calcula Timber MLC da URBEM e Calcula Timber Column da URBEM, respectivamente (Urbem, 2024).

Para a verificação das vigas foi considerado o pórtico com maior vão de carregamento para as vigas do eixo X, com 2,6 metros. Para a determinação do vão teórico para flexão simples reta, devemos determinar o menor valor entre os eixos dos apoios e o vão livre acrescido da altura da seção transversal da peça no meio do vão, não podendo ter acréscimos maiores que 10cm.

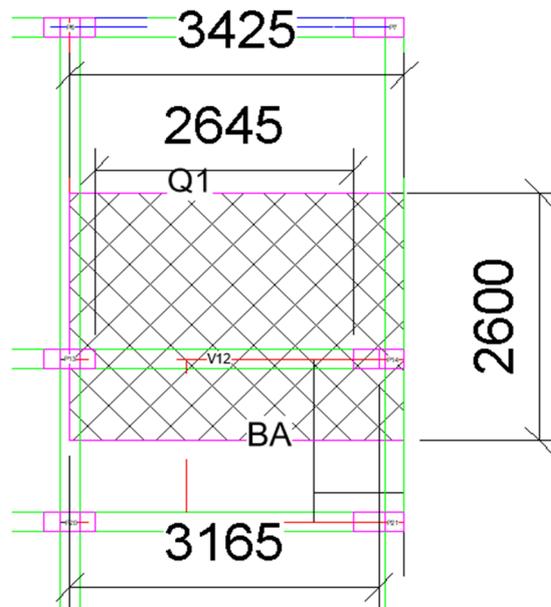
Como as seções da viga no meio do vão ultrapassam o valor de 10 centímetros, é considerado um acréscimo máximo de 10 centímetros, conforme Tabela 24.

Tabela 24 – Valor determinado para o vão de cálculo da viga

$2,645\text{m} + 0,10\text{m} < 3,165\text{m}$
valor adotado 2,745m
aproximado para 2,75m

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Figura 8 - Área e vãos das vigas críticas consideradas para o dimensionamento

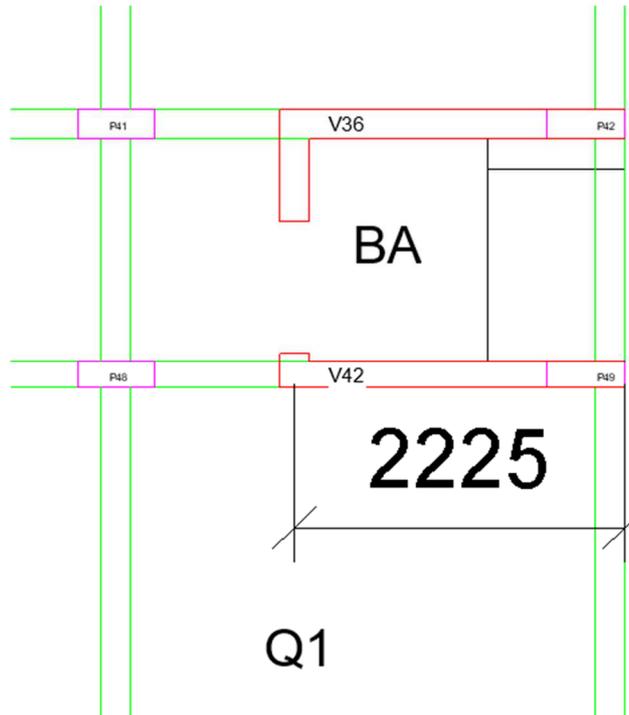


Fonte: Elaborada pelo autor (2024).

Para a carga de uso consideramos 1kN/m^2 (acesso apenas para manutenção ou inspeção) para a cobertura e 3kN/m^2 (corredores de uso comum) para os pavimentos tipos. A carga permanente da cobertura é relacionada a impermeabilização do telhado ($2,7\text{kN/m}^2$) mais o peso específico da laje de 14cm de espessura, conforme cálculo do item 5.2, com densidade média da madeira de classe 50 (550Kg/m^3), chegando ao valor de $0,76\text{kN/m}^2$ e para o pavimento tipo uma carga de 0,3 cm de impermeabilização dos apartamentos ($0,08\text{kN/m}^2$), mais a carga de revestimentos de edifícios residenciais ($1,0\text{kN/m}^2$)

Ademais foram estipuladas cargas uniformes para as paredes de divisa entre quarto e banheiro acima da viga com altura de 2,34m (altura entre lajes, menos a espessura da laje e a altura da viga) e a carga pontual da parede de divisória do banheiro com o corredor $1,35\text{kN}$ aplicada a 2,225 metros da lateral externa das vigas da extremidade da edificação, ($0,5\text{kN/m}^2 \times 2,84\text{m} \times 1,89\text{m} = 1,35\text{kN}$).

Figura 9 - Posição da carga pontual



Fonte: Elaborada pelo autor (2024).

Também foi definido um TRRF de 60 minutos. As solicitações foram definidas através da combinação de diferentes cargas.

5.3.1 Tensões solicitantes e resistentes

A Tabela 25 apresenta os valores utilizados para o dimensionamento da viga, especificando os valores dos carregamentos distribuídos, pontuais e a posição da carga pontual, caracterizando também o caso, sendo peso próprio (PP), permanente (Perm) e acidental (Acid).

Tabela 25 - Valores dos carregamentos na viga

CARREGAMENTOS	Distribuído	Pontual	Posição da carga pontual
Caso	qyk (tf/m)	Fyk (tf)	XF (m)
PP	0,0572	0	0
Perm	1	0,135	1,76
Acid	0,78	0	0

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

As combinações de majoração das ações são exibidas nas Tabelas 26, 27, 28 e 29 e foram utilizadas em conjunto com o *software* Ftool para determinação das solicitações de

tensões axiais, de cisalhamento e de momento fletor nas vigas e pilares analisados.

Para o dimensionamento das vigas no eixo Y só foram consideradas as ações de vento e peso próprio das vigas em razão das lajes terem sido dimensionadas considerando apoio nas vigas do eixo X.

Para a verificação da segurança das vigas foram selecionadas as maiores solicitações apresentadas no pórtico analisado e estão apresentadas na Tabela 30.

Tabela 26 - Valores das de majoração

ELS Inicial	PP	Perm	Variável 1 (Uso e ocupação)	Variável 2 (Vento)
Combinação 1 Sem vento	1,00	1,00	1,00	0,00
Combinação 2 Uso e ocupação principal	1,00	1,00	1,00	0,60
Combinação 3 Vento principal	1,00	1,000	0,70	1,00
ELS Final	PP	Perm	Variável 1 (Uso e ocupação)	Variável 2 (Vento)
Combinação 1 Sem vento	1,80	1,80	1,26	0,00
Combinação 2 Uso e ocupação principal	1,80	1,80	1,26	0,54
Combinação 3 Vento principal	1,80	1,80	1,08	1,08
ELU	PP	Perm	Variável 1 (Uso e ocupação)	Variável 2 (Vento)
Combinação 1 Sem vento	1,30	1,40	1,50	0,00
Combinação 2 Uso e ocupação principal	1,30	1,40	1,50	0,84
Combinação 3 Vento principal	1,30	1,40	1,05	1,40
Combinação 4 Vento principal sem majoração do PP e permanente	1,00	1,00	0,00	1,40

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Tabela 27 - Valores das cargas majoradas das vigas no eixo X dos pavimentos tipo

Viga Tipo					
ELS Inicial	PP Tf/m)	Perm (Tf/m)	Variável 1 (Uso e ocupação) (Tf/m)	Carga pontual (Parede do banheiro) (kN)	Carga pontual (PP pilares) (kN)
Combinação 1 Sem vento	0,25	0,68	0,78	1,35	1,85
Combinação 2 Uso e ocupação principal	0,25	0,68	0,78	1,35	1,85
Combinação 3 Vento principal	0,25	0,68	0,55	1,35	1,85
ELS Final	PP Tf/m)	Perm (Tf/m)	Variável 1 (Uso e ocupação) (Tf/m)	Carga pontual (Parede do banheiro) (kN)	Carga pontual (PP pilares) (kN)

Combinação 1 Sem vento	0,45	1,23	0,98	2,43	3,33
Combinação 2 Uso e ocupação principal	0,45	1,23	0,98	2,43	3,33
Combinação 3 Vento principal	0,45	1,23	0,84	2,43	3,33
ELU e Incêndio	PP Tf/m)	Perm (Tf/m)	Variável 1 (Uso e ocupação) (Tf/m)	Carga pontual (Parede do banheiro) (kN)	Carga pontual (PP pilares) (kN)
Combinação 1 Sem vento	0,33	0,95	1,17	1,89	2,41
Combinação 2 Uso e ocupação principal	0,33	0,95	1,17	1,89	2,41
Combinação 3 Vento principal	0,33	0,95	0,82	1,89	2,41
Combinação 4 Vento principal sem majoração do PP e permanente	0,25	0,68	0,00	1,35	1,85

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Tabela 28 - Valores das cargas majoradas das vigas no eixo X de cobertura

Viga cobertura			
ELS Inicial	PP Tf/m)	Perm (Tf/m)	Variável 1 (Uso e ocupação) (Tf/m)
Combinação 1 Sem vento	0,25	0,70	0,26
Combinação 2 Uso e ocupação principal	0,25	0,70	0,26
Combinação 3 Vento principal	0,25	0,70	0,18
ELS Final	PP Tf/m)	Perm (Tf/m)	Variável 1 (Uso e ocupação) (Tf/m)
Combinação 1 Sem vento	0,45	1,26	0,33
Combinação 2 Uso e ocupação principal	0,45	1,26	0,33
Combinação 3 Vento principal	0,45	1,26	0,28
ELU e Incêndio	PP Tf/m)	Perm (Tf/m)	Variável 1 (Uso e ocupação) (Tf/m)
Combinação 1 Sem vento	0,33	0,98	0,39
Combinação 2 Uso e ocupação principal	0,33	0,98	0,39
Combinação 3 Vento principal	0,33	0,98	0,27
Combinação 4 Vento principal sem majoração do PP e permanente	0,25	0,70	0,00

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Tabela 29 - Valores das cargas majoradas das vigas no eixo Y

Viga Y		
ELS Inicial	PP (kN/m)	Variável 2 (Vento)

Combinação 1 Sem vento	0,56	0,00
Combinação 2 Uso e ocupação principal	0,56	0,60
Combinação 3 Vento principal	0,56	1,00
ELS Final	PP (kN/m)	Variável 2 (Vento)
Combinação 1 Sem vento	1,01	0,00
Combinação 2 Uso e ocupação principal	1,01	0,54
Combinação 3 Vento principal	1,01	1,08
ELU e Incêndio	PP (kN/m)	Variável 2 (Vento)
Combinação 1 Sem vento	0,73	0,00
Combinação 2 Uso e ocupação principal	0,73	0,84
Combinação 3 Vento principal	0,73	1,40
Combinação 4 Vento principal sem majoração do PP e permanente	0,56	1,40

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Tabela 30 - Valores máximos das solicitações nas vigas

