



*Universidade Federal da Paraíba*

*Centro de Tecnologia*

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E**

**AMBIENTAL**

**– MESTRADO –**

**PROJETO PARAMÉTRICO ESTRUTURAL OTIMIZADO DE  
PÓRTICOS DE EDIFÍCIOS EM MADEIRA ENGENHEIRADA**

*Por*

***Marcos Vinícius Barbosa Costa de Souza***

*Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade Federal da Paraíba para  
obtenção do grau de Mestre*

**João Pessoa - Paraíba**

**Fevereiro de 2025**



*Universidade Federal da Paraíba*

*Centro de Tecnologia*

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E  
AMBIENTAL  
– MESTRADO–**

**PROJETO PARAMÉTRICO ESTRUTURAL OTIMIZADO DE  
PÓRTICOS DE EDIFÍCIOS EM MADEIRA ENGENHEIRADA**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal da Paraíba, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre.

**Marcos Vinícius Barbosa Costa de Souza**

**Orientador: Prof. Dr. Felipe Tavares da Silva**

**João Pessoa - Paraíba**

**Fevereiro de 2025**



## **PROJETO PARAMÉTRICO ESTRUTURAL OTIMIZADO DE PÓRTICOS DE EDIFÍCIOS EM MADEIRA ENGENHEIRADA**


**MARCOS VINICIUS BARBOSA COSTA DE SOUZA**

**Dissertação aprovada em 25 de fevereiro de 2025**


**Período Letivo: 2024.2**

Documento assinado digitalmente  
 **FELIPE TAVARES DA SILVA**  
Data: 18/03/2025 12:05:19-0300  
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

**Prof(a). Dr(a). Felipe Tavares da Silva – UFPB**  
**Orientador(a)**

Documento assinado digitalmente  
 **ROBERTO LEAL PIMENTEL**  
Data: 18/03/2025 10:25:40-0300  
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

**Prof(a). Dr(a). Roberto Leal Pimentel – UFPB**  
**Examinador(a) Interno(a)**

Documento assinado digitalmente  
 **EDNA MOURA PINTO**  
Data: 13/03/2025 11:40:22-0300  
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

**Prof(a). Dr(a). Edna Moura Pinto – UFRN**  
**Examinador(a) Externo(a)**

**Catálogo na publicação**  
**Seção de Catalogação e Classificação**

S729p Souza, Marcos Vinícius Barbosa Costa de.  
Projeto paramétrico estrutural otimizado de pórticos  
de edifícios em madeira engenheirada / Marcos Vinícius  
Barbosa Costa de Souza. - João Pessoa, 2025.  
123 f. : il.

Orientação: Felipe Tavares da Silva.  
Dissertação (Mestrado) - UFPB/CT.

1. Estruturas em madeira. 2. Madeira engenheirada.  
3. Modelagem paramétrica - estruturas. 4. Espaços de  
soluções. I. Silva, Felipe Tavares da. II. Título.

UFPB/BC

CDU 624.011.1(043)

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao Deus Uno e Trino por ter me sustentado até aqui. Agradeço também a Virgem Maria por ter me consolado em tantos momentos.

Aos meus familiares, sobretudo, à minha amada mãe. Agradeço a minha namorada por todo o incentivo. Aos amigos e colegas que fiz durante o curso.

Ao professor Felipe Tavares por tamanha benevolência e dedicação ao me orientar neste trabalho. Agradeço aos professores Roberto Pimentel e Edna Moura pelas importantes contribuições à pesquisa.

Agradeço ao CNPQ, ao PPGECAm e a UFPB por proporcionar os meios para o desenvolvimento do estudo aqui descrito.

## SUMÁRIO

<b>RESUMO.....</b>	<b>1</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>2</b>
<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>3</b>
<b>2. OBJETIVOS.....</b>	<b>5</b>
<b>3. REFERENCIAL TEÓRICO.....</b>	<b>5</b>
3.1. MODELAGEM PARAMÉTRICA.....	5
3.2. OTIMIZAÇÃO.....	6
3.2.1. Otimização com algoritmo genético.....	7
3.3. ESPAÇOS DE SOLUÇÕES DE PROJETO.....	9
3.4. PRODUTOS DE MADEIRA ENGENHEIRADA.....	11
3.4.1. Madeira Lamelada Colada.....	12
3.4.2. Madeira Lamelada Colada Cruzada.....	15
<b>4. MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>16</b>
4.1. DESCRIÇÃO DO ESTUDO DE CASO.....	16
4.2. VARIÁVEIS DE PROJETO PARA A CONSTRUÇÃO DOS ESPAÇOS SOLUÇÕES	17
4.3. VERIFICAÇÃO DA ACEITABILIDADE ESTRUTURAL.....	20
4.3.1. Verificação utilizando como base o Eurocode 5.....	21
<b>4.3.1.1. Verificação do estado limite último (ELU).....</b>	<b>21</b>
<b>4.3.1.2. Verificação do estado limite de serviço (ELS).....</b>	<b>26</b>
4.3.2. Verificação utilizando como base a NBR 7190.....	30
<b>4.3.2.1. Verificação do estado limite último (ELU).....</b>	<b>30</b>
<b>4.3.2.2. Verificação do estado limite de serviço (ELS).....</b>	<b>32</b>
4.3.3. Fenômeno da fluência no dimensionamento estrutural.....	33
4.4. DESENVOLVIMENTO DO ALGORITMO.....	35
4.5. MODELO PARAMÉTRICO ESTRUTURAL.....	36
4.6. MODELAGEM EM ELEMENTOS FINITOS NO KARAMBA3D.....	39

4.6.1. Descrição das seções transversais e materiais constituintes dos elementos estruturais.....	44
4.7. VERIFICAÇÃO DOS ESTADOS LIMITES INTEGRADA AO MODELO PARAMÉTRICO.....	46
4.8. CONSTRUÇÃO DOS ESPAÇOS DE SOLUÇÕES.....	48
<b>5. RESULTADOS E ANÁLISE.....</b>	<b>52</b>
5.1. TAXA DE CONSUMO.....	52
5.1.1. Taxa de consumo relacionado ao vão da laje e variando o tipo de MLCC.....	54
5.1.2. Taxa de consumo relacionado ao vão e variando o tipo de viga.....	55
5.1.3. Taxa de consumo relacionada aos pilares.....	57
5.1.4. Taxa de consumo relacionada ao centro de contraventamento.....	58
5.2. FATORES DE PROJETO (DF).....	59
5.2.1. DF das lajes.....	63
5.2.2. DF das vigas secundárias.....	65
5.2.3. DF das vigas principais.....	67
5.2.4. DF dos pilares.....	69
5.2.5. Fator de projeto relacionado ao centro de contraventamento.....	74
5.2.6. Fator de projeto relacionado à ação do vento.....	75
<b>5.2.6.1. Fator de projeto relacionado à ação do vento e às lajes.....</b>	<b>76</b>
<b>5.2.6.2. Fator de projeto relacionado à ação do vento e às vigas secundárias</b>	<b>77</b>
<b>5.2.6.3. Fator de projeto relacionado à ação do vento e aos pilares.....</b>	<b>79</b>
<b>5.2.6.4. Fator de projeto relacionado à ação do vento e ao centro de contraventamento.....</b>	<b>81</b>
5.3. FREQUÊNCIAS NATURAIS DAS LAJES.....	82
5.3.1. Frequência natural das lajes relacionada às vigas de apoio.....	83
5.3.2. Frequência natural das lajes relacionada às classes de MLCC.....	85
5.3.3. Frequência natural das lajes relacionada às espessuras das lajes.....	87
5.3.4. Frequência natural das lajes relacionada ao módulo de elasticidade.....	89
<b>6. CONCLUSÕES.....</b>	<b>91</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>93</b>

<b>APÊNDICE A - FATORES MODIFICADORES E EXPRESSÕES PARA OBTENÇÃO DE PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS PRESENTES NO EUROCODE 5.....</b>	<b>98</b>
A.1 - PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS.....	98
A.2 - FATORES MODIFICADORES.....	100
<b>APÊNDICE B - FATORES MODIFICADORES PRESENTES NA NBR 7190.....</b>	<b>105</b>
<b>APÊNDICE C - CLASSES DE PAINÉIS EM MLCC APLICADAS AO ALGORITMO...</b>	<b>107</b>
<b>APÊNDICE D - VARIÁVEIS DE PROJETO.....</b>	<b>110</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: A - Representação Cromossômica de um sistema: A - formado por 7 genes; B - Cruzamento entre dois cromossomos de tamanho 8 com o ponto de crossover = 5; Mutação aplicada ao 6º gene de um cromossomo de tamanho 8.....	8
Figura 2: Fluxograma de um algoritmo genético simples.....	9
Figura 3: Espaço de solução e caixa de solução ilustrados em 2D ( a ) e 3D ( b ). A caixa marcada em verde em ( b ) representa uma região delimitada de alto desempenho.....	10
Figura 4 - Alguns produtos de madeira engenheirada: MLCC (a); MLC (b); NLT (c); DLT (d). 11	11
Figura 5 - Processo de colagem das lâminas de um elemento de MLC.....	12
Figura 6: Exemplo de um elemento de madeira laminada colada homogênea e combinada....	13
Figura 7 - Flexão aplicada nas direções de resistência CLT maior (esquerda) e menor (direita). 15	15
Figura 8: Distribuição de projetos em madeira engenheirada na América do Norte conforme o WoodWorks Innovation Networks.....	17
Figura 9: Variáveis geométricas do sistema estrutural.....	20
Figura 10: Situações de projeto nas quais a verificação da tensão de cisalhamento por rolamento é relevante.....	24
Figura 11 - Comparação entre fatores modificadores de deflexões do Eurocode e da NBR 7190.....	34
Figura 12: Esquema que representa a otimização abordada no estudo.....	35
Figura 15: Visualização do modelo tridimensional paramétrico.....	36
Figura 13 - Painel de controle das variáveis de entrada no ambiente Grasshopper.....	37
Figura 14 - Bloco de componentes da geração geométrica do modelo.....	38
Figura 17 - Bloco de componentes dos apoios do sistema estrutural.....	41
Figura 18 - Bloco de componentes das ações incidentes no sistema estrutural.....	42
Figura 19 - Bloco de componentes das rótulas do sistema estrutural.....	43
Figura 20: Visualização do modelo em MEF do sistema estrutural abordado no item 4.5.....	44
Figura 21: Exemplos de pilares de MLC.....	45

Figura 22: Trecho do código da verificação dos estados limites dos pilares do sistema estrutural abordado no item 4.5.....	47
Figura 23: Trecho do código dos estados limites dos painéis de laje do sistema estrutural abordado no item 4.5.....	47
Figura 24 - Exemplos de elementos com concentração de tensões de cisalhamento apontados pelas setas em azul.....	49
Figura 25 - Exemplos de corte (seta vermelha) no painel de MLCC de uma laje sendo içada para encaixe em um pilar (seta verde).....	49
Figura 26 - Frequência da variável número de replicações das unidades básicas no eixo x na primeira (esquerda) e na última busca (direita) do espaço de soluções.....	51
Figura 27 - Bordos ótimos de agrupamentos fictícios.....	53
Figura 28: Vão da laje x taxa de consumo categorizado por espessuras de MLCC.....	54
Figura 29: Vão da laje x taxa de consumo categorizado pelas classes de resistência de MLC das vigas secundárias (A) e Vão principal x taxa de consumo categorizado pelas classes de resistência de MLC das vigas principais (B).....	56
Figura 30: Número de pavimentos x taxa de consumo categorizado pelas classes de resistência de MLC dos pilares.....	58
Figura 31: Número de pavimentos x taxa de consumo categorizado por proporções de abertura do centro de contraventamento.....	59
Figura 32 - Bordos superiores de agrupamentos fictícios.....	60
Figura 33: Número de pavimentos x Taxa de consumo (%) (A) e Vão principal x Taxa de consumo (%) (B) relacionada a todos elementos estruturais e categorizada pelos tipo de fator de projeto.....	62
Figura 34: Vão principal x Valor máximo de DF (%) (A) e Vão da laje x Valor máximo de DF (%) (B) relacionado às lajes categorizado pelos tipo de fator de projeto.....	64
Figura 35: Vão da laje x Valor máximo de DF (%) categorizado pela classe de resistência de MLC das vigas secundárias.....	66
Figura 36: Vão principal x Valor máximo de DF (%) relacionado às vigas principais categorizado pelos tipo de fator de projeto.....	68
Figura 37: Vão principal x Valor máximo de DF (%) categorizado pela classe de resistência de MLC das vigas principais.....	69

Figura 38: Número de pavimentos x Valor máximo de DF (%) relacionado aos pilares categorizado pelos tipo de fator de projeto.....	71
Figura 39: Número de pavimentos x Valor máximo de DF (%) categorizado pelo número de camadas de MLC na seção do pilar.....	72
Figura 40: Número de pavimentos x DF relacionado ao deslocamento de topo (%) categorizado pela altura da seção de pilares em (A) e pelo número de camadas de MLC na seção do pilar em (B).....	73
Figura 41: Número de pavimentos x DF relacionado ao deslocamento de topo (%) categorizado por proporções de abertura do centro de contraventamento.....	75
Figura 42: Vão de laje x Valor máximo de DF (%) relacionado às lajes e ação do vento categorizado por espessura do painel de MLCC.....	77
Figura 43: Vão da laje x Valor máximo de DF (%) relacionado às lajes e ação do vento categorizado pela altura da seção transversal das vigas secundárias.....	78
Figura 44: Número de pavimentos x Valor máximo de DF (%) relacionado às lajes e à ação do vento categorizados pela altura da seção transversal das vigas secundárias.....	79
Figura 45: Número de pavimentos x valor máximo de DF relacionado a ação do vento (%) categorizado pela altura da seção de pilares em (A) e pelo número de camadas de MLC na seção do pilar em (B).....	80
Figura 46: Número de pavimentos x Valor máximo de DF (%) relacionado às lajes e ação do vento categorizado por proporções de abertura do centro de contraventamento.....	82
Figura 47: Vão da laje x Frequência natural (A) e Vão principal x Frequência natural (B) categorizado pela altura da seção das vigas principais.....	84
Figura 48: Vão da laje x Frequência natural (A) e Vão principal x Frequência natural (B) categorizado pelas classes de resistência dos painéis de MLCC.....	86
Figura 49: Vão da laje x Frequência natural (A) e Vão principal x Frequência natural (B) categorizado pelas espessuras dos painéis de MLCC.....	88
Figura 50: Vão da laje x Frequência natural (A) e Vão principal x Frequência natural (B) categorizado módulo de elasticidade do painel de MLCC.....	90
Figura 51: Viga em seus apoios.....	103

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classes de resistência de MLC.....	14
Tabela 2 - Descrição dos principais dados geométricos de edifícios de madeira engenheirada na base de dados consultada.....	18
Tabela 3 - Descrição dos principais dados geométricos de edifícios de madeira engenheirada considerados nesta pesquisa.....	19
Tabela 4 - Limites admissíveis para os deslocamentos de lajes em MLCC.....	26
Tabela 5 - Valores de M.....	31
Tabela 6 - Dimensões das seções de elementos de MLC previstas em APA (2016).....	46
Tabela 7 - Quantidade de instâncias após aplicação de filtros no banco de dados.....	52
Tabela 8 - Classificação dos valores máximos de DF de cada instância.....	60
Tabela 9 - Distribuição de instâncias por categorias de valores de DF relacionados às lajes...	63
Tabela 10 - Distribuição de instâncias por categorias de valores de DF relacionados às vigas secundárias.....	65
Tabela 11 - Distribuição de instâncias por categorias de valores de DF relacionados às vigas principais.....	67
Tabela 12 - Distribuição de instâncias por categorias de valores de DF relacionados aos pilares.....	70
Tabela 13 - Quantidade de instâncias e as respectivas categorias de DFs relacionados à ação do vento.....	76
Tabela 14 - Valores de $le_{fl}$ .....	100
Tabela 15 - Valores de $k_{mod}$ .....	100
Tabela 16 - Valores de $k_h$ e $k_l$ .....	101
Tabela 17 - Valores do fator redutor.....	104
Tabela 18 - Valores do fator redutor.....	104
Tabela 19 - Valores de $k_{mod.1}$ .....	105
Tabela 20 - Valores de $k_{mod.2}$ .....	106
Tabela 21 - Valores de $w$ .....	106
Tabela 22 - Descrição das propriedades mecânicas das classes de MLCC.....	107

Tabela 23 - Descrição qualitativa das classes de MLCC.....	108
Tabela 24 - Descrição das variáveis de entrada.....	110
Tabela 25 - Descrição das variáveis de saída.....	111

.

## RESUMO

O uso da madeira engenheirada em sistemas estruturais vem ganhando bastante relevância. Não diferente de outros partidos estruturais, tornou-se fundamental adotar técnicas projetuais que permitam explorar melhor as capacidades do sistema antes de desenvolver os projetos. Para tal, é vantajoso saber quais as configurações de melhor desempenho do sistema estrutural relacionadas às variáveis de projeto. Tais configurações do sistema estrutural podem ser obtidas através da abordagem em espaços de soluções de projeto e em modelagem paramétrica. Deste modo, o objetivo desta pesquisa é a construção de espaços de soluções de projeto de sistemas estruturais de pórticos em madeira engenheirada para edifícios. As variáveis de projeto consideradas foram: número de pavimentos, pé-direito, altura total, comprimento e largura do edifício, classes de resistência da madeira engenheirada e dimensões das seções transversais. Os pilares e as vigas são constituídos por madeira lamelada colada (MLC), enquanto que as lajes por madeira lamelada colada cruzada (MLCC). A construção dos espaços de soluções foi realizada a partir de um algoritmo genético integrado junto ao modelo paramétrico. As análises dos resultados indicaram que a taxa de consumo de material está relacionada às classes de resistência de MLC e MLCC e à estabilidade oferecida pelo centro de contraventamento. Além disso, verificou-se que as vigas principais, aquelas responsáveis por transferir os esforços das lajes aos pilares, possuem sua aceitabilidade estrutural governada principalmente pelo cisalhamento. Outra observação é que, a partir do décimo primeiro pavimento, fatores relacionados à estabilidade global do sistema estrutural passam a ser bastante relevantes. Comprovou-se também que as frequências naturais das lajes dos pavimentos são muito afetadas pela espessura, módulo de elasticidade, vãos e elementos de apoios dos painéis de MLCC.

**Palavras-chave:** Estruturas em madeira engenheirada. Modelagem paramétrica de estruturas. Espaços de soluções.

## ABSTRACT

The use of engineered wood in structural systems has been gaining significant relevance. Similar to other structural approaches, it has become essential to adopt design techniques that allow for better exploration of the system's capabilities before developing the projects. To this end, it is advantageous to identify the optimal configurations of the structural system in relation to design variables. Such configurations can be obtained through the design solution space approach and parametric modeling. Thus, the objective of this research is to construct design solution spaces for engineered wood frame structural systems for buildings. The considered design variables include the number of floors, floor-to-ceiling height, total height, building length and width, engineered wood strength classes, and cross-sectional dimensions. The columns and beams are made of glued laminated timber (Gulam), while the slabs are made of cross-laminated timber (CLT). The construction of the solution spaces was carried out using a genetic algorithm integrated with the parametric model. The analysis of the results indicated that the material consumption rate is related to the strength classes of Glulam and CLT and the stability provided by the bracing center. Furthermore, it was observed that the main beams, which are responsible for transferring the loads from the slabs to the columns, have their structural acceptability primarily governed by shear. Another observation is that, from the eleventh floor onward, factors related to the overall stability of the structural system become highly relevant. It was also proven that the natural frequencies of the floor slabs are significantly affected by thickness, modulus of elasticity, spans, and support elements of the CLT panels.

**Palavras-chave:** Timber Structures. Parametric modeling of structures. Solution spaces.

## 1. INTRODUÇÃO

A utilização da madeira na construção civil vem crescendo de modo acentuado nos últimos anos, principalmente em virtude do surgimento de novos processos industriais que permitem uma aplicabilidade maior deste tipo de material. Esses produtos desenvolvidos com novos processos de industrialização são conhecidos pelo termo de madeira engenheirada, em inglês, pela sigla EWP (Engineered wood products) (SHIGUE, 2019).

Dentre os mais empregados produtos de madeira engenheirada tem-se: a madeira lamelada colada (MLC ou, do inglês, *Glued Laminated Timber - Glulam*), madeira lamelada colada cruzada (MLCC ou CLT, *Cross Laminated Timber*), painel de tiras de madeira orientadas (do inglês, *Oriented Strand Board, OSB*), madeira micro lamelada-colada (LVL, *Laminated Veneer Lumber*) e as múltiplas variedades de madeira compensada.

Quanto à aplicação estrutural, a madeira engenheirada acabou por contribuir no desenvolvimento de novas soluções. Isto é explicado pelo fato dessas soluções amenizarem a questão da anisotropia típica da madeira, além de possibilitarem a concepção de seções maiores, simples ou compostas, e estruturas com formas diversas, como por exemplo, vigas arqueadas com grandes vãos. Dessa forma, a madeira engenheirada acaba tornando-se uma alternativa estrutural para emprego em edificações multipavimentos e outras tipologias.

Outro aspecto importante da madeira engenheirada que a posiciona como alternativa para edificações de grande porte é a conscientização quanto ao impacto ambiental (OLIVEIRA, 2023). Apesar de não ser o único fator determinante, o perfil ambientalmente amigável da madeira engenheirada, quando comparada a materiais convencionais, tais como o concreto armado e aço, ainda é um aspecto relevante para muitos projetos que buscam reduzir seu impacto ambiental.

Além disso, a ágil montagem e construção oferecida pelo processo de pré-fabricação de peças de madeira engenheirada é um aspecto de muita valia para a construção de edificações modulares seriadas. Quando comparada ao concreto armado moldado in-loco, a alvenaria e ao aço, por exemplo, o emprego da madeira engenheirada, por ser mais leve e mais fácil de manipular, resulta em tempos de construção mais breves e menores custos quando aplicada em obras industriais, comerciais e residenciais (APA, 2020).

Aliado a essa série de benefícios inerentes a edificações com estruturas de madeira engenheirada, ao ser empregada uma modelagem paramétrica é conferida grande eficiência ao processo de concepção. A modelagem paramétrica permite uma abordagem flexível e eficiente para projetos multipavimentos, possibilitando a exploração iterativa de diferentes

opções de projeto e a automação de tarefas repetitivas (LEONE, 2017). Essa técnica possibilita uma otimização célere do desempenho do edifício ao integrar análises estruturais, energéticas e de conforto diretamente no modelo, resultando em projetos mais eficientes e sustentáveis desde as fases iniciais.

Outra ferramenta que possibilita uma abordagem ainda mais eficiente quando aplicada a projetos de sistemas estruturais é a exploração de espaços de soluções de projeto. Segundo Stumpf et al. (2022), o conceito de espaços de soluções consiste em uma abordagem *top-down* baseada em conjuntos, que objetiva integrar requisitos de diferentes disciplinas em um nível de sistema e gerar “caixas” (do inglês, *box*) de soluções multidimensionais que podem ser representadas por um intervalo permissível para cada variável de projeto no nível do componente. Com isso, é possível definir faixas de valores de uma determinada variável de projeto, tal como, tamanho de vão, dimensão da edificação, dados de seções geométricas, altura total, dentre outras, que se relacionam com uma outra dessas variáveis, de modo a ter desempenho mais eficiente quanto a um determinado critério, podendo ser a aceitabilidade estrutural, por exemplo.

Neste sentido, uma proposta de modelo de projeto aplicada a sistemas estruturais em concreto armado foi proposta por Silva (2018) através de modelagem paramétrica a fim de se obter as espaços de soluções cujas variáveis de projeto estudadas foram os valores de dados geométricos dos elementos estruturais, classes de resistência de concreto, modulação e tamanho dos vãos, ações, número de pavimentos requeridos pelo projetista. O processo de buscas dos pontos que constituíram essas faixas de valores foi realizado através de algoritmo genético.

Em vista disso, no contexto de sistemas estruturais de madeira engenheirada, é extremamente útil oferecer ao projetista a possibilidade de ter acesso às configurações mais eficientes de uma edificação. Isto posto, a pesquisa apresentada visa desenvolver um processo de busca de espaços de soluções de projeto que permita a concepção do arranjo estrutural de uma edificação em madeira engenheirada com pavimentos múltiplos tendo como parâmetros número de pavimentos, dimensões de elementos estruturais e as características mecânicas dos materiais componentes por meio de uma modelagem paramétrica integrada e algoritmo genético.

## **2. OBJETIVOS**

### **Objetivo Geral:**

Geração e exploração do espaço de soluções de projetos por meio de um modelo paramétrico a fim de determinar os limites das capacidades estruturais de pórticos rígidos em madeira engenheira com vigas e colunas em MLC e lajes em MLCC, contraventados com um núcleo rígido em concreto armado.

### **Objetivos Específicos:**

- ✓ Obter espaços de soluções de projeto através de algoritmo genético cuja função objetivo está relacionada à aceitabilidade estrutural e à taxa de consumo de madeira em  $m^3/m^2$ ;
- ✓ Analisar o modo como determinadas variáveis de projeto afetam indicadores de aceitabilidade estrutural obtidos através de códigos normativos nacionais e europeus;
- ✓ Analisar os sistemas gerados com relação ao conceito de eficiência estrutural, ou seja, a relação entre consumo de material e capacidade estrutural estática e dinâmica.

## **3. REFERENCIAL TEÓRICO**

A fundamentação teórica da pesquisa descrita a seguir foi dividida nos seguintes tópicos: modelagem paramétrica, métodos de otimização e busca de espaços de soluções, e, finalmente, uma breve descrição quanto aos principais elementos de madeira engenheirada.

### **3.1. MODELAGEM PARAMÉTRICA**

A modelagem paramétrica permite a concepção geométrica de projetos de modo inovador e célere. Isto porque a definição da geometria acontece por meio de parâmetros que possibilitam uma grande variedade de formas (LEONE, 2017). Tais parâmetros relacionam os elementos dos modelos que estão inseridos no contexto de uma base virtual. Deste modo, ao fazer quaisquer alterações nos valores paramétricos todo o modelo é atualizado de modo

automático. Consequentemente, o emprego da modelagem paramétrica acaba por reduzir significativamente o tempo de concepção de geometrias complexas ou convencionais.

Neste contexto, Polonini (2014) ao analisar o conceito de modelagem paramétrica abordado na literatura destacou que trata-se de um recurso de modelagem que possibilita a geração automática de formas simples e complexas com forte emprego como ferramenta BIM (*Building Information Modeling* ou Modelagem/Modelação da Informação da Construção), podendo ainda ser compreendida como uma subárea da computação gráfica. Deste modo, esta ferramenta pode permitir, por exemplo, a replicação de unidades básicas em projetos de edifícios que podem consistir de peças estruturais e outros detalhes construtivos a partir de parâmetros pré-estabelecidos.

O conjunto de operações e regras empregados para obtenção de um modelo paramétrico é realizado através de um algoritmo. Estes são elaborados através da definição de variáveis de entrada, componentes operacionais e dados de saída, ou seja, quando empregados modelos paramétricos estruturais possibilitam a recombinação das variáveis de entrada e permite-se a obtenção de novas soluções. Deste modo, o algoritmo paramétrico pode facilmente ser integrado no processo de exploração de espaços de soluções de projeto.

Compreende-se, portanto, que a versatilidade da modelagem paramétrica é de grande valia para o desenvolvimento de projeto e tem seu potencial aumentado quando empregado junto à obtenção de espaços de soluções, uma vez que os parâmetros podem ser compreendidos como variáveis de projeto.

### 3.2. OTIMIZAÇÃO

O processo de otimização pode ser compreendido como um conjunto de procedimentos com a finalidade de encontrar soluções plausíveis dentro de um domínio específico por meio de iterações até que não sejam mais possíveis soluções melhores para um determinado problema com relação a determinado critério (NARIÑO, 2014). Esses critérios são representados em termos de valores através de relações matemáticas denominadas funções objetivo. Desse modo, é maximizando ou minimizando a função objetivo que se obtém a solução de um problema de otimização.

Uma maneira comum de se formular um problema de otimização dá-se do seguinte modo: dada a função objetivo  $f: D \rightarrow \mathbb{R}^n$  de algum conjunto  $D \in \mathbb{R}^m$ , ao encontrar um conjunto  $\{x_1, \dots, x_k\} \subset D$  tendo por contradomínio  $Y = \{f(x_i) \mid x_i \in \{x_1, \dots, x_k\}\}$  e os

elementos de  $Y$  menores ou iguais a  $f(x)$ , o problema é otimizado a partir de uma minimização. Já quando os elementos de  $Y$  são maiores ou iguais a  $f(x)$  acontece uma maximização.

Desse modo, percebe-se que a classificação do problema é uma etapa elementar no processo de otimização. Gautier (2020) explica que os problemas de otimização podem ser compreendidos a partir da seguinte classificação: com base na natureza das variáveis de decisão (contínuos ou discretos), da função objetivo (lineares ou não-lineares, mono-objetivo ou multi-objetivo) e das restrições (restritos ou irrestritos e locais ou globais).

### 3.2.1. Otimização com algoritmo genético

A técnica de algoritmo genético aplica o fenômeno natural de modelo darwiniano de sobrevivência do mais forte em um processo estruturado e aleatório, no qual variáveis são combinadas em uma estratégia de busca múltipla (MEDEIROS, 2015). Esta aplicação do conceito de seleção natural foi desenvolvida inicialmente por Jonh Holland, na Universidade de Michigan no ano de 1989.

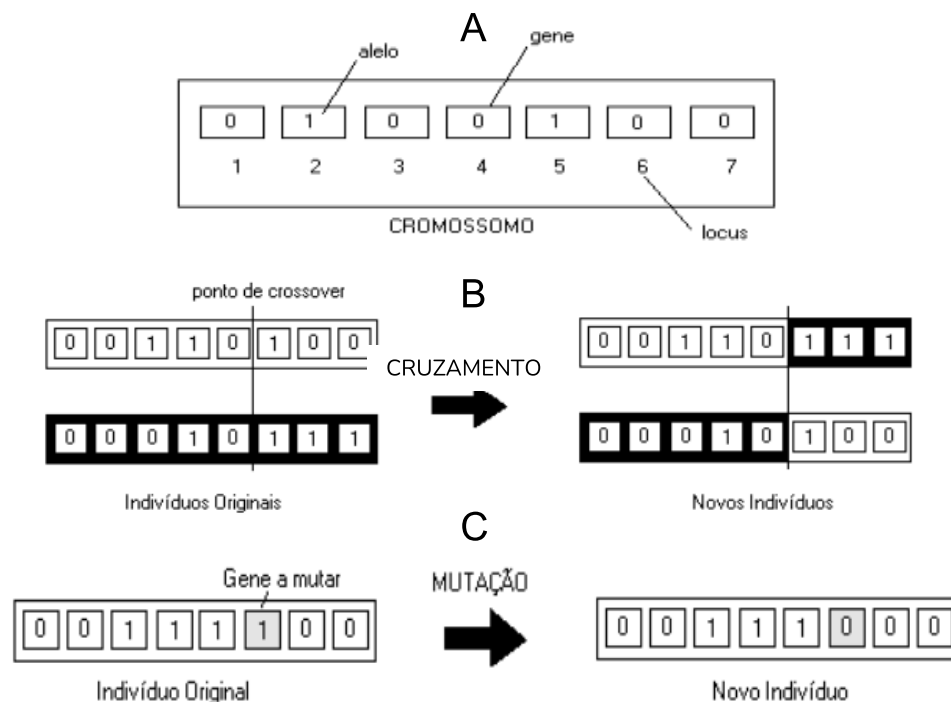
Este método é geralmente utilizado para solucionar problemas de otimização, e, para seu emprego ocorrer de modo satisfatório, Narino (2014) recomenda a observância das seguintes características do problema:

- Intervalo bem delimitado do espaço de busca;
- Possibilidade de aplicação de uma função que permita o ranqueamento das respostas denominada função *fitness*;
- Codificação relativamente simples das soluções para implementação computacional.

Como anteriormente explicado, por ser baseado na reprodução sexuada, a mesma sistematização terminológica pode ser utilizada no emprego desta técnica como pode ser visto na Figura 1. O cromossomo, por exemplo, pode ser entendido como a unidade de armazenamento da informação relativa às variáveis que constituem o problema. Já o gene é a unidade básica que compõe o cromossomo, que por sua vez, possui alelos que representam os valores conferidos aos genes. O conjunto destes cromossomos forma a população obtidas a cada iteração (geração).

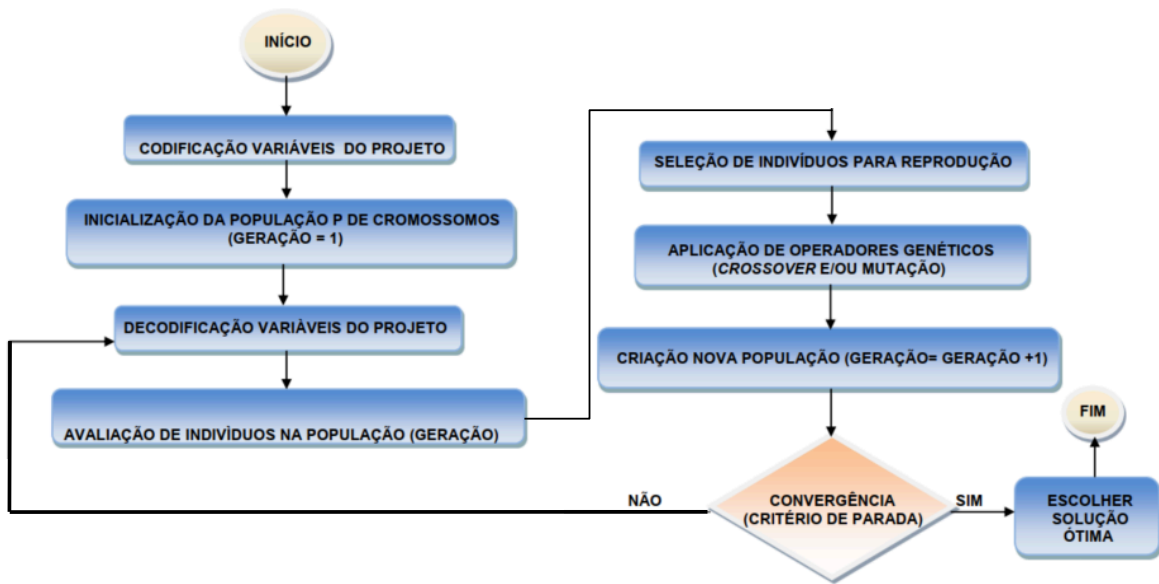
Tais elementos interagem entre si durante a execução do algoritmo genético a partir de passos básicos bem definidos. O primeiro deles é verificar a pontuação no ranqueamento dos cromossomos que constituem a população atual. Em seguida, os cromossomos mais aptos são submetidos à reprodução por meio de operadores genéticos, como, o cruzamento (combinação dos genes de dois cromossomos) e a mutação (mudança forçada de um dos genes). Organiza-se, então, a nova população através da nova geração de indivíduos mais aptos como está esquematizado na Figura 2.

**Figura 1: A - Representação Cromossômica de um sistema: A - formado por 7 genes; B - Cruzamento entre dois cromossomos de tamanho 8 com o ponto de crossover = 5; Mutação aplicada ao 6º gene de um cromossomo de tamanho 8**



Fonte: Moori et al. (2010, p. 7, 9 e 10 )

**Figura 2: Fluxograma de um algoritmo genético simples**



Fonte: Nariño (2014, p. 60)

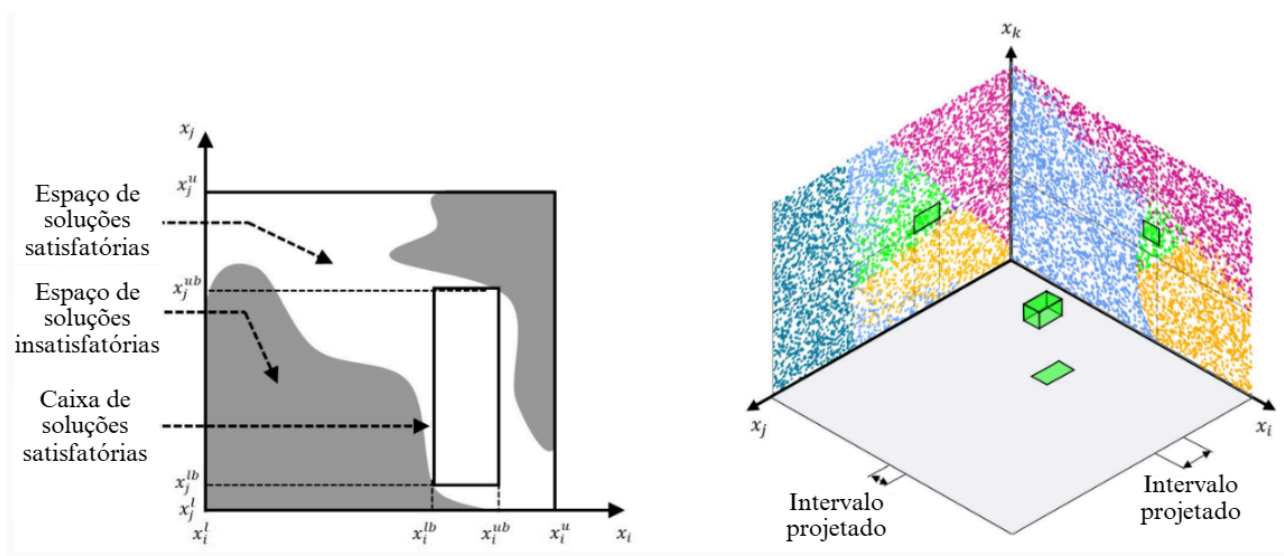
O critério de parada, por sua vez, se dá com critérios pré-estabelecidos, tais como, o número máximo de gerações, ou quando não houver mudanças genéticas significativas entre populações consecutivas, ou ainda, ao se verificar a convergência do valor médio da função *fitness*.

