

Universidade Estadual de Campinas
Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo

Gustavo Rosa Violin

**Concepção Estrutural Paramétrica de Projetos
em Madeira Lamelada Colada e Madeira Lamelada Cruzada**

Campinas

2019

Universidade Estadual de Campinas
Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo

Gustavo Rosa Violin

**Concepção Estrutural Paramétrica de Projetos
em Madeira Lamelada Colada e Madeira Lamelada Cruzada**

Trabalho Final de Curso apresentado
como requisito parcial para obtenção do
título de **Bacharel em Engenharia Civil** à
Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura
e Urbanismo da Universidade Estadual de
Campinas.

Orientadora: Profa. Dra. Maria Gabriela Caffarena Celani

Coorientador: Prof. Dr. Felipe Tavares da Silva

Campinas

2019

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

V813c Violin, Gustavo Rosa, 1994-
Concepção estrutural paramétrica de projetos em madeira lamelada colada e madeira lamelada cruzada / Gustavo Rosa Violin. – Campinas, SP : [s.n.], 2019.

Orientador: Maria Gabriela Caffarena Celani.

Coorientador: Felipe Tavares da Silva.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo.

1. Design paramétrico. 2. Novo estruturalismo. 3. Madeira lamelada colada. 4. Estrutura Paramétrica. 5. Madeira lamelada cruzada. I. Celani, Maria Gabriela Caffarena, 1967-. II. Silva, Felipe Tavares da. III. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. IV. Título.

Informações adicionais, complementares

Título em outro idioma: Parametric structural conception with glulam and cross laminated timber

Palavras-chave em inglês:

Parametric design

New structuralism

Glulam

Parametric structure

Cross laminated timber

Titulação: Bacharel

Banca examinadora:

Cilmar Donizeti Baságli

Nilson Tadeu Mascia

Data de entrega do trabalho definitivo: 04-12-2019

**Concepção Estrutural Paramétrica de Projetos
em Madeira Lamelada Colada e Madeira Lamelada Cruzada**

Gustavo Rosa Violin

BANCA EXAMINADORA

.....
Profa. Dra. Maria Gabriela Caffarena Celani
Orientadora

.....
Prof. Dr. Cilmar Donizeti Baságua

.....
Prof. Dr. Nilson Tadeu Mascia

Aprovado em: _____

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho ao meu querido amigo Rodrigo Adrian de Oliveira Abans, cuja vida de anseios e questionamentos muito contribuiu para a minha formação pessoal. Esses 18 anos de amizade foram essenciais para que eu conseguisse superar todas as dificuldades que a vida trouxe. Que sua alma encontre conforto onde quer que esteja.

AGRADECIMENTOS

À minha orientadora Maria Gabriela Caffarena Celani pelo grande apoio e pela supervisão do trabalho, mesmo com o pouco tempo de que dispunha.

Ao meu coorientador Felipe Tavares da Silva pela supervisão, pelos conselhos e pelo imenso encorajamento oferecido ao longo do ano.

À minha namorada Raquel Maria Riera Maia, pelo apoio incondicional nas horas mais difíceis, nunca poupando esforços para me ajudar da forma que conseguisse.

Ao meu amigo Rodrigo Adrian de Oliveira Abans pelo incentivo de constante aprimoramento pessoal e busca pelo conhecimento.

Aos meus pais Airton Violin e Elizabeth Rosa da Costa Manso por todo o suporte pessoal e carinho ao longo desses anos.

À minha irmã Daniela Rosa Violin por toda a amizade desenvolvida ao longo dos anos.

Aos meus amigos Israel de Oliveira Fialho e Gustavo Alcalá Batistela pelo companheirismo, pela paciência e pelos longos desabafos ao longo desses últimos anos.

À equipe da empresa Rewood pelo material disponibilizado e pelo tempo dispendido para auxílio deste trabalho, em especial ao Dr. Carlito Calil Neto, ao Eng. Caio Cainã Ferreira, ao Eng. Murilo Negreli e ao Eng. Leonardo Kaufman.

Aos professores do Departamento de Estruturas da FEC-UNICAMP, em especial ao Prof. Dr. Cilmar Donizeti Baságli, ao Prof. Dr. Nilson Tadeu Mascia e ao Prof. Dr. Saulo José de Castro Almeida pelo tempo dispendido fora da sala de aula.

Aos coordenadores da Engenharia Civil, Prof. Dra. Luana Mattos de Oliveira Cruz e ao Prof. Dr. Gustavo Henrique Siqueira pelos conselhos fornecidos e pelo extenso apoio dado, em especial nesses últimos meses.

À Arq. Bárbara de Holanda Maia Teixeira e ao Arq. Henrique Monteiro de Souza pelo auxílio e empenho em desenvolver o trabalho de forma colaborativa.

Ao Arq. Caio Magalhães Castriotto pela ajuda e pela indicação de referências utilizadas como base para esse trabalho.

Aos amigos Lucas Tamaki Otani e Pedro Vinícios Orlando Oliveira pelo companheirismo.

Gostaria também de agradecer a todas os amigos, familiares, colegas e professores que colaboraram direta ou indiretamente com a elaboração deste trabalho.

RESUMO

O trabalho aqui desenvolvido descreve a concepção estrutural paramétrica em madeira engenheirada de dois projetos arquitetônicos. Para tanto, ele foi realizado de forma colaborativa com o Trabalho Final de Graduação de dois alunos do curso de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas (Unicamp): Henrique Monteiro de Souza e Bárbara de Holanda Maia Teixeira. O projeto de Bárbara consiste em um Laboratório de Fabricação Digital no campus da Unicamp, em Barão Geraldo. Ele propõe a criação de um espaço que valorize a interdisciplinaridade na Universidade através da convivência entre os alunos e do incentivo à pesquisa. Já o projeto de Henrique consiste em uma faculdade para o CNPEM (Centro Nacional de Pesquisa em Energia e Materiais), localizada também em Campinas, São Paulo. Seu trabalho visa a inovação através do desenvolvimento da relação entre academia, empresas e comunidade. A partir dos dois projetos supracitados, o presente estudo procura compreender e explorar as possibilidades da colaboração entre engenheiros estruturais e arquitetos trabalhando juntos desde o início do processo projetual. Para isso, o principal embasamento teórico é expresso pelo artigo *New Structuralism* (2010), de Rivka Oxman e Robert Oxman. Ao longo do desenvolvimento da pesquisa, objetivou-se criar um sistema estrutural que atendesse aos projetos apresentados, com o intuito de ser adaptável para ambos. Para isso, foi desenvolvido um código que possui parâmetros de entrada gerais e que comporta uma análise básica dos Estados Limites Últimos e de Serviço de uma estrutura em Madeira Lamelada Colada e Madeira Lamelada Cruzada. O modelo do projeto foi desenvolvido no Rhinoceros 6 (MCNEEL, 2015), um programa CAD que trabalha com superfícies NURBS. Mais especificamente, foi utilizado o plugin Grasshopper para a concepção da geometria paramétrica e o plugin Karamba 3D (PREISINGER, 2013) para a análise estrutural. Ao longo do processo, foram necessários outros plugins para auxiliar na concepção do código. Por fim, almejou-se, com este estudo, expandir os limites do desenvolvimento de projetos estruturais em conjunto com os arquitetos, buscando explorar ao máximo a madeira engenheirada, os métodos descritos e a tecnologia disponível de forma a se alcançar o melhor resultado possível.

Palavras-chave: Design Paramétrico; Novo Estruturalismo; Mass Timber; Estrutura Paramétrica; Madeira Lamelada Colada; Madeira Lamelada Cruzada.

ABSTRACT

This work presents two parametric structural design projects developed in engineered timber. These projects were developed in a collaborative way with two architecture students of University of Campinas (UNICAMP): Henrique Monteiro de Souza e Bárbara de Holanda Maia Teixeira. Barbara's project consists in a digital fabrication laboratory located inside UNICAMP, in Barão Geraldo's district. It proposes the creation of a space that valorizes the interdisciplinarity in the campus through the interaction between students and through the encouragement in researching. On the other hand, Henrique's project consists in a college made for the CNPEM (National Center in research of Energy and Materials), located in Campinas, São Paulo. His project aims at creating an innovation space through the development of the relation between the academic circle, companies and the community. Taking these two projects as a base, the present study seeks to understand and explore the possibilities of a collaboration between structural engineers and architects working together since the beginning of the projectual process, following the theoretical background specified in the article *New Structuralism* (2010), of Rivka Oxman and Robert Oxman. Through the development of this research, a structural system that served both projects was aimed, with the objective of being an adaptable system. To do that, a code was developed which has general input parameters and that compute a basic Ultimate Limit State and Serviceability Limit State analysis of the Glulam and CLT structure. The work was developed in Rhinoceros 6 (MCNEEL, 2015), a CAD software that works with NURBS surfaces. More specifically, Grasshopper plugin was used in the conception of the parametric structure and the plugin Karamba 3D (PREISINGER, 2013) to compute the structural analysis. Through the develop of the code other plugins were used to aide the conception of the coding. Finally, the whole project intended to expand the limits of the developing of structural projects with architects, pursuing to explore to the maximum the engineered timber, the described methods and the available technology intending to reach the best possible result.

Keywords: Parametric Design; New Structuralism; Mass Timber; Parametric Structure; Glulam; Cross Laminated Timber.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 MOTIVAÇÃO	1
1.2 CONTEXTUALIZAÇÃO	2
1.3 OBJETIVO	4
1.4 METODOLOGIA	5
2 CONCEITOS	6
2.1 DESIGN PARAMÉTRICO	6
2.2 DESIGN ALGORÍTMICO	6
2.3 NOVO ESTRUTURALISMO	7
2.4 PROCESSO DE PROJETO <i>OVER THE WALL</i>	7
2.5 CNC (Computer Numeric Control)	8
3 MADEIRA ENGENHEIRADA	11
3.1 MADEIRA LAMELADA COLADA (MLC OU GLULAM)	12
3.2 MADEIRA LAMELADA CRUZADA (CLT OU CROSS LAMINATED TIMBER)	16
4 SOFTWARES UTILIZADOS	20
4.1 GRASSHOPPER	20
4.1.1 LÓGICA DE TRABALHO	20
4.2 KARAMBA	24
5 CONCEPÇÃO ESTRUTURAL	31
5.1 ESCOLHA DO MATERIAL	31
5.2 ESCOLHA DO SISTEMA ESTRUTURAL	31
5.3 VISITA DE CAMPO	34
5.4 COMPATIBILIZAÇÃO	38
5.5 CONEXÕES	39
6 DESENVOLVIMENTO DO PROGRAMA DE CONCEPÇÃO ESTRUTURAL	41
6.1 GRID	41
6.1 MODELO UNIFILAR	46
6.3 CRIAÇÃO DOS ELEMENTOS ESTRUTURAIS	47
6.3.1 PILARES	48
6.3.2 VIGAS	49

6.3.3 APOIOS	50
6.3.4 MATERIAIS	50
6.3.6 VINCULAÇÕES	55
6.3.7 CONTRAVENTAMENTOS	63
7 CONSIDERAÇÕES DE CÁLCULO	66
7.1 NORMAS UTILIZADAS	66
7.2 VENTO	66
7.3 CARREGAMENTOS VERTICAIS	68
7.3.1 CONSIDERAÇÕES DOS VALORES DE CARGA	68
7.3.2 COMBINAÇÕES DE CARGAS	69
8 CÁLCULOS E VERIFICAÇÕES	72
8.1 VIGAS E PILARES DE MLC	72
8.1.1 PILARES	72
8.1.2 VIGAS	76
8.2 LAJES DE CLT	79
9 PROPOSTA PARA UTILIZAÇÃO DO CÓDIGO	86
10 ANÁLISE DOS PROJETOS	88
10.1 CICLO FAB LAB	88
10.1.1 O PROJETO	88
10.1.2 ESTRUTURA	88
10.1.3 RESULTADOS	90
10.2 CIEnCIA – UM ESPAÇO DE INOVAÇÃO	94
10.2.1 O PROJETO	94
10.2.2 ESTRUTURA	95
10.2.3 RESULTADOS	102
10.3 CONSIDERAÇÃO SOBRE A FABRICAÇÃO	112
10.4 CONSIDERAÇÕES SOBRE O CONTRAVENTAMENTO	113
11 CONCLUSÃO	114

1 INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO

A partir do segundo ano de faculdade, comecei a participar do programa Formação Ampliada da FEC/ UNICAMP que visa a integração entre os cursos de Engenharia Civil e de Arquitetura e Urbanismo. Nesse programa participei da disciplina eletiva AU251 – Projeto Paramétrico de Estruturas Arquitetônicas, ministrada pelo Prof. Dr. Felipe Tavares da Silva, na qual me aprofundei nos conceitos de Engenharia Paramétrica e pude perceber um território extremamente rico em termos de possibilidades. Também através de um convite da minha orientadora, eu tive a oportunidade de participar como monitor PAD da disciplina AU149 – Projeto IX: Verticalidade, ministrada pela Profa. Dra. Maria Gabriela Caffarena Celani e pelo Prof. Dr. Carlito Calil Neto. Esta disciplina também contou com a participação do PED Filipe Medeira Campos e do PED Caio Magalhães Castriotto, cujo tema de doutorado abarca a área de estruturas arquitetônicas em madeira. Tal experiência me colocou em contato com os princípios da madeira engenheirada, especialmente a Madeira Lamelada Colada, e contribuiu para o entendimento e utilização do material na arquitetura e na engenharia.

Quanto mais eu entrava em contato com essas grandes áreas de conhecimento, menos eu entendia porque elas eram ensinadas quase que completamente a parte uma da outra. Da mesma forma que a estrutura possibilita que o projeto arquitetônico construa o bem-estar do usuário, ela só ganha um sentido a partir de todos os conceitos e estratégias arquitetônicas utilizadas. São intrínsecos.

E foi justamente nessa fronteira que eu me encontrei. Ao me deparar com o projeto paramétrico, logo me interessei pela pluralidade de áreas de conhecimento que estavam envolvidas e as possibilidades que isso propiciava. Formas complexas e não convencionais que só estão se tornando realidade por causa dessa intensa confluência entre a Engenharia, a Arquitetura, o Design e a Programação.

Todo esse contexto é amplamente representativo da forma de pensar do século XXI, já sendo muito implementado em vários países fora do Brasil. Dessa forma, é de meu interesse maior adentrar nesse campo de pesquisa e explorar os limites das possibilidades que essa nova tendência está criando.

1.2 CONTEXTUALIZAÇÃO

Os grandes avanços tecnológicos da última década possibilitaram engenheiros e arquitetos a conceberem edifícios de formas cada vez mais complexas. Projetos como o BMW Welt (Figura 1) (Coop Himmelb(l)au, 2007) em Munique, na Alemanha e a Ópera de Guangzhou (Figura 2) (Zaha Hadid Architects, 2010) em Guangdong, na China, só puderam ser idealizados e executados utilizando as ferramentas mais recentes de modelagem e de fabricação digital. Em face disso, novas demandas têm surgido para a concepção de estruturas, fazendo com que os métodos tradicionais, já há muito consolidados, sejam repensados e exigindo que novos processos de projeto sejam desenvolvidos.

Figura 1: BMW Welt, Munique, 2007.



Fonte: <http://www.archiexpo.com/pt/prod/josef-gartner/product-58213-142763.html>

Figura 2: Ópera de Guangzhou, China, 2010



Fonte: <http://www.arcoweb.com.br/projetodesign/arquitetura/zaha-hadid-architects-teatro-guangzhou-13-07-2011>

O projeto paramétrico tem buscado resolver esse conflito entre os métodos tradicionais e as novas demandas da arquitetura ao traduzir ideias através de parâmetros de projeto que controlem uma ação explícita. Isso possibilita que engenheiros consigam atuar desde o início do projeto de forma colaborativa com arquitetos na concepção estrutural, para que haja o melhor aproveitamento do material e a otimização do sistema estrutural.

No que diz respeito à madeira engenheirada, percebe-se uma clara tendência mundial à sua utilização, uma vez que estão surgindo cada vez mais edifícios altos e formas curvas utilizando tal material. Esse evento pode ser observado no quadro abaixo que indica alguns dos principais edifícios construídos ou em andamento concebidos em madeira no mundo.

Figura 3: Alguns exemplos de edifícios de madeira ao redor do mundo

Name	Location	Stories	Year
Limnologen (Figure 2)	Växjö, Sweden	8	2009
Stadthaus	London, UK	8	2010
Bridport House	London, UK	8	2010
Holz8	Bad Aibling, Germany	8	2011
E-3	Berlin, Germany	7	2011
Forte	Melbourne, Australia	10	2012
LifeCycle Tower One	Dornbirn, Austria	8	2012
Pentagon II	Oslo, Norway	8	2013
Wagramerstrasse	Vienna, Austria	7	2013
Cenni di Cambiamento	Milan, Italy	9	2013
Panorama Giustinelli	Triste, Italy	7	2013
Treet(Figure 3)	Bergen, Norway	14	2014
Strandparken	Stockholm, Sweden	8	2014
Wood Innovation Design Centre	British Columbia, Canada	8	2014
Contralaminada	Lleida, Spain	8	2014
St. Die-des-Vosges	St. Die-des-Vosge, France	8	2014
Puukuokka	Jyvaskyla, Finland	8	2015
Trafalgar Place	London, UK	10	2015
Banyan Wharf	London, UK	10	2015
Dalston Lane	London, UK	10	2015
Shoreditch	London, UK	10	2015
Maison de l'Inde	Paris, France	7	TBA
Wood City	Helsinki, Finland	8	TBA
Abrora	Montreal, Canada	8	TBA
Carbon 12	Portland, OR, USA	8	TBA
Framework/Beneficial Bank	Portland, OR, USA	12	TBA
475 West 18 th	New York, NY, USA	10	TBA
HoHo Vienna	Vienna, Austria	24	2017
Origine	Quebec City, Canada	13	2017

Fonte: BOWYER, BRÁTKOVICH, HOWE, FERNHÖLZ, FRANK, HANESSIAN, GROOT, PEPKE (2017, p. 5)

Isso se dá pelas características que serão tratadas no próximo capítulo deste trabalho – por se tratar de um material sustentável, por sua grande capacidade portante e pela eficiência do processo de fabricação e de montagem aliadas a uma paulatina aceitação do material por parte do mercado. Ademais, também se notou um crescente campo de pesquisa a ser desenvolvido que aborda desde questões específicas do comportamento do material até estudos sobre outras formas de se utilizar a madeira, como o NLT, LVL e o DLT.

1.3 OBJETIVO

Considerando o que foi explanado anteriormente, o objetivo do presente trabalho é o desenvolvimento de um sistema paramétrico que efetue o pré-dimensionamento de estruturas em madeira lamelada colada e madeira lamelada cruzada que possa ser utilizado nas fases iniciais do projeto. Procura-se, assim,

entender como se dá o processo colaborativo do projeto estrutural paramétrico, de que forma ele contribui para que a concepção estrutural esteja presente desde o início da proposta e quais as implicações desse procedimento.

1.4 METODOLOGIA

Serão realizadas duas concepções estruturais de forma colaborativa com projetos arquitetônicos elaborados por dois alunos do curso de Arquitetura e Urbanismo da Unicamp, Henrique Monteiro de Souza e Bárbara de Holanda Maia Teixeira. Portanto, este sistema paramétrico visa criar uma estrutura que possa ser adaptável para ambos os casos, pois, além de ser utilizado o mesmo material estrutural – a madeira engenheirada -, tais trabalhos possuem lógicas de projeto que definem desafios estruturais similares. Assim sendo, o algoritmo será concebido paralelamente ao desenvolvimento destes projetos, possibilitando incorporar as necessidades específicas dos profissionais de arquitetura ao longo do processo. Com isso, busca-se evitar os efeitos de projetos over-the-wall, no qual o engenheiro parte de um projeto arquitetônico já concebido e busca criar um sistema estrutural a partir dele. Tal lógica bloquearia a possibilidade de o arquiteto realizar experimentos estruturais que permitiriam que ambos chegassem juntos na melhor relação entre estrutura e arquitetura. Além disso, ao se idealizar o programa levando-se em conta dois projetos diferentes, amplia-se a flexibilidade do código, fazendo com que ele atenda a uma gama maior de possibilidades projetuais.

2 CONCEITOS

Com a finalidade de introduzir terminologias importantes que serão abordadas no presente trabalho, será feita uma sucinta definição dos principais conceitos que compõem a base teórica utilizada como referência para os projetos.

2.1 DESIGN PARAMÉTRICO

Segundo Neil Leach e Philip F. Yuan (2012), no campo da arquitetura, o design paramétrico está associado ao uso de softwares de modelagem paramétrica. Esta concepção se refere à criação de formas baseadas em parâmetros que podem ser variados, ao contrário dos softwares tradicionais onde a geometria é referenciada por dados fixos. A variação de cada parâmetro específico ocorre com um imediato reajuste de tudo que está relacionado com ele através de uma readaptação, harmonização e suavização da geometria. Isso faz com que haja uma grande facilidade em se remodelar as formas, possibilitando maior controle no processo de concepção. Além disso, ele fornece informações mais detalhadas, garantido maior nível de precisão para o processo de fabricação digital. Por fim, o design paramétrico não se relaciona apenas com a forma, mas também com novos modelos de eficiência e de coordenação do processo construtivo. Ele permite que a equipe de projeto interaja em uma plataforma única e possibilita um maior nível de controle em termos de prazos e custo de construção.

2.2 DESIGN ALGORÍTMICO

O design algorítmico se refere à manipulação do design digital pela programação através de scripts, que permitem ao projetista ir além das limitações que o software impõe. Entretanto, como existe uma certa dificuldade atrelada à programação textual, alguns softwares se utilizam do chamado *graphic scripting*, que visa atenuar esse entrave. Assim, ele permite que o usuário tenha maior controle sobre a geometria e consiga poupar tempo com tarefas laboriosas e repetitivas.

2.3 NOVO ESTRUTURALISMO

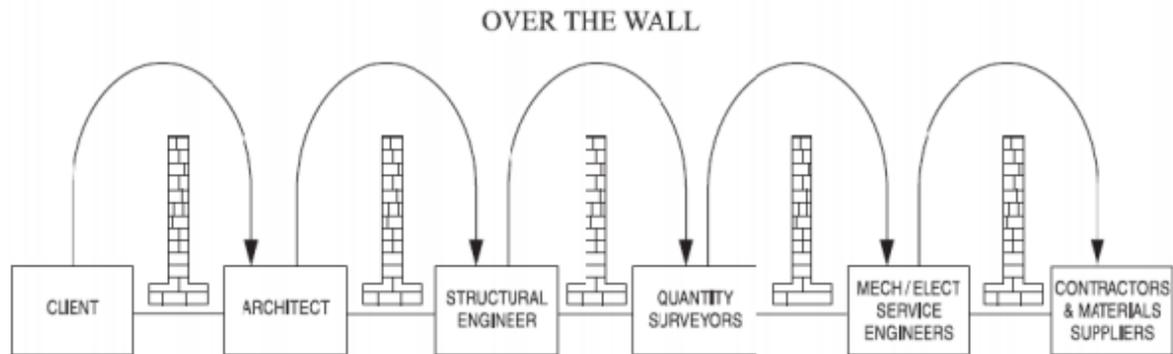
O Novo Estruturalismo é um conceito que fundamenta a revolução que está ocorrendo no campo da arquitetura e da engenharia, expressa pela nova forma colaborativa de projeto entre engenheiros estruturais e arquitetos. O movimento propõe a inversão do desenvolvimento tradicional de projeto, que se dá pela sequência – “forma, estrutura, material” – para “material, estrutura, forma”. Segundo Rivka Oxman e Robert Oxman, o Novo Estruturalismo envolve também a interrelação de três outros conceitos: Estruturação, Tectônica Digital e Materialização.

Primeiramente, a Estruturação procura discretizar estruturas em padrões conhecidos com fins de explorar experimentalmente a forma representada. Para isso, utiliza-se modelos matemáticos e formas inspiradas na natureza, sendo o processo caracterizado por um expressivo viés geométrico. Em segundo lugar, o termo Tectônica Digital faz referência a programas que, através de códigos e parametrizações, permitem a criação de topologias estruturais. Nesse conceito, é enfatizada a importância da programação no que diz respeito aos padrões estruturais. Finalmente, a Materialização enfoca a função do material no projeto. Tal conceito aborda a habilidade de trabalhar com o material e as técnicas de representações de materiais na estrutura.

2.4 PROCESSO DE PROJETO *OVER THE WALL*

Over The Wall é um conceito utilizado para descrever a relação sequencial entre os profissionais envolvidos no método tradicional de se fazer um projeto. Segundo Evbuomwan e Anumba (1998), tal relação se dá da seguinte forma: o arquiteto faz um projeto a partir do contato com o cliente; esse projeto é passado para o engenheiro estrutural, que faz a concepção e o cálculo; em seguida, o engenheiro passa o projeto para o orçamentista para especificar o custo e a quantidade de materiais; então, o projeto é entregue para o empreiteiro, que toma decisões com a construtora sobre questões práticas, como a produção dos elementos do edifício e a montagem da obra.

Figura 4: Esquema ilustrativo do projeto sequencial Over The Wall



Fonte: EVBUOMWAN; ANUMBA, 1998, p. 588.

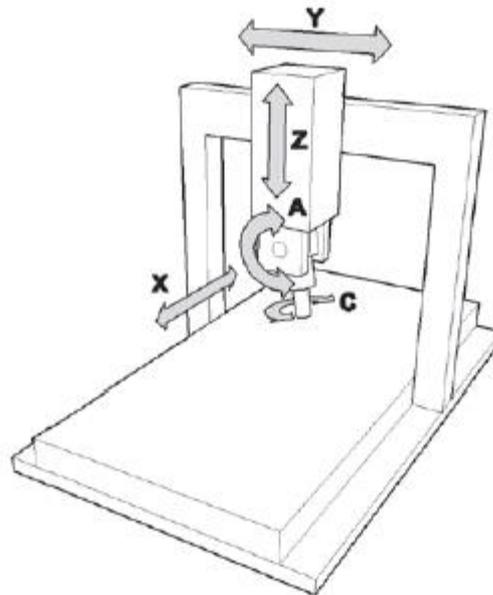
Esta abordagem impõe que os profissionais atuem em um momento específico do projeto e de forma isolada, sem interação com os outros profissionais que estão envolvidos. Cada um é responsável por resolver apenas os problemas referentes à sua área de atuação, não sendo pensadas as questões do edifício como um todo, o que geralmente resulta em diversas interferências entre as áreas envolvidas, resultando em retrabalho e desperdício de recursos.

2.5 CNC (Computer Numeric Control)

As fresadoras CNC são dispositivos eletromecânicos que permitem manipular determinadas ferramentas de remoção de material ao longo de um número variado de eixos com alta precisão (que pode chegar a 0,001 milímetros) através de instruções passadas por um programa de computador. Elas operam através da *Subtractive Fabrication*, que é definida pela remoção de um volume específico de material de sólidos brutos. A técnica CNC representa uma das maneiras na qual pode ser produzido um objeto físico a partir de um modelo digital. Além disso, outro modo também muito utilizado atualmente é conhecido como *Additive Fabrication*, no qual o modelo é formado pela deposição e pelo acúmulo de material como se dá, por exemplo, através da impressora 3D.

Os modelos mais básicos de fresadoras CNC possuem 2 eixos de movimento (X e Y) e os mais completos podem chegar a ter 5 eixos (3 translacionais - X, Y e Z - e 2 rotacionais – o longo de X e de Y).

Figura 5: Graus de liberdade da máquina CNC de 5 eixos

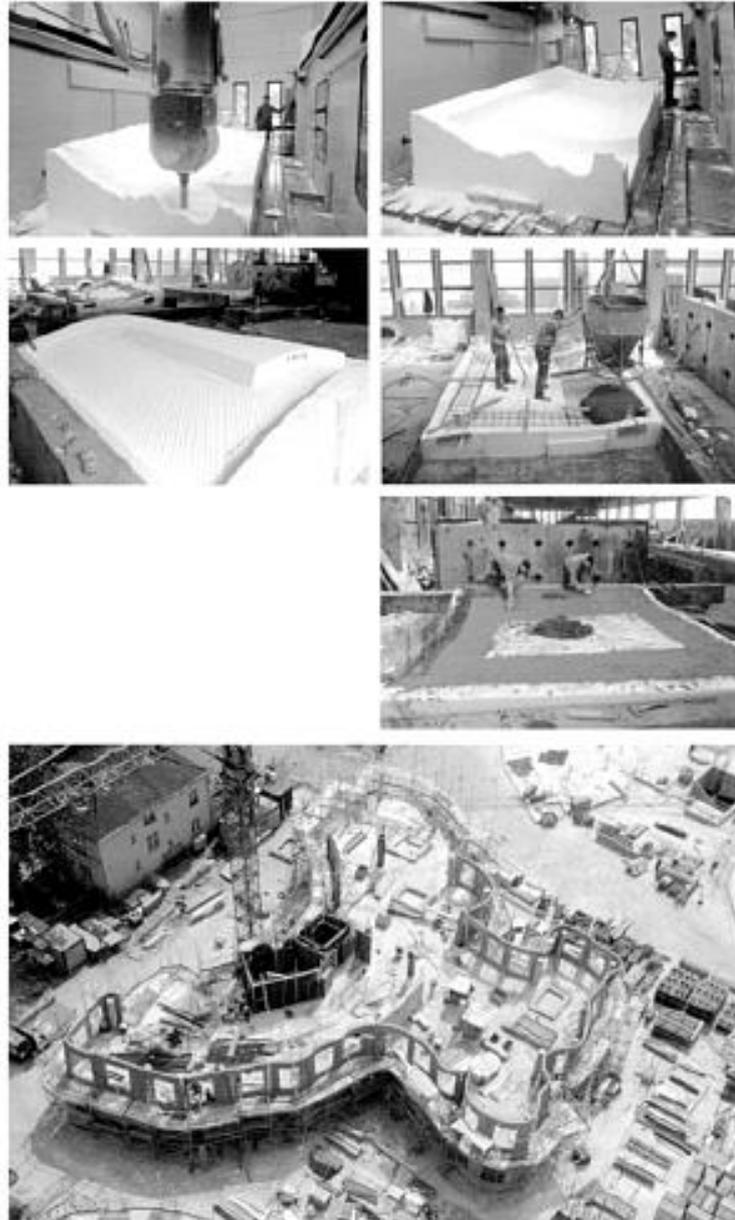


Fonte: KOLAREVIC, 2003, p. 54.

Existem também diversas ferramentas que podem ser acopladas na cabeça de corte do aparelho, possuindo variados tamanhos e diâmetros. Maiores diâmetros são utilizados para remoção de material e os menores são utilizados para acabamento do modelo. Além disso, a fresa pode ser realizada em diferentes velocidades de rotação, a depender das propriedades do material a ser fresado. Um sistema dedicado de computador executa as funções básicas de controle sobre o movimento da máquina, utilizando uma sequência de instruções codificadas através do chamado G-Code. A geometria é importada ao software de pós-processamento que gera as instruções que são transmitidas para a fresadora. Além das fresadoras e das máquinas de manufatura aditiva, outros equipamentos CNC são as cortadoras a laser, a plasma e a oxicorte.

Esse processo foi recentemente incorporado de novas maneiras na indústria da construção civil. Um exemplo marcante é o da produção das fôrmas dos elementos de concreto com dupla curvatura no projeto das Zollhof Towers de Frank Gehry:

Figura 6: Produção das fôrmas da Zollhof Towers (2000)



Fonte: KOLAREVIC, 2003, p. 55.

3 MADEIRA ENGENHEIRADA

De acordo com Simone Jeska e Khaled Pascha (2015), a madeira foi extensivamente utilizada como material de construção na antiguidade. Ela geralmente é ligada a costumes tradicionais e regionalistas como construções da idade média e templos presentes na história da arquitetura japonesa.

Entretanto, os autores apontam que a madeira ficou em segundo plano durante a revolução industrial, quando o aço e o concreto armado começaram a ganhar maior destaque como material estrutural. Os métodos manuais de processamento da madeira se mostraram muito lentos quando comparados com os materiais industrializados emergentes.

Para Jeska e Pascha, porém, nos últimos anos houve um rápido crescimento dos métodos de racionalização e industrialização de produtos trabalhados em madeira. Um dos principais fatores que contribuíram para esse desenvolvimento foi o uso de madeiras engenheiradas no lugar da madeira convencional, através de conexões coladas padronizadas e de alta qualidade. Segundo os autores, esse fator, somado a diversas outras tecnologias de ligações e juntas recentemente criadas, tornaram possível a execução de longos vãos em madeira que, em vários casos, se mostram tão econômicos quanto o aço ou o concreto armado. Hoje, esse processo de industrialização faz com que a madeira deixe de ser um material com propriedades não uniformes para se tornar um material que pode ser completamente previsível e controlado.

O aumento da escolha da madeira como material estrutural contemporâneo também está fortemente relacionado ao seu caráter sustentável. Isso se dá pelo fato de que, no crescimento das árvores é absorvido CO₂ da atmosfera e utilizada apenas a energia solar nesse processo. Uma tonelada de madeira estrutural (já seca) contém 510 quilos de carbono correspondente a 1,8 toneladas de CO₂ que está aprisionado no material. Apenas ao apodrecer ou ao ser queimada a madeira retorna esse gás carbônico para a atmosfera. Portanto, a madeira representa um material com uma taxa de produção de carbono nula e pode ser facilmente retornada ao meio ambiente, gerando resíduos biodegradáveis. Comparando-a com outros materiais de

construção, ela possui uma energia necessária para produção e processamento muito baixa.

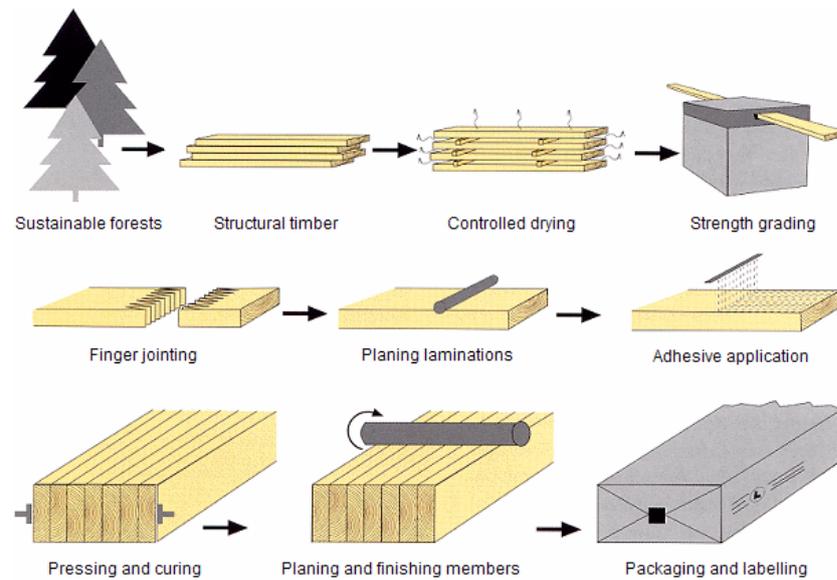
O grande desenvolvimento das ferramentas CAD também é um fator que contribui fortemente para a utilização da madeira nos últimos anos, devido à facilidade de transformar um modelo digital em comandos para serem executados por robôs na fabricação dos elementos estruturais. A alta precisão garantida pelas máquinas CNC e a possibilidade de produção automatizada de geometrias complexas torna o material ainda mais atrativo para engenheiros e arquitetos, considerando ainda a velocidade de produção. Dessa forma, os componentes estruturais podem ser produzidos sob medida de forma econômica e sem a necessidade de grandes lotes. O princípio estrutural tradicional rígido e ortogonal está perdendo espaço até mesmo do ponto de vista econômico para estruturas mais elaboradas e baseadas em formas geométricas livres.

3.1 MADEIRA LAMELADA COLADA (MLC OU GLULAM)

A madeira lamelada colada é resultado de uma forma de se engenheirar o elemento estrutural de madeira através da colagem de diversas lamelas de madeira (de espessura variando de 1 a 5 centímetros cada), com as fibras orientadas no sentido do comprimento do elemento, aumentando, assim, sua capacidade estrutural.

O elemento estrutural em MLC é produzido a partir de ripas de madeira previamente secas e tratadas contra fungos e cupins. Tais ripas recebem cola nas faces de contato e são prensadas durante a secagem do adesivo, formando elementos estruturais lineares (vigas ou pilares) (Figura 7). Para serem produzidos peças mais longas, cada ripa é unida a uma nova, dando continuidade ao comprimento do elemento. Isso faz com que não haja limites para suas dimensões, podendo ter o seu comprimento estendido de acordo com a necessidade do projeto e, da mesma forma, a altura da seção do elemento alongada conforme forem sendo coladas mais lamelas (Figura 8).

Figura 7: Processos de fabricação de um elemento em MLC.



Fonte: <http://glulambeams.co.uk/about-glulam/what-is-glulam>

Figura 8: Fabricação de um arco em MLC de grandes dimensões pela empresa norte-americana Unalam.



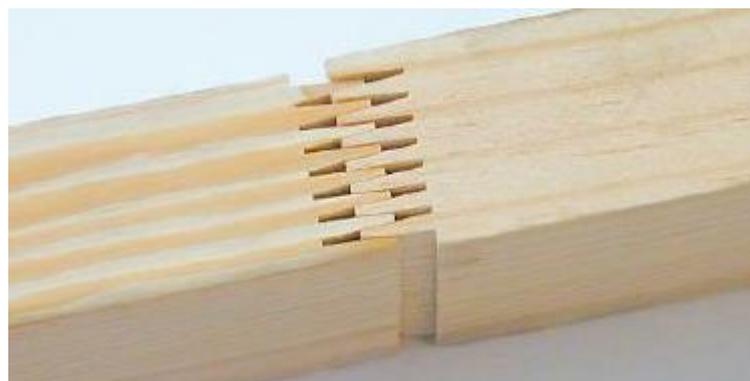
Fonte: <http://unalam.blogspot.com/2017/08/manufacturing-large-glulam-arches.html>

Outro diferencial da MLC com relação à madeira normal é a homogeneização do material. A madeira é tradicionalmente tida como um material que possui uma difícil previsibilidade estrutural devido às imperfeições e processos naturais de crescimento (como os nós). A MLC, no entanto, é formada apenas por ripas pré-selecionadas em que fatores indesejados são removidos de forma a unificar o comportamento do material, como se ele fosse formado por apenas um elemento e não pela colagem de vários.

Apesar de a MLC ter sido patenteada há mais de um século atrás (em 1906, mais especificamente), um fator primordial que possibilitou seu uso construtivo de forma ampla foi o desenvolvimento de adesivos que garantissem uma boa resistência estrutural de forma que o elemento colapse pelo rompimento das fibras da madeira e não por falha da superfície colada. Diferente de pregos ou parafusos, a cola leva grande vantagem na junção das lamelas pois garante que a interação seja rígida e trabalhe de forma bidimensional (e não pontual). Essa característica, aliada a diversos fatores como o preço acessível dos adesivos; sua facilidade de aplicação; a manutenção da resistência estrutural ao longo do tempo; os períodos curtos de secagem; a impermeabilidade à água e a resistência ao crescimento de fungos são fatores que fizeram com que a MLC ficasse comercial e estruturalmente viável no mercado contemporâneo.

Além do adesivo, o desenvolvimento de junções eficientes entre as ripas de madeira também se mostrou essencial para a viabilização da MLC. A principal delas, as *Finger Joints* (Figura 9), são caracterizadas pela presença de dentes que se intertravam na seção de junção de ambos os elementos. Tais ligações (que também recebem uma demão de adesivo), são realizadas em todas as lamelas, mas não na mesma seção, garantindo uma continuidade para o elemento de forma que as junções não representem pontos frágeis da estrutura.

Figura 9: *Finger Joint*



Fonte: <https://maxworldmktg.com.my/product/finger-joint/>

Existe ainda a possibilidade de classificação da qualidade estrutural da madeira através de tecnologias como Raio-X, escaneamento 3D e testes mecânicos que podem identificar peças mais ou menos resistentes de forma que as mais resistentes

possam ser posicionadas em situações que exijam mais do material (nos extremos da seção transversal). Esse posicionamento das lamelas também pode ter como diretriz um controle estético dos elementos aparentes, fazendo com que eventuais nós (que não eram grandes o suficiente para precisarem ser retirados previamente) fiquem à vista ou não.

Ainda outra característica marcante da MLC é a possibilidade de se produzir elementos com geometria curva devido ao processo de colagem das lamelas, dependendo apenas dos moldes e das prensas disponíveis. Este método, continua garantido o sentido das fibras, que é o principal responsável pela elevada resistência da MLC. Caso se tratasse de madeira maciça convencional, a peça curva só poderia ser produzida cortando um elemento de seções sólidas, o que acarretaria em um desperdício muito elevado de material. Essa liberdade de formas é uma das principais características que colocam a MLC como um material de destaque cenário da arquitetura contemporânea, possibilitando a concepção de obras complexas como o Nine Bridge Country Club, do arquiteto japonês Shigeru Ban (Figura 10).

Por fim, vale também ressaltar a resistência da madeira em situações de incêndio. A carbonização da superfície da madeira durante um incêndio protege o material no centro da seção transversal, mantendo boa parte da integridade estrutural do elemento.

Figura 10: Nine Bridge Country Club

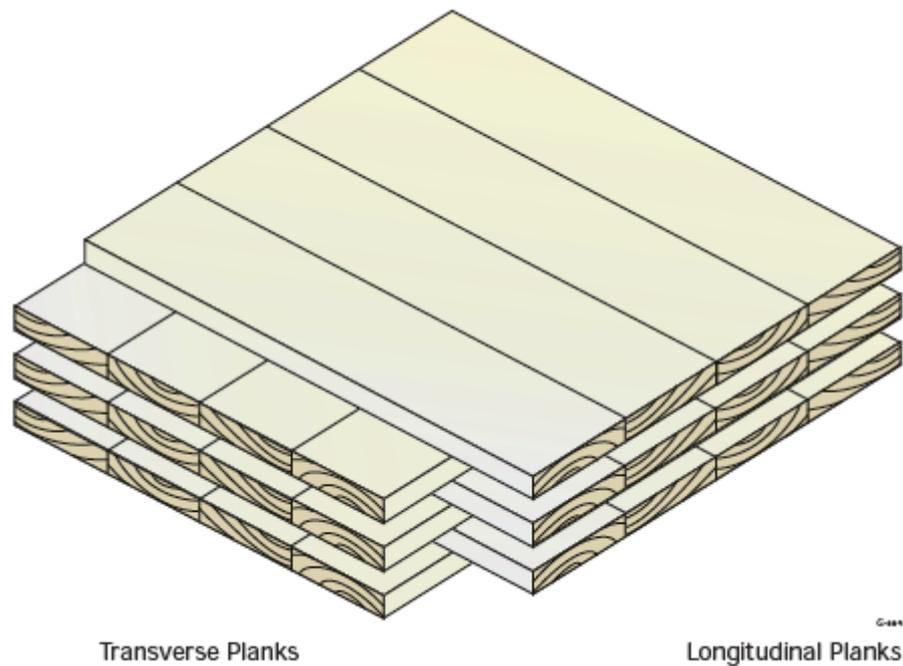


Fonte: <https://www.archdaily.com.br/br/01-189060/nine-bridges-country-club-slash-shigeru-ban-architects>

3.2 MADEIRA LAMELADA CRUZADA (CLT OU CROSS LAMINATED TIMBER)

A madeira lamelada cruzada consiste em placas que são formadas por lamelas de madeira coladas com o sentido das fibras variando em 90 graus em cada camada. Tal configuração permite que o esforço aplicado na placa seja distribuído em ambos os sentidos do elemento, conferindo uma capacidade portante nas duas direções e fazendo com que ela trabalhe analogamente a lajes de concreto armado (CLT CANADIAN HANDBOOK – cap. 1, pag. 4). As lamelas geralmente variam de 6 a 45 milímetros de espessura e são conectadas longitudinalmente por finger joints e transversalmente por aplicação de adesivo estrutural (NOVAK, KOPPELHUBBER E POCK – pag. 9). As placas de CLT são comumente utilizadas como lajes, coberturas, paredes estruturais e vigas-parede.

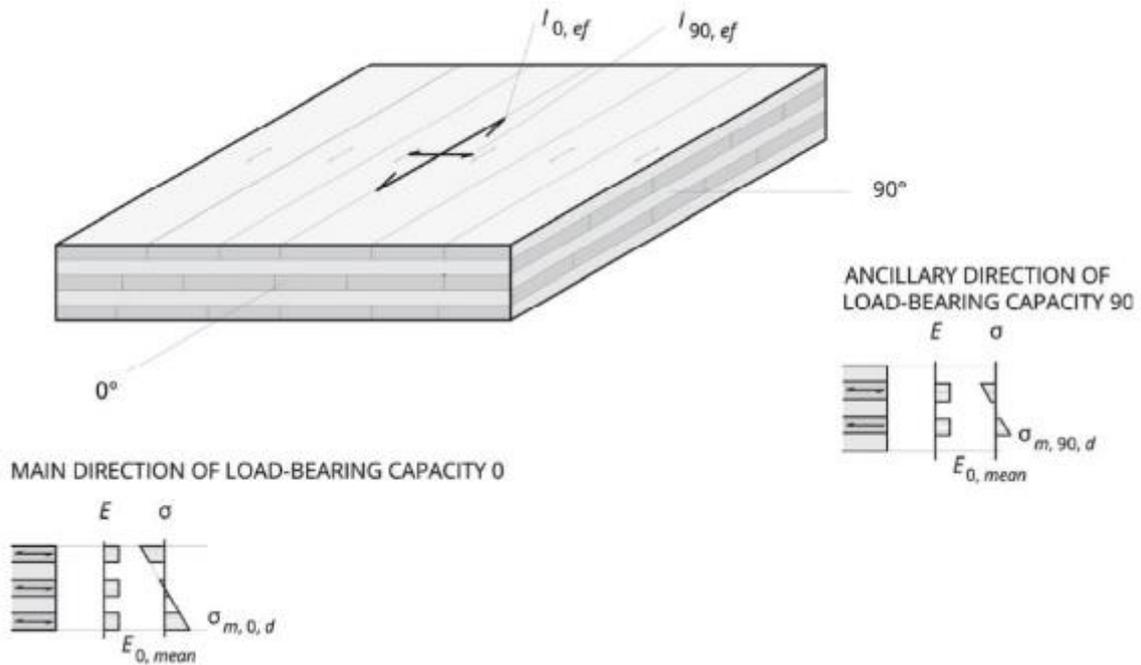
Figura 11: Placa de CLT formada pelas lamelas longitudinais e transversais



Fonte: CLT Canadian Handbook, Cap 1 p. 4

Segundo o CLT USA HANDBOOK (Cap. 1 pag.1) apesar de se tratar de um produto relativamente novo no cenário da construção civil, é altamente competitivo em termos de custo e capacidade portante, e pode substituir elementos construtivos de concreto, alvenaria e aço. O livro também aponta que o uso de painéis de CLT tem crescido consideravelmente na Europa nos últimos anos principalmente em função de se tratar de um material industrializado que permite diversas configurações de formas e um ganho de velocidade na obra bastante significativo, similar à MLC. Isso tem ganhado força principalmente em edifícios de média altura (entre 5 e 10 pavimentos). As placas são geralmente constituídas por um número ímpar de camadas, tendo as fibras das lamelas externas o mesmo sentido do vão (no caso de lajes e coberturas), o que aumenta a capacidade portante do elemento nessa disposição, já que as fibras mais tracionadas e mais comprimidas da seção estarão trabalhando na direção de maior resistência da madeira (NOVAK, KOPPELHUBBER E POCK - pg 13).

Figura 12: Detalhes das tensões atuantes nas seções de uma placa de CLT



Fonte: NOVAK, KOPPELHUBBER E POCK - pg 12

Apesar de se tratar de uma tecnologia recente, o CLT está sendo bastante incorporado no cenário internacional podendo ter como exemplo o edifício Brock Commons em Vancouver no Canadá, concebido para ser a moradia estudantil da University of British Columbia. Ele possui 2 cores estruturais de concreto que contraventam a estrutura de 18 pavimentos e foi construído em um sistema de pilares de MLC e lajes de CLT.

Figura 13: Edifício Brock Commons construído em mass timber em Vancouver



Fonte: TAYLOR, 2017, p. 83.

4 SOFTWARES UTILIZADOS

Para o desenvolvimento do algoritmo proposto, será utilizado o software Rhinoceros 6, um programa CAD que trabalha com superfícies NURBS, através dos plugins Grasshopper e Karamba 3D.

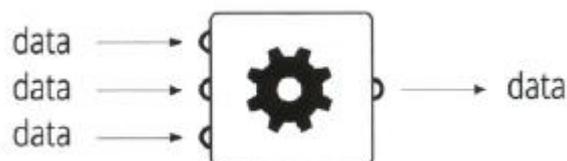
4.1 GRASSHOPPER

Como o intuito deste estudo é utilizar o Grasshopper como ambiente de desenvolvimento do projeto proposto, não serão abordadas questões aprofundadas sobre o funcionamento do programa. Assim, a dinâmica do software será apresentada de forma sucinta, tendo sido incluso em anexo a este trabalho um documento com uma explicação mais detalhada de forma a complementar o entendimento do leitor, caso seja necessário.

4.1.1 LÓGICA DE TRABALHO

O Grasshopper é um plugin do Rhinoceros 3D, um programa CAD de modelagem NURBS, que consiste em uma linguagem de programação visual possuindo como base a utilização de componentes pré-programados para executar funções específicas. Conforme aponta Tedeski (2013), tais componentes executam transformações em dados, ou seja, necessitam de dados como input para executar suas operações e geram novos dados como output.

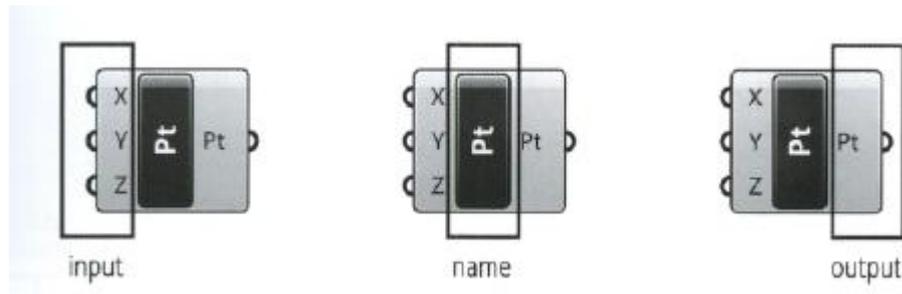
Figura 14: Esquema de funcionamento de um componente do Grasshopper



Fonte: TEDESKI, 2013, p. 40.

Um exemplo simples de componente é o Construct Point, que gera um ponto na interface do Rhinoceros 3D a partir da informação de 3 números que representam as coordenadas, x, y e z. Para mudar a posição do ponto criado, os dados de entrada devem ser modificados de acordo com a sua nova localização.

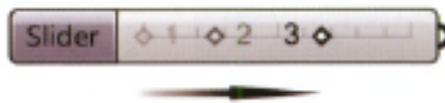
Figura 15: Partes de um componente do Grasshopper



Fonte: TEDESKI, 2013, p. 41.

Além de definir números manualmente para mudar a posição dos pontos, pode-se utilizar, por exemplo, o componente Number Slider, que cria um domínio de números que pode ser percorrido ajustando-se o cursor central presente na interface do componente. Assim, quando o cursor se encontrar na posição 2, ele fornecerá o número 2 como output.

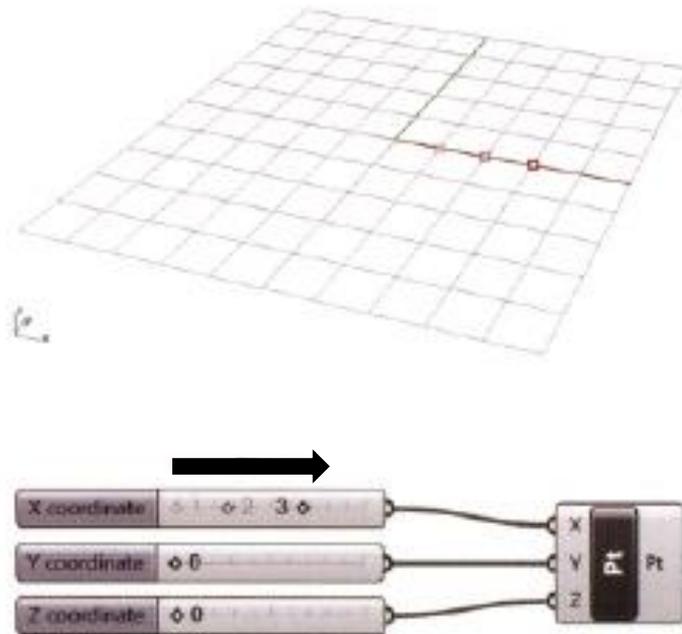
Figura 16: Componente Number Slider variando de 1 a 3



Fonte: TEDESKI, 2013, p. 44.

Dessa forma, pode-se ligar 3 Number Sliders, um em cada input do componente Construct Point definindo, assim, 3 domínios dinâmicos para a criação do ponto. Isso significa que o ponto criado pelo componente que aparece na interface do Rhinoceros 3D muda de lugar parametricamente conforme o usuário percorre o Number Slider referente a uma das coordenadas.

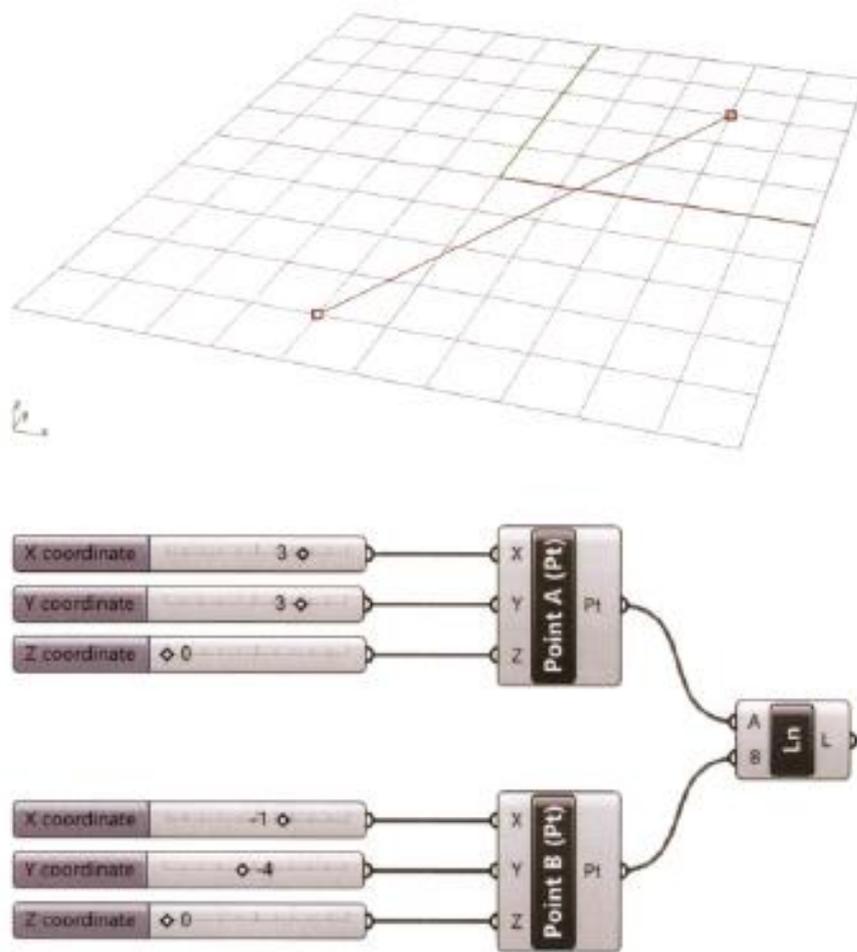
Figura 17: Variação da coordenada X através do componente Number Slider.



Fonte: TEDESKI, 2013, p. 45.

As conexões entre os componentes são representadas por fios que formalmente são utilizados para construir sequências algorítmicas (TEDESKI, 2013, p. 46) e representam a transferência de informação entre eles. Assim, uma linha pode ser gerada utilizando o componente Line, que requer 2 elementos de ponto como inputs. Dessa forma, pode-se conectar o output de 2 componentes Construct Point no input de um componente Line, gerando, então, uma linha entre os dois pontos previamente criados. Entretanto, caso os pontos tiverem sido criados com Number Sliders, a linha gerada é paramétrica, significando que existe uma possibilidade de combinações de coordenadas dentro dos domínios pré-estabelecidos dos pontos que cria diferentes possibilidades de linhas.

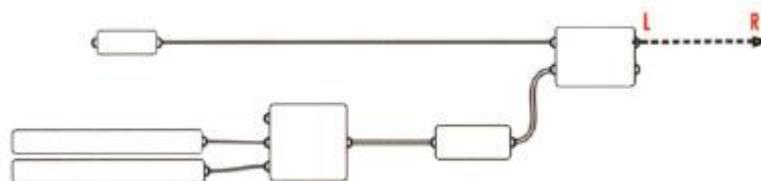
Figura 18: Criação de um segmento de reta paramétrico



Fonte: TEDESKI, 2013, p. 47.

Por último, é importante perceber que como a convenção dos componentes do Grasshopper se dá com os inputs à esquerda e os outputs à direita, o fluxo de dados no programa se dá da esquerda para a direita.

Figura 19: Fluxo de informação ente os componentes do Grasshopper



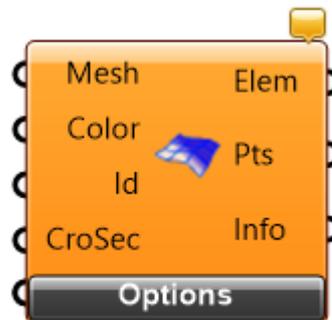
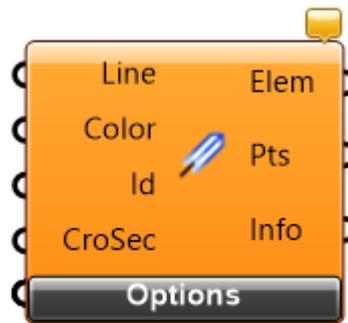
Fonte: TEDESKI, 2013, p. 59.

4.2 KARAMBA

Karamba3D é um plugin do Grasshopper de análise estrutural paramétrica em elementos finitos. Ele utiliza como base geometrias produzidas no próprio Grasshopper ou importadas do Rhinoceros 3D para criar um modelo estrutural e calcular resultados de deformações, esforços, utilização dos elementos, entre outras possibilidades.

A partir dele, é possível criar elementos estruturais como vigas, pilares e placas com base em geometrias de linhas e superfícies. Tal transformação é realizada através dos componentes Line To Beam e Mesh To Shell, que possuem como principais inputs Line e Mesh, que referenciam conjuntos de elementos geométricos. Outros inputs importantes nesses componentes são o CroSec, que atribui uma Seção Transversal aos elementos, e o Id, que permite a classificação dos elementos para análises separadas.

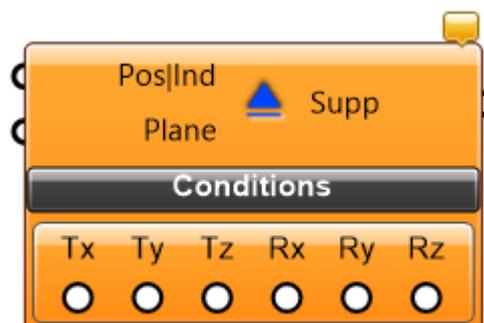
Figura 20: Componentes Line To Beam (acima) e Mesh To Shell (abaixo)



Fonte: Imagem elaborada pelo autor.

Outra ferramenta essencial no Karamba 3D é o componente Supports, que permite a associação de pontos do modelo (input Pos|Ind) a apoios estruturais, com a possibilidade de restrição dos 6 graus de liberdade.

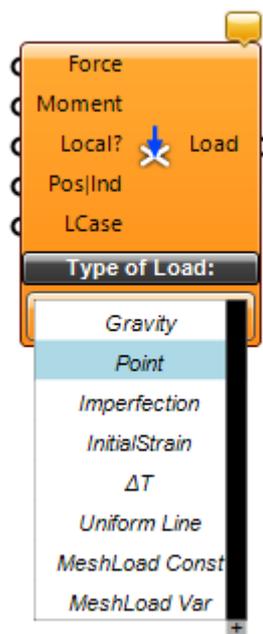
Figura 21: Componente Supports



Fonte: Imagem elaborada pelo autor.

O componente Loads permite a definição de diversos tipos de carregamentos (Cargas Gravitacionais, Cargas Pontuais, Cargas de Mesh, etc.) com inputs variáveis, porém sempre utilizando-se de um vetor de entrada que indica a direção e o módulo do carregamento (input Force). Tal componente também exige que seja referenciada a geometria à qual será aplicado esse carregamento, que deve ser especificado no input Pos|Ind. Outra atribuição importante deste componente é o input LCase, que permite que sejam criados casos de cargas distintos – bastante úteis para elaborar as combinações de cargas especificadas pela NBR8681.

Figura 22: Componente Loads indicando o menu que permite escolher o tipo de carregamento que será criado

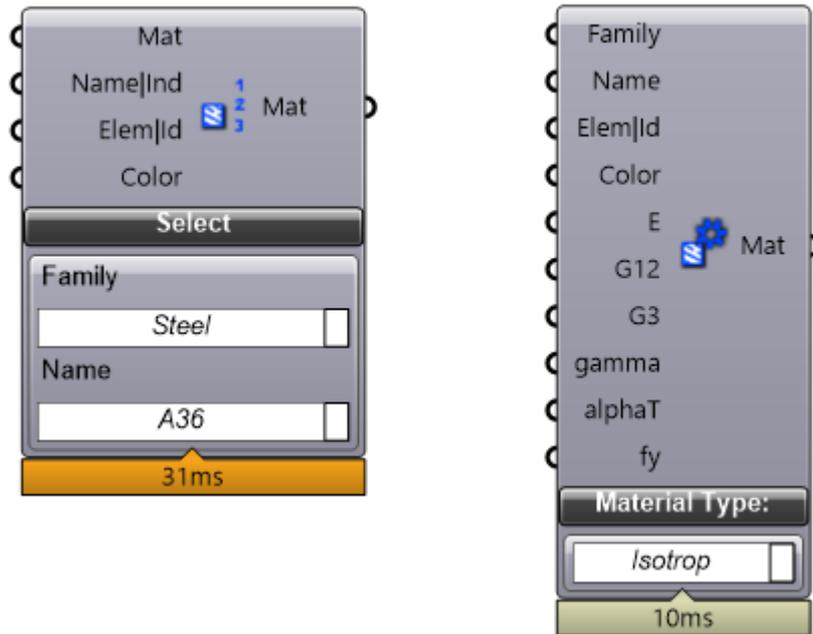


Fonte: Imagem elaborada pelo autor.

Com relação aos materiais, o Karamba3D permite a utilização de um catálogo interno já pré-configurado com uma ampla seleção de materiais através do componente MatSelec. Outra opção oferecida pelo plugin é dada pelo componente MatProp, que permite definir manualmente as características dos materiais utilizados segundo dois tipos: materiais isotrópicos e materiais ortotrópicos. Neste caso, o componente possui inputs das propriedades dos materiais, tais como o módulo de

elasticidade e o peso específico. Vale frisar que o input Elem|Id permite que sejam atribuídos diferentes materiais a elementos específicos, pré-definidos pelo usuário nos componentes LineToBeam e MeshToShell.

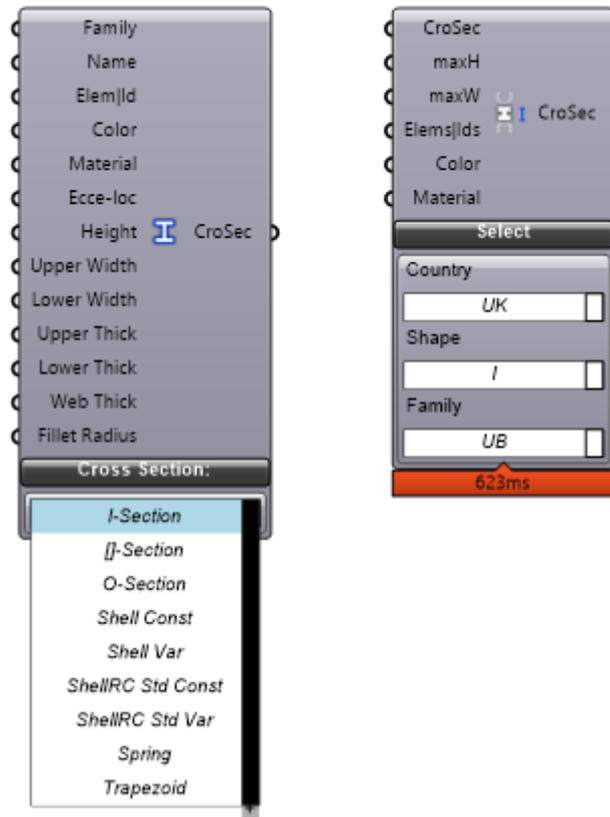
Figura 23: Componentes MatSelec (à esquerda) e MatProp (à direita)



Fonte: Imagem elaborada pelo autor.

Por fim, outro componente primordial para a concepção do modelo de análise é o Cross Section, que permite definir seções transversais para os elementos do modelo, possuindo uma grande variedade de tipologias de seções. Os principais inputs constituem as dimensões da seção transversal que variam conforme o tipo selecionado pelo usuário. Assim como nos materiais, o Karamba3D possui um componente chamado CroSecRSelec, que acessa uma biblioteca interna do Karamba 3D com alguns catálogos de seções que também podem ser utilizados. Novamente, o input Elem|Id pode ser utilizado para especificar diferentes seções para elementos específicos do modelo.

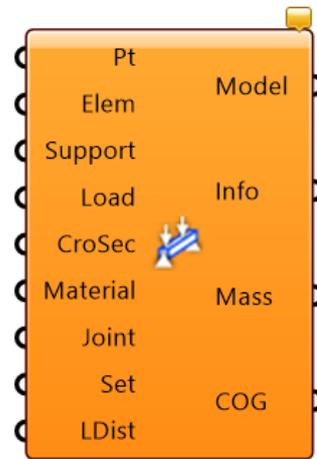
Figura 24: Componentes Cross Section (à esquerda) e CroSecRSelec (à direita)



Fonte: Imagem elaborada pelo autor.

Uma vez realizadas tais definições, o modelo estrutural é consolidado através do componente Assemble Model, no qual são conectados todos os componentes descritos anteriormente. Esse componente é responsável por juntar todas as informações definidas nos componentes anteriores e as transformar em um modelo de simulação, deixando-o pronto para a análise. Uma saída importante desse componente é a Mass, que indica o peso total da estrutura, informação que pode ser utilizada para a otimização do gasto de material.

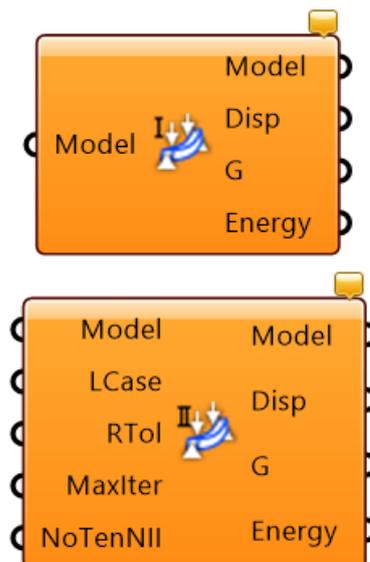
Figura 25: Componente Assemble Model



Fonte: Imagem elaborada pelo autor.

Em seguida, o modelo criado é conectado ao componente Analyze para que sejam executados os cálculos. Tal componente realiza análise estática de modelos submetidos a pequenos deslocamentos. Existe ainda a possibilidade de se utilizar o componente Analyze ThII, que computa as deflexões utilizando a teoria de segunda ordem para pequenos deslocamentos.

Figura 26: Componentes Analyze (acima) e Analyze ThII (abaixo)



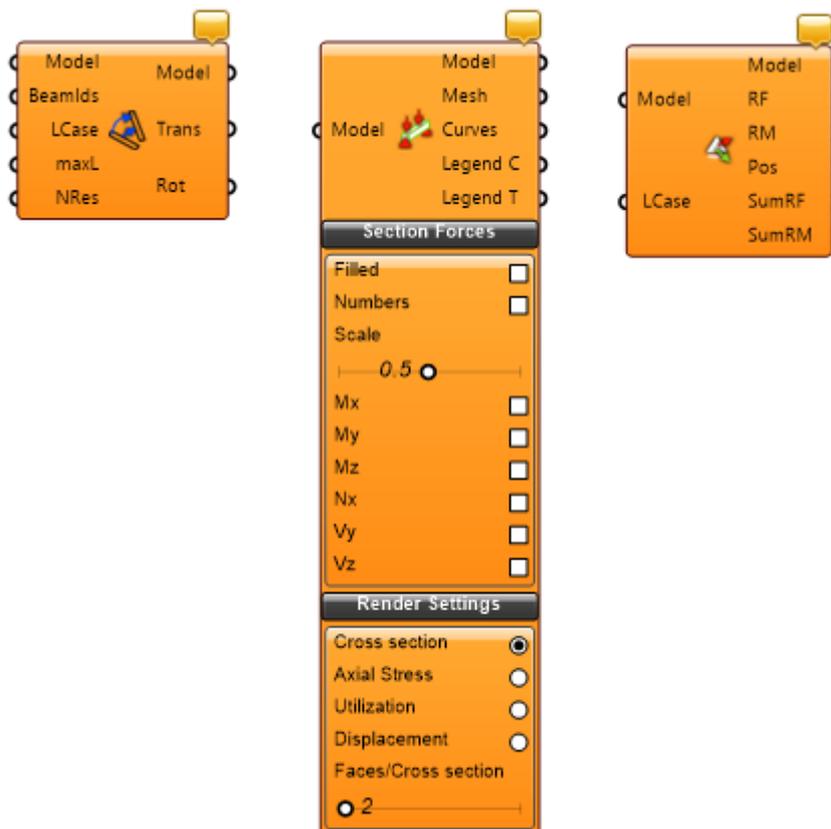
Fonte: Imagem elaborada pelo autor.

Finalmente, a saída do componente Análise gera o modelo estrutural calculado, que pode ser ligado a outros componentes específicos para a extração de resultados. Vale notar que a saída Disp fornece o maior deslocamento global obtido no modelo.

Alguns exemplos de componentes que podem ser aplicados para a análise dos resultados são o Beam Displacements, que retorna os deslocamentos nos nós dos elementos determinados pelo usuário; o Beam View, que permite, entre outras funções, a visualização dos diagramas de esforços dos elementos do modelo; e o Reaction Forces, que retorna os valores dos esforços de reações nos apoios.

Além desses atributos, o Karamba3D ainda permite que sejam calculadas a vibração natural da estrutura, os modos de falha, as linhas principais de esforços em superfícies entre outras possibilidades.

Figura 27: Componentes Beam Displacements (à esquerda), Model View (ao centro) e Reaction Forces (à direita)



Fonte: Imagem elaborada pelo autor.