Combinações	Vigas em X			Vigas em Y		
	Cisalhamento Máx (kN)	Fletor Máx (kN.m)	Axial Máx (kN)	Cisalhamento Máx (kN)	Fletor Máx (kN.m)	Axial Máx (kN)
ELS Inicial						
Combinação 1 Sem vento	32,40	14,80	3,80	1,10	0,60	0,30
Combinação 2 Uso e ocupação principal	36,90	21,70	7,10	6,90	5,60	6,90
Combinação 3 Vento principal	35,70	23,90	10,40	11,20	9,20	10,20
ELS Final						
Combinação 1 Sem vento	50,40	23,10	6,10	1,90	1,20	0,50
Combinação 2 Uso e ocupação principal	54,50	29,60	9,10	6,60	5,40	5,50
Combinação 3 Vento principal	56,00	34,10	11,80	12,30	10,10	11,00
ELU e Incêndio						
Combinação 1 Sem vento	46,20	21,10	2,40	1,40	0,80	0,40
Combinação 2 Uso e ocupação principal	52,60	30,90	10,00	9,40	7,60	8,50
Combinação 3 Vento principal	50,40	33,70	14,60	15,60	12,90	14,30
Combinação 4 Vento principal sem majoração do PP e permanente	28,70	26,20	14,40	15,50	12,90	14,30

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

As propriedades geométricas e valores de resistência das vigas, apresentadas nas Tabelas 31 e 32 respectivamente, foram determinados da mesma forma como descrito no dimensionamento das lajes. com a diferença que neste caso a peça é de MLC, possuindo todas suas lâminas na mesma direção e não sendo necessário utilizar o valor obtido através do método gama para obter o momento de inércia efetivo. Outro item diferente é o K_{mod3} , com valor de 0,95, conforme item 5.1.

Tabela 31 - Valores das propriedades da viga

Ycg : 26.00 (cm)
Area Líquida : 1,040.00 (cm ²)
Ic Líquido : 234,346.67 (cm ⁴)
It Líquido : 234,346.67 (cm ⁴)
Wc Líquido : 9,013.33 (cm ³)
Wt Líquido : 9,013.33 (cm ³)
Sh/2 Líquido : 6,760.00 (cm ³)

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Tabela 32 - Valores das tensões resistêntes da viga

ELS Inicial	Kmod	Resis compressão paralela (MPa)	Resis tração paralela (MPa)	σ_{rd} (Mpa)	τ_{vrd} (Mpa)
Combinação 1 Sem vento	1,00	20,71	21,43	35,71	2,22
Combinação 2 Uso e ocupação principal	1,00	20,71	21,43	35,71	2,22
Combinação 3 Vento principal	1,00	20,71	21,43	35,71	2,22
ELS Final	Kmod	Resis compressão paralela (MPa)	Resis tração paralela (MPa)	σ_{rd} (Mpa)	τ_{vrd} (Mpa)
Combinação 1 Sem vento	1,00	20,71	21,43	35,71	2,22
Combinação 2 Uso e ocupação principal	1,00	20,71	21,43	35,71	2,22
Combinação 3 Vento principal	1,00	20,71	21,43	35,71	2,22
ELU	Kmod	Resis compressão paralela (MPa)	Resis tração paralela (MPa)	σ_{rd} (Mpa)	τ_{vrd} (Mpa)
Combinação 1 Sem vento	0,46	9,53	9,86	16,43	1,02
Combinação 2 Uso e ocupação principal	0,46	9,53	9,86	16,43	1,02
Combinação 3 Vento principal	0,46	9,53	9,86	16,43	1,02
Combinação 4 Vento principal sem majoração do PP e permanente	0,46	9,53	9,86	16,43	1,02

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

As tensões solicitantes máximas, conforme Tabela 33, foram obtidas através dos valores de solicitação máxima das vigas da Tabela 30 e das propriedades geométricas da Tabela 29.

Tabela 33 - Valores das tensões solicitantes máximas da viga

ELS Inicial	σ_{SNd} (Mpa)	$\sigma_{Sd}(\text{Max})$ MPa	$\tau_{Sd}(\text{Max})$ Mpa
Combinação 1 Sem vento	0,04	1,64	0,47
Combinação 2 Uso e ocupação principal	0,07	2,41	0,53
Combinação 3 Vento principal	0,10	2,65	0,51
ELS Final	σ_{SNd} (Mpa)	$\sigma_{Sd}(\text{Max})$ MPa	$\tau_{Sd}(\text{Max})$ Mpa
Combinação 1 Sem vento	0,06	2,56	0,73
Combinação 2 Uso e ocupação principal	0,09	3,28	0,79
Combinação 3 Vento principal	0,11	3,78	0,81
ELU	σ_{SNd} (Mpa)	$\sigma_{Sd}(\text{Max})$ MPa	$\tau_{Sd}(\text{Max})$ Mpa
Combinação 1 Sem vento	0,02	2,34	0,67
Combinação 2 Uso e ocupação principal	0,10	3,43	0,76
Combinação 3 Vento principal	0,14	3,74	0,73
Combinação 4 Vento principal sem majoração do PP e permanente	0,14	2,91	0,41

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

5.3.2 Verificação do estado limite de serviço

As flechas apresentadas pelas diferentes combinações de estados limites de serviço também foram obtidas pelo *software* Ftool e os resultados são apresentados na Tabela 34.

Tabela 34 - Valores das flechas calculadas

ELS Inicial	dMax(cm) Ftool	L/dMax(t)
Combinação 1 Sem vento	0,13	2165,35 > 500
Combinação 2 Uso e ocupação principal	0,13	2165,35 > 500
Combinação 3 Vento principal	0,29	948,28 > 500
ELS Final	dMax(cm) Ftool	L/dMax(t)
Combinação 1 Sem vento	0,21	1309,52 > 350
Combinação 2 Uso e ocupação principal	0,21	1309,52 > 350
Combinação 3 Vento principal	0,20	1375,00 > 350

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

5.3.3 Verificação da estabilidade lateral

A verificação da estabilidade lateral das vigas retangulares deve seguir os requisitos expostos no item 6.5.6 da NBR 7190-1 (ABNT, 2022a). Essa verificação pode ser desconsiderada quando 2 parâmetros são atendidos.

O primeiro parâmetro é referente ao impedimento de rotações nas seções extremas de apoio da viga, ou seja, as vigas devem possuir impedimentos em seus apoios como condição para a desconsideração da estabilidade lateral. O segundo parâmetro define-se pelas equações de definição das distâncias mínimas entre travamentos laterais, conforme equações seguintes:

$$\beta M = \frac{4}{\pi} \times \frac{\beta E}{\gamma f} \times \frac{\left(\frac{h}{b}\right)^{\frac{3}{2}}}{\left(\frac{h}{b}-0,63\right)^{\frac{1}{2}}} = \frac{4}{\pi} \times \frac{4}{1,4} \times \frac{\left(\frac{52}{20}\right)^{\frac{3}{2}}}{\left(\frac{52}{20}-0,63\right)^{\frac{1}{2}}} = 10,86$$

$$E0,ef = E0,m \times Kmod = 16000 \times 0,6 \times 0,8 \times 0,95 = 7296MPa$$

$$L1 \leq \frac{E0,ef \times b}{\beta M f_{m,d}} = \frac{7296 \times 20}{10,86 \times 16,28} = 825 \text{ cm}$$

A Tabela 35 exibe os valores das variáveis e resultados das equações para determinação da distância entre travamentos laterais (825 cm), como o valor é maior do que o do vão entre apoios da viga analisada (275 cm), pode-se desconsiderar a verificação de estabilidade lateral da viga.

Tabela 35 - Verificação de estabilidade lateral da viga

ESTABILIDADE LATERAL
$E0,ef$: 7296 (MPa)
E_{c0m} : 16000(MPa)
k_{mod} : 0,456
f_{bd} : 16,28 (MPa)
βE : 4
γf : 1,4
βM : 10,86
$L1 <$: 8,25 (m)

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

5.3.4 Verificação da estrutura em situação de incêndio

Da mesma forma que foi feito o dimensionamento para as lajes em situação de incêndio, os efeitos do incêndio na resistência das vigas de madeira é feito pela desconsideração da espessura afetada pelo incêndio.

Para as vigas consideramos uma taxa linear de carbonização, visto que as lamelas foram

consideradas paralelas umas as outras. Sendo assim temos uma taxa de carbonização única (β_n), cuja taxa tem um valor maior do que o β_1 tabelado especificado para as lajes. Isso se deve ao fator de arredondamento dos cantos do elemento estrutural, que deve ser considerado.

A Tabela 36 exhibe os valores dos parâmetros de cálculo para a viga em situação de incêndio, assim como a espessura carbonizada e efetiva calculada.

Tabela 36 - Parâmetros das vigas em situação de incêndio

INCÊNDIO
kfi : 1.15 (mm/min)
TRRF : 60 (min)
β_n : 0.7 (mm/min)
ecarb : 42.00 (mm)
cef : 49.00 (mm)

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Feita a análise da espessura afetada pelo incêndio pode-se prosseguir com o redimensionamento das propriedades geométricas das viga em situação de incêndio. Os resultados são apresentados na Tabela 37

Tabela 37 - Propriedades das vigas em situação de incêndio

GEOMETRIA EM INCÊNDIO
H incêndio : 47.10 (mm)
B incêndio : 10.20 (mm)
Ycg : 23.55 (cm)
Area Líquida : 480.42 (cm ²)
Ic Líquido : 88,814.04 (cm ⁴)
It Líquido : 88,814.04 (cm ⁴)
Wc Líquido : 3,771.30 (cm ³)
Wt Líquido : 3,771.30 (cm ³)
Sh/2 : 2,828.47 (cm ³)

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Os valores de tensões resistentes e solciantes das vigas em situação de incêndio para as diferentes combinações, conforme Tabelas 38 e 39 respectivamente, são obtidos através das mesmas equações utilizados para dimensionamento das lajes.

Tabela 38 - Valores das tensões de resistência das vigas em situação de incêndio

Combinações	Tensões resistentes em situação de Incêndio				
	Kmod	Resis compressão paralela (MPa)	Resis tração paralela (MPa)	σ_{rd} (Mpa)	τ_{vrd} (Mpa)
Combinação 1 Sem vento	1,00	33,35	34,50	57,50	4,60
Combinação 2 Uso e ocupação	1,00	33,35	34,50	57,50	4,60

principal					
Combinação 3 Vento principal	1,00	33,35	34,50	57,50	4,60
Combinação 4 Vento principal sem majoração do PP e permanente	1,00	33,35	34,50	57,50	4,60

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Tabela 39 - Valores das tensões solicitantes das vigas em situação de incêndio

Combinações	Tensões solicitantes em situação de Incêndio		
	σ_{SNd} (Mpa)	$\sigma_{Sd(Max)}$ MPa	$\tau_{Sd(Max)}$ Mpa
Combinação 1 Sem vento	0,05	5,59	0,74
Combinação 2 Uso e ocupação principal	0,21	8,19	0,84
Combinação 3 Vento principal	0,30	8,94	0,80
Combinação 4 Vento principal sem majoração do PP e permanente	0,30	6,95	0,46

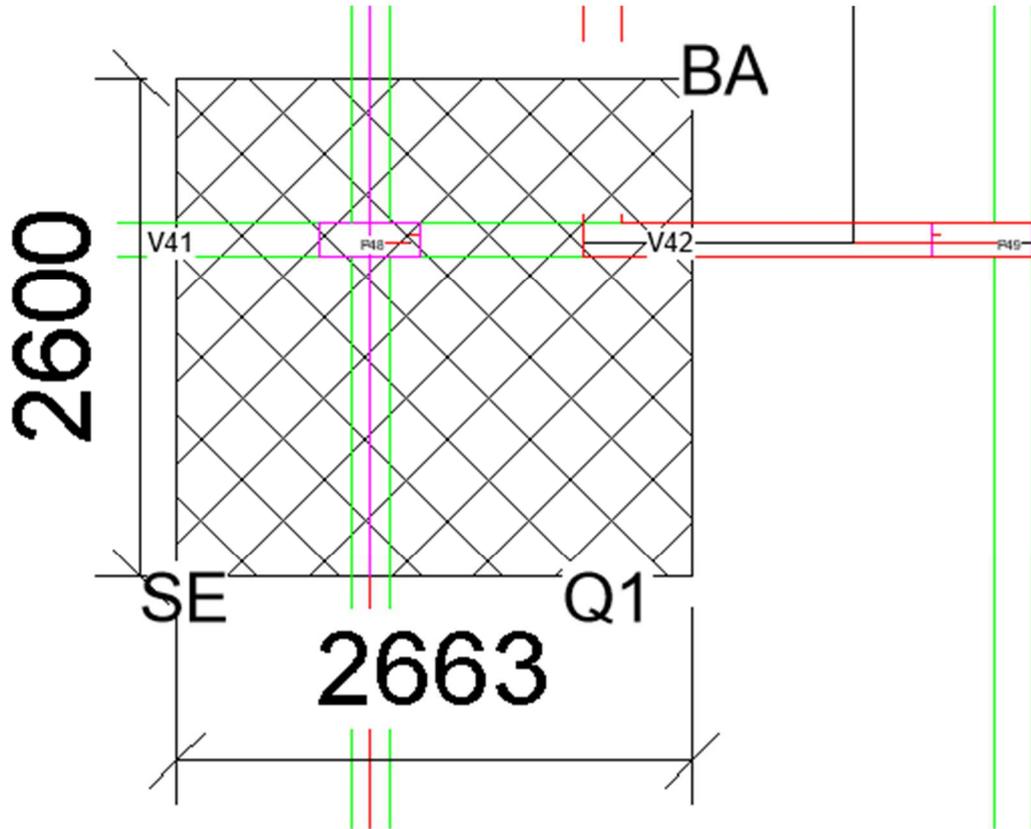
Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Com os valores de tensão solicitante menores dos que os de tensão resistente, pode-se concluir que as seções de pré dimensionamento da viga (20x50cm), atendem as diferentes combinações de cargas impostas a ela, tanto para estados limites de serviço, último e de situação de incêndio.

5.4 PILARES

Para análise dos pilares foi considerado o pior caso do projeto, nos pilares 9, 13, 44 e 48 do térreo, que recebem as cargas de todos os outros pavimentos. Esses pontos possuem a maior área de carregamento (7m²). Os carregamentos por metro quadrado são os mesmos utilizados na verificação das vigas e as solicitações também foram obtidas pela análise com auxílio do *software* Ftool (Figura 9).

Figura 10 - Área de carregamento dos pilares críticos consideradas para o dimensionamento



Fonte: Elaborada pelo autor (2024).

Considerando-se as mesmas cargas utilizadas para análise das vigas no *software* Ftool, chega-se aos valores máximos de solicitação nos pilares para todas as diferentes combinações consideradas conforme Tabela 40.

Tabela 40 - Valores máximos das solicitações nos pilares

Combinações	Pilares Y			Pilares X		
	Cisalhamento Máx (kN)	Fletor Máx (kN.m)	Axial Máx (kN)	Cisalhamento Máx (kN)	Fletor Máx (kN.m)	Axial Máx (kN)
ELS Inicial						
Combinação 1 Sem vento	0,30	0,50	7,00	3,80	5,70	236,20
Combinação 2 Uso e ocupação principal	4,00	6,70	15,00	6,10	9,30	241,10
Combinação 3 Vento principal	6,60	11,10	20,40	8,10	12,30	216,20
ELS Final						
Combinação 1 Sem vento	0,50	0,90	12,70	6,10	9,30	373,70
Combinação 2 Uso e ocupação principal	3,60	6,10	19,90	7,80	11,80	378,10
Combinação 3 Vento	7,20	12,00	27,10	9,90	15,10	365,50

principal						
ELU	Cisalhamento Máx (kN)	Fletor Máx (kN.m)	Axial Máx (kN)	Cisalhamento Máx (kN)	Fletor Máx (kN.m)	Axial Máx (kN)
Combinação 1 Sem vento	0,40	0,60	9,20	5,40	8,00	335,10
Combinação 2 Uso e ocupação principal	5,60	9,30	20,30	8,60	13,10	341,90
Combinação 3 Vento principal	9,20	15,50	27,90	11,40	17,30	304,20
Combinação 4 Vento principal sem majoração do PP e permanente	9,20	15,50	25,80	11,00	16,60	153,80

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

As propriedades geométricas dos pilares foram obtidas pelas seções pré dimensionadas nas calculadoras da URBEM. Os valores dessas propriedades são apresentadas na Tabela 41.

Tabela 41 - Valores das propriedades dos pilares

Area Líquida (cm ²)	1144,00
Ix (cm ⁴)	257781,33
Iy (cm ⁴)	46141,33
Wx (cm ³)	9914,67
Wy (cm ³)	4194,67
GEOMETRIA	
B : 22	
H : 52	
Comprimento: 300 cm	

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Na verificação de pilares devemos determinar o comprimento equivalente através do coeficiente K_e , definido na Tabela 42. Esse parâmetro depende do tipo de apoio dos pilares, que no atual projeto foi considerado como 2 apoios simples, em favor da segurança, tendo o valor de $K_e = 1$.

Tabela 42 - Valores de K_E para os diferentes tipos de apoios

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

Fonte: NBR 7190-1 (2022a).

Os valores das tensões solicitantes e resistentes dos pilares para solicitações normais seguem as equações utilizadas nos dimensionamentos das vigas e lajes. Para os momentos fletores deve-se considerar a diferença dos momentos de inércia para os eixos X e Y e a solicitação que é diferente para cada eixo. Os resultados obtidos para as diferentes combinações são exibidos nas tabelas 43 e 44.

Tabela 43 - Valores das tensões solicitantes dos pilares

ELS Inicial	σ_{SNd} (Mpa)	σ_{SMxd} (Mpa)	σ_{SMyd} (Mpa)
Combinação 1 Sem vento	2,13	0,57	0,12
Combinação 2 Uso e ocupação principal	2,24	0,94	1,60
Combinação 3 Vento principal	2,07	1,24	2,65
ELS Final	σ_{SNd} (Mpa)	σ_{SMxd} (Mpa)	σ_{SMyd} (Mpa)
Combinação 1 Sem vento	3,38	0,94	0,21
Combinação 2 Uso e ocupação principal	3,48	1,19	1,45
Combinação 3 Vento principal	3,43	1,52	2,86
ELU	σ_{SNd} (Mpa)	σ_{SMxd} (Mpa)	σ_{SMyd} (Mpa)
Combinação 1 Sem vento	3,01	0,81	0,14
Combinação 2 Uso e ocupação principal	3,17	1,32	2,22
Combinação 3 Vento	2,90	1,74	3,70

principal			
Combinação 4 Vento principal sem majoração do PP e permanente	1,57	1,67	3,70

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Tabela 44 - Valores das tensões resistentes dos pilares

ELS Inicial	Kmod	σ_{RNd} (Mpa)	τ_{vrd} (Mpa)	σ_{rd} (Mpa)
Combinação 1 Sem vento	1,00	20,71	2,22	35,71
Combinação 2 Uso e ocupação principal	1,00	20,71	2,22	35,71
Combinação 3 Vento principal	1,00	20,71	2,22	35,71
ELS Final	Kmod	σ_{RNd} (Mpa)	τ_{vrd} (Mpa)	σ_{rd} (Mpa)
Combinação 1 Sem vento	1,00	20,71	2,22	35,71
Combinação 2 Uso e ocupação principal	1,00	20,71	2,22	35,71
Combinação 3 Vento principal	1,00	20,71	2,22	35,71
ELU	Kmod	σ_{RNd} (Mpa)	τ_{vrd} (Mpa)	σ_{rd} (Mpa)
Combinação 1 Sem vento	0,46	9,53	1,02	16,43
Combinação 2 Uso e ocupação principal	0,46	9,53	1,02	16,43
Combinação 3 Vento principal	0,46	9,53	1,02	16,43
Combinação 4 Vento principal sem majoração do PP e permanente	0,46	9,53	1,02	16,43

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Para verificação da estabilidade da peça comprimida devemos analisar a sua esbeltez através das seguintes equações:

$$L_o = L \times K_e = 300 \times 1,00 = 300 \text{ cm}$$

$$\lambda_x = \frac{L_o}{\sqrt{\frac{I_x}{A}}} = \frac{300}{\sqrt{\frac{257781,33}{1144}}} = 19,98$$

$$\lambda_y = \frac{L_o}{\sqrt{\frac{I_y}{A}}} = \frac{300}{\sqrt{\frac{46141,33}{1144}}} = 47,24$$

$$E_{0,05} = E_{0,med} \times 0,7 = 16000 \times 0,7 \approx 11000 \text{ MPa}$$

$$\text{em } x: \lambda_{rel,x} = \frac{\lambda_x}{\pi} \times \sqrt{\frac{f_{c0,k}}{E_{0,05}}} = \frac{19,98}{\pi} \times \sqrt{\frac{29}{11000}} = 0,33$$

$$\text{em } y: \lambda_{rel,y} = \frac{\lambda_y}{\pi} \times \sqrt{\frac{f_{c0,k}}{E_{0,05}}} = \frac{47,24}{\pi} \times \sqrt{\frac{29}{11000}} = 0,77$$

Em casos em que a esbelteza relativa é maior que 0,3, além da verificação da compressão paralela e flexo-compressão, deve-se fazer a análise da estabilidade da peça através das inequações abaixo.

$$\frac{\sigma_{Nc,d}}{K_{cx} \times f_{c0,d}} + \frac{\sigma_{Mx,d}}{f_{m,d}} + K_m \times \frac{\sigma_{My,d}}{f_{m,d}} \leq 1$$

$$\frac{\sigma_{Nc,d}}{K_{cy} \times f_{c0,d}} + K_m \times \frac{\sigma_{Mx,d}}{f_{m,d}} + \frac{\sigma_{My,d}}{f_{m,d}} \leq 1$$

Os valores de K_{cy} e K_{cx} são obtidos através das seguintes equações:

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

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

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

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

$$\beta_c = 0,1 \text{ para MLCC e MLC}$$

$$K_m = 0,7 \text{ para peças retangulares}$$

A verificação da flexo-compressão é similar a da estabilidade sendo avaliada pela inequação:

$$\left(\frac{\sigma_{Nc,d}}{f_{c0,d}}\right)^2 + \frac{\sigma_{Mx,d}}{f_{m,d}} + Km \times \frac{\sigma_{My,d}}{f_{m,d}} \leq 1$$

$$\left(\frac{\sigma_{Nc,d}}{f_{c0,d}}\right)^2 + Km \times \frac{\sigma_{Mx,d}}{f_{m,d}} + \frac{\sigma_{My,d}}{f_{m,d}} \leq 1$$

Através dessas inequações pode-se obter os valores exibidos na Tabela 45, para verificação da estabilidade e flexo-compressão nas diferentes combinações analisadas.

Tabela 45 - Verificação da estabilidade e flexo-compressão dos pilares

ELS Inicial	Flexocompressão		Estabilidade	
Combinação 1 Sem vento	0,09	0,08	0,27	0,28
Combinação 2 Uso e ocupação principal	0,18	0,19	0,36	0,40
Combinação 3 Vento principal	0,24	0,26	0,41	0,46
ELS Final	Flexocompressão		Estabilidade	
Combinação 1 Sem vento	0,19	0,18	0,43	0,45
Combinação 2 Uso e ocupação principal	0,27	0,28	0,51	0,55
Combinação 3 Vento principal	0,35	0,37	0,58	0,64
ELU	Flexocompressão		Estabilidade	
Combinação 1 Sem vento	0,16	0,14	0,38	0,39
Combinação 2 Uso e ocupação principal	0,29	0,31	0,51	0,56
Combinação 3 Vento principal	0,36	0,40	0,57	0,64
Combinação 4 Vento principal sem majoração do PP e permanente	0,29	0,33	0,43	0,48

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Na verificação dos estados limites de serviço, obteve-se os valores de deslocamento axial dos pilares através do *software* Ftool.

O maior deslocamento axial do pilar observado foi nos pilares de apoio das vigas da cobertura, para a combinação 3 do estado limite de serviço final, considerando o vento como principal carga variável e os efeitos da fluência da madeira, chegando a um valor de 8,3 mm de desvio lateral conforme apêndice 2. Como exposto no item 6.5.2 da NBR 7190-1 (ABNT, 2022a), o valor máximo de deslocamento é definido por $L/500$, ou seja 6,00 mm para o atual projeto.

Dessa forma os pilares tiveram que ser redimensionados com uma nova geometria de 52 cm x 25 cm para atender o valor de 6,00 mm, conforme exibido no apêndice 3. As novas propriedades do pilar são apresentadas na Tabela 46.

Tabela 46 - Valores das propriedades dos pilares redimensionados

Área Líquida (cm ²)	1300,00
I _x (cm ⁴)	292933,33
I _y (cm ⁴)	67708,33
W _x (cm ³)	11266,67
W _y (cm ³)	5416,67
GEOMETRIA	
B : 25	
H : 52	
Comprimento: 300 cm	

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Para o dimensionamento do pilar em situação de incêndio considerou-se a seção do pilar redimensionado. A determinação das propriedades dos pilares, em situação de incêndio, exibidas na Tabela 47, segue os exemplos de dimensionamento das vigas, com efeito de arredondamento das bordas.

Tabela 47 - Propriedades dos pilares em situação de incêndio

GEOMETRIA EM INCÊNDIO
k _{fi} : 1.15 (mm/min)
TRRF : 60 (min)
β _n : 0.7 (mm/min)
e _{carb} : 42.00 (mm)
e _{ef} : 49.00 (mm)
H incêndio : 42.20 (mm)
B incêndio : 15.20 (mm)
A _{rei} : 641.44 (cm ²)
I _{xi} : 95,191.83 (cm ⁴)
I _{yi} : 12,349.86 (cm ⁴)
W _{xi} : 4,511.46 (cm ³)
W _{yi} : 1,624.98 (cm ³)

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

As tensões resistentes e solicitantes, assim como as análises de flexocompressão e estabilidade são refeitas para as novas seções do pilar em situação de incêndio. Os resultados dessas verificações são apresentadas nas Tabelas 48, 49 e 50.

Tabela 48 - Tensões resistentes em situação de incêndio

Tensões resistentes em situação de incêndio
σ _{RNd} (Mpa)
33,35
σ _{rd} (Mpa)
57,5

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Tabela 49 - Tensões solicitantes em situação de incêndio

Combinações Incêndio	Tensões solicitantes em situação de incêndio		
	σ_{SNd} (Mpa)	σ_{SMxd} (Mpa)	σ_{SMyd} (Mpa)
Combinação 1 Sem vento	5,37	1,77	0,37
Combinação 2 Uso e ocupação principal	5,65	2,90	5,72
Combinação 3 Vento principal	5,18	3,83	9,54
Combinação 4 Vento principal sem majoração do PP e permanente	2,80	3,68	9,54

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Tabela 50 - Verificação de estabilidade em situação de incêndio

Incêndio	Flexocompressão		Estabilidade	
Combinação 1 Sem vento	0,06	0,05	0,20	0,27
Combinação 2 Uso e ocupação principal	0,15	0,16	0,29	0,39
Combinação 3 Vento principal	0,21	0,24	0,34	0,44
Combinação 4 Vento principal sem majoração do PP e permanente	0,19	0,22	0,27	0,34

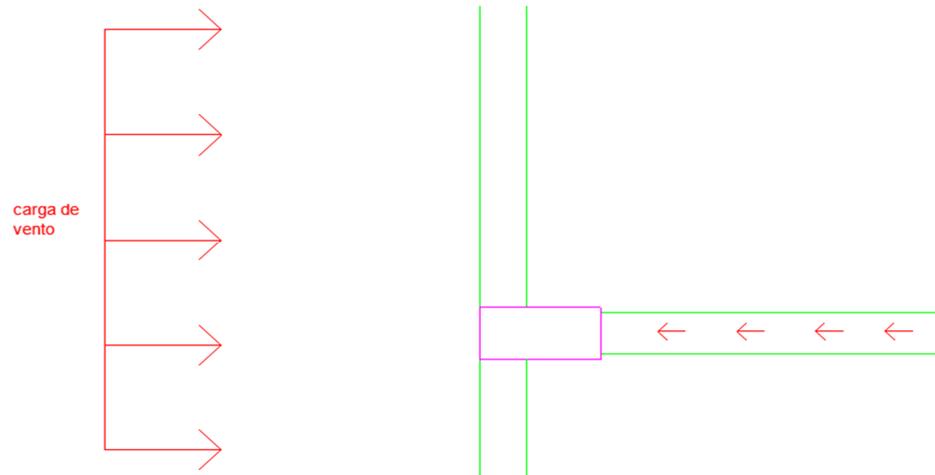
Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

5.5 LIGAÇÕES

5.5.1 Conexões laje-viga

As ligações entre lajes devem ser avaliadas para as emendas entre as peças, nesses casos, a ligação foi feita por parafusos e foi dimensionada para resistência lateral e cisalhamento, sendo os valores da solicitação obtidos pelo Ftool, considerando os mesmos esforços laterais das vigas.

Figura 11 - Resistência às solicitações laterais das vigas



Fonte: Elaborada pelo autor (2024).

$$N_{sd} = 14,6 \text{ kN}$$

O parafuso considerado inicialmente para o dimensionamento foi o A307, parafuso passante estrutural padronizado na NBR 7190 (ABNT, 2022a) com menor resistência. Sua resistência característica ($F_{y,k}$) tem o valor de 250MPa e sua resistência última característica ($F_{u,k}$) tem valor de 415 MPa. Para o cálculo das ligações parafusadas nas lajes de madeira, devemos considerar as propriedades conjuntas das madeiras como a resistência ao embutimento que varia em razão do ângulo de solicitação.

$$F_{e\alpha, k} = \frac{F_{e0, k}}{K_{90} \times \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha}$$

$$F_{e0, k} = 0,082 \times (1 - 0,01d) \times P_k$$

$$K_{90} = 1,35 + 0,015d \text{ para madeiras coníferas}$$

$$d = 10\text{mm (diâmetro do parafuso)}$$

A resistência à flexão do pino e a relação entre a resistência paralela ao embutimento e a resistência no ângulo analisado (β) é definida por:

$$M_{yR, k} = 0,3 \times f_{u, k} \times d^{2,6}$$

$$\beta = \frac{F_{e\alpha, k}}{F_{e0, k}}$$

$$t_1 = \text{Espessura da laje (14 cm)}$$

$$t_2 = \text{profundidade do parafuso na viga (5 cm)}$$

Os modos de falha para a conexão são expostos na Tabela 18 da NBR 7190-1 (ABNT, 2022a), possuindo 6 modos de falha. A menor resistência encontrada foi a de $F_{v,Rk5}$, com valor de 6,23 kN de resistência para cada parafuso.

$$F_{v,Rk1} = 47527.20 \text{ N}$$

$$F_{v,Rk2} = 14473.83 \text{ N}$$

$$F_{v,Rk3} = 15413.21 \text{ N}$$

$$F_{v,Rk4} = 16533.02 \text{ N}$$

$$F_{v,Rk5} = 6228.00 \text{ N}$$

$$F_{v,Rk6} = 9434.51 \text{ N}$$

Assim, a situação de falha com menor resistência calculada é a 6. Precisa-se, portanto, aplicar os coeficientes de modificação (K_{mod}) e de minoração da resistência ao valor encontrado.

$$FRd = \frac{F_{v,Rk} \times K_{mod}}{\gamma_{a1}} = \frac{6,23 \times 0,6 \times 0,8 \times 0,95}{1,4} = 2,03$$

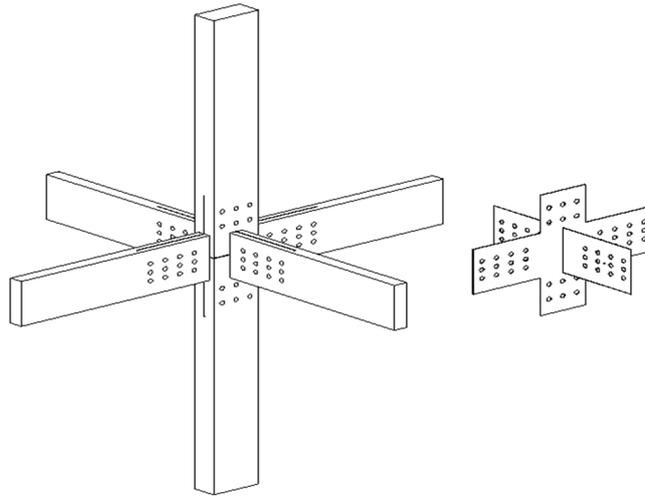
$$N^{\circ} \text{ de parafusos} = \frac{N_{sd}}{FRd \times n^{\circ} \text{ planos de corte}} = \frac{14,60}{2,03 \times 1} = 7,20 \text{ Parafusos}$$

Dessa forma, define-se então 8 parafusos distribuídos por cada viga para a conexão com a laje. Como a distribuição desses parafusos entre as vigas e lajes não descumpra com os afastamentos mínimos entre parafusos e bordas dos elementos, pode-se manter o parafuso A307, não sendo necessária aumentar a resistência do pino para diminuir o número de parafusos.