### 3.3. ESPAÇOS DE SOLUÇÕES DE PROJETO

Segundo Zimmermann e Hoessle (2013) projetos otimizados não são necessariamente robustos e costumam ser consideravelmente sensíveis a alterações de parâmetros. Ou seja, caso o contexto em que tais parâmetros venham a ser empregados seja suscetível a variações, mesmo que de pequena grandeza, os resultados podem não apresentar valor máximo ou mínimo globais. Em vista disso, é mais razoável realizar uma abordagem a partir do conceito de espaços de soluções em razão da confiabilidade.

Espaço de soluções consiste em uma região de pontos representativos das variáveis de um problema, ou seja, determinadas configurações de projeto, cujo desempenho atende a requisitos ou a critérios pré-estabelecidos (XU et. al, 2023). A figura 3 exemplifica esta região compreendida por uma nuvem de pontos para um “bom projeto”.

**Figura 3: Espaço de solução e caixa de solução ilustrados em 2D ( a ) e 3D ( b ). A caixa marcada em verde em ( b ) representa uma região delimitada de alto desempenho.**



Fonte: Xu et. al (2023, p. 5).

A definição matemática para espaços de soluções segue do seguinte modo:

- Define-se como ponto de projeto o vetor  $x = (x_1, \dots, x_k)$ , para o qual  $x$  representa o número de dimensões. O conjunto de todos os pontos de projeto forma o espaço de projeto  $\Omega_{ds}$ ;
- A resposta do ponto de projeto ao problema dado é definida por  $z = f(x)$  com  $f$  sendo a função de desempenho;
- A partir da relação  $z \leq f_c(x)$ , para a qual  $f_c$  representa o critério para um desempenho satisfatório na formulação do problema, obtém-se, então, o espaço de soluções com os pontos de projeto que atendam a condição.

A abordagem em espaços de soluções é de muita valia para problemas mecânicos de sistemas estruturais. Silva e Pimentel (2023), ao estudarem diferentes tipologias de pórticos metálicos para estruturas de galpões industriais, obtiveram importantes relações entre diversas variáveis de projeto, tais como, altura dos pilares, consumo de material, velocidade do vento, dentre outras.

Em relação a projetos em madeira engenheirada, Hens et al. (2021) exploraram espaços soluções para tipologias estruturais de edifícios considerando o nível de carbono

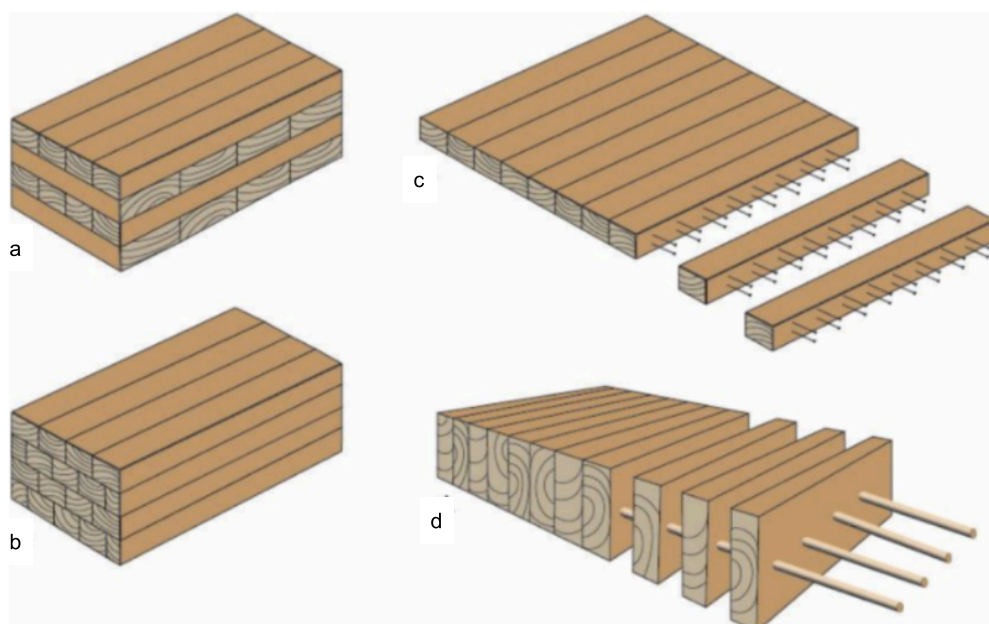
incorporado. Os elementos estruturais eram constituídos por madeira lamelada colada ou madeira lamelada cruzada e foram obtidas relações entre as alturas dos edifícios, nível de carbono incorporado e peso próprio por área.

### 3.4. PRODUTOS DE MADEIRA ENGENHEIRADA

Algumas vantagens da madeira como material base para elementos estruturais estão relacionados ao baixo impacto ambiental de sua fabricação, a facilidade de montagem e aspectos relativos ao conforto de habitação (SHI et al., 2021). O desenvolvimento dessas e outras vantagens se deu de modo mais acentuado com o advento dos produtos de madeira engenheirada, os já referidos EWP's.

Neste sentido, destacam-se em incidência do uso três principais produtos: a madeira lamelada colada cruzada (MLCC ou CLT, do inglês, Cross Laminated Timber), a madeira lamelada colada (MLC) e os elementos de madeira em seções compostas. Há ainda a madeira lamelada pregada (NLT, do inglês Nail Laminated Timber) e a madeira lamelada unida por cavilhas (DLT, do inglês, Dowel Laminated Timber) como se pode ver na figura 4.

**Figura 4 - Alguns produtos de madeira engenheirada: MLCC (a); MLC (b); NLT (c); DLT (d)**



Fonte: Abed et al. (2022)

Alguns estudos analisam a aplicação de elementos de EWP em contextos estruturais diversos a partir do processo de otimização. Das e Tesfamariam (2022), por exemplo, verificaram o desempenho satisfatório do uso de elementos de MLC e MLCC em estabilizadores de efeitos de ações sísmicas em edifícios fazendo uso de quatro tipos de algoritmo de otimização.

#### 3.4.1. Madeira Lamelada Colada

A madeira lamelada colada (MLC) é a simples colagem de lamelas de madeira orientadas num mesmo sentido. Na produção dos elementos de MLC, após cortadas, as lamelas são submetidas ao processo de colagem com material adesivo com resistências apropriadas. Nesta etapa, é empregada no conjunto alguma forma de secagem com compactação que pode utilizar barras roscadas, sistemas pneumáticos ou cavilhas (HOW et al., 2016). Na figura 5, vê-se o processo de cura do adesivo com compactação com fixadores feitos com barras roscadas. Após a finalização da colagem este aparato é retirado.

**Figura 5 - Processo de colagem das lâminas de um elemento de MLC**



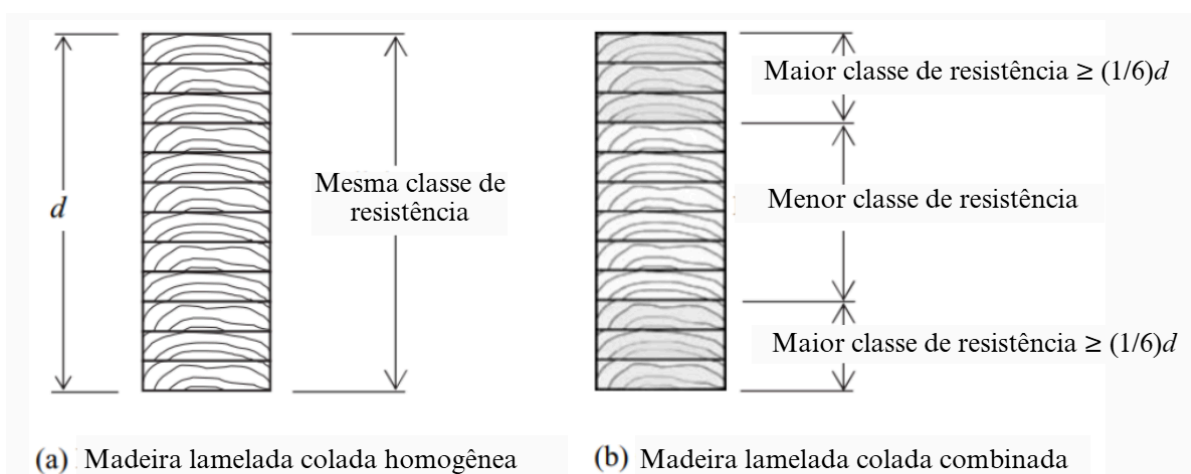
Fonte: Glulam (s. d.)

No contexto das normas europeias, a madeira laminada colada deve cumprir os requisitos da BS EN 386 (BSI, 2001) - *Glued laminated timber — Performance requirements*

*and minimum production requirements* e a EN 14080 (CEN, 2013) - *Timber structures - Glued laminated timber and glued solid timber - Requirements*. A EN 14080 define as classes de resistência associadas ao MLC e também afirma como os valores característicos das propriedades relacionadas à resistência e à rigidez devem ser obtidos.

O sistema de classificação proposto por estas normas aplica-se apenas a madeira lamelada horizontalmente constituídas com pelo menos quatro laminações, sendo que todas elas devem ser de madeira de espécies coníferas. Tais classes de resistência são fornecidas para madeira lamelada colada homogênea e combinada, cuja aplicação em seções transversais é detalhada conforme os exemplos mostrados na figura 6, na qual em (a) é descrita uma seção com todas as lamelas com mesma classe de resistência (homogênea) e, em (b), as lamelas mais externas com resistência superior às internas (combinada).

**Figura 6: Exemplo de um elemento de madeira laminada colada homogênea e combinada**



Fonte: Porteous e Kermami (2007, p. 208)

Na EN 14080, os valores característicos das propriedades de resistência mais relevantes de MLC são reproduzidos na Tabela 1.

**Tabela 1 - Classes de resistência de MLC**

Parâmetro	Descrição	GL 24h	GL 28h	GL 32h	GL 24c	GL 28c	GL 32c
$f_{m,g,k}$	Resistência à flexão	2,4	2,8	3,2	2,4	2,8	3,2
$f_{t,0,g,k}$	Resistência à tração paralela às fibras	1,92	2,23	2,56	1,7	1,95	1,95
$f_{t,90,g,k}$	Resistência à tração perpendicular às fibras	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
$f_{c,0,g,k}$	Resistência à compressão paralela às fibras	2,4	2,8	3,2	2,15	2,4	2,45
$f_{c,90,g,k}$	Resistência à compressão perpendicular às fibras	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
$f_{v,g,k}$	Resistência ao cisalhamento	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35
$E_{0,g,média}$	Módulo de elasticidade médio paralelo às fibras	1150,0	1260,0	1420,0	1100,0	1250,0	1350,0
$E_{0,g,0.05}$	Módulo de elasticidade característico paralelo às fibras (percentil 5%)	960,0	1050,0	1180,0	910,0	1040,0	1120,0
$E_{90,g,média}$	Módulo de elasticidade médio perpendicular às fibras	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0
$G_{g,média}$	Módulo de elasticidade transversal	65,0	65,0	65,0	65,0	65,0	65,0
Peso Específico	Densidade da madeira	3,85	4,25	4,4	3,65	3,9	4,0

Resistências em kN/cm<sup>2</sup>; Módulos de elasticidade em kN/cm<sup>2</sup>; Densidade em kN/cm<sup>3</sup>.

Fonte: CEN (2013, p. 25).

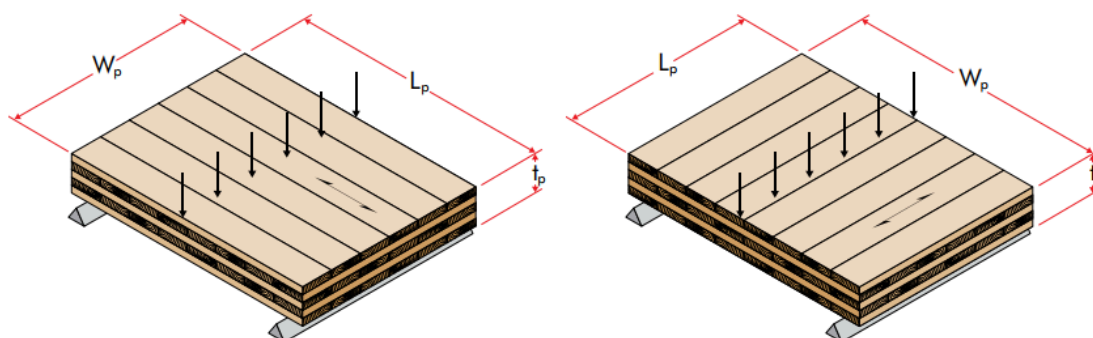
Com relação a estudos de problemas de otimização para sistemas estruturais deste tipo de madeira engenheirada, Junior et al. (2023), por exemplo, estudaram a alocação de um núcleo oco em camadas intermediárias de elementos MLC e obtiveram resultados de campos de deslocamento semelhantes a elementos sem esses mesmos vazios, concluindo uma possível redução de madeira relacionada a uma moderada perda de capacidade. Van Cauteren et al. (2022) empregaram funções multi-objetivos para avaliar combinações ótimas de elementos MLC com perfis metálicos em pórticos treliçados tendo como critérios a avaliação e os custos de ciclo de vida. Enfim, há uma vastidão de trabalhos que investigam com uso de ferramentas

de otimização aplicadas às diversas nuances do emprego de MLC como elemento de madeira engenheirada em sistemas estruturais.

### 3.4.2. Madeira Lamelada Colada Cruzada

A madeira lamelada colada cruzada (MLCC) consiste na colagem de lâminas de madeira em camadas alternadas ortogonalmente. Siddika et al. (2021) aponta que este procedimento visa reduzir o comportamento anisotrópico da madeira, além de aumentar a integridade estrutural. Para os casos de lajes o uso de MLCC é mais frequente, já que as lâminas de madeira estão alternadas nas duas direções, permitindo assim a criação de painéis com duas dimensões preponderantes, conforme pode ser observado na figura 7.

**Figura 7 - Flexão aplicada nas direções de resistência CLT maior (esquerda) e menor (direita)**



Fonte: ANSI/APA (2017, p. 6)

A norma ANSI/APA PRG 320 (2017) traz mais especificamente a definição de MLCC como um produto constituído por no mínimo três camadas de SCL (madeira micro lamelada-colada) ou madeira serrada maciça, coladas entre si com adesivo estrutural. Este código descreve a classificação de painéis de MLCC por espessura e quantidade das camadas e espécies que as constituem reconhecidas pelo American Lumber Standards Committee (ALSC) ou pelo Canadian Lumber Standards Accreditation Board (CLSAB). Um painel pode conter camadas distintas compostas por diferentes espécies, mas em uma única camada devem ser empregadas mesmas espécies de madeira (OLIVEIRA, 2018). Os valores de resistência destas classificações de painéis são apresentados no Apêndice C.

Mayencourt e Mueller (2019) propuseram dois modelos de painéis de MLCC otimizados objetivando a otimização da quantidade de material tendo em vista um contexto de carregamento a flexão unidirecional. Verificaram que até 20% do material pode ser reduzido com a adoção dos modelos propostos. Já Junda et al. (2023) aplicaram modelos de aprendizado de máquina, ferramenta já muito empregada em problemas de otimização, para estimar o comportamento de várias tipologias de edifícios com sistema estrutural em MLCC sob efeitos de sismos. Para tal, foi necessário a otimização de diversos parâmetros estatísticos devido à extensa nuvem de dados gerados na pesquisa.

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção do trabalho serão descritos: a metodologia utilizada para a concepção da ferramenta de projeto. Em seguida, são apresentadas as vias para a verificação da aceitabilidade dos sistemas estruturais estudados. Por fim, são apresentados os procedimentos realizados para a construção do modelo paramétrico estrutural, do modelo em elementos finitos.

### 4.1. DESCRIÇÃO DO ESTUDO DE CASO

Edifícios com madeira engenheirada em seu sistema estrutural geralmente não possui a madeira constituindo a totalidade de seus elementos. Por exemplo, é comum que os primeiros pavimentos sejam de concreto armado. De mesmo modo, os elementos de fundações, ou ainda pilares e vigas voltados para um uso mais específico, como suporte para armazenamento de água potável, ou ainda, pórticos tridimensionais voltados para o sistema de elevadores, geralmente são compostos por outro material. Portanto, dificilmente um sistema estrutural de um edifício em madeira engenheirada não será misto.

Além disso, sistemas estruturais em madeira engenheirada podem ser classificados em duas modalidades (HENS et al., 2021): o sistema pilar-plataforma (*post-and-platform*), em que pilares e vigas são constituídas de madeira lamelada colada, as lajes de painéis de MLCC e um sistema com vigas diagonais em madeira lamelada colada; e o sistema laje-viga-pilar (*post-beam-panel*), diferindo do anterior pela presença de um centro de contraventamento em MLCC e a presença de vigas apenas nas áreas perimetrais. Observa-se que o sistema estrutural estudado enquadra-se como o modelo *post-beam-panel*, com vigas e pilares em

MLC e lajes em MLCC, com a exceção de ter sido empregado um centro de contraventamento em concreto armado moldado in loco comum a todos arranjos estruturais.

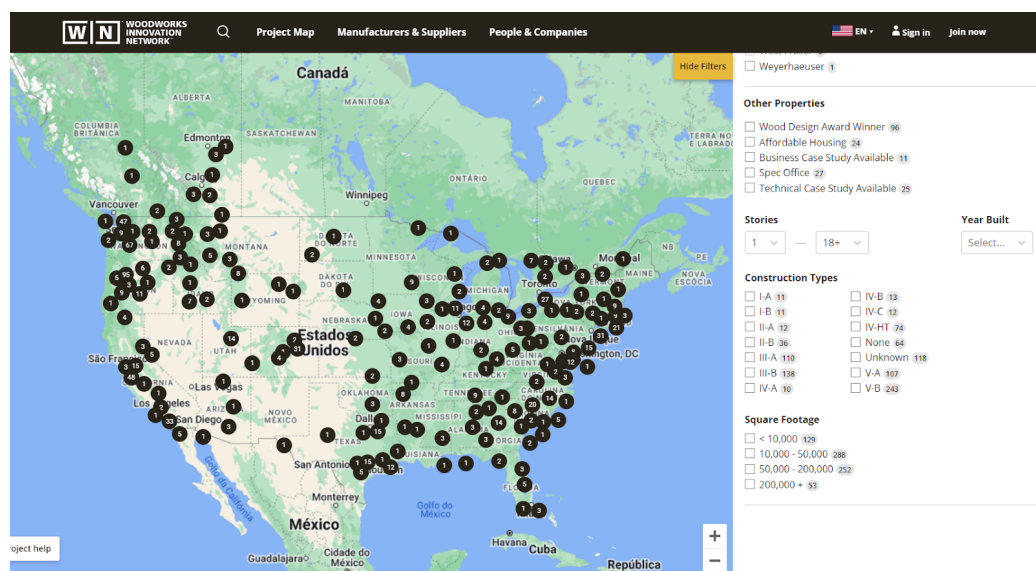
Outras características, como, altura total, comprimento, largura, número de unidades básicas, tamanhos dos vãos, costumam variar bastante a depender da necessidade de projeto.

Partindo destes pontos, serão apresentados os critérios empregados para a concepção de espaço de soluções de projetos de edificações com estrutura modular com um núcleo de contraventamento em paredes estruturais em concreto armado.

#### 4.2. VARIÁVEIS DE PROJETO PARA A CONSTRUÇÃO DOS ESPAÇOS SOLUÇÕES

Para uma seleção eficiente das variáveis de projeto e condizente com a realidade prática da construção civil, fez-se a análise de um banco de dados desenvolvido pela *WoodWorks Innovation Networks* de informações acerca de projetos que empregam madeira em seus sistemas estruturais nos territórios estadunidense e canadense (WIN, 2024). A distribuição de projetos nestes territórios pode ser visualizada na figura 8. A partir deste banco de dados, foi possível fazer uma análise de tipologias mais comuns de edifícios.

**Figura 8: Distribuição de projetos em madeira engenheirada na América do Norte conforme o WoodWorks Innovation Networks**



Fonte: WIN (2024)

Deste modo, buscou-se obter as faixas de valores das principais características geométricas destes edifícios para análise na pesquisa, conferindo-a um potencial de aplicação prática das propostas resultantes dos processos de busca dos espaços de soluções de projeto. O critério para filtrar os dados foi o tipo de madeira engenheirada utilizada, buscando prioritariamente edificações com pilares e vigas de MLC e lajes de MLCC.

A tabela 2 apresenta a descrição das características estruturais, em termos de intervalos, dos edifícios presentes no banco de dados seguindo os filtros citados anteriormente, descrevendo os seguintes parâmetros: distância estimada dos vãos nos sentidos transversal e longitudinal a edificação, dimensões totais do centro de contraventamento, dimensões totais nas duas direções, número de pavimentos entre outras características.

**Tabela 2 - Descrição dos principais dados geométricos de edifícios de madeira engenheirada na base de dados consultada**

Nº de pavimentos	Pé-direito (m)	Altura total (m)	Dimensões do centro de contraventamento (m)	Comprimento do edifício (m)	Largura do Edifício (m)	Distâncias dos vãos entre os pilares no sentido do comprimento (m)	Distâncias dos vãos entre os pilares no sentido da largura (m)
3 a 12	2,80 a 4,80	9 a 75	(3 a 4,5)x (3 a 4,5)	15 a 100	8 a 35	3 a 8	3 a 8

Fonte: Elaborada pelo autor.

Salienta-se que para fins de simplificação optou-se por fazer algumas reduções no detalhamento estrutural que viria a ser modelado. As fundações e pavimentos prévios de outro material que antecedem aos pavimentos de madeira engenheirada foram omitidas.

Ressalta-se também em omitir a modelagem dos dispositivos metálicos que fazem as conexões entre os elementos. Essas conexões, como são denominadas na literatura, podem ser tanto em madeira, cantoneiras metálicas com parafusos auto-atarraxantes, parafusos com porcas e também, em grande parte, alumínio extrudado e conectores de chapa dobrada de formatos padronizados (RAMOS, 2023). Por não fazer parte do objetivo do estudo, optou-se por considerar apenas os efeitos de vinculação proporcionados por elas, ou seja, foram implementadas ligações rotuladas, de modo a garantir que não houvesse prejuízo da análise estrutural.

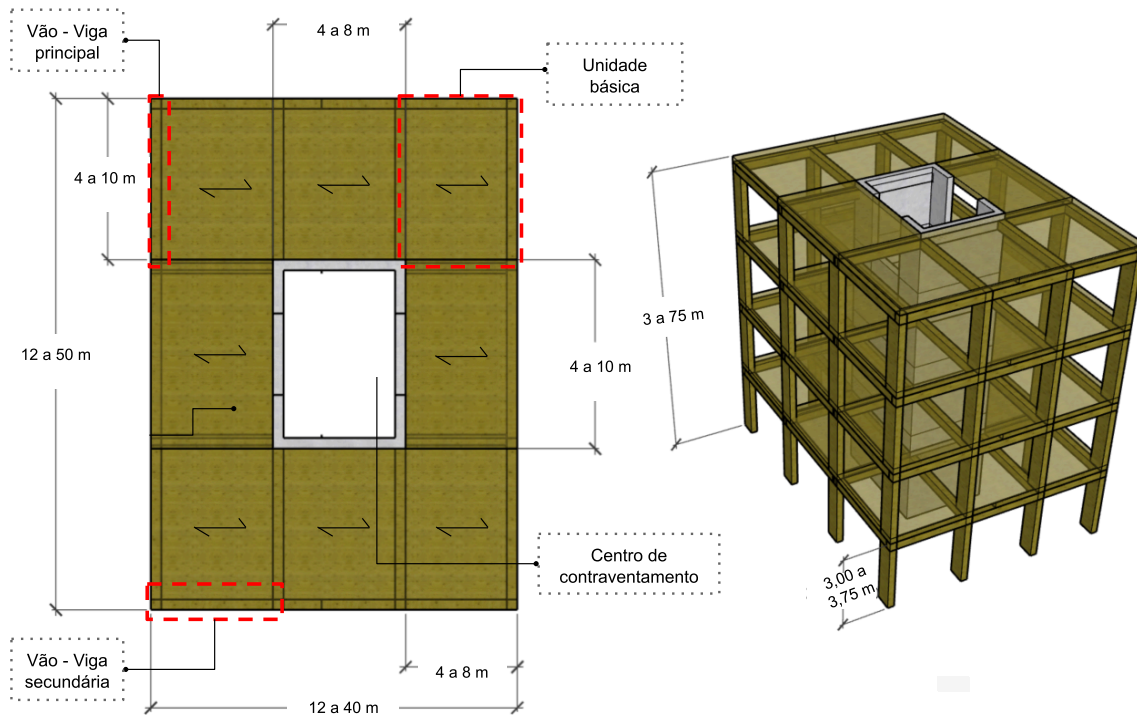
A partir destas considerações organizou-se os limites dos domínios dos parâmetros em que foi empregado o algoritmo genético para a construção dos espaços de soluções conforme está apresentado na tabela 3 e esquematizado na figura 9.

**Tabela 3 - Descrição dos principais dados geométricos de edifícios de madeira engenheirada considerados nesta pesquisa**

<b>Variável de projeto</b>	<b>Descrição dos domínios</b>
<b>Nº de pavimentos</b>	1 a 20
<b>Pé-direito (m)</b>	3,80±1,00
<b>Dimensões do centro de contraventamento (m)</b>	(4 a 8)x(4 a 8)
<b>Comprimento do edifício (m)</b>	12 a 40
<b>Largura do Edifício (m)</b>	12 a 50
<b>Distâncias dos vãos entre os pilares no sentido do comprimento - eixo x ou vão da laje (m)</b>	4 a 8
<b>Distâncias dos vãos entre os pilares no sentido da largura - eixo y ou vão principal (m)</b>	4 a 8
<b>Classes de MLC para pilares e vigas</b>	GL24h, GL28h, GL32h, GL24c, GL28c, GL32c
<b>Classes de painéis em CLT para lajes</b>	E1-5, V1-5, S1-3 (Apêndice C)
<b>Espessuras das lajes (mm)</b>	105, 175, 245
<b>Altura das seções das vigas e das seções dos pilares (mm)</b>	6, 7-½, 9, 10-½, 12, 13-½, 15, 16-½, 18, 19-½, 21, 22-½, 24, 25-½, 27, 28-½, 30, 31-½, 33, 34-½, 36, 37-½, 39, 40-½, 42, 43-½, 45
<b>Largura das seções das vigas (pol.)</b>	3-⅛, 3-½, 5-⅛, 5-½, 6-¾, 8-¾
<b>Largura das seções dos pilares (pol.)</b>	n·(3-⅛, 3-½, 5-⅛, 5-½, 6-¾, 8-¾), onde n=1, 2, 3, 4

Fonte: Elaborada pelo autor.

**Figura 9: Variáveis geométricas do sistema estrutural**



Fonte: Elaborada pelo autor.

#### 4.3. VERIFICAÇÃO DA ACEITABILIDADE ESTRUTURAL

Para a verificação das peças estruturais em madeira engenheirada empregada na pesquisa, tomou-se dois caminhos:

- Vigas e pilares: verificação utilizando como base as normas brasileiras, NBR 7190 – Projetos de Estrutura de Madeira (ABNT, 2022) e a NBR 6123 – Forças devido ao vento em edificações (ABNT, 1988), e de modo suplementar seguiu-se as recomendações contidas em Pfeil (2003);
- Lajes: metodologia de verificação utilizada foi extraída do *The CLT Handbook: CLT structures – facts and planning* (FSS, 2019) utilizando como base o *Eurocode 5 - Design of timber structures* (CEN, 2004) e o *Eurocode 1: Actions on structures* (CEN, 2002).

#### 4.3.1. Verificação utilizando como base o Eurocode 5

Esta sub-seção detalha os procedimentos de cálculo previstos no Eurocode 5 para verificação do estado limite último e de serviço para painéis de laje em MLCC. Observa-se que nos tópicos seguintes estão presentes fatores modificadores ( $k$ ) e valores relacionados às propriedades geométricas necessárias para a obtenção dos principais valores para verificação. As expressões necessárias para obtenção desses parâmetros estão presentes no Apêndice A.

##### 4.3.1.1. Verificação do estado limite último (ELU)

Descritos os fatores modificadores, parte-se para o conjunto de equações com a função de verificação do estado limite último. Primeiramente, salienta-se que o Eurocode 5 se refere às tensões de resistência relacionadas às propriedades mecânicas dos materiais constituintes dos elementos estruturais pelo termo “resistência” (do inglês, *strength*), enquanto que as tensões entendidas como efeitos dos esforços internos e conseqüentemente das ações são denominadas simplesmente por tensões (do inglês, *stress*).

O dimensionamento considerando apenas efeitos de flexão compara a resistência à flexão de projeto ( $f_{m,i,d}$ ), com a tensão atuante de projeto ( $\sigma_{m,i,d}$ ), conforme o que está descrito nas equações 1 e 2.

$$f_{m,y,d} = \frac{k_{mod,med} \cdot k_{sys} \cdot k_h \cdot f_{m,y,g,k}}{\gamma_M} \quad (1)$$

$$\sigma_{m,y,d} = \frac{M_{y,d}}{W_y} \quad (2)$$

Onde:

- $W_y$  é o módulo de resistência e está descrito no Apêndice A.1;
- $M_{y,d}$  é o valor do momento fletor atuante de projeto.

Para fins de análise, considerando o esforço de flexão de forma isolada, o dimensionamento é validado através da equação 3. Além disso, toma-se  $W_y = \frac{bh^2}{6}$  como o

módulo de resistência à flexão para seções retangulares, com  $b$  sendo a largura da seção transversal e  $h$ , a altura.

$$\frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,i,d}} \leq 1 \quad (3)$$

Já a tensão de cisalhamento máxima para seções retangulares  $\tau_{cis}$  é calculada como:

$$\tau_{cis} = \frac{3V}{2A} \quad (4)$$

onde:

- $M$  é o esforço cortante máximo;
- $A = bh$  é a área da seção transversal;

O fator de redução da área de cisalhamento é considerado, ajustando  $A$  para  $\frac{2}{3}A$ , resultando em:

$$\tau_{cis} = \frac{3V}{2 \cdot \frac{2}{3}A} = \frac{9V}{4A} \quad (5)$$

A resistência de projeto ao cisalhamento  $f_{v,i,d}$  é determinada pelo material, e o dimensionamento é aceitável para:

$$\frac{\tau_{cis}}{f_{v,i,d}} \leq 1 \quad (6)$$

A relação  $\frac{f_{m,i,d}}{f_{v,i,d}}$  é importante para determinar a altura relativa  $h/l$  em que a tensão de cisalhamento começa a governar. Por outro lado, a proporção  $h/l$  pode ser derivada comparando as duas condições, com base na razão de esforços internos (momento fletor  $M$  e esforço cortante  $V$ ):

- Considerando que  $\frac{f_{m,i,d}}{f_{v,i,d}} \approx 6$ , relação comum para as classes de MLC;
- $M = \frac{ql^2}{8}$  e  $M = \frac{ql}{2}$  para carregamento uniformemente distribuído ( $q$ ).
- Substituindo nas expressões de tensão:

$$\frac{\sigma_{m,y,d}}{\tau_{cis}} = \frac{\frac{M}{W}}{\frac{9V}{4A}} = \frac{l}{3h} \quad (7)$$

O cisalhamento passar a gober a partir da seguinte condição:

$$\frac{\tau_{cis}}{f_{v,i,d}} > \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,i,d}} \quad (8)$$

Substituindo  $\frac{f_{m,i,d}}{f_{v,i,d}} = 6$ :

$$\frac{l}{3h} < 6 \Rightarrow \frac{h}{l} > \frac{1}{18} \quad (9)$$

Evidentemente, esta é uma abordagem um pouco simplista já que não considera o aumento do peso próprio, que é um carregamento uniformemente distribuído, todavia, a partir dela é possível compreender que, para madeira lamelada colada, a tensão de cisalhamento pode vir a governar o dimensionamento de vigas quando se é aumentada a altura da seção transversal.

De modo análogo, é feita a verificação para as tensões de compressão ( $\sigma_{c,0,d}$ ) e as tensões de tração ( $\sigma_{t,0,d}$ ).

$$\sigma_{t,0,d} = \frac{N_d}{A}, \text{ para } Nd > 0 \quad (10)$$

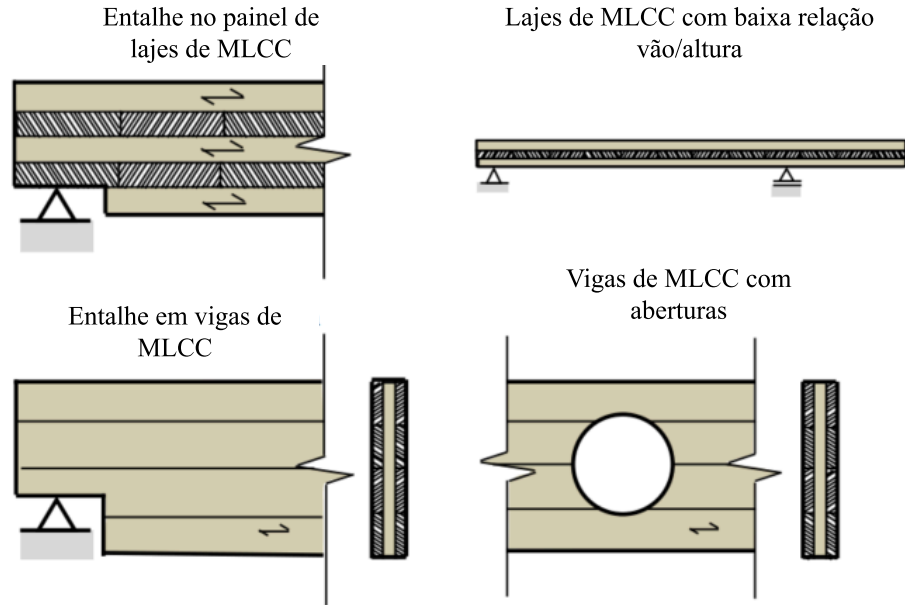
$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N_d}{A}, \text{ para } Nd < 0 \quad (11)$$

Onde:

- $N_d$  é o esforço normal atuante de projeto;
- $A$  é a área de seção;

Destaca-se também a verificação da resistência de rolamento que faz referência a valores de resistência ortogonais às fibras da madeira. Essas tensões de cisalhamento por rolamento, que representam características inerentes deste produto de madeira com camadas ortogonais, como a madeira lamelada colada cruzada, surgem quando elementos expostos à flexão fora do plano desenvolvem tensões de cisalhamento transversais à direção das fibras. Tais tensões ocorrem nas camadas cruzadas orientadas transversalmente ao momento atuante e geralmente ocorrem para as situações descritas na figura 10 (GLASNER et al., 2023).

**Figura 10: Situações de projeto nas quais a verificação da tensão de cisalhamento por rolamento é relevante**



Fonte: Glasner et al. (2023, p. 2.)

Salienta-se que para a verificação dos efeitos de flambagem lateral basta que se multiplique o valor correspondente de  $k_{crit}$  a resistência à flexão de projeto  $f_{m,i,d}$ .

$$f_{mr,y,d} = k_{crit} \cdot f_{m,y,d} \quad (12)$$

Já a tensão de flambagem lateral é dada pela seguinte equação:

$$\sigma_{m,crit} = \frac{\pi \cdot b^2 \cdot [E_{0.05,g} \cdot G_{0.05,g} (1 - 0,63 \cdot \frac{b}{h})]^{0,5}}{h \cdot l_{ef}} \quad (13)$$

Onde:

- $b$  é a largura do elemento;
- $h$  é a altura do elemento;
- $l_{ef}$  é o comprimento efetivo;
- $E_{0.05,g}$  é o valor do quinto percentil do módulo de elasticidade;
- $G_{0.05,g}$  é o valor do quinto percentil do módulo de elasticidade transversal.

Para verificação de elementos com esforços combinados de tração e flexão, as seguintes equações devem ser satisfeitas, sendo priorizado o resultado que expresse pior desempenho:

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (14)$$

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (15)$$

De modo semelhante, a verificação para compressão axial combinada à flexão para elementos com índice de esbeltez relativa ( $\lambda_{rel}$ ) para ambos eixos de seção menor que 0,3 deve seguir a equação 16 e 17, simultaneamente.

$$\left( \frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (16)$$

$$\left( \frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} \right)^2 + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (17)$$

Já para outros casos devem ser satisfeitas as equações 18 e 19 também simultaneamente.

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y} \cdot f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (18)$$

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} \cdot f_{c,0,d}} + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (19)$$

Para ação combinada de flambagem lateral e compressão axial tem-se a seguinte equação:

$$\left( \frac{\sigma_{m,y,d}}{k_{crit} \cdot f_{m,y,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} \cdot f_{c,0,d}} \leq 1 \quad (20)$$

#### 4.3.1.2. Verificação do estado limite de serviço (ELS)

O Eurocode 5 recomenda a análise para a flecha máxima  $u_{fin}$  considerando a natureza das ações. As expressões 21 e 22 representam essas deflexões. O valor de  $u_{inst}$  refere-se ao valor da deflexão instantânea que pode ser encontrada a partir de equações do Eurocode 5, modelos matemáticos para predição do campo de deslocamento, ou ainda modelos em MEF. O índice  $G$  refere-se às cargas permanentes, enquanto que os índices  $Q$  às cargas variáveis. Já o índice  $creep$  a parcela da deflexão causada pela fluência.

$$u_{fin,G} = u_{inst,G} + u_{creep,G} = u_{inst,G}(1 + k_{def}) \quad (21)$$

$$u_{fin} = u_{fin,G} + u_{inst,Q,1} \cdot (1 + k_{def} \cdot \psi_2) + \sum_{i=2}^n [u_{inst,Q,i} \cdot (\psi_{0,i} + k_{def} \cdot \psi_{2,i})] \quad (22)$$

As deflexões máximas  $w_{inst}$  permissíveis são dadas pela tabela e fórmula seguintes:

**Tabela 4 - Limites admissíveis para os deslocamentos de lajes em MLCC**

Documento	Elemento Estrutural	$w_{inst}$	$w_{fin}$	$w_{net,fin}$
EC5 Tabela 7.2	Viga Biapoiada	$\ell/300$ a $\ell/500$	$\ell/150$ a $\ell/300$	$\ell/250$ a $\ell/350$
	Viga em Balanço	$\ell/150$ a $\ell/250$	$\ell/75$ a $\ell/150$	$\ell/125$ a $\ell/175$
UKNA to EC5, NA.2.5	Viga entre dois apoios com revestimento (gesso ou placa de gesso)	$\ell/250$		
	Viga em Balanço com revestimento	$\ell/125$		
	Viga entre dois apoios sem revestimento	$\ell/150$		
	Viga em Balanço sem revestimento	$\ell/75$		

Fonte: Adaptado de Porteous e Kermami (2007, p. 126)

$$w_{fin} = w_{inst} + w_{creep} \quad (23)$$

Onde:

- $w_{creep}$  é a deformação por fluência, ou seja, a deformação que pode surgir com o tempo sob a combinação de carregamento que causa o comportamento de fluência;
- $w_{fin}$  é a deformação final, ou seja, a combinação da deformação instantânea e da deformação por fluência.

Na pesquisa foram utilizados deflexões permissíveis valores iguais a  $\ell/300$ , os quais fazem referência a vigas biapoiadas apresentados pelo Eurocode 5 conforme a tabela 4.

Também é recomendada a verificação de critérios relacionados à vibração. A equação 24 descreve a obtenção do valor frequência fundamental  $f_1$ . Observa-se que o modelo proposto permite a obtenção deste dado numericamente através de análise modal. De todo modo, este valor é aceitável quando maior que 8 Hz, caso contrário, segundo o item 7.3.3 (1) do Eurocode, deve-se fazer uma investigação especial. Também não são detalhadas na mesma norma as ações que devem ser consideradas para comparações deste limite de vibração, podendo-se apenas presumir que não envolvem vibrações originadas por máquinas, já que há um item específico para esta situação.

$$f_1 = \frac{\pi}{2 \cdot l^2} \cdot \sqrt{\frac{E \cdot I}{m}} \quad (24)$$

Onde:

- $l$  é o comprimento do vão em metros;
- $m$  é a massa por unidade de área do piso, em  $\frac{kg}{m^2}$ .

Ainda se faz necessário a análise para efeitos de baixa frequência. Para tal, calcula-se a deflexão  $a$  para uma carga pontual de 1 kN no meio do vão usando a seguinte equação.

$$a = \frac{1000}{48 \cdot (E \cdot I)} \cdot k_{dist} \cdot l_{eq} \cdot k_{amp} [mm] \quad (25)$$

Onde:

- Pode-se considerar o valor de  $k_{dist}$  igual a 0,3 para pisos sem vigas intermediárias de suporte ou quando estas estiverem espaçadas com mais de 1 m;
- $l_{eq}$  é o comprimento equivalente do vão. Para pisos simplesmente apoiados pode ser considerado igual o valor do vão;
- Neste caso, o produto  $(E \cdot I)$  refere-se a rigidez à flexão da viga intermediária. Caso não sejam empregados elementos como estes, pode-se utilizar a rigidez do painel;
- $k_{amp}$  pode ser considerado igual a 1,00 para painéis de pisos sem vigas intermediárias de suporte, e, com a presença de vigas intermediárias simplesmente apoiadas nas extremidades, pode-se considerar igual a 1,05.

Posteriormente, compara-se com os valores de  $a_p$  permissíveis indicados abaixo:

$$a_p \leq 1,8 \text{ mm para vãos de piso } \leq 4000 \text{ mm} \quad (26)$$

$$a_p \leq \frac{16500}{l^{1.1}} \text{ mm para vãos de piso } > 4000 \text{ mm} \quad (27)$$

Para altas frequências, faz-se a análise para o impulso de uma carga de 1 N.s no centro do vão conforme a equação que expressa a velocidade permissível abaixo:

$$v_p = b^{(f_1 \cdot \zeta - 1)} [m/(N \cdot s^2)] \quad (28)$$

Onde:

- $v_p$  é a resposta unitária da velocidade de impulso em unidades  $m/(N \cdot s^2)$ ; ou seja, o valor máximo da velocidade de vibração do piso (em m/s) na direção vertical causada por um impulso de 1,0 N.s, simulando a condição de impacto do calcanhar aplicada no ponto do chão proporcionando deslocamento máximo;

- $b$  é uma constante para o controle da resposta ao impulso unitário e está relacionada à deflexão do piso. Pode ser expresso em formato de equação do seguinte modo:
  - $b = 150 - (30 (a - 0,5) / 0,5) = 180 - 60a$ ,  
quando  $a \leq 1 \text{ mm}$ ;
  - $b = 120 - (40 (a - 1)) = 160 - 40a$ ,  
quando  $a > 1 \text{ mm}$ ;
- $f_1$  é a frequência natural do piso obtida pela equação (em Hz);
- $\zeta$  é a taxa de amortecimento modal do piso e para pisos valor de 0,02 é apropriado.

Compara-se esses valores a resposta real da velocidade de impulso unitário da estrutura com os obtidos pelas equações abaixo:

$$v = \frac{4 \cdot (0.4 + 0.6 \cdot n_{40})}{(m \cdot w_f \cdot l) + 200} [m/(N \cdot s^2)] \quad (29)$$

Onde:

- $w_f$  é a largura do painel do piso;
- $n_{40} = \left\{ \left[ (40/f_1)^2 - 1 \right] \cdot (w_f/l)^4 \right\}^{0.25}$

De modo alternativo, Huang et al. (2020) apresentam a equação 30 para a estimativa da frequência natural na qual são consideradas as rigidezes das vigas de apoio.

$$f_1 = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{k_{eff}}{m}} \quad (30)$$

Na equação 30,  $k_{eff}$  é a rigidez à flexão efetiva do sistema de piso MLCC que pode ser calculado usando a equação 31 como:

$$k_{eff} = k_{CLT, panel, eff} + k_{beam, l, eff} + k_{beam, t, eff} \quad (31)$$

Onde:

- $k_{CLT, panel, eff}$  é a rigidez efetiva à flexão do painel MLCC;
- $k_{beam, l, eff}$  é a rigidez efetiva das duas vigas paralelas à direção longitudinal;
- é a rigidez efetiva das vigas paralelas à direção transversal.

Já o valor de  $k_{CLT, panel, eff}$  pode ser calculado a partir da equação 32.

$$k_{CLT, panel, eff} = \frac{A_{panel} \cdot EI_{CLT, panel, eff} \cdot \left(\frac{\pi}{0.8l_l}\right)^4}{l_t} \quad (32)$$

Onde:

- $A_{panel}$  é a área do painel MLCC;
- $l_l$  e  $l_t$  representam, respectivamente, os comprimentos laterais longitudinal e transversal do painel de piso MLCC;
- $EI_{CLT, panel, eff}$  produto entre o módulo de elasticidade na direção principal com o momento de inércia na mesma direção, ambas grandes do painel de MLCC.

#### 4.3.2. Verificação utilizando como base a NBR 7190

As subseções seguintes detalham os procedimentos de cálculo previstos na NBR 7190 (ABNT, 2022) para verificação do estado limite último e de serviço que foram empregadas para vigas e pilares. Observa-se que as expressões relacionadas aos coeficientes modificadores necessários para a obtenção dos principais valores para verificação são expostas no Apêndice B. Deste modo, são descritas as equações que compõem as verificações dos estados limites último e de serviço.

##### 4.3.2.1. Verificação do estado limite último (ELU)

As tensões solicitantes  $\sigma_d$  resultantes do esforços aplicados nos elementos de madeira devem ser menores ou iguais as resistências admissíveis  $f_d$  correspondentes, que por sua vez, é resultado das incidências dos coeficientes  $k_{mod}$  e  $\gamma_w$  conforme a equação 21.

$$\sigma_d = \frac{k_{mod} \cdot f_d}{\gamma_w} \quad (33)$$

Desse modo, os esforços de compressão, tração e cisalhamento devem ser verificados em observância da equação 29 se atendo às variações dos coeficientes e propriedades geométricas correspondentes à natureza destes esforços.

Expressões para as tensões críticas devido a flambagem lateral não são mencionadas na NBR 7190 (PFEIL, 2003), porém é apresentada a possibilidade de dispensar essa verificação a partir da relação entre a distância  $l_1$  entre os pontos de contenção lateral e a largura do elemento estrutural desde que seja atendido a condição disposta na equação 34.

$$\frac{l_1}{b} \leq \frac{E_{c0,ef}}{\beta_M \cdot f_{c0,d}} \quad (34)$$

Onde:

- $\beta_M$  é um coeficiente de correção apresentado na tabela 5;
- $E_{c0,ef} = k_{mod.1} \cdot k_{mod.2} \cdot k_{mod.3} \cdot E_{c0,m}$  ;
- $E_{c0,m}$  é o módulo de elasticidade à compressão obtido a partir de metodologia definida pela NBR 7190.
- 

**Tabela 5 - Valores de  $\beta_M$**

$\frac{h}{b}$	$\beta_M$
1	6,0
2	8,8
3	12,3
4	15,9
5	19,5
6	23,1
7	26,7
8	30,3
9	34,0
10	37,6
11	41,2
12	44,8
13	48,5
14	52,1
15	55,8
16	59,4
17	63,0
18	66,7
19	70,3
20	74,0

Fonte: ABNT (2022, p. 27).

Para elementos que  $\frac{l_1}{b} > \frac{E_{c0,ef}}{\beta_M \cdot f_{c0,d}}$  também se pode dispensar a verificação quanto à instabilidade lateral desde que seja atendido o que está expresso na equação 35.

$$\sigma_{c1,d} \leq \frac{E_{c0,ef}}{\beta_M \cdot \frac{l_1}{b}} \quad (35)$$

Onde  $\sigma_{c1,d}$  é a tensão atuante de cálculo nas borda mais comprimida.

A análise da flexo-tração deve seguir o equacionamento seguinte, sendo priorizado o resultado que expresse pior desempenho:

$$\frac{\sigma_{t0,d}}{f_{t0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_M \cdot \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (36)$$

$$\frac{\sigma_{t0,d}}{f_{t0,d}} + k_M \cdot \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (37)$$

A análise da flexo-compressão, segundo a NBR 7190 (ABNT, 2022), deve seguir o mesmo equacionamento proposto pelo Eurocode 5.

Observa-se que, para fins práticos, os equacionamentos apresentados foram empregados no algoritmo em termos de esforços.

#### 4.3.2.2. Verificação do estado limite de serviço (ELS)

Primeiramente, salienta-se que para a obtenção das flechas resultantes de carregamentos a NBR 7190, no item 6.4.9, recomenda que seja empregado os valores de  $E_{c0,ef}$ .

A flecha máxima permissível definida por  $w_{ef}$  é definida nas equações 38 e 39, e deve ser comparada a flecha efetiva ( $u_{ef}$ ) obtida pela soma das deflexões devido às cargas permanentes ( $u_G$ ) e às cargas acidentais ( $u_Q$ ).

$$u_{ef} = u_G + u_Q \leq w_{ef} = 1/200 \text{ para vãos} \quad (38)$$

$$u_{ef} = u_G + u_Q \leq w_{ef} = 1/100 \text{ para balanços} \quad (39)$$

Seguindo a mesma abordagem do Eurocode 5, a NBR 7190 estabelece que a menor frequência natural de vibração dos elementos de estrutura do piso devem ser maiores ou iguais a 8 Hz.

#### 4.3.3. Fenômeno da fluência no dimensionamento estrutural

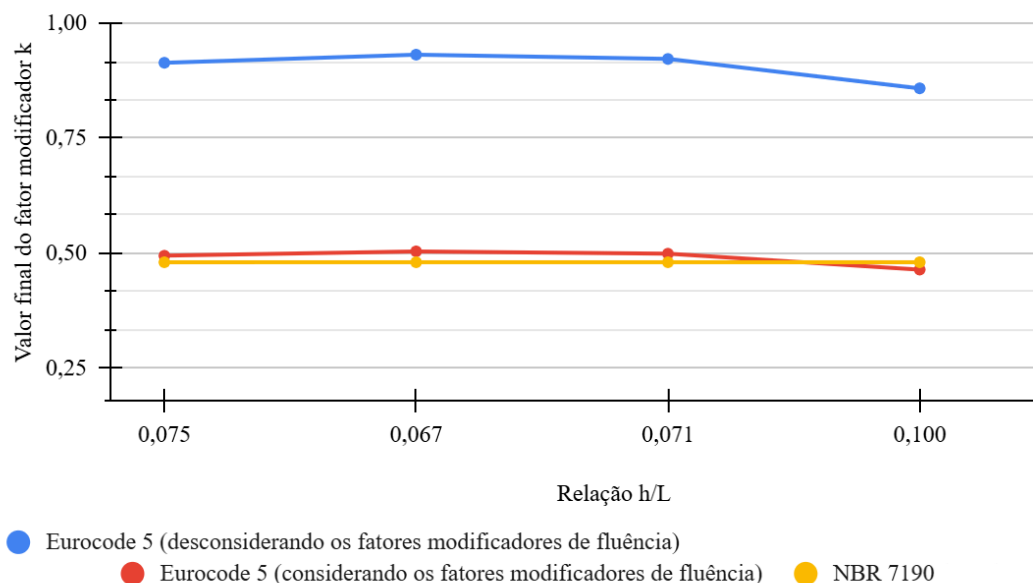
Fluência é o comportamento de certos materiais, tal como a madeira, que, ao se aplicar um carregamento permanente, ocorre uma deformação dependente do tempo, muito influenciada pela umidade relativa do ar, pela temperatura do ambiente e pelas propriedades da madeira, sobretudo o módulo de elasticidade (SANTOS, 2018).

Deste modo, não se pode desconsiderar a importância da fluência no processo de projeto estrutural para madeira. Para isso, há duas abordagens na literatura: a primeira propõe a redução do módulo de elasticidade por fatores como o  $k_{mod.i}$  (item A. 2) a fim de reproduzir as limitações que a fluência causa no campo de deflexões de um elemento estrutural, de modo que tal procedimento ocorre antes dos processos de cálculo para obtenção das flechas máximas de projeto; já a segunda abordagem considera a aplicação de fatores como  $k_{def}$  e  $\psi$  (item A. 1) apenas após a determinação do campo de deformações, sem uma redução prévia do módulo de elasticidade.

Tanto o Eurocode 5 (CEN, 2024) como a nova versão da NBR 7190 (ABNT, 2022) trazem a segunda abordagem em seu conteúdo, enquanto que a versão anterior da NBR (ABNT, 1997) segue a primeira abordagem explicada anteriormente. Supõe-se que esta mudança quanto às versões da norma brasileira esteja relacionada ao fato que as concepções estruturais que comumente são aplicadas às estruturas de madeira são compreendidas como isostáticas, consequentemente, reduzir o módulo de elasticidade antes do cálculo ou depois é pouco relevante.

A fim de verificar as duas abordagens, comparou-se os valores de fatores modificadores que atuam sobre uma viga simplesmente apoiada segundo os métodos utilizados por Porteous e Kermami (2007), que por sua vez, seguem as recomendações do Eurocode 5, com os valores extraídos da antiga versão da NBR 7190. Observou-se que comparativamente os valores pouco variam entre si para uma viga simplesmente apoiada para diferentes relações de  $h/l$  quando consideradas as duas normas, conforme pode ser observado na figura 11.

**Figura 11 - Comparação entre fatores modificadores de deflexões do Eurocode e da NBR 7190**



Fonte: Elaborada pelo autor.

Todavia, para uma modelagem global em elementos finitos de estruturas constituintes de um edifício, como a aplicada nesta pesquisa, a simplificação para um sistema isostático não é possível, ou seja, o sistema estrutural tende a ser hiperestático. Em razão deste comportamento hiperestático do todo estrutural, os métodos de cálculo para obtenção de esforços internos, reações dos apoios, tensões, deformações e deslocamentos são dependentes das leis constitutivas dos materiais que compõem as peças estruturais, tais como o módulo de elasticidade e o módulo de elasticidade transversal (MARTHA, 2010). Deste modo, a consideração da primeira abordagem em introduzir antecipadamente a limitação da madeira como material constituinte devido aos fatores de fluência é mais adequada, ou seja, deve-se considerar um coeficiente incidindo diretamente no módulo de elasticidade.

Além disso, a sobreposição de deslocamentos de determinados elementos sobre outros está intimamente relacionada ao módulo de elasticidade de cada peça estrutural, como por exemplo, o caso das deformações que ocorrem nas vigas e repercutem sobre as lajes. Estas sobreposições podem, inclusive, causar mudanças importantes na forma como os esforços internos interagem no sistema estrutural.

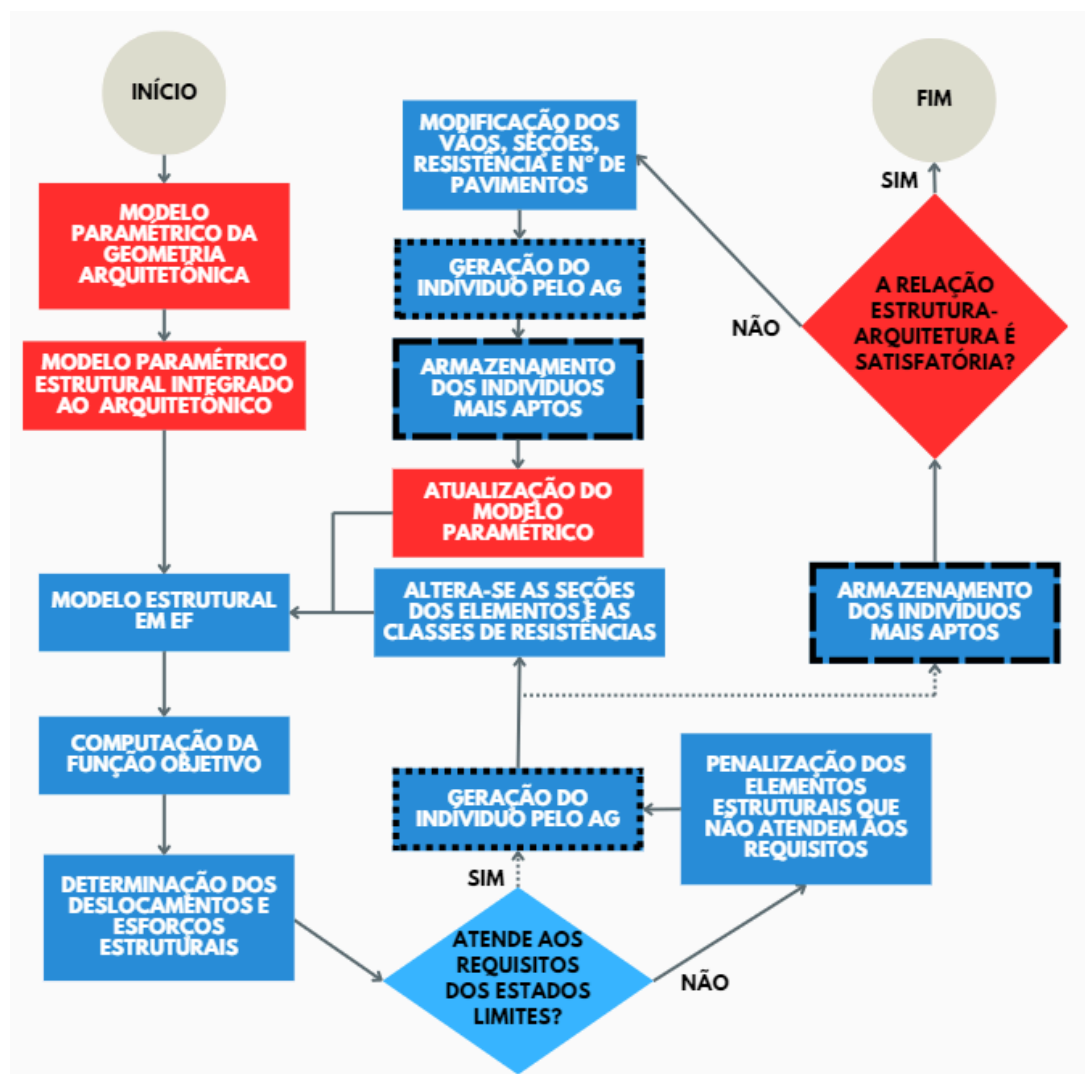
De todo o modo, corroborando o que foi explanado, no item 2.3.2.2 (2) do Eurocode 5 (CEN, 2004), é apresentado que para os estados limites últimos, nos quais a distribuição de

forças e momentos nos membros é afetada pela distribuição de rigidez na estrutura, deve-se proceder com a redução do valor médio final do módulo de elasticidade, do módulo de cisalhamento e do módulo de deslizamento.

#### 4.4. DESENVOLVIMENTO DO ALGORITMO

A figura 12 esquematiza através de um fluxograma o protótipo de ferramenta de projeto proposto. Os processos em vermelho são aqueles referentes aos dados de entradas e avaliação do sistema estrutural gerado, ambos dependentes do controle pelo operador. Os outros processos, em azul, se dão de modo automatizado.

**Figura 12: Esquema que representa a otimização abordada no estudo**



Fonte: Adaptado de Silva (2018)

Observa-se que a construção do modelo paramétrico ocorre com a integração das geometrias da estrutura com as da arquitetura, a partir de variáveis de entrada relacionadas aos tamanhos do vão, ao número de pavimentos e repetições das unidades básicas. Deste modo, o modelo em MEF e sua posterior verificação são concebidos com base nas mesmas variáveis paramétricas do modelo paramétrico (MP).

Há ainda a integração do modelo com um motor de otimização em algoritmo genético que controla as seções geométricas dos elementos estruturais e as classes do tipo de madeira engenheirada empregada. Deste modo, o conjunto de valores das variáveis de entrada que permite a concepção de um sistema estrutural é denominado pelo termo “instância”.

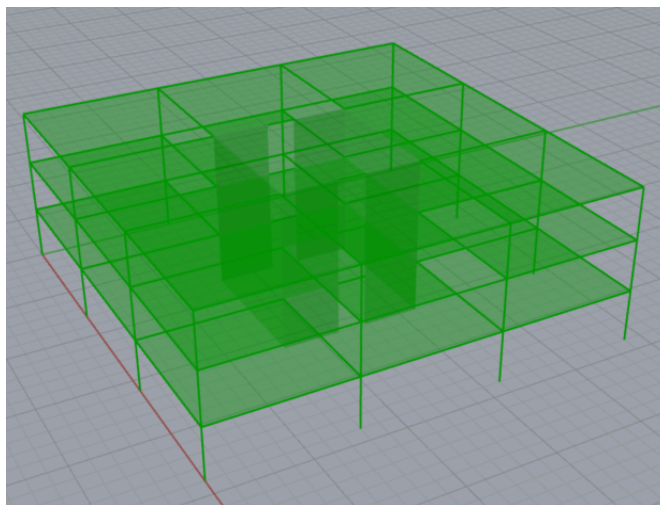
Assim, a partir de demandas projetuais pré-estabelecidas, é possível obter instâncias otimizadas quanto às seções transversais, ao arranjo das peças estruturais e às classes de material, formando, dessa forma, seu espaço de soluções.

Portanto, semelhante ao que fez Silva (2018), por meio destes espaços de soluções pode-se sistematizar informações em gráficos e índices como ferramentas de um processo inicial de projeto (*optioneering*).

#### 4.5. MODELO PARAMÉTRICO ESTRUTURAL

O modelo geométrico de um dos sistemas estruturais no ambiente tridimensional do CAD Rhinoceros é apresentado na figura 15. Esse modelo foi submetido às verificações mencionadas no item 4.3.

**Figura 15: Visualização do modelo tridimensional paramétrico**



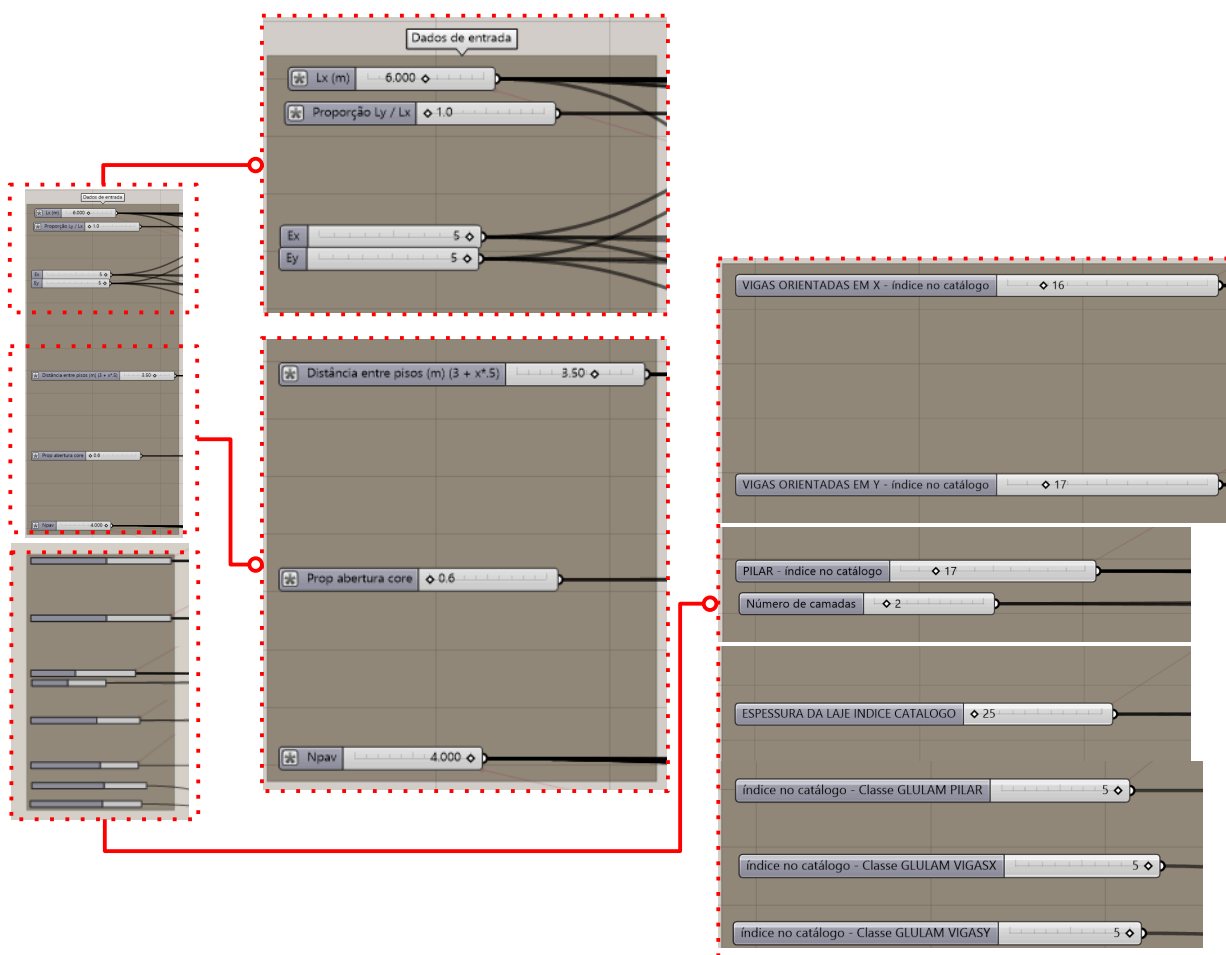
Fonte: Elaborada pelo autor.

Observa-se que o sistema estrutural é constituído por uma unidade básica composta por quatro pilares e quatro vigas, de seções retangulares conforme as dimensões dispostas nos catálogos apresentados no item 4.6.1, bem como, um painel de laje em MLCC com as propriedades geométricas extraídas do catálogo apresentado no Apêndice C. Além disso, há ainda um centro de contraventamento em concreto armado posicionado de modo centralizado ao edifício.

As vigas foram agrupadas em secundárias (paralelas aos eixos x) e principais (paralelas ao eixo y) do sistema de coordenadas do CAD Rhinoceros e foi possibilitado a diferenciação de seções.

Também foi possibilitada a replicação no plano horizontal, sendo possível alterar os tamanhos dos vãos de modo independente, bem como é possível replicar os pavimentos alterando o pé-direito conforme é visto na figura 13.

**Figura 13 - Painel de controle das variáveis de entrada no ambiente Grasshopper**

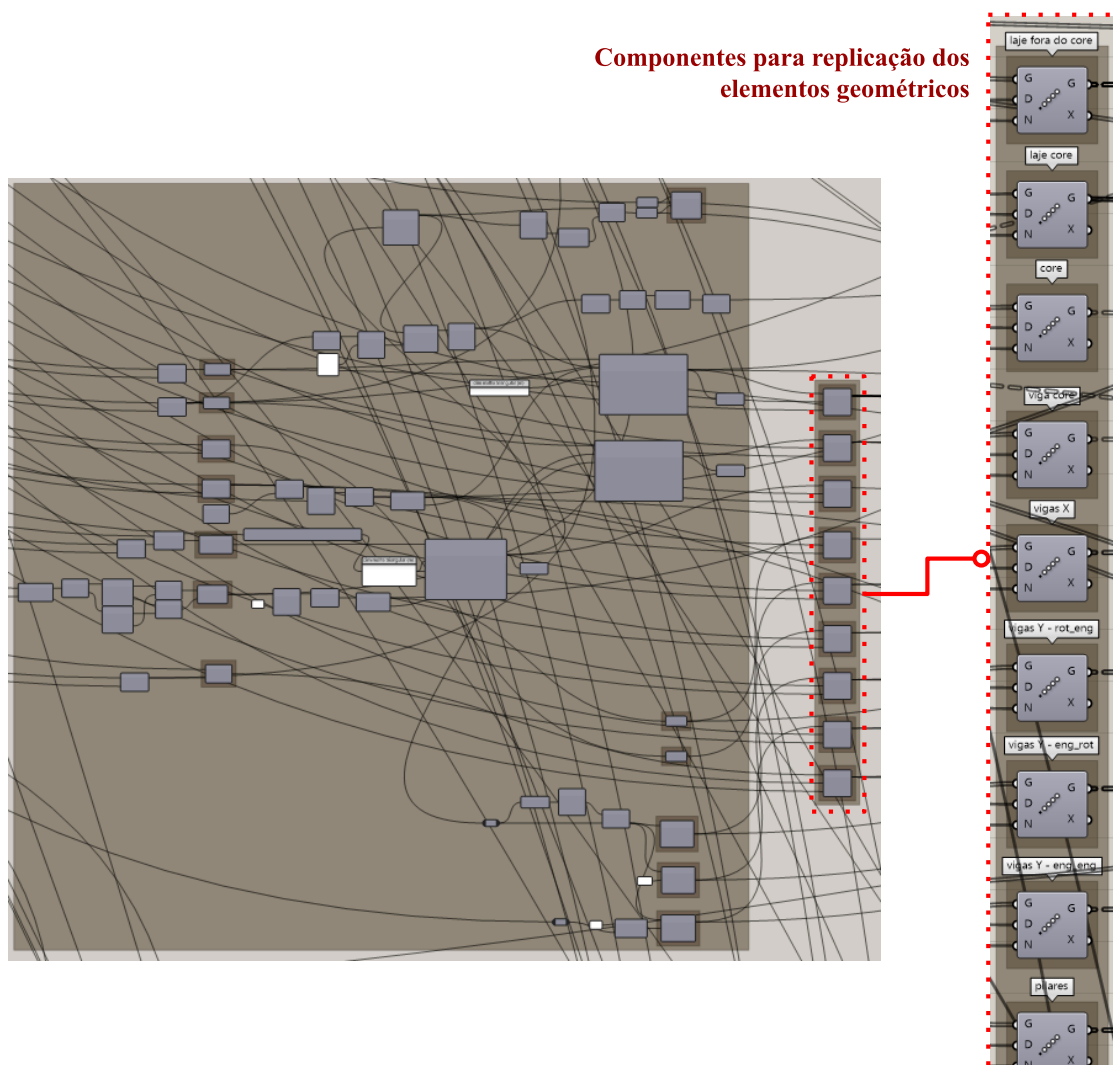


Fonte: Elaborada pelo autor.

A fim de garantir a consistência do modelo, as linhas que representam as vigas foram subdivididas e os vértices resultantes destes procedimentos foram incluídos na rede de pontos que formam as malhas que representam as lajes.

Enfim, o grupo de componentes do código do algoritmo cuja função é conceber a geometria dos eixos dos elementos do modelo em MEF é apresentado na figura 14. Silva (2018) descreve esses componentes do ambiente Grasshopper como sendo funções de código computacional que processam dados de entrada de modo consecutivo através de “fios”.

**Figura 14 - Bloco de componentes da geração geométrica do modelo**



Fonte: Elaborada pelo autor.

Com o modelo paramétrico estrutural desenvolvido, foi possível alterar parâmetros como dimensões dos elementos, tamanhos dos vãos em duas direções, número de pavimentos, pé direito e posicionamento do centro de contraventamento. É a partir de um modelo como este, que pode-se obter um arquivo referencial para outras disciplinas de projeto, com a versatilidade de se poder alterar diretamente no painel de controle os parâmetros referidos anteriormente (figura 13) e obter assim novos sistemas estruturais em tempo real.

Desse modo, basta vincular ao modelo estrutural as partes do algoritmo cujas funções são realizar a verificação dos limites estruturais, sinalizar dos elementos em desacordo com os códigos utilizados, e, por conseguinte, otimizar considerando a melhor combinação de elementos que respondam satisfatoriamente aos carregamentos e ao consumo de material.

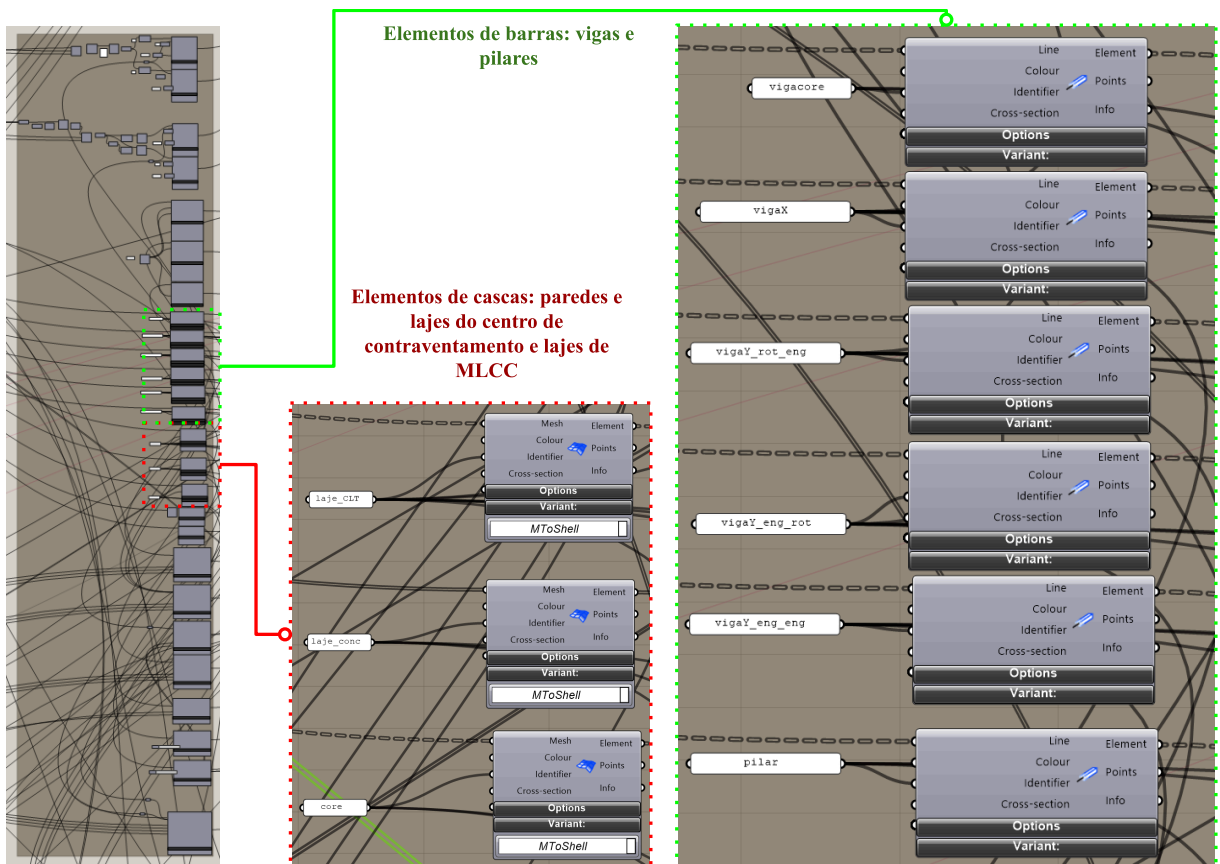
#### 4.6. MODELAGEM EM ELEMENTOS FINITOS NO KARAMBA3D

O Karamba3D é um plug-in do ambiente Grasshopper para análise estrutural utilizando a modelagem em elementos finitos. Com essa interação no mesmo ambiente entre o modelo geométrico tridimensional e o modelo em MEF não há necessidade de transferências ou conversão de arquivos como é comum acontecer para outros *softwares*.