5 CONCEPÇÃO ESTRUTURAL

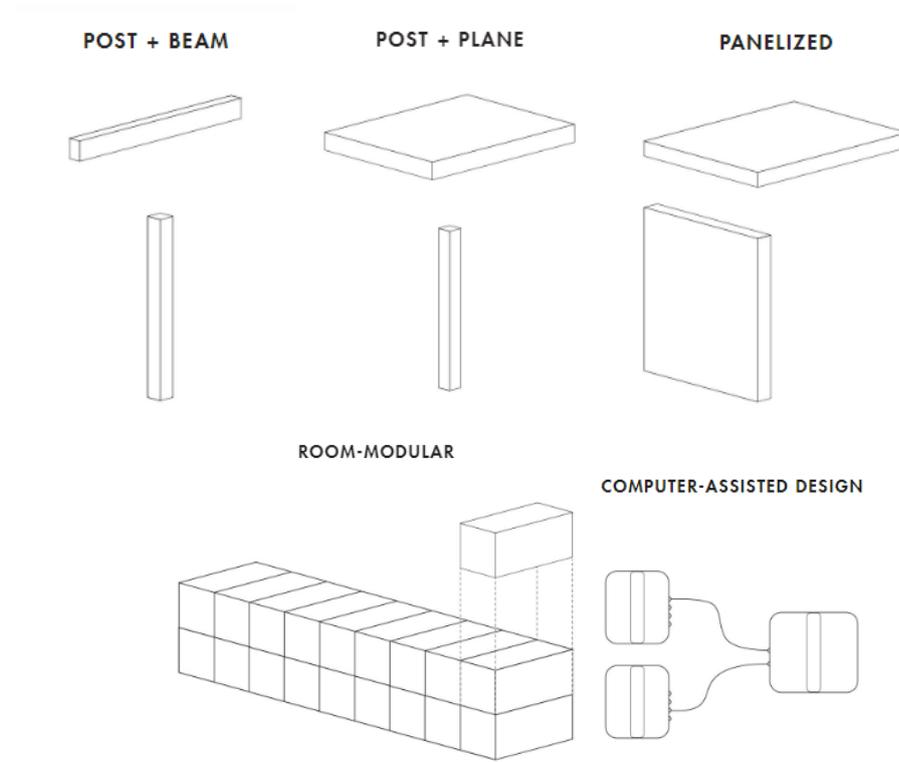
5.1 ESCOLHA DO MATERIAL

Segundo Oxman (2013, p. 15), a colaboração entre engenheiros estruturais e arquitetos desde o início do projeto reverte a lógica sequencial do processo para material, estrutura e forma, ao contrário da sequência tradicional de forma, estrutura e material. Assim sendo, a primeira abordagem com os arquitetos envolvidos neste trabalho, Bárbara e Henrique, se deu para a definição do material construtivo que viria a ser utilizado. A escolha da madeira engenheirada se sobressaiu por diversos fatores – entre eles, a rapidez do processo construtivo, a sustentabilidade inerente ao material e a capacidade estrutural que possibilita a criação de espaços mais livres.

5.2 ESCOLHA DO SISTEMA ESTRUTURAL

Para o estudo de qual concepção viria a ser adotada nos projetos arquitetônicos de Bárbara e Henrique, foi necessária uma discussão para a visualização das possibilidades projetuais. Para isso, foi feito um levantamento referencial que incluía 5 categorias básicas de tipologias adotadas no uso contemporâneo da madeira, de acordo com Taylor (2017, p. 18). Tais categorias abrangiam os sistemas Pilar-Viga, o Pilar-Laje, o de Painéis, o Modular e o Computer-Assisted Design (Figura 28).

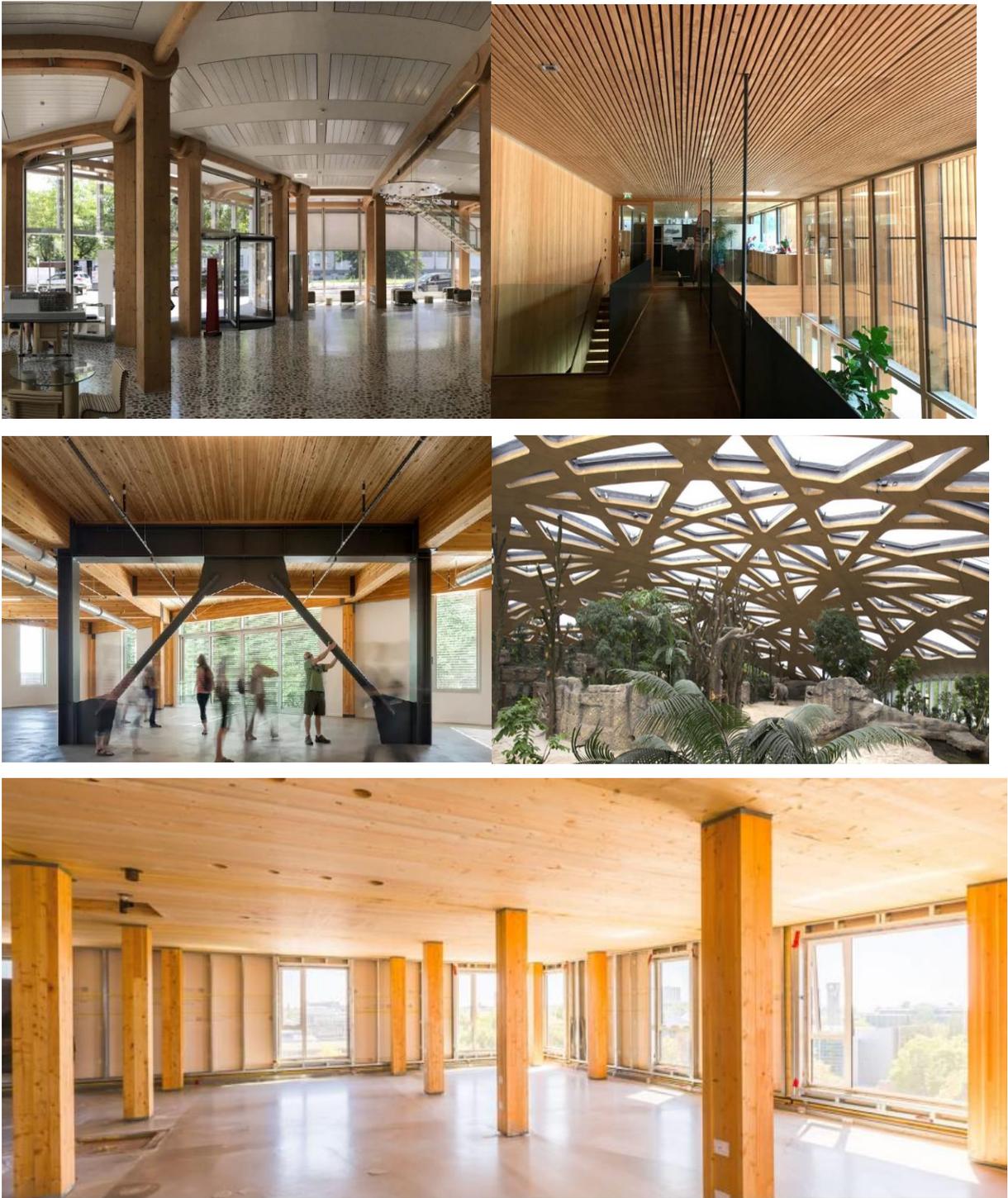
Figura 28: Tipologias estruturais sugeridas por TAYLOR para construções em Mass Timber



Fonte: TAYLOR, 2017, p. 17.

Foram selecionados exemplos de construções que abrangessem cada uma das categorias, bem como detalhes projetuais e implicações de tais métodos. Em seguida, essas referências foram apresentadas aos arquitetos para que pudessem melhor compreender cada tipo de sistema construtivo e escolher o que mais se adequasse à ideia de projeto que vinha sendo desenvolvida.

Figura 29: Imagens de algumas referências projetuais apresentadas aos arquitetos



Fonte: TAYLOR, 2017, p. 34; 98; 66; 118; 82.

Frente a essas possibilidades, os arquitetos optaram pela primeira opção, que consiste em vigas e pilares interconectados. Ela se mostrou uma boa escolha para ambos por comportar melhor programas que requerem espaços mais amplos e

flexíveis, além de possuírem maior permeabilidade visual. Entretanto, exigem um sistema de contraventamento que impacta diretamente no projeto arquitetônico. Para tal sistema, seria utilizado uma combinação de MLC para compor as vigas, e pilares do pórtico e de CLT para compor as lajes e cobertura dos edifícios.

5.3 VISITA DE CAMPO

De forma a complementar o entendimento das questões envolvidas no projeto e aprofundar o conhecimento em construções de madeira engenheirada, foi feita uma visita de campo em uma obra realizada pela empresa Rewood¹ em São Paulo, SP, que possuía um sistema estrutural similar ao proposto pelos arquitetos: pilares e vigas em MLC e lajes em CLT.

Na visita, puderam ser observados diversos detalhes construtivos, principalmente relacionados às ligações, aos contraventamentos e à montagem.

Figura 30: Visão geral da obra em andamento



Fonte: Foto tirada pelo autor.

Na obra, foram utilizadas ligações em chapas metálicas para a conexão entre os elementos. Uma conexão bastante presente no edifício foi a chapa T, que possui uma lingueta com pinos metálicos, que transfere os esforços da viga para a chapa; e

¹ Conforme solicitado pela empresa, não serão divulgadas informações relativas ao cliente e tampouco será informada a localização específica da obra.

por uma base também contendo pinos metálicos, que é responsável por transferir os esforços da chapa para o pilar ou para outra viga. Ademais, foi observada a conexão base de pilar, utilizada para conectar a parte inferior dos pilares do edifício com o solo e para garantir a proteção destes elementos contra possíveis empoçamentos de água.

Figura 31: Ligações metálicas Base de Pilar (à esquerda) e Chapa T (à direita)



Fonte: Fotos tiradas pelo autor.

Chamou a atenção que ambas as conexões citadas se mostram bastante discretas no aspecto estético, deixando apenas uma fenda de usinagem e a seção dos pinos aparentes.

Figura 32: Detalhes das conexões dos elementos em MLC



Fonte: Fotos tiradas pelo autor.

Figura 33: Conexão das Chapas T aos pilares



Fonte: Foto tirada pelo autor.

Outro ponto de interesse foram os contraventamentos, realizados pelos núcleos de contraventamento em concreto armado. Tais elementos, destinados à circulação vertical, também foram ligados aos pórticos de madeira para garantir a estabilidade lateral do edifício, projetado com quatro pavimentos.

Figura 34: Detalhes das torres de circulação vertical em concreto



Fonte: Fotos tiradas pelo autor.

Por fim, foi observado o içamento das primeiras lajes de CLT de 5 camadas e sua respectiva fixação na estrutura de MLC. Neste momento, atentou-se a detalhes de encaixe e de apoio das placas com as vigas.

Figura 35: Lajes de CLT na estrutura de MLC



Fonte: Fotos tiradas pelo autor.

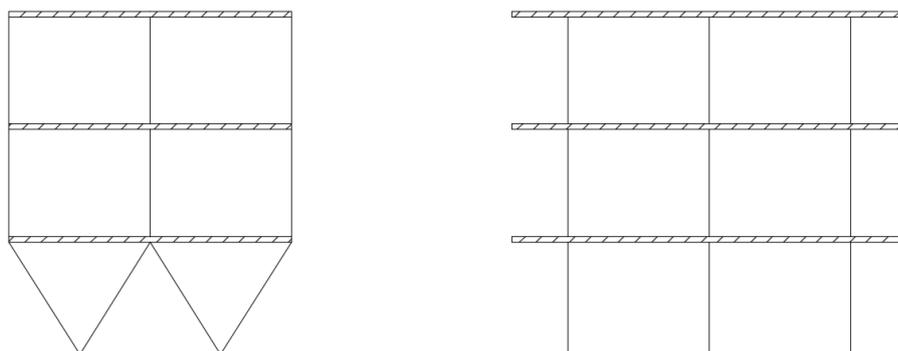
5.4 COMPATIBILIZAÇÃO

Uma vez escolhido o sistema estrutural, foi necessária a elaboração de uma concepção em madeira a ser implementada pelo programa. Primeiramente, os arquitetos fizeram uma sugestão inicial, que foi apresentada e discutida. Nesse cenário, se sobressaiu a proposta do Henrique, que consistiu em pilares em “v” no pavimento térreo que absorveriam as cargas dos pilares dos pavimentos superiores.

A proposta tinha o objetivo de aumentar o espaço livre no pavimento em questão, que seria mais permeável que os demais. Entretanto, da forma como foi proposta, ela necessitaria de pilares bastante robustos, o que resultaria em uma grande interferência na visibilidade do espaço térreo, além da perda da escala humana nos elementos estruturais. Destarte, entende-se que a estabilidade lateral dos pórticos, fator bastante crítico em estruturas de madeira, seria prejudicada pela diminuição do número de apoios nas fundações.

Frente a essas questões, decidiu-se pela continuidade dos pilares de forma linear até a fundação e a criação de balanços transversais, sugerida pelo estudante de arquitetura. A implementação dos balanços teve o intuito de aumentar o desempenho estrutural das vigas, se valendo da possibilidade de serem produzidas peças inteiras de grande comprimento, apresentadas previamente. Outro fator bastante relevante foi a proteção da estrutura – a criação dos balanços gera um beiral de proteção dos pilares contra intempéries no caso de possíveis pavimentos abertos que deixariam parte da estrutura exposta, ideia que foi citada pelos estudantes de arquitetura.

Figura 36: Cortes transversais das propostas iniciais do sistema estrutural a ser adotado: à esquerda, a ideia de Henrique; à direita, a proposta dada pelo autor



Fonte: Imagens elaboradas pelo autor.

5.5 CONEXÕES

Por fim, buscou-se pensar em um sistema de ligação que possibilitasse atender aos requisitos expostos acima, ou seja, um modelo que permitisse a criação de balanços nas vigas transversais sem que houvesse interrupção dos pilares, viabilizando tecnicamente um detalhe estrutural sem gerar prejuízos na resistência ou na rigidez da estrutura. Dada a dificuldade de se garantir uma ligação rígida em elementos de madeira, conforme será discutido nos próximos capítulos, não poderia haver a interrupção das vigas transversais nos pilares e a execução dos balanços separadamente. Assim, a principal referência utilizada para tal concepção foi a do projeto Yusuvara Town Office, do arquiteto japonês Kengo Kuma, no qual a seção transversal do pilar é dividida em 4 seções menores e espaçadas, permitindo a passagem de vigas em ambos os sentidos.

Figura 37: Ligações entre elementos de madeira no Yusuvara Town Office

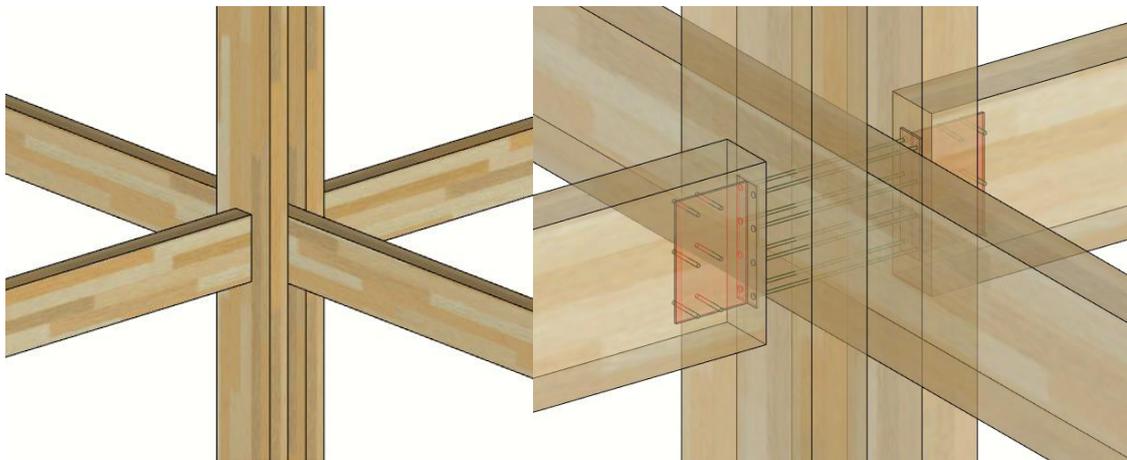


Fonte: <https://timbertech17.files.wordpress.com/2018/02/yusuvara-town-hall-chung.pdf>

Diferentemente do projeto de referência, a solução adotada consiste em uma seção composta por duas peças solidarizadas descontinuamente. Dessa maneira, as vigas transversais também passariam pelo espaçamento das peças do pilar, porém as longitudinais seriam interrompidas nas duas extremidades pelos pilares e ficariam na condição de biapoiadas. A ligação de tais elementos interrompidos com os pilares se daria por uma Chapa T metálica, similar à observada na visita de campo explanada na seção 5.3. As vigas transversais passantes são unidas ao pilar pela conexão proveniente dos pinos metálicos utilizados nas bases das chapas. Além disso, tal composição permite que as faces superiores das vigas possam ser niveladas entre si para receberem as lajes de CLT, diferente do projeto de referência analisado.

Como observado na visita, a utilização da chapa T se mostrou interessante por minimizar o impacto visual da conexão e por garantir proteção à estrutura contra casos de incêndio.

Figura 38: Conexão proposta pelo autor para o desenvolvimento dos projetos



Fonte: Imagens elaboradas pelo autor.

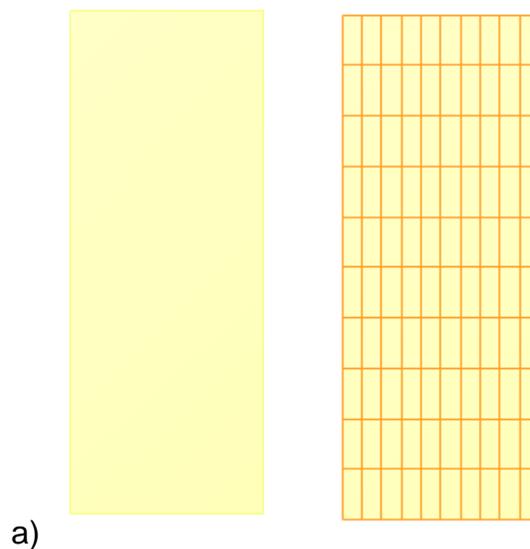
É importante ressaltar que essa concepção se aproveita da vantagem já citada da MLC na produção de elementos estruturais com grande comprimento, já que as vigas transversais e os pilares poderão ser compostos por peças inteiras, dependendo apenas da capacidade de transporte dos veículos da obra e do esquema de montagem da estrutura.

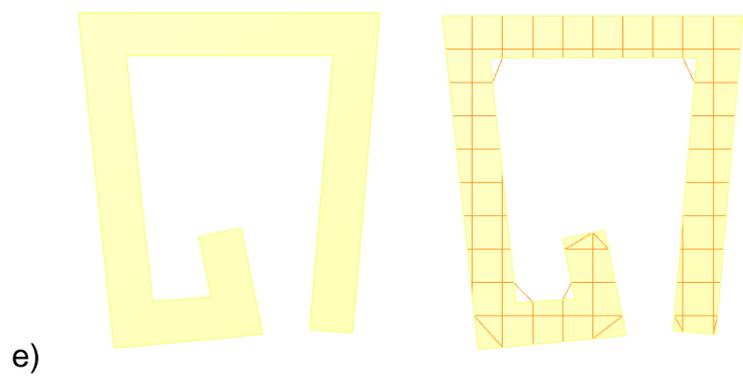
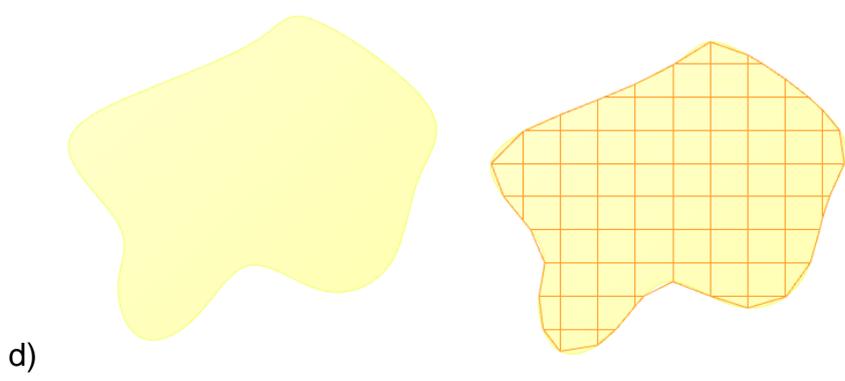
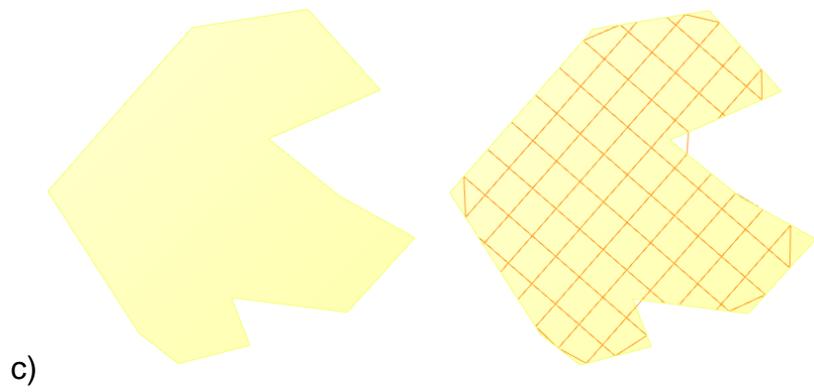
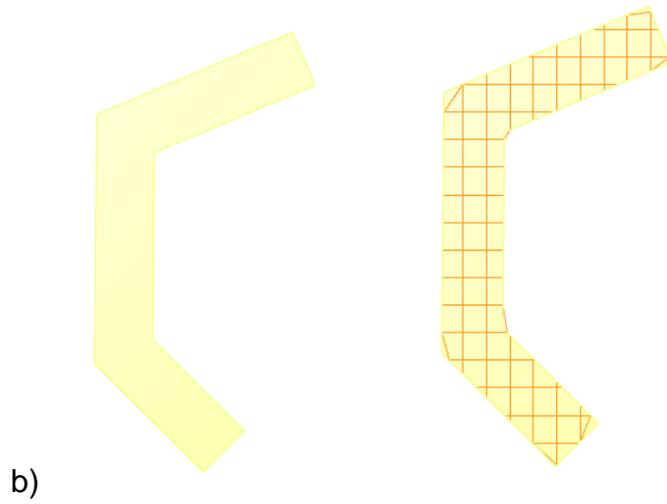
6 DESENVOLVIMENTO DO PROGRAMA DE CONCEPÇÃO ESTRUTURAL

6.1 GRID

Primeiramente, foi desenvolvido um mecanismo que gerava uma malha estrutural a partir da superfície da planta arquitetônica, fornecida pelo usuário. Neste processo, foi almejado um resultado que fosse o mais geral possível, de forma a tentar abranger a maior gama de possibilidades de formatos. Foram efetuados diversos testes prévios em formas variadas que, apesar de criarem um grid em qualquer superfície genérica, representavam malhas abstratas que não necessariamente estavam ligadas a uma lógica arquitetônica ou estrutural. Como a planta inicialmente proposta por Bárbara consistia em um retângulo simples, o desafio maior foi implementar a concepção da planta proposta por Henrique (Figura 39-e), que se constituía em uma forma mais complexa.

Figura 39: À esquerda: superfícies que simulam plantas arquitetônicas através de formas genéricas; à direita: malha criada pelo programa nas concepções iniciais

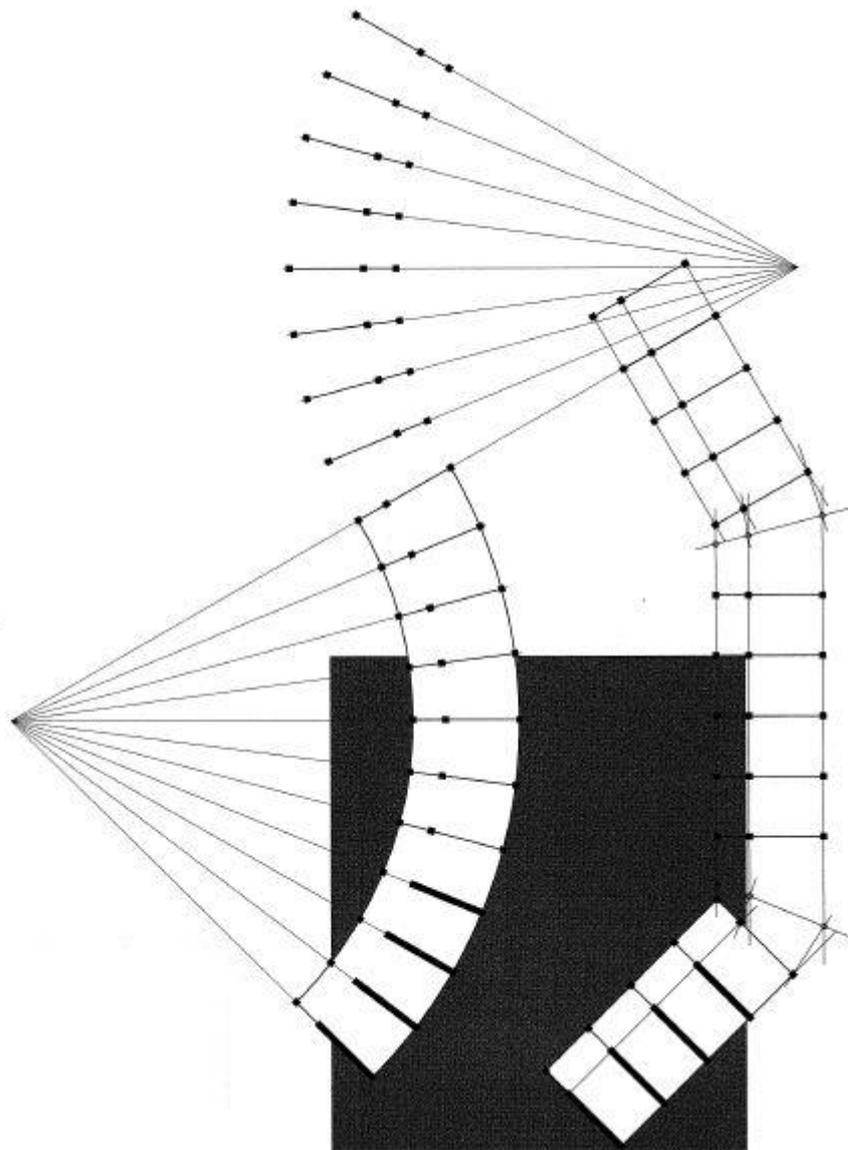




Fonte: Imagens elaboradas pelo autor.

Frente a esses resultados e observando as demandas iniciais do projeto de Henrique, procurou-se seguir as recomendações dadas por Ching (2009, p. 76) para lidar com grelhas irregulares (Figura 40).

Figura 40: Proposta de Ching para resolver plantas irregulares



Fonte: CHING, 2009, p. 76.

A ideia proposta por Ching é que se tenha um ponto base fictício externo à forma do qual são criadas linhas que interceptam a planta ortogonalmente,

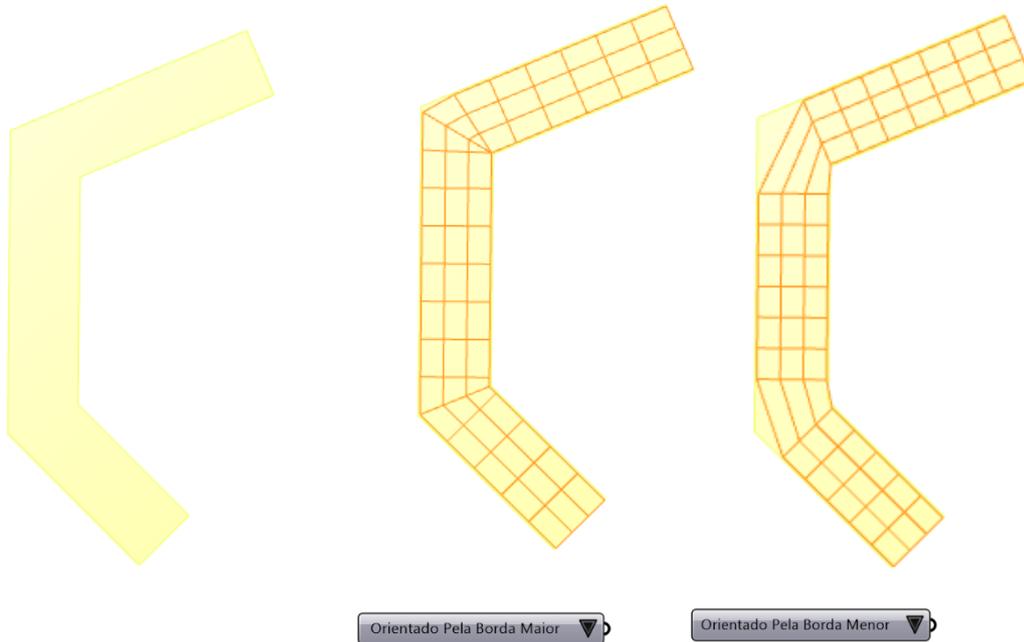
possibilitando espaçamentos de mesma dimensão. Assim, o programa procurou simular tal conceito pela seleção da maior aresta da forma (tomada como longitudinal) seguido de sua segmentação em trechos de igual comprimento. Em seguida, o código cria segmentos de reta ortogonais a tais trechos nos pontos de interseção, gerando as linhas de menor comprimento da malha (tomadas como transversais).

Foram estabelecidos como parâmetros de entrada o número de eixos estruturais no sentido transversal e no sentido longitudinal. Desta forma, foi possibilitada uma dinamicidade para a concepção da malha, uma vez que os mesmos são facilmente alteráveis e resultam em uma resposta visual direta demandada para a concepção do projeto arquitetônico.

Posteriormente, dada a demanda de utilização do programa, foi adicionado um novo parâmetro na concepção da malha para dar a possibilidade de o usuário escolher a localização da aresta longitudinal de orientação. Tal parâmetro surgiu da constatação de irregularidades no grid no projeto do Henrique, no qual a orientação das linhas transversais pela menor aresta longitudinal gerava condições de vãos muito discrepantes, o que dificultava o caráter generalista deste estudo.

Assim, implementando os conceitos de Ching (2009) no código, pode-se notar que a planta indicada na Figura 39-b previamente testada se aproxima de um cenário mais realístico de concepção estrutural (Figura 41-b). A Figura 41-c indica a mudança do último parâmetro citado para as mesmas entradas de número de linhas longitudinais e número de linhas transversais, ou seja, caso a polilinha longitudinal utilizada como base para a geração da malha fosse a de menor comprimento.

Figura 41: Geração da malha pelo programa de acordo com CHING, orientado pela borda maior (b) e pela borda menor (c).



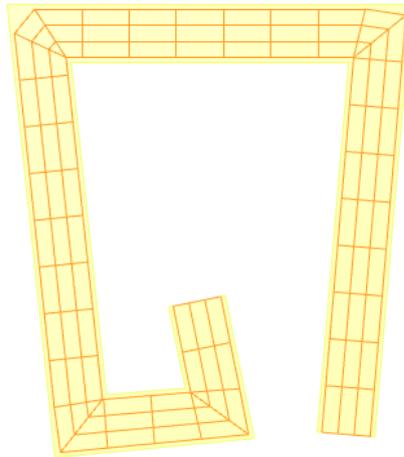
Fonte: Imagens elaboradas pelo autor.

Vale salientar que, conforme afirma Ching (2009, p. 17), grelhas irregulares geralmente causam situações específicas nos pontos angulares da planta que devem ser solucionadas à parte, conforme será explicitado mais à frente.

É importante frisar que duas condições principais foram estabelecidas no corpo do programa. A primeira é a de que as superfícies de entrada devem ter apenas 4 arestas, mesmo que tais arestas sejam compostas por polilinhas. A segunda diz respeito à orientação das arestas da superfície, que devem ter uma relação de perpendicularidade com os segmentos vizinhos. Tais condições foram impostas tanto para garantir o bom funcionamento do programa quanto para que se tenha uma malha que possua um sentido construtivo.

A implementação das ideias discutidas resultou em um programa que conseguia atender tanto às demandas de Bárbara quanto às de Henrique (Figura 42).

Figura 42: Aplicação da nova malha à versão inicial do projeto de Henrique



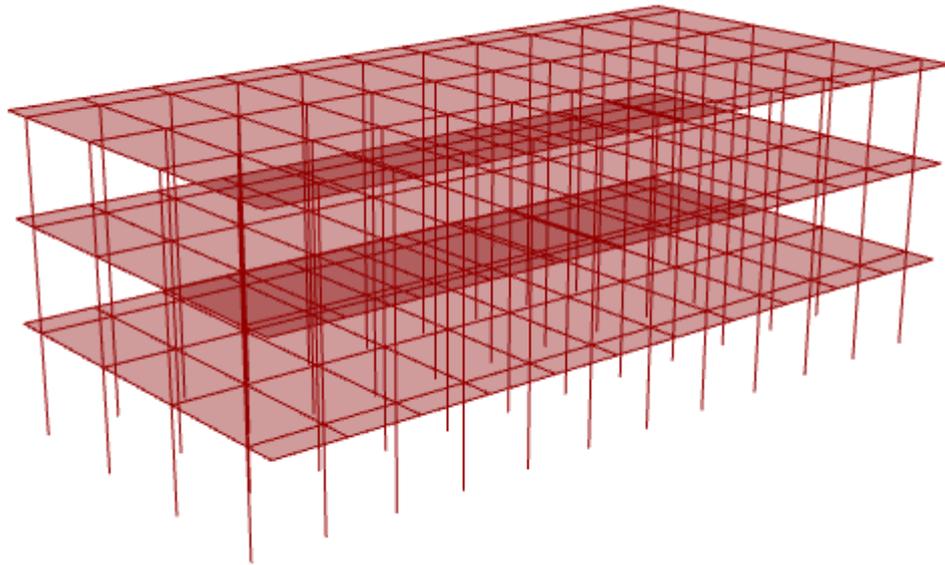
Fonte: Imagem elaborada pelo autor.

Outro ponto importante a ser ressaltado é que, no processo de desenvolvimento de projeto arquitetônico, houve mudanças significativas nas plantas criadas. Isso, no entanto, não prejudicou este estudo, uma vez que todo o processo estava parametrizado.

6.1 MODELO UNIFILAR

Uma vez que o grid e a concepção estrutural foram estabelecidos, o programa cria um modelo unifilar em cima das especificações dadas pelo usuário. Isso inclui a elaboração dos eixos das vigas, dos pilares e das lajes. Para isso, foram implementados dois novos parâmetros: o de número de pavimentos do edifício e o da altura do pé direito de cada pavimento, a serem definidos pelo usuário (Figura 44).

Figura 43: Modelo unifilar criado em uma planta retangular simples



Fonte: Imagem elaborada pelo autor.

Figura 44: Painel de controle principal do código responsável por estabelecer os parâmetros do unifilar

A screenshot of a control panel titled "PAINEL DE CONTROLE". The panel has a yellow background and contains five adjustable parameters, each with a slider and a numerical value:

- Numero de Pilares Longitudinais: 12
- Numero de Pilares Transversais: 4
- Balanço (m): 2.0
- Pé Direito (m): 4.0
- Nº de Pavimentos: 3

Fonte: Imagem elaborada pelo autor.

6.3 CRIAÇÃO DOS ELEMENTOS ESTRUTURAIS

Uma vez que o modelo unifilar é concebido, sua geometria é desacoplada para a criação e especificação dos diferentes elementos que compõem a estrutura.

6.3.1 PILARES

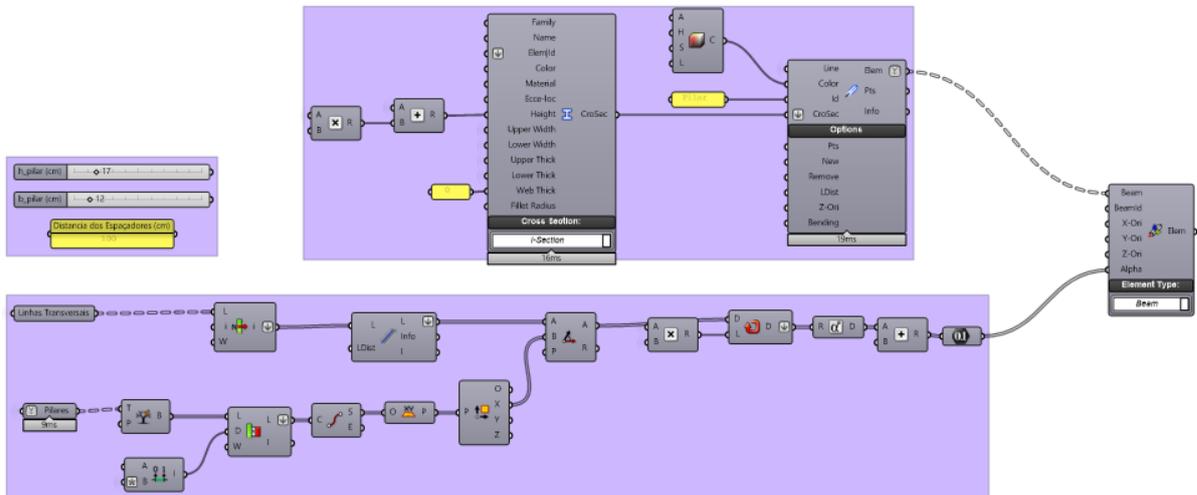
Primeiramente, as linhas verticais do modelo são separadas para serem transformadas em pilares. Tais linhas são segmentadas na interseção com os outros elementos para que sejam criados os nós e os tramos. Com isso, foi possível montar o elemento através do componente Line To Beam, fornecendo entradas de linhas, cor do elemento, nome e seção transversal.