5.5.2 Conexões pilar-viga

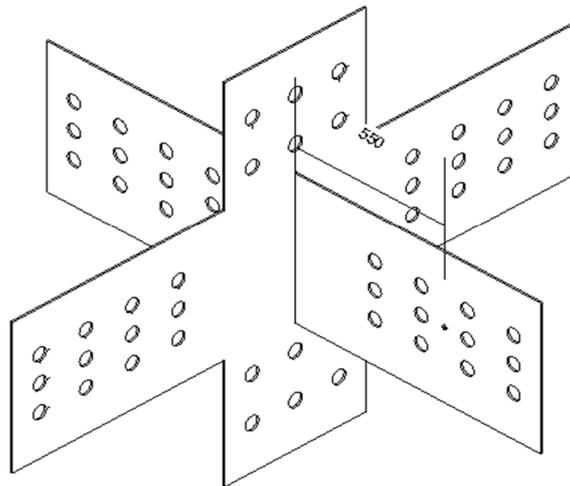
Para a conexão entre vigas e pilares adotou-se uma conexão parafusada com ligação por chapas de aço. O aço das chapas utilizadas para dimensionamento foi o A36 com espessura de 6,35mm e os parafusos A490 com diâmetro de 24mm e suas características resistentes são definidas pela NBR 8800 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2008).

Figura 12 - Modelo de ligações dimensionado para a conexão vigas-pilares



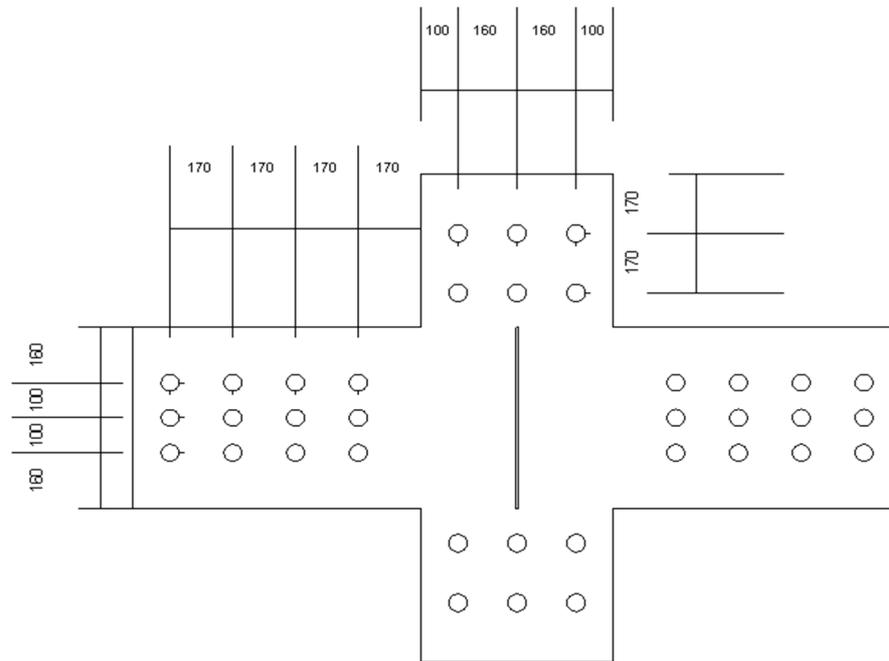
Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Figura 13 - Dimensões em cm do ponto de solda até o eixo geométrico da ligação parafusada



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Figura 14 - Distâncias em cm entre parafusos



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Tabela 51 - Aços de uso freqüente especificados pela ASTM para uso estrutural

Classificação	Denominação	Produto	Grupo de perfil ^{a b} ou faixa de espessura disponível	Grau	f_y MPa	f_u MPa
Aços-carbono	A36	Perfis	1, 2 e 3	-	250	400 a 550
		Chapas e barras ^c	$t \leq 200$ mm			
	A500	Perfis	4	A	230	310
				B	290	400

Fonte: NBR 8800 (2008).

A espessura de chapa de A36 escolhida foi a de 6,35mm amplamente disponível no mercado e especificados pela ASTM para uso estrutural. Suas solicitações, assim como a dos parafusos utilizados, foram consideradas as máximas para cada situação apresentada no dimensionamento das vigas e pilares.

A chapa foi verificada para situações de cisalhamento, tração, compressão e colapso por rasgamento, conforme as seguintes equações:

$$FRd \text{ compress\~{a}o: } \frac{F_y \times A_g}{\gamma_{a1}} = \frac{25 \times 52 \times 0,635}{1,1} = 750,45 \text{ Kn}$$

$$FRd \text{ tra\~{c}o\~{a}o por escoamento: } \frac{F_y \times A_g}{\gamma_{a1}} \times \frac{25 \times 52 \times 0,635}{1,1} = 750,45 \text{ Kn}$$

$$FRd \text{ tra\~{c}o\~{a}o por ruptura: } \frac{F_u \times A_e}{\gamma_{a2}} = \frac{40 \times [52 - 3 \times (2,4 + 0,15)] \times 0,635}{1,35} = 775,17 \text{ Kn}$$

$$FRd \text{ cisalhamento por escoamento: } 0,6 \times \frac{F_y \times A_g}{\gamma_{a1}} = 0,6 \times \frac{25 \times 52 \times 0,635}{1,1} = 450,27 \text{ Kn}$$

$$FRd \text{ cisalhamento por ruptura: } 0,6 \times \frac{F_u \times A_{nv}}{\gamma_{a1}} =$$

$$0,6 \times \frac{40 \times [51 - 4 \times (2,4 + 0,15)] \times 0,635}{1,35} = 465,10 \text{ Kn}$$

$$FRd \text{ rasgamento 1: } 0,6 \times \frac{F_u \times A_{nv} + C_{ts} \times F_u \times A_e}{\gamma_{a2}} =$$

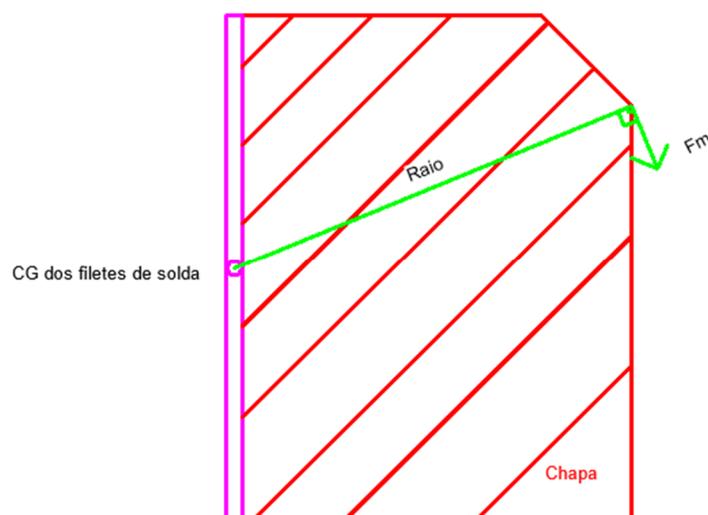
$$0,6 \times \frac{40 \times [51 - 4 \times (2,4 + 0,15)] \times 0,635 + 1 \times 40 \times [52 - 3 \times (2,4 + 0,15)] \times 0,635}{1,35} = 1240,84 \text{ Kn}$$

$$FRd \text{ rasgamento 2: } 0,6 \times \frac{F_y \times A_g + C_{ts} \times F_u \times A_e}{\gamma_{a2}} =$$

$$0,6 \times \frac{25 \times [51 - 4 \times (2,4 + 0,15)] \times 0,635 + 1 \times 40 \times [52 - 3 \times (2,4 + 0,15)] \times 0,635}{1,35} = 1330,73 \text{ Kn}$$

A liga\~{c}\~{a}o de solda entre as chapas foi verificada para carregamento exc\~{e}ntrico em rela\~{c}\~{a}o centro geom\~{e}trico da liga\~{c}\~{a}o parafusada. Foi definido soldas nas duas laterais de encontro de chapa com chapa, considerando dois filetes de 52 cm com $d_w = 0,635$ cm, mesma espessura da chapa. O material utilizado foi o E60 com resist\~{e}ncia conforme Tabela A.4 da NBR 8800 (Associa\~{c}\~{a}o Brasileira de Normas T\~{e}cnicas, 2008).

Figura 15 - Carregamento exc\~{e}ntrico em soldas



Fonte: Elaborada pelo autor (2024).

Na determina\~{c}\~{a}o das for\~{c}as solicitantes considera-se tanto o momento quanto a for\~{c}a

de cisalhamento aplicadas à solda para achar a força solicitante (FS), junção entre F_m e F_v como apresentado na equação:

$$F_{m,x} = \frac{M}{I_p} \times Y_x c$$

$$F_{m,y} = \frac{M}{I_p} \times X_x c$$

$$F_v = \frac{v}{A_s}$$

$$F_s = \sqrt{F_{m,x}^2 + (F_{m,y} + F_v)^2}$$

Os valores dos parâmetros e tensões solicitantes aplicados nas soldas são informados na Tabela 52.

Tabela 52 - Propriedades das soldas

t (cm)	0,635
dw (cm)	0,635
de (cm)	0,890
β	1,000
L (cm)	52,000
Lw (cm)	52,000
A_s (cm ²)	93,395
E60 (Mpa)	415,000
v (kN)	51,600
F_v (kN/cm ²)	0,552
m (kNcm)	3.350,000
I_p (cm ⁴)	23.463,967
x (cm)	55,000
y (cm)	0,000
$F_{m,x}$ (kN/cm ²)	0,000
$F_{m,y}$ (kN/cm ²)	7,852
F_s (kN/cm ²)	8,405

Fs (MPa)	84,050
Amb	33,020

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Além das tensões resistentes da solda devem ser consideradas as tensões resistentes do metal base ao qual foi aplicado a solda. Esses valores são apresentados na tabela 53.

Tabela 53 - Tensões resistentes das solda

Seção efetiva da Solda		
Rd (MPa)	184	escoamento tensões normais
Metal Base		
Rd (Mpa)	227	escoamento tensões normais
Rd (Mpa)	136	escoamento tensões cisalhantes
Rd (Mpa)	178	Ruptura tensões cisalhantes
136	>	84
OK		

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Para o cálculo das ligações parafusadas nas vigas e pilares de madeira repete-se o mesmo processo de determinação das propriedades feito no dimensionamento da ligação laje-viga.

$$F_{e\alpha, k} = \frac{F_{e0, k}}{K_{90} \times \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha}$$

$$F_{e0, k} = 0,082 \times (1 - 0,01d) \times P_k$$

$$K_{90} = 1,35 + 0,015d \text{ para madeiras coníferas}$$

$$d = 24\text{mm (diâmetro do parafuso)}$$

Na situação analisada deve-se considerar os modos de falha F, G e H do item 7.3 da NBR 7190-1 (ABNT, 2022a). Visto que a norma solicita investigação experimental do efeito de confinamento para considerar a contribuição dele no cálculo, não foi adicionado o valor de $\frac{F_{ax, Rk}}{4}$. Como dimensionamento de resistência ao momento envolve diferentes angulações α é diferente para cada parafuso, o pré dimensionamento dos parafusos utilizou $\alpha = 90^\circ$, considerando a menor resistência possível.