Outra grande vantagem destacada por Silva (2018), resultado da interação entre Karamba3D e modelagem paramétrica, é a dinamicidade em obter os resultados em um processamento mais ágil da modelagem em elementos finitos a partir de mudanças em variáveis de entrada.

Segundo Matos (2021) a Teoria de vigas de Timoshenko é utilizada para descrever o comportamento estrutural dos elementos em barras, enquanto que a teoria de Kirchhoff para placas finas é o modelo matemático empregado para os elementos compreendidos como cascas contínuas. De modo mais claro, cada elemento de barra consiste de um elemento que tem um polinômio interpolador cúbico, enquanto que o elemento de casca (apenas com elementos triangulares) é um elemento com função interpoladora linear.

**Figura 16 - Bloco de componentes dos elementos do sistema estrutural**

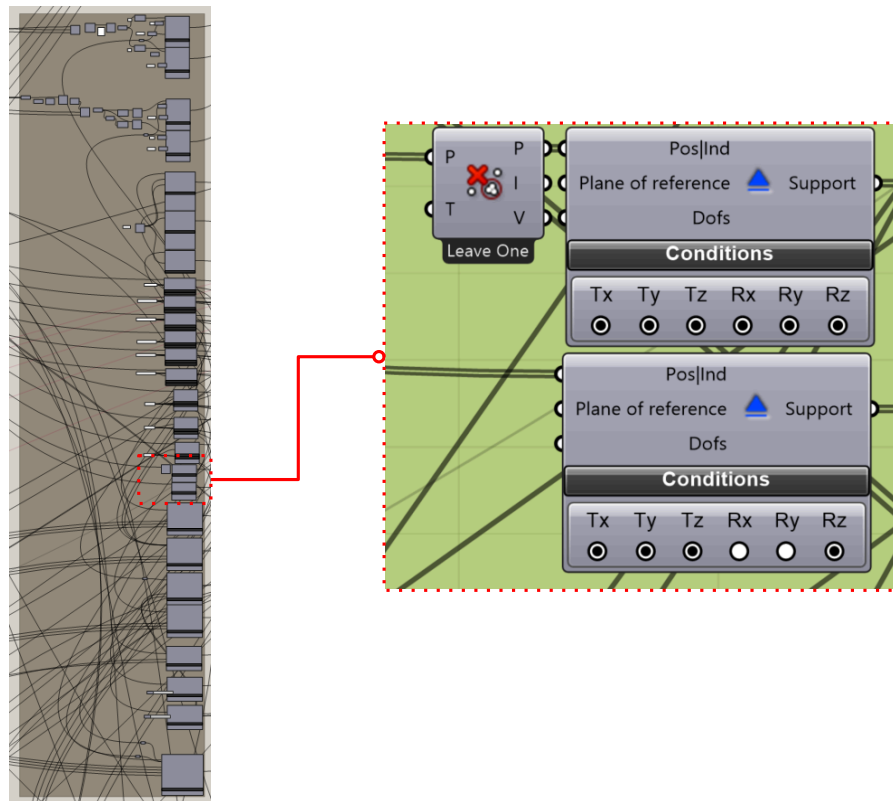


Fonte: Elaborada pelo autor.

Enfim, a partir do Karamba3D foi concebida a modelagem da estrutura pelo MEF, que primariamente se deu a partir da conversão das entidades geométricas que representam pilares e vigas em elementos de barra cujos componentes com tal função são mostrados na figura 16. De mesmo modo, é apresentado também na figura os componentes referentes à concepção dos elementos de cascas contínuas, ou seja, as lajes de MLCC, as paredes e as lajes do centro de contraventamento.

Já os apoios na base dos pilares foram configurados de modo a ter restrições de translação nos eixos x, y e z e permitir a livre rotação conforme se vê na figura 17.

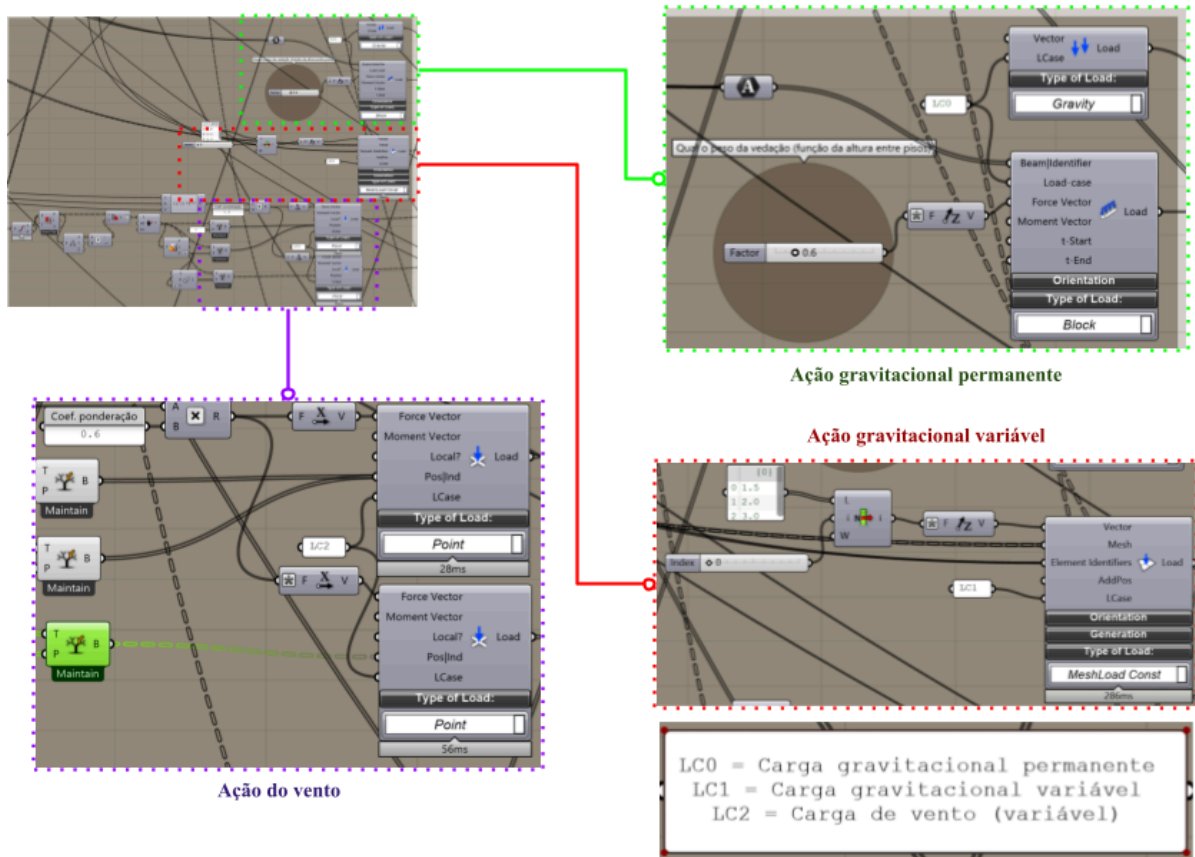
**Figura 17 - Bloco de componentes dos apoios do sistema estrutural**



Fonte: Elaborada pelo autor.

Os casos de carregamentos tidos como efeito das ações de vento atuando no plano yz, peso próprio e cargas variáveis são implementados ao modelo a partir da configuração dos componentes apresentados na figura 18. Enfim, para ações gravitacionais, foram considerados um carregamento distribuído de  $1,5 \text{ kN/m}^2$  aplicado às lajes do pavimento e um carregamento linear de  $0,6 \text{ kN/m}$  no contorno do pavimento, além do peso próprio de todos elementos estruturais. Já a velocidade do vento foi considerada variando de 20 a 50 m/s. Estes valores foram extraídos para o uso de edifícios residenciais do Eurocode 1 (CEN, 2002), da NBR 6123 (ABNT, 1988) e da NBR 6120 (ABNT, 1980).

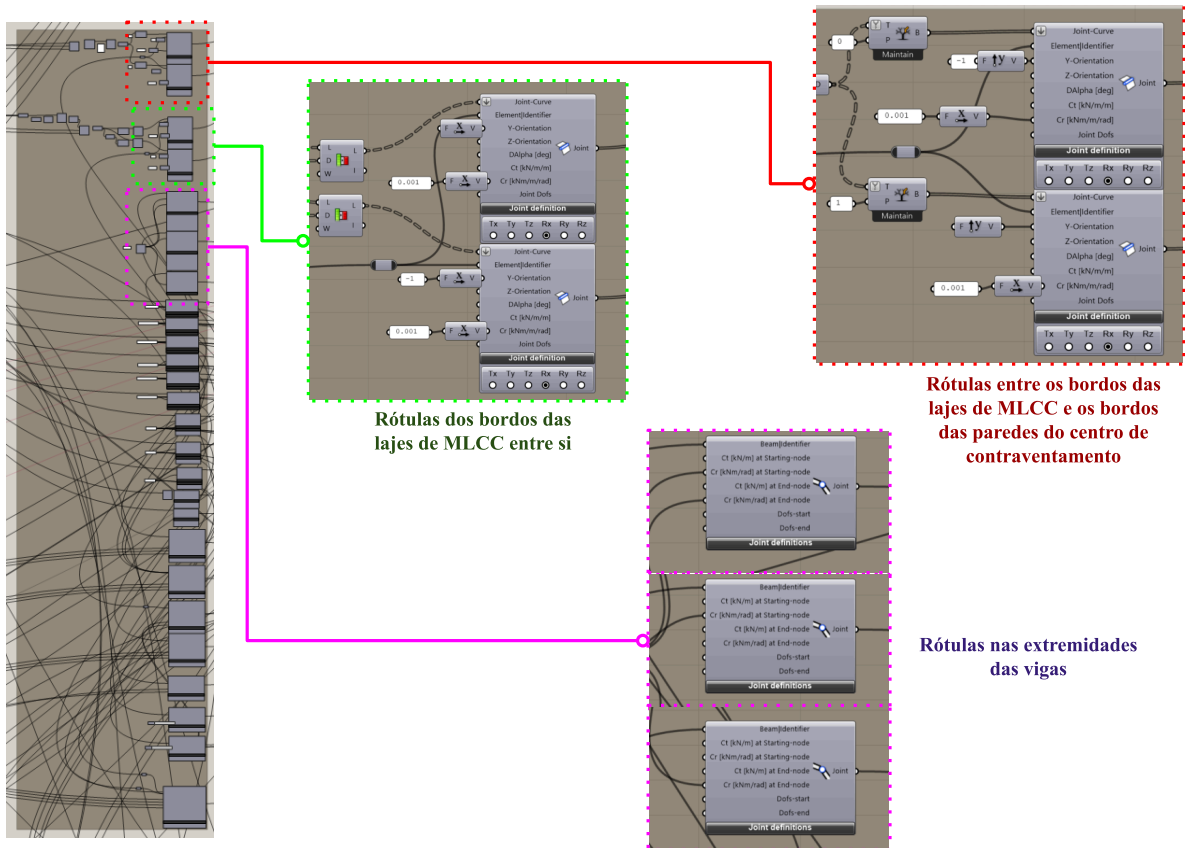
**Figura 18 - Bloco de componentes das ações incidentes no sistema estrutural**



Fonte: Elaborada pelo autor.

Os vínculos entre lajes, vigas e pilares necessitam ser compreendidos como rótulas a fim de se comportarem no modelo conforme o emprego prático. Na figura 19, é apresentado o conjunto de componentes que representam as rótulas do modelo em MEF.

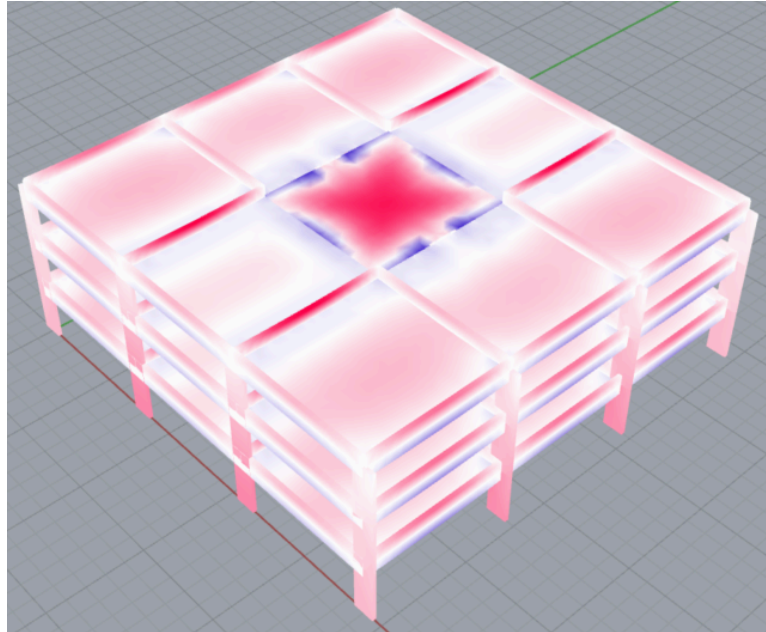
**Figura 19 - Bloco de componentes das rótulas do sistema estrutural**



Fonte: Elaborada pelo autor.

Portanto, com o modelo em MEF desenvolvido e acoplado ao modelo paramétrico estrutural paramétrico, ou seja, é possível realizar as alterações na geometria do sistema estrutural de modo a resultar em novos processamentos em MEF. Na figura 20, é apresentada a modelagem em MEF do sistema estrutural exemplificado no item anterior.

**Figura 20: Visualização do modelo em MEF do sistema estrutural abordado no item 4.5**



Fonte: Elaborada pelo autor.

O bloco de componentes do Karamba3D para a modelagem em MEF permite a visualização dos esforços e campo de deformações graficamente como também gera esses dados através de listas de dados podendo o operador optar por análise de primeira ou segunda ordem, por exemplo. Também é possível fazer análises considerando apenas um caso de carregamento.

#### 4.6.1. Descrição das seções transversais e materiais constituintes dos elementos estruturais

O componente do Karamba3D responsável por configurar as seções dos elementos estruturais permite não apenas a introdução dos dados geométricos, bem como a especificação do seu tipo de material. Estas características, por sua vez, se dão a partir de outro componente que leva em consideração diversos dados relacionados a propriedades mecânicas.

Neste sentido, as vigas e os pilares do modelo seguiram os padrões de classe de madeira lamelada colada, previstos na EN 14080 (CEN, 2013) - *Timber structures - Glued laminated timber and glued solid timber - Requirements*, através de um bloco de componentes que permitem a seleção por índices em uma tabela semelhante a apresentada no item 3.4.1

(tabela 1). Desse modo, o operador consegue definir qual classe de madeira lamelada colada será empregada para vigas e pilares.

De modo semelhante, fez-se para os painéis que compõem as lajes em CLT. Todavia, as classes de resistência destes painéis à luz da norma ANSI/APA (2017) estão relacionadas às suas espessuras, ou seja, a seleção da classe de resistência do CLT está atrelada a esta dimensão. Logo, o operador escolhe o índice correspondente a um tipo de painel de laje com espessuras e classe de resistência já estabelecidas conforme pode-se ver na tabela 22 apresentada no Apêndice C. Destaca-se que as tipologias descritas com a denominação E1 a E3, V1 a V5 e S1 a S3 referem-se às possibilidades de combinação de espécies de madeira empregadas nas camadas previstas pelo mesmo código.

Já as seções das vigas e pilares se dão de modo independente das classes de resistência, conforme a tabela 6, extraída do documento *Glued Laminated Beam Design Tables* (APA, 2016) e utilizada no algoritmo. Salienta-se que os pilares seguiram as mesmas dimensões para vigas diferindo que estes são produzidos como que com vigas seriadas e coladas como pode ser visto na figura 21.

Salienta-se que para as lajes, vigas e paredes do centro de contraventamento foi considerado como material constituinte concreto armado com valor característico de resistência à compressão igual a 35 MPa.

**Figura 21: Exemplos de pilares de MLC**



Fonte: WIEHAG (s. d.).

**Tabela 6 - Dimensões das seções de elementos de MLC previstas em APA (2016)**

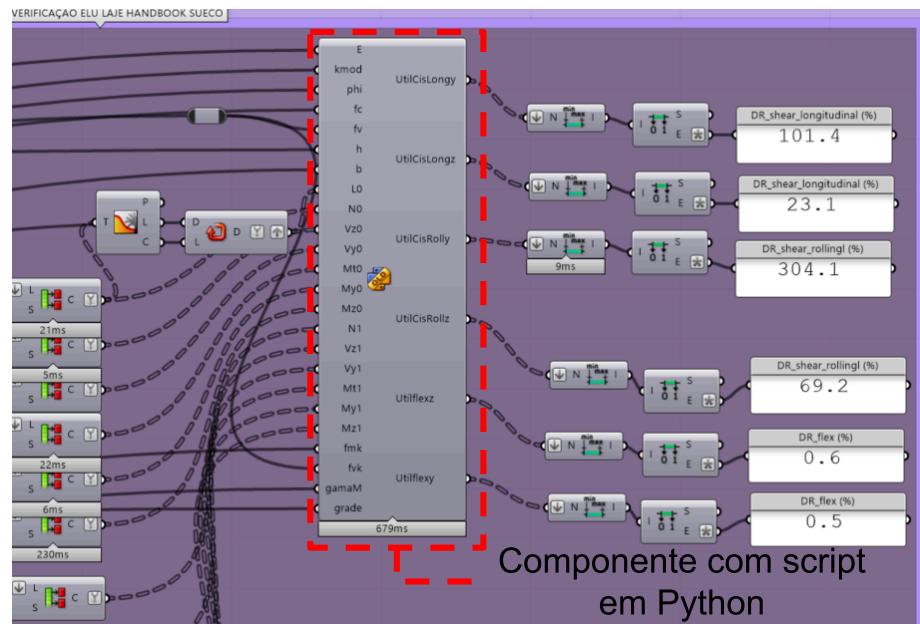
3-1/8 pol. largura															
Altura (pol.)	6	7-1/2	9	10-1/2	12	13-1/2	15	16-1/2	18	19-1/2	21	22-1/2	24	25-1/2	27
3-1/2 pol. largura															
Altura (pol.)	6	7-1/2	9	10-1/2	12	13-1/2	15	16-1/2	18	19-1/2	21	22-1/2	24	25-1/2	27
5-1/8 pol. largura															
Altura (pol.)	12	13-1/2	15	16-1/2	18	19-1/2	21	22-1/2	24	25-1/2	27	28-1/2	30	31-1/2	33
5-1/2 pol. largura															
Altura (pol.)	12	13-1/2	15	16-1/2	18	19-1/2	21	22-1/2	24	25-1/2	27	28-1/2	30	31-1/2	33
6-3/4 pol. largura															
Altura (pol.)	18	19-1/2	21	22-1/2	24	25-1/2	27	28-1/2	30	31-1/2	33	34-1/2	36	37-1/2	39
8-3/4 pol. largura															
Altura (pol.)	24	25-1/2	27	28-1/2	30	31-1/2	33	34-1/2	36	37-1/2	39	40-1/2	42	43-1/2	45

Fonte: Adaptado de APA (2016).

#### 4.7. VERIFICAÇÃO DOS ESTADOS LIMITES INTEGRADA AO MODELO PARAMÉTRICO

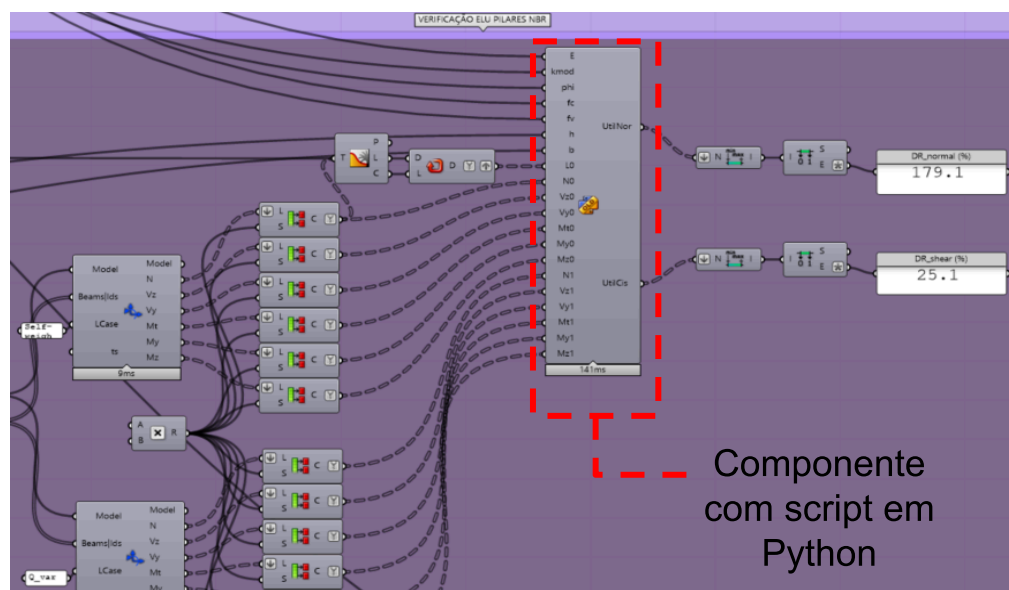
As figuras 22 e 23 apresentam os resultados da verificação do exemplo de sistema estrutural para tipologia de edifício abordado no item anterior. No atual estágio do estudo, o algoritmo permite a verificação da estrutura a luz da NBR 7190 para pilares e vigas, e das lajes em CLT considerando o *CLT Handbook: CLT structures – facts and planning* (FSS, 2019). Tal procedimento é realizado através de um componente com *script* em linguagem Python, o qual obtém o resultado das equações de verificação das normas a partir de dados de entrada, como esforços resultantes da modelagem em elementos finitos, dados geométricos e dados relacionados às propriedades mecânicas.

**Figura 22: Trecho do código da verificação dos estados limites dos pilares do sistema estrutural abordado no item 4.5**



Fonte: Elaborada pelo autor.

**Figura 23: Trecho do código dos estados limites dos painéis de laje do sistema estrutural abordado no item 4.5**



Fonte: Elaborada pelo autor.

#### 4.8. CONSTRUÇÃO DOS ESPAÇOS DE SOLUÇÕES

Como ferramenta de obtenção dos espaços de soluções, foi utilizado neste trabalho o plug-in do ambiente do Grasshoper chamado de Galápagos, um otimizador baseado em algoritmo genético. Esta ferramenta permite a escolha dos seguintes critérios (SILVA, 2018):

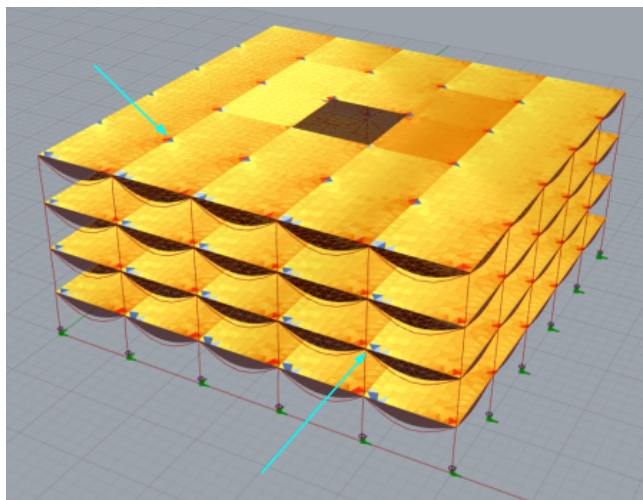
- Igual probabilidade de agrupamento de casais durante o cruzamento para cada geração iterada através de uma combinação aleatória;
- O tamanho da população em cada geração;
- Número máximo de gerações sem evolução;
- Percentual de indivíduos mantidos por geração;
- Nível de aptidão em relação a função objetivo.

Como já mencionado, neste estudo, a partir dos limites dos domínios dos parâmetros que caracterizam os sistemas estruturais de edifícios de madeira, tais como, números de pavimentos, pé-direito, tamanho e número de vãos, considerou-se como concepção dos cromossomos as combinações entre seções dos elementos estruturais e classes de resistências de seus materiais constituintes. Observa-se que apenas os indivíduos que satisfaçam as condições de aceitabilidade estrutural são considerados aptos.

Deste modo, cada instância de sistema estrutural está associada às variáveis paramétricas de entrada e às variáveis de verificação da aceitabilidade estrutural conforme as tabelas 24 e 25 do apêndice D descrevem. Destacam-se as categorias de valores para fatores de projeto (*design factor*) para os quais considerou-se a razão percentual dos esforços ou deslocamentos de projetos pelos seus valores correspondentes permissíveis, conforme já foi apresentado no 4.3.1.2.

Salienta-se que na modelagem obtida pelo Karamba3D algumas áreas de interação entre elementos acabam por gerar tensões múltiplas vezes acima das que de fato deveriam ser consideradas. Exemplo de uma destas interfaces de interação são as que ocorrem entre as lajes e os pilares por concentrar um grande esforço numa área pequena, levando a uma elevada concentração de tensões como se pode observar na figura 24. Sabe-se que, do ponto de vista prático, não se espera que as lajes transfiram esforços de modo direto aos pilares já que este papel é realizado pelas vigas, sobretudo, nos sistemas *post-beam*. Diversas práticas no processo executivo enfatizam esta preocupação como a disposição de folgas ou recortes entre lajes e pilares como a apresentada na figura 25.

**Figura 24 - Exemplos de elementos com concentração de tensões de cisalhamento apontados pelas setas em azul**



Fonte: Elaborada pelo autor.

Em vista disso e considerando que as lajes foram concebidas para se comportarem como faixas de viga apoiadas, naturalmente, os valores do meio de momentos fletor nos meios de vãos devem ser considerados como os máximos de projeto, por isso, procedeu-se com a seleção destes valores. Já para os esforços cortantes foram selecionados os valores de cisalhamento nas bordas das lajes.

**Figura 25 - Exemplos de corte (seta vermelha) no painel de MLCC de uma laje sendo içada para encaixe em um pilar (seta verde)**



Fonte: CDSC (s. d.).

Além disso, duas problemáticas precisaram ser solucionadas na implementação da busca dos espaços de soluções por algoritmo genético: a convergência prematura da busca e a alta demanda computacional. Narino (2014) expõe estes dois conceitos como as principais desvantagens do uso do algoritmo genético da seguinte forma:

- O elevado custo computacional para se alcançar a convergência numérica conforme parâmetros como o tamanho da população, número de gerações, probabilidades de cruzamento e de mutação;
- Possibilidade de convergência de modo prematuro caso um indivíduo mais apto do que a maioria de seus competidores se sobressaia durante o processamento do algoritmo, havendo, por consequência, a rápida reprodução de suas características, diminuindo assim a diversidade da população. Deste modo, o algoritmo converge para soluções subótimas.

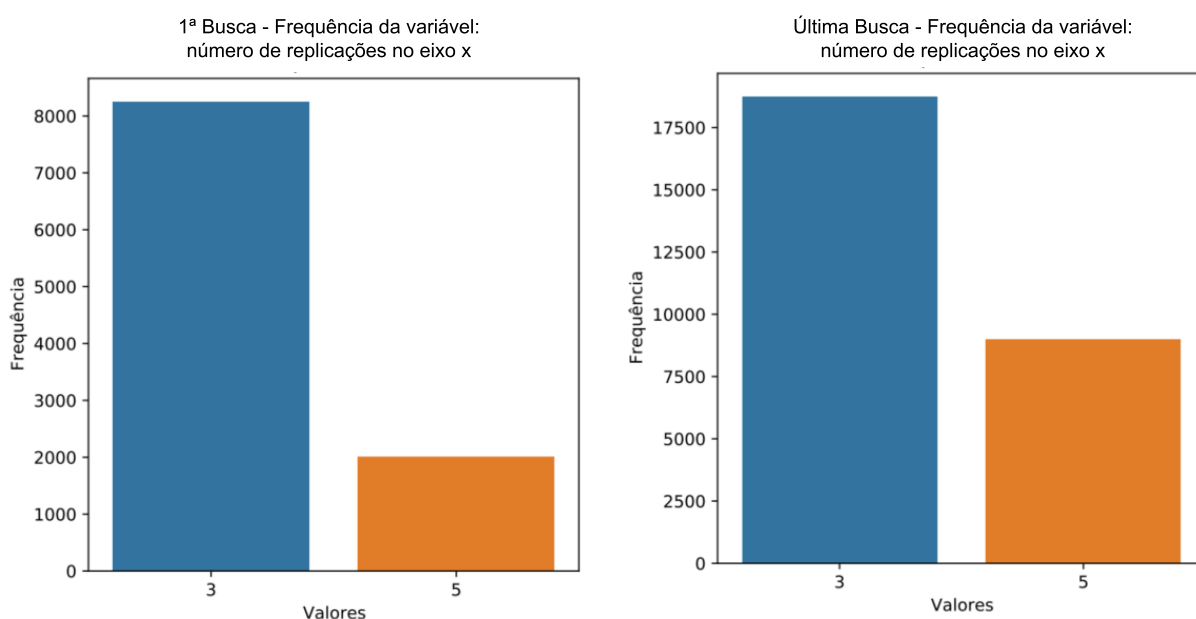
Portanto, na aplicação de sistemas estruturais, o processo de cálculo pode convergir sem explorar todas as possibilidades das variáveis que representam os genomas. Dentro do painel de controle do componente Galápagos é possibilitado ao operador inserir mutações nas gerações, todavia, como o processo acontecia em várias horas de processamento não era viável este recurso.

Já o tempo elevado de processamento computacional está atrelado ao número de variáveis que compõem os genomas, bem como o tamanho de seus intervalos de busca e o tempo de execução dos componentes do Karamba3D que fornecem os dados para a função *fitness*. Esse último fator, por sua vez, está relacionado à complexidade do sistema estrutural modelado, ou seja, edifícios com grande número de pavimentos ou maior quantidade de módulos horizontais tendem a consumir mais da capacidade de processamento.

Para solucionar ambos problemas optou-se por fazer a busca dos espaços de soluções delimitando ou fixando algumas variáveis. Um exemplo deste tipo de estratégia foi realizar as buscas por pavimento, ou ainda, fixar os valores de pé direito para apenas três dentro do intervalo apresentado na tabela 3. Desta forma, por ter um espaço menor de busca de soluções, o componente Galápagos demanda menos da capacidade computacional, além de que, ao se fixar previamente as variáveis, força-se que a exploração ocorra para os valores pretendidos, evitando uma convergência prematura.

Entretanto, mesmo com essa abordagem, foi necessário analisar a frequência com que as opções de valores dentro dos genomas representativos da variáveis eram contemplados para os intervalos correspondentes. Caso tivesse ocorrido houvesse uma má distribuição entre os valores destes intervalos, procedia-se com a fixação dos valores que se pretendiam explorar novos espaços soluções. A figura 26 traz um exemplo em que, após a percepção da deficiência de distribuição das frequências, fez-se novas buscas como o valor fixado de cinco replicações das unidades básicas no eixo x e, após o processo, obteve-se uma distribuição mais equilibrada.

**Figura 26 - Frequência da variável número de replicações das unidades básicas no eixo x na primeira (esquerda) e na última busca (direita) do espaço de soluções**



Fonte: Elaborada pelo autor.

## 5. RESULTADOS E ANÁLISE

Inicialmente, foram obtidas 28.587 instâncias a partir da exploração dos espaços de soluções e organizado em um banco de dados. Em seguida, foram filtrados as linhas do banco de dados que representavam valores duplicados, ou ainda, que possuíam valores indefinidos ou irrepresentáveis. A etapa seguinte filtrou os valores aceitáveis estruturalmente, ou seja, excluiu-se as instâncias que possuíam um ou mais valores de fatores de projeto (DF) maiores que 100%. A tabela 7 apresenta as quantidades de instâncias obtidas após cada etapa explicadas anteriormente.

**Tabela 7 - Quantidade de instâncias após aplicação de filtros no banco de dados**

Total de instâncias obtidas	28.587
Total de instâncias após o filtro de valores duplicados ou indefinidos	27.725
Total de instâncias após o filtro de valores de DF menores que 100%	10.087

Fonte: Elaborada pelo autor.

Os tópicos seguintes apresentam os resultados obtidos a partir de análises considerando os fatores de projeto, a taxa de consumo de material e a frequência natural dos lajes em MLCC dos pavimentos.

Salienta-se que em algumas figuras o termo “*core*” foi utilizado para se referir ao sistema de contraventamento.

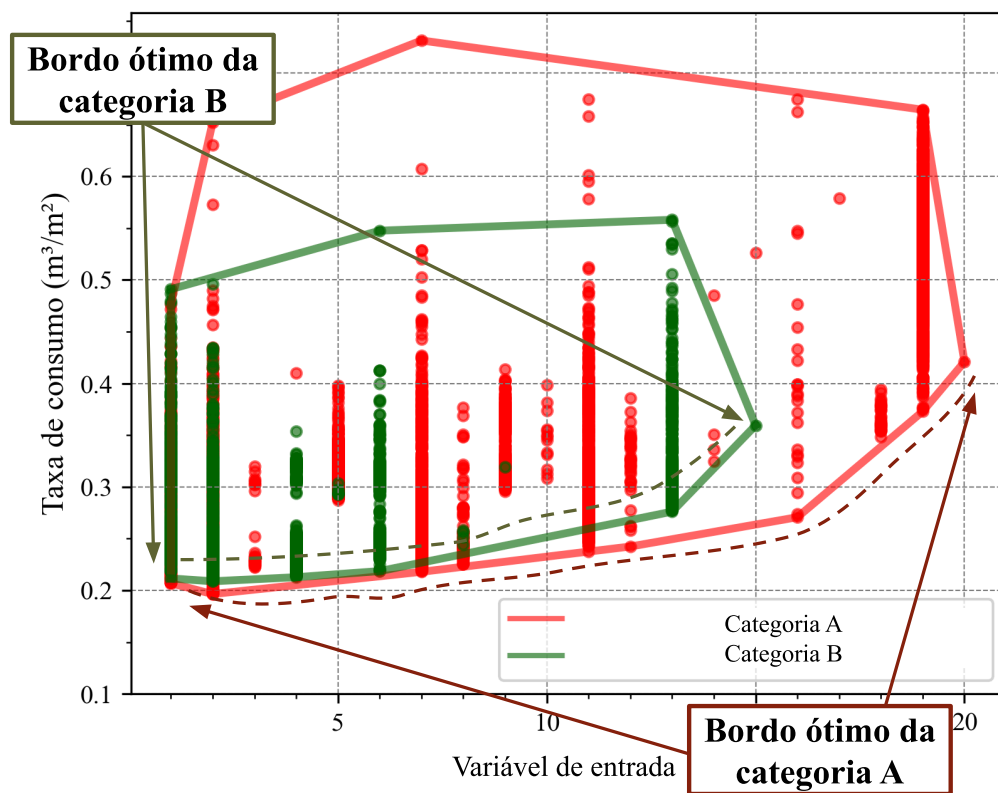
### 5.1. TAXA DE CONSUMO

A exposição dos valores de taxas de consumo de material correspondentes a cada instância será realizada nos tópicos seguintes considerando os painéis de laje em MLCC, as vigas principais e secundárias, os pilares e o centro de contraventamento do sistema estrutural.

Inicialmente, explica-se aqui uma terminologia que será utilizada. Trata-se do conceito de “bordo ótimo”. O bordo ótimo consiste no conjunto de segmentos do agrupamento de

instâncias do espaço de soluções que possuem o melhor aproveitamento de material, ou seja, que representam pontos de projeto com maior economia. A fim de esclarecer visualmente este conceito, a figura 27 apresenta a localização do bordo ótimo para dois agrupamentos fictícios de instâncias.

**Figura 27 - Bordos ótimos de agrupamentos fictícios**



Fonte: Elaborado pelo autor.

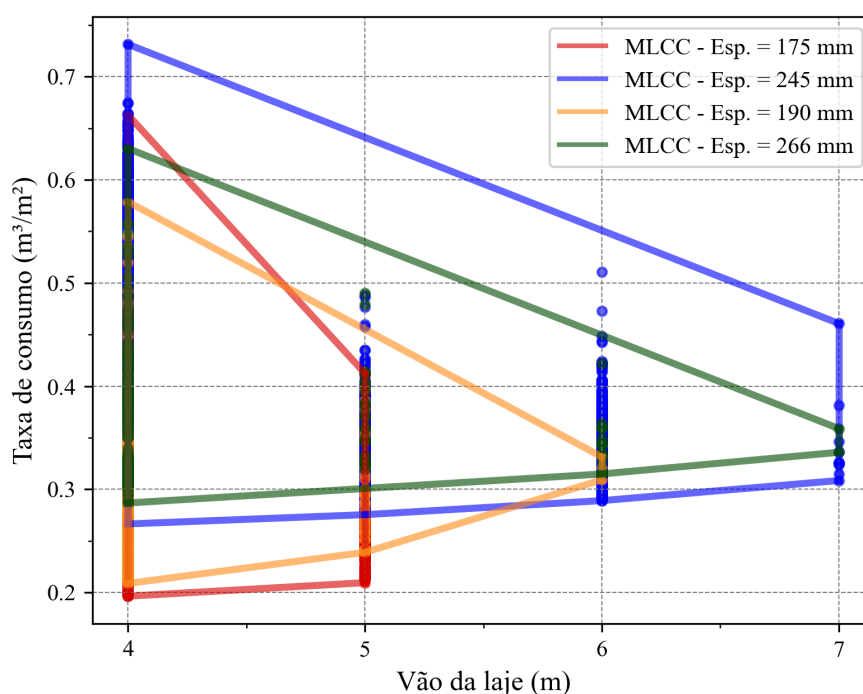
Como apontado na figura 27, quanto mais próximo do eixo das abscissas, mais o bordo ótimo de um determinado agrupamento de pontos implica em eficiência no consumo de material, de modo que as instâncias mais próximas desta região interessam mais em aplicações de projeto.

### 5.1.1. Taxa de consumo relacionado ao vão da laje e variando o tipo de MLCC

Como o catálogo de referência para o trabalho não descreve variação (apêndice C) de densidade para as diferentes classes de MLCC, a espessura e o tamanho do vão dos painéis são os principais fatores relacionados à laje que podem alterar o consumo de material. Com base nisso, elaborou-se o gráfico presente na figura 28, o qual apresenta os pontos a partir de duas variáveis: o vão da laje e a taxa de consumo. Os espaços de soluções estão agrupados em quatro espessuras de MLCC: 175 mm, 245 mm, 190 mm e 266 mm.

Primariamente, observa-se a inexistência de instâncias com as espessuras de 105 mm e 114 mm. Isto está de acordo com as limitações trazidas por FSS (2019) em que para painéis com espessura próximas dos 100 mm não há a possibilidade de vãos maiores que 4 m. Verifica-se também que a área de abrangência dos agrupamentos de instâncias, em termos de tamanho de vão da laje, aumenta à medida que as espessuras de painéis de MLCC também aumentam. Salienta-se que a linha de consumo no bordo ótimo variou entre  $0,2 \text{ m}^3/\text{m}^2$  a  $0,3 \text{ m}^3/\text{m}^2$ .

**Figura 28: Vão da laje  $\times$  taxa de consumo categorizado por espessuras de MLCC**



Fonte: Elaborado pelo autor.

Quanto aos bordos ótimos, observa-se que para a espessura de MLCC de 175 mm ocorre a limitação para 5 m de vão, enquanto que para a espessura de 190 mm, a limitação ocorre para 6 m. Além disso, a escolha destas duas espessuras para projetos demonstra ser eficientes em termos de consumo de material nos intervalos próximos aos 5 m de vão. Quanto aos bordos ótimos referentes às espessuras de 245 mm e 266 mm, verifica-se que a taxa de consumo aumenta suavemente à medida que se aumenta o vão da laje. Outro aspecto é que a espessura de 245 mm demonstrou ser a melhor opção entre 5,70 m a 7,00 m de vão da laje.

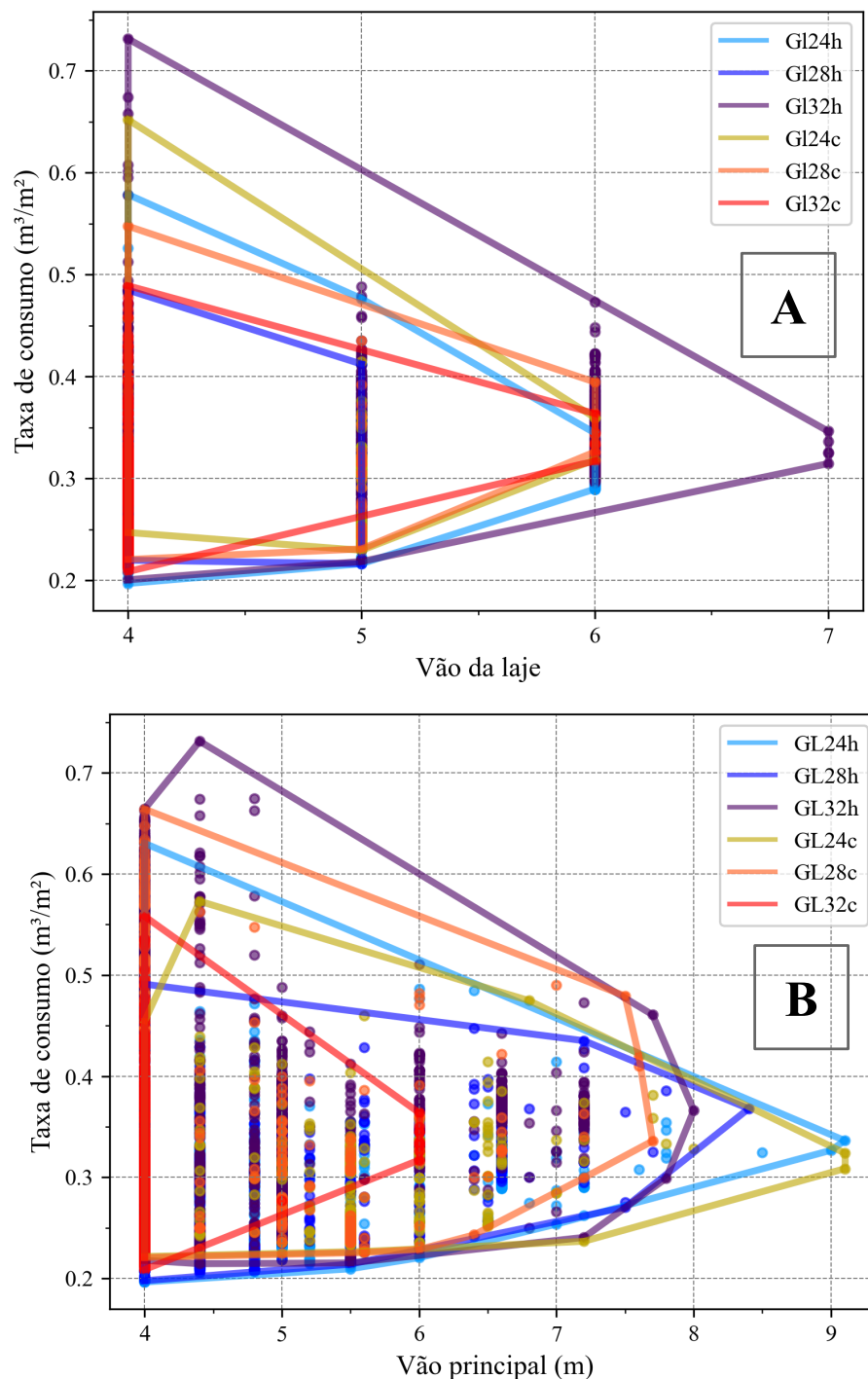
#### 5.1.2. Taxa de consumo relacionado ao vão e variando o tipo de viga

Diferente das classes de MLCC, as classes de MLC apresentam variação do peso próprio, de modo que é razoável estudar a taxa de consumo das vigas sob a perspectiva do material constituinte. O gráfico A presente na figura 29 apresenta os pontos a partir de duas variáveis: o vão da laje (distância entre as vigas de apoios da laje) e a taxa de consumo. Os espaços de soluções estão agrupados nas classes de resistência de MLC das vigas secundárias.

Deste modo, apesar do peso próprio mais elevado, observa-se que o algoritmo genético priorizou a busca objetivando a classe de resistência superior do tipo homogênea, ou (GL32h). Diferente das outras classes, esta apresenta um bordo ótimo que cresce numa taxa menos acentuada, o que a configura como a melhor opção para as vigas secundárias. Fenômeno oposto aconteceu para a classe GL32C, fato que pode ser justificado em razão do módulo de elasticidade menor quando comparado a classe GL32h. Também pode ser observado que a taxa de consumo das instâncias próximas ao bordo ótimo acabam por ter seus valores elevados a partir do vão de 5 m, fato comum a todas as classes de resistência. Ainda considerando os bordos ótimos, observa-se que, embora a classe GL32h possua peso próprio maior, aparentemente, instâncias com este tipo de peça estrutural representam uma economia de material maior também a partir de 5 m.

Semelhante ao que foi feito para as secundárias, verificou-se a relação entre o vão principal e a taxa de consumo através do gráfico B apresentado na figura 29. Os espaços de soluções estão agrupados nas classes de resistência de MLC das vigas principais.

**Figura 29: Vão da laje  $\times$  taxa de consumo categorizado pelas classes de resistência de MLC das vigas secundárias (A) e Vão principal  $\times$  taxa de consumo categorizado pelas classes de resistência de MLC das vigas principais (B)**



Fonte: Elaborado pelo autor.

No gráfico B, observa-se que as classes GL24h e GL24c, cujos valores de peso próprios são os menores, permitem que as instâncias possuam comprimentos de vigas

principais maiores. Há uma grande diferença de abrangência entre GL32h e GL32c. Tal fenômeno pode ser explicado pelo fato do maior peso próprio de GL32h ser compensado por aumento em valores de resistência, enquanto que em GL32c não acontece na mesma proporção.

Quanto aos bordos ótimos destacam-se dois fatos para dois intervalos distintos de tamanho de vão principal: o primeiro é que para vãos entre 4 e 6 metros é pouco relevante a classe de MLC quanto a economia de material (com exceção da classe GL32c) já que acontece a sobreposição dos bordos neste intervalo; o segundo fato é que a partir de 7 metros de vão das vigas principais, as classes com menor peso próprio passam a implicar em taxas de consumo menores que as demais nos bordos ótimos.

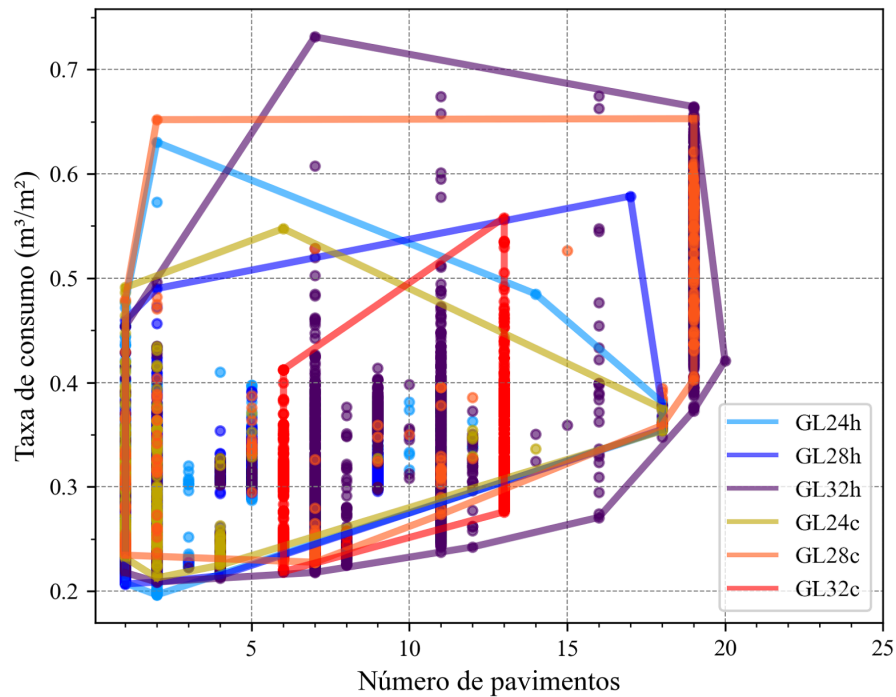
#### 5.1.3. Taxa de consumo relacionada aos pilares

Conforme foi feito para as outras peças estruturais, relacionou-se a taxa de consumo com uma variável paramétrica que mais sofre influência dos pilares, no caso, número de pavimentos para a concepção do gráfico apresentado na figura 30. Os espaços de soluções estão agrupados nas classes de resistências de MLC dos pilares.

Observa-se que para este gráfico não se consegue levantar relações entre capacidades de resistência dos pilares com a abrangência dos espaços de soluções. Por exemplo, o agrupamento de instâncias de pilares com classe de MLC do tipo GL32c é menor que a classe que a antecede em valores de resistência, a classe GL28c. De todo modo, é perceptível certa tendência de aumento da taxa de consumo ao passo em que se aumenta o número de pavimentos.

Já os bordos ótimos das classes de MLC indicam que as instâncias com melhores aproveitamento de material possuem a classe GL32h como material constituinte dos pilares para a maior parte do intervalo de número de pavimentos estudado.

**Figura 30: Número de pavimentos  $\times$  taxa de consumo categorizado pelas classes de resistência de MLC dos pilares**



Fonte: Elaborado pelo autor.

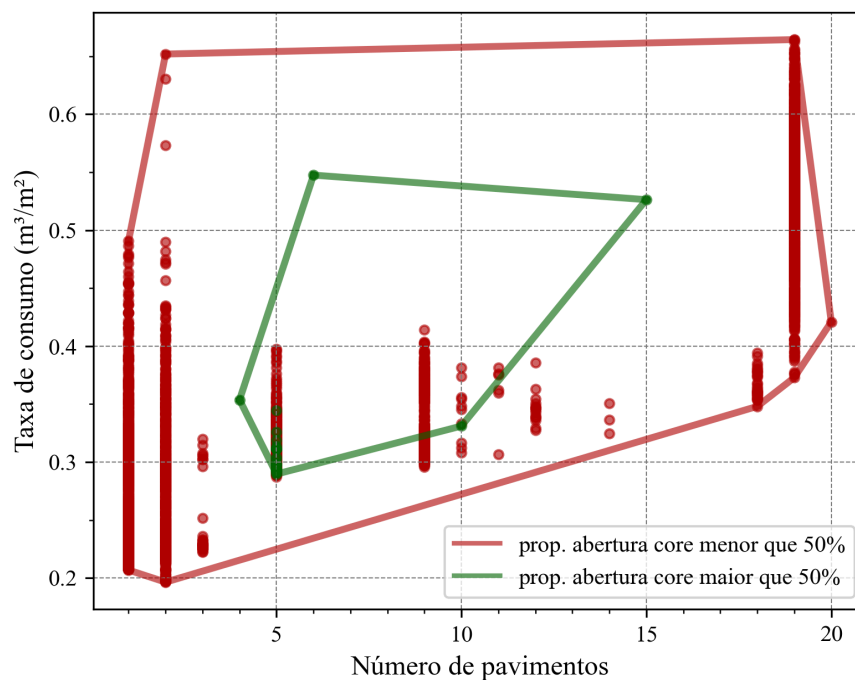
#### 5.1.4. Taxa de consumo relacionada ao centro de contraventamento

No intuito de avaliar as nuances entre a relação das taxas de consumo, número de pavimentos e rigidez oferecida pelo centro de contraventamento, concebeu-se o gráfico da figura 31, o qual apresenta os pontos a partir de duas variáveis: o número de pavimentos e a taxa de consumo de material. Os espaços de soluções estão agrupados da seguinte forma: instâncias com proporções de abertura em planta do sistema de contraventamento menores que 50% do vão da laje (mais robusto) e maiores que 50% (menos robusto).

Esta configuração de gráfico permite verificar a relação da taxa de consumo do material com o número de pavimentos considerando os valores da proporção das aberturas do núcleo de contraventamento. Nesse aspecto, Dernayka et. al (2022) sugerem que a adição de um centro de contraventamento robusto contribui para a economia do consumo dos materiais constituintes da estrutura, como lajes de painéis de MLCC, fato que pode ser comprovado a partir do bordo ótimo para as instâncias com menor abertura, ou seja mais robusto, conforme é perceptível no gráfico.

Outro fato observado a partir do bordo ótimo da figura 31 é que não implica em economia de material optar por edifícios com apenas um pavimento, já que, para o número de pavimentos seguinte, houve uma diminuição da taxa de consumo.

**Figura 31: Número de pavimentos  $\times$  taxa de consumo categorizado por proporções de abertura do centro de contraventamento**



Fonte: Elaborado pelo autor..

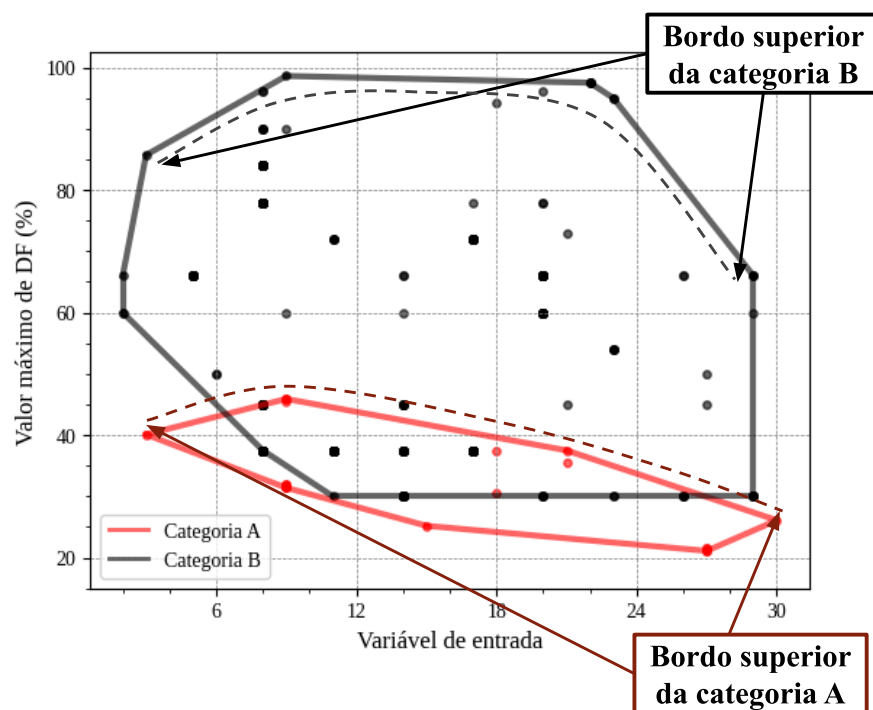
## 5.2. FATORES DE PROJETO (DF)

As seções seguintes apresentam os resultados obtidos pela exploração de espaços de soluções ao analisar os valores de fatores de projeto (DF) de cada instância a partir de variáveis de entrada correspondentes. A seguir serão apresentados graficamente as relações entre os fatores de projeto e diversas variáveis consideradas como parâmetros de projeto para lajes, vigas principais e secundárias, pilares e o centro de contraventamento.

De modo análogo ao que foi feito para o conceito de bordo ótimo, explica-se aqui outra terminologia que será utilizada. Trata-se do conceito de “bordo superior”. O bordo superior consiste no conjunto de segmentos do agrupamento de instâncias do espaço de soluções cujas peças estruturais estão submetidas a valores próximos da máxima capacidade

do sistema, ou seja, representam pontos de projeto com maior eficiência estrutural. A fim de esclarecer visualmente este conceito, a figura 32 apresenta a localização do bordo superior para dois agrupamentos fictícios de instâncias.

**Figura 32 - Bordos superiores de agrupamentos fictícios**



Fonte: Elaborado pelo autor.

Antes, será apresentada uma breve análise geral dos valores de DF. A tabela 8 expõe a classificação dos valores máximos de DF de cada instância (ponto de projeto):

**Tabela 8 - Classificação dos valores máximos de DF de cada instância**

Descrição	Número de instâncias
Instâncias com valores máximos de DF relacionados às lajes	742
Instâncias com valores máximos de DF relacionados às vigas secundárias	119
Instâncias com valores máximos de DF relacionados às vigas principais	6310
Instâncias com valores máximos de DF relacionados aos pilares	2916

Fonte: Elaborada pelo autor.

O gráfico A apresentado na figura 33 representa os pontos a partir de duas variáveis: o número de pavimentos e a taxa de consumo de material. Os espaços de soluções estão agrupados em instâncias cujo máximo valor de DF está relacionado às vigas secundárias, às vigas principais, aos pilares e às lajes. A partir deste gráfico permite-se avaliar quais dos elementos governam a aceitabilidade estrutural. Observa-se que as vigas principais possuem o agrupamento de instâncias mais abrangente, fato que pode ser explicado em razão destas peças receberem grande solicitação devido ao carregamento das lajes, além de sua contribuição para o contravento dos sistemas estruturais.

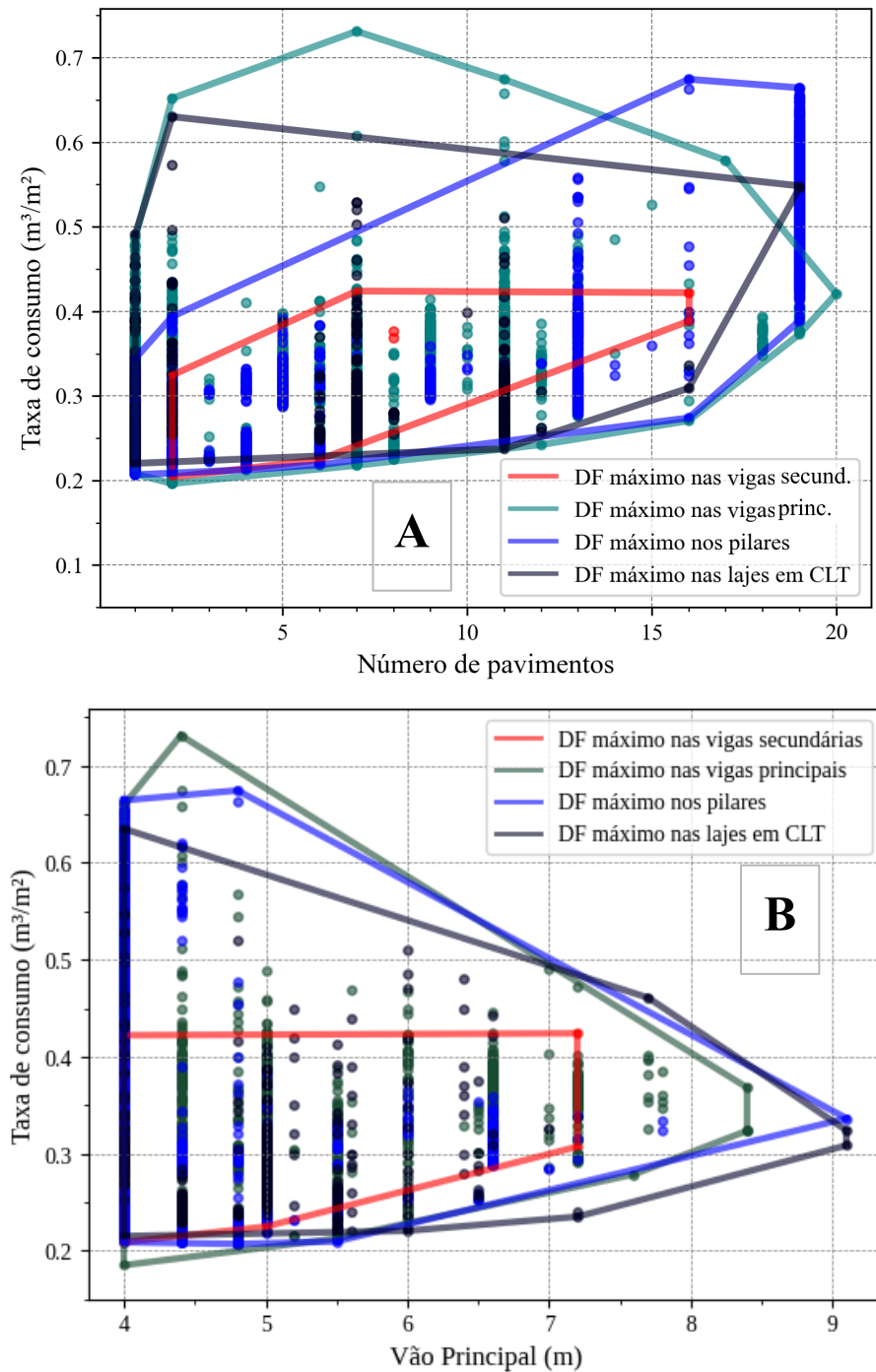
Verifica-se também que a partir do décimo sétimo pavimento os máximos valores de DF estão relacionados às lajes, às vigas principais e aos pilares. De modo especial, salienta-se que as vigas secundárias governam casos entre 2 e 16 pavimentos, os quais demonstram ter taxas maiores nos bordos ótimos a partir do sétimo pavimento, indicando que neste intervalo é mais eficiente trabalhar com seções maiores e classes mais resistentes para estas peças estruturais.

De todo o modo, a forte relação apresentada no gráfico A entre os valores de fatores de projeto relacionados aos pilares e o número de pavimentos já é esperada, uma vez que, com o aumento do número de pavimentos, mais intenso é o fluxo de cargas a partir dos pilares até as fundações. De modo análogo, o agrupamento referente aos máximos valores de projeto relacionados às lajes também é consideravelmente abrangente. Isto pode ser explicado, pois à medida que o número de pavimento aumenta, mais solicitadas são os painéis de laje, uma vez que funcionam como elementos de contraventamento. Tal fenômeno será melhor explicado mais adiante.

Já no gráfico B da mesma figura, cuja abscissa está relacionada ao tamanho do vão principal, observa-se que, a partir do valor de 7,50 m de vão, os máximos valores de DF estão relacionados às lajes, às vigas principais e aos pilares. De modo especial, salienta-se que as vigas secundárias governam casos entre 4 e 7,20 m de vão, os quais demonstram ter taxas maiores nos bordos ótimos com vãos maiores que 5 m.

Observa-se também neste gráfico que a categoria referentes aos DF máximos relacionados às vigas principais se limita o valor de vão igual a 8,40 m. Neste sentido, o fato do aumento do vão principal comprometer os pilares e não as vigas principais em intervalos maiores que este valor não é algo tão esperado. Porém, isto pode indicar que, à medida que se aumenta as alturas das seções destas vigas a fim de alcançarem vãos maiores que 8,40 m, os esforços oriundos do peso destas peças estruturais comprometem mais os pilares do que os esforços de flexão gerados nas vigas principais.

**Figura 33: Número de pavimentos  $\times$  Taxa de consumo (%) (A) e Vão principal  $\times$  Taxa de consumo (%) (B) relacionada a todos elementos estruturais e categorizada pelos tipo de fator de projeto**



Fonte: Elaborado pelo autor.

### 5.2.1. DF das lajes

Inicialmente, observa-se que ao aplicar um filtro para buscar as instâncias que tiveram como valor máximo de DF relacionado às lajes de MLCC, constatou-se que as instâncias obtidas eram governadas principalmente pela deflexão máxima, e ainda, de modo secundário, pela tensão de cisalhamento por rolamento. A tabela 9 representa esta distribuição de instâncias por categorias de valores de DF.

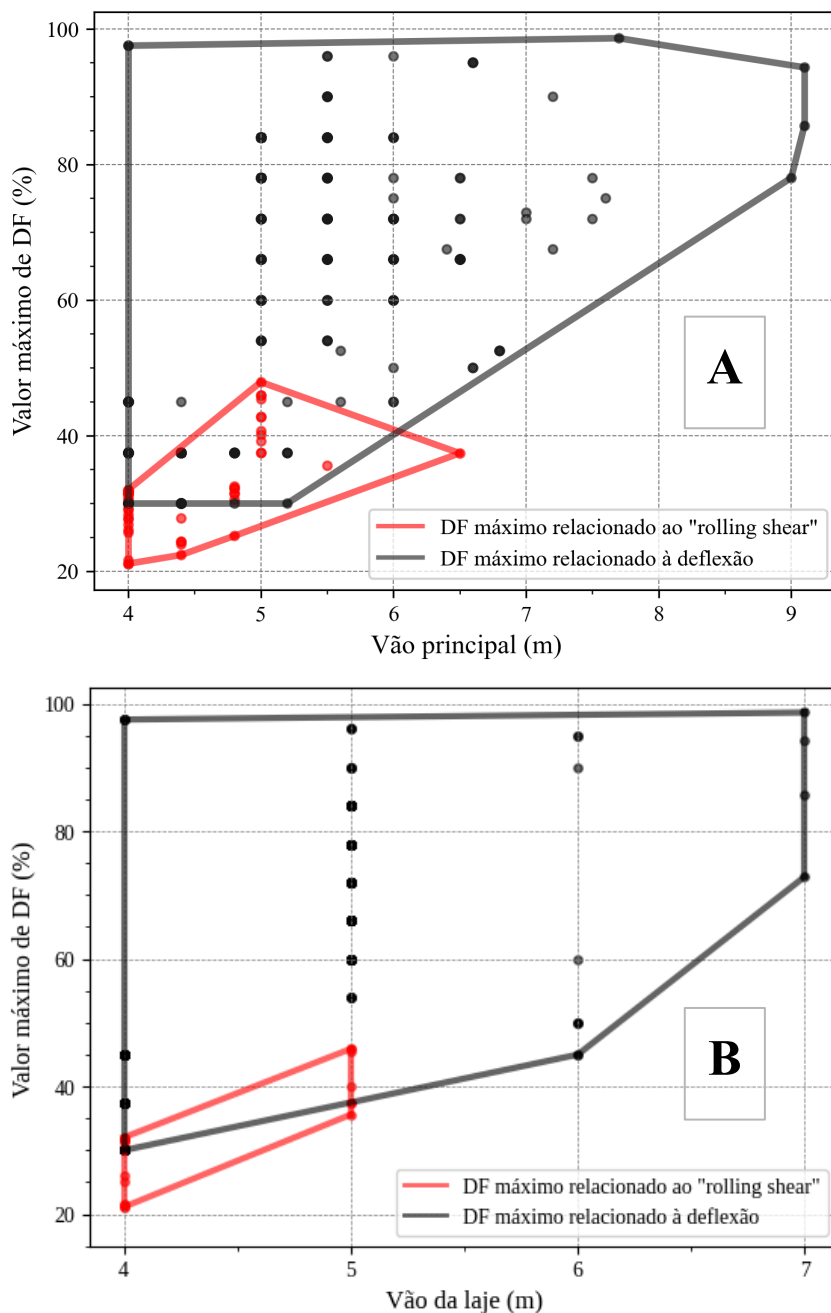
**Tabela 9 - Distribuição de instâncias por categorias de valores de DF relacionados às lajes**

<b>Descrição das instâncias com valores máximos de DF relacionados às lajes</b>	<b>Número de instâncias</b>
Instâncias com valores máximos de DF relacionados às tensões normais obtidas considerando apenas as ações gravitacionais	0
Instâncias com valores máximos de DF relacionados às tensões normais obtidas considerando a combinação das ações gravitacionais com as ações do vento	0
Instâncias com valores máximos de DF relacionados às tensões de cisalhamento obtidas considerando apenas as ações gravitacionais	0
Instâncias com valores máximos de DF relacionados às tensões de cisalhamento obtidas considerando a combinação das ações gravitacionais com as ações do vento	0
Instâncias com valores máximos de DF relacionados às tensões de cisalhamento por rolamento obtidas considerando apenas as ações gravitacionais	50
Instâncias com valores máximos de DF relacionados às tensões de cisalhamento por rolamento obtidas considerando a combinação das ações gravitacionais com as ações do vento	0
Instâncias com valores máximos de DF relacionados às deflexões no meio da laje	692

Fonte: Elaborada pelo autor.

Os gráficos apresentados na figura 34 representam os pontos a partir das seguintes variáveis: o valor do vão principal (A) e do vão secundário (B) nas abscissas e o valor máximo de DF relacionados ao painel de MLCC que formam as lajes dos pavimentos nas ordenadas. Os pontos foram classificados pelas categorias de DF descritas conforme a tabela 9.

**Figura 34: Vão principal  $\times$  Valor máximo de DF (%) (A) e Vão da laje  $\times$  Valor máximo de DF (%) (B) relacionado às lajes categorizado pelos tipo de fator de projeto**



Fonte: Elaborado pelo autor.

Como explicado no item 4.3.1.1, painéis de MLCC com baixa relação vão/espessura tendem a ser mais suscetíveis ao cisalhamento por rolamento. Considerando isto compreende-se a concentração de pontos relacionados aos fatores de projeto de rolamento para faixas de vão menores. No mais, é razoável que a maior parte das instâncias sejam governados pelos valores máximos de deflexões, sobretudo com o aumento do vão.

Outro aspecto importante observado nos gráficos da figura 34 é que quando as instâncias são governadas pelo cisalhamento de rolamento a eficiência estrutural é bem abaixo dos pontos de projeto governados pela máxima deflexão como pode ser visto a partir dos bordos superiores. No gráfico A, o cisalhamento é preponderante com vãos principais entre 4 e 6,5 m, enquanto que a categoria representada pela deflexão engloba instâncias para o intervalo de 4 a 9,2 m.

Já na figura B, o cisalhamento prepondera-se entre 4 e 5 m de vão de laje, enquanto que a deflexão engloba instâncias para o intervalo de 4 a 7 m.

#### 5.2.2. DF das vigas secundárias

Primeiramente, observa-se que ao aplicar um filtro para a realização da busca das instâncias que tiveram como valor máximo de DF relacionado às vigas secundárias, constatou-se que todas as instâncias obtidas eram governadas pela máxima deflexão, não havendo elementos deste tipo governados pelas tensões de cisalhamento ou normais, conforme está apresentado na tabela 10.

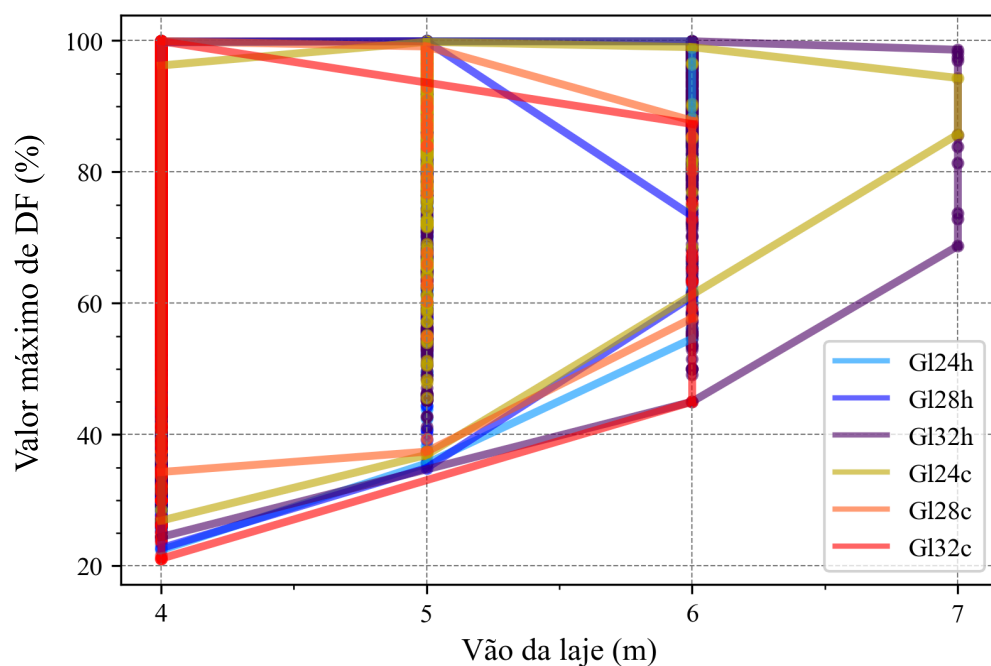
**Tabela 10 - Distribuição de instâncias por categorias de valores de DF relacionados às vigas secundárias**

<b>Descrição das instâncias com valores máximos de DF relacionados às vigas secundárias</b>	<b>Número de instâncias</b>
Instâncias com valores máximos de DF relacionados às tensões normais obtidas considerando apenas as ações gravitacionais	0
Instâncias com valores máximos de DF relacionados às tensões normais obtidas considerando a combinação das ações gravitacionais com as ações do vento	0
Instâncias com valores máximos de DF relacionados às tensões de cisalhamento obtidas considerando apenas as ações gravitacionais	0
Instâncias com valores máximos de DF relacionados às tensões de cisalhamento obtidas considerando a combinação das ações gravitacionais com as ações do vento	0
Instâncias com valores máximos de DF relacionados às deflexões no meio do vão	119

Fonte: Elaborada pelo autor.

O gráfico da figura 35 representa os pontos a partir de duas variáveis: o comprimento das vigas secundárias (vão da laje) e o valor máximo de DF (%) relacionado às vigas secundárias. A partir das categorias de classes de resistência de MLC que compõem estas vigas, agrupou-se os espaços de soluções. Verifica-se que à medida que os valores de vão aumentam, os valores máximos de DF também aumentam. Outra observação é que as vigas secundárias podem vencer de 4 a 7 m pela GL32h ou GL24c. Porém, todas estas tipologias de MLC apresentam boa eficiência mecânica entre 4 e 5 m, já que os bordos superiores encontram-se próximos do valor de 100%.

**Figura 35: Vão da laje  $\times$  Valor máximo de DF (%) categorizado pela classe de resistência de MLC das vigas secundárias**



Fonte: Elaborado pelo autor.

### 5.2.3. DF das vigas principais

Inicialmente, é apresentada a tabela 11 com a quantidade de instâncias com valores máximos de DF relacionados às vigas principais e suas respectivas categorias.

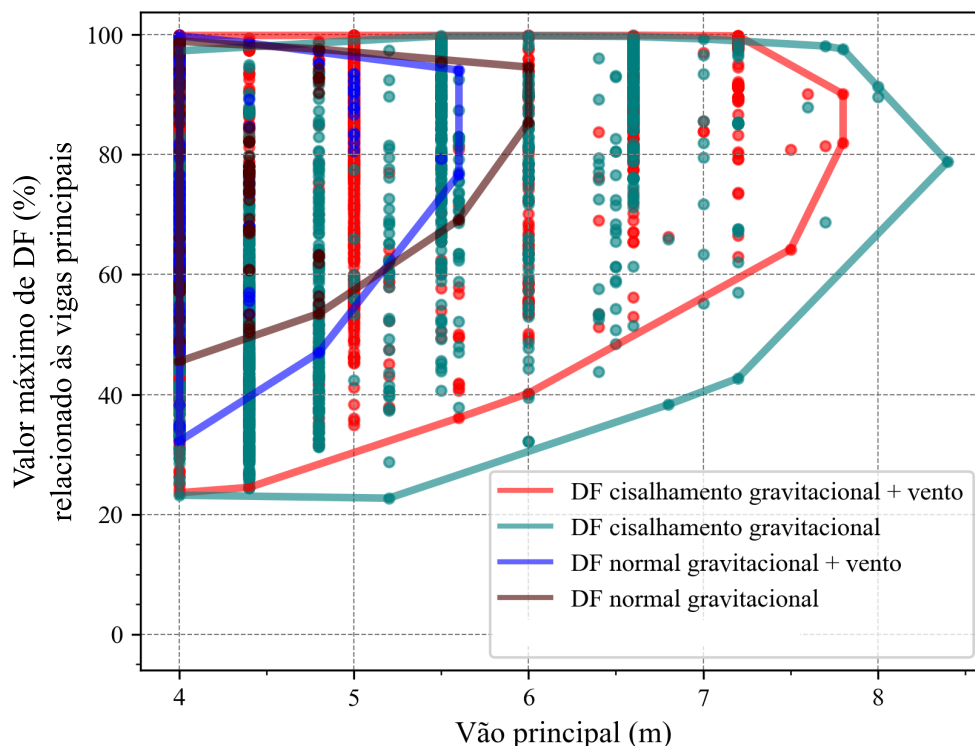
**Tabela 11 - Distribuição de instâncias por categorias de valores de DF relacionados às vigas principais**

<b>Descrição das instâncias com valores máximos de DF relacionados às vigas principais</b>	<b>Número de instâncias</b>
Instâncias com valores máximos de DF relacionados às tensões normais obtidas considerando apenas as ações gravitacionais	206
Instâncias com valores máximos de DF relacionados às tensões normais obtidas considerando a combinação das ações gravitacionais com as ações do vento	95
Instâncias com valores máximos de DF relacionados às tensões de cisalhamento obtidas considerando apenas as ações gravitacionais	1597
Instâncias com valores máximos de DF relacionados às tensões de cisalhamento obtidas considerando a combinação das ações gravitacionais com as ações do vento	4412
Instâncias com valores máximos de DF relacionados às deflexões no meio do vão	0

Fonte: Elaborada pelo autor.

A fim de definir qual tipo de esforço governa o dimensionamento das vigas analisadas sob a perspectiva do aumento do tamanho do vão, o gráfico da figura 36 representa os pontos a partir de duas variáveis: o comprimento das vigas do vão principal e o valor máximo de DF relacionado a estas mesmas vigas. A partir das categorias descritas na tabela 11, agrupou-se os espaços de soluções.

**Figura 36: Vão principal  $\times$  Valor máximo de DF (%) relacionado às vigas principais categorizado pelos tipo de fator de projeto**



Fonte: Elaborado pelo autor.

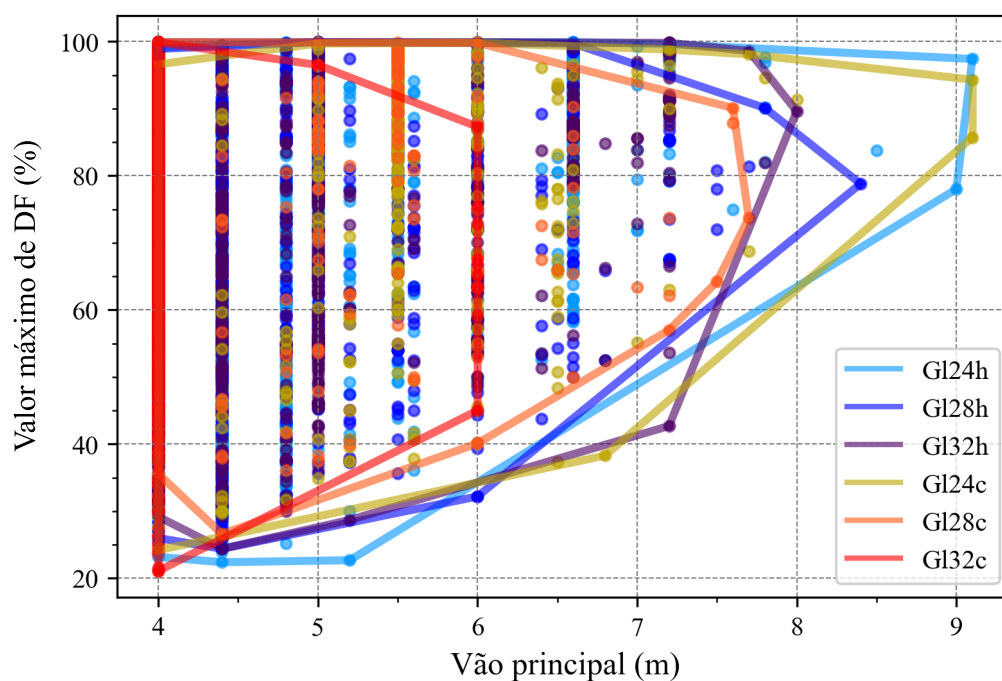
Verifica-se que as instâncias governadas pelo cisalhamento (com ação gravitacional combinada ou não com vento) atingem vãos máximos próximos dos 8 metros. Já os valores de DF relacionados às tensões normais se limitam a vãos com cerca de 6 metros. Como já mencionado, pelo fato das vigas principais serem bastante solicitadas, estas acabam por demandar grande altura em sua seção transversal, conseqüentemente, a relação  $h/L$  também aumenta o que implica na preponderância dos valores de DFs relacionados às tensões de cisalhamento sobre os DFs relacionados às tensões normais (este fenômeno já foi abordado no item 4.3.1.1).

Também é observado o indicativo de que a ação do vento acaba por limitar que as instâncias alcancem vãos com cerca de 8 m quando se trata de tensões de cisalhamento.

O gráfico da figura 37 representa os pontos a partir de duas variáveis: o comprimento das vigas principais e o valor máximo de DF (%). A partir das categorias de classes de resistência de MLC que compõem as vigas principais, agrupou-se os espaços de soluções. Verifica-se que à medida que os valores de vão aumentam, os valores máximos de DF também aumentam. As classes de MLC com valores de peso próprio menores (GL24h e

GL24c) apresentam uma abrangência maior que as demais, alcançando assim vãos maiores. Observa-se que a classe GL32C não atingiu valores de vão principal maiores que 6 metros.

**Figura 37: Vão principal  $\times$  Valor máximo de DF (%) categorizado pela classe de resistência de MLC das vigas principais**



Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 5.2.4. DF dos pilares

Inicialmente, observa-se que ao aplicar um filtro para buscar as instâncias que tiveram como valor máximo de DF relacionado aos pilares, constatou-se que as instâncias obtidas eram governadas pelo deslocamento de topo, pelas tensões normais oriundas das ações gravitacionais e das tensões normais obtidas pela combinação das ações gravitacionais com a ação do vento, conforme pode ser observado na figura 38 e na tabela 12.

**Tabela 12 - Distribuição de instâncias por categorias de valores de DF relacionados aos pilares**

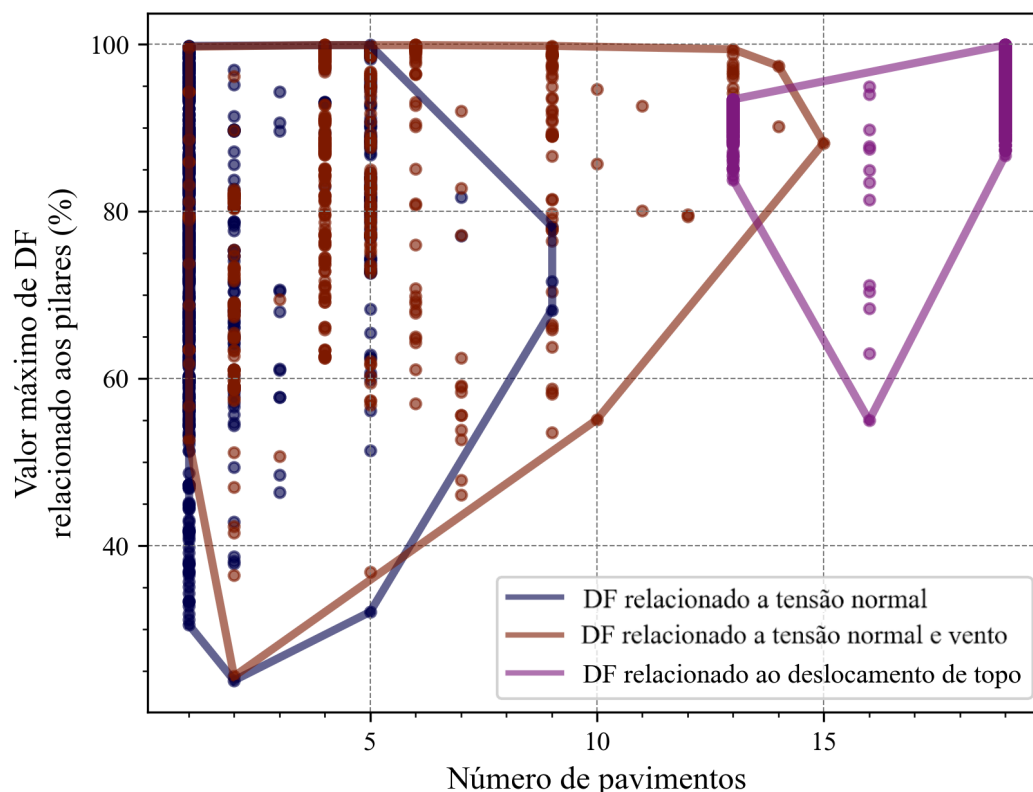
<b>Descrição das instâncias com valores máximos de DF relacionados aos pilares</b>	<b>Número de instâncias</b>
Instâncias com valores máximos de DF relacionados às tensões normais obtidas considerando apenas as ações gravitacionais	551
Instâncias com valores máximos de DF relacionados às tensões normais obtidas considerando a combinação das ações gravitacionais com as ações do vento	1076
Instâncias com valores máximos de DF relacionados às tensões de cisalhamento obtidas considerando apenas as ações gravitacionais	0
Instâncias com valores máximos de DF relacionados às tensões de cisalhamento obtidas considerando a combinação das ações gravitacionais com as ações do vento	0
Instâncias com valores máximos de DF relacionados ao deslocamento de topo	1289

Fonte: Elaborada pelo autor.

O gráfico da figura 38 apresenta os pontos a partir de duas variáveis: o número de pavimentos e o valor máximo de DF. As instâncias representadas em pontos no gráfico referem-se apenas aquelas cujo maior valor de fator de projeto esteja relacionado aos pilares, sendo estes fatores relacionados às categorias de DF apresentadas na tabela 12. Como pode ser visto tanto na figura 38, como na tabela 12, não houveram instâncias com máximos valores de DF relacionados aos pilares e a esforços de cisalhamento.

Salienta-se que é perceptível que os valores de tensões normais são o principal fator de projeto que limita os pilares até o décimo quinto pavimento. Ainda considerando este tipo de esforço, observa-se que maiores velocidades de vento permitem a geração de instâncias com número de pavimento maiores que nove. Também é perceptível que o DF relacionado ao deslocamento de topo passa a ser preponderante a partir do décimo terceiro pavimento.

**Figura 38: Número de pavimentos  $\times$  Valor máximo de DF (%) relacionado aos pilares categorizado pelos tipo de fator de projeto**

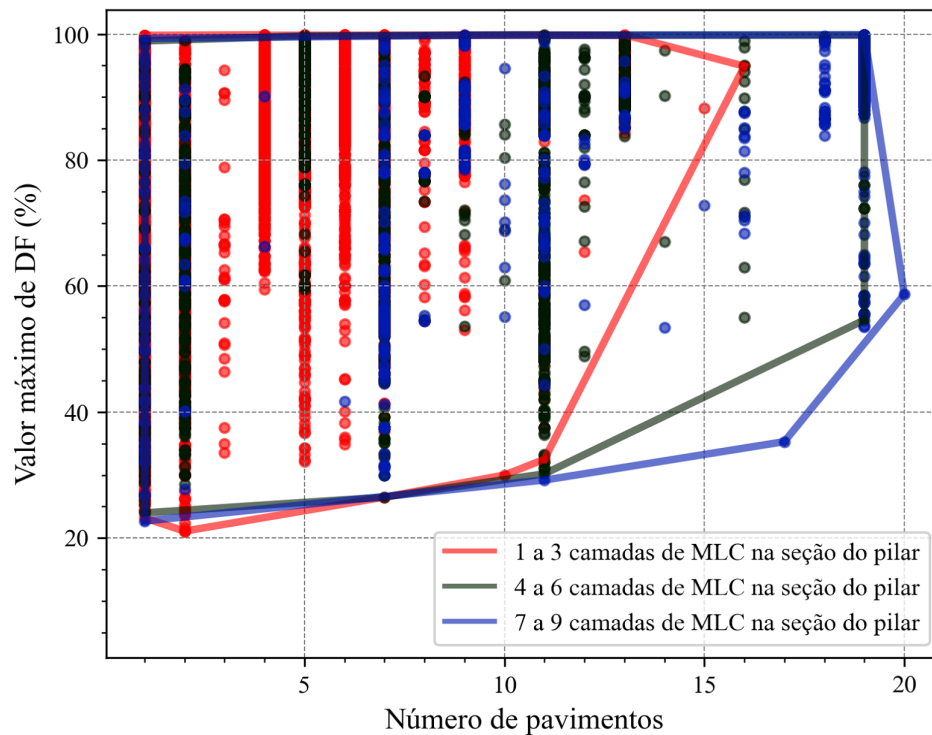


Fonte: Elaborado pelo autor.

Na literatura há trabalhos que estudam a influência da ação do vento em sistemas estruturais de edifícios de multiandares, como é o caso do estudo realizado por Vilguts et al. (2021) em que, através de análises paramétricas, foram concebidos espaços de soluções tendo como critério a razão entre o deslocamento lateral e a altura de pé direito. O estudo concluiu que variáveis como as dimensões da seção transversal dos pilares são fatores significativos para o deslocamento de topo de um edifício.

Neste sentido, o gráfico da figura 39 apresenta os pontos de projeto a partir de duas variáveis: o valor do fator de projeto para o máximo valor de DF e o número de pavimentos para todas as 10087 instâncias. Os espaços de soluções estão agrupados do seguinte modo: 1 a 3 camadas de MLC; 4 a 6 camadas de MLC; e 7 a 9 camadas de MLC. Sob o aspecto do número de camadas, salienta-se que a redução da abrangência se intensifica à medida que o número de camadas diminui a partir do décimo primeiro andar.

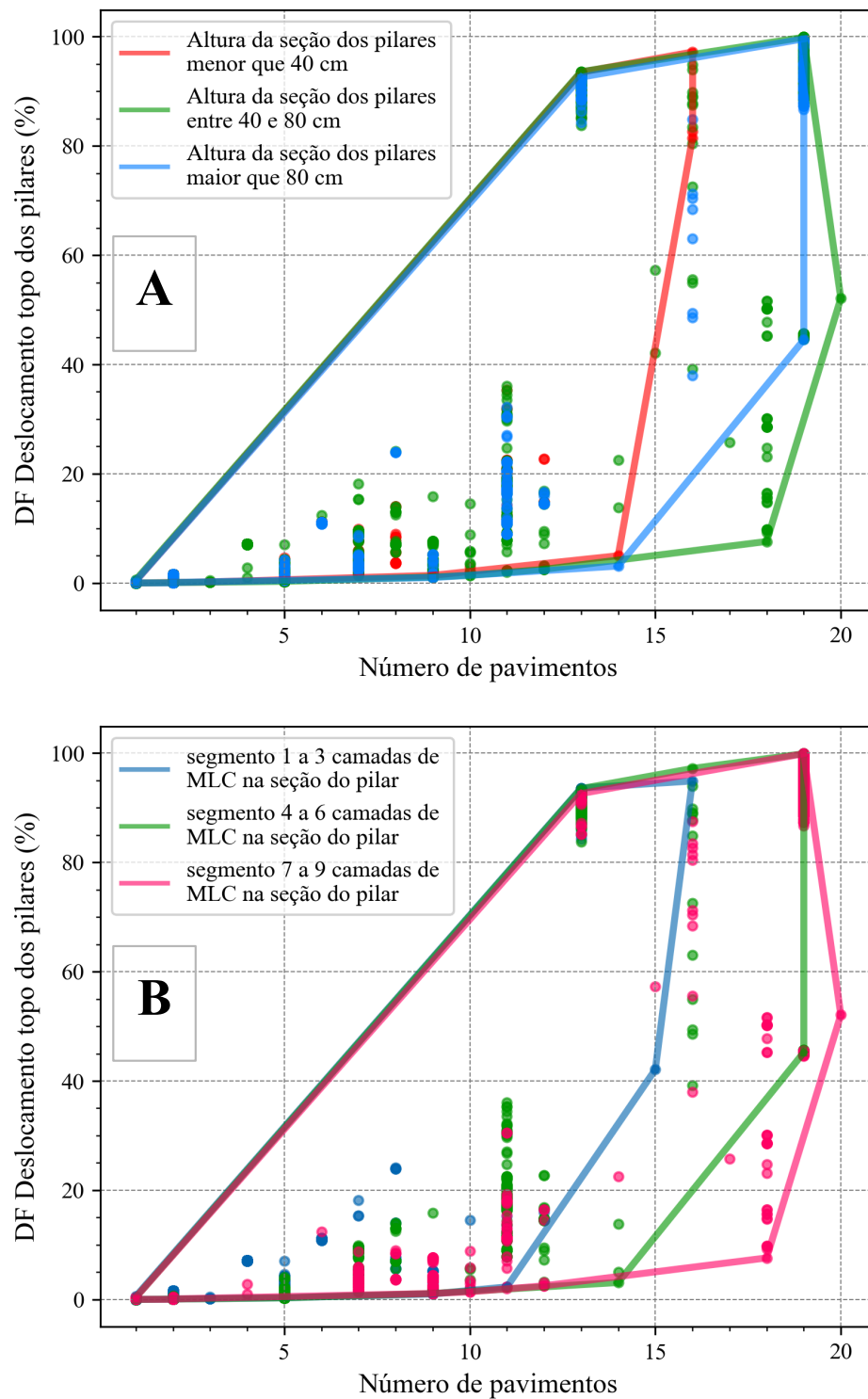
**Figura 39: Número de pavimentos  $\times$  Valor máximo de DF (%) categorizado pelo número de camadas de MLC na seção do pilar**



Fonte: Elaborado pelo autor.

A fim de investigar tal fato, concebeu-se os gráficos da figura 40 que apresentam os pontos a partir de duas variáveis: o valor do fator de projeto para o deslocamento de topo dos pilares e o número de pavimentos. Em A, os espaços de soluções estão agrupados em relação a três faixas de alturas das seções transversais dos pilares, sendo estas: valores menores que 40 cm; valores entre 40 cm e 80 cm; e valores maiores que 80 cm. Já em B, são apresentados os agrupamentos do seguinte modo: 1 a 3 camadas de MLC; 4 a 6 camadas de MLC; e 7 a 9 camadas de MLC. Com estes gráficos é possível avaliar como o número de pavimentos e as variáveis relacionadas a seção transversal dos pilares (altura e número de camadas) afetam o deslocamento de topo.

**Figura 40: Número de pavimentos  $\times$  DF relacionado ao deslocamento de topo (%) categorizado pela altura da seção de pilares em (A) e pelo número de camadas de MLC na seção do pilar em (B)**



Fonte: Elaborado pelo autor.

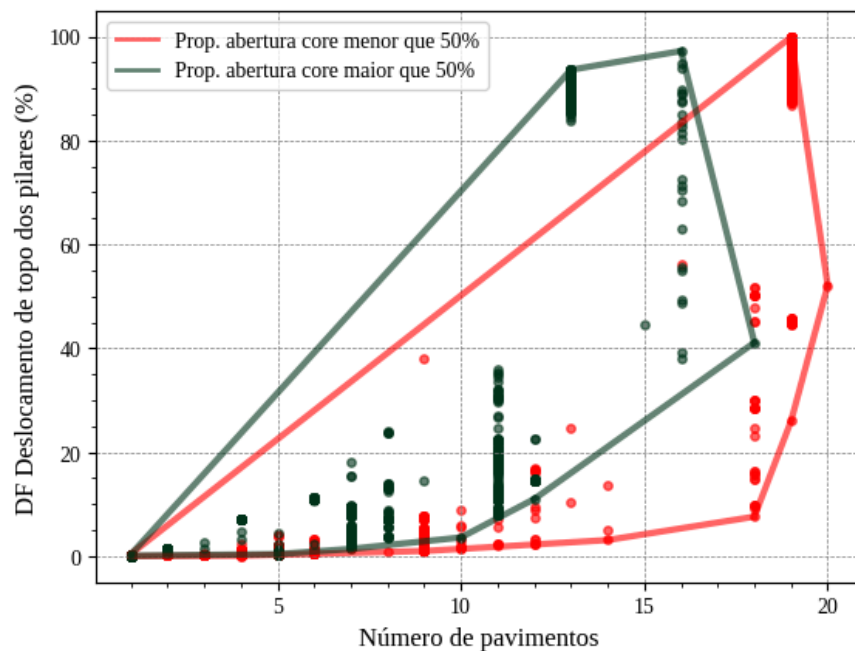
Detalhando a análise do gráfico A da figura 40, o deslocamento de topo começa a governar as configurações de sistemas estruturais a partir do décimo terceiro pavimento. Já entre 16 e 19 pavimentos, a categoria com 4 a 6 camadas apresenta um bordo superior igual a com 7 a 9 camadas, ou seja, para ambas contemplam-se bons resultados, porém, apenas as instâncias categorizadas com 7 a 9 camadas alcançaram o vigésimo pavimento. Verifica-se ainda que no intervalo de 13 a 16 pavimentos, o número de camadas não demonstra relevância, apesar do bordo superior da categoria com 1 a 3 camadas só permanecer até o décimo sexto pavimento.

De modo análogo, no gráfico B da figura 40, o deslocamento de topo também governa as configurações de sistemas estruturais a partir do décimo terceiro pavimento. Já entre 16 e 19 pavimentos, as duas últimas categorias, em termos de altura de seções de pilares, apresentam bordos superiores semelhantes, ou seja, para ambas contemplam-se bons resultados, porém, apenas as instâncias categorizadas com altura entre 60 e 80 cm alcançam o vigésimo pavimento. Verifica-se ainda que, semelhante ao número de camadas, no intervalo de 13 a 16 pavimentos, a altura da seção não demonstra relevância, apesar do bordo superior da categoria com altura menor que 40 cm camadas só permanecer até o décimo sexto pavimento.

#### 5.2.5. Fator de projeto relacionado ao centro de contraventamento

Ainda objetivando analisar a contribuição do centro de contraventamento na estabilidade do sistema estrutural, o gráfico apresentado na figura 41 representa as instâncias a partir de duas variáveis: o número de pavimentos e o valor de DF relacionado ao deslocamento de topo. Os espaços de soluções estão agrupados da seguinte forma: instâncias com proporções de abertura em planta do sistema de contraventamento menores que 50% do vão da laje (mais robusto) e maiores que 50% (menos robusto).

**Figura 41: Número de pavimentos  $\times$  DF relacionado ao deslocamento de topo (%) categorizado por proporções de abertura do centro de contraventamento**



Fonte: Elaborado pelo autor.

Verifica-se que os sistemas estruturais atingem o número de 20 pavimentos em razão da maior robustez do sistema de contraventamento, que limita o deslocamento de topo do edifício. Neste sentido, os trabalhos de Wang et al. (2021) e Budak et al. (2023) concluíram que a rigidez oferecida por centros de contraventamento em edifícios de grande altura influenciam consideravelmente na resistência do sistema estrutural em termos de ações de vento e sismos, e, conseqüentemente, na razão entre os deslocamentos laterais de topo e altura de pé direito.

#### 5.2.6. Fator de projeto relacionado à ação do vento

Ainda em uma análise geral do espaço de soluções, fez-se necessário classificar as instâncias cujos máximos valores de DF estavam relacionados à ação do vento. Como será visto posteriormente, essa abordagem dará subsídio a análises do contraventamento do sistema estrutural. A tabela 13 traz a quantidade de instâncias e as respectivas categorias de DFs relacionados à ação do vento.

Deixa-se claro que, diferentemente das seções anteriores, nos tópicos seguintes só foram consideradas as instâncias governadas por fatores de projeto relacionados à ação do

vento, ou seja, este tipo de esforço levou tais instâncias a valores próximos dos limites de aceitabilidade estrutural.

**Tabela 13 - Quantidade de instâncias e as respectivas categorias de DFs relacionados à ação do vento**

<b>Elemento do sistema estrutural</b>	<b>Descrição do DF relacionado a ação do vento e ao seguinte esforço interno:</b>	<b>Número de instâncias</b>
Laje	Tensão normal	0
	Tensão de cisalhamento	0
	Tensão de cisalhamento por rolamento	50
Vigas principais	Tensão normal	0
	Tensão de cisalhamento	0
Vigas secundárias	Tensão normal	95
	Tensão de cisalhamento	4412
Pilares	Tensão normal	551
	Tensão de cisalhamento	0

Fonte: Elaborada pelo autor.

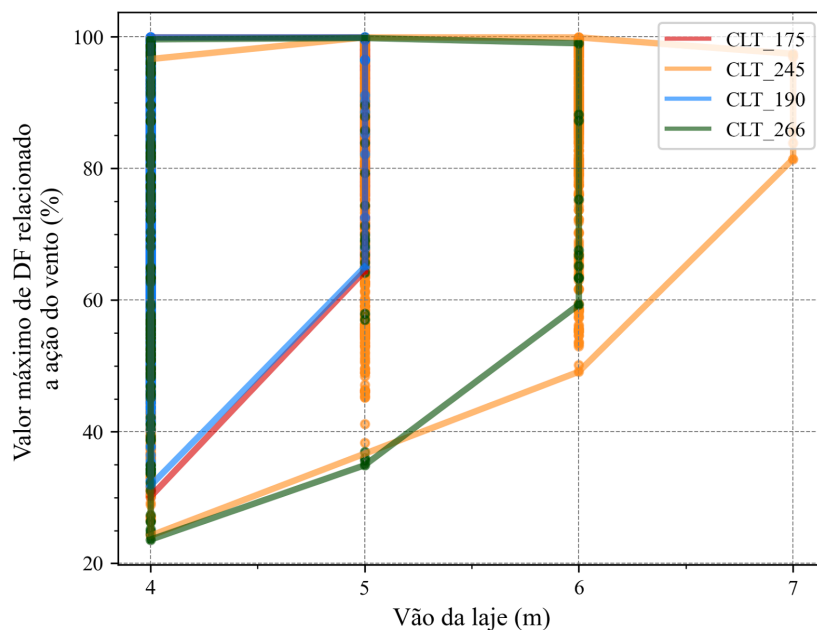
#### **5.2.6.1. Fator de projeto relacionado à ação do vento e às lajes**

É sabido que as lajes atuam como elemento de contraventamento, o que demonstra ser razoável analisar este tipo de peça estrutural associada ao máximo valor dentre os DFs relacionados ao vento para cada instância.

Deste modo, o gráfico apresentado na figura 42 representa os pontos a partir de duas variáveis: o valor de vão da laje (aquele das vigas secundárias) e o máximo valor de DF relacionado com a ação do vento. Já os espaços de soluções estão agrupados nas 6 espessuras de MLCC estudadas. Com este gráfico, reforça-se a influência da rigidez das lajes na resistência do sistema estrutural às ações do vento, já que observa-se de modo claro que as instâncias com maior espessura de painel MLCC apresentaram maior abrangência à medida que se varia o tamanho do vão.

Considerando esta relação entre estas peças estruturais e a ação do vento, o estudo de Dernayka et. al (2022) apresenta uma análise comparativa entre a aplicação de lajes em MLCC e de concreto armado, no qual é apresentado que propriedades geométricas e mecânicas influenciam nas acelerações geradas devido a ação do vento. A partir disto, compreende-se o fato das espessuras das lajes constituírem um aspecto relevante na resposta do sistema estrutural de um edifício aos esforços gerados pelo vento.

**Figura 42: Vão de laje  $\times$  Valor máximo de DF (%) relacionado às lajes e ação do vento categorizado por espessura do painel de MLCC**



Fonte: Elaborado pelo autor.

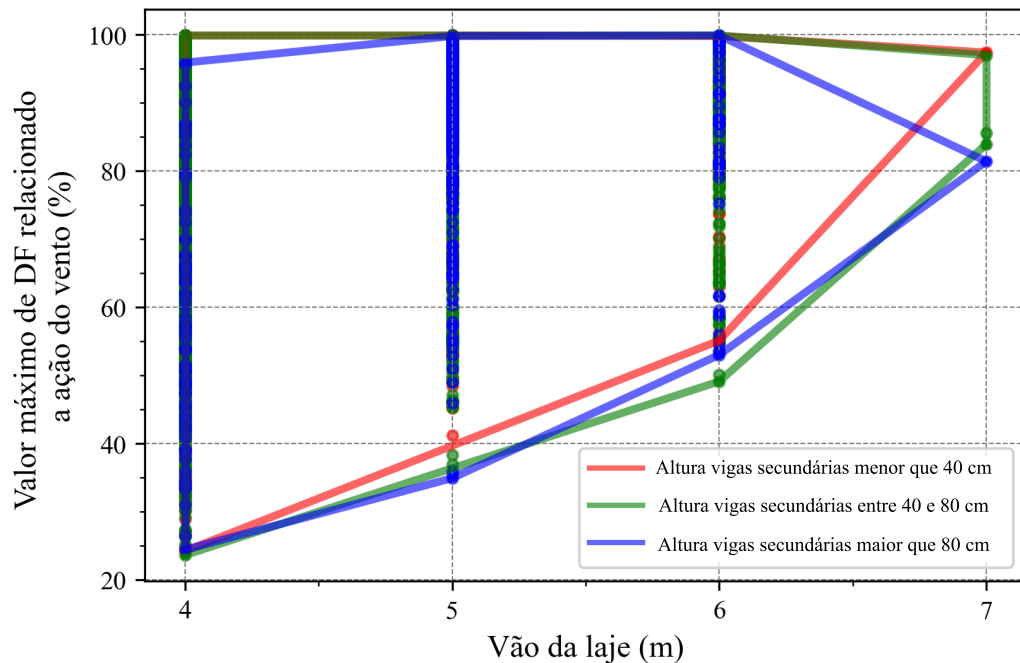
#### 5.2.6.2. Fator de projeto relacionado à ação do vento e às vigas secundárias

Como já explicado anteriormente, as vigas secundárias não recebem solicitações diretamente das lajes, agindo principalmente como elemento de contraventamento, o que demonstra ser razoável analisar este tipo de peça estrutural associada ao máximo valor dentre os DFs relacionados ao vento para cada instância.

O gráfico apresentado na figura 43 representa os pontos a partir de duas variáveis: o valor de vão da laje (aquele das vigas secundárias) e o máximo valor de DF relacionado com a

ação do vento. Os espaços de soluções estão agrupados em relação a três faixas de alturas das vigas secundárias, sendo estas: valores menores que 40 cm; valores entre 40 cm e 80 cm; e valores maiores que 80 cm.

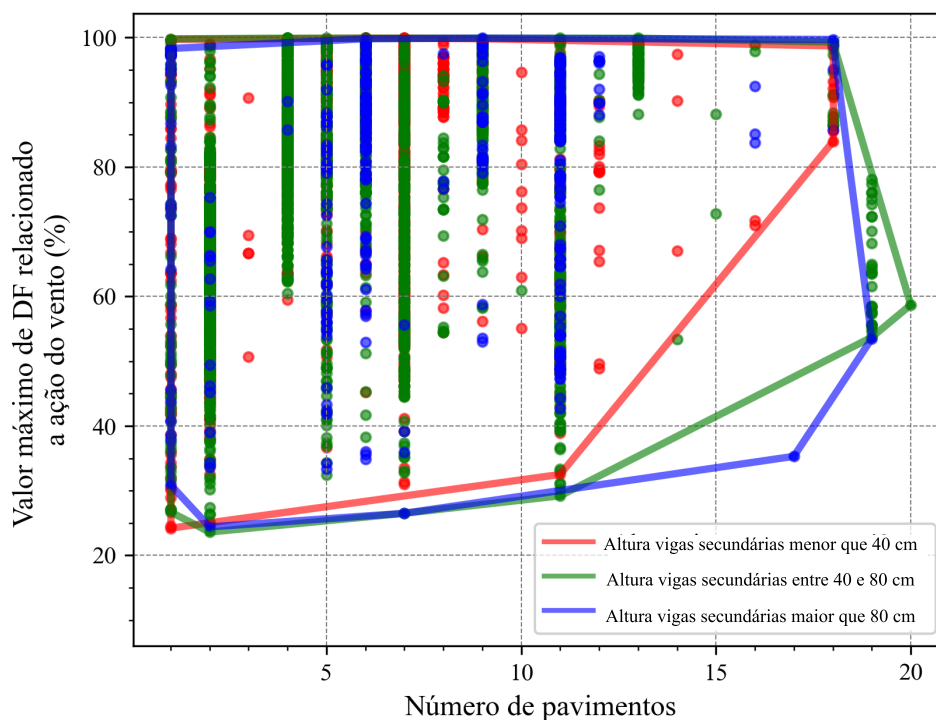
**Figura 43: Vão da laje  $\times$  Valor máximo de DF (%) relacionado às lajes e ação do vento categorizado pela altura da seção transversal das vigas secundárias**



Fonte: Elaborado pelo autor.

Por outro lado, o gráfico da figura 44 apresenta os pontos a partir de duas variáveis: o número de pavimentos e o máximo valor de DF relacionado com a ação do vento. Os espaços de soluções estão agrupados em relação a três faixas de alturas das vigas secundárias, sendo estas: valores menores que 40 cm; valores entre 40 cm e 80 cm; e valores maiores que 80 cm. Por se tratar de um elemento de contravento, como também, pelo fato da ação do vento solicitar mais o sistema estrutural à medida que se aumenta o número de pavimentos, esta representação gráfica é mais eficiente que a anterior.

**Figura 44: Número de pavimentos  $\times$  Valor máximo de DF (%) relacionado às lajes e à ação do vento categorizados pela altura da seção transversal das vigas secundárias**



Fonte: Elaborado pelo autor.

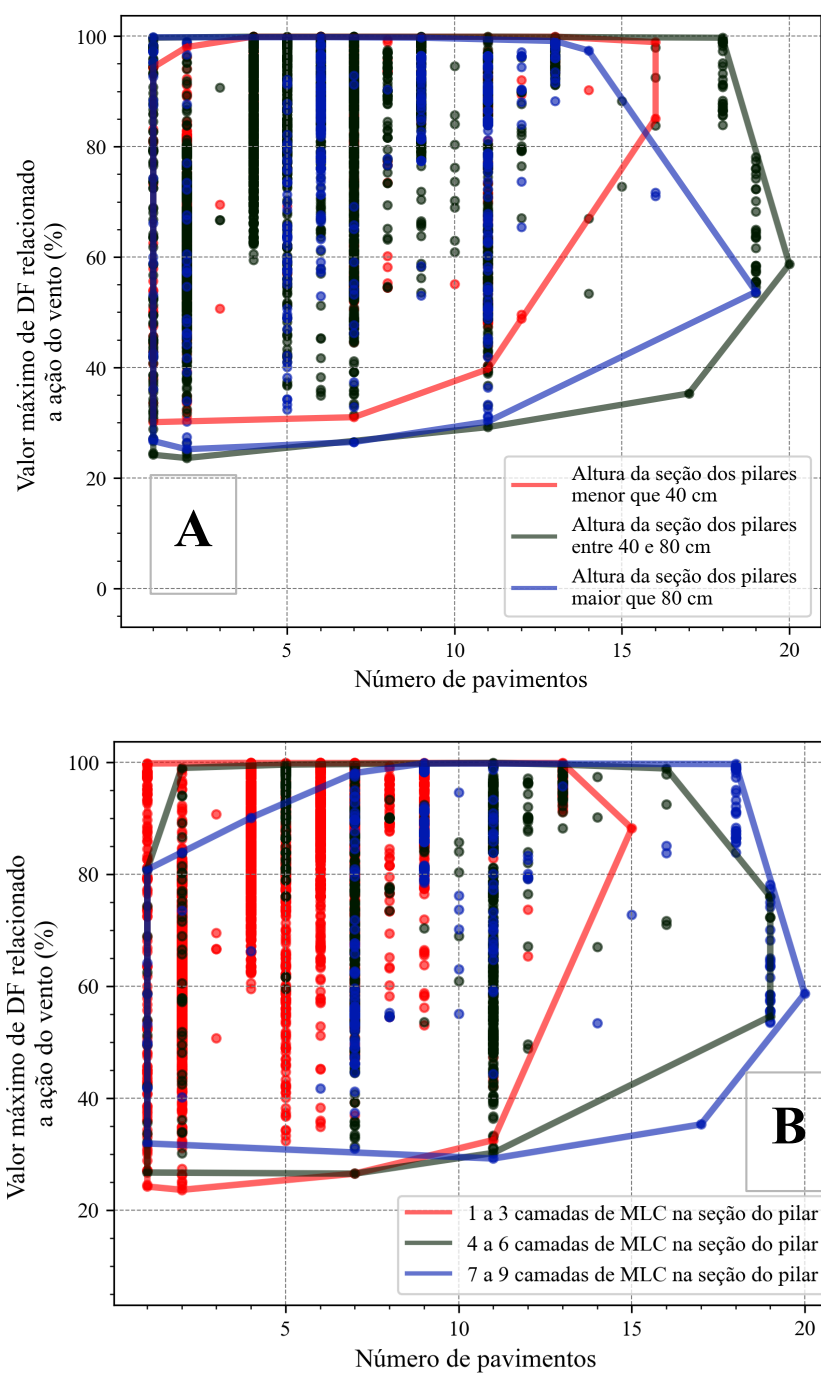
Observa-se que a partir do décimo primeiro pavimento o valor máximo de DF relacionado a ação do vento se eleva consideravelmente, mudando a abrangência dos agrupamentos para cada faixa de altura da seção transversal das vigas secundárias. Ainda analisando sob este aspecto, salienta-se que a redução da abrangência se intensifica à medida que os valores de referência das faixas de altura diminuem a partir do décimo primeiro andar. Tal fato pode indicar dois fenômenos: ou o número de instâncias reduz ou as instâncias tendem a possuir valores de DF maiores e muito próximos.

#### 5.2.6.3. Fator de projeto relacionado à ação do vento e aos pilares

Objetivando estudar a contribuição dos pilares para o contraventamento do sistema estrutural, concebeu-se os gráficos da figura 45 que apresentam os pontos a partir de duas variáveis: o máximo valor de DF relacionado a ação do vento e o número de pavimentos. Em A, os espaços de soluções estão agrupados em relação a três faixas de alturas das seções transversais dos pilares, sendo estas: valores menores que 40 cm; valores entre 40 cm e 80 cm; e valores maiores que 80 cm. Já em B, são apresentados os agrupamentos do seguinte

modo: 1 a 3 camadas de MLC; 4 a 6 camadas de MLC; e 7 a 9 camadas de MLC. Com estes gráficos é possível avaliar como o número de pavimentos e as variáveis relacionadas a seção transversal dos pilares (altura e número de camadas) afetam o deslocamento de topo.

**Figura 45: Número de pavimentos  $\times$  valor máximo de DF relacionado a ação do vento (%) categorizado pela altura da seção de pilares em (A) e pelo número de camadas de MLC na seção do pilar em (B)**



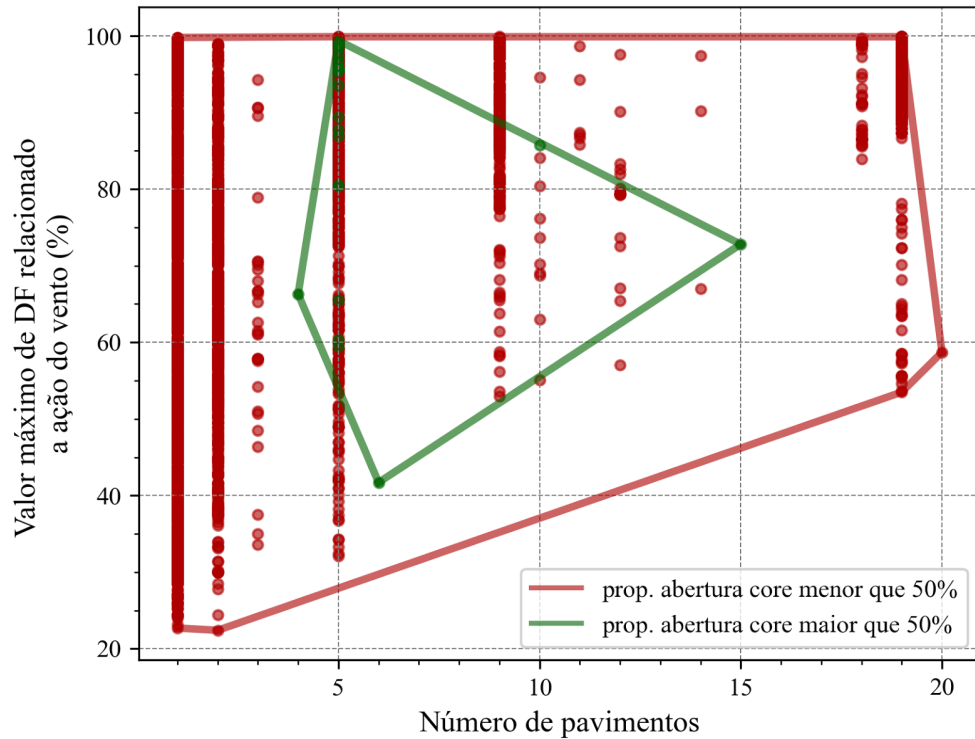
Fonte: Elaborado pelo autor.

Observa-se que para ambos os gráficos ocorre uma mudança perceptível na abrangência dos agrupamentos para as diferentes faixas de categorias a partir do décimo primeiro pavimento. Entretanto, fica demonstrado que, em termos de resistência a ação do vento, o aumento do número de camadas é mais relevante que o aumento da altura da seção transversal do pilar, uma vez que, a faixa de valores referentes a alturas maiores que 80 cm implicou em uma redução de abrangência do agrupamento de pontos quando comparado a faixa anterior, diferente do que ocorreu para o gráfico categorizado pelo número de camadas.

#### **5.2.6.4. Fator de projeto relacionado à ação do vento e ao centro de contraventamento**

De modo análogo ao que foi apresentado nos itens anteriores, ao filtrar apenas as instâncias cujos os máximos valores de DF estão relacionados à ação do vento, o gráfico exposto na figura 46 apresenta os pontos a partir de duas variáveis: o número de pavimentos e o valor máximo de DF relacionado à ação do vento. Os espaços de soluções estão agrupados da seguinte forma: instâncias com proporções de abertura em planta do sistema de contraventamento menores que 50% do vão em x e maiores que 50%. Observa-se que a diminuição da rigidez oferecida pelo centro de contraventamento compromete as possibilidades de projeto à medida que se aumenta o número de pavimentos.

**Figura 46: Número de pavimentos  $\times$  Valor máximo de DF (%) relacionado às lajes e ação do vento categorizado por proporções de abertura do centro de contraventamento**



Fonte: Elaborado pelo autor.

### 5.3. FREQUÊNCIAS NATURAIS DAS LAJES

Os itens seguintes apresentam os resultados obtidos pela exploração de espaços de soluções ao analisar os valores de frequência natural de cada instância com os valores de vão correspondentes. Os seguintes critérios foram utilizados para agrupar os pontos representativos de cada instância:

- Frequência natural das lajes relacionada às vigas de apoio;
- Frequência natural das lajes relacionada às classes de MLCC;
- Frequência natural das lajes relacionada às espessuras das lajes;
- Frequência natural das lajes relacionada ao módulo de elasticidade

De antemão, verifica-se que para todas as instâncias foram obtidas valores de frequências naturais maiores que o limite normativo de 8 Hz. Uma reta constante foi plotada junto aos gráficos que serão apresentados para indicar este limite.

#### 5.3.1. Frequência natural das lajes relacionada às vigas de apoio

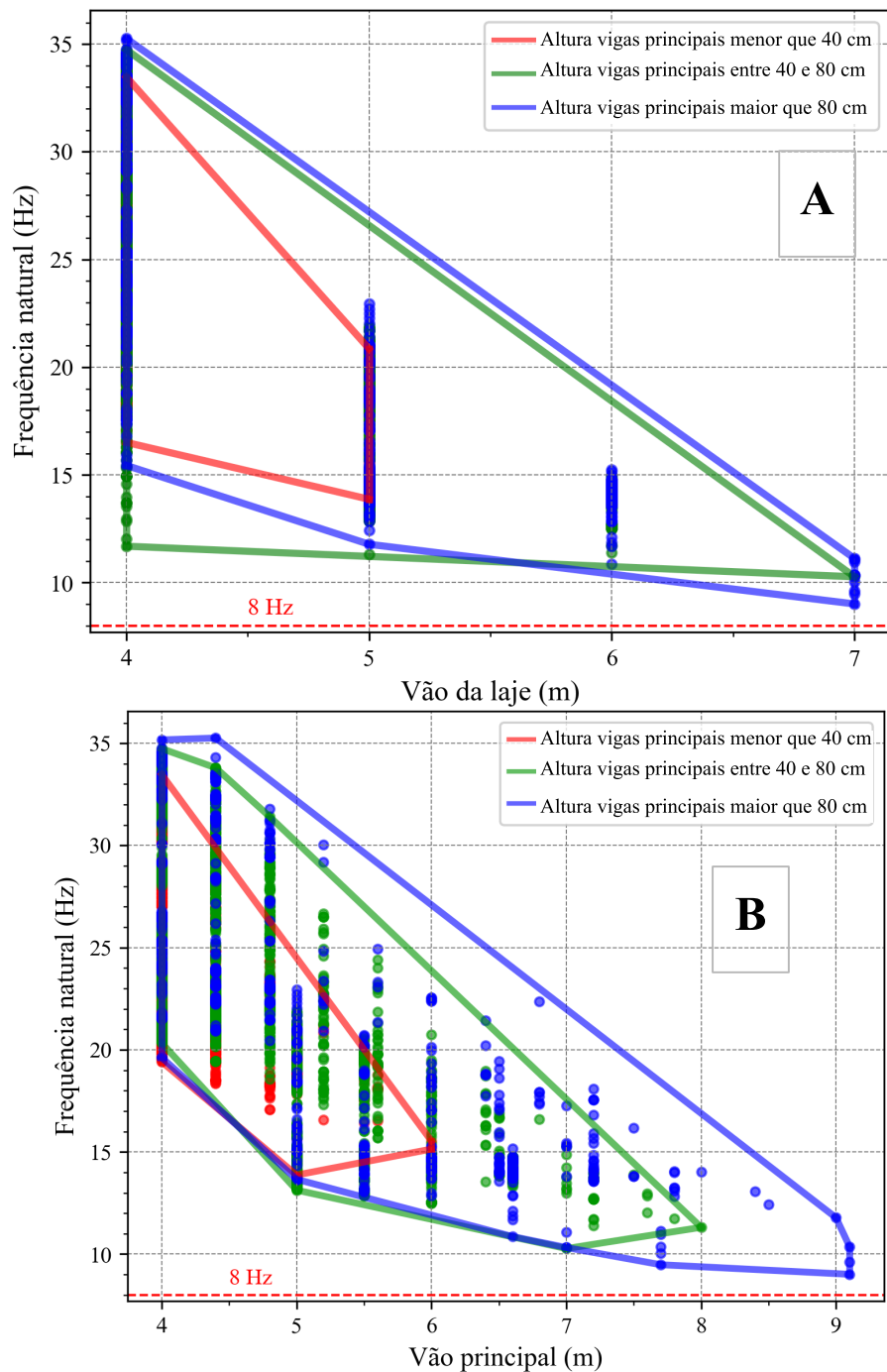
Há indicativos de que a rigidez das vigas de suporte de lajes de MLCC, que nas instâncias estudadas são as vigas principais, contribuem para a diminuição da frequência natural de lajes de painéis de madeira, ou seja, a rigidez das vigas de suporte estabilizam as lajes quanto às vibrações.

Para se aprofundar nas nuances desta relação entre vigas de suporte e frequência natural das lajes, o gráfico apresentado em A na figura 47 apresenta os pontos a partir de duas variáveis: vão de laje e a frequência natural do painel de MLCC que formam as lajes de um pavimento. Já no gráfico B da mesma figura, os valores de frequência natural das lajes estão dispostos para os valores de vão principal de cada instância. Para ambos os gráficos, os espaços de soluções estão agrupados em relação a três faixas de alturas das vigas principais, sendo estas: valores menores que 40 cm; valores entre 40 cm e 80 cm; e valores maiores que 80 cm.

Observa-se que a medida que a altura da viga principal aumenta, a abrangência do espaço de soluções correspondente também se eleva. Este fato está de acordo com as conclusões do estudo de Huang et al. (2020), em que foi constatada a influência dos conjuntos de vigas de suporte de lajes em MLCC nos valores de frequência natural, em que esta grandeza de lajes de pisos pode ser estimada conforme as equações 30 a 32 apresentadas. Observa-se que esta equação difere da equação 24, devido a inserção da contribuição em termos de rigidez das vigas de apoio das lajes. Se, para fins de análise, fosse desconsiderado as rigidezes efetivas das vigas longitudinais, já que estas não recebem o carregamento das lajes, a partir do conjunto de equações propostas, seria observado que o valor de frequência natural é afetado pela rigidez do sistema de vigas transversais (vigas principais). Nesse sentido, Simovic et al. (2020) também concluem algo muito semelhante em seus trabalhos, relatando que as condições de suporte causam um efeito muito significativo nos valores de frequências naturais.

Outro fato a ser salientado é que os resultados apresentados nos gráficos da figura 47 corroboram com o limite da razão de altura sobre vão ( $h/l$ ) igual a 1/17 proposta por FSS (2024).

**Figura 47: Vão da laje  $\times$  Frequência natural (A) e Vão principal  $\times$  Frequência natural (B) categorizado pela altura da seção das vigas principais**



Fonte: Elaborado pelo autor.

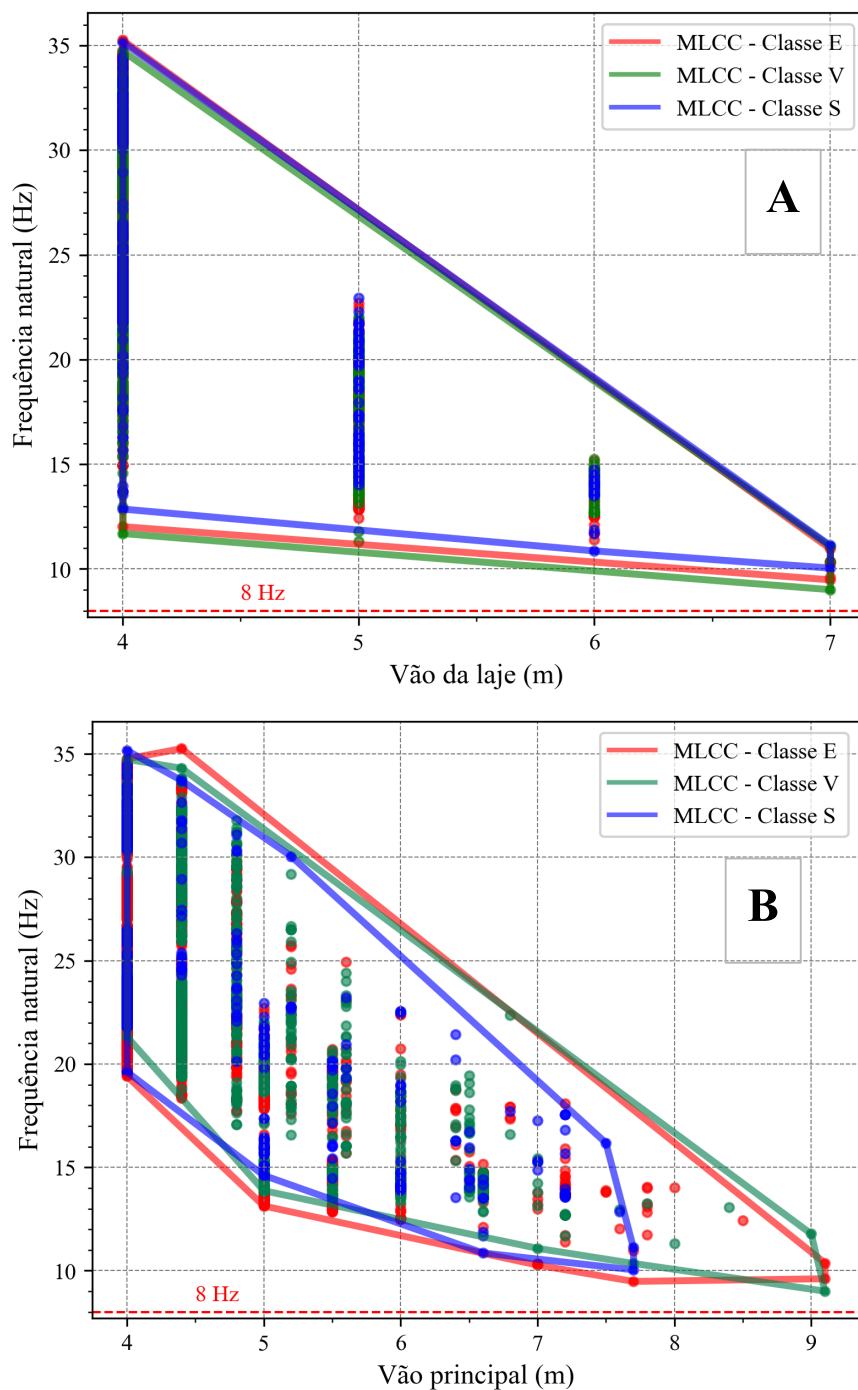
### 5.3.2. Frequência natural das lajes relacionada às classes de MLCC

A fim de verificar a relevância da classe de MLCC para a análise de espaços de soluções quanto aos critérios de valor de vão e de frequência natural foram gerados os gráficos contidos na figura 48. O gráfico apresentado em A, apresenta os pontos a partir de duas variáveis: vão de laje e a frequência natural do painel de MLCC que formam as lajes de um pavimento. Já no gráfico B da mesma figura, os valores de frequência natural das lajes estão dispostos para os valores de vão principal de cada instância. Para ambos os gráficos, os espaços de soluções estão agrupados em relação às classes dos painéis de MLCC.

Observa-se que não houve variação significativa nos espaços de soluções quando as instâncias foram agrupadas para o vão da laje sob o critério da classe de MLCC. Diferentemente, observa-se diferenças significativas quanto às dimensões dos agrupamentos de instâncias quando o eixo das ordenadas se refere aos valores de vão principal.

Isso se explica por dois fatores. O primeiro é que, apesar das lajes dos pavimentos deslocarem-se livremente na direção das vigas secundárias, seus painéis se apoiam nos bordos com as vigas principais, estas, por sua vez, apresentam deflexões bem elevadas, seja em virtude de carregamento (já que as lajes descarregam apenas nestas), seja pelo fato dos vãos destas vigas serem maiores. Deste modo, essas deflexões serão também transmitidas para as lajes, provocando uma sobreposição de efeitos que pode interferir na aceitabilidade estrutural. Já o segundo fator consiste no fato de que a classe S de painéis de MLCC está relacionada ao emprego de outros produtos de madeira engenheira, como o LVL, nas camadas internas transversais, o que afeta de modo significativo o comportamento mecânico de lajes com este tipo de material, e, conseqüentemente, a abrangência do agrupamento das instâncias correspondentes a esta classe. Em contrapartida, as classes E e V diferem entre si apenas no modo qualitativo de sua classificação, não havendo especificidades relevantes quanto às suas capacidades mecânicas. Fato é que, como se pode observar no apêndice C, os valores das propriedades mecânicas não variam efetivamente de acordo com a classe, mas sim com relação às subclasses.

**Figura 48: Vão da laje  $\times$  Frequência natural (A) e Vão principal  $\times$  Frequência natural (B) categorizado pelas classes de resistência dos painéis de MLCC**



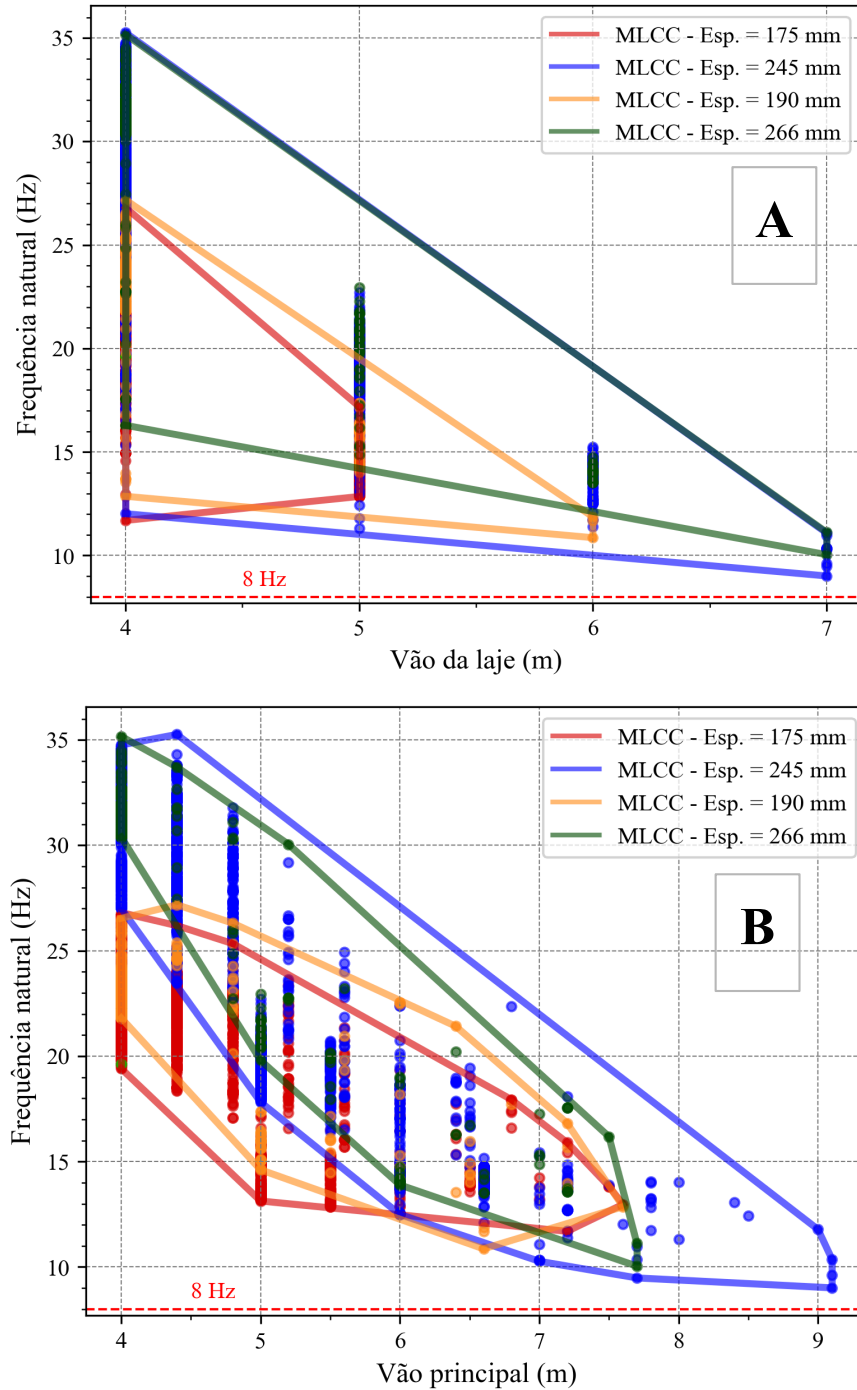
Fonte: Elaborado pelo autor.

### 5.3.3. Frequência natural das lajes relacionada às espessuras das lajes

A fim de verificar a relevância da espessura do painel de MLCC para a análise de espaços de soluções quanto aos critérios de valor de vão e de frequência natural foram gerados os gráficos contidos na figura 49. O gráfico apresentado em A, apresenta os pontos a partir de duas variáveis: vão de laje e a frequência natural do painel de MLCC que formam as lajes de um pavimento. Já no gráfico B da mesma figura, os valores de frequência natural das lajes estão dispostos para os valores de vão principal de cada instância. Para ambos os gráficos, os espaços de soluções estão agrupados em relação às espessuras dos painéis de MLCC.

Observa-se que não há instâncias com as espessuras de 105 e 114 mm, fato que está de acordo com os limites de vãos para diferentes espessuras de painéis de MLCC de pisos apresentados por FSS (2019). Além disso, a medida que o valores de vão da laje e vão principal dos painéis de lajes aumentam, menores são os valores de frequência natural.

**Figura 49: Vão da laje  $\times$  Frequência natural (A) e Vão principal  $\times$  Frequência natural (B) categorizado pelas espessuras dos painéis de MLCC**



Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao estudar quatro modelos matemáticos para estimativa de frequências naturais, Simovic et al. (2023) concluíram que a frequência natural depende principalmente da razão entre as rigidezes longitudinal e transversal e a razão entre a espessura do piso e o tamanho do

vão. Tal fato também pode ser verificado no conjunto de equações 30 a 32, se, para fins de análise, fosse desconsiderado as rigidezes efetivas das vigas, seria observado que o valor de frequência natural é muito afetado pela rigidez do painel. Esta grandeza, por ser o produto entre o módulo de elasticidade e o momento de inércia do painel, é afetada em termos de terceira potência pelo valor de espessura da laje.

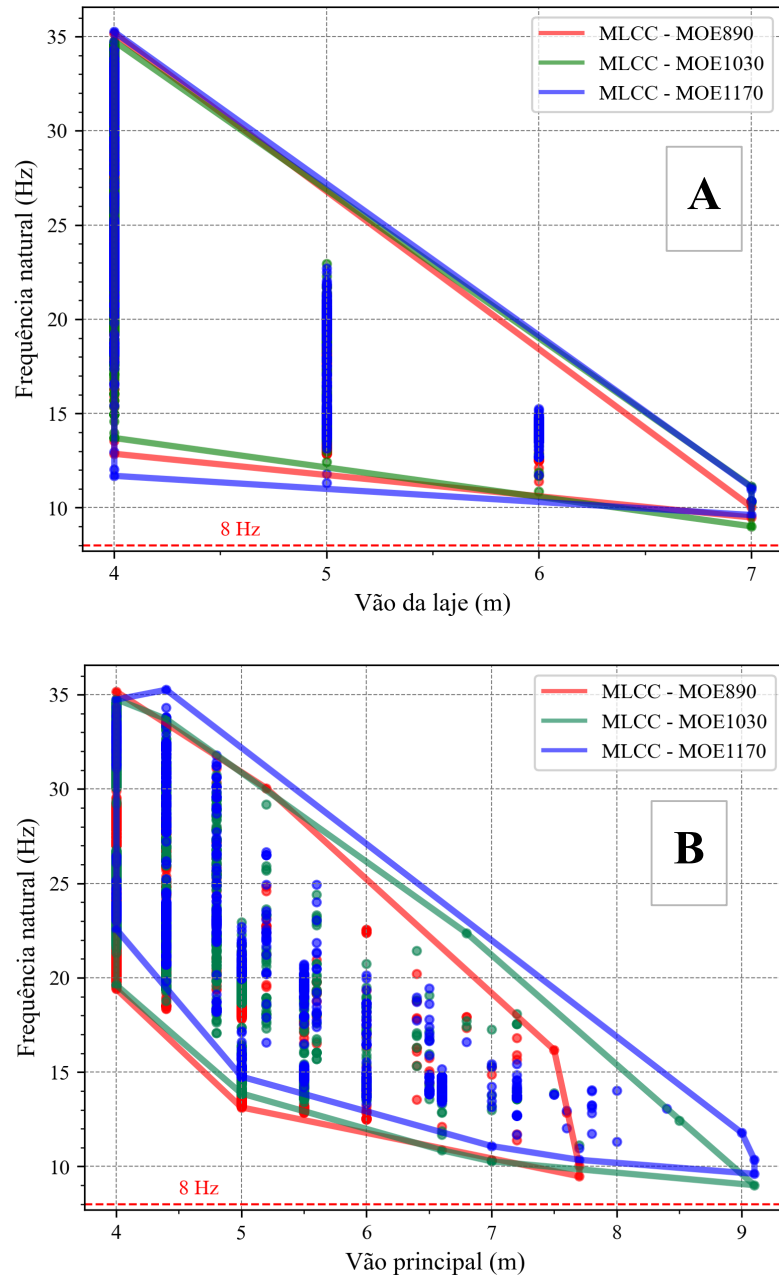
Já a distância do vão da laje reduz consideravelmente a rigidez caso ocorra o aumento de seu valor, ocorrendo em termos de quarta potência. Estas mesmas relações matemáticas entre vão e propriedades geométricas podem ser observadas a partir da equação 24.

#### 5.3.4. Frequência natural das lajes relacionada ao módulo de elasticidade

Primeiramente, os limites de deflexões máximas permissíveis geralmente norteiam a aceitabilidade estrutural de lajes de madeira, conforme foi visto no gráfico 34. Por outro lado, o módulo de elasticidade é a principal propriedade mecânica que define o campo de deflexão de elementos flexionados. Logo, o módulo de elasticidade está fortemente associado à aceitabilidade estrutural de pisos em MLCC.

Em vista disto, os gráficos da figura 50 apresenta os pontos a partir das seguintes variáveis: Em A, o valor do vão da laje de cada instância e a frequência natural do painel de MLCC correspondente; e, em B, o valor do vão principal de cada instância e a frequência natural do painel de MLCC. Os espaços de soluções estão agrupados em relação a três faixas de valores de módulo de elasticidade, sendo estas: valores não maiores que  $890 \text{ N/mm}^2$ ; valores entre  $890 \text{ N/mm}^2$  e  $1030 \text{ N/mm}^2$ ; e valores entre  $1030 \text{ N/mm}^2$  e  $1170 \text{ N/mm}^2$ .

**Figura 50: Vão da laje  $\times$  Frequência natural (A) e Vão principal  $\times$  Frequência natural (B) categorizado módulo de elasticidade do painel de MLCC**



Fonte: Elaborado pelo autor.

Observa-se que o agrupamento das instâncias com faixa de valores de módulos de elasticidade não maiores que  $890 \text{ N/mm}^2$  é menor que as faixas de valores superiores estudadas, além de não permitir instâncias com vãos máximos maiores que 8 m. Como já mencionado, o conjunto de equações abordadas no 4.3.1.2 traz a aplicação dos valores de módulo de elasticidade para a estimativa de frequências naturais de lajes de madeira engenheirada.

## 6. CONCLUSÕES

Primeiramente, observa-se que a inexistência de instâncias para determinados intervalos dos gráficos apresentados nos tópicos do item 5, não implica necessariamente que estes intervalos não gerem possibilidades aceitáveis estruturalmente. De modo mais claro, tome-se por exemplo o fato de não terem sido encontradas instâncias com pilares com classes de resistência GL32c nos cinco primeiros pavimentos, de maneira que a ausência de pontos neste intervalo não significa que não seja possível em um projeto conceber um sistema estrutural com pilares constituídos por este tipo de MLC. Porém, como a amostragem do espaço de soluções foi realizada através de um algoritmo genético, ficou demonstrado, deste modo, que a classe GL32c é ineficiente para poucos pavimentos.

Também foi verificado que, quando se trata da estabilidade do sistema estrutural, seja em termos de ação do vento ou de deslocamento no topo, as propriedades geométricas das seções transversais dos elementos de contraventamento influenciam de modo mais determinante a partir do décimo primeiro pavimento.

Ainda quanto às peças estruturais que combatem os efeitos da instabilidade gerada pelo vento, foi constatado que as classes de MLC com propriedades de resistência maiores são mais determinantes para a abrangência dos espaços de soluções que aquelas com menor peso próprio, diferentemente do que pode ser visto para as vigas principais, cuja função era preponderantemente transferir os esforços gravitacionais aos pilares. Verificou-se que estas vigas foram governadas pelas tensões de cisalhamento quando estudadas a partir do tamanho de seus vãos.

Além disso, foi visto que a robustez do centro de contraventamento tem forte associação com a eficiência no consumo de material. De modo semelhante, foi observado que outros fatores podem afetar o consumo de madeira tais como: as classes de resistência, tamanhos dos vãos, número de pavimentos e propriedades geométricas. Neste sentido, ao se observar a grande quantidade de instâncias concentrando-se nos bordos ótimos, sugere-se em estudos futuros avaliar a correlação destas variáveis para a geração de modelos matemáticos que objetivem a previsão da eficiência estrutural para baixas taxas de consumo. Pode-se também investigar a relação entre os bordos ótimos e os bordos superiores.

Portanto, a partir da exploração dos espaços de soluções pode-se sugerir as seguintes diretrizes projetuais para a concepção de sistemas estruturais otimizados com características semelhantes às aquelas empregadas no estudo:

- Utilização das seguintes espessuras de lajes em MLCC:
  - Vãos de lajes entre 4 e 5 m: uso de painéis com 175 mm;
  - Vãos de lajes entre 5 e 6 m: uso de painéis com 190 mm;
  - Vãos de lajes entre 6 e 7 m: uso de painéis com 245 mm;
- Emprego do limite da razão de altura sobre vão ( $h/l$ ) igual a 1/17 para vigas;
- Para minimizar frequências próximas dos limites normativos, deve-se empregar, prioritariamente, vigas de apoio com maior altura;
- Emprego da classe de MLC GL32h para vigas secundárias e pilares, e ainda, utilização das classes GL24h ou GL24c para vigas principais;
- Emprego de pilares com altura de seção transversal entre 40 e 80 cm, uma vez atingem grandes números de pavimentos e possuem significativa eficiência estrutural;
- Sugere-se preconizar o aumento do número de camadas de pilares dos pilares quando esta grandeza representar resistência do sistema estrutural à ação do vento;
- Evitar o emprego de sistemas de contraventamento com comprimento de aberturas em planta maiores que 50% do vão da laje.

Também foi observado que, no geral, o bordo ótimo cresce suavemente até o décimo sexto pavimento, com valor de 0,3 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> em relação à taxa de material, e, após este valor, acontece um aumento abrupto no consumo. Portanto, observa-se que os sistemas estruturais só permanecem em configurações ótimas de eficiência estrutural abaixo de 16 pavimentos.

Já quanto ao comportamento dinâmico da estrutura, verificou-se que as frequências naturais das lajes em MLCC dos pavimentos variaram significativamente quando relacionadas às espessuras dos painéis, à altura das vigas de apoio e aos tamanhos dos vãos.

Por fim, seria de grande valia para o estado da arte, a elaboração estudos que empreguem a metodologia abordada neste trabalho e que permitam a variação dos materiais constituintes, como outros produtos de madeira engenheirada e elementos mistos de madeira-concreto, ou até mesmo, a implementação de diversas modalidade de conexões entre as peças estruturais.

## REFERÊNCIAS

ABED, Joseph et al. A Review of the Performance and Benefits of Mass Timber as an Alternative to Concrete and Steel for Improving the Sustainability of Structures. *Sustainability*, v. 14, n. 9, p. 5570, 2022.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6120 – Cargas para o cálculo de estruturas de edificações**. ABNT. Rio de Janeiro, 1980.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6123 – Forças devido ao vento em edificações**. ABNT. Rio de Janeiro, 1988.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190: Projeto de estruturas de madeira**. ABNT. Rio de Janeiro, 1997.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190: Projeto de estruturas de madeira**. ABNT. Rio de Janeiro, 2022.

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

APA - The Engineered Wood Association. 2016. **Glued Laminated Beam Design Tables**. APA. Tacoma, WA, 2016.

APA - The Engineered Wood Association. **North American CLT vs. Imported Product: Stringent standard assures value and performance**. ANSI/APA. Tacoma, WA, 2020.

BSI - BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **BSI EN 1194 - Timber structures. Glued laminated timber. Strength classes and determination of characteristic values**. BSI. Londres, UK. 1994.

BSI - BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **BSI EN 386 - Glued laminated timber — Performance requirements and minimum production requirements**. BSI. Londres, UK. 2001.

BUDAK, Erhan; SUCUOĞLU, Halûk; CELIK, Ozan Cem. Response parameters that control the service, safety and collapse performances of a 253 m tall concrete core wall building in Istanbul. *Bulletin of Earthquake Engineering*, v. 21, n. 1, p. 375-395, 2023.

CDSC - C.D. Smith Construction. *Mass Timber Construction*. Disponível em: <<https://www.cdsmith.com/mass-timber-construction>>. Acesso em: 19 dez. 2024.

CEN - European Committee for Standardization. **Eurocode 1: Actions on structures**. CEN. Bruxelas, 2002.

CEN - European Committee for Standardization. **EN 14080: Timber structures - Glued laminated timber and glued solid timber - Requirements**. CEN. Bruxelas, 2013.

CEN - European Committee for Standardization. **Eurocode 5: design of timber structures – Part 1.1: general rules and rules for buildings**. CEN. Bruxelas, 2004.

DAS, Sourav; TESFAMARIAM, Solomon. Multiobjective design optimization of multi-outrigger tall-timber building: Using SMA-based damper and Lagrangian model. **Journal of Building Engineering**, v. 51, p. 104358, 2022.

DERNAYKA, Samar et al. Comparison of wind induced response of high-rise buildings with reinforced concrete and cross laminated timber. **Proc. Int. Struct. Eng. Constr**, v. 9, p. 21, 2022.

FSS - Föreningen Sveriges Skogsindustrier,. **The CLT Handbook: CLT structures – facts**. 1 Ed. Estocolmo: Swedish Wood, 2019.

FSS - Föreningen Sveriges Skogsindustrier,. **The Glulam Handbook**. 1 Ed. v. 1. Estocolmo: Swedish Wood, 2024.

GAUTIER, Nelson Jose Díaz. Algoritmo de Otimização Multi-Objetivo Assistida por Metamodelagem com Aplicações em Problemas de Aerodinâmica. **Tese de Doutorado**. Tese–Térmica, Fluidos e Máquinas de Fluxo, Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá., 2020.

GLASNER, David et al. Rolling Shear Strength of Cross Laminated Timber (CLT)—Testing, Evaluation, and Design. **Buildings**, v. 13, n. 11, p. 2831, 2023.

GLULAM Manufacture. **Buckland Timber**, Crediton. Disponível em: <<https://www.bucklandtimber.co.uk/glulam-manufacture/>> . Acesso em: 07 de nov. de 2022.

HENS, Isabelle; SOLNOSKY, Ryan; BROWN, Nathan C. Design space exploration for comparing embodied carbon in tall timber structural systems. **Energy and Buildings**, v. 244, p. 110983, 2021.

HOW, Seok Sean; SIK, Huei Shing; ANWAR, U. M. K. An overview of manufacturing process of glue-laminated timber. **Timber Technol Bull** (63), 2016.

HUANG, Haoyu; GAO, Yan; CHANG, Wen-Shao. Human-induced vibration of cross-laminated timber (CLT) floor under different boundary conditions. **Engineering Structures**, v. 204, p. 110016, 2020.

HUANG, Zirui et al. The appropriacy of the analytical models for calculating the shear capacity of cross-laminated timber (CLT) under out-of-plane bending. **Journal of Wood Science**, v. 69, n. 1, p. 14, 2023.

JUNDA, Eknara; MÁLAGA-CHUQUITAYPE, Christian; CHAWGIEN, Ketsarin. Interpretable machine learning models for the estimation of seismic drifts in CLT buildings. **Journal of Building Engineering**, v. 70, p. 106365, 2023.

JUNIOR, Artur Fernando; VICENTE, William Martins; XIE, Yi Min. Topology optimization applied to the core of structural engineered wood product. **Structures**. Elsevier. p. 1567-1575, 2023.

LEONE, Camila. Modelagem paramétrica: Concepção de torres torcidas e proteções solares para análise de iluminação natural e radiação solar em edifício comercial na cidade de São Paulo. 2017. 255 f. **Dissertação (Arquitetura e Urbanismo)** - Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, 2017.

MARTHA, Luiz. **Análise de estruturas: conceitos e métodos básicos**. Elsevier Brasil, 2010.

MATOS, Elisa B. Desenvolvimento de estrutura gridshell em processo generativo baseado no desempenho estrutural. 2021. 95 f. **Dissertação (Arquitetura e Urbanismo)** - Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 2021. Disponível em: <<https://locus.ufv.br/handle/123456789/29036>>. Acesso em: Jun./2024.

MAYENCOURT, Paul; MUELLER, Caitlin. Structural optimization of cross-laminated timber panels in one-way bending. **Structures**. Elsevier, p. 48-59, 2019.

MEDEIROS, Luciano Frontino de. Uso de algoritmos genéticos para definição de mix de produção em simulador de plano de negócios. **Gestão & Produção**, v. 22, p. 624-635, 2015.

MOORI, Roberto Giro; KIMURA, Herbert; ASAKURA, Oscar Kenjiro. Aplicação do algoritmo genético na gestão de suprimentos. **INMR-Innovation & Management Review**, v. 7, n. 2, p. 171-192, 2010.

NARIÑO, Giovanni A. R. Otimização de Risers em Catenária com Amortecedores Hidrodinâmicos. 2014. 119 p. **Dissertação de Mestrado** – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia de Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.17771/PUCRio.acad.24617>>. Acesso em: Jun./2024.

OLIVEIRA, Gabriela Lotufo. Cross Laminated Timber (CLT) no Brasil: processo construtivo e desempenho. Recomendações para o processo do projeto arquitetônico. 2018. **Dissertação (Mestrado em Tecnologia da Arquitetura)** - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo,

Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018. doi:10.11606/D.16.2019.tde-09012019-144057. Acesso em: Jun./2024.

OLIVEIRA, Gabriela Lotufo. Estruturas de madeira engenheirada: a concepção arquitetônica orientada à racionalização do processo construtivo. 2023. **Tese de Doutorado**. 252 p. Faculdade de Arquitetura da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2023. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/16/16132/tde-12122023-120853/pt-br.php>. Acesso: Jan/2024.

PFEIL, Walter; PFEIL, Michèle. **Estruturas de madeira: dimensionamento segundo a Norma Brasileira NBR 7190/97 e critérios das Normas Norte-americana NDS e Européia EUROCODE 5**. 6. ed., rev., atual. e ampl. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2003. xxii, 224 p.

POLONINI, Flávia B. da S. A Modelagem Paramétrica na concepção de formas curvilíneas da Arquitetura Contemporânea. 2014. 288 f. **Dissertação (Arquitetura e Urbanismo)** - Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2017.

PORTEOUS, Jack; KERMANI, Abdy. **Structural timber design to Eurocode 5**. JBlackwell Science, 2007.

RAMOS, Fernando M. G. Conector de aço para ligações entre painéis de madeira laminada colada cruzada e entre painéis de madeira laminada colada cruzada e laje de concreto pré-fabricado. 2023. 260 p. **Tese de Doutorado (Engenharia de Estruturas)** - Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2023. Disponível em: <<https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/58674>>. Acesso: Jun/2024.

SANTOS, L. M. A.. Madeiras. **Revista Científica Semana Acadêmica**, v. 01, p. 01-35, 2018.

SHI, Benkai; LIU, Weiqing; YANG, Huifeng. Experimental investigation on the long-term behaviour of prefabricated timber-concrete composite beams with steel plate connections. **Construction and Building Materials**, v. 266, p. 120892, 2021.

SHIGUE, Erich Kazuo. Difusão da construção em madeira no Brasil: agentes, ações e produtos. 2018. **Dissertação** (Mestrado em Arquitetura, Urbanismo e Tecnologia) - Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018. doi:10.11606/D.102.2018.tde-03092018-094051. Acesso em: Abril/2024.

SIDDIKA, Ayesha et al. Cross-laminated timber–concrete composite structural floor system: A state-of-the-art review. **Engineering Failure Analysis**, v. 130, p. 105766, 2021.

SILVA, Felipe T. da. Concepção interativa e parametrizada de edifícios de múltiplos pavimentos em concreto armado. **Gestão & Tecnologia de Projetos**, São Carlos, v. 12, n. 1,

p. 7–28, 2017. DOI: 10.11606/gtp.v12i1.99212. Disponível em: <https://revistas.usp.br/gestaodeprojetos/article/view/99212..> Acesso em: 15 jul. 2024.

SILVA, Felipe T. da. Modelo paramétrico de pórticos em concreto armado com dimensionamento otimizado: uma proposta de ferramenta de projeto para as fases iniciais de concepção estrutural. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 18, n. 1, p. 193-210, jan./mar. 2018.

SILVA, Felipe T. da. PIMENTEL, Roberto Leal. Optimization of Steel Portal Frames under a Parametric Structural Design Framework. **Practice Periodical on Structural Design and Construction**, v. 28, n. 1, 18 pág. 2023.

SIMOVIĆ, Nađa; GLIŠOVIĆ, Ivan; TODOROVIĆ, Marija. Design of cross-laminated timber (CLT) floors for human-induced vibrations. **Building Materials and Structures**, v. 66, 2023.

STUMPF, J.; CÓNDOR LÓPEZ, J. G. ; NAUMANN, T.; ZIMMERMANN; M.. Systems Design Using Solution-Compensation Spaces with Built-In Tolerance Applied to Powertrain Integration. **Proceedings of the Design Society**, vol. 2. p. 1995–2004, 2022.

VAN CAUTEREN, Daan et al. Design optimization of hybrid steel/timber structures for minimal environmental impact and financial cost: A case study. **Energy and Buildings**, v. 254, p. 111600, 2022.

VILGUTS, Aivars; STAMATOPOULOS, Haris; MALO, Kjell Arne. Parametric analyses and feasibility study of moment-resisting timber frames under service load. **Engineering Structures**, v. 228, p. 111583, 2021.

WANG, Zhen; PAN, Wei; ZHANG, Yang. Parametric study on module wall-core system of concrete modular high-rises considering the influence of vertical inter-module connections. **Engineering Structures**, v. 241, p. 112436, 2021.

WIEHAG. **Estruturas de madeira engenheirada**. Disponível em: <https://www.wiehag.com/en/services/timber-highrise/>. Acesso em: Abril/2024.

WIN - WOODWORKS INNOVATION NETWORK. **The WoodWorks Innovation Network - Projects, 2024**. Disponível em: <<https://www.woodworksinnovationnetwork.org/projects>>. Acesso em: Abril/2024.

XU, D.; ZHANG, Y.; ZIMMERMANN, M. Design of Vibrating Systems Using Solution Spaces. **Machines**, vol. 11 , n. 642, 25 pág. 2023.

ZIMMERMANN, M.; HOESSLE, J.E. Computing solution spaces for robust design. **International Journal for Numerical Methods in Engineering**. p. 1-29. 2013.

## APÊNDICE A - FATORES MODIFICADORES E EXPRESSÕES PARA OBTENÇÃO DE PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS PRESENTES NO EUROCODE 5

### A.1 - PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS

Para os procedimentos de cálculo faz-se necessário a obtenção dos valores de algumas propriedades geométricas dos elementos de projeto. O primeiro valor que será abordado é o de momento de inércia, o qual para madeira lamelada colada segue a expressão apresentada na equação 40. Já para madeira lamelada colada cruzada, FSS (2019) apresenta a equação 41. Essa diferenciação vem do fato que as camadas transversais do painel CLT pouco influenciam no campo de deslocamento quando comparadas com as camadas com fibras longitudinais (HUANG et al., 2023). Quando verificada a capacidade resistente dos painéis CLT não se pode fazer essa simplificação.

$$I_x = \sum \frac{E_{x,i}}{E_{ref}} \cdot \frac{b_x t_i^3}{12} + \sum \frac{E_{x,i}}{E_{ref}} \cdot b_x t_i a_i^2 \quad (40)$$

$$I_{x,ef} = \sum \frac{E_{x,i}}{E_{ref}} \cdot \frac{b_x t_i^3}{12} + \gamma_i \frac{E_{x,i}}{E_{ref}} b_x t_i a_i^2 \quad (41)$$

Onde:

- $i$  e  $j$  fazem referência a  $i$ -ésima e a  $j$ -ésima camada que compõe o EWP, respectivamente;
- $t$  e  $b$  são a espessura e a largura da camada, respectivamente;
- $a_i$  é igual a distância entre o centróide da seção da  $i$ -ésima camada até a linha neutra;
- $l_{ef}$  é o comprimento efetivo do elemento;
- $\gamma_i$  é igual a  $\left(1 + \frac{\pi^2 \cdot E_{x,i} \cdot t_i}{l_{eff}^2 \cdot G_{Rj} / t_j}\right)^{-1}$ ;
- $E_x$ ,  $E_{ref}$  e  $G_R$  são os módulos de elasticidade da camada, o módulo de elasticidade de referência do painel e o módulo de elasticidade transversal de rolamento, respectivamente.

Como o módulo de resistência  $W$  é obtido pela divisão do momento de inércia pela distância da camada mais externa da seção transversal a sua linha neutra, tais valores seguem conforme a equação 42:

$$W_x = 2 \cdot I_x / h \quad (42)$$

Onde  $h$  é a altura total do elemento.

O índice de esbeltez é dado pela seguinte equação 43. Os comprimentos efetivos são dados na tabela 2.

$$\lambda = \frac{l_{ef}}{r} \quad (43)$$

Onde  $r$  (raio de giração) é igual a  $I_x / (b \cdot h)$ .

O índice de esbeltez relativa é dado pela equação:

$$\lambda_{rel} = \frac{\lambda}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{c.0.k}}{E_{0.05.g}}} \quad (44)$$

Onde:

- $f_{c.0.k}$  é a resistência de compressão característica paralela a fibra da madeira;
- $E_{0.05.g}$  é o valor do quinto percentil do módulo de elasticidade.

O índice de esbeltez relativa para flexão é expressado na equação 45:

$$\lambda_{rel.m} = \sqrt{\frac{f_{m.k}}{\sigma_{m.crit}}} \quad (45)$$

Onde:

- $f_{m.k}$  é a resistência à flexão característica;
- $\sigma_{m.crit}$  é o valor da tensão crítica descrita no item 4.3.1.1.

**Tabela 14 - Valores de  $\frac{l_{ef}}{l}$**

<b>Condições de suporte nas extremidades dos elementos</b>	<b><math>\frac{l_{ef}}{l}</math></b>
Mantido efetivamente na posição e direção em ambas as extremidades	<b>0,7</b>
Mantido efetivamente na posição em ambas as extremidades e na direção em uma extremidade	<b>0,85</b>
Mantido efetivamente na posição em ambas as extremidades, mas não na direção	<b>1</b>
Mantido efetivamente na posição e direção em uma extremidade e na direção, mas não na posição na outra extremidade	<b>1,5</b>
Mantido efetivamente na posição e direção em uma extremidade e completamente livre na outra extremidade	<b>2</b>

Fonte: Adaptado de Porteous e Kermami (2007)

## A.2 - FATORES MODIFICADORES

Primeiramente, destaca-se o fato do Eurocode 5 trazer valores de fatores modificadores referidos com a letra  $k$ .

Para a duração de aplicação da ação tem-se o  $k_{mod}$ . Tal índice modificador é classificado tanto pelo tipo de material, classe de serviço pela ação da umidade e classe de duração da ação. A incidência desse valor é justificada pela influência da umidade na resistência e no fenômeno de fluência da madeira.

**Tabela 15 - Valores de  $k_{mod}$**

Material – Norma	Classe de Serviço	Permanente	Duração do carregamento			
			Longa Duração	Duração Média	Curta Duração	Instantânea
Madeira maciça – EN 14081-1	1	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
Madeira lamelada colada – EN 14080	2	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
Madeira laminada de lâminas finas (LVL) – BS EN 14374 ou EN 14279	3	0,50	0,55	0,65	0,70	0,90

<b>Compensado – BS EN 636</b>	1	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
	2	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
	3	0,50	0,55	0,65	0,70	0,90
<b>OSB – BS EN 300, Tipo de Placa: OSB/2</b>	1	0,30	0,45	0,65	0,85	1,10
<b>OSB/3 e OSB/4</b>	1	0,40	0,50	0,70	0,80	0,90
<b>OSB/3 e OSB/4</b>	3	0,30	0,40	0,55	0,70	0,90

Fonte: CEN (2004, p. 27)

Já os fatores  $k_h$  e  $k_l$  estão relacionados ao fato de que as dimensões de referências utilizadas nos ensaios que forneceram os valores de resistência do Eurocode 5 podem diferir daqueles a serem empregados em projeto. Não há referência à obtenção do valor destes fatores para peças estruturais em CLT nos documentos estudados. A Tabela 9 apresenta em quais parâmetros  $k_h$  e  $k_l$  incidem.

**Tabela 16 - Valores de  $k_h$  e  $k_l$**

<b>Símbolo do Fator de Tamanho</b>	<b>Função do Fator</b>	<b>Propriedade Característica Afetada</b>	<b>Item Relevante no EC5</b>
$k_h$	Ajusta a resistência característica à flexão e/ou a resistência característica à tração paralela às fibras para considerar o efeito do tamanho da seção quando este é menor que a seção de referência dada no EC5.	$f_{m,k}$	Madeira maciça: 3.2(3); Madeira lamelada colada: 3.3(3); LVL: 3.4(3)
		$f_{t,0,k}$	Madeira maciça: 3.2(3); Madeira lamelada colada: 3.3(3)
$k_l$	Ajusta a resistência característica à tração paralela às fibras do LVL para considerar o efeito do comprimento do elemento quando este é menor que o comprimento de referência dado no EC5.	$f_{t,0,k}$	LVL: 3.4(4)

Fonte: Adaptado de Porteous e Kermami (2007, p. 67)

Especificamente, para madeira laminada colada o fator  $k_h$  é calculado da seguinte forma:

$$k_h = \begin{cases} 1.0 & \text{if } h \geq 600 \text{ mm} \\ \left(\frac{600 \text{ mm}}{h}\right)^{0.1} & \text{if } 1.1 \leq \left(\frac{600 \text{ mm}}{h}\right)^{0.1} \\ 1.1 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (46)$$

O fator  $k_m$  é aplicado em situações de projeto em que há a razão entre a resistência à flexão e a tensão de projeto para elemento sujeitos a flexão composta. Para elementos de madeira laminada colada com seções retangulares o valor de  $k_m$  é igual a 0,7. Este valor leva em conta a variação da distribuição das tensões ao longo da seção.

O fator  $k_{crit}$  leva em consideração o efeito da instabilidade distorcional lateral e reduz a resistência a flexão de um elemento sobre o eixo mais resistente quando associado a índices de esbeltez maiores que 0,75. Já os valores de  $k_{cy}$  e  $k_{cz}$  levam em consideração o efeito da instabilidade axial para índices de esbeltez maiores que 0,3. As equações 47, 48 e 51 apresentam os cálculos de  $k_{cy}$ ,  $k_{cz}$  e  $k_{crit}$ , respectivamente.

$$k_{c,y} = \frac{1}{k_y + \sqrt{k_y^2 - \lambda_{rel,y}^2}} \quad (47)$$

$$k_{c,z} = \frac{1}{k_z + \sqrt{k_z^2 - \lambda_{rel,z}^2}} \quad (48)$$

$$k_y = 0,5 \left( 1 + \beta_c (\lambda_{rel,y} - 0,3) + \lambda_{rel,y}^2 \right) \quad (49)$$

$$k_z = 0,5 \left( 1 + \beta_c (\lambda_{rel,z} - 0,3) + \lambda_{rel,z}^2 \right) \quad (50)$$

Onde:

- $\beta_c$  é igual a 0,1 para madeira laminada colada;
- Demais variáveis são apresentadas no item A.1.

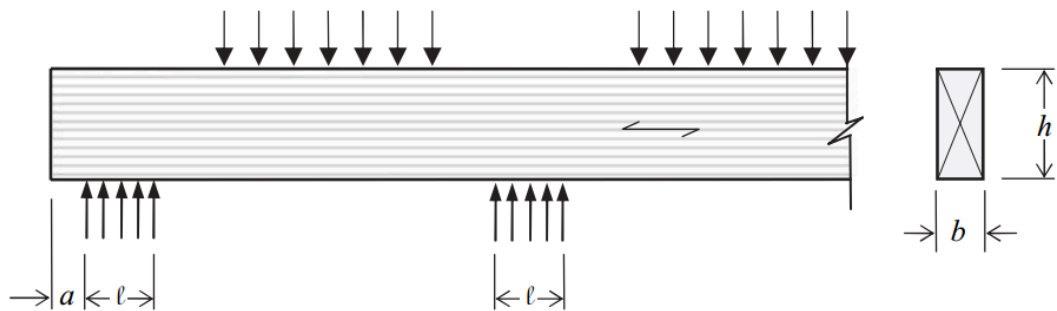
$$k_{crit} = \begin{cases} 1 & \text{for } \lambda_{rel,m} \leq 0,75 \\ 1,56 - 0,75\lambda_{rel,m} & \text{for } 0,75 < \lambda_{rel,m} \leq 1,4 \\ \frac{1}{\lambda_{rel,m}^2} & \text{for } 1,4 < \lambda_{rel,m} \end{cases} \quad (51)$$

O fator  $k_{c,90}$  está relacionado a configuração dos suportes e as tensões compressivas. Em regra,  $k_{c,90}$  é adotado com valor igual a 1, porém podem variar casos os suportes sejam contínuos ou discretos, como explicados na figura 51, tipo de madeira, ou ainda, se o valor de  $l_1$  é maior ou igual a duas vezes o valor da altura da seção.

$$k_{c,90} = (2,38 - l/250) \cdot [1 + h/(12 \cdot l)] \text{ para } a \leq h/3 \quad (52)$$

$$k_{c,90} = (2,38 - l/250) \cdot [1 + h/(6 \cdot l)] \text{ para } a > h/3 \quad (53)$$

**Figura 51: Viga em seus apoios**



Fonte: Porteous e Kermami (2007, p. 122)

Há ainda o fator  $k_{sys}$  que aumenta as propriedades de resistências quando elementos estruturais semelhantes estão igualmente espaçados e conectados por um sistema de distribuição contínua de esforços (PORTEOUS; KERMAMI, 2007). Nestes casos, considera-se o valor de  $k_{sys}$  igual a 1,1.

Além disso, destaca-se o fator  $\gamma_m$  que leva em consideração a incerteza do modelo de resistência empregado no projeto, desvio desfavorável das propriedades mecânicas do material e os desvios geométricos. Para madeira laminada colada  $\gamma_m$  é igual 1,25, enquanto que para CLT pode variar entre 1,15 a 1,25 a depender do país de projeto (FSS, 2019).

Quanto à fluência, tem-se os valores de  $k_{def}$  e  $\psi$ . Estes valores variam em relação às condições de carregamento associadas a edifícios de madeira e ao tipo de produto de madeira engenheirada empregado conforme pode ser visto nas tabelas 17 e 18.

**Tabela 17 - Valores do fator redutor  $\psi$**

Material	Classe de serviço 1	Classe de serviço 2	Classe de serviço 3
Madeira maciça	0.6	0.8	2.0
Madeira laminada colada	0.6	0.8	2.0
LVL , EN 14279	0.6	0.8	2.0
Compensado	0.8	-	-
Compensado	0.8	1.0	-
Compensado	0.8	1.0	2.5
OSB - tipo OSB/2	2.25	-	-
OSB - tipos OSB/3, OSB/4	1.5	2.25	-

Fonte: Porteous e Kermami (2007, p. 78)

Na tabela 18, são apresentados alguns dos valores relevantes para as condições de carregamento associadas a edifícios de madeira.

**Tabela 18 - Valores do fator redutor  $\psi$**

Ação Variável	$\psi_0$	$\psi_1$	$\psi_2$
Categoria A: áreas domésticas e residenciais	0.7	0.5	0.3
Categoria B: áreas de escritório	0.7	0.5	0.3
Categoria C: áreas onde pessoas se reúnem	0.7	0.7	0.6
Categoria H: telhados (observando que a carga imposta não deve ser aplicada com carga de neve ou ação do vento)	0.7	0.0	0.0
Cargas de neve em edifícios (altitude $\leq 1000$ m acima do nível do mar)	0.5	0.2	0.0
Cargas de vento em edifícios	0.5	0.2	0.0

Fonte: Porteous e Kermami (2007, p. 59)

## APÊNDICE B - FATORES MODIFICADORES PRESENTES NA NBR 7190

A NBR 7190 (ABNT, 2013) apresenta três coeficientes que são empregados nos procedimentos de cálculo para verificação da resistência. O primeiro deles é o coeficiente de  $k_{mod}$  resultado do produto dos seguintes fatores:  $k_{mod.1}$ , que leva em consideração a classe de carregamento e o tipo de material empregado;  $k_{mod.2}$ , que leva em conta a classe de umidade e o tipo de material;  $k_{mod.3}$  está relacionado ao fato da madeira ser primeira ou segunda.

Entende-se a condição de madeira de primeira categoria quando todas as peças estruturais forem isentas de defeitos visualmente, e ainda, tenham comportamento mecânico homogêneo. Para primeira categoria tem-se que  $k_{mod.3}$  é igual a 1,0, enquanto que para segunda categoria é igual a 0,8.

As tabelas 19 e 20 apresentam os valores de  $k_{mod.1}$  e  $k_{mod.2}$ , respectivamente.

**Tabela 19 - Valores de  $k_{mod.1}$**

Classes de carregamento	Tipos de madeira	
	Madeira serrada Madeira roliça Madeira lamelada colada(MLC) Madeira lamelada colada cruzada (MLCC) Madeira laminada colada (LVL)	Madeira recomposta
Permanente	0,60	0,30
Longa duração	0,70	0,45
Média duração	0,80	0,65
Curta duração	0,90	0,90
Instantânea	1,10	1,10

Fonte: ABNT (2022, p. 14).

**Tabela 20 - Valores de  $k_{mod.2}$**

Classes de umidade	Madeira serrada Madeira laminada colada Madeira compensada	Madeira recomposta
(1)	1,0	1,0
(2)	0,9	0,95
(3)	0,8	0,93
(4)	0,7 <sup>a</sup>	0,90
<sup>a</sup> - Não é permitido uso do MLCC para classe de umidade (4)		

Fonte: ABNT (2022, p. 15).

Há também o fator  $k_M$  que a NBR 7190 faz referência como sendo um coeficiente de correção, o qual possui o valor de 0,5 para seções retangulares e 1,0 para outras seções transversais. Este valor é empregado para verificação de esforços combinados como pode ser visto no item 4.3.2.1.

Há ainda o fator de minoração  $\gamma_w$  dos valores de resistências mecânicas da madeira. Este fator é descrito na tabela 21.

**Tabela 21 - Valores de  $\gamma_w$**

Esforço	$\gamma_w$
Compressão paralela às fibras	1,4
Tração paralela às fibras	1,4
Cisalhamento paralelo às fibras	1,8

Fonte: ABNT (2022, p. 15).

## APÊNDICE C - CLASSES DE PAINÉIS EM MLCC APLICADAS AO ALGORITMO

**Tabela 22 - Descrição das propriedades mecânicas das classes de MLCC**

CLT GRADE	tp (mm)	Direção de maior resistência				Direção de menor resistência			
		E (kN/cm <sup>2</sup> )	ft (kN/cm <sup>2</sup> )	fc (kN/cm <sup>2</sup> )	fv (kN/cm <sup>2</sup> )	E (kN/cm <sup>2</sup> )	ft (kN/cm <sup>2</sup> )	fc (kN/cm <sup>2</sup> )	fv (kN/cm <sup>2</sup> )
E1	105	1170	1.54	1.93	0.15	900	0.32	.9	0.15
	175	1170	1.54	1.93	0.15	900	0.32	.9	0.15
	245	1170	1.54	1.93	0.15	900	0.32	.9	0.15
E2	105	1030	1.14	1.81	0.19	1000	0.21	.73	0.19
	175	1030	1.14	1.81	0.19	1000	0.21	.73	0.19
	245	1030	1.14	1.81	0.19	1000	0.21	.73	0.19
E3	105	830	0.67	1.51	0.13	650	0.2	.52	0.13
	175	830	0.67	1.51	0.13	650	0.2	.52	0.13
	245	830	0.67	1.51	0.13	650	0.2	.52	0.13
E5	105	1030	1.14	1.81	0.16	1000	0.32	.92	0.16
	175	1030	1.14	1.81	0.16	1000	0.32	.92	0.16
	245	1030	1.14	1.81	0.16	1000	0.32	.92	0.16
V1(N)	105	1100	0.58	1.4	0.19	1000	0.21	.73	0.19
	175	1100	0.58	1.4	0.19	1000	0.21	.73	0.19
	245	1100	0.58	1.4	0.19	1000	0.21	.73	0.19
V2	105	950	0.55	1.15	0.15	900	0.32	.9	0.15
	175	950	0.55	1.15	0.15	900	0.32	.9	0.15
	245	950	0.55	1.15	0.15	900	0.32	.9	0.15
V5	105	1100	0.62	1.48	0.16	1000	0.32	.92	0.16
	175	1100	0.62	1.48	0.16	1000	0.32	.92	0.16
	245	1100	0.62	1.48	0.16	1000	0.32	.92	0.16
S1	114	1030	1.91	2.15	0.17	1030	1.91	2.15	0.17
	190	1030	1.91	2.15	0.17	1030	1.91	2.15	0.17
	266	1030	1.91	2.15	0.17	1030	1.91	2.15	0.17
S2	114	890	1.66	1.82	0.19	930	1.66	1.82	0.19
	190	890	1.66	1.82	0.19	930	1.66	1.82	0.19
	266	890	1.66	1.82	0.19	930	1.66	1.82	0.19
S3	114	890	1.53	1.65	0.15	890	1.53	1.65	0.15
	190	890	1.53	1.65	0.15	890	1.53	1.65	0.15
	266	890	1.53	1.65	0.15	890	1.53	1.65	0.15

Fonte: Adaptado de ANSI/APA (2017).

Essas iniciais representam diferentes classes de materiais para madeira engenheirada:

- E (Engineered): Indica madeira com classificação estrutural mecânica. Tais classes são empregadas em camadas longitudinais e transversais para fornecer desempenho consistente e confiável.

- V (Visually Graded): Essa classificação faz referência à madeira classificada visualmente, cuja verificação se baseia em critérios visuais, como nós e defeitos. O produto de madeira engenheirada com essa classificação é adequado para aplicações estruturais, porém com um nível de confiabilidade diferente das classificadas mecanicamente.
- S (Specialty): Refere-se a produtos de madeira engenheirada obtidos a partir de processos específicos de fabricação objetivando fornecer alta resistência e estabilidade dimensional, sendo aplicados principalmente em usos estruturais. São exemplos: o LVL (Laminated Veneer Lumber), LSL (Laminated Strand Lumber), e OSL (Oriented Strand Lumber). Esses produtos são fabricados para

**Tabela 23 - Descrição qualitativa das classes de MLCC**

Identificação	Camadas Longitudinais	Camadas Transversais
E1	Madeira MSR 1950f-1.7E Spruce-pine-fir	Madeira No. 3 Spruce-pine-fir
E2	Madeira MSR 1650f-1.5E Douglas fir-Larch	Madeira No. 3 Douglas fir-Larch
E3	Madeira MSR 1200f-1.2E Eastern Softwoods, Northern Species, ou Western Woods	Madeira No. 3 Eastern Softwoods, Northern Species, ou Western Woods
E4	Madeira MSR 1950f-1.7E Southern pine	Madeira No. 3 Southern pine
E5	Madeira MSR 1650f-1.5E Hem-fir	Madeira No. 3 Hem-fir
V1	Madeira No. 2 Douglas fir-Larch	Madeira No. 3 Douglas fir-Larch
V1(N)	Madeira No. 2 Douglas fir-Larch (North)	Madeira No. 3 Douglas fir-Larch (North)
V2	Madeira No. 1/No. 2 Spruce-pine-fir	Madeira No. 3 Spruce-pine-fir
V3	Madeira No. 2 Southern pine	Madeira No. 3 Southern pine
V4	Madeira No. 2 Spruce-pine-fir South	Madeira No. 3 Spruce-pine-fir South
V5	Madeira No. 2 Hem-fir	Madeira No. 3 Hem-fir
S1	Madeira Laminada LVL 2250f-1.5E	Madeira Laminada LVL 2250f-1.5E
S2	Madeira Laminada LSL 1900f-1.3E	Madeira Laminada LSL 1900f-1.3E
S3	Madeira Laminada OSL 1750f-1.3E	Madeira Laminada OSL 1750f-1.3E

Fonte: Adaptado de ANSI/APA (2017).

Notas:

- MSR (Machine Stress Rated) consiste na classificação de resistência da madeira com base em testes de estresse mecânico.
- LVL (Laminated Veneer Lumber) é um tipo de madeira lamelada composta por lâminas finas coladas.
- LSL (Laminated Strand Lumber) é um tipo de madeira lamelada composta por tiras de madeira.
- OSL (Oriented Strand Lumber), diferentemente do LSL, neste produto de madeira engenheirada as tiras de madeira são orientadas em direções específicas para aumentar a resistência.
- As letras "F" e "E" referem-se à resistência à flexão e ao módulo de elasticidade da madeira, respectivamente.
- Spruce-pine-fir (SPF) - Píceas, pinheiros e abetos
- Douglas fir-Larch - Pseudotsuga (ou pinheiro-de-Oregon) e lariço
- Eastern Softwoods, Northern Species, or Western Woods - Coníferas do leste, espécies do norte ou madeiras do oeste
- Southern pine - Pinheiro do sul
- Hem-fir - Hemlock e abeto

## APÊNDICE D - VARIÁVEIS DE PROJETO

**Tabela 24 - Descrição das variáveis de entrada**

Variável	Índice	Descrição
<b>Entrada</b>	1	Valor da distância do vão da laje que é o mesmo valor do comprimento das vigas secundárias
	2	Valor do fator multiplicativo cujo o produto com o valor do vão da laje resulta no vão principal que é o mesmo valor do comprimento das vigas principais
	3	Número de replicações do módulo básico no eixo x
	4	Número de replicações do módulo básico no eixo y
	5	Distância entre pisos (pé direito)
	6	Proporção da abertura em planta do par de paredes orientadas em x com relação a vão da laje
	7	Número de pavimentos
	8	Velocidade básica do vento
	9	Índice do catálogo de MLC (Tabela 6) para a escolha da seção transversal das vigas secundárias
	10	Índice do catálogo de MLC (Tabela 6) para a escolha da seção transversal das vigas principais
	11	Índice do catálogo de MLC (Tabela 6) para a escolha da seção transversal dos pilares
	12	Número de replicações das camadas de MLC dos pilares
	13	Índice do catálogo de MLCC (Tabela 22) para a escolha do painel das lajes
	14	Classe de resistência de MLC dos pilares
	15	Classe de resistência de MLC das vigas secundárias
	16	Classe de resistência de MLC das vigas principais

Fonte: Elaborada pelo autor.

**Tabela 25 - Descrição das variáveis de saída**

Variável	Índice	Descrição
Saída	17	Frequência natural do conjuntos de painéis de laje do pavimento (Hz)
	18	DF de flambagem - Em uma análise de segunda ordem, existe um valor de esforço normal para uma determinada barra que geraria a instabilidade de um sistema estrutural. A partir da razão percentual entre o esforço normal de projeto que atua nesta barra e o esforço que leva a instabilidade da estrutura é obtido o DF de flambagem.
	19	DF relacionados às tensões de cisalhamento por rolamento das lajes obtidas considerando apenas as ações gravitacionais
	20	DF relacionados às tensões de cisalhamento das lajes obtidas considerando apenas as ações gravitacionais
	21	DF relacionados às tensões normais das lajes obtidas considerando apenas as ações gravitacionais
	22	DF relacionados às tensões de cisalhamento por rolamento das lajes obtidas considerando a combinação das ações gravitacionais com as ações do vento
	23	DF relacionados às tensões de cisalhamento das lajes obtidas considerando a combinação das ações gravitacionais com as ações do vento
	24	DF relacionados às tensões normais das lajes obtidas considerando a combinação das ações gravitacionais com as ações do vento
	25	DF relacionados às tensões normais das vigas secundárias obtidas considerando apenas as ações gravitacionais
	26	DF relacionados às tensões de cisalhamento das vigas secundárias obtidas considerando apenas as ações gravitacionais
	27	DF relacionados às tensões normais das vigas secundárias obtidas considerando a combinação das ações gravitacionais com as ações do vento
	28	DF relacionados às tensões de cisalhamento das vigas secundárias obtidas considerando a combinação das ações gravitacionais com as ações do vento
	29	DF relacionados às tensões normais das vigas principais obtidas considerando apenas as ações gravitacionais
	30	DF relacionados às tensões de cisalhamento das vigas principais obtidas considerando apenas as ações gravitacionais
	31	DF relacionados às tensões normais das vigas principais obtidas considerando a combinação das ações gravitacionais com as ações do vento

	32	DF relacionados às tensões de cisalhamento das vigas principais obtidas considerando a combinação das ações gravitacionais com as ações do vento
	33	DF relacionados às tensões normais dos pilares obtidas considerando apenas as ações gravitacionais
	34	DF relacionados às tensões de cisalhamento dos pilares obtidas considerando apenas as ações gravitacionais
	35	DF relacionados às tensões normais dos pilares obtidas considerando a combinação das ações gravitacionais com as ações do vento
	36	DF relacionados às tensões de cisalhamento dos pilares obtidas considerando a combinação das ações gravitacionais com as ações do vento
	37	DF relacionado a máxima deflexão das vigas secundárias
	38	DF relacionado a máxima deflexão das vigas principais
	39	DF relacionado a máxima deflexão das lajes
	40	DF relacionado ao máximo deslocamento de topo dos pilares
	41	Taxa de consumo ( $\text{m}^3/\text{m}^2$ )

Fonte: Elaborada pelo autor.