É importante ressaltar que o Karamba3D não possui uma opção no componente CroSec para seções compostas, como é o caso do elemento em questão. Após diversas tentativas de implementação da seção desejada, chegou-se a uma solução ideal, que foi a consideração de uma seção I cujas mesas representariam as peças retangulares que compõem a seção composta e cuja alma representaria o espaçamento entre as peças dado pela largura da base da viga transversal passante. Assim, o parâmetro que determina a base da viga transversal foi ligado ao input de altura da alma da seção, mantendo a parametrização do código. A espessura da alma da seção foi definida como zero, representando o espaçamento necessário entre as peças solidarizadas.

Outra observação importante diz respeito à orientação da seção transversal. Como a planta fornecida pode não ser regular, como é o caso do projeto de Henrique, deve-se garantir que a seção esteja orientada de forma correta para qualquer superfície analisada. Para isso, utilizou-se o componente Orientate Elem, que permite uma reorientação dos elementos de acordo com os eixos locais. Dessa forma, foi implementada uma rotação em torno do eixo vertical de cada pilar que acompanha as linhas transversais do grid, assegurando que os pilares estarão sempre orientados com o eixo de maior inércia no sentido das linhas longitudinais.

Os parâmetros implementados nesse bloco são relativos à altura da seção composta e à base de cada peça que compõe a seção. Há ainda um parâmetro que se faz necessário para a verificação da estabilidade do pilar, que é a distância entre os espaçadores das peças. Tal ponto será abordado com mais detalhes no tópico de dimensionamento.

Figura 45: Concepção dos pilares no código

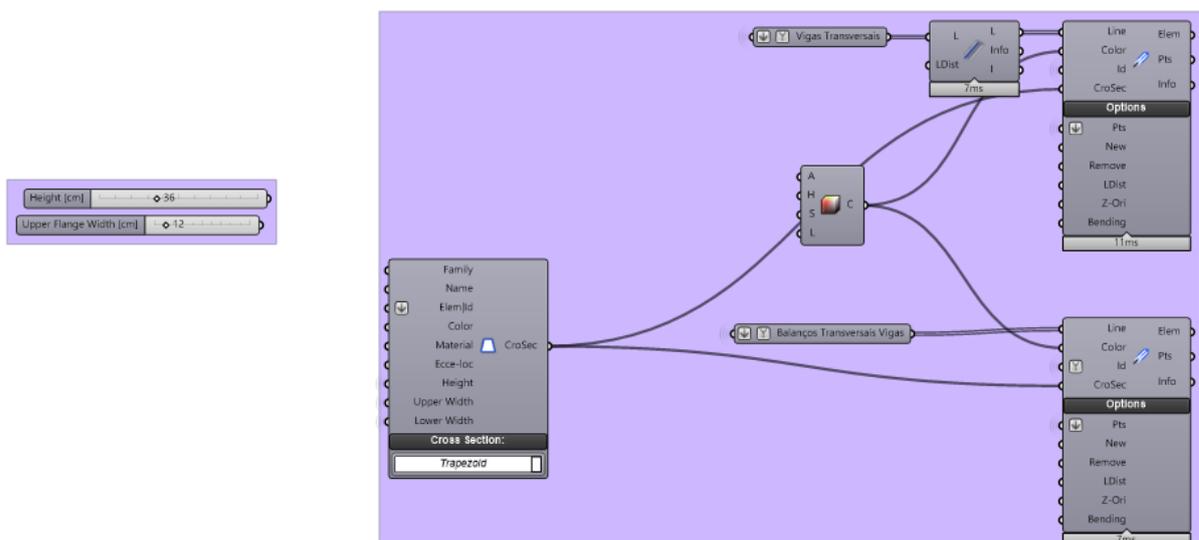


Fonte: Imagem elaborada pelo autor.

6.3.2 VIGAS

Assim como no item anterior, para a construção das vigas transversais e longitudinais foi utilizado o componente Line To Beam, referenciando os tramos de linhas longitudinais e transversais separadamente. As vigas de cobertura também foram implementadas separadamente, por estarem solicitadas de maneira diferente das vigas de piso. Assim, foram criados mais 8 parâmetros que estabelecem as bases e alturas de todas as vigas transversais e longitudinais de piso e de cobertura.

Figura 46: Concepção das vigas no código

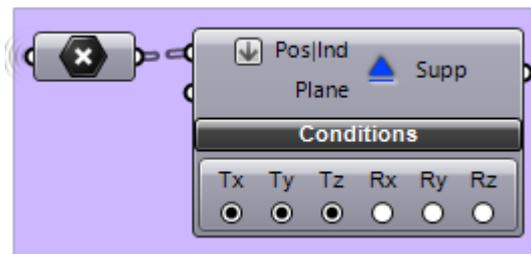


Fonte: Imagem elaborada pelo autor.

6.3.3 APOIOS

Para a definição dos apoios através do componente Supp, foram referenciados todos os pontos da base dos pilares. Com relação às vinculações, conforme afirmam Kermani e Porteous (2007, p. 497), as conexões metálicas em madeira possuem comportamento semirrígido devido ao amassamento das fibras sob esforço das conexões e às eventuais folgas nos furos dos pinos. Dessa forma, segundo os autores, a análise ganha um aspecto mais realista quando se leva em conta o efeito da semirrígidez das ligações no que diz respeito à distribuição dos momentos e do comportamento dos deslocamentos. Assim sendo, os apoios serão definidos como rotulados pelo componente Supp e será adicionada uma rigidez especificada no item de conexões.

Figura 47: Concepção dos apoios no código



Fonte: Imagem elaborada pelo autor.

Assim, os 3 primeiros graus de liberdade referentes à translação foram restringidos.

6.3.4 MATERIAIS

6.3.4.1 MLC

As propriedades da Madeira Lamelada Colada utilizadas para a análise do pórtico foram fornecidas pela empresa Rewood LTDA. Conforme decidido em conjunto com Bárbara e com Henrique, para esse estudo será utilizada a madeira Eucalipto da espécie *Eucalyptus grandis*, por possuir maiores valores de resistência e de módulo de elasticidade. Ressalta-se que tais propriedades podem ser facilmente modificadas e o modelo será novamente calculado.

Figura 48: Propriedades da MLC da empresa Rewood

			
Classe de resistência para madeira laminada colada Rewood segundo NBR 7190:2012			
Valores característicos de resistência e modo elástico	Índice	Espécie	
		Eucalipto	Pinus
Resistência (MPa)			
Tração paralela à fibra	ft0,k	106,1	74,8
Tração perpendicular à fibra	ft90,k	5,3	3,7
Compressão paralela à fibra	fc0,k	81,7	57,6
Compressão perpendicular à fibra	fc90,k	20,4	14,4
Cisalhamento	fv,k	12,3	8,6
Módulo elástico (GPa)			
Módulo elástico médio paralelo à fibra	Ew0m,k	16,9	11,0
Módulo elástico característico paralelo à fibra	Ew0,0,05	14,8	9,2
Módulo elástico médio perpendicular à fibra	Ew90m,k	0,8	0,55
Módulo de elasticidade transversal médio	Gw,k	1,1	0,73
Massa volumétrica (kg/m³)			
Massa volumétrica característica	ρ,k	625	552

Fonte: REWOOD

Esses valores foram inseridos no cálculo através do componente MatProp, já com os coeficientes de modificação estabelecidos pela NBR7190.

Pela tabela 4 da NBR7190, o Kmod1 considerado foi de 0,6 para toda a vida útil da estrutura. A Tabela 5 fornece o Kmod2 igual a 1,0, uma vez que a empresa Rewood trabalha com madeiras de classe de umidade 1. Assim, de acordo com o Item 4.4.4 da NBR7190, teremos:

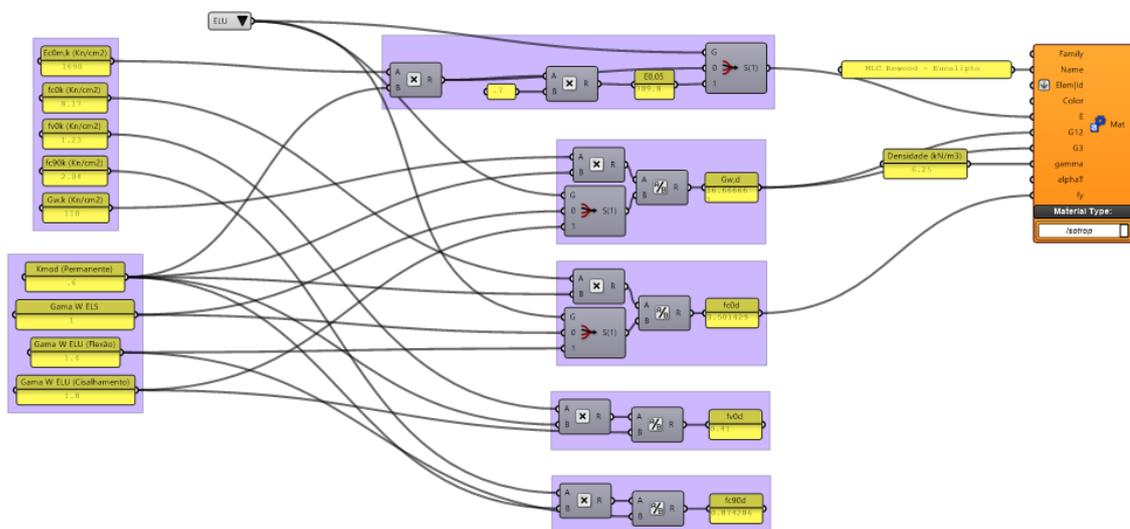
$$Kmod=Kmod1.Kmod2=0,6$$

É importante frisar que coeficiente Kmod3, presente na versão vigente da NBR7190, não é considerado no cálculo do Kmod pela versão em revisão da NBR7190 utilizada. Isso se dá por conta do item 5.7.4.5 que exige que as tábuas que irão compor as lamelas passem por uma classificação visual e por uma classificação

pele módulo de elasticidade, não havendo possibilidade de usar madeira não classificada.

Conforme os Itens 4.4.5 e 4.4.6 da NBR7190, os coeficientes GamaW adotados foram: para situação de ELU, igual a 1,4 para flexão e igual a 1,8 para tração e cisalhamento; para a situação de ELS, igual a 1,0. Da mesma forma, segundo o Item 4.4.8 da referida NBR, o módulo de elasticidade utilizado para a verificação do ELU foi de 70% de seu valor médio e o utilizado para a verificação do ELS foi igual ao valor médio. Como o Karamba3D não permite a diferenciação de tais verificações e de seus coeficientes no material, foi utilizado um componente de seleção que possibilita a escolha dos valores utilizados como entrada conforme a análise a ser feita (ELU ou ELS). Assim, ao selecionar a opção ELS, por exemplo, o módulo de elasticidade utilizado no modelo é o médio ($E_{c0,m}$) e ao mudar-se para a opção ELU é utilizado o valor característico ($E_{c0,05}$).

Figura 49: Definição das propriedades da MLC no código



Fonte: Imagem elaborada pelo autor.

Vale ressaltar que o efeito da fluência será explicitado na seção de verificação deste trabalho.

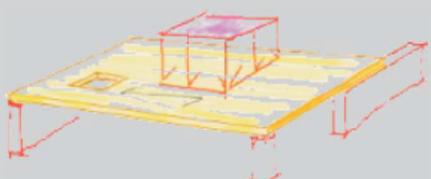
Uma ressalva a ser feita é que, apesar de a madeira ser um material ortotrópico, ou seja, possuir propriedades diferentes conforme a direção analisada, para o pórtico ele foi considerado isotrópico. Isso se deu por uma limitação do Karamba3D que, segundo Preisinger (2018, p. 60), considera o componente MatProp no modo

ortotrópico apenas em elementos de casca. Dessa forma, quando são inseridas as propriedades do material no componente MatProp no modo isotrópico, o Karamba3D o torna laranja, indicando que algum input do componente pode estar errado. O aviso dado pelo programa é que para materiais isotrópicos, o valor do módulo de elasticidade transversal (G) deve estar entre $E/2$ e $E/3$, relação que não é respeitada em materiais ortotrópicos, uma vez que o valor de G inserido é bem menor do que o esperado. Entretanto, de acordo com Davalos, Loferski e Yadama (1991), a consideração de ortotropia em elementos lineares de MLC pode ser ignorada para aplicações práticas de engenharia, podendo ser admitido como material isotrópico.

6.3.4.2 CLT

As informações do CLT utilizado foram extraídas do catálogo da empresa austríaca KLH (2008). Em posse de tais dados, foram inseridas as propriedades do material no componente MatProp, de forma análoga ao item anterior. Cabe observar que o CLT foi considerado como ortotrópico, possuindo uma série de inputs adicionais relativos às propriedades do material em cada direção do elemento.

Figura 50: Propriedades do CLT da empresa KLH



LOAD APPLIED PARALLEL TO FACING GRAIN

MECHANICAL STRENGTH	VERIFICATION PROCEDURE	STRENGTH
Modulus of Elasticity – Parallel to the direction of the panel grain $E_{0, \text{mean}}$ – Normal to the direction of the panel grain $E_{90, \text{mean}}$	I_{eff} , Annex 4, CUAP 03.04/06, 4.1.1.1 EN 338	12.000 MPa 370 MPa
Shear modulus – Parallel to the direction of the panel grain G_{mean} – Normal to the direction of the panel grain, Roll shear module $G_{R, \text{mean}}$	EN 338 CUAP 03.04/06, 4.1.1.1	690 MPa 50 MPa
Bend strength – Parallel to the direction of the panel grain $f_{m, k}$	W_{eff} , Annex 4, CUAP 03.04/06, 4.1.1.1	24 MPa
Tensile strength – Normal to the direction of the panel grain $f_{t, 90, k}$	EN 1194, reduced	0,12 MPa
Compressive strength – Normal to the direction of the panel grain $f_{c, 90, k}$	EN 1194	2,7 MPa
Shear strength – Parallel to the direction of the panel grain $f_{v, k}$ – Normal to the direction of the panel grain (Roll shear strength) $f_{R, V, k}$	EN 1194 A_{gross} , Annex 4 CUAP 03.04/06, 4.1.1.3	2,7 MPa 1,5 MPa

Fonte: K LH

Os coeficientes de ajuste das propriedades do material são dados no Capítulo 6 do CLT Canadian Handbook (2011). Tal item disserta sobre como o CLT ainda é um material muito recente, que não é contemplado nem pela norma canadense nem pelo Eurocode 5 (2004). Entretanto, os autores do manual canadense propõem duas opções de fatores modificadores a serem adotados para a consideração do material, um baseado na norma canadense CSA O86 e o outro baseado no Eurocode 5. Como a norma brasileira NBR7190 opera de modo similar à europeia, concluiu-se que tal opção seria mais consistente com o modelo de cálculo que vem sendo desenvolvido no presente trabalho. Dessa forma, os autores desse capítulo indicam aplicação do K_{mod} às propriedades do material, conforme a Figura 51, e a utilização de um coeficiente de fluência específico para a análise dos deslocamentos, que será comentado adiante.

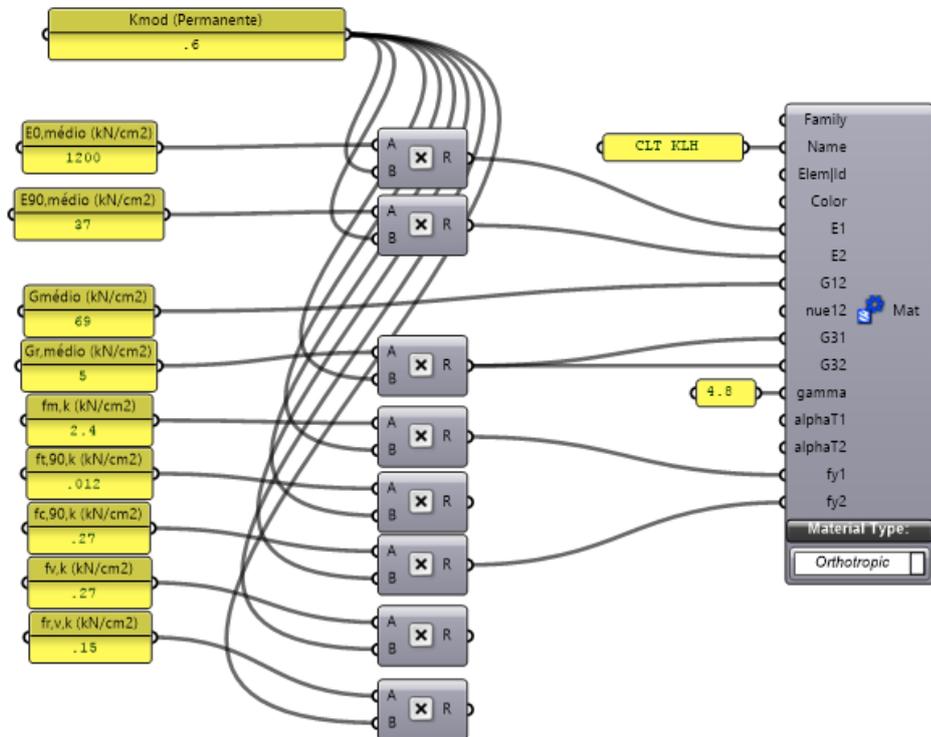
Figura 51: Coeficientes de modificação utilizados nas propriedades do CLT

Material/Load Duration Class	Service Class 1	Service Class 2	Service Class 3
Glued-Laminated Timber			
Permanent	0.60	0.60	0.50
Long term	0.70	0.70	0.55
Medium term	0.80	0.80	0.65
Short term	0.90	0.90	0.70
Instantaneous	1.10	1.10	0.90
Plywood¹			
Permanent	0.60	0.60	0.50
Long term	0.70	0.70	0.55
Medium term	0.80	0.80	0.65
Short term	0.90	0.90	0.70
Instantaneous	1.10	1.10	0.90

Fonte: CLT Canadian Handbook (2012, p. 6)

Foi adotado um K_{mod} de 0,6 considerando as cargas permanentes e classe de umidade 1, similar à MLC.

Figura 52: Propriedades do CLT no código



Fonte: Imagem elaborada pelo autor.

6.3.6 VINCULAÇÕES

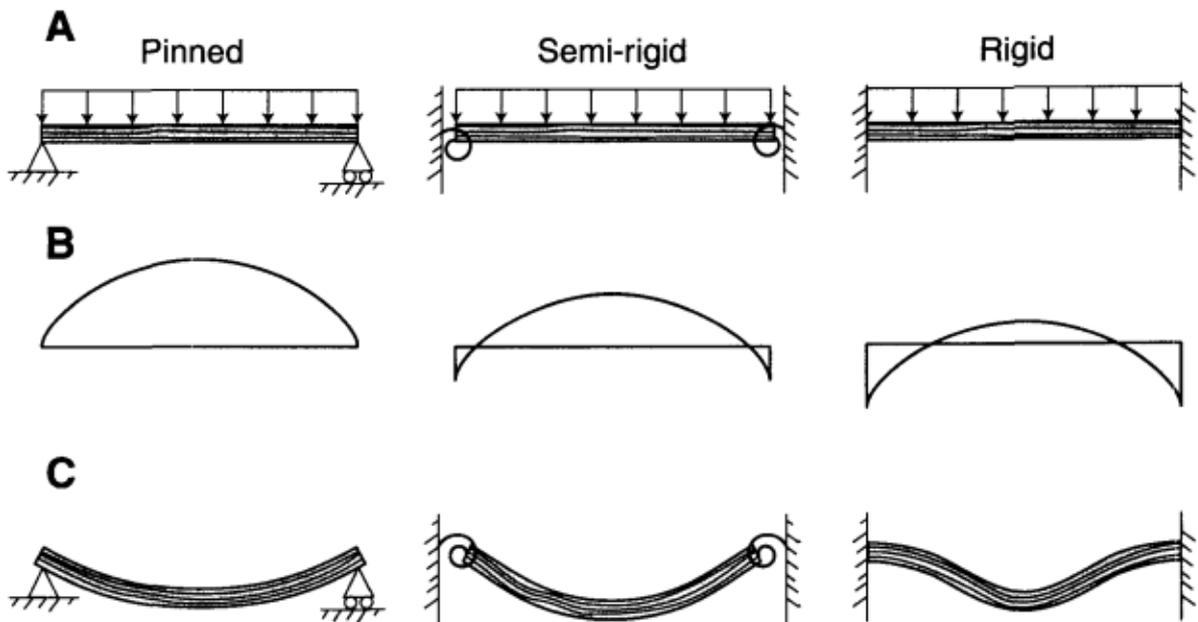
Foram implementadas vinculações no modelo a partir do componente Beam-Joints que possui o atributo de rotular, engastar ou definir uma rigidez de ligação para os pontos de início ou de fim de determinados elementos. Tal componente foi aplicado nas vigas longitudinais, ou seja, as vigas que são interrompidas a cada pilar, para liberar a rotação nas extremidades destes elementos. Dessa forma, tais vigas foram consideradas biapoiadas enquanto as vigas transversais correm continuamente por dentro do pilar composto, possuindo um número de apoios igual ao número de pilares.

6.3.6.1 RIGIDEZ DAS LIGAÇÕES

De acordo com Kermani e Porteous (2007, p. 483), as ligações em estruturas de madeira apresentam um comportamento de semirrigidez, ou seja, se encontram entre a situação de engastamento e a situação de rotulação. Isso faz com que seja permitida a transferência de parte dos esforços entre os elementos conectados e faz

com que haja uma rotação parcialmente restrita no ponto de ligação (LEICHTI; HYDE; FRENCH; CAMMILOS, 1999, p. 12).

Figura 53: Comparação entre ligações rotuladas, semirrígidas e engastadas (a) em termos de distribuição de momento (b) e de deslocamentos (c)

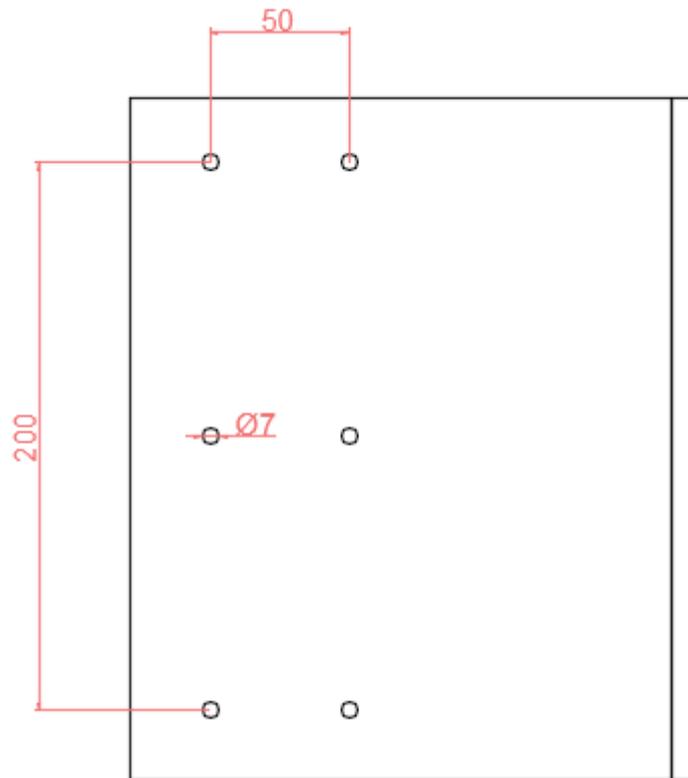


Fonte: LEICHTI; CAMILLOS, 1999, p. 13.

Ao se levar em conta o efeito de semirrigidez nas conexões da estrutura de madeira, a análise se torna mais realista em termos de distribuição de momento fletor e de comportamento dos deslocamentos (KERMANI; PORTEOUS, 2007, p. 497).

No presente trabalho, não será implementado no corpo do código um dimensionamento das ligações metálicas propostas anteriormente. Entretanto, frente ao impacto que tais elementos impõem na rigidez da estrutura, foi considerada uma ligação genérica na lingueta das chapas T para que se tenha uma análise mais precisa do modelo. As características de tal ligação, cujos detalhes relevantes para a consideração da rigidez podem ser vislumbrados na figura abaixo, foram baseadas nas medidas observadas na visita de campo.

Figura 54: Dimensões básicas da ligação da lingueta da chapa T utilizada



Fonte: Imagem elaborada pelo autor.

Entende-se que para o cálculo específico da ligação devem ser verificados o embutimento dos pinos na madeira, o espaçamento dos parafusos, a resistência à cortante dos pinos, a espessura da lingueta e da base da chapa, entre outros cálculos que não serão abordados neste estudo.

A partir de tais dimensões, foi possível calcular a rigidez nas ligações das vigas longitudinais de acordo com as equações extraídas da tabela 7.1 do Eurocode 5 (2004, p. 52) e de Kermani e Porteous (2007, p. 499).

Figura 55: Tabela 7.1 utilizada para encontrar o Kser

Fastener type	K_{ser}
Dowels Bolts with or without clearance ^a Screws Nails (with pre-drilling)	$\rho_m^{1,5} d/23$
Nails (without pre-drilling)	$\rho_m^{1,5} d^{0,8}/30$
Staples	$\rho_m^{1,5} d^{0,8}/80$
Split-ring connectors type A according to EN 912 Shear-plate connectors type B according to EN 912	$\rho_m d_c/2$
Toothed-plate connectors: – Connectors types C1 to C9 according to EN 912 – Connectors type C10 and C11 according to EN 912	$1,5\rho_m d_c/4$ $\rho_m d_c/2$
^a The clearance should be added separately to the deformation.	

Fonte: Eurocode 5, p. 52.

$$k_{ser} = n \cdot \left(\frac{K_{ser}}{1 + k_{def}} \right) \cdot \sum_{i=1}^n (x_i^2 + y_i^2)$$

Foram considerados um pino metálico de diâmetro (d) de 7 milímetros, a densidade (ρ) da MLC da Rewood de 625 kg/m³, o coeficiente de fluência (k_{def}) de 0,6 (justificado nos próximos tópicos do trabalho), as coordenadas geométricas dos parafusos com relação ao cg da ligação e 2 planos de corte (n) na conexão. Isso resultou em uma rigidez de 260 kN.m/rad no sentido de atuação da ligação.

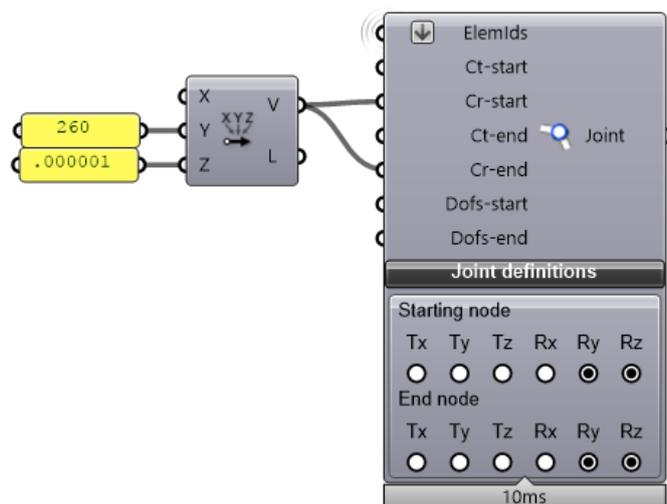
$$k_{ser} = 2 \cdot \left(\frac{(625^{1,5} \cdot \frac{7}{23})}{1 + 0,6} \right) \cdot 0,044 = 260 \text{ kN} \cdot \frac{\text{m}}{\text{rad}}$$

Vale salientar que o Eurocode 5 propõe valores de rigidez distintos para os casos de verificação do ELS e do ELU. Entretanto, foi utilizado apenas o valor referente ao ELS (k_{ser}) para a obtenção de deslocamentos mais próximos dos reais.

Outra observação importante é que foi considerada uma rigidez muito pequena no sentido perpendicular ao anterior, impedindo que a ligação viga seja tomada como rotulada pelo programa.

Assim, tal recurso foi implementado ao código através do componente Beam-Joints que permite considerar valores de rigidez em cada grau de liberdade de ligações específicas, conforme indicado na figura abaixo.

Figura 56: Inserção da rigidez nas ligações das vigas longitudinais

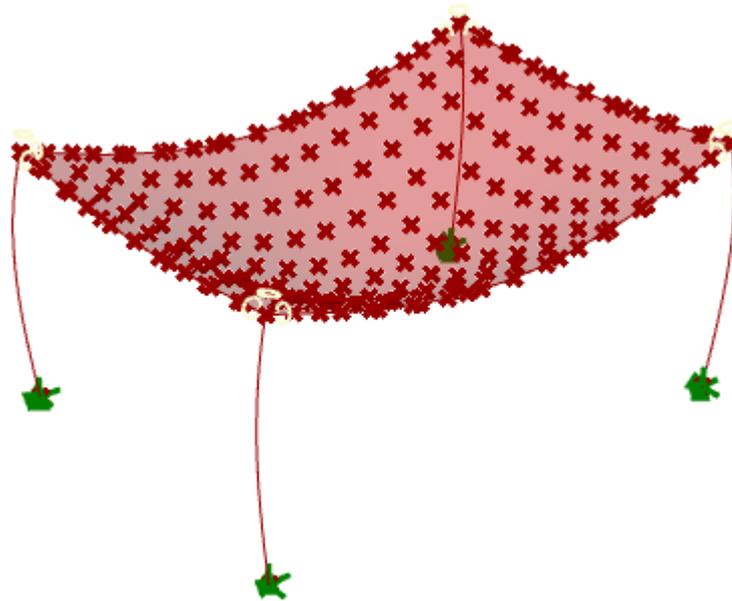


Fonte: Imagem elaborada pelo autor.

6.3.6.2 INTERAÇÃO MLC CLT

O Karamba3D permite que se crie associações entre elementos de linha e elementos de placa de forma que as ações sofridas pela placa sejam transferidas para o pórtico e descarregadas nos apoios. Isso se dá pela compatibilização de pontos da malha e elementos finitos da borda da placa com os pontos de elementos finitos das vigas de apoio, conforme a Figura 57.

Figura 57: Exemplo de deformada de um pórtico simplificado gerada pelo Karamba3D



Fonte: Imagem elaborada pelo autor.

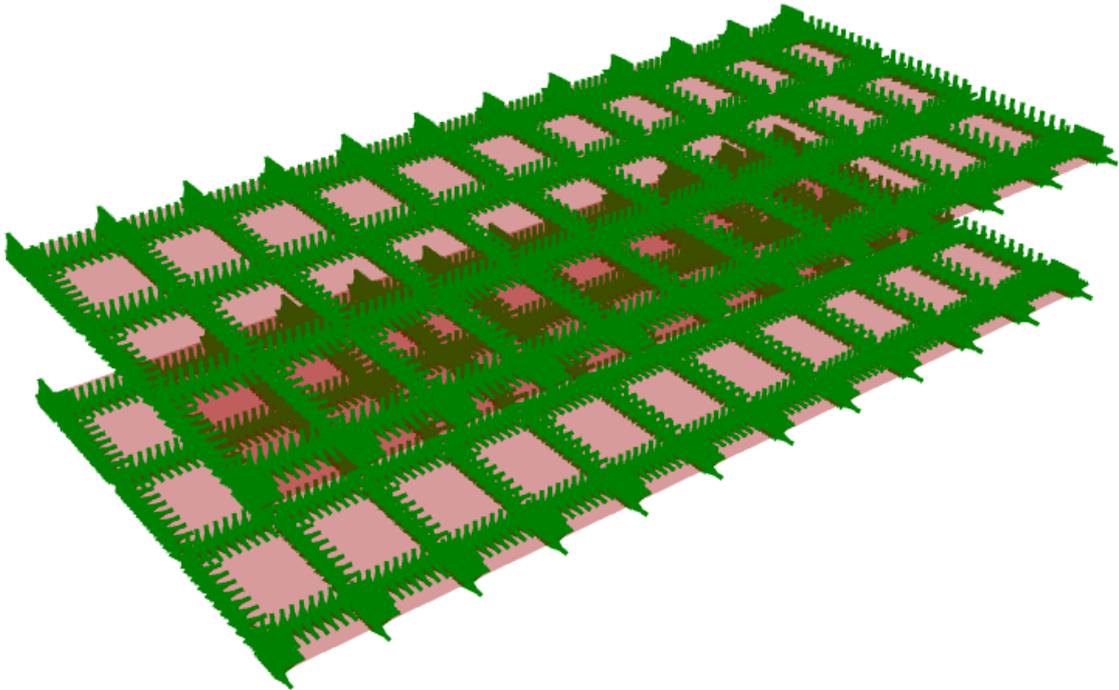
Entretanto, a fim de diminuir o custo computacional gerando uma resposta mais rápida do programa, foi admitida uma simplificação na relação entre as placas de CLT e as vigas de MLC. Assim, o modelo das lajes e o do pórtico foram desvinculados e analisados separadamente pelo programa, conectando-se os parâmetros de saída do modelo de lajes aos parâmetros de entrada do modelo do pórtico. Isso garante que os efeitos sejam transferidos do CLT para as vigas de MLC sem que o programa perca o caráter paramétrico.

Entende-se que o CLT exercia duas funções principais na estrutura: a transferência dos esforços verticais para o pórtico e a rigidez em seu plano que contribui para contraventar a estrutura. De forma a garantir tais efeitos, foram adotadas duas estratégias, uma para cada situação.

Para assegurar a transferência de esforços verticais, adotou-se apoios pontuais fictícios nas bordas das placas, que seriam responsáveis por absorver a carga distribuída na mesma. As reações do conjunto de apoios de cada aresta da placa foram então vinculadas às respectivas vigas no pórtico de MLC parametricamente e aplicadas nesses elementos em formato de carga distribuída, considerando o

comprimento de cada viga aplicada. Dessa forma, fica garantida a transferência da carga em qualquer situação de distribuição de esforços na estrutura (Figura 58).

Figura 58: Lajes de CLT (em vermelho) simplesmente apoiadas em apoios fictícios (em verde)



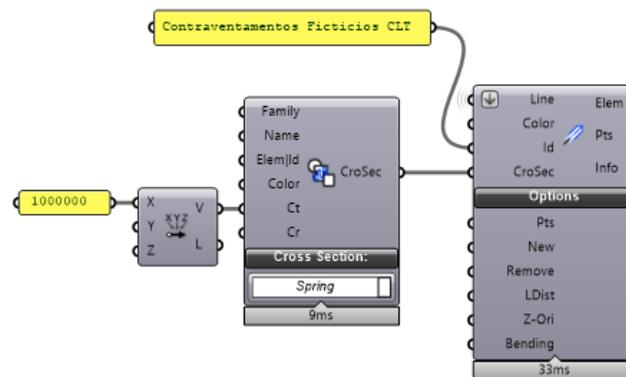
Fonte: Imagem elaborada pelo autor.

É importante evidenciar que o número de apoios fictícios é controlado por um parâmetro variável, podendo ser facilmente modificado para observação dos resultados de transferência de carga. Para este estudo foram adotados 10 pontos de apoio fictício por aresta, que resultaram em uma aproximação satisfatória em termos numéricos sem comprometer o desempenho computacional do modelo. Cabe também observar que foi considerado que as arestas comuns a duas placas receberiam a soma das reações de cada elemento naquela determinada aresta.

Com relação ao comportamento do CLT de diafragma no contexto de contraventamento do edifício, foram considerados cabos de rigidez infinita para criar o efeito diafragma no pórtico. Para isso, utilizou-se o componente “spring” do Karamba3D que permite que se crie uma rigidez entre dois nós pela inserção de

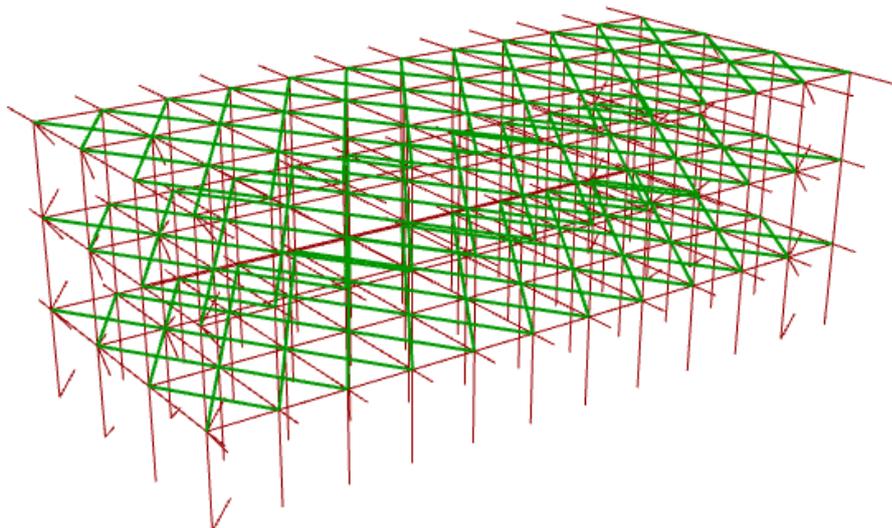
constantes de mola. Assim, os nós do pórtico no plano das lajes e coberturas foram vinculados “em x” por uma constante de mola de 1000000 kN/m.

Figura 59: Código que cria os contraventamentos fictícios que simulam o CLT no pórtico de MLC



Fonte: Imagem elaborada pelo autor.

Figura 60: Aplicação dos contraventamentos fictícios (em verde) no pórtico de MLC (em vermelho)

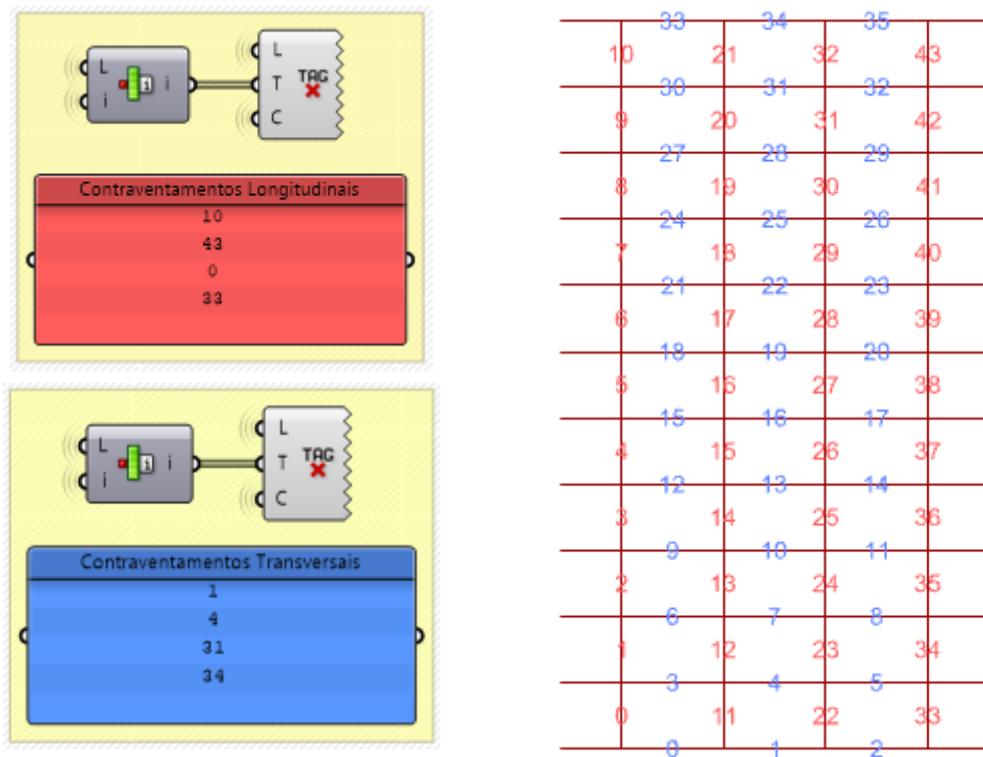


Fonte: Imagem elaborada pelo autor.

6.3.7 CONTRAVENTAMENTOS

Para garantir estabilidade lateral, foi necessário implementar um sistema de planos de contraventamento no pórtico. A forma escolhida para isso foi um sistema de cabos metálicos cruzantes, de modo que causasse a menor interferência arquitetônica possível. Para isso, foi concebido um modelo de identificação das possibilidades de contraventamento em planta através de um mapeamento numérico, conforme a Figura 61.

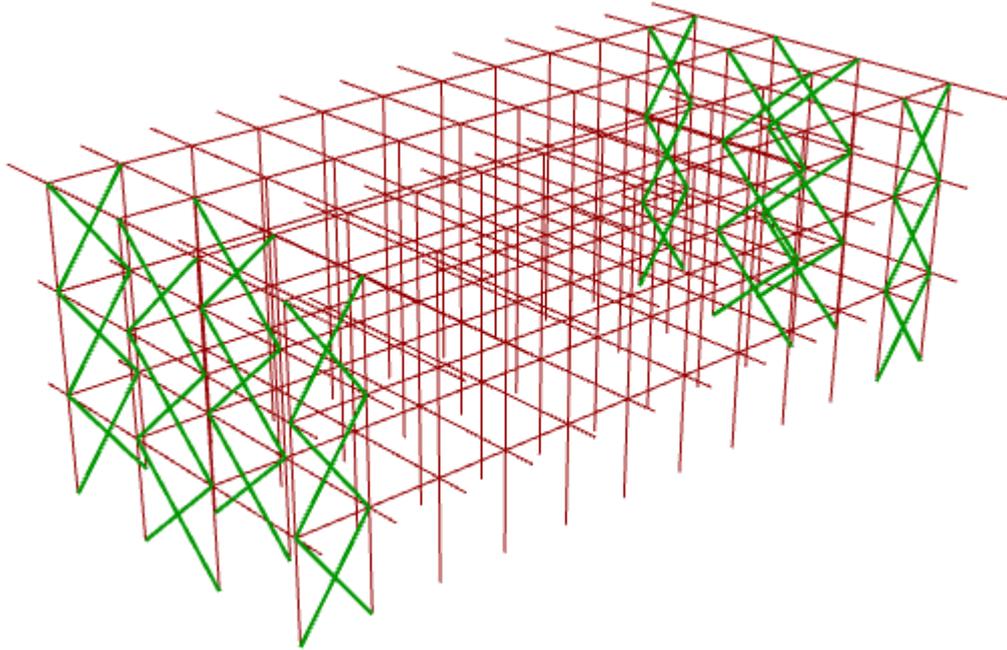
Figura 61: Implementação do sistema de contraventamento no código. Os números mapeados no grid em azul são referenciados no painel de mesma cor, da mesma forma que os números vermelhos.



Fonte: Imagem elaborada pelo autor.

A partir dos números exibidos na planta, pode-se definir quais pórticos serão contraventados, referenciando os algarismos em dois novos parâmetros criados: contraventamentos longitudinais (em vermelho) e contraventamentos transversais (em azul). Assim, para a estrutura exemplificada acima, o sistema de contraventamento ficaria de acordo com a Imagem 62.

Figura 62: Contraventamentos criados pelos inputs da figura anterior



Fonte: Imagem elaborada pelo autor.

Tais linhas são, então, referenciadas no Karamba3D com a seção transversal Spring, utilizada nos contraventamentos fictícios do CLT. A rigidez transferida entre os nós é obtida de acordo com a fórmula a seguir.

$$k = \frac{A \cdot E}{L}$$

Onde A é a área da seção transversal, E é o módulo de elasticidade do aço e L é o comprimento do tirante.

Para isso, foi estabelecido um novo parâmetro de diâmetro do cabo utilizado, em centímetros. Foi empregado um módulo de elasticidade do aço de 16000 kN/cm², conforme especificado pelo catálogo do fabricante norte americano Ronstan (Figura 63).

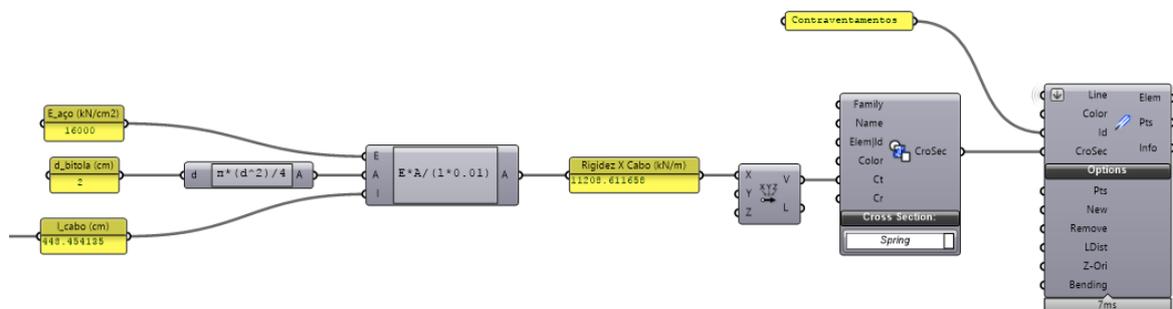
Figura 63: Propriedades referentes aos tirantes utilizados da empresa Ronstan

GS GALFAN Coated Steel - Open Spiral Strands			PFEIFER			
	1x19		1x37		1x61	Modulus of Elasticity: 160 ± 10 kN/mm ² Tolerance Cable Diameter: +3% Corrosion Protection: GALFAN coated without inner filling
NOMINAL CABLE DIAMETER mm	CABLE CONSTRUCTION	METALLIC CROSS SECTION AREA mm ²	MINIMUM BREAKING LOAD			WEIGHT APPROX kg/m
			kN	kg	lb	
8.1	1 x 19	39.0	59	6020	13250	0.3
10.1	1 x 19	60.0	93	9480	20890	0.5
12.2	1 x 19	87.0	134	13670	30100	0.7
14.1	1 x 37	117.0	181	18460	40660	0.9
17.0	1 x 37	168.0	260	26530	58420	1.3
20.1	1 x 37	237.0	367	37440	82460	1.9
24.4	1 x 37	347.0	537	54790	120660	2.7
28.3	1 x 37	467.0	722	73670	162220	3.7
31.3	1 x 61	572.0	884	90204	198620	4.5
36.3	1 x 61	769.0	1189	121320	267160	6.1

Fonte: RONSTAN

O comprimento do cabo L utilizado é retirado do próprio modelo pelo programa.

Figura 64: Implementação das propriedades dos tirantes no código



Fonte: Imagem elaborada pelo autor.

7 CONSIDERAÇÕES DE CÁLCULO

7.1 NORMAS UTILIZADAS

Para a verificação da estrutura, foram utilizadas como base as seguintes normas brasileiras: NBR7190 – Projetos de Estrutura de Madeira (2013); NBR6123 – Forças Devido ao Vento em Edificações (1988); NBR6120 – Cargas Para o Cálculo de Estruturas em Edificações (1980); NBR8681 – Ações e Segurança nas estruturas (2003). Também foram consultadas como auxílio para os cálculos a NBR8800 (2008) e o Eurocode 5 (2003), além dos livros de Calil (2019), Pfeil (2003) e Porteous (2007). Destaca-se que a versão utilizada da NBR7190 foi a 2ª revisão, datada de setembro de 2013. Tal escolha se deu pelo fato de que a versão vigente, que data de 1997, não possui diretrizes específicas para o dimensionamento de MLC, enquanto a revisão utilizada as tem.

Com relação ao CLT, as verificações utilizadas foram extraídas do CLT Canadian Handbook (2012), que opera com base nas normas canadenses. Isso foi feito pois a versão da NBR7190 utilizada não fazia menção a métodos de cálculo de CLT.

7.2 VENTO

A consideração do vento foi realizada pelo programa desenvolvido neste trabalho com o auxílio do software Ciclone, desenvolvido pelo Departamento de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos.

Como o código do programa tem um caráter generalista, foi admitido o cálculo de um edifício com planta retangular para todos os casos, para a simplificação dos cálculos. Entende-se que tal cenário não representa a realidade, mas para os fins de pré-dimensionamento almejados pelo presente estudo, os efeitos considerados são satisfatórios. Tal abordagem também desconsidera os efeitos de vizinhança que podem gerar excentricidades nas forças do vento, conforme o item 6.6 da NBR6123. Isso, entretanto, não dispensa a necessidade de uma análise experimental para os casos de planta não retangular, conforme o item 1.2 da NBR6123.

Os inputs iniciais do programa para esse bloco são a velocidade básica do vento, em m/s; as informações sobre a variação do relevo; a categoria de rugosidade do terreno; e o grupo da edificação, conforme os itens 5.2, 5.3 e 5.4 da NBR6123. Tais

fatores foram inseridos no código através de um componente que permite seleccionar um caso dentre uma lista de outros casos pré-definidos, conforme ilustra a Figura 65 a seguir. Ressalta-se que, como a classe da edificação (Item 5.3.2 da NBR6123) depende exclusivamente de fatores geométricos, o código foi programado para identificá-la automaticamente.

Figura 65: Entradas básicas da seção de ventos do código

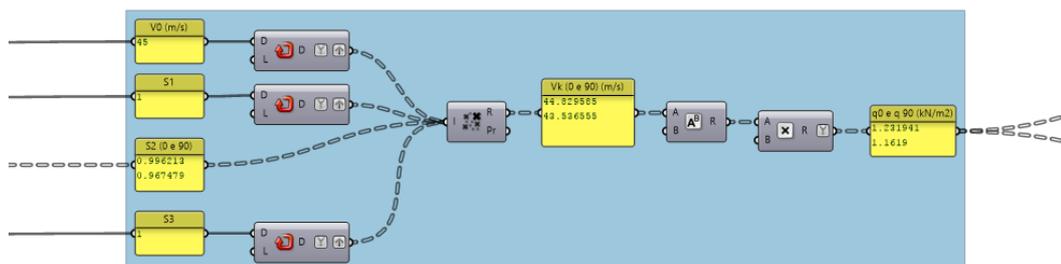
The image shows a software interface with a light purple background. It contains four input fields arranged vertically. The first is a blue box labeled 'Velocidade Básica do Vento (m/s)' with the value '45'. The second is a white box with a dropdown arrow labeled 'S1 Terreno Plano ou Pouco Ondulado'. The third is a white box with a dropdown arrow labeled 'S2 Categoria 2'. The fourth is a white box with a dropdown arrow labeled 'S3 Grupo 2'.

Fonte: Imagem elaborada pelo autor.

Com essas informações, o programa extrai os coeficientes S1, S2 e S3. Interessa destacar que, para o cálculo do fator S2, os dados da Tabela 1 da NBR6123 foram inseridos manualmente em formato de matriz no corpo do programa. Outra observação importante é que são calculados dois valores do coeficiente S2, um para cada direção do vento considerada.

Assim, é obtida a pressão dinâmica para ambos os casos de vento, conforme ilustra a figura abaixo.

Figura 66: Dados do vento calculados pelos inputs da figura anterior



Fonte: Imagem elaborada pelo autor.

O Coeficiente de Arrasto utilizado foi retirado de Silva (2017), que computou uma aproximação da figura 4 da NBR6123 em uma equação que permite parametrizar tal fator com base nas dimensões da edificação.

Os Coeficientes de Forma Externos e Internos são extraídos do software Ciclone inserindo os valores específicos do projeto manualmente. Tais pressões são então transferidas para cargas pontuais nos nós dos pórticos (F), que atuam perpendicularmente às respectivas faces do edifício, levando-se em conta a área de influência dos pórticos e a altura do pé direito segundo a equação do item 4.2.2 da NBR6123.

$$F = (C_e - C_i) \cdot q \cdot A$$

Onde C_e é o coeficiente de pressão externa, C_i é o coeficiente de pressão interna, q é a pressão dinâmica e A é a área de influência do nó.

Vale apontar que o código foi programado para considerar a área de influência do último pavimento como metade da do pavimento tipo.

7.3 CARREGAMENTOS VERTICAIS

7.3.1 CONSIDERAÇÕES DOS VALORES DE CARGA

No dimensionamento do programa, levou-se em conta carregamento devido ao Peso Próprio, às Cargas Permanentes, à Sobrecarga, ao Vento a 0° e ao Vento a 90° . Para adotar o valor da sobrecarga atuante no piso edifício, foi utilizada a Tabela 2 da NBR 6120. Para a cobertura, seguiu-se o especificado no item 9.1.2 da NBR7190, que fornece o valor de $0,25 \text{ kN/m}^2$.

Tais carregamentos foram combinados de acordo com o recomendado pela NBR8681, gerando 3 combinações diferentes com base nas ações variáveis principais: sobrecarga, vento a 0° e vento a 90° .

7.3.2 COMBINAÇÕES DE CARGAS

Para o programa foram considerados 6 casos de carga que abordam duas situações específicas: verificação do Estado Limite de Serviço (ELS) e verificação do Estado Limite Último (ELU).

No ELS, conforme indicado no item 7.1.3 da NBR7190 para construções correntes, foi considerada a Combinação de Longa duração para os carregamentos usuais. Assim, para a carga variável como ação principal, foram empregados o ψ_2 igual a 0,4 (para situações com elevadas concentrações de pessoas) para a carga variável e o ψ_2 igual a zero para a situação de vento, de acordo com a Tabela 6 da NBR8681. Como o valor do vento não é computado nessa conta, o programa não inclui uma carga de vento nessa consideração.

$$F_{d,uti} = \sum_{i=1}^m F_{Gi,k} + \sum_{j=1}^n \psi_{2j} \cdot F_{Qj,k}$$

Assim, para as lajes teremos:

$$F_{d,uti} = F_{pp} + F_{cp} + 0,4 \cdot F_s$$

Onde F_{pp} é a carga do peso próprio, F_{cp} é a carga permanente e F_s é a carga devido à sobrecarga.

Para a situação de vento a 0° como ação principal ação, foi utilizada a Combinação Rara de Serviço com o coeficiente ψ_1 igual a 0,6 relativo às cargas variáveis e considerando-se integralmente as forças devido ao vento 0° . A consideração do vento a 90° como ação principal se deu da mesma forma.

$$F_{d,uti} = \sum_{i=1}^m F_{Gi,k} + F_{Q1,k} + \sum_{j=2}^n \psi_{1j} \cdot F_{Qj,k}$$

Assim, para as lajes teremos:

$$F_{d,uti} = F_{pp} + F_{cp} + F_v + 0,6 \cdot F_s$$

Onde F_{pp} é a carga do peso próprio, F_{cp} é a carga permanente, F_s é a carga devido à sobrecarga e F_v é a carga devido às ações do vento.

No ELU, conforme recomenda o item 5.1.2 da NBR7190, deve ser considerada a Combinação Normal Última com a ação vertical como principal em um cenário e com a ação dinâmica dos ventos como principal em outro.

$$F_d = \sum_{i=1}^m \gamma_{gi} \cdot F_{Gi,k} + \gamma_q \cdot [F_{Q1,k} + \sum_{j=2}^n \psi_{0j} \cdot F_{Qj,k}]$$

Assim, foi utilizado o γ_g para o peso próprio de 1,2, conforme recomenda o item 5.1.1-b da NBR7190 para elementos estruturais de madeira industrializados. Também foi adotado um γ_g de 1,35 para as cargas permanentes (Elementos Construtivos Industrializados). O γ_q utilizado foi de 1,5 para ações variáveis no geral e de 1,4 para ações dinâmicas do vento, conforme indicado na Tabela 4 da NBR8681. O ψ_0 usado foi de 0,7 para as ações variáveis relativas a elevadas concentrações de pessoas e de 0,6 para a pressão dinâmica do vento em estruturas no geral, nos moldes da Tabela 6 da NBR8681.

Portanto, para as lajes teremos:

$$F_d = 1,2 \cdot (F_{pp} + F_{cp}) + 1,5 \cdot [F_s + 0,6 \cdot F_v]$$

e

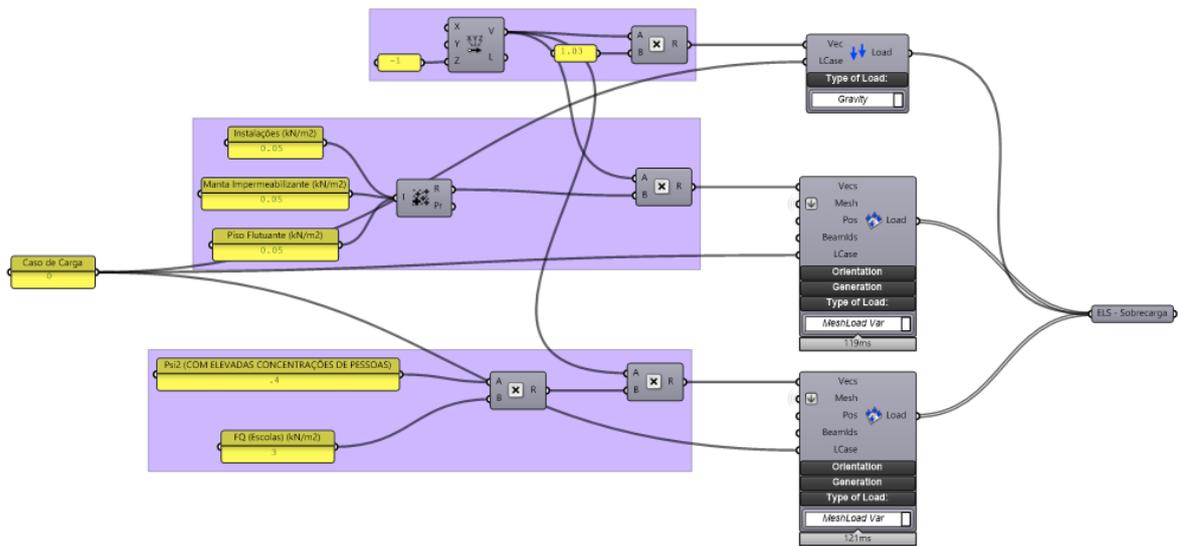
$$F_d = 1,2 \cdot (F_{pp} + F_{cp}) + 1,4 \cdot [0,75 \cdot F_v + 0,7 \cdot F_s]$$

Onde F_{pp} é a carga do peso próprio, F_{cp} é a carga permanente, F_s é a carga devido à sobrecarga e F_v é a carga devido às ações do vento.

É válido ressaltar que, conforme o item 5.1.2 da NBR7190, o esforço devido ao vento foi minorado por 0,75 quando considerado como principal. Ademais, outra observação importante é que as cargas relativas ao peso próprio foram majoradas em 3% para se considerarem o peso próprio dos elementos de ligação, conforme sugerido por Calil (2018, p. 104).

Os valores das cargas foram considerados pelo programa como carregamento distribuído sobre as placas de CLT; portanto, foi utilizado o componente Mesh Load citado anteriormente. A figura a seguir ilustra as entradas das cargas relativas às lajes de CLT para o ELS com a sobrecarga como ação principal.

Figura 67: Combinação de cargas do ELS com a sobrecarga como ação principal



Fonte: Imagem elaborada pelo autor.

Para o caso das placas da cobertura, foram utilizadas as mesmas expressões acima, porém com os coeficientes para locais onde não há elevadas concentrações de pessoas ($\psi_1 = 0,5$, $\psi_2 = 0,4$, e $\psi_3 = 0,3$) e foi considerado ainda uma carga de sucção do vento obtida pela análise do programa Ciclone.

8 CÁLCULOS E VERIFICAÇÕES

8.1 VIGAS E PILARES DE MLC

8.1.1 PILARES

O código foi programado para realizar a verificação dos pilares com relação à resistência e à estabilidade dos elementos, conforme sugerido por Calil (2018, p. 92).

8.1.1.1 RESISTÊNCIA

A verificação de resistência realizada considerou a situação de flexocompressão dos pilares, tendo sido utilizadas as seguintes expressões (NBR7190, item 5.3.6):

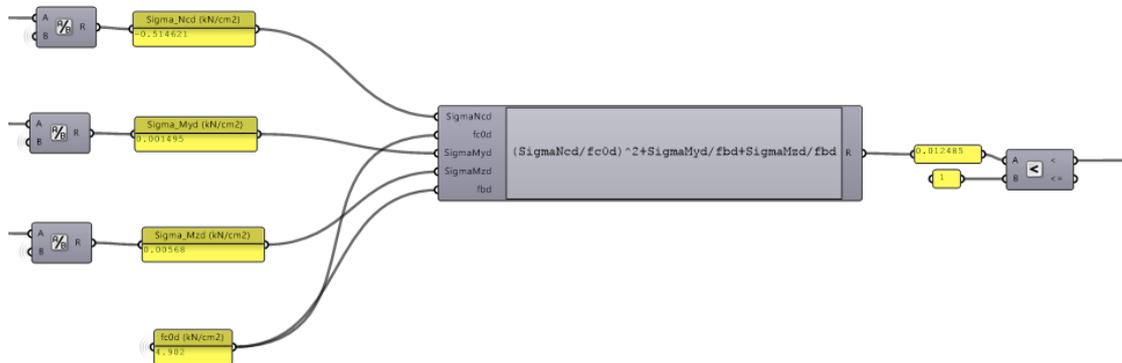
$$\left(\frac{\sigma_{Nc,d}}{f_{c0,d}}\right)^2 + \frac{\sigma_{Mx,d}}{f_{c0,d}} + k_M \cdot \frac{\sigma_{My,d}}{f_{c0,d}} \leq 1,0$$

$$\left(\frac{\sigma_{Nc,d}}{f_{c0,d}}\right)^2 + \frac{\sigma_{My,d}}{f_{c0,d}} + k_M \cdot \frac{\sigma_{Mx,d}}{f_{c0,d}} \leq 1,0$$

Onde $\sigma_{My,d}$ e $\sigma_{Mx,d}$ são as tensões máximas devidas às componentes de flexão atuantes segundo os eixos principais da seção; $\sigma_{Nc,d}$ é o valor de cálculo da tensão de compressão atuante; k_M é um coeficiente de correção segundo o item 5.3.4 da NB7190

Como o coeficiente k_M vale 0,5 para seções retangulares e 1,0 para outros casos, foi considerado o segundo cenário, pela utilização de seção composta no programa.

Figura 68: Verificação da resistência dos pilares



Fonte: Imagem elaborada pelo autor.

Vale comentar que a tensão de compressão indicada acima é explicitada pelo sinal negativo, que entrou na expressão dessa forma pois será elevada ao quadrado.

É importante frisar que tal verificação foi repetida para 3 cenários diferentes, considerando 3 pilares diferentes. O programa busca os elementos com os maiores esforços de compressão, de momento com relação a Y e de momento com relação a Z dentre todos os casos de carga, verificando a condição acima para cada uma das 3 peças.

8.1.1.2 ESTABILIDADE DE PEÇAS FLEXOCOMPRESSADAS

8.1.1.2.1 CONDIÇÃO DE ALINHAMENTO DAS PEÇAS

De acordo com o item 5.5.1 da NBR7190, o desvio no alinhamento axial da peça foi medido na metade da distância entre os apoios, tendo sido verificado para $l/500$, conforme exigido para peças em MLC. É importante frisar que o deslocamento medido pelo programa para esse caso é local, tendo sido descontados os deslocamentos ocorridos nos nós das extremidades do tramo em questão. Ou seja, trata-se dos deslocamentos relativos máximos.

Figura 69: Verificação da condição de alinhamento das peças

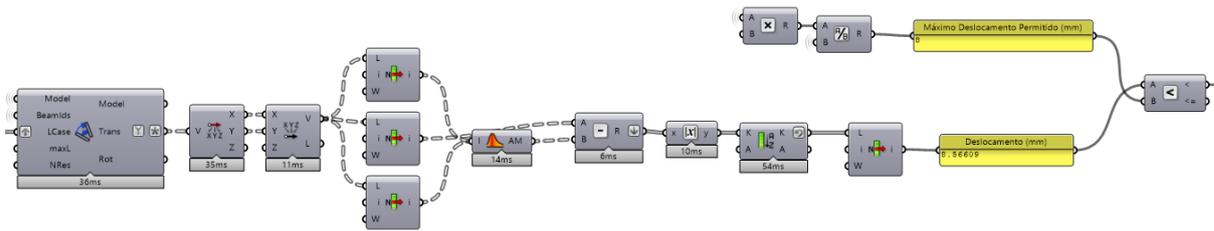


Imagem elaborada pelo autor.

8.1.1.2.2 CÁLCULO DO ÍNDICE DE ESBELTEZ DAS PEÇAS

O índice de esbeltez foi calculado de duas maneiras diferentes, uma vez que se trata de uma seção composta. Com relação ao eixo Z, a peça foi tratada de forma comum, considerando-se a contribuição de 2 seções retangulares simples. Já com relação ao eixo Y, foram aplicadas as condições especiais estabelecidas no item 5.8.2 da NBR7190 para verificação de estabilidade em peças compostas solidarizadas descontinuamente, conforme será explicitado.

Para o cálculo do comprimento de flambagem L_0 , foi utilizado $K_e=1$, desconsiderando a rigidez existente das ligações metálicas nos elementos de MLC. Assim, de acordo com o item 5.5.6 da NBR7190, foram calculadas as esbeltezes com relação a cada eixo de inércia.

$$\lambda = \frac{L_0}{\sqrt{\frac{I}{A}}}$$

Onde L_0 é o comprimento de flambagem do eixo considerado;

Convém ressaltar que o L da peça foi considerado igual ao pé direito de cada pavimento, assumindo que as lajes de CLT atuam travando o pilar em ambos os sentidos. Além disso, outra verificação realizada pelo programa é a do limite de esbeltez para peças flexocomprimidas, estabelecida em 5.5.6 com o valor máximo de 140.

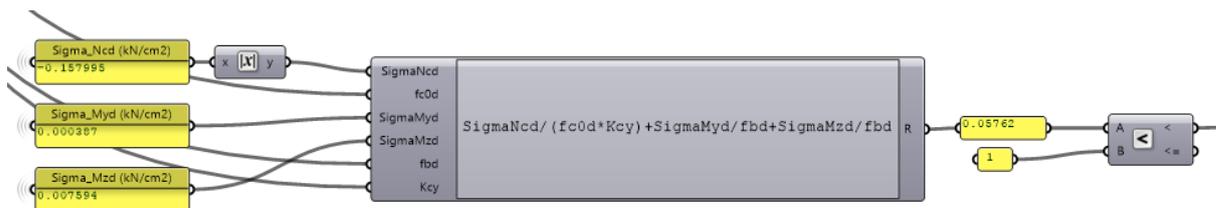
Para o eixo Z, a marcha de cálculo utilizada consiste na obtenção da esbeltez relativa, do coeficiente K_z , do coeficiente K_{cz} e, finalmente, na verificação da condição de estabilidade, conforme o item 5.5.8 da NBR7190. O valor indicado pela norma para o coeficiente Beta C é de 0,1 para MLC.

$$\frac{\sigma_{c0,d}}{k_{cx} \cdot f_{c0,d}} + \frac{\sigma_{Mx,d}}{f_{c0,d}} + k_M \cdot \frac{\sigma_{My,d}}{f_{c0,d}} \leq 1,0$$

$$\frac{\sigma_{c0,d}}{k_{cy} \cdot f_{c0,d}} + k_m \cdot \frac{\sigma_{My,d}}{f_{c0,d}} + \frac{\sigma_{Mx,d}}{f_{c0,d}} \leq 1,0$$

Novamente, como foi utilizado um $K_m=1,0$ (seção não-retangular), a verificação foi feita com apenas uma expressão e para as 3 situações de maiores esforços dentre todos os casos de carga, de modo análogo ao item anterior.

Figura 70: Verificação da estabilidade do pilar



Fonte: Imagem elaborada pelo autor.

Vale frisar que o valor negativo da compressão explicitado no exemplo da figura acima é ligado a um componente que gera o valor absoluto do input, ou seja, transforma-o em positivo antes de inseri-lo na expressão.

Os valores das tensões foram obtidos da mesma forma que o item 8.1.1.1, ou seja, foram verificados os 3 casos de peças com maior esforço de tensão de compressão, de momento em Y e de momento em Z.

A marcha de cálculo adotada para o eixo Y, onde atuam os efeitos da seção composta, foi similar, porém exigiu obtenção da esbeltez efetiva, que por sua vez demandou a criação de um novo parâmetro: a distância entre espaçadores. Os espaçadores considerados no código são interpostos colados, o que define um η de valor 1,0.

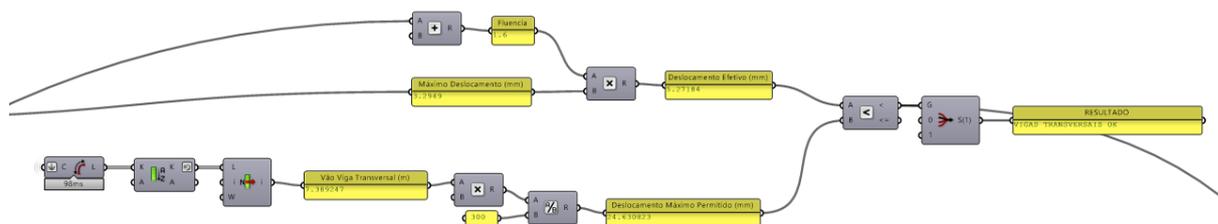
8.1.2 VIGAS

As vigas de MLC foram verificadas para o ELS e para o ELU seguindo os critérios da NBR7190. Para isso, foram utilizados os dois conjuntos de casos de carga já citados e exigidos pela NBR8681, para cada um dos cenários. Os elementos de vigas foram divididos em 4 conjuntos definidos por situações de apoio e de cargas diferentes: as vigas transversais, contínuas no menor sentido da planta, não sendo interrompidas pelos pilares; as vigas longitudinais que são interrompidas a cada pilar, possuindo sempre a condição de biapoiadas; as vigas transversais de cobertura, semelhantes às primeiras, porém com casos de carga distintos das mesmas; e as vigas longitudinais de cobertura, semelhantes às segundas, porém com casos de cargas também distintos.

8.1.2.1 VERIFICAÇÃO DO ELS

A verificação do estado limite de serviço se deu através da obtenção dos deslocamentos fornecidos pelo Karamba3D e consequente aplicação do fator de fluência para a obtenção do deslocamento efetivo, conforme indicado no item 7.2.1. Entretanto, foi utilizado o valor do coeficiente de fluência recomendado por Calil (2018, p. 90) na tabela 4.8 de 0,6, considerando-se MLC com classe de umidade 1. Apesar de tal valor ser menor do que o exigido pela NBR7190, ele está de acordo com o recomendado para MLC pela tabela 3.1 do Eurocode 5. Dessa forma, os deslocamentos locais foram comparados com os exigidos pelo item 7.2.1 de $l/300$ para os vãos e de $l/150$ para os balanços.

Figura 71: Verificação do deslocamento nas vigas



Fonte: Imagem elaborada pelo autor.

8.1.2.2 VERIFICAÇÃO DO ELU

Para o Estado Limite Último foram verificadas as Tensões Normais, as Tensões de Cisalhamento, a Estabilidade Lateral e a Compressão Normal às Fibras. Nesse caso foram utilizados os maiores esforços resultantes para cada tipo de elemento obtidos pelo Karamba3D como base para os cálculos.

8.1.2.2.1 TENSÕES NORMAIS

Neste tópico, foram consideradas seções submetidas a momento fletor cujo plano de ação não contém um de seus eixos centrais. Portanto, a verificação se deu pelo item 5.3.4 da NBR7190, conforme indicado abaixo.

$$\frac{\sigma_{Mx,d}}{f_{w,d}} + k_M \cdot \frac{\sigma_{My,d}}{f_{w,d}} \leq 1,0$$

$$k_m \cdot \frac{\sigma_{My,d}}{f_{w,d}} + \frac{\sigma_{Mx,d}}{f_{w,d}} \leq 1,0$$

Figura 72: Verificação das tensões normais



Fonte: Imagem elaborada pelo autor.

Assim como nos casos anteriores, foram consideradas todas as situações nas quais um dos esforços envolvidos é máxima (nesse caso, uma para o My máximo e outra para o Mz máximo). Da mesma forma, o Km utilizado também foi considerado igual a 1,0.

8.1.2.2.2 TENSÕES DE CISALHAMENTO

A verificação da segurança relativa às tensões tangenciais decorrentes do esforço cortante foi realizada pela condição expressa no item 5.4.2 da NBR7190:

$$\tau_d = V_d \cdot \frac{S}{b \cdot I} \leq f_{v0,d}$$

Figura 73: Verificação das tensões de cisalhamento



Fonte: Imagem elaborada pelo autor.

8.1.2.2.3 ESTABILIDADE LATERAL

Tal verificação foi realizada de acordo com o item 5.5.9 da NBR7190, conforme indicado a seguir.

$$\frac{L1}{b} \leq \frac{E_{c0,ef}}{\beta_M \cdot f_{c0,d}}$$

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

ou

$$\sigma_{c1,d} \leq \frac{E_{c0,ef}}{\frac{L1}{b} \cdot \beta_M}$$

Cabe ressaltar que essa verificação, apesar de realizada no presente trabalho para fins de estudo, não se mostra essencial nesse caso pois considera-se que as vigas serão travadas ao longo do seu comprimento pelas placas de CLT. Dessa forma, tais índices não entram no cálculo do veredito gerado pelo programa.

8.1.2.2.4 COMPRESSÃO NORMAL ÀS FIBRAS

Tal situação foi calculada na região dos apoios e foi verificada de acordo com o item 5.2.4 da NBR7190. A condição de segurança utilizada nesse caso é expressa por:

$$\sigma_{c90,d} \leq f_{c90,d}$$

onde

$$f_{c90,d} = 0,25 \cdot f_{c0,d} \cdot \alpha_n$$

A Tabela 6 da seção supracitada foi inserida dentro do programa de forma que o mesmo consiga selecionar o coeficiente α_n automaticamente. Como nesse caso nem as vigas transversais e nem as longitudinais estão diretamente apoiadas sobre os pilares, a área de atuação de tal efeito foi estimada utilizando-se a largura da peça e a altura da seção do pilar.

8.2 LAJES DE CLT

Para a verificação das lajes de CLT, foi utilizado o Método Gama (ou Mechanically Jointed Beams Theory) por se tratar de uma análise relativamente consolidada e cujos resultados são bastante precisos para a prática da engenharia (CLT Canadian Handbook, 2013, p. 4). Ele é baseado no Anexo B do Eurocode 5, que é usado para seções compostas por pinos metálicos espaçados entre si. Tal metodologia envolve o cálculo de uma rigidez efetiva (E_{eff}) e de um coeficiente Gama que está relacionado à eficiência de solidarização das camadas da seção transversal, conforme as equações abaixo utilizadas para um CLT de 5 camadas.

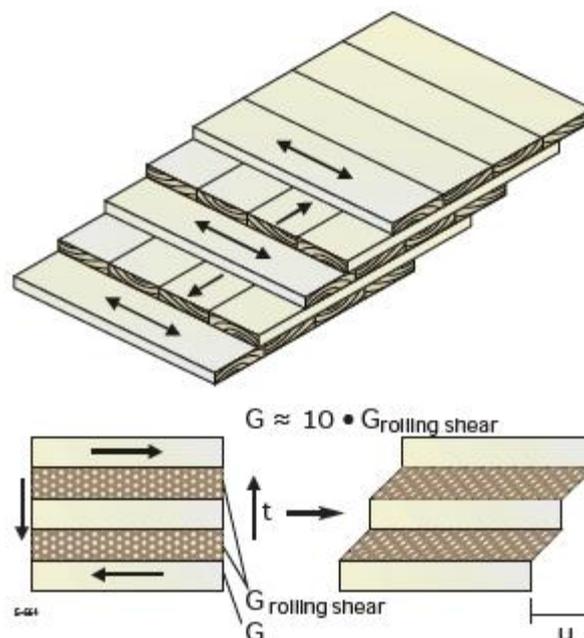
$$EI_{eff} = \sum_{i=1}^n (E_i \cdot I_i + \gamma_i \cdot E_i \cdot A_i \cdot a_i^2)$$

$$\gamma_i = \left[1 + \pi^2 \cdot E_i \cdot A_i \cdot \frac{h_i}{G_R \cdot b \cdot l^2} \right]^{-1}$$

Onde G_R é o módulo de Rolling Shear; b é a largura do painel (tomada geralmente como 1 metro); h_i é a espessura da camada na direção perpendicular à ação; a_i é a distância entre o cg da camada i ao cg da seção; l é o comprimento do vão a ser vencido.

Nesse cálculo, a capacidade portante das camadas transversais ao vão analisado é desconsiderada e o deslizamento entre as camadas longitudinais é tomado com base no efeito de Rolling Shear que ocorre nas lamelas transversais. Segundo Novak, Koppelhubber e Pock (2014, p. 13), o Rolling Shear representa o colapso do CLT pelo cisalhamento causado de forma tangencial aos anéis de crescimento da madeira das camadas transversais (Figura 74).

Figura 74: Efeito Rolling Shear no CLT



Fonte: CLT Canadian Handbook (p. 6)

Nesse método, como apenas a contribuição de resistência das lamelas longitudinais ao vão é considerada, as fórmulas de cálculo são análogas às de uma viga de seção composta apoiada.

Seguindo a marcha de cálculo estabelecida pelo CLT Canadian Handbook, foram feitas quatro verificações para os painéis de madeira correspondentes a deformação, ao momento solicitante, ao esforço cortante transversal ao plano e ao Rolling Shear. A verificação da máxima tensão de flexão é dada pela soma da tensão axial devido à flexão do elemento com a tensão de flexão na camada externa mais solicitada. Assim, considerando o E_{eff} e o coeficiente Gama, a equação de verificação do momento resistente (M_r) de um CLT de 5 camadas pode ser expressa por:

$$M_r = F_b \cdot \frac{I_{eff}}{\gamma_1 \cdot a_1 + 0,5 \cdot h_1}$$

Onde a_1 representa a distância do cg da lamela mais externa ao cg da seção; h_1 representa a altura da lamela orientada no sentido do vão; F_b é o valor resistente do painel à flexão paralela à direção principal das fibras;

Vale frisar que tal expressão assume o módulo de elasticidade de todas as camadas longitudinais com o mesmo valor.

Assim, o esforço de momento fletor atuante máximo das lajes é obtido através do componente S-Forces, a partir dos casos de carga do ELU fornecidos ao componente. Tal valor é comparado com o resultado obtido para M_r .

Com relação à verificação do cisalhamento, a máxima tensão cisalhante é calculada quando as tensões normais são iguais a zero e é obtida a partir da seguinte expressão.

$$\tau = 1,5 \cdot \frac{V}{A_{gross}}$$

Onde V representa o valor máximo de esforço cortante; A_{gross} representa a área bruta da seção transversal.

Considerando-se o E_{eff} e o coeficiente γ , a resistência cortante longitudinal (V_rL) e a resistência ao Rolling Shear (V_rR) para um CLT de 5 camadas podem ser tomadas respectivamente como as expressões a seguir.

$$V_{rL} = \frac{\Phi \cdot F_v \cdot (E \cdot I_{eff}) \cdot b}{\gamma_1 \cdot E_1 \cdot A_1 \cdot a_1 + E'_1 \cdot A'_1 \cdot a'_1 + \gamma_2 \cdot E_2 \cdot \frac{A_2}{2} \cdot \frac{h_2}{4}}$$

$$V_{rR} = \frac{\Phi \cdot F_{vR} \cdot (E \cdot I_{eff}) \cdot b}{\gamma_1 \cdot E_1 \cdot A_1 \cdot (a_1 - \frac{h_2}{2}) + E'_1 \cdot A'_1 \cdot (a'_1 - \frac{h_2}{2})}$$

Onde F_v é o valor da força cortante resistente; F_{vR} é o valor da força resistente de Rolling Shear.

Tais fórmulas foram deduzidas para um CLT de 5 camadas e necessitam de adaptações caso sejam consideradas outras composições de seção. O esforço cortante resistente máximo permitido é tomado como o menor valor entre V_{rL} e V_{rR} e tal valor é comparado com o esforço cortante solicitante máximo no modelo dado pelo componente S-Forces.

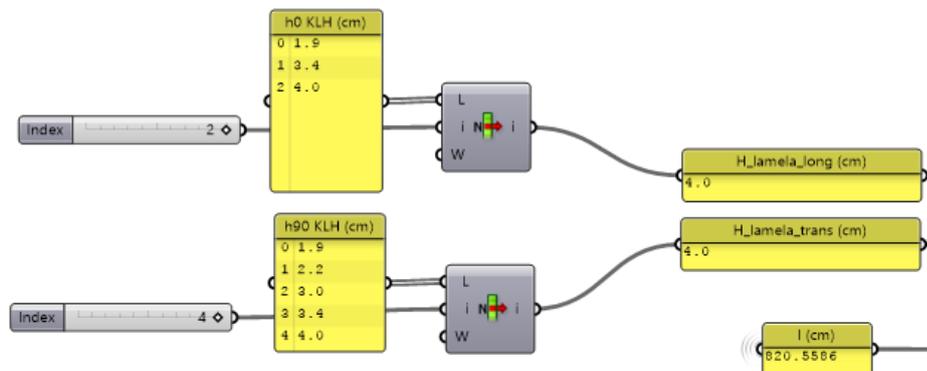
Para a inserção de tais métodos no código, foi primeiramente definido o uso de um CLT de 5 camadas. Então, foram implementados os parâmetros de espessuras comerciais das lamelas longitudinais e transversais de acordo com o catálogo da KLH para que o usuário consiga escolher as espessuras das lamelas a 0° e a 90°.

Figura 75: Especificações sobre as camadas do CLT da empresa KLH

FACING LAYERS ALIGNED TO PANEL LONGITUDINAL DIRECTION TL										
Nominal thickness	=	⊥	=	⊥	=	⊥	=	A _{net}	A _q	I _{full}
in mm	Layers	l	t	l	t	l	t	[mm ²]	[mm ²]	[10 ⁶ mm ⁴]
60	3 s	19	22	19				38000	60000	1800
78	3 s	19	40	19				38000	78000	3955
90	3 s	34	22	34				68000	90000	6075
95	3 s	34	27	34				68000	95000	7145
108	3 s	34	40	34				68000	108000	10498
120	3 s	40	40	40				80000	120000	14400
117	5 s	19	30	19	30	19		57000	117000	13347
125	5 s	19	34	19	34	19		57000	125000	16276
140	5 s	34	19	34	19	34		102000	140000	22867
146	5 s	34	22	34	22	34		102000	146000	25934
162	5 s	34	30	34	30	34		102000	162000	35429
182	5 s	34	40	34	40	34		102000	182000	50238
200	5 s	40	40	40	40	40		120000	200000	66667
202	7 s	34	22	34	22	34	22	136000	202000	68687
226	7 s	34	30	34	30	34	30	136000	226000	96193
208	7 ss	68	19	34	19	68		170000	208000	74991
230	7 ss	68	30	34	30	68		170000	230000	101392
* 260	7 ss	80	30	40	30	80		200000	260000	146467
* 280	7 ss	80	40	40	40	80		200000	280000	182933
248	8 ss	68	22	68	22	68		204000	248000	127108
* 300	8 ss	80	30	80	30	80		240000	300000	225000
* 320	8 ss	80	40	80	40	80		240000	320000	273067

Fonte: KLH

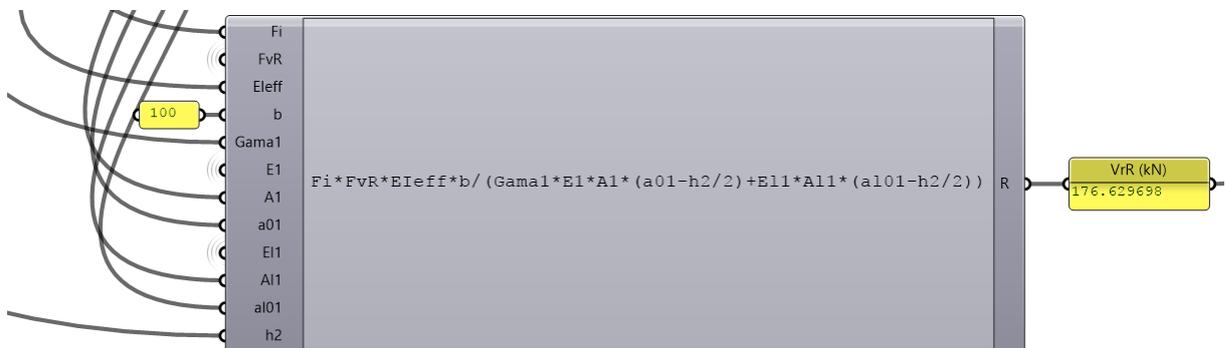
Figura 76: Parâmetros criados para a definição do CLT utilizado



Fonte: Imagem elaborada pelo autor.

Assim, os cálculos foram efetuados inserindo-se as equações supracitadas no código.

Figura 77: Equação da resistência de Rolling Shear para um CLT de 5 camadas com os inputs da imagem anterior



Fonte: Imagem elaborada pelo autor.

Como tal método considera um momento de inércia efetivo, foi calculada uma altura de seção efetiva para fornecer um valor mais real ao componente Mesh To Shell, resultando em valores mais coerentes de deslocamentos calculados pelo programa do que se fosse usada a altura total da seção. Os máximos esforços resultantes do modelo são, então, comparados com os valores de resistência calculados para os casos de carga referentes ao ELU.

Com relação à deformação da placa, foi analisado o valor máximo do modelo sob as combinações de carregamentos do ELS. Para o coeficiente de fluência, o CLT Canadian Handbook recomenda os valores mostrados na Figura 78, que são baseados em resultados experimentais. Vale notar que, de acordo com a bibliografia, os valores são maiores que os recomendados para a MLC em parte porque a fluência atua com maior intensidade na direção perpendicular às fibras.

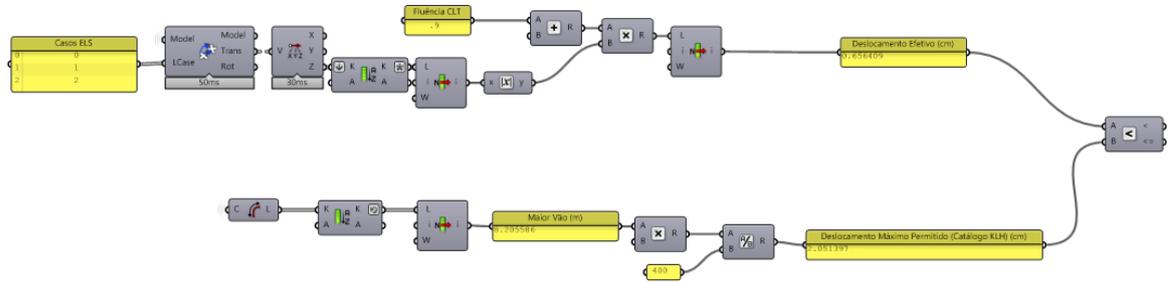
Figura 78: Coeficientes de fluência recomendados para placas de CLT

Material	Service Class 1	Service Class 2	Service Class 3
CLT	0.90	1.10	N/A

Fonte: CLT Canadian Handbook (cap. 6, p. 9)

Em posse do valor do deslocamento efetivo, é efetuada a comparação com o limite de $l/400$ definido no catálogo do fabricante K LH.

Figura 79: Verificação do deslocamento máximo nas placas de CLT

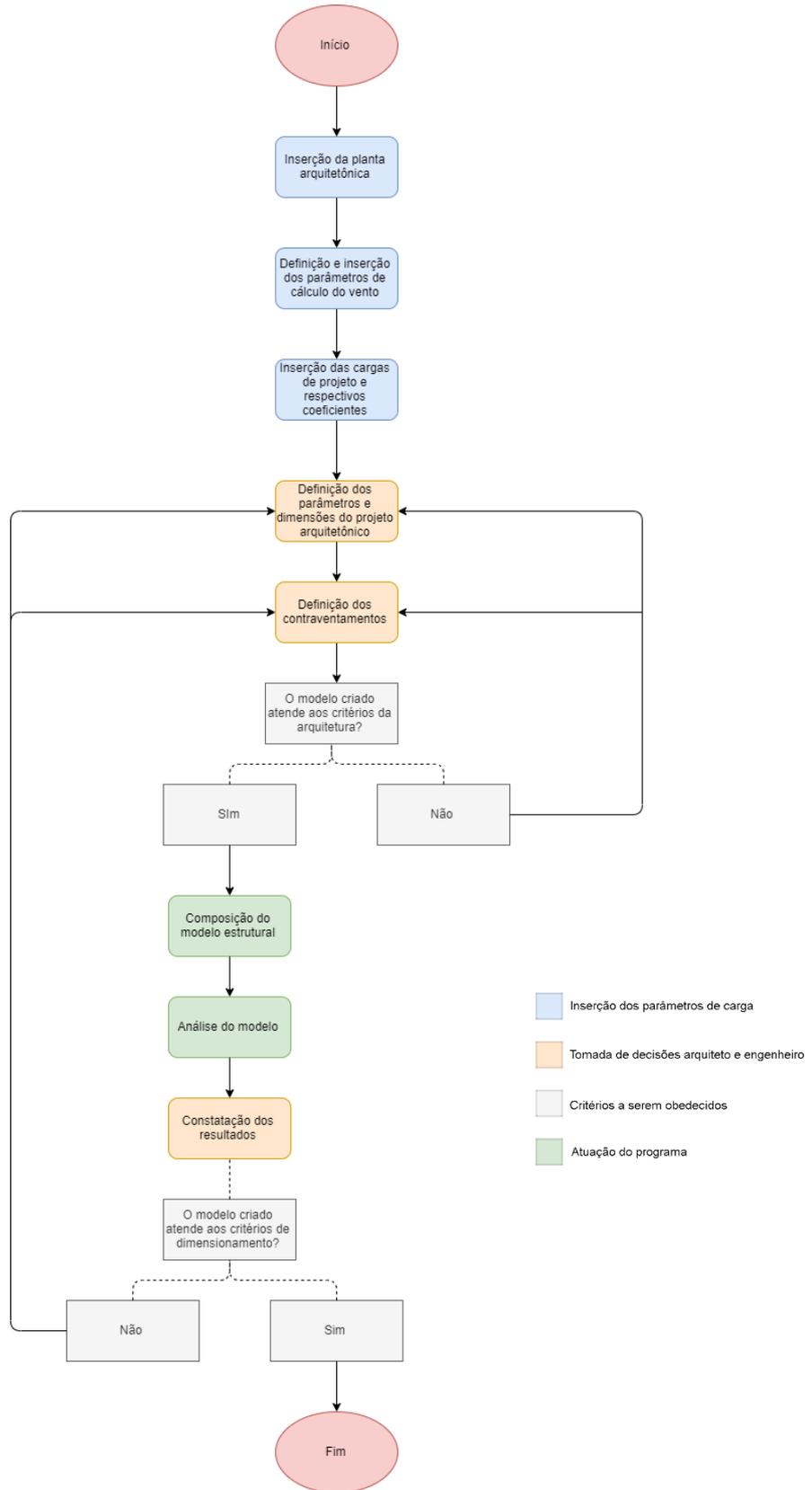


Fonte: Imagem elaborada pelo autor.

9 PROPOSTA PARA UTILIZAÇÃO DO CÓDIGO

A dinâmica proposta para a utilização do código na concepção do projeto colaborativo está sintetizada no fluxograma a seguir (Figura 80). As células em azul representam uma fase prévia a do projeto, na qual devem ser inseridos os parâmetros relativos às cargas e aos coeficientes relativos às mesmas. Já as células em laranja representam as fases que devem ser acompanhadas pelos arquitetos e pelos engenheiros conjuntamente e constituem a fase de tomada de decisões de projeto. As células em verde representam a atuação do programa no processo. Finalmente, as células em cinza representam os critérios que devem ser obedecidos e os respectivos caminhos a serem tomados a partir deles.

Figura 80: Sugestão utilização do código no processo de projeto colaborativo



Fonte: Imagem elaborada pelo autor.

10 ANÁLISE DOS PROJETOS

10.1 CICLO FAB LAB

10.1.1 O PROJETO

O Ciclo Fab Lab é o projeto de TFG desenvolvido pela aluna Bárbara Maia, de Arquitetura e Urbanismo da FEC-UNICAMP. Ele consiste em um maker space e tem o objetivo de oferecer apoio ao Polo Estratégico de Desenvolvimento da Unicamp/CIATEC II dentro do futuro HIDS (Hub Internacional de Desenvolvimento Sustentável), cujo intuito é sediar laboratórios e espaços de pesquisa ligados ao desenvolvimento sustentável representando, ao mesmo tempo, um equipamento para uso dos estudantes da Unicamp.

O edifício está localizado na Unicamp e foi projetado para integrar-se ao eixo de circulação da quadra, resultando em um lugar de passagem e de encontro. Com relação ao programa arquitetônico, foram criadas três grandes áreas, uma para cada competência a ser estimulada: estudar; criar e testar; compartilhar.

10.1.2 ESTRUTURA

Ao longo das reuniões com a estudante de arquitetura e discutindo-se as possibilidades do projeto, percebeu-se que as necessidades evocadas se afastavam da utilização da madeira como material estruturalmente eficiente. Isso se deu principalmente pela cobertura almejada por ela – que além de demandar grandes vãos, fosse capaz de recobrir todo o projeto e ainda permitir que fosse caminhável. Na ausência de referências de projetos similares que utilizassem madeira e após conversas com profissionais da área de estruturas de madeira, foi recomendado à arquiteta que fosse adotado outro material para suprir as necessidades dessa estrutura principal. Assim, a parte do projeto que foi concebida em madeira consiste em uma estrutura independente e interna.

Como o código foi desenvolvido com a lógica de que os balanços fossem transversais, ou seja, seguiriam as vigas dispostas no sentido do menor comprimento da planta arquitetônica, foi necessário realizar um ajuste para a demanda do projeto. Para isso, foi implementado um novo parâmetro no código que possibilita ao usuário escolher o sentido dos balanços, seguindo a lógica de que apenas umas das vigas (transversais ou longitudinais) poderia conceber balanços.

Para esse cálculo, a parte de código que considerava as cargas de vento foi desativada, uma vez que a estrutura se encontraria no ambiente interno, tendo sido aplicadas, portanto, as combinações referentes à sobrecarga. Outra adaptação que precisou ser considerada foi o fato de se trabalhar agora com pilares de seção simples retangular. Já que a estrutura possuía apenas um pavimento, as vigas com balanço poderiam ser acopladas sobre os pilares, não havendo necessidade da continuidade do mesmo. Uma vez que tal estrutura está sendo concebida para comportar escritórios, foi utilizada uma sobrecarga de 2 kN/m² de acordo com a NBR6120.

Além disso, não se julgou necessária a implementação de contraventamentos uma vez que, além da rigidez fornecida pelo CLT, o pórtico será ligado à estrutura de concreto armado que, em situações de ausência de vento, supre o esforço dinâmico que solicitaria horizontalmente a estrutura.

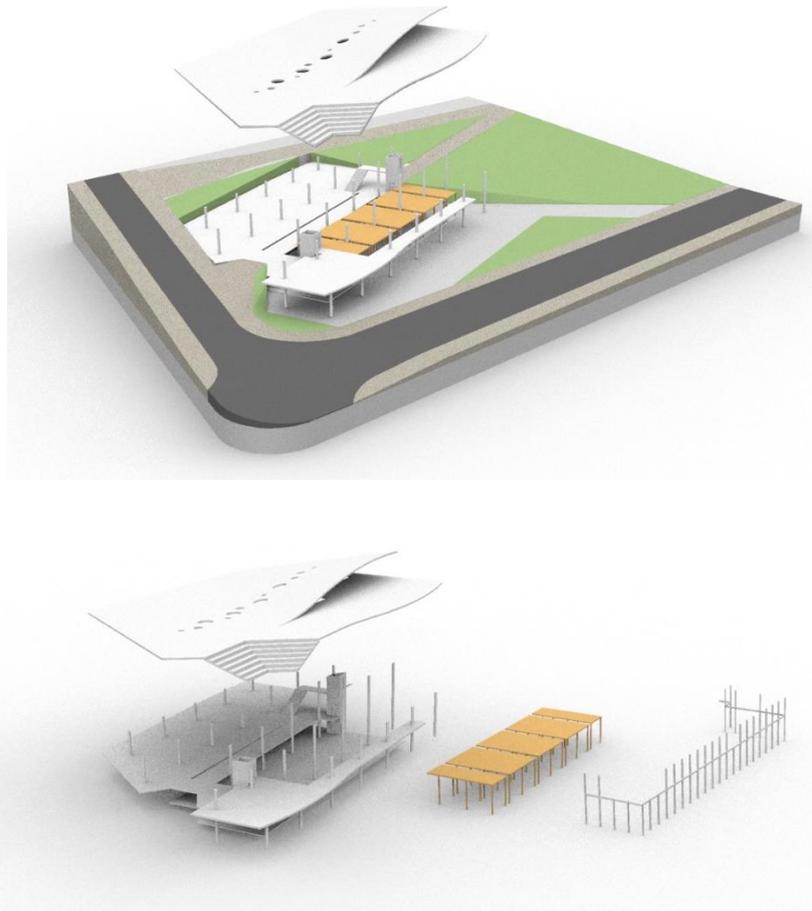
Por fim, cabe salientar que o módulo calculado possui duas tipologias no projeto, mas como as dimensões e o uso são os mesmos, foi calculado apenas um deles.

Figura 81: Fachada do Ciclo Fab Lab



Fonte: TEIXEIRA (2019)

Figura 82: Estrutura de madeira presente no projeto da Bárbara

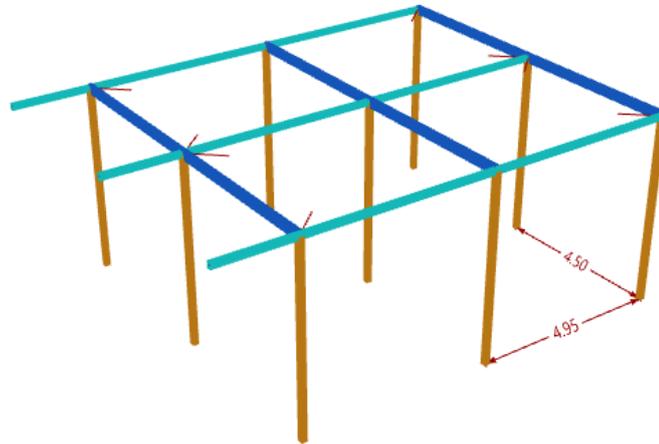


Fonte: TEIXEIRA (2019)

10.1.3 RESULTADOS

São apresentados abaixo os resultados dos cálculos efetuados pelo programa. Na Figura 83, os elementos foram representados por cores, sendo os pilares em marrom, as vigas transversais contínuas em azul claro e as vigas longitudinais bi apoiadas em azul escuro.

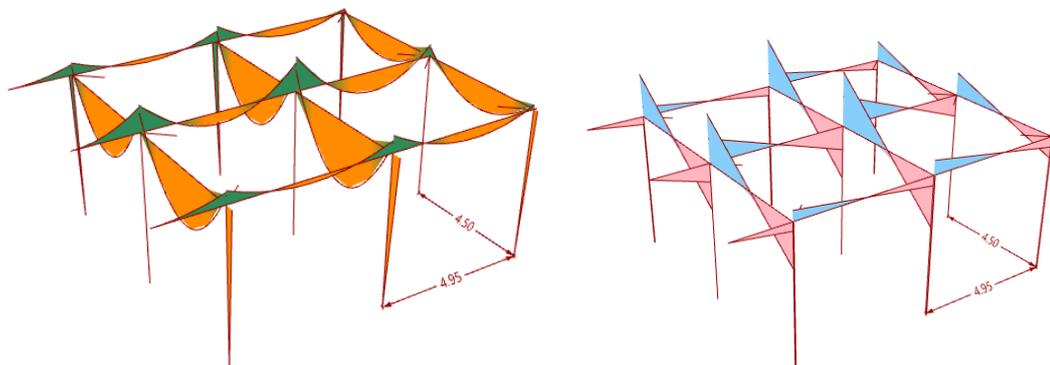
Figura 83: Pórtico de MLC com as dimensões reais das peças, localizado dentro do projeto da Bárbara.



Fonte: Imagem elaborada pelo autor.

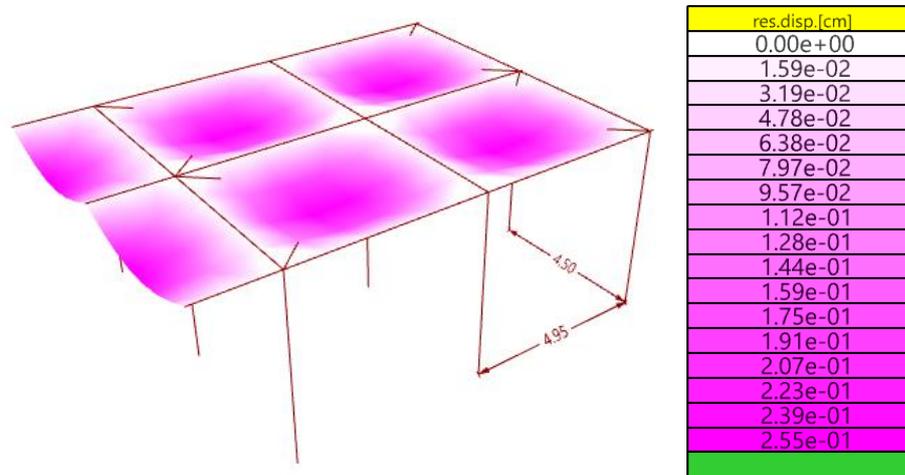
Os diagramas de momento fletor e de esforço cortante são exibidos abaixo. É importante frisar que os picos de momento negativo nas extremidades das vigas transversais, interrompidas nos pilares, se dá pela consideração da semi-rigidez nas ligações, como discutido previamente.

Figura 84: Diagramas de Momento Fletor (à esquerda) e de esforço cortante (à direita)



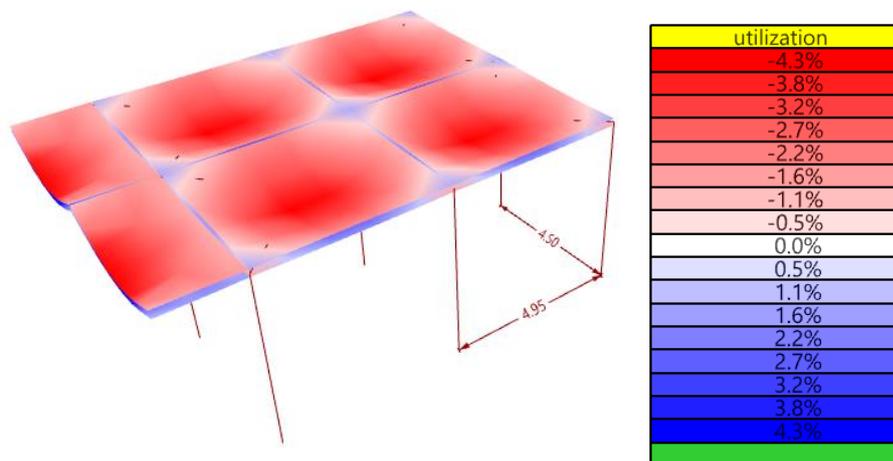
Fonte: Imagens elaboradas pelo autor.

Figura 85: Diagrama de deslocamentos das placas de CLT (valores da tabela sem a fluência)



Fonte: Imagens elaboradas pelo autor.

Figura 86: Utilização das lajes de CLT (em vermelho: fibras comprimidas; em azul: fibras tracionadas)



Fonte: Imagem elaborada pelo autor.

Figura 87: Quadro resumo indicando os inputs dados para o programa

INPUTS		
Geometria	Balanço	2 m
	Vão Longitudinal Grid	4,95 m
	Vão Transversal Grid	4,50 m
	Pé Direito	4,9 m
	Número de Pavimentos	1 pav
Seção Transversal MLC	Altura Pilar	15 cm
	Base Pilar (largura de uma das peças que compõe a seção)	15 cm
	Distância entre espaçadores	-
	Altura Viga Transversal	15 cm
	Base Viga Transversal	10 cm
	Altura Viga Longitudinal	25 cm
	Base Viga Longitudinal	10 cm
	Altura Viga Transversal Cobertura	-
	Base Viga Transversal Cobertura	-
	Altura Viga Longitudinal Cobertura	-
Seção Transversal CLT	Composição CLT	5 camadas
	Altura Lamela 0° CLT	3,4 cm
	Altura Lamela 90° CLT	2,2 cm
Vento	Velocidade Básica do vento	-
	Fator Topográfico	-
	Categoria de rugosidade do Terreno	-
	Grupo da edificação	-
Cargas	Cargas permanentes (Instalações+ Manta Impermeabilizante + Revestimento do P)	0,15 kNm ²
	Sobrecarga (Escritório)	2 kNm ²

Fonte: Imagem elaborada pelo autor.

Figura 88: Quadro resumo dos resultados gerados pelo programa

OUTPUTS	
Máxima verificação à compressão do pilar	0,001 < 1,00
Máximo deslocamento horizontal no meio do pilar	2,96 < 9,80 mm
Máxima Esbeltez	113,16 < 140
Máxima verificação à estabilidade do pilar	0,30 < 1,00
Máximo deslocamento em vigas transversais (com fluência)	13,1 < 16,50 mm
Máximo deslocamento em vigas longitudinais (com fluência)	9,9 < 15,00 mm
Máximo deslocamento em vigas transversais de cobertura (com fluência)	-
Máximo deslocamento em vigas longitudinais de cobertura (com fluência)	-
Máxima verificação de tensões normais em vigas transversais	0,0006 < 1,00
Máxima verificação de tensões normais em vigas longitudinais	0,004 < 1,00
Máxima verificação de tensões normais em vigas transversais de cobertura	-
Máxima verificação de tensões normais em vigas longitudinais de cobertura	-
Máxima verificação de tensões de cisalhamento em vigas transversais	0,05 < 1,00
Máxima verificação de tensões de cisalhamento em vigas longitudinais	0,06 < 1,00
Máxima verificação de tensões de cisalhamento em vigas transversais de cobertura	-
Máxima verificação de tensões de cisalhamento em vigas longitudinais de cobertura	-
Máxima verificação de momento atuante no CLT	0,22 < 1,00
Máxima verificação de cortante transversal atuante no CLT	0,09 < 1,00
Máxima verificação de esforço de Rolling Shear atuante no CLT	0,10 < 1,00
Máximo deslocamento atuante no CLT	9,49 < 12,38 mm

Fonte: Imagem elaborada pelo autor.

Os resultados apresentados na Figura 88 comparam os valores verificados nos elementos mais solicitados com os valores limites. Ou seja, a placa de CLT mais solicitada nesse caso está utilizando 22% de sua capacidade de momento fletor, e está deslocando 9,49 milímetros, tendo o limite de deslocamento admissível de 12,38 milímetros.

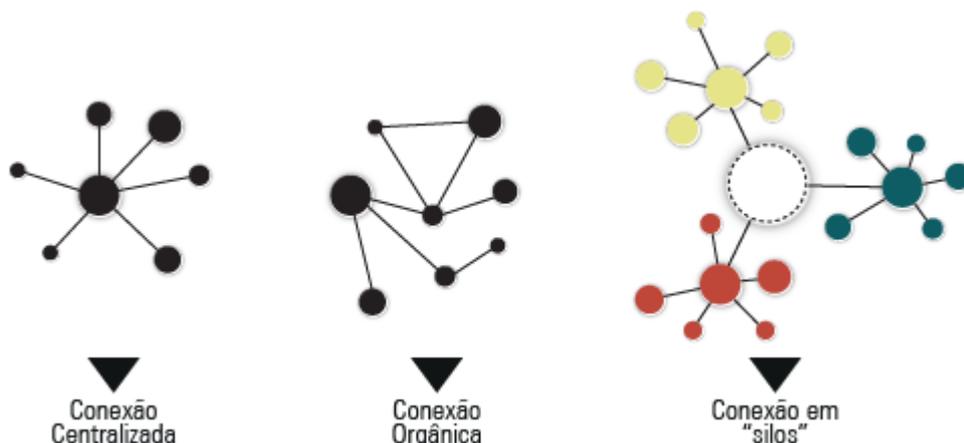
10.2 CIEnCIA – UM ESPAÇO DE INOVAÇÃO

10.2.1 O PROJETO

O Centro de Formação em Ciências e Tecnologia (CIEnCIA) é o projeto de TFG desenvolvido pelo aluno Henrique Monteiro, de Arquitetura e Urbanismo da FEC-UNICAMP. O projeto consiste em uma faculdade que visa a criação de um espaço de aprendizado através da inovação, do empreendedorismo e da diversidade de conhecimento. Essa iniciativa partiu de uma proposta de projeto do CNPEM (Centro Nacional de Pesquisa em Energia e Materiais). O espaço foi projetado para ser implantado próximo à UNICAMP, ao CNPEM, à PUC e à FACAMP e, assim como o projeto anterior, se coloca como equipamento complementar ao HIDS.

A ideia central do projeto é propiciar, segundo Henrique, “a serendipidade, a troca, a conexão e a criatividade por meio de novos caminhos”. Para isso, o arquiteto se valeu da setorização do projeto em silos (Figura 89), criando espaços de integração, de troca e de descoberta e reflexão que foram organizados através das escalas de aprendizado.

Figura 89: Tipologias de conexões entre os espaços de projeto

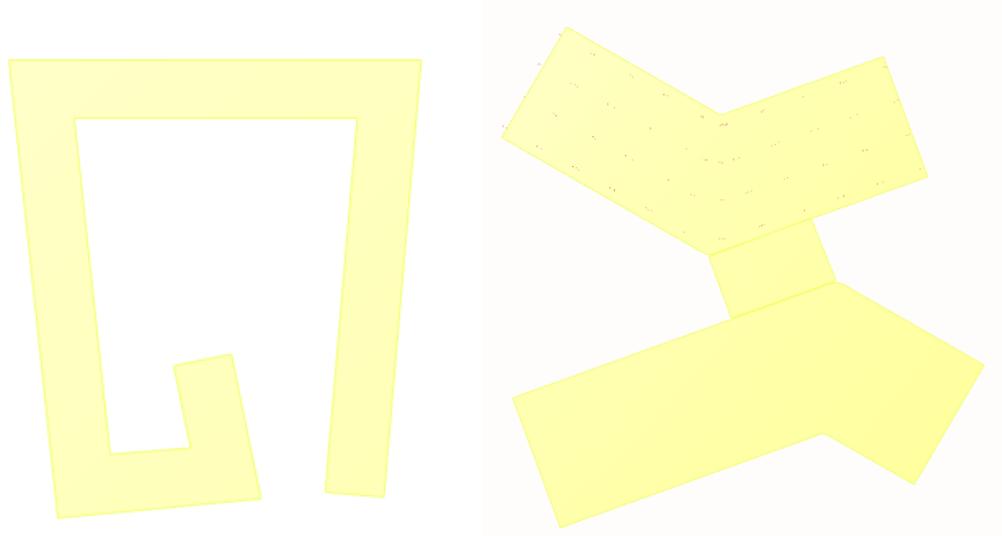


Fonte: Monteiro (Prancha 1)

10.2.2 ESTRUTURA

As características específicas desse projeto exigiram algumas mudanças do código no decorrer do processo. Como já comentado, inicialmente este estudo foi desenvolvido a partir de uma planta bastante diferente da final, contribuindo para o enriquecimento do código, uma vez que cada particularidade nova implicava em uma adaptação do programa para que ele conseguisse funcionar corretamente (Figura 90).

Figura 90: Proposta de planta arquitetônica inicial (à esquerda) e proposta de planta arquitetônica final (à direita)

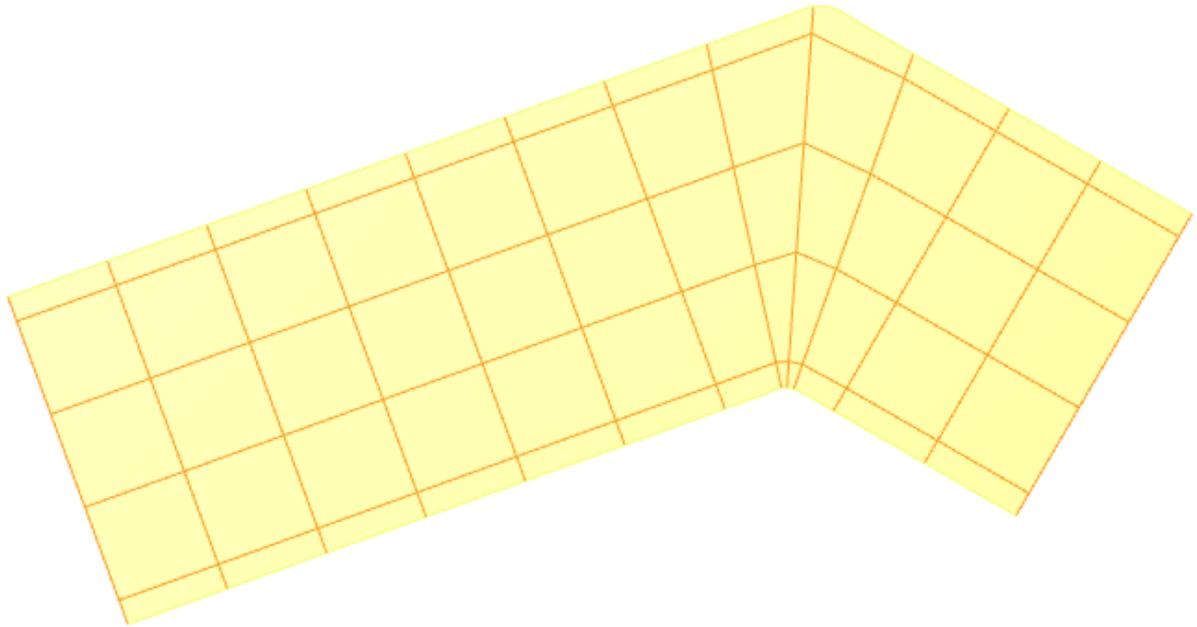


Fonte: Imagem elaborada pelo autor.

A partir da planta proposta pelo arquiteto, percebeu-se que era necessário dividi-la em 3 partes e rodar o programa separadamente para cada uma. Com o objetivo de sintetizar o tópico, será exposto o pré-dimensionamento de apenas uma dessas 3 partes, porém, os dados de entrada e de saída das outras duas partes serão apresentados no quadro síntese localizado no final deste capítulo.

Foi gerada uma malha para cada parte, em conjunto com o arquiteto, que buscava possibilitar o objetivo do projeto sem que isso se afastasse de uma lógica estrutural (Figura 91). As dimensões do grid do exemplo foram de 7,67 m nos vãos transversais e de 8,14 m nos vãos longitudinais.

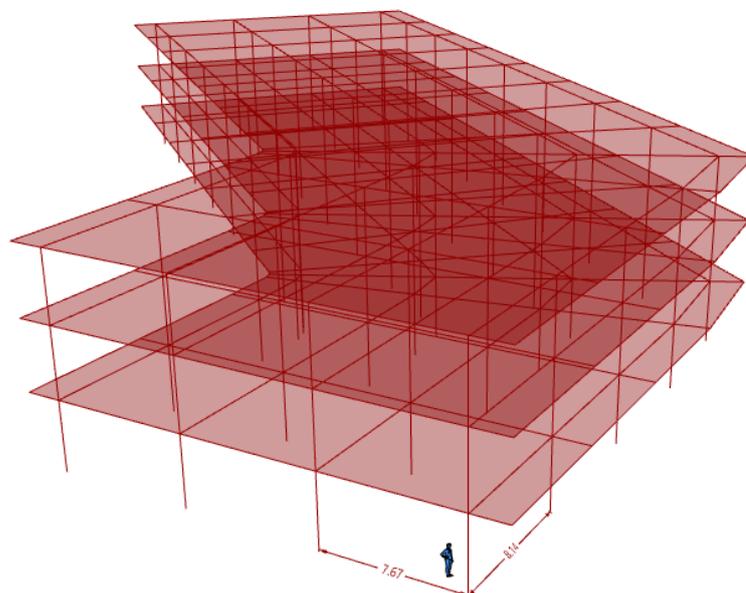
Figura 91: Grelha utilizada para a estruturação do Bloco 2 do projeto



Fonte: Imagem elaborada pelo autor.

Em seguida, foram ajustados os inputs do painel de controle para as características específicas do projeto: 3 pavimentos, 2 metros de balanços transversais e pé direito de 4 metros.

Figura 92: Modelo unifilar do Bloco 2 do projeto



Fonte: Imagem elaborada pelo autor.

Após esse passo, foi utilizado o software Ciclone para encontrar o Coeficientes de Pressão Interna e o Coeficiente de Pressão Externa. Para os dados de entrada, como já comentado, foram utilizadas as dimensões transversais (27 metros) e longitudinal (92 metros) da planta do projeto como se ela fosse retangular. As características para o cálculo do vento foram consideradas para a cidade de Campinas, SP, na região do projeto especificada anteriormente. Os coeficientes específicos utilizados nesse projeto estão expostos nas figuras a seguir.

Figura 93: Inputs fornecidos ao programa Ciclone (à esquerda) e dados dos coeficientes de vento calculados pelo programa (à direita)

The image displays two screenshots from the 'Ciclone' software interface.

Left Screenshot (Geometria):

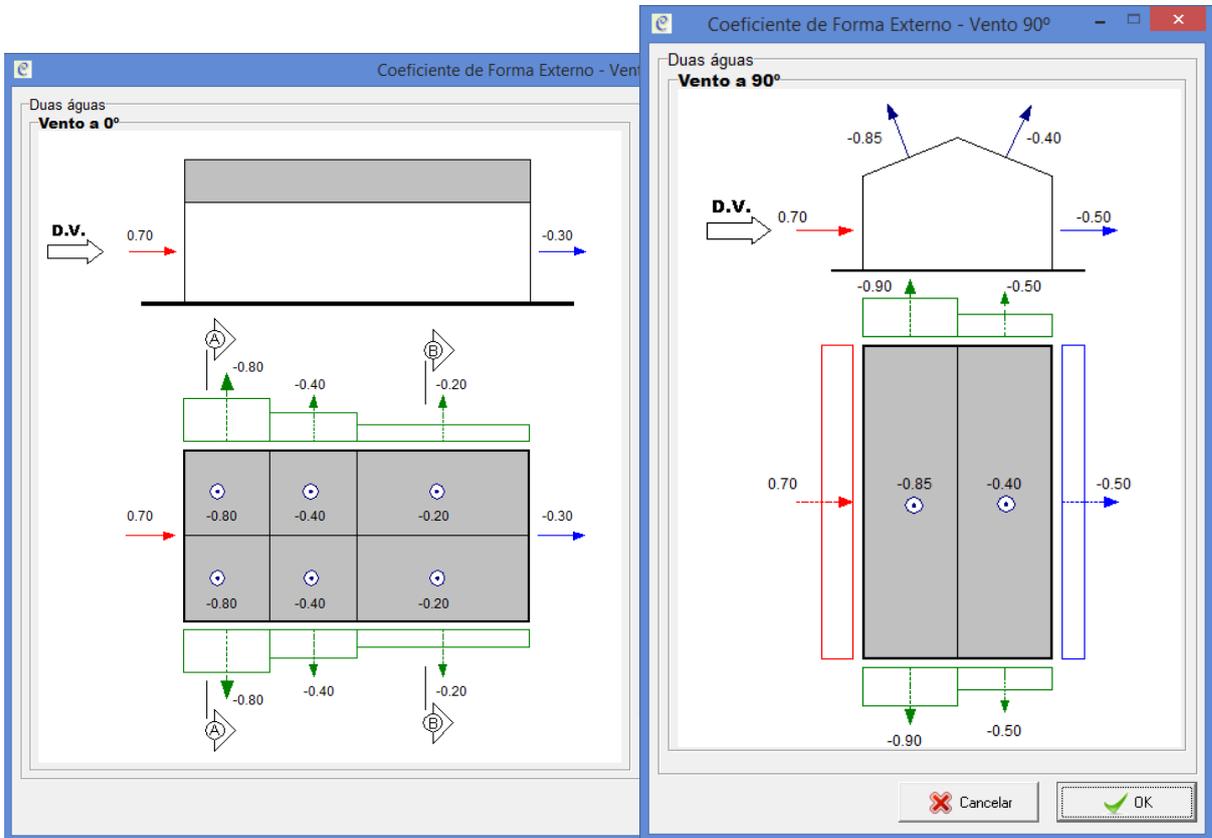
- Tipo de Telhado:**
 - Uma Água
 - Duas Águas
 - Abóboda Cilíndrica - Baixa Turbulência
 - Abóboda Cilíndrica - Alta turbulência
 - Múltiplas Águas - Simétrico
 - Múltiplas Águas - Assimétrico / 60°
 - Múltiplas Águas - Uma água vertical
- Dimensões:**
 - a: 92
 - b: 27
 - h: 12
 - c: 0.63
- Diagramas:**
 - CORTE:** A diagram showing a gabled roof with height 'c' and total height 'h'.
 - PLANTA:** A diagram showing a rectangular footprint with width 'b' and length 'a'.

Right Screenshot (Velocidade Característica e Pressão de Obstrução):

- Velocidade Característica:**
 - Equation: $V_k = V_0 \times S_1 \times S_2 \times S_3$
 - Inputs: $V_0 = 45.00$ m/s, $S_1 = 1.000$, $S_3 = 1.000$
 - Wind Direction Coefficients:
 - Vento 0°: $S_2 = 1.001$
 - Vento 90°: $S_2 = 0.972$
 - Calculated Values:
 - Vento 0°: $V_k = 45.037$ m/s
 - Vento 90°: $V_k = 43.760$ m/s
 - Button: **Calcular**
- Pressão de Obstrução:**
 - Equation: $q = 0,613 \times V_k^2$
 - Wento 0°: $q = 1243.341$ N/m² → $q = 1.243$ kN/m²
 - Wento 90°: $q = 1173.852$ N/m² → $q = 1.174$ kN/m²
 - Buttons: **Cancelar**, **OK**

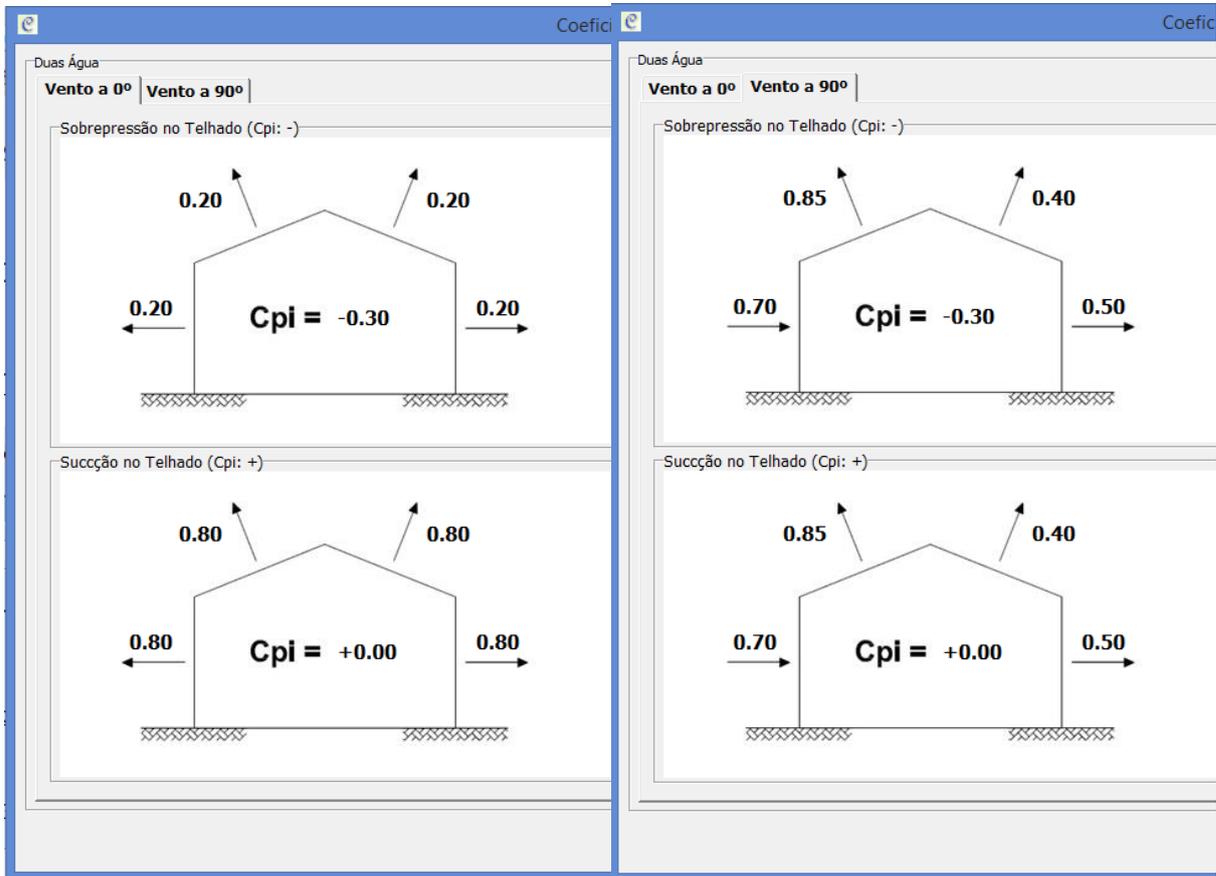
Fonte: Software Ciclone.

Figura 94: Coeficientes de forma externos do vento a 0° (à esquerda) e do vento a 90° (à direita) utilizados no projeto



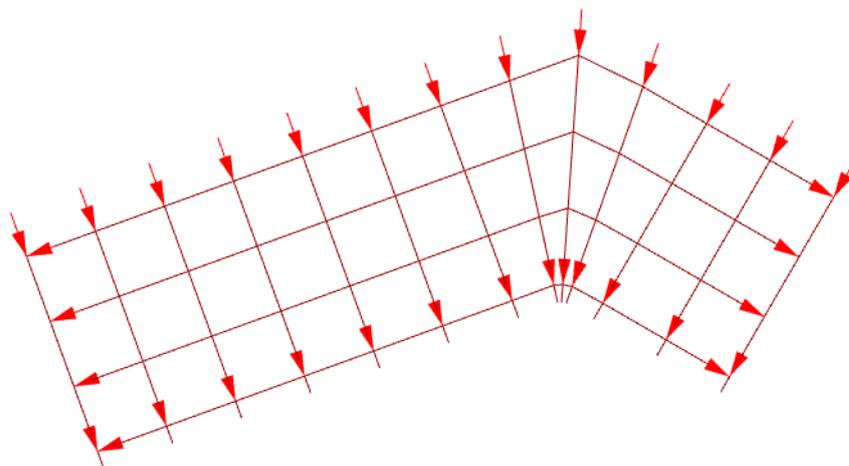
Fonte: Software Ciclone.

Figura 95: Coeficientes de forma internos do vento a 0° (à esquerda) e do vento a 90° (à direita) utilizados no projeto



Fonte: Software Ciclone.

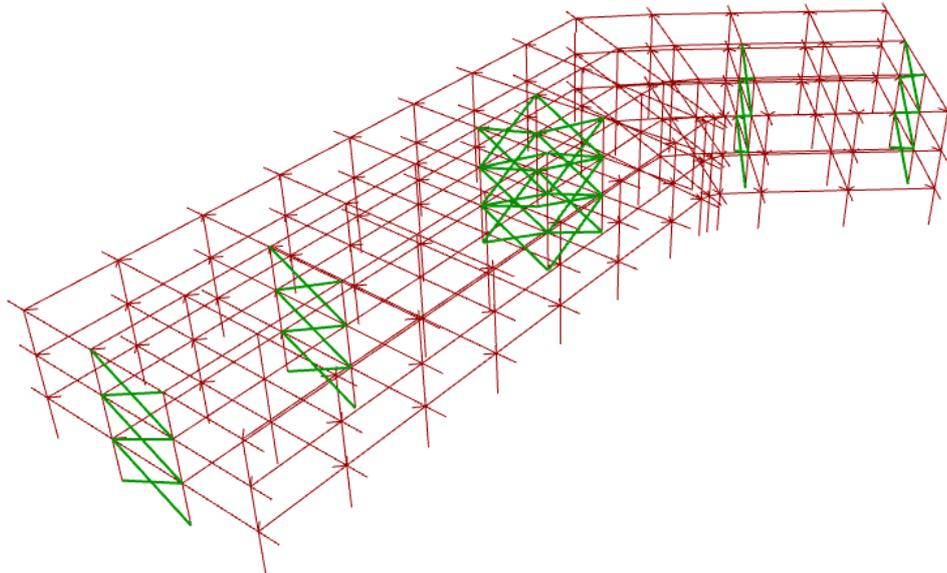
Figura 96: Esforços do vento a 90° atuando na estrutura do Bloco 2



Fonte: Imagem elaborada pelo autor.

Foram, então, estabelecidos os pontos de contraventamento conjuntamente com o arquiteto (Figura 97).

Figura 97: Contraventamentos do Bloco 2 (em verde)

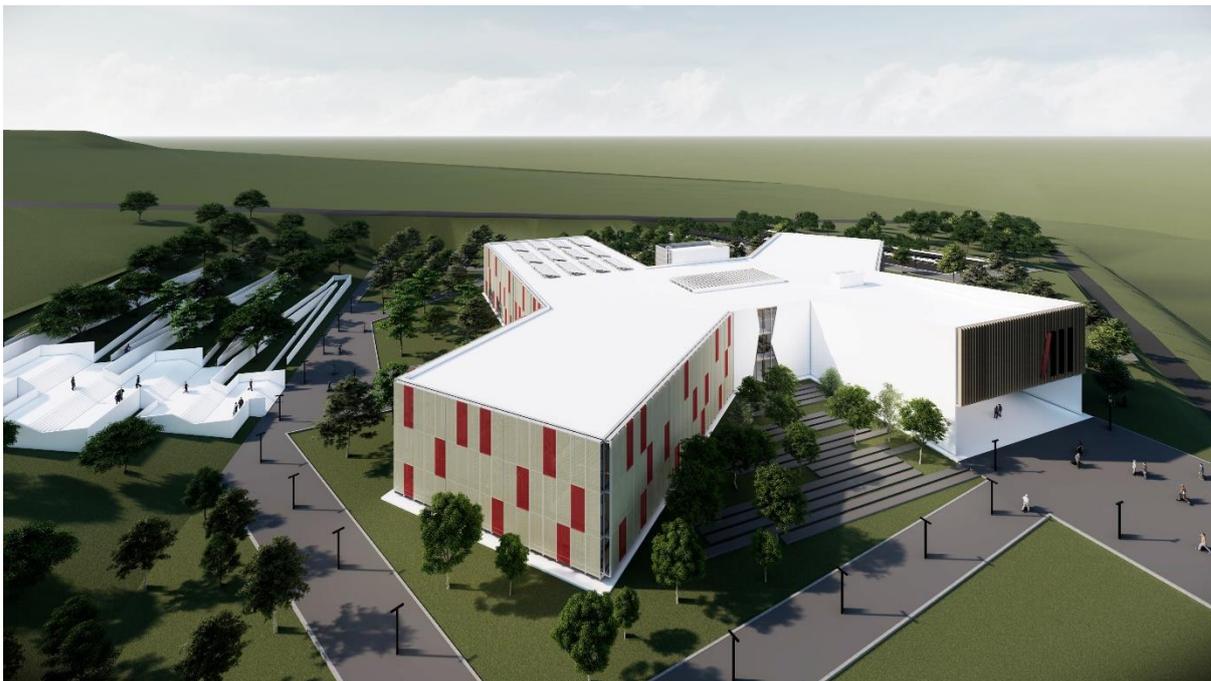


Fonte: Imagem elaborada pelo autor.

Vale frisar que o projeto contém algumas partes executadas em concreto e levou-se em consideração que tal material contribui para a estabilidade lateral da estrutura, tendo sido colocado o contraventamento de cabos do programa onde estariam localizadas as paredes estruturais. Entende-se que tal abordagem também constitui uma aproximação; entretanto, para este estudo, ela foi considerada suficiente.

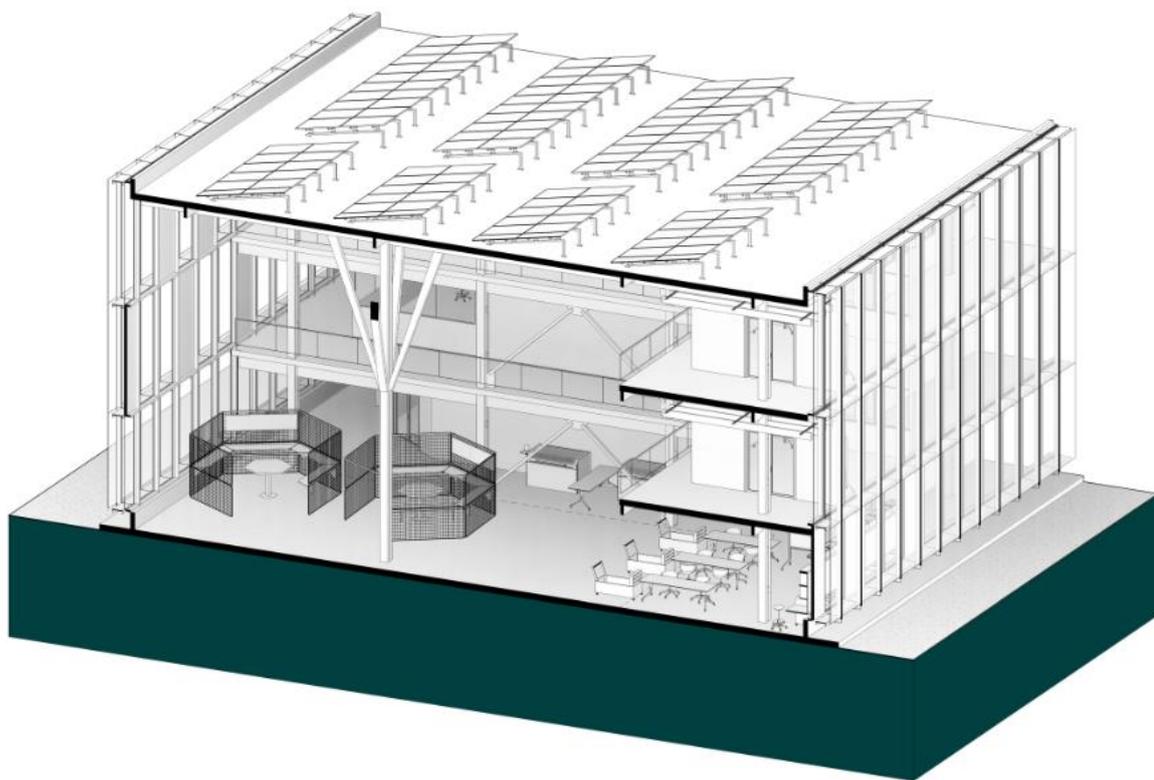
Com tais parâmetros estabelecidos, o modelo pôde então ser calculado e as dimensões dos elementos puderam ser determinadas. Os resultados das análises foram sintetizados no quadro síntese do tópico seguinte.

Figura 98: Vista geral do projeto de Henrique



Fonte: Monteiro (2019)

Figura 99: Corte transversal do projeto explicitando os contraventamentos e o pilar em árvore do mezanino

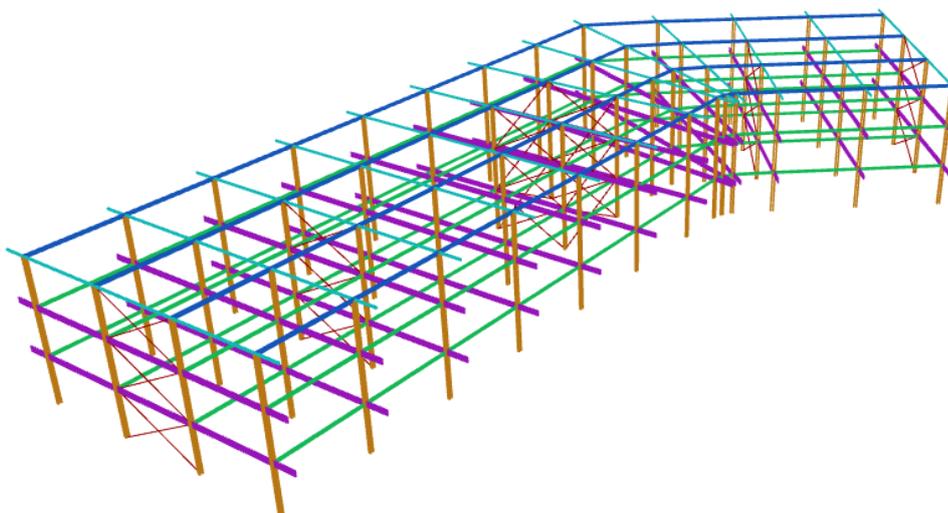


Fonte: Monteiro (2019)

10.2.3 RESULTADOS

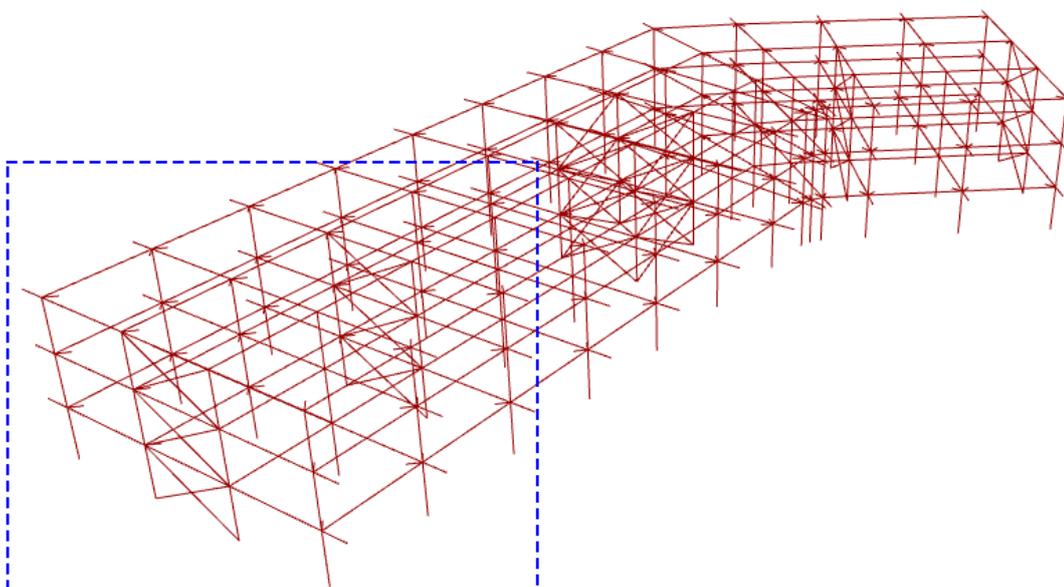
Podem ser visualizados abaixo a estrutura final com as dimensões das peças já estabelecidas e os diagramas de momento fletor, de força cortante e de força normal referentes ao caso de carga onde atua apenas a sobrecarga.

Figura 100: Estrutura Pré-Dimensionada



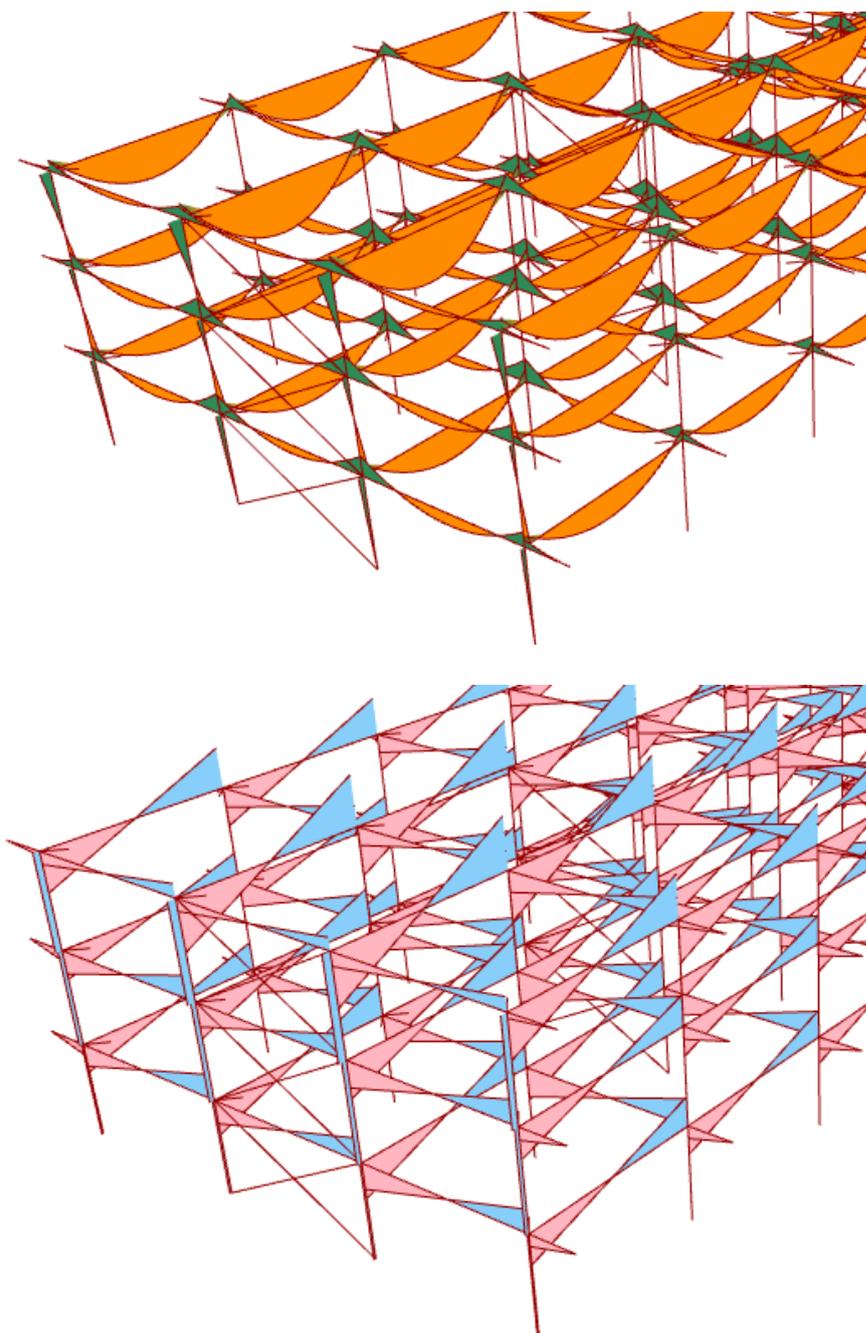
Fonte: Imagem elaborada pelo autor.

Figura 101: Indicação da parte da estrutura que corresponde aos diagramas das figuras que se seguem



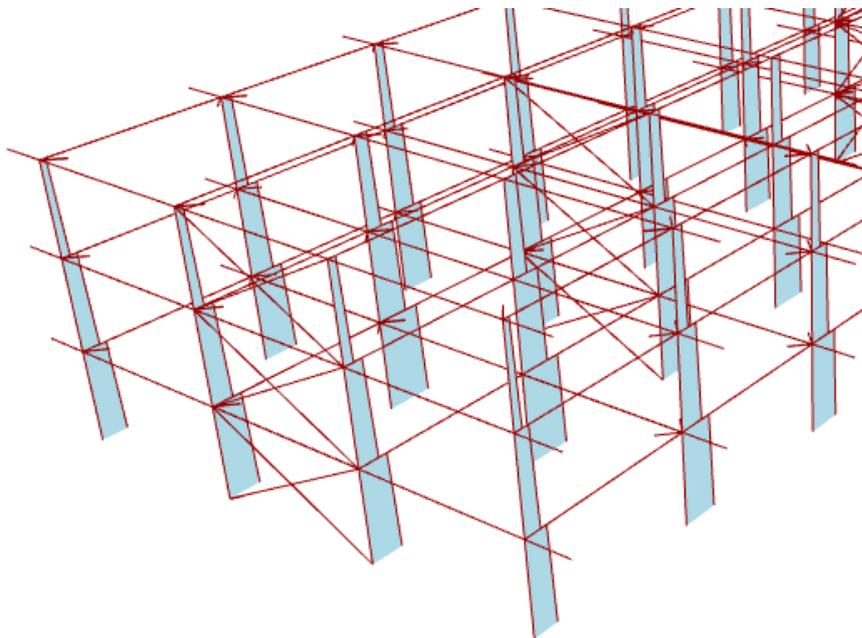
Fonte: Imagem elaborada pelo autor.

Figura 102: Diagrama de Momento Fletor (acima) e de esforço Cortante (abaixo) dos elementos especificados pela figura anterior na combinação referente ao efeito da sobrecarga



Fonte: Imagem elaborada pelo autor.

Figura 103: Diagrama de Esforço Axial dos elementos especificados na figura acima na combinação referente ao efeito da sobrecarga

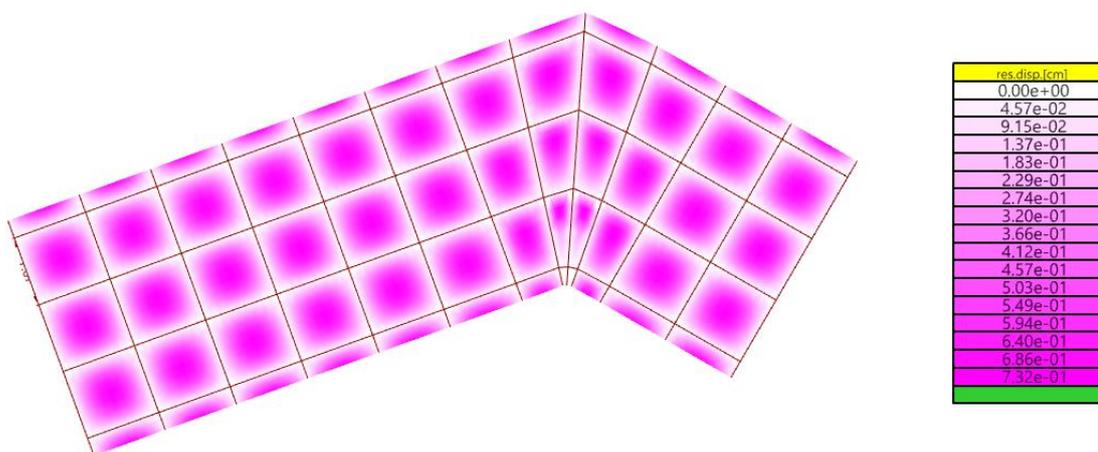


Fonte: Imagem elaborada pelo autor.

Vale ressaltar que da mesma forma que no projeto anterior, a rigidez inserida na vinculação das vigas longitudinais fez com que surgisse momento negativo nas extremidades dos elementos.

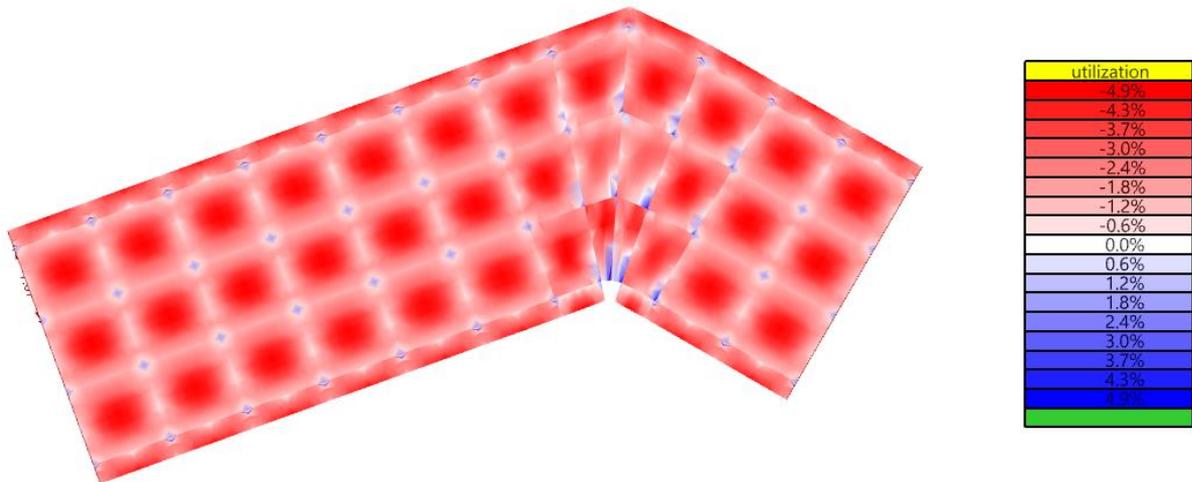
Por fim, são expostos abaixo os mapas de deslocamento das lajes de CLT para o mesmo caso de carga.

Figura 104: Mapa de deslocamentos das lajes de CLT (valores da tabela sem a fluência)



Fonte: Imagem elaborada pelo autor.

Figura 105: Vista superior do mapa de utilização das lajes de CLT (em vermelho: fibras comprimidas; em azul: fibras tracionadas)



Fonte: Imagem elaborada pelo autor.

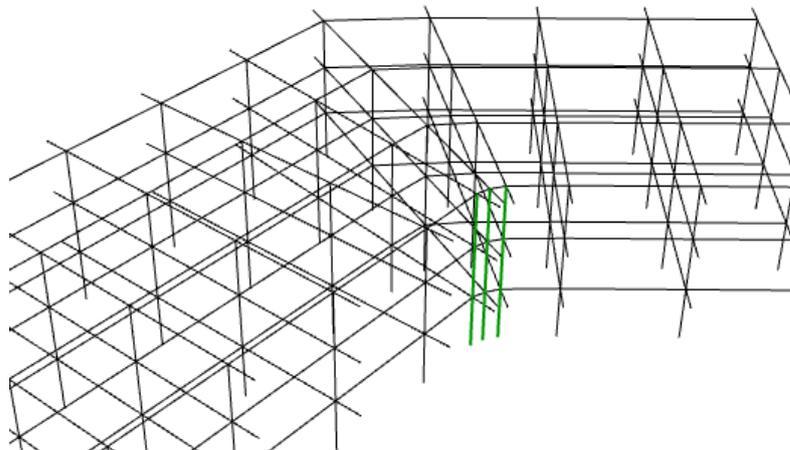
Vale observar que as lajes irregulares localizadas na mudança de direção da planta apresentaram uma distorção no mapeamento das fibras superiores comprimidas e tracionadas por conta da orientação dos eixos locais dessas placas.

Cabe a observação de que para esse projeto, foi necessário implementar no programa o cálculo de placas de CLT com 7 camadas para que pudesse ser atendida a demanda do projeto.

Além disso, neste projeto, dois pilares foram calculados separadamente. Um deles foi resultado do ângulo existente na planta, que acabou criando pilares muito próximos entre si, gerando uma situação antieconômica e problemática do ponto de vista arquitetônico (Figura 106). O outro caso se deu pela opção do estudante de arquitetura de colocar um mezanino no projeto, o que acabou isolando um pilar que ficou sustentando apenas a cobertura.

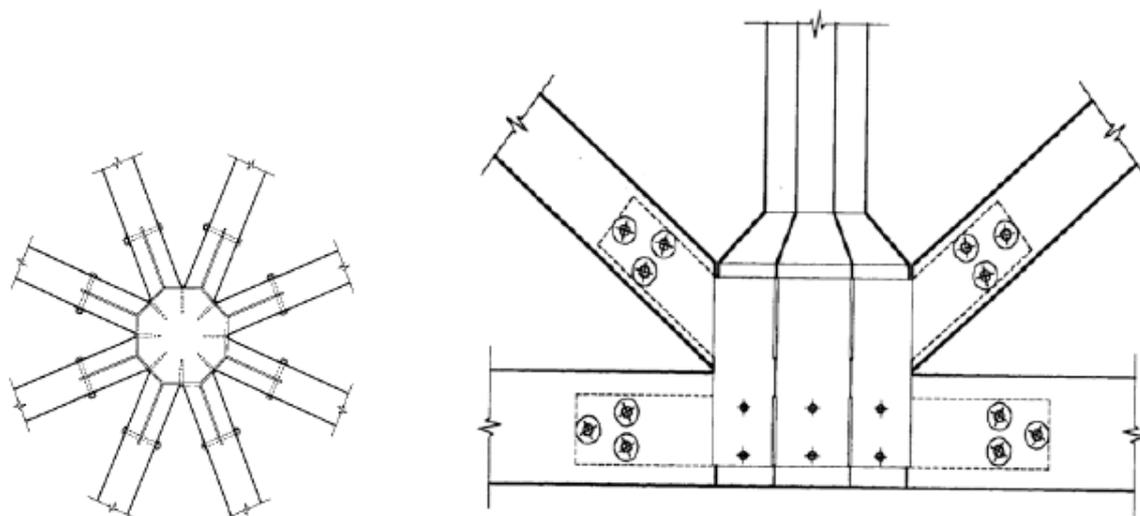
Na primeira situação, a opção para fazer o cálculo foi considerar que os pilares próximos se tornariam um único, que receberia as vigas através de uma conexão metálica feita especialmente para essa ligação, como exemplificado na Figura 107. A estratégia utilizada foi somar as reações dos elementos a serem unidos e utilizar tal valor para fazer o pré-dimensionamento.

Figura 106: Pilares muito próximos, destacados em verde



Fonte: Imagem elaborada pelo autor.

Figura 107: Exemplo de ligação a ser idealizada para o pilar que recebe as 3 vigas



Fonte: BATCHELAR, MCINTOSH, (S.D., p. 16)

Assim, como foi especificado pelo estudante de arquitetura, foi verificado um pilar com a mesma geometria e dimensões de seção dos pilares regulares.

Figura 108: Quadros resumo do cálculo do primeiro pilar especial

Dados		
b	12	cm
h	24	cm
Dimensão Longitudinal	8,2	m
Dimensão Transversal	7,7	m
$f_{c0,d}$	4,9	kN/cm ²
L_{0x}	4	m
L_{0y}	4	m
L	12	m
$f_{c0,k}$	8,17	kN/cm ²
$E_{0,05}$	709,8	kN/cm ²

Cálculos		
$N_{c,d}$	65,30	kN
Tensão Axial	0,23	kN/cm ²
Esbeltez X	57,74	
I_{tot}	89856,00	cm ⁴
Esbeltez Teórica	96,08	
Esbeltez Localizada	1,15	
Esbeltez Y efetiva	96,08	
Esbeltez Relativa x	1,97	
Esbeltez Relativa y	3,28	
k_x	2,53	
k_y	6,03	
k_{cx}	0,24	
k_{cy}	0,09	

Verificações		
Resistência	0,002	< 1
Estabilidade	0,018	< 1
Estabilidade	0,008	< 1
Esbeltez X	57,73503	< 140
Esbeltez Y	96,08383	< 140

Fonte: Imagem elaborada pelo autor.

Na segunda situação, calculou-se a combinação da carga de cobertura que foi aplicada sobre a área de influência do pilar, para que se obtivesse a força de compressão resultante para o dimensionamento. Como se admite que o pilar estaria rotulado na base, não foi considerado efeito de momento no mesmo, uma vez que eventuais forças horizontais que fossem aplicadas à cobertura fariam com que o mesmo girasse no apoio, não absorvendo esforço. Nesse caso, a questão mais crítica é a esbeltez, uma vez que o pilar teria um comprimento de 12 metros. Para isso, foi

sugerida por Henrique a elaboração de um pilar em árvore, que criaria um marco no espaço, mas que ao mesmo tempo serviria para diminuir o comprimento destravado do pilar para 8 metros (Figura 99). Assim, de forma equivalente à anterior, foi verificado um pilar com a geometria e dimensões padrão do projeto.

Figura 109: Quadros resumo do cálculo do segundo pilar especial

Dados		
b	12	cm
h	24	cm
Dimensão Longitudinal	8,2	m
Dimensão Transversal	7,7	m
H_laje	18	cm
fc0,d	4,9	kN/cm ²
L0x	8	m
L0y	8	m
L	12	m
fc0,k	8,17	kN/cm ²
E0,05	709,8	kN/cm ²

Cálculos		
Comb Sobrecarga Cobertura	2,03	kN/m ²
Nc,d	128,11	kN
Tensão Axial	0,44	kN/cm ²
Esbeltez X	115,47	
Itot	89856,00	cm ⁴
Esbeltez Teorica	96,08	
Esbeltez Localizada	2,31	
Esbeltez Y efetiva	96,10	
Esbeltez Relativa x	3,94	
Esbeltez Relativa y	3,28	
kx	8,46	
ky	6,03	
kcx	0,06	
kcy	0,09	

Verificações		
Resistência	0,008	< 1
Estabilidade	0,011	< 1
Estabilidade	0,015	< 1
Esbeltez X	115,4701	< 140
Esbeltez Y	96,10464	< 140

Fonte: Imagem elaborada pelo autor.

Finalmente, os resultados das verificações de cada bloco estão expostos nas tabelas a baixo.

Figura 110: Resultados finais da análise do Bloco 1

INPUTS		
Geometria	Balanço	2 m
	Vão Longitudinal Grid	7,5 m
	Vão Transversal Grid	7,0 m
	Pé Direito	4 m
	Número de Pavimentos	3 pav
Seção Transversal MLC	Altura Pilar	20 cm
	Base Pilar (largura de uma das peças que compõe a seção)	12 cm
	Distância entre espaçadores	100 cm
	Altura Viga Transversal	34 cm
	Base Viga Transversal	12 cm
	Altura Viga Longitudinal	36 cm
	Base Viga Longitudinal	12 cm
	Altura Viga Transversal Cobertura	17 cm
	Base Viga Transversal Cobertura	12 cm
	Altura Viga Longitudinal Cobertura	32 cm
Base Viga Longitudinal Cobertura	12 cm	
Seção Transversal CLT	Composição CLT	7 camadas
	Altura Lamela 0° CLT	3,4 cm
	Altura Lamela 90° CLT	2,2 cm
Vento	Velocidade Básica do vento	45 m/s
	Fator Topográfico	Terreno Plano
	Categoria de rugosidade do Terreno	2
	Grupo da edificação	2
Cargas	Cargas permanentes (Instalações+ Manta Impermeabilizante + Revestimento do P)	0,15
	Sobrecarga (Escolas)	3

OUTPUTS	
Máxima verificação à compressão do pilar	0,06 < 1,00
Máximo deslocamento horizontal no meio do pilar	4,46 < 8,00 mm
Máxima Esbeltez	69,3 < 140
Máxima verificação à estabilidade do pilar	0,27 < 1,00
Máximo deslocamento em vigas transversais (com fluência)	7,18 < 25,87 mm
Máximo deslocamento em vigas longitudinais (com fluência)	24,84 < 24,85 mm
Máximo deslocamento em vigas transversais de cobertura (com fluência)	5,54 < 25,87 mm
Máximo deslocamento em vigas longitudinais de cobertura (com fluência)	6,92 < 24,85 mm
Máxima verificação de tensões normais em vigas transversais	0,003 < 1,00
Máxima verificação de tensões normais em vigas longitudinais	0,002 < 1,00
Máxima verificação de tensões normais em vigas transversais de cobertura	0,006 < 1,00
Máxima verificação de tensões normais em vigas longitudinais de cobertura	0,001 < 1,00
Máxima verificação de tensões de cisalhamento em vigas transversais	0,03 < 1,00
Máxima verificação de tensões de cisalhamento em vigas longitudinais	0,05 < 1,00
Máxima verificação de tensões de cisalhamento em vigas transversais de cobertura	0,02 < 1,00
Máxima verificação de tensões de cisalhamento em vigas longitudinais de cobertura	0,03 < 1,00
Máxima verificação de momento atuante no CLT	0,15 < 1,00
Máxima verificação de cortante transversal atuante no CLT	0,12 < 1,00
Máxima verificação de esforço de Rolling Shear atuante no CLT	0,18 < 1,00
Máximo deslocamento atuante no CLT	6,54 < 18,62 mm

Fonte: Imagem elaborada pelo autor.

Figura 111: Resultados finais da análise do bloco 2

		INPUTS	
Geometria	Balanço		2 m
	Vão Longitudinal Grid		8,14 m
	Vão Transversal Grid		7,76 m
	Pé Direito		4 m
	Número de Pavimentos		3 pav
Seção Transversal MLC	Altura Pilar		24 cm
	Base Pilar (largura de uma das peças que compõe a seção)		12 cm
	Distância entre espaçadores		100 cm
	Altura Viga Transversal		47 cm
	Base Viga Transversal		12 cm
	Altura Viga Longitudinal		28 cm
	Base Viga Longitudinal		12 cm
	Altura Viga Transversal Cobertura		20 cm
	Base Viga Transversal Cobertura		12 cm
	Altura Viga Longitudinal Cobertura		32 cm
Seção Transversal CLT	Base Viga Longitudinal Cobertura		12 cm
	Composição CLT		7 camadas
	Altura Lamela 0° CLT		3,4 cm
	Altura Lamela 90° CLT		2,2 cm
Vento	Velocidade Básica do vento		45 m/s
	Fator Topográfico		Terreno Plano
	Categoria de rugosidade do Terreno		2
	Grupo da edificação		2
Cargas	Cargas permanentes (Instalações+ Manta Impermeabilizante + Revestimento do P)		0,15
	Sobrecarga (Escolas)		3

OUTPUTS	
Máxima verificação à compressão do pilar	0,01 < 1,00
Máximo deslocamento horizontal no meio do pilar	6,29 < 8,00 cm
Máxima Esbeltez	57,7 < 140
Máxima verificação à estabilidade do pilar	0,27 < 1,00
Máximo deslocamento em vigas transversais (com fluência)	5,42 < 28,30 mm
Máximo deslocamento em vigas longitudinais (com fluência)	27,29 < 27,41 mm
Máximo deslocamento em vigas transversais de cobertura (com fluência)	17,46 < 28,30 mm
Máximo deslocamento em vigas longitudinais de cobertura (com fluência)	26,68 < 27,41 mm
Máxima verificação de tensões normais em vigas transversais	0,004 < 1,00
Máxima verificação de tensões normais em vigas longitudinais	0,002 < 1,00
Máxima verificação de tensões normais em vigas transversais de cobertura	0,008 < 1,00
Máxima verificação de tensões normais em vigas longitudinais de cobertura	0,007 < 1,00
Máxima verificação de tensões de cisalhamento em vigas transversais	0,03 < 1,00
Máxima verificação de tensões de cisalhamento em vigas longitudinais	0,05 < 1,00
Máxima verificação de tensões de cisalhamento em vigas transversais de cobertura	0,01 < 1,00
Máxima verificação de tensões de cisalhamento em vigas longitudinais de cobertura	0,02 < 1,00
Máxima verificação de momento atuante no CLT	0,09 < 1,00
Máxima verificação de cortante transversal atuante no CLT	0,14 < 1,00
Máxima verificação de esforço de Rolling Shear atuante no CLT	0,20 < 1,00
Máximo deslocamento atuante no CLT	8,63 < 20,34 mm

Fonte: Imagem elaborada pelo autor.

Figura 112: Resultados finais da análise do bloco 3

		INPUTS	
Geometria	Balanço		1,7 m
	Vão Longitudinal Grid		6,85 m
	Vão Transversal Grid		4,10 m
	Pé Direito		4 m
	Número de Pavimentos		3 pav
Seção Transversal MLC	Altura Pilar		24 cm
	Base Pilar (largura de uma das peças que compõe a seção)		12 cm
	Distância entre espaçadores		100 cm
	Altura Viga Transversal		27 cm
	Base Viga Transversal		12 cm
	Altura Viga Longitudinal		30 cm
	Base Viga Longitudinal		12 cm
	Altura Viga Transversal Cobertura		20 cm
	Base Viga Transversal Cobertura		12 cm
	Altura Viga Longitudinal Cobertura		32 cm
Base Viga Longitudinal Cobertura		12 cm	
Seção Transversal CLT	Composição CLT		7 camadas
	Altura Lamela 0° CLT		3,4 cm
	Altura Lamela 90° CLT		2,2 cm
Vento	Velocidade Básica do vento		45 m/s
	Fator Topográfico	Terreno Plano	
	Categoria de rugosidade do Terreno		2
	Grupo da edificação		2
Cargas	Cargas permanentes (Instalações+ Manta Impermeabilizante + Revestimento do P)		0,15
	Sobrecarga (Escolas)		3

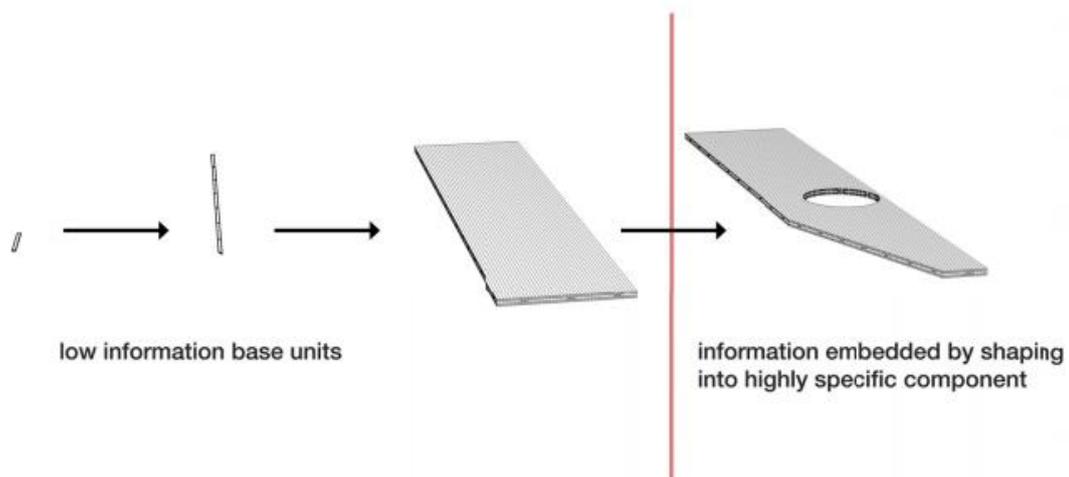
OUTPUTS	
Máxima verificação à compressão do pilar	0,004 < 1,00
Máximo deslocamento horizontal no meio do pilar	2,8 < 8,00 mm
Máxima Esbeltez	57,7 < 140
Máxima verificação à estabilidade do pilar	0,17 < 1,00
Máximo deslocamento em vigas transversais (com fluência)	2,53 < 13,67 mm
Máximo deslocamento em vigas longitudinais (com fluência)	18,30 < 22,83 mm
Máximo deslocamento em vigas transversais de cobertura (com fluência)	1,45 < 13,67 mm
Máximo deslocamento em vigas longitudinais de cobertura (com fluência)	13,59 < 22,83 mm
Máxima verificação de tensões normais em vigas transversais	0,002 < 1,00
Máxima verificação de tensões normais em vigas longitudinais	0,004 < 1,00
Máxima verificação de tensões normais em vigas transversais de cobertura	0,0004 < 1,00
Máxima verificação de tensões normais em vigas longitudinais de cobertura	0,002 < 1,00
Máxima verificação de tensões de cisalhamento em vigas transversais	0,02 < 1,00
Máxima verificação de tensões de cisalhamento em vigas longitudinais	0,04 < 1,00
Máxima verificação de tensões de cisalhamento em vigas transversais de cobertura	0,01 < 1,00
Máxima verificação de tensões de cisalhamento em vigas longitudinais de cobertura	0,02 < 1,00
Máxima verificação de momento atuante no CLT	0,10 < 1,00
Máxima verificação de cortante transversal atuante no CLT	0,03 < 1,00
Máxima verificação de esforço de Rolling Shear atuante no CLT	0,04 < 1,00
Máximo deslocamento atuante no CLT	5,85 < 17,13 mm

Fonte: Imagem elaborada pelo autor.

10.3 CONSIDERAÇÃO SOBRE A FABRICAÇÃO

Diferentemente do caso de Bárbara, a concepção do projeto do Henrique exigiu a criação de lajes de CLT bastante específicas próximo da angulação da planta dos blocos irregulares. Segundo Whalen (2013, p. 13), a usinagem de um painel acabado de CLT exige a incorporação de mais informação ao processo. No processo de projeto, tal informação é gerada digitalmente através dos softwares de modelagem utilizados e pode ser aplicada para guiar a forma das peças acabadas. Então, através do uso de equipamentos de fresagem por controle numérico (CNC), essa informação digital torna-se física e é incorporada em um produto final específico e bem-acabado, resultando em uma placa que foi projetada e produzida para um uso específico, e que possui uma localização exata na montagem da uma estrutura. Assim, de acordo com o autor, o elemento de CLT repleto de informação é fabricado em escala industrial, mas, ao contrário dos itens produzidos em massa, ele representa um produto completamente personalizado.

Figura 113: Processo de aquisição de informação na fabricação do CLT



Information embedding in current CLT fabrication processes

Fonte: WHALEN, 2013, p. 13.

Dessa forma, como já explicitado no início do trabalho, o design paramétrico fornece informações mais detalhadas que podem ser incorporadas ao sistema de produção através da CNC, mantendo a escala industrial e tornando o processo de fabricação das lajes específicas do projeto completamente prático e viável.

Figura 114: Produção industrial de uma parede de CLT customizada para uso específico



Fonte: <https://www.cltcrosslaminatedtimber.com.au/clt/efficiency>

10.4 CONSIDERAÇÕES SOBRE O CONTRAVENTAMENTO

No processo colaborativo de projeto, a definição de diversos fatores adotados tais como as dimensões do grid e as verificações das peças foram realizadas em conjunto com o arquiteto. O processo da escolha dos planos de contraventamento se deu da mesma forma. Entretanto, como o desenvolvimento do código se deu paralelamente ao desenvolvimento do projeto arquitetônico, houve uma discrepância com relação ao tipo de contraventamento adotado no projeto (peças de madeira “em k”) e o tipo de contraventamento considerado no cálculo (cabos metálicos cruzantes “em x”). Apesar dos planos contraventados serem os mesmos, entende-se que as peças de madeira deveriam ser verificadas e substituídas no modelo para uma reavaliação do comportamento da estrutura.

11 CONCLUSÃO

A iminente difusão de novos sistemas produtivos, aliada ao desenvolvimento de softwares avançados e das ferramentas de fabricação digital, possibilita novas oportunidades de conectar as áreas de engenharia e de arquitetura no mundo contemporâneo, colocando em perspectiva o modelo tradicionalmente consolidado. Lógicas mais atuais, como a busca pela sustentabilidade e a eficiência do processo construtivo, vêm ganhando força na área da construção e criando novas demandas que exigem novas estratégias, novos materiais e novos processos.

Nesse sentido, o projeto paramétrico surge como uma reação a tais questionamentos, buscando ampliar o leque de possibilidades de projeto e garantir maior controle e dinamicidade aos engenheiros e arquitetos. Ele também propõe uma lógica de processo que integra muito mais as áreas de conhecimento e que exige uma visão multidisciplinar dos profissionais, garantindo uma maior qualidade de projeto.

Com relação ao processo de projeto colaborativo desenvolvido, foi percebido que a atuação conjunta entre engenheiros e arquitetos evita que sejam gerados diversos problemas futuros no projeto. Ao longo desse processo, foram testadas e discutidas alternativas que ponderassem as principais questões envolvendo ambas as áreas de conhecimento. Entretanto, a delonga tomada no desenvolvimento do código, que ocorreu paralelamente ao desenvolvimento dos projetos, acabou defasando partes do processo, que se resultou na diferença dos tipos de contraventamento utilizado no projeto e utilizado para o cálculo, conforme citado no item 10.4 deste trabalho. Mesmo assim, é seguro afirmar que o processo de projeto colaborativo desenvolvido ao longo deste trabalho resultou em uma experiência bastante rica em termos de aprendizado e de interdisciplinaridade.

Com relação ao programa desenvolvido, pôde-se aferir que o código implementado foi de grande valia, uma vez que serviu de ponte para que o processo de projeto colaborativo pudesse ser desenvolvido com certa dinamicidade. A sua utilização permitiu uma resposta direta dos resultados possibilitando uma eficiência bastante relevante em termos de tomada de decisões. Nesse sentido, vale retomar a importância de se ter modelado as lajes de CLT separado do modelo de vigas e pilares que deixou o modelo mais leve e permitiu tal dinâmica. Outro ponto positivo observado que vale ser recuperado é a não dependência de um tipo específico de planta

arquitetônica, que possibilitou a mudança quase que absoluta de concepção dos arquitetos sem que isso comprometesse a utilização do programa, tendo sido feitas pequenas modificações nele ao longo processo.

Complementarmente, cabe retomar que as ligações metálicas não foram calculadas, sendo cabível imaginar um processo paramétrico para tal procedimento, uma vez que os tipos de ligação foram padronizados. Dessa forma, além de poder criar um modelo de cada ligação para cada nó a depender dos esforços, o programa conseguiria calcular os deslocamentos e a distribuição de esforços de forma mais realista ao se levar em conta o número de pinos na lingueta de cada uma das chapas. Além disso, outro tópico interessante que não foi explorado neste trabalho é a utilização de algoritmos genéticos para otimização da estrutura. Tal ferramenta, presente no Grasshopper, pode “procurar” a melhor combinação de determinados parâmetros de forma a diminuir o gasto com material e aumentar a eficiência da estrutura. Os parâmetros a serem otimizados pela ferramenta poderiam abarcar simultaneamente critérios de cunho estrutural, como limitação das verificações de resistência das peças, e critérios de cunho arquitetônico, como nível de iluminação e de ventilação do projeto.

Outro apontamento importante é que, devido à grande quantidade de considerações e verificações realizadas, os resultados se aproximam dos admitidos em um projeto estrutural. Nesse sentido, vale observar que a utilização do projeto paramétrico em conjunto com a proposta de projeto colaborativo fez com que a etapa de pré-dimensionamento da estrutura não fosse necessária. Entretanto, o programa não dispensa uma análise estrutural mais aprofundada que considere as especificidades dos edifícios, uma análise de simulação de vento e a verificação da frequência natural da estrutura (fator crítico em construções em madeira que pode representar mais limitações que o próprio ELS).

Por fim, é possível perceber que essa imensa gama de inovações no campo da construção que está tomando corpo e ganhando espaço nas obras contemporâneas, possibilita a crescente superação de desafios na área. Isso garante não apenas a qualidade de projetos cada vez mais complexos, mas também sua concepção, sua produção e sua execução, apontando para um cenário em que a tecnologia seja cada vez mais incorporada ao setor e em que as decisões relativas

à estrutura sejam cada vez mais definidas no início do processo de projeto, e de maneira integrada às decisões arquitetônicas.

REFERÊNCIAS

AMERICAN NATIONAL STANDARD INSTITUTE. **Standard for Performance-Rated Cross-Laminated Timber**. Tacoma: APA, 2018.

ANUMBA, C; EVBUOMWAN, N. An integrated framework for concurrent life-cycle design and construction. **Advances in Engineering Software**. N. 7, v. 29, 1998. Pp. 587-597.

ARUP. **Designing with timber**. [s.l.]: [s.d.].

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6123**: Forças Devido ao Vento em Edificações. Rio de Janeiro, 1988.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6120**: Cargas para o cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro, 1990.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8681**: Ações e segurança nas estruturas – Procedimento. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8800**: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190**: Projetos de Estrutura em Madeira (2º PN Revisão). Rio de Janeiro, 2013.

BATCHELAR, M; MCINTOSH, K. Structural Joints in Glulam. **NZ Timber Design Journal**, Issue 4, Vol. 7. Auckland, 2018.

BOUCHAIR, A; RACHER, P; BOCQUET, J. Analysis of dowelled timber to timber moment-resisting joints. **Materials and Structures**, vol. 40, 2007. Pp. 1128-1141.

BOWYER et al. Modern Tall Wood Buildings: Opportunities for Innovation. [s.l.], 2017.

CHING, F; ONOUYE, B; ZUBERBUHLER, D. Sistemas Estruturais Ilustrados. Porto Alegre: Bookman, 2010.

DAVALOS, J. *et al.* Transverse Isotropy Modeling of 3-D Glulam Timber Beams. **Journal of Materials in Civil Engineering**. Vol. 3, No. 2, 1991.

EN. Eurocode 5: Design of timber structures. Bruxelas: [s.n.], 2008

FAIRWEATHER, R. **Beam Column Connections for Multi-storey Timber Buildings**. Tese de Mestrado – University of Canterbury, Canterbury, 1992.

FAST, P et al. Case study: an 18 storey tall mass timber hybrid student residence at the University of British Columbia, Vancouver. Word Conference on Timber Engineering, 2016.

FAUGSTAD, H; ROGNES, Ø. **Digital Workflow in Conceptual Structural Design**. Tese de Mestrado – Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, 2008.

FOREST PRODUCTS LABORATORY. Wood handbook—Wood as an engineering material. [s.l.]: [s.n.], 2010

GAGNON, S; PIRVU, C. (Org.) **Introduction to Cross-Laminated Timber**. Québec: [s.n.], 2012.

GAGNON, S. *et al.* **Introduction to Cross-Laminated Timber**. In: KARACABEYLI, E; DOUGLAS, B. (Ed.). **CLT Handbook: Cross-Laminated Timber U.S.** Leesburg: AWC, 2013. p. 3-45.

HARRIS, R.; RINGHOFER, A.; SCHICKHOFER, G. (Org.) **Focus Solid Timber Solutions** – European Conference on Cross Laminated Timber (CLT). Áustria: Grz University of Technology, 2013.

JESKA, S.; PASCHA, K. **Emergent Timber Technologies: materials structures engineering projects**. Basel: Birkhäuser, 2015.

KLH. **Catálogo do fabricante**. Versão 1, 2008.

KOLAREVIC, B. **Architecture in the digital age: design and manufacturing**. Nova York: Spon Press, 2003.

KREUZINGER, H.; MESTEK, P.; WINTER, S. **Design of Cross Laminated Timber (CLT)**. [s.l.]: [s.d.].

LAM, F *et al.* Moment resistance of bolted timber connections with perpendicular to grain reinforcements. **World Conference on Timber Engineering**. Myazaki, 2008.

LEACH, N.; YUAN, P. **Scripting the future**. Xangai: Tonghi University Press, 2012.

LEICHTI, R. *et al.* **The Continuum of Connection Rigidity in Timber Structures**. Brisbane: The University of Queensland, 1999.

LESKO, A. Modern moment resisting timber connections – theory and numerical modelling. Zilina: **XXV Polish-Russian-Slovak Seminar “Theoretical Foundation of Civil Engineering”**, 2016.

MONIZZA, G; RAUCH, E; MATT, D. **Parametric and Generative Design Techniques for Mass-Customization in Building Industry: A Case Study for Glued-Laminated Timber**. Bolzano: University of Bozen-Bolzano, 2017.

NOGUEIRA, R. Estudo do comportamento de ligação viga-pilar de madeira lamelada colada por meio de perfil T de alumínio. Tese de doutorado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos: 2019.

OXMAN, R; OXMAN, R. **The New Structuralism: Design, Engineering and Architectural Technologies**. United Kingdom: John Wiley & Sons Ltd, 2010.

PFEIL, M.; PFEIL, W. **Estruturas de madeira**. Rio de Janeiro: LTC, 2003.

PORTEOUS, J; KERMANI, A. **Structural Timber Design to Eurocode 5**. Hoboken, EUA: Wiley-Blackwell, 2007.

PRESINGER, C. Linking Structure and Parametric Geometry. **Architectural Design**, vol. 83, 2013. Pp. 110-113.

PREISINGER, C. **Karamba 3D: Parametric Engineering**. User Manual Version 1.3.1, 2018.

RAJA, N; KHALFAN, M. Improving Construction Process through Integration and Concurrent Engineering. *Australasian Journal of Construction Economics and Building*. [s.l.], 2012.

RETHINK WOOD. **Mass Timber in North America** – Educational Advertisement. [s.d.]

REWOOD. **Caderno de Detalhes Construtivos (Rewood)**. Taboão da Serra: publicação digital, 2019.

SANTANA, C. **Análise não-linear de porticos planos de madeira com ligações semi-rígidas**. Tese de doutorado – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2002.

SILVA, F. T. da. Automatic Structural Preliminary Design of a 3d Concrete Frame by Numerical Parametric Structural Modeling. **Brazilian-German Conference**, Campinas, 2016.

SILVA, F. 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**, v. 18, n. 1. Porto Alegre, 2018. Pp. 193-210.

TAYLOR, M. **Mass Timber Methods**. [s.l.]: [s.n.], 2017

TEDESCHI, A. **AAD Algorithms-Aided Design**: parametric strategies using Grasshopper. Brienza, Itália: Le Penseur, 2014.

VALENTE, J. **O Processo Colaborativo entre Engenheiros de Estruturas e Arquitetos na Concepção e Análise de Estruturas Paramétricas**. Trabalho final de graduação – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2018.

WALLNER-NOVAK, M; KOPPELHUBER, J; POCK, K. Analysis and structural design of timber structures. Austria: [s.n.], 2014

WAUGH THISTLETON ARCHITECTS. **100 Projects UK CLT**. Canadá: [s.n.], 2018.