Figura 16 - Equações dos modos de falhas analisados

para ligações com chapa de aço central de qualquer espessura, em dupla seção de corte:

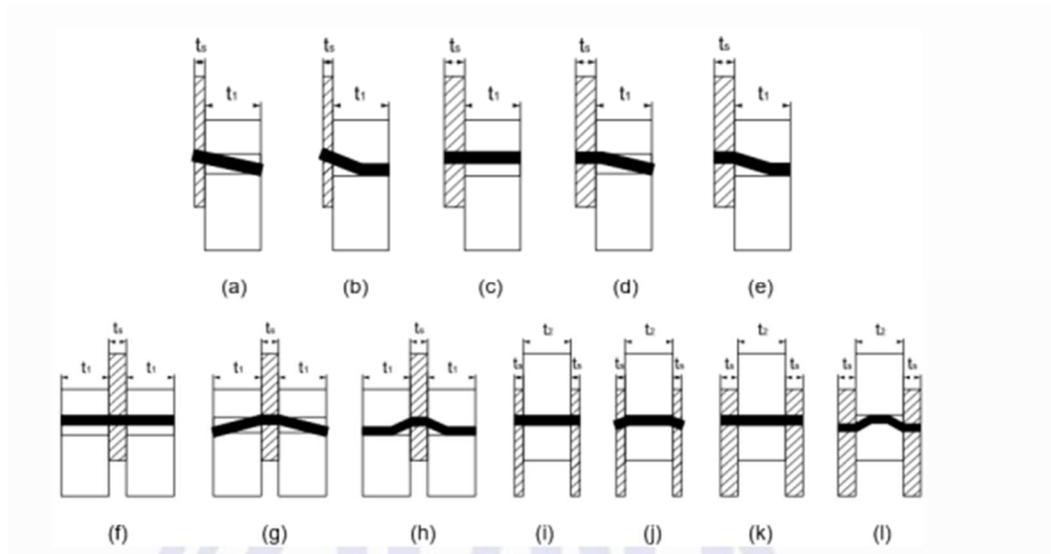
Modo de falha (f) $F_{v,Rk} = f_{e1,k} \cdot t_1 \cdot d$

Modo de falha (g) $F_{v,Rk} = f_{e1,k} \cdot t_1 \cdot d \left[\sqrt{2 + \frac{4 \cdot M_{y,Rk}}{f_{e1,k} \cdot d \cdot t_1^2}} - 1 \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$

Modo de falha (h) $F_{v,Rk} = 2,3 \cdot \left[\sqrt{M_{y,Rk} \cdot f_{e1,k} \cdot d} \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$

Fonte: NBR 7190-1 (2022a)

Figura 17 - Exemplificação dos modos de falhas analisados



Fonte: NBR 7190-1 (2022a).

$$F_{v,RkF} = 39228.800 \quad \text{N}$$

$$F_{v,RkG} = 31590.895 \quad \text{N}$$

$$F_{v,RkH} = 50621.3189 \quad \text{N}$$

Assim, a situação de falha com menor resistência calculada é a F, com falha nas lâminas de madeira. Para continuar a análise, é necessário aplicar os coeficientes de modificação (K_{mod}) e de minoração da resistência ao valor encontrado.

$$FRd = 31,59 \times 0,6 \times 0,8 \times 0,95 = 10,29$$

Para o dimensionamento dos momentos aplicados à ligação parafusada também se faz necessário somar as distâncias dos centros dos parafusos até o centro geométrico do conjunto e achar a média desses raios. Essa determinação foi estimada em 17 centímetros considerando a altura da viga (52 cm) e o espaçamento necessário entre parafusos e bordas ditado pelas tabelas 14 e 15 da NBR 7190-1 (ABNT, 2022a). Os espaçamentos calculados são apresentados na Tabela 54.

Tabela 54 - Espaçamentos entre parafusos e entre parafusos e bordas

a1	168	mm
a2	96	mm
a3t	168	mm
a3c	168	mm
a4t	96	mm
a4c	72	mm

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Com o valor de resistência a falha de cada parafuso pode-se dimensionar o número de parafusos pelas equações:

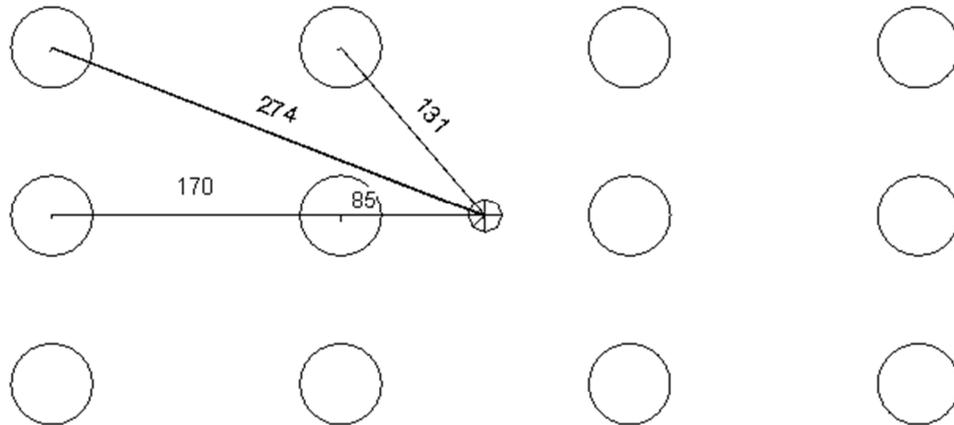
$$N^{\circ} \text{ mín parafusos} = \frac{NSd}{FRd \times n^{\circ} \text{ da planos de corte}} = \frac{14,6}{10,29 \times 2} = 0,71 \text{ Parafusos}$$

$$N^{\circ} \text{ mín parafusos} = \frac{MSd}{FRd \times n^{\circ} \text{ da planos de corte} \times \Delta D} = \frac{3350}{10,29 \times 2 \times 15} = 10,85 \text{ Parafusos}$$

ΔD = distância média do centro dos parafusos até o centro geométrico do conjunto

Adota-se o primeiro número par inteiro maior que o resultado de 10,85, chegando ao valor de 12 parafusos para o dimensionamento.

Figura 18 - Distância entre CG do conjunto e CG dos parafusos



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

$$8,5 \times 2 \times F = 17F$$

$$25,5 \times 2 \times F = 51F$$

$$27,4 \times 4 \times F = 109,6F$$

$$13,1 \times 4 \times F = 52,4F$$

$$230F \times 2 = 3350 \Rightarrow F = 7,28 \text{ Kn} \Rightarrow OK$$

5.5.3 Conexões pilar-pilar

O dimensionamento da ligação parafusada foi feito considerando o carregamento normal de compressão máximo (362,2 kN), seguindo os mesmos critérios apresentados anteriormente para a determinação das propriedades resistentes com a variante da largura do pilar, que tem 25 cm e o ângulo α , que foi considerado com 0° . Os parafusos utilizados e chapa são os mesmos definidos para a conexão pilar-viga.

$$F_{v,RkF} = 83817.16N$$

$$F_{v,RkG} = 47955.31N$$

$$F_{v,RkH} = 66195.96\text{N}$$

$$F_{v,RkG} = 47,96 \times 0,6 \times 0,8 \times 0,95 = 16,44$$

$$N^{\circ} \text{ mín parafusos} = \frac{NSd}{FRd \times n^{\circ} \text{ da planos de corte}} = \frac{362,2}{16,44 \times 2} = 11.01 \text{ Parafusos}$$

Determina-se a aproximação para o maior valor inteiro acima do número mínimo de parafusos na ligação (12 parafusos). Dispondo 6 no pilar inferior e 6 no pilar superior. O posicionamento dos parafusos nos pilares é apresentado na Figura 13 e a distância mínima entre bordas e parafusos é igual à apresentada para vigas na Tabela 54.

6 CONCLUSÃO

Apesar de haver algumas indefinições a respeito de parâmetros de projeto, as normas brasileiras já permitem o dimensionamento de edifícios com elementos de MLCC e MLC. Para uma melhor determinação dos valores e exatidão, se faz necessário mais estudos a respeito do comportamento das peças, principalmente com as madeiras produzidas no Brasil e com as condições climáticas habituais do país.

A utilização da MLC e da MLCC contribui para a construção de edificações mais sustentáveis, reduzindo o consumo de energia e as emissões de gases do efeito estufa. Além disso, pode apresentar vantagens econômicas em determinados casos, devido à redução do tempo de construção e à otimização do uso do material.

O dimensionamento de estruturas em MLC e MLCC exige um conhecimento profundo das características do material, das normas técnicas específicas e dos softwares de cálculo adequados. A heterogeneidade da madeira, as propriedades mecânicas variáveis entre as espécies e a influência das condições ambientais tornam o processo mais complexo em comparação com materiais como o concreto armado.

A utilização de softwares de cálculo especializados em estruturas de madeira e baseados nos conceitos da análise de elementos finitos é essencial para otimizar o dimensionamento e garantir a precisão dos resultados, principalmente considerando o comportamento global das estruturas. Esses softwares permitem simular o comportamento da estrutura sob diferentes carregamentos e verificar o atendimento aos critérios de resistência e deformação.

Com perspectivas para trabalhos futuros sobre a temática, destaca-se a necessidade de estudar o impacto ambiental da MLCC e MLC em todo o seu ciclo de vida, desde a produção até a destinação final, assim como o comportamento das suas propriedades resistentes durante o tempo. Ainda, é necessário considerar aspectos técnicos, econômicos e ambientais, investigando o desenvolvimento de novas tecnologias e soluções construtivas como novos métodos de conexões para otimizar o uso da MLC.

Para mais, estudos de caso com edificações construídas com MLC e MLCC são relevantes para avaliar o desempenho e a durabilidade das estruturas em condições reais de uso. Por fim, também será fundamental analisar outros pontos específicos, como a contribuição do enclausuramento da escada em concreto armado para a rigidez global do edifício e a resistência das ligações de aço embutidas nas peças de madeira.

Conclui-se, portanto, que com o avanço das pesquisas e o desenvolvimento de novas tecnologias, a MLC e MLCC tem um futuro promissor na construção civil, oferecendo diversas possibilidades para a criação de edificações inovadoras, sustentáveis e de rápida construção.

REFERÊNCIAS

- AICHER, S.; DILL-LANGER, G. Basic considerations to rollings shear modulus in wooden boards. **Otto Graf Journal**, [S.I.], v.11, jan. 2000. Disponível em: https://www.mpa.uni-stuttgart.de/institut/publikationen/otto-graf-journal/new_downloadgallery/2000/2000_beitrag_aicher_dill_langer-2.pdf. Acesso em: 8 ago. 2024.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6120**: Ações para o cálculo de estruturas de edificações. ABNT: Rio de Janeiro, 2019
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6123**: Forças devidas ao vento em edificações. ABNT: Rio de Janeiro, 2022
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7190-1**: Projeto de estruturas de madeira. Parte 1: Critérios de dimensionamento. ABNT: Rio de Janeiro, 2022
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7190-7**: Projeto de estruturas de madeira. Parte 7: métodos de ensaio para caracterização de madeira lamelada colada cruzada estrutural. ABNT: Rio de Janeiro, 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8681**: Ações e segurança nas estruturas – Procedimento. ABNT: Rio de Janeiro, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8800**: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. ABNT: Rio de Janeiro, 2008.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12721**: Avaliação de custos unitários de construção para incorporação imobiliária e outras disposições para condomínios edifícios - Procedimento. ABNT: Rio de Janeiro, 2021.
- KARACABEYLI, E.; GAGNON, S. **Canadian CLT**. 2.ed. [S.I.]: FPInnovations, 2019.
- OBSERVA POA. **Bairro Cel. Aparício Borges**. Porto Alegre, 2010. Disponível em: http://portoalegremanalise.procempa.com.br/?regiao=88_. Acesso em: 9 ago. 2024.
- PEREIRA, M. C. M.; CALIL J. C. Strength and Stiffness of Cross Laminated Timber (CLT) panels produced with Pinus and Eucalyptus: experimental and analytical comparisons. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v.24, n.4, p.1-14, abr. 2019. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rmat/a/kd3M9TtSnHMbXM4qbQsykQD/?format=pdf>. Acesso em: 8 ago. 2024.
- RIO GRANDE DO SUL. Secretaria da Agricultura, Pecuária e Agronegócio. **Atlas climático**. Porto Alegre, 2020. Disponível em: <https://www.agricultura.rs.gov.br/upload/arquivos/202005/13110034-atlas-climatico-rs.pdf>. Acesso em: 9 ago. 2024.
- SÃO PAULO. Secretária da Segurança Pública. **Instrução técnica nº 08/2019**. Disponível em: <https://bombeiros.com.br/instrucao-tecnica-no-08-2019-seguranca-estrutural-contra->

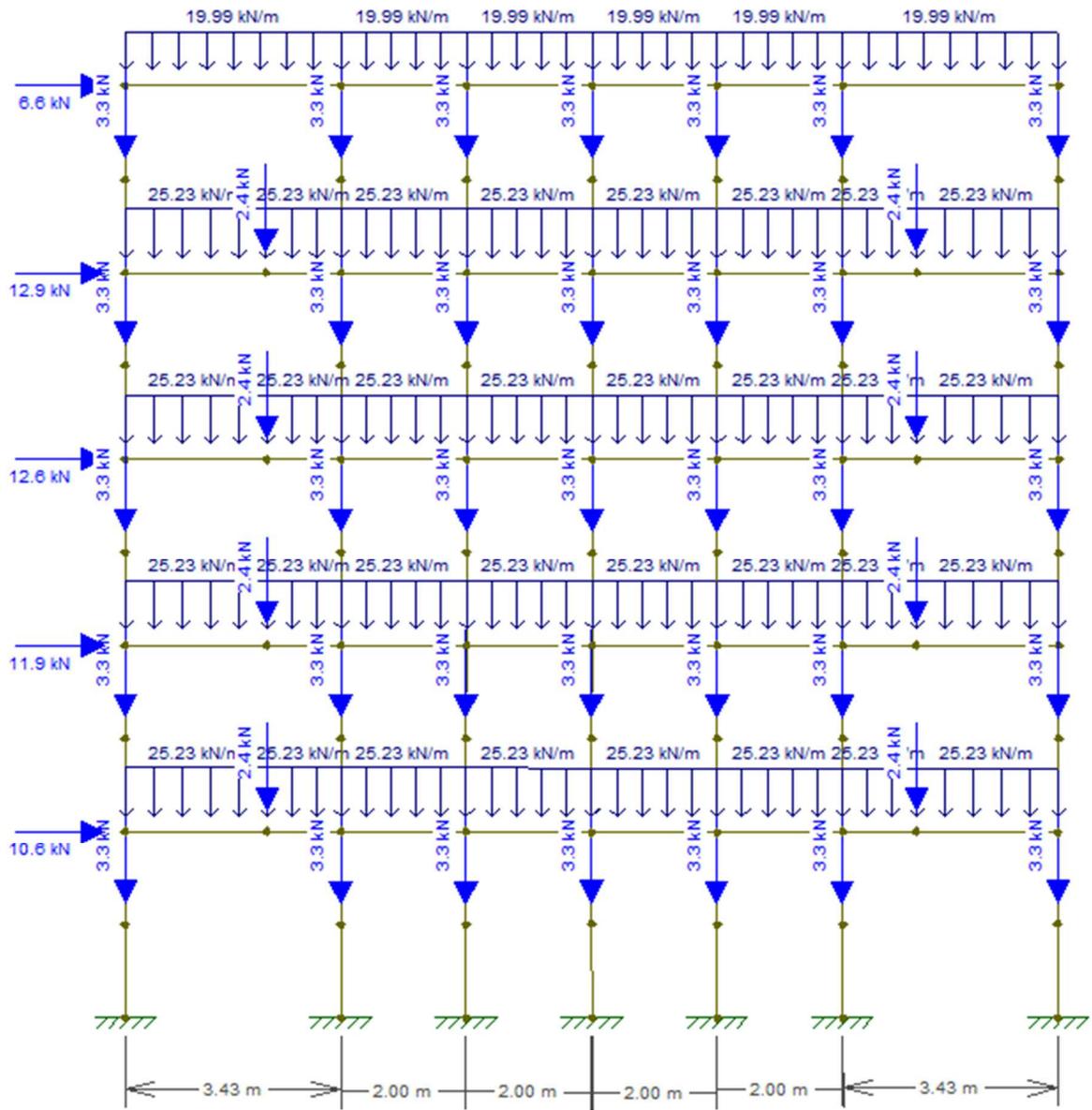
incendio/#. Acesso em: 9 ago. 2024.

TORNEPORT, M. **Industrial Requirements for Cross-Laminated Timber Manufacturing**. 2021. Disponível em: <https://lnu.diva-portal.org/smash/get/diva2:1567861/FULLTEXT01.pdf>. Acesso em: 9 ago. 2024.

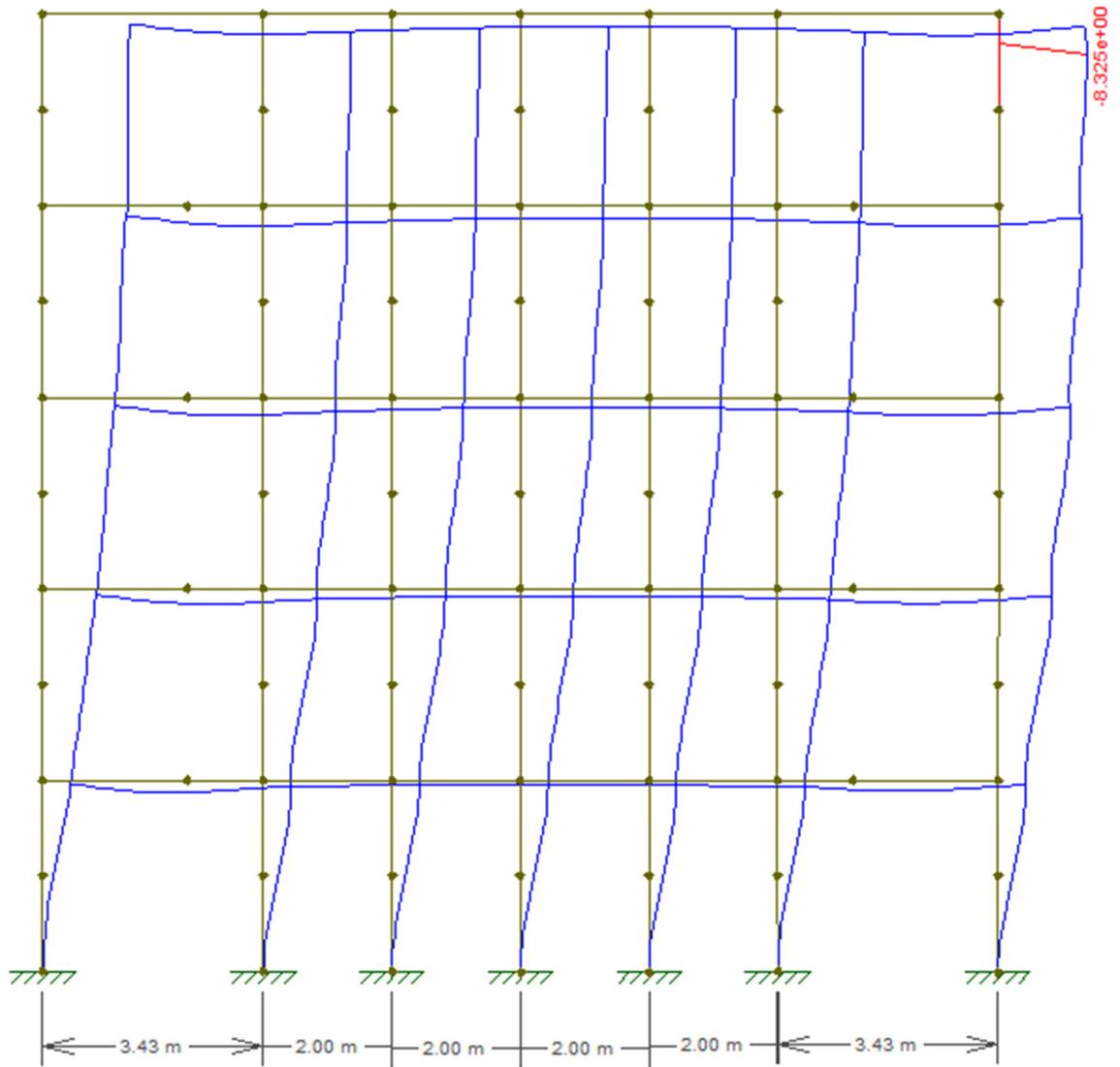
URBEM. **Calcula timber MLC_Vigas**. São Paulo, 2024. Disponível em: <https://biblioteca.urbembr.com/primeira-calculadora-de-lajes-de-clt>. Acesso em: 9 ago. 2024.

WETTERHOLT, J. **Modelling cross-laminated timber floors in dynamic analysis**. Dissertation. University Lund, Sweden, 2019. Disponível em: <https://lup.lub.lu.se/luur/download?func=downloadFile&recordId=8991653&fileId=8991674>. Acesso em: 9 ago. 2024.

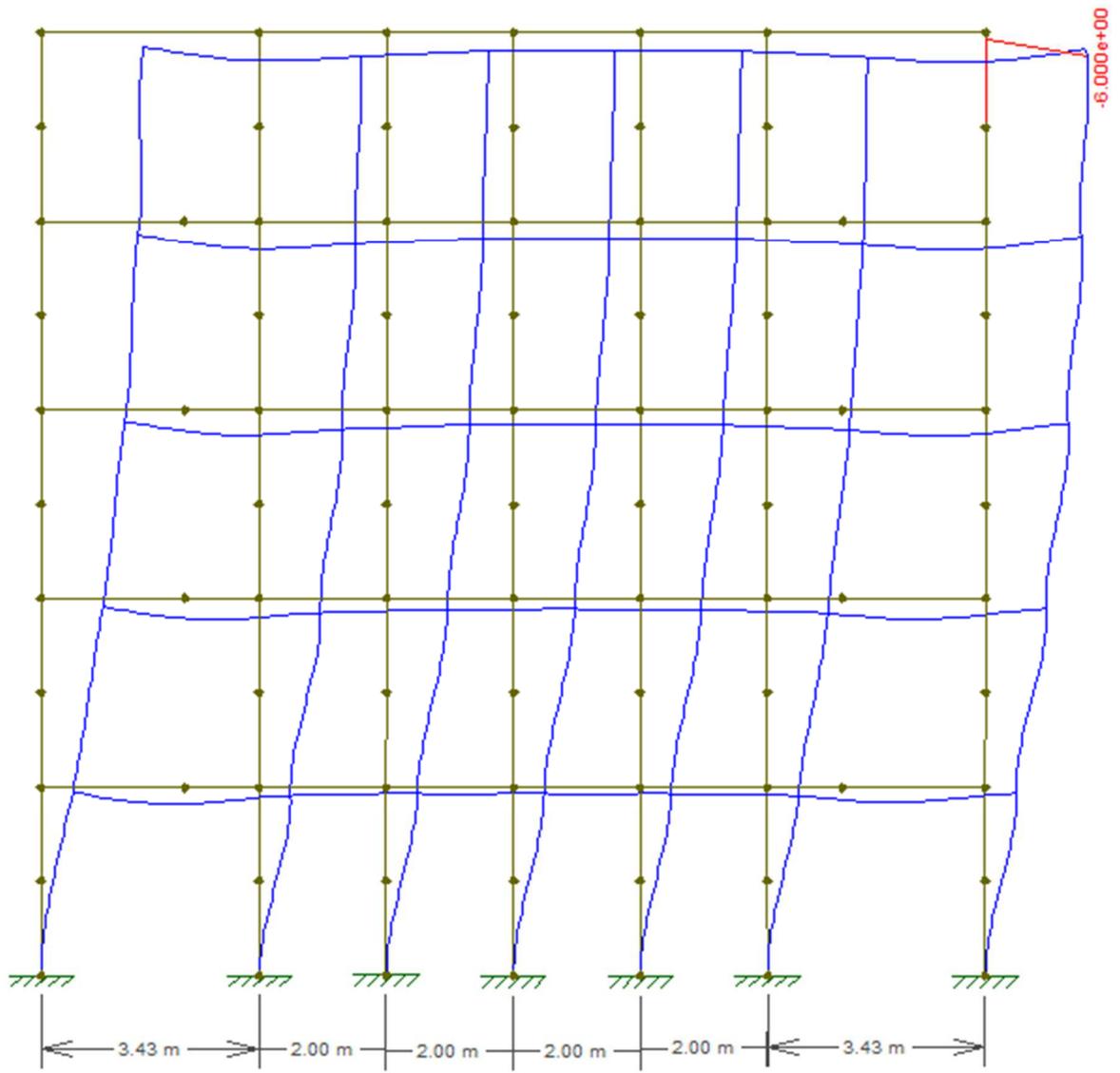
APÊNDICE A - COMBINAÇÃO 3 ELS FINAL CARGAS X



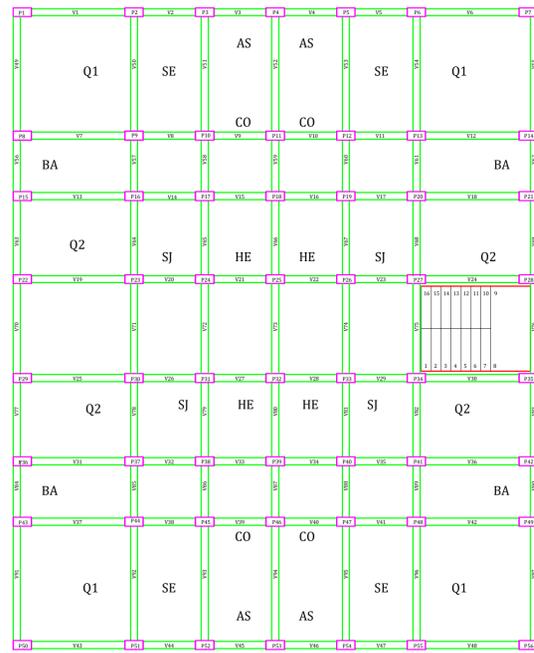
APÊNDICE B - COMBINAÇÃO 3 ELS FINAL X FLECHA LIMITANTE DO PILAR



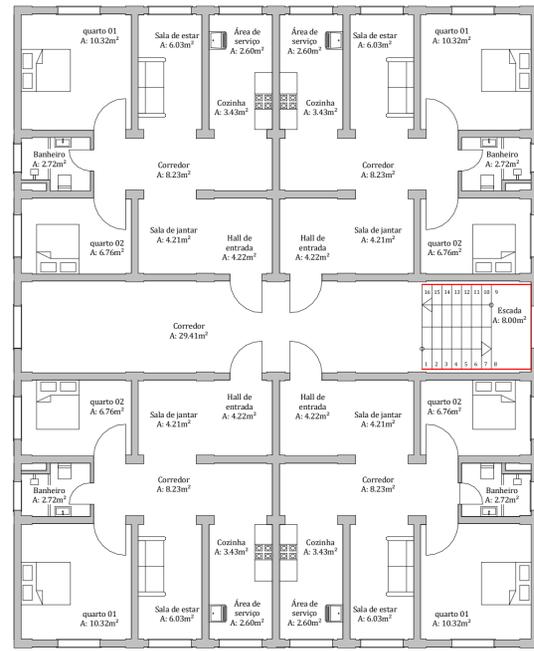
**APÊNDICE C - COMBINAÇÃO 3 ELS FINAL X FLECHA LIMITANTE DO PILAR
REDIMENSIONADO**



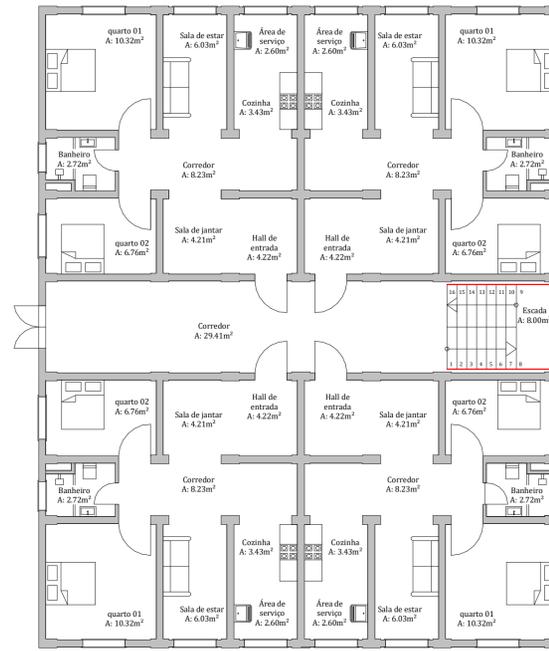
**APÊNDICE D – PLANTA BAIXA DO PAVIMENTO TIPO, ISOMÉTRICO DA
CONEXÃO VIGA-PILAR E SEÇÕES DAS VIGAS E PILARES**



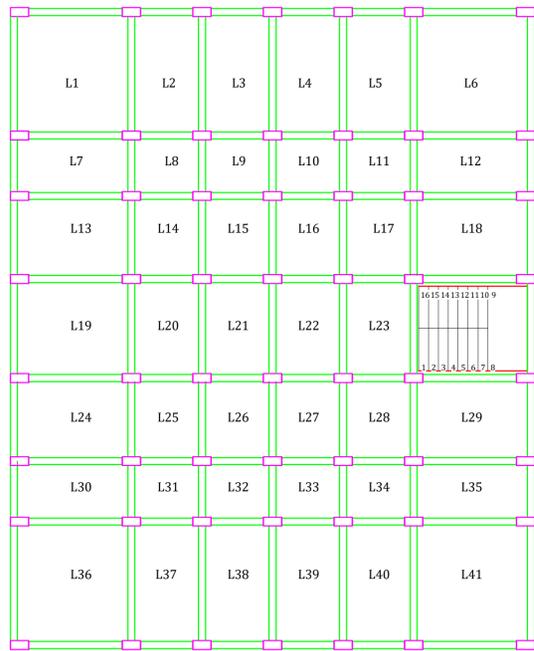
1 Identificação vigas e pilares
1 : 100



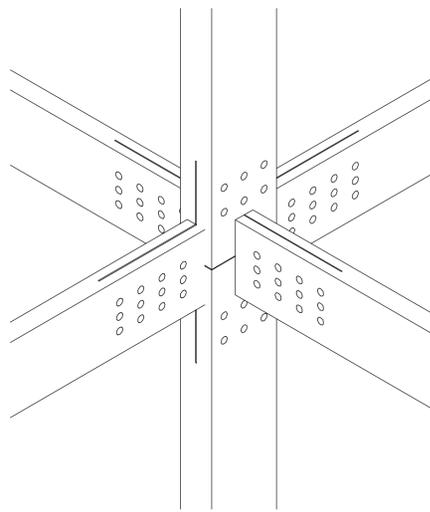
2 Planta arquitetônica Pav. Tipo
1 : 100



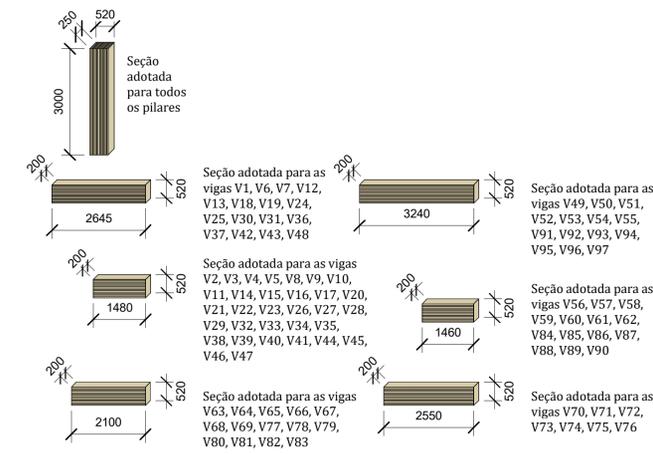
3 Planta arquitetônica Térreo
1 : 100



4 Identificação lajes
1 : 100



5 Isométrico ligação pilar-viga
1:20



6 Seções das vigas e pilares
1 : 100

LEGENDAS

- CO - COZINHA
- SJ - SALA DE JANTAR
- SE - SALA DE ESTAR
- Q1 - QUARTO 1
- Q2 - QUARTO 2
- BA - BANHEIRO
- HE - HALL DE ENTRADA

Plantas baixas
Isométrico da ligação pilar-viga
Seções das vigas e pilares

Responsável:
Eduardo Reis

Data
Agosto/2024

Escala
como indicado