

Universidade Estadual de Campinas
Faculdade de Engenharia Civil Arquitetura e Urbanismo

Thiago Mendes Pinheiro

**Projeto de estrutura em madeira utilizando a NBR
7190/1997**

Campinas
2023

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

Thiago Mendes Pinheiro

**Projeto de estrutura em madeira utilizando a NBR
7190/1997**

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.

Orientador(a): Prof. Dr. Nilson Tadeu Mascia

Campinas
2023

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

P655p Pinheiro, Thiago Mendes, 2001-
Projeto de estrutura em madeira utilizando a NBR 7190/1997 / Thiago Mendes
Pinheiro. – Campinas, SP : [s.n.], 2023.

Orientador: Nilson Tadeu Mascia.
Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo.

1. Madeira. 2. NBR 7190/1997. 3. Construção de madeira. 4. Projeto. I.
Mascia, Nilson Tadeu, 1956-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade
de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. III. Título.

Informações adicionais, complementares

Título em outro idioma: Design of wood structure using NBR 7190/1997

Palavras-chave em inglês:

Wood

NBR 7190/1997

Wood construction

Design

Titulação: Bacharel em Engenharia Civil

Banca examinadora:

Saulo José de Castro Almeida

Thomaz Eduardo Teixeira Buttignol

Data de entrega do trabalho definitivo: 26-06-2023

DEDICATORIA

A Deus. Aos meus pais. Ao meu orientador. Aos meus irmãos. Aos meus avós.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pelo dom da vida e por todas as experiências de vida.

Agradeço aos meus pais, por todo apoio e suporte incondicional durante esta jornada árdua, superando adversidades e estando sempre ao meu lado, mesmo em outra cidade.

Agradeço aos meus irmãos, pelo suporte financeiro e parceria ao longo da faculdade.

Agradeço aos meus avós, por todo carinho, amor e cuidado.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Nilson Tadeu Mascia, por todo o conhecimento fornecido ao longo da graduação, pela orientação na minha Iniciação Científica e principalmente, pela orientação neste TFC.

Agradeço ao meu grupo de estudos, pela convivência, momentos de diversão e lazer, estudos e projetos que influenciaram positiva e significativamente para minha formação acadêmica.

Agradeço aos meus colegas do pensionato, pela convivência, companhia e apoio.

RESUMO

Este trabalho tem significativa importância por apresentar o cálculo de um projeto em estrutura de madeira utilizando a NBR 7190/1997, expondo como se dá o cálculo de projeto de madeira e expondo na teoria a revisão pela qual a norma passou após 25 anos. O objetivo desta pesquisa é mostrar um embasamento teórico contendo a história da madeira na construção civil e todas as técnicas construtivas utilizadas ao longo do tempo, além de demonstrar todo o processo de cálculo de uma estrutura em madeira (vigas e pilares) utilizando madeira engenheirada (MLC e CLT). A metodologia do projeto consistiu na busca de dados e informações sobre a história da madeira em bases de dados renomadas (Web of Science e Scopus) e na sua seguinte seleção dos melhores artigos que se adequavam ao tema, e com os artigos selecionados, foi realizado um estudo histórico sobre as técnicas construtivas de madeira, e suas vantagens, e como cada técnica buscou evoluir e desenvolver o uso do material. Para a segunda parte do trabalho, será utilizado um pórtico com vigas e pilares de MLC, onde serão dimensionados com a norma antiga, e terão seus valores comparados a fim de obter o melhor tipo de madeira para o projeto. Com a parte teórica apresentada e o projeto dimensionado, a última seção deste trabalho será dedicada a expor sinteticamente as atualizações na nova versão da NBR 7190 quanto a um projeto de cálculo estrutural em madeira.

Palavras-chave: MLC, CLT, NBR 7190, madeira, cálculo.

ABSTRACT

This work has significant importance because it presents the calculation of a project in timber structure using the NBR 7190/1997, showing how the calculation of the timber project happens and showing in theory the revision that the standard went through after 25 years. The objective of this research is to show a theoretical background containing the history of wood in civil construction and all the construction techniques used over time, besides demonstrating the entire calculation process of a wood structure (beams and columns) using engineered wood (GLT and CLT). The methodology of the project consisted in searching data and information about the history of wood in renowned databases (Web of Science and Scopus) and in its following selection of the best articles that fit the theme, and with the selected articles, a historical study was carried out about the wood constructive techniques, and their advantages, and how each technique sought to evolve and develop the use of the material. For the second part of the work, a frame with GLT beams and columns will be used, where they will be dimensioned with the old standard, and will have their values compared in order to obtain the best type of wood for the project. With the theoretical part presented and the project dimensioned, the last section of this work will be dedicated to briefly present the updates of the new version of NBR 7190 regarding a wood structural calculation project.

Keywords: GLT, CLT, NBR 7190, wood, calculation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Diferenças entre as 3 principais direções de corte da madeira	11
Figura 2: Primeiras estruturas usando troncos (eram cobertas com folhas)	15
Figura 3: Casas de troncos.....	16
Figura 4: À esquerda, esqueleto de madeira. À direita, pau-a-pique.....	17
Figura 5: Casa de pau-a-pique.....	17
Figura 6: Parede feita em heavy wood frame.....	18
Figura 7: Esqueleto de estrutura de uma casa em heavy wood frame.....	19
Figura 8: Ballon Frame.....	20
Figura 9: Platform Frame.....	21
Figura 10: Vigas joists.....	22
Figura 11: Peça feita em MLC.....	24
Figura 12: Produção de pilar em MLC.....	24
Figura 13: Peça feita em LVL.....	25
Figura 14: Museu de Arte Latino-americana em construção.....	26
Figura 15: Vista aérea do Ascent.....	26
Figura 16: Área interna do Ascent.....	27
Figura 17: Fábrica Rewood.....	28
Figura 18: Painel na prensa.....	29
Figura 19: Painel com stain e borracha líquida.....	30
Figura 20: Várias peças feitas em CLT.....	31
Figura 21: Produção de painel em CLT.....	31
Figura 22: Vista aérea do Brock Commons.....	32
Figura 23: Vista externa do Mjøstårnet.....	33
Figura 24: Projeto do Edifício Amata em São Paulo.....	34
Figura 25: Processo de usinagem.....	36
Figura 26: Encaixe para içamento.....	37
Figura 27: Estrutura do pórtico (viga+pilar)	38
Figura 28: Áreas de influência.....	41
Figura 29: Forças permanentes aplicadas na viga principal.....	45
Figura 30: Forças do vento de sobrepressão aplicadas na viga principal.....	45
Figura 31: Forças do vento de sucção aplicadas na viga principal.....	45

Figura 32: Diagrama de normal devido às cargas permanentes.....	47
Figura 33: Diagrama de normal devido ao vento de sobrepressão.....	48
Figura 34: Diagrama de normal devido ao vento de sucção.....	48
Figura 35: Diagrama de momento fletor devido às cargas permanentes.....	48
Figura 36: Diagrama de momento fletor devido ao vento de sobrepressão.....	49
Figura 37: Diagrama de momento fletor devido ao vento de sucção.....	49
Figura 38: Forças permanentes aplicadas na viga principal com nova seção.....	51
Figura 39: Diagrama de normal com nova seção devido às cargas permanentes.....	52
Figura 40: Diag. de momento fletor com nova seção devido às cargas permanentes.	52
Figura 41: Diagrama de cortante com nova seção devido às cargas permanentes....	56
Figura 42: Diagrama de cortante com nova seção devido ao vento de sobrepressão.	56
Figura 43: Diagrama de cortante com nova seção devido ao vento de sucção.....	57
Figura 44: Deslocamento vertical máximo da viga devido às cargas permanentes....	59
Figura 45: Estrutura do pilar.....	60
Figura 46: Forças permanentes aplicadas na viga principal.....	73
Figura 47: Diagrama de normal na viga principal devido às cargas permanentes.....	74
Figura 48: Diag. de momento fletor na viga principal devido às cargas permanentes.	74
Figura 49: Forças permanentes aplicadas na viga principal com nova seção.....	76
Figura 50: Diagrama de normal com nova seção devido às cargas permanentes.....	77
Figura 51: Diag. de momento fletor com nova seção devido às cargas permanentes.	77
Figura 52: Diagrama de cortante com nova seção devido às cargas permanentes....	81
Figura 53: Deslocamento vertical máximo da viga devido às cargas permanentes....	82

SUMÁRIO

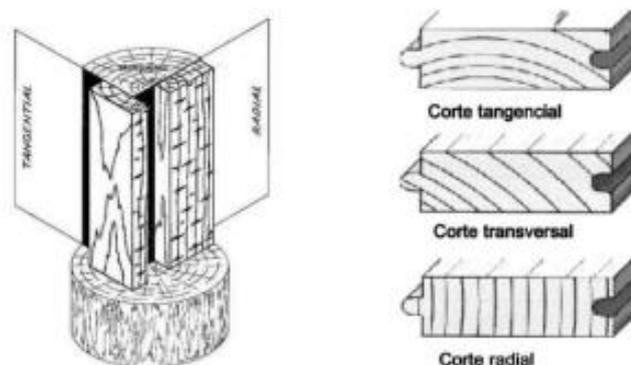
1. INTRODUÇÃO.....	11
1.1. JUSTIFICATIVA.....	11
1.2. OBJETIVOS.....	12
1.2.1. Objetivos Específicos.....	13
2. METODOLOGIA.....	14
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	15
3.1. CONSTRUÇÕES EM MADEIRA.....	15
3.1.1. Casas de troncos (entre 12000 a.C. e 4000 a.C.)	15
3.1.2. Pau-a-Pique ou Taipa (séc. XVII)	16
3.1.3. Enxaimel/Heavy Wood Frame (séc. XIX)	18
3.1.4. Light Wood Frame (séc. XIX)	19
3.1.4.1. Ballon Frame.....	20
3.1.4.2. Platform Frame.....	20
3.1.4.3. OSB.....	21
3.1.4.4. Empresas no Brasil.....	22
3.2. CONSTRUÇÕES EM MADEIRA ENGENHEIRADA (MLC E CLT)	23
3.2.1. Madeira Lamelada Colada (MLC) (séc. XX)	23
3.2.1.1. Rewood.....	27
3.2.2. Madeira Lamelada Cruzada (CLT) (fim do séc. XX)	30
3.2.2.1. Brasil.....	33
3.2.2.2. Crosslam.....	35
4. PROJETO DE CÁLCULO.....	38
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	91
6. NBR 7190/2022.....	93
7. CONCLUSÃO.....	95
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	97

1. INTRODUÇÃO

Desde os primórdios da humanidade, a madeira tem sido utilizada como material essencial para a construção, como por exemplo, o emprego de troncos amarrados com cordas a fim de construir-se paredes.

A madeira em si é um material que apresenta diversas e excelentes vantagens como a boa resistência e baixa densidade, porém, apresenta desvantagens devido a sua origem natural, como a anisotropia, e segundo SOUTO; BUENO; SILVA, 2016, a madeira, caso não tratada adequadamente com produtos preservantes, pode se deteriorar rapidamente sendo consumida por organismos vivos, como cupins e fungos apodrecedores. Apesar desses aspectos, existem produtos que podem ser utilizados na estrutura, de forma a combater esses organismos vivos e proporcionar uma vida útil competitiva com outras matérias usuais de construção.

Figura 1 – Diferenças entre as 3 principais direções de corte da madeira



Fonte: SANTOS, 2018

Com isso, essa pesquisa visa apresentar a história da madeira no cenário da construção civil expondo todas as técnicas construtivas utilizadas pelo ser humano, desde as técnicas com madeira serrada até às técnicas mais evoluídas com madeira engenheirada e alta tecnologia, como o MLC e CLT.

1.1. JUSTIFICATIVA

Após 25 anos, a NBR 7190 – “Projeto de estruturas de madeira” foi revisada e atualizada apresentando novos valores para certos coeficientes e novas considerações acerca de detalhes de projeto.

Com isso, será apresentado um projeto de uma estrutura de madeira com

vigas e pilares em MLC utilizando a NBR 7190/1997, para 2 tipos de madeira, a fim de apresentar a gama completa de como se dá o processo de cálculo e seus diferentes valores. Após isso, serão expostas em um apêndice, as atualizações da norma nova, a fim mostrar quais mudanças ocorreram.

Vale ressaltar que esse trabalho é um reaproveitamento de um projeto feito em 2021, com isso, foi produzido com base na norma antiga, porém, para não distar muito da realidade, o processo de cálculo para vigas e pilares pela NBR 7190/2022 será explicado na teoria.

Por fim, este trabalho se justifica por apresentar o processo de cálculo de uma estrutura em madeira, comparando os valores finais das seções, além de apresentar uma simulação da cobertura, com uso de valores como carga permanente e acidental na seção de vigas, e também, destacar as principais atualizações trazidas pela nova norma.

1.2. OBJETIVOS

Um dos objetivos desse TFC é apresentar um embasamento sobre como o uso da madeira na construção civil passou por modificações significativas e de que forma essas novas técnicas mais aprimoradas e desenvolvidas vem ganhando espaço no setor construtivo mundial, através de um estudo histórico sobre os sistemas estruturais em madeira.

Além do embasamento, serão apresentados pontos significativos da norma antiga necessários para o cálculo de um projeto estrutural utilizando madeira, bem como, mudanças e atualizações que essa nova norma apresenta em relação à anterior.

O principal objetivo do trabalho é expor todo o processo e memorial de cálculo de um projeto estrutural utilizando a madeira como material principal de construção, através do cálculo de vigas e pilares em MLC, considerando 2 tipos de madeira, a fim de compará-las para o projeto em questão. Vale ressaltar que será realizado dentro da seção de vigas, o cálculo de peso e ações permanentes e acidentais (simulando a presença da cobertura).

1.2.1. Objetivos Específicos:

- Calcular vigas e pilares para diferentes tipos de madeira (*Pinus* e *Eucalyptus*);
- Comparar os valores de cálculo de vigas e pilares obtidos com a NBR 7190/1997;
- Discutir sobre qual o melhor tipo de madeira para o projeto em questão;
- Apresentar atualizações contidas na NBR 7190/2022.

2. METODOLOGIA

O primeiro passo para a elaboração dessa pesquisa foi a busca de informações para a fundamentação teórica, na base de dados Web of Science, pelo site <https://apps.webofknowledge.com/>; e na base Scopus, pelo site <https://www.scopus.com/>, além de outras plataformas, bibliotecas etc. Para a coleta de informações, foram utilizadas as “strings” de busca: “timber construction history” (história da construção de madeira), “wooden structural systems” (sistemas estruturais em madeira) e “buildings AND CLT” (construções E CLT), a fim de obter um bom número de artigos como pré-seleção; além de pesquisas em algumas fontes da internet a fim de obter informações mais pontuais sobre o tema.

Dos artigos selecionados, aqueles com mais citações tiveram os resumos avaliados de forma que um grupo mais seletivo seja formado e utilizado para a produção da base teórica. O próximo passo foi a separação dos artigos em grupos de acordo com o grau de relevância com o tema central da pesquisa, assim, foi feita a leitura dos artigos mais relevantes a fim de encontrar o máximo de informações pertinentes que agreguem o trabalho.

Com os dados coletados, foi realizado um estudo sobre as construções de madeira e suas técnicas, para a produção da fundamentação teórica contendo as técnicas de construção em madeira e suas vantagens.

Para o projeto de cálculo, será utilizado inicialmente um pórtico com vigas e pilares, onde os valores serão calculados duas vezes, com a NBR 7190/1997, uma para *Pinus* e outra para *Eucalyptus*, a fim de comparar os valores e posteriormente, apresentar as mudanças da revisão da norma.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1. CONSTRUÇÕES EM MADEIRA

A partir de 12000 a.C., a madeira passou a ser empregada como materiais constituintes dos sistemas estruturais, período onde não havia tal avanço tecnológico como se tem nos dias atuais, de modo que o uso era realizado de forma simples, ou seja, cortava-se as árvores e fazia-se uso dos troncos. Com o passar do tempo, o uso da madeira evoluiu para um sistema um pouco mais trabalhado, em que os troncos eram recortados em tábuas.

Com a chegada de um novo século, o século XVII, as tábuas foram substituídas por toras retangulares que eram obtidas através dos troncos, e do século XIX, essas toras foram trabalhadas para dimensões menores, constituindo um novo sistema estrutural impulsionado pela Revolução Industrial.

3.1.1. Casas de troncos (entre 12000 a.C. e 4000 a.C.)

Como já mencionado, há tempos a madeira já é utilizada nas construções, e seus primeiros registros são nas casas de troncos por conta de seu baixo custo, além de uma fácil disponibilidade, visto que na época, o planeta ainda era ocupado em sua totalidade natural praticamente plena (vale ressaltar que, com o passar dos anos, com a evolução da civilização, a Terra foi sofrendo mudanças e perdendo boa parte de sua natureza, implicando em um uso maior de materiais não-orgânicos como principal elemento estrutural).

Figura 2 – Primeiras estruturas usando troncos (eram cobertas com folhas)



Fonte: SOUTO; BUENO; SILVA, 2016

Suas melhores vantagens são as resistências à tração e à compressão paralelas as fibras, já suas desvantagens eram a pouca estabilidade dessas construções, devido à forma como eram alocadas na edificação além das intempéries; a baixa hermeticidade, ou seja, os troncos eram agrupados e amarrados por cordas, o que ainda não era suficiente para manter a edificação completamente fechada, e por fim, pode-se destacar a baixa estanqueidade da construção, que era suprida com uso de materiais “colantes”, como pele de animais.

Figura 3 – Casas de troncos



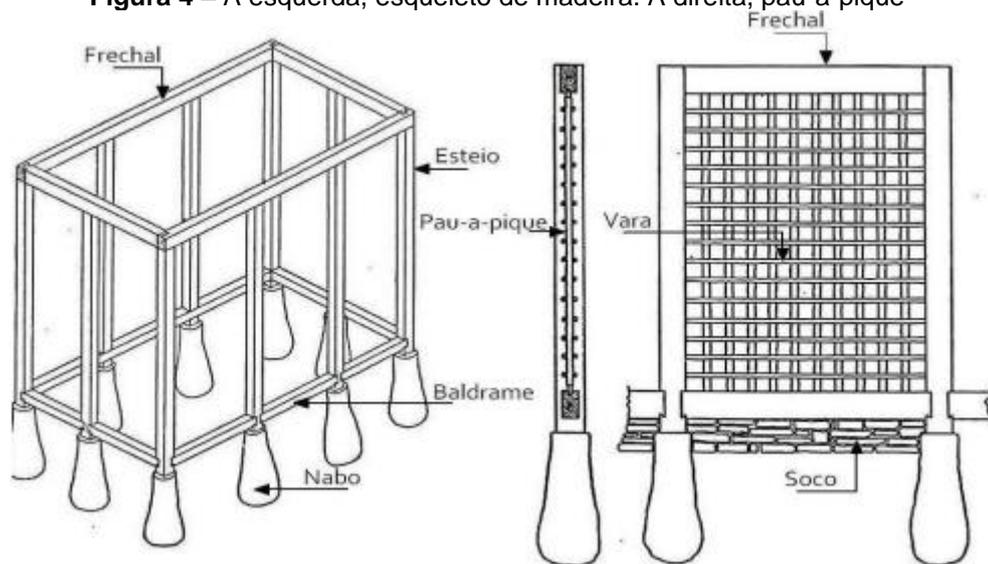
Fonte: SOUTO; BUENO; SILVA, 2016

Somando todas essas desvantagens e com o advento da energia hidráulica, os troncos passaram a ser recortados, com uma maior frequência, em tábuas (forma que a madeira era utilizada nas edificações de pau-a-pique ou taipa), tornando a madeira um material mais vantajoso para uso estrutural.

3.1.2. Pau-a-Pique ou Taipa (séc. XVII)

Segundo SOUTO; BUENO; SILVA, 2016, pau-a-pique ou taipa é uma técnica construtiva na qual um esqueleto de madeira (Figura 4) é firmemente amarrado em uma estrutura de madeira trançada (pau-a-pique) e revestida com materiais como o barro (Figura 5). Essa cobertura tinha a função de gerar a estanqueidade da edificação.

Figura 4 – À esquerda, esqueleto de madeira. À direita, pau-a-pique



Fonte: SOUTO; BUENO; SILVA, 2016

Nessa época surge o preconceito para o uso da madeira no sistema estrutural de uma construção, visto que uma estrutura de pau-a-pique é pouco estável, não muito resistente às intempéries e geralmente, não tratada com produtos para a proteção de sua deterioração por organismos vivos; sendo assim, substituída pela alvenaria.

Figura 5 – Casa de pau-a-pique



Disponível em: <http://www.ecoeficientes.com.br/taipa-de-mao-ou-pau-a-pique/>. Acesso em: 10 fev. 2022.

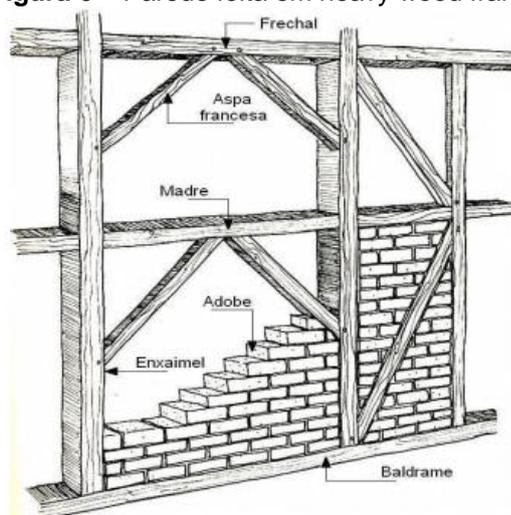
No Brasil, nas regiões mais pobres e em algumas cidades do interior, ainda é possível encontrar esse tipo de construção, por conta da facilidade de construção, do custo baixo quanto aos materiais e da não especialização de quem a constrói. Vale ressaltar os perigos que os moradores desse tipo de residência, já que é um tipo de

estrutura de baixa resistência, e com a madeira utilizada não protegida devidamente, como já citado anteriormente.

3.1.3. Enxaimel/Heavy Wood Frame (séc. XVII)

Esta técnica foi iniciada na Alemanha e consiste em grandes toras de árvore que eram cortadas de forma retangular ou quadrada, a fim de formar os componentes da estrutura, como as vigas e pilares, por exemplo (Figura 6). O esqueleto estrutural é formado com a junção dessas toras recortadas e tem como principal vantagem a altíssima estabilidade. Para sua montagem, o esqueleto era feito por completo, possibilitando a colocação do telhado, e por fim, materiais de vedação, como o adobe.

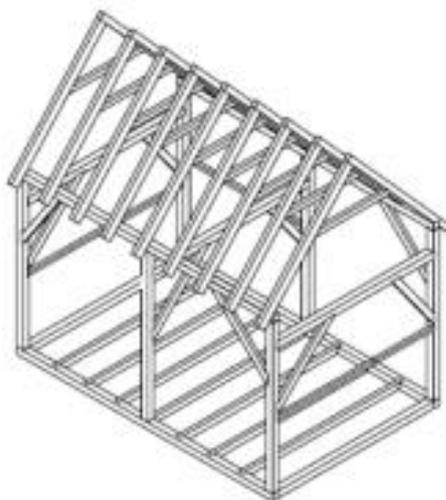
Figura 6 – Parede feita em heavy wood frame



Fonte: SOUTO; BUENO; SILVA, 2016

É uma técnica que foi difundida para países das Américas do Sul e do Norte, principalmente no século XIX, com a movimentação imigrante de alemães para os novos locais. No Brasil, a técnica foi apresentada principalmente no Sul do país, porém teve seu uso freado pelas políticas antialemãs criadas pelo governo de Getúlio Vargas no período da Segunda Grande Guerra. Já nos Estados Unidos, o uso do enxaimel foi freado pela grave crise imobiliária enfrentada devido ao alto crescimento populacional que não foi acompanhado pelo número de habitações.

Figura 7 – Esqueleto de estrutura de uma casa em heavy wood frame



Fonte: COSTA, 2013

Atualmente, esse tipo de construção ainda pode ser encontrado em algumas regiões da Europa, pela sua tradição e por ser considerada a pioneira das construções modernas de madeira.

3.1.4. Light Wood Frame (séc. XIX)

Esta técnica foi impulsionada pela Revolução Industrial, que possibilitou a produção em massa de madeira serrada e pregos, desenvolvendo um sistema construtivo rápido, eficiente e barato (SOUTO; BUENO; SILVA, 2016). Além disso, pode-se afirmar que a técnica consiste na junção de diversos elementos construtivos, que quando unidos, dão à estrutura final a capacidade de resistir a esforços nas duas principais direções, horizontais e verticais.

Vale ressaltar que essa técnica é apenas uma parte da estrutura, como se fosse o esqueleto, sendo ainda utilizados durante a construção outros materiais para finalização da edificação como dry wall, concreto armado e materiais isolantes térmicos e acústicos. Pode ser dividida em ballon frame e platform frame, tendo sido desenvolvido o segundo para corrigir as falhas do primeiro e Oriented Strand Board (OSB).

Essa técnica é bem difundida pelo mundo, principalmente no Japão, no Chile e nos Estados Unidos, onde a grande maioria das construções voltadas a moradia, utilizam a técnica do Light Wood Frame como base para suas estruturas.

3.1.4.1. Ballon Frame

Sistema no qual as fachadas são levantadas com montantes contínuos em toda a sua altura e as vigas de laje ligam-se diretamente nestes montantes, depois são travadas transversalmente por tábuas corridas formando assim os pisos. (SOUTO; BUENO; SILVA, 2016). Além disso, as ligações nessa subdivisão são realizadas apenas com pregos.

Figura 8 – Ballon Frame



Fonte: OLIVEIRA, 2018

Vale ressaltar algumas desvantagens que são a dificuldade de execução, devido ao fato de várias partes da construção serem erguidas simultaneamente; o tamanho das peças, que devem ter medidas exatas para formar os montantes; e por fim, a resistência ao fogo, visto que pela continuidade da estrutura como um todo, um pedaço dela que venha a ser danificado por um incêndio, pode gerar danos colaterais à toda construção.

3.1.4.2. Platform Frame

Criada para corrigir os defeitos da subdivisão anterior, ou seja, como uma evolução, o platform frame traz como principal diferença a altura dos montantes, onde

no ballon frame, o montante tem a altura de todos os andares, já no platform frame, existe um montante para cada piso (Figura 9). Para manter a estrutura unida como um todo, utiliza-se comumente madeira engenheirada para revestir cada um dos pisos.

Figura 9 – Platform Frame



Fonte: OLIVEIRA, 2018

Com a significativa diferença entre o Ballon e o Platform – o fato de os pisos serem “separados” -, essa técnica apresenta uma maior resistência ao fogo que a técnica anterior, além de possibilitar uma execução expedita com trabalho simultâneo em andares diferentes, o que a torna mais fácil de ser construída, visto que a estrutura toda não tem a necessidade de ser erguida simultaneamente.

3.1.4.3. OSB

A técnica do OSB consiste em painéis de partículas orientadas, que são feitos com partículas de madeira, que são prensadas com resina seguindo uma mesma orientação, com a finalidade de aumentar a resistência para suportar as cargas geradas pela estrutura.

Uma das principais aplicações do OSB, ocorre nas vigas I joists, que são vigas compostas, onde a alma da peça é feita com OSB e as mesas são feitas com madeira serrada.

Figura 10 – Vigas I joists



Fonte: VILELA, 2020

Vale ressaltar que essa viga é uma ótima solução econômica, visto que na alma, onde os esforços não são críticos, é utilizado o OSB que é um material muito mais barato para ser produzido; e nas mesas, onde os esforços são críticos, utiliza-se um material mais caro, porém com maior resistência.

3.1.4.4. Empresas no Brasil

No caso do Brasil, algumas empresas já fazem o uso de wood frame na construção de residências, como a Tecverde, de Araucária no Paraná, e a MG Homes, de Limeira.

Fundada no ano de 2009, a Tecverde surgiu, na cidade de Pinhais, Paraná, como uma construtora com novos ideais sobre a construção civil, através da técnica do wood frame, construindo mais de 300 casas até o ano de 2012. Com a própria tecnologia, inspirada nos conceitos alemães, americanos e canadenses, o sistema construtivo da Tecverde busca sempre atingir mais rentabilidade, produtividade e alta qualidade.

A empresa MG Homes é uma das que se destaca pelo uso do Wood Frame, buscando atender o cliente com um bom serviço e alta tecnologia, visando mudar a visão da construção civil atual para uma visão mais sustentável e limpa. A MG Homes

utiliza para suas obras o *Pinus* Autoclavado, retirado de forma sustentável da natureza. A madeira depois de retirada, é tratada contra a ação de organismos vivos, evitando o seu apodrecimento e conseqüentemente, aumentando sua durabilidade.

3.2. CONSTRUÇÕES EM MADEIRA ENGENHEIRADA (MLC E CLT)

Na transição entre os séculos XIX e XX, com estudos e avanços na tecnologia, surgiu a madeira engenheirada, que consiste na criação de peças com dimensões elevadas e diferentes formatos, a partir de peças menores, a fim de tornar a madeira um material ainda mais vantajoso para o setor da construção civil, devido à alta tecnologia e trabalhabilidade envolvida.

Com isso, as construções atuais que utilizam madeira são projetadas e executadas com sistemas de madeira engenheirada em sua maioria, apresentando toda sua beleza estética e suas inúmeras vantagens em relação a outros materiais como o aço e o concreto.

3.2.1. Madeira Lamelada Colada (MLC) (séc. XX)

É uma técnica que muda a forma como a madeira era utilizada nos sistemas estruturais, que antes era serrada, com isso, traz uma significativa mudança nas técnicas construtivas que utilizam o material. Essa mudança é a inserção da alta tecnologia na produção de peças pré-fabricadas, o que contribui quanto à poluição do meio ambiente, visto que, há um menor desperdício de material residual, além do baixo custo energético de produção.

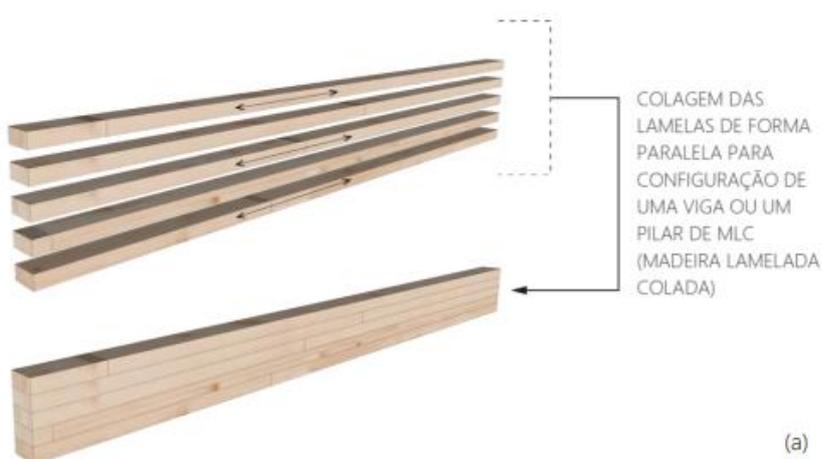
Figura 11 – Peça feita em MLC



Fonte: MIOTTO, 2009

Assim, surgindo no começo do século passado, a técnica MLC consiste na colagem de lamelas de madeira de forma paralela, formando assim peças que podem ser usadas como vigas, pórticos e lajes, tornando possível a construção com um maior controle de qualidade de peças maiores dimensões a partir de menores, gerando como vantagens maior resistência, durabilidade e sustentabilidade, contando com alta tecnologia.

Figura 12 – Produção de pilar em MLC

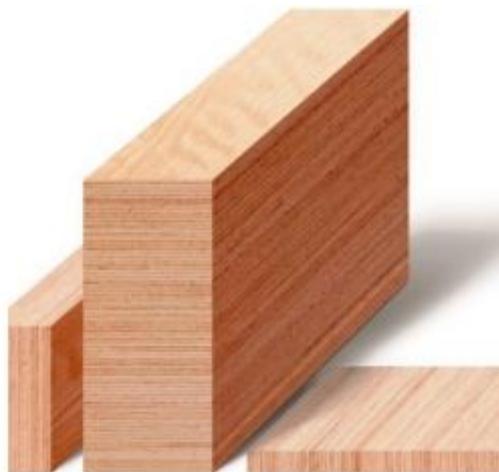


Fonte: OLIVEIRA, 2018

A tecnologia por trás do MLC está sempre em constante movimentação, e conseqüentemente, isso gera inovações e novas técnicas, como o Laminated Veneer Lumber (LVL), que tem o mesmo processo de produção do MLC, com a diferença que

as camadas são muito mais finas, possibilitando a criação de peças mais planas e retas.

Figura 13 – Peça feita em LVL



Fonte: VILELA, 2020

O MLC é uma técnica bem difundida pelo mundo que pode ser utilizada sozinha ou, como é mais comum, em união ao CLT (técnica detalhada no tópico principal subsequente), como em um dos maiores edifícios do mundo feito com madeira, o Mjøstårnet (Figura 23).

“A construção de um auditório em Basel, na Suíça, em 1893, é frequentemente citada como a primeira utilização do MLC.” (MIOTTO, 2009). A partir de 1945, com o fim da Segunda Grande Guerra, o MLC passou a se destacar mais, começando sua trajetória no setor da construção civil.

Em 1940, algumas casas na Finlândia já foram construídas com o MLC, demonstrando um uso, mesmo que baixo, da técnica que se difundia pela Europa. Hoje em dia, destacam-se o Museu de Arte Latino-americana, que está em construção no Chile, utilizando o MLC de formas inovadoras e diferentes; e o maior edifício do mundo construído com madeira, o edifício Ascent, localizado na cidade de Milwaukee, EUA.

Figura 14 – Museu de Arte Latino-americana em construção



Disponível em: <https://madera-sostenible.com/arquitectura/la-construccion-del-museo-de-arte-latinoamericano-avanza-a-buen-ritmo/>. Acesso em: 17 fev. 2022.

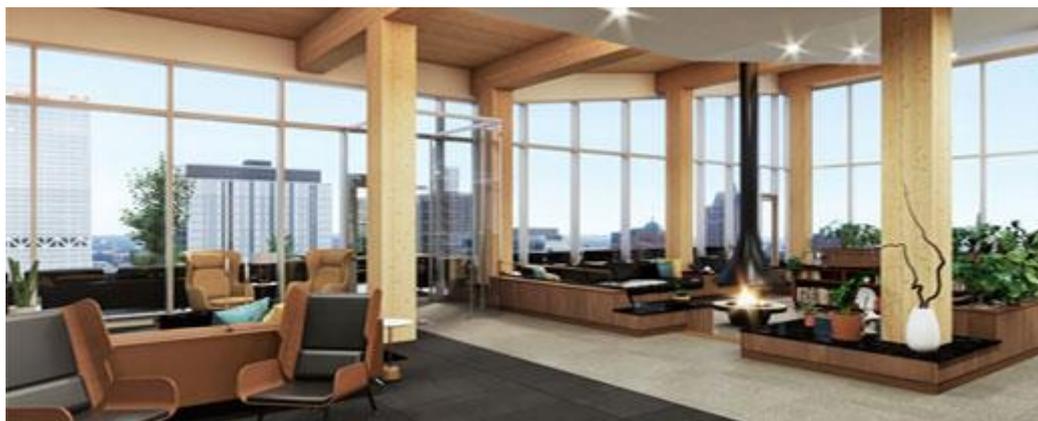
Figura 15 – Vista aérea do Ascent



Disponível em: <http://www.remade.com.br/noticias/17679/a-torre-de-madeira-mais-alta-do-mundo-comeca-a-ultrapassar-edificios-proximos>. Acesso em: 17 fev. 2022.

O edifício Ascent tem sua arquitetura projetada por Korb + Associates Architects, além de possuir 259 apartamentos de luxo e 25 andares, tornando-o o maior prédio do mundo superando o prédio norueguês (Figura 23). Vale destacar o custo de 125 milhões de dólares para construir essa estrutura híbrida de madeira e concreto. Na figura 32, é possível ver a inovação e modernidade do prédio, com os pilares e parte das lajes de MLC expostas.

Figura 16 – Área interna do Ascent



Disponível em: <http://www.remade.com.br/noticias/17679/a-torre-de-madeira-mais-alta-do-mundo-comeca-a-ultrapassar-edificios-proximos>. Acesso em: 17 fev. 2022.

Já no Brasil, pode-se destacar a empresa Rewood, de São Paulo, quanto ao uso da técnica em suas construções com diversos projetos e inovações em diferentes nichos da construção civil.

3.2.1.1. Rewood

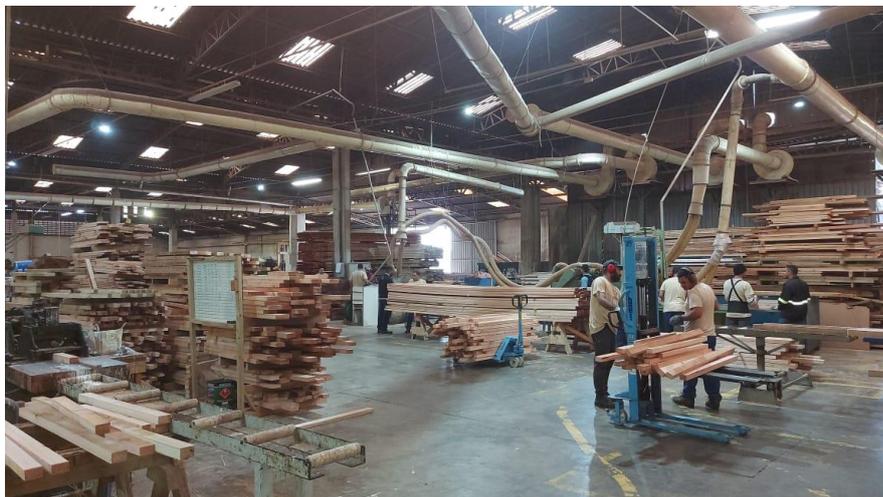
A empresa de São Paulo é a primeira a utilizar a tecnologia do MLC no país, sendo quase exclusiva na produção desse material. Atende às normas brasileiras, americanas, canadenses e europeias, além de prestar diversos tipos de serviços como logística, montagem, análise estrutural, garantia, entre outros.

A Rewood busca em seus trabalhos unir sustentabilidade e tecnologia, de forma a levantar uma construção com o menor dano possível ao meio ambiente, utilizando sempre madeira de reflorestamento e não incentivando práticas lucrativas de exploração do recurso. Além de trabalhar com o MLC, a empresa também utiliza o Nail-Laminated Timber (NLT) – técnica na qual a madeira no tamanho desejado é empilhada e travada com pregos -, e o Wood Frame, já apresentado anteriormente.

Em busca de ampliar a pesquisa, foi realizada uma visita técnica no escritório e na fábrica da Rewood, passando por cada máquina e cada passo do processo de produção dos painéis de MLC, além de acompanhar um pouco da rotina de trabalho dos engenheiros e arquitetos nos projetos.

A empresa utiliza em sua maioria madeira de *Pinus* ou *Eucalyptus*, além de seguir as normas NBR 7190/ASTM/CSA/EN para produção dos painéis de madeira engenheirada.

Figura 17 – Fábrica Rewood



Elaboração própria, 2022.

As tábuas são colocadas na primeira máquina, a multilâmina, onde as peças passam por uma esteira rolante, e saem do outro lado cortadas em lamelas, atendendo a largura solicitada de projeto, acrescentando 7 mm por precaução.

Com as lamelas feitas, todas as peças passam por uma análise visual afim de verificar se houve alguma quebra ou fissura que torne a lamela inutilizável de acordo com os parâmetros da norma. As lamelas selecionadas passam pela segunda máquina que corta o extremo da lamela formando emendas dentais, necessárias para o próximo passo.

Nesse passo, formam-se os “finger joints”, que são as junções feitas com cola entre os dentes de cada peça (processo realizado por máquina). Vale ressaltar, que são coladas tantas peças quanto necessárias para atingir o comprimento de projeto. Com as peças já coladas, elas são colocadas na quarta máquina, a moldureira, que tem o objetivo de aplainar as peças, tirando o excesso de cola e qualquer “relevo” que a peça possa apresentar.

Com isso, as lamelas no comprimento certo são reservadas enquanto é feita a sequência de montagem, que busca evitar a colagem da emenda de uma lamela sobre a emenda de outra lamela. Com a sequência de montagem pronta, são colocadas duas peças de capa, uma inferior e uma superior, para que a ferragem da prensa não

amasse o painel. O painel fica na prensa por um determinado tempo sobre pressão para que as lamelas fiquem bem coladas umas nas outras.

Figura 18 – Painel na prensa



Elaboração própria, 2022.

Com as lamelas coladas, o painel passa pela calibradora, onde o excesso de cola é retirado, deixando o painel na altura pré-determinada de projeto.

Entrando na fase de acabamento, os painéis são lixados e recebem uma camada de stain (material que destaca a tonalidade da madeira, além de gerar proteção à peça contra agentes externos, como água e fungos).

Por fim, passa-se uma borracha líquida nos extremos dos painéis, para que a peça não sofra com a umidade externa durante o transporte até o canteiro. Vale ressaltar que os painéis tem um certo comprimento em excesso para prevenir um imprevisto de obra (como por exemplo, a necessidade de 3 mm a mais ou a menos).

Figura 19 – Painel com stain e borracha líquida



Elaboração própria, 2022.

3.2.2. Madeira Lamelada Cruzada (CLT) (fim do séc. XX)

Por fim, a madeira lamelada cruzada (Cross Laminated Timber – CLT), como ilustrado na Figura 21, é uma técnica construtiva que utiliza lamelas coladas, sempre ímpares, e a cada camada, troca-se o sentido de orientação, girando 90 graus, gerando assim, alta rigidez e resistência nos dois sentidos de maior comprimento das peças. Com uma grande gama de usos, como lajes e vedação, pode-se destacar a facilidade de montagem na obra, necessitando de pouca mão-de-obra, maior estabilidade da estrutura, sustentabilidade, alto grau de pré-fabricação, limpeza no canteiro de obra, maior resistência ao fogo e melhor conforto térmico.

Figura 20 – Várias peças feitas em CLT



Disponível em: <https://www.crosslam.com.br/site/historia-do-clt/>. Acesso em: 17 fev. 2022.

A madeira por si só é um material que trabalha a favor do meio ambiente, por ser renovável, por conta do baixo consumo de energia necessário em sua produção, além do maior sequestro de CO₂ da atmosfera, quando comparado a outros materiais utilizados no setor da construção, como o aço e concreto. Unindo essa qualidade à alta tecnologia empregada para a produção desse elemento construtivo, torna o CLT um dos melhores materiais possíveis para as construções.

Figura 21 – Produção de painel em CLT



Fonte: OLIVEIRA, 2018

Por conta de todas essas qualidades, além de maior segurança para os trabalhadores, o CLT, assim como o MLC citado anteriormente, se colocam no mais alto patamar para substituir o destaque de aço e concreto no setor da construção civil, de forma que aliado à essa ascensão da madeira, o preconceito quanto ao seu uso vem diminuindo, visto que há alguns anos, surgem pelo mundo, diversas edificações utilizando a madeira, principalmente através da técnica do CLT (o MLC também, mas não tanto quanto o CLT).

Difundido pelo mundo, segundo FAUSTINO, 2018, pode-se encontrar grandes construções que utilizam esta técnica no Canadá, como o Edifício Brock Commons de 18 andares, com partes de CLT; na Austrália, como o International House Sydney com 6 andares e 3500 metros cúbicos de madeira reciclada e o Fortè in Melbourne com 759 painéis de CLT, 10 andares e uma economia de 761 toneladas de CO₂; em Londres, como o Dalston Lane, com 10 andares e inteiramente feito com CLT; na Noruega como o edifício Mjøstårnet, com 85,4 m de altura concluído em março de 2019.

Figura 22 – Vista aérea do Brock Commons



Disponível em: <http://goinggreen.com.br/2018/02/26/edificios-de-madeira-laminada-cruzada-clt-sustentaveis-e-cada-vez-mais-populares/>. Divulgação: KK Law/Flickr. Acesso em: 16 fev. 2022.

Figura 23 – Vista externa do Mjøstårnet



Fonte: VILELA, 2020

3.2.2.1. Brasil

Apesar dessa difusão do CLT em vários países do mundo, principalmente na Europa, o Brasil vem demonstrando um novo interesse em mudar o material mais usado em obras para a madeira. Vale destacar que já há iniciativas com previsão de construção de prédios de CLT no país, como o projeto do escritório Triptyque do Edifício Amata de 13 andares na Vila Madalena, em São Paulo.

Figura 24 – Projeto do Edifício Amata em São Paulo



Disponível em: <http://goinggreen.com.br/2018/02/26/edificios-de-madeira-laminada-cruzada-clt-sustentaveis-e-cada-vez-mais-populares/>. Divulgação: Triptyque. Acesso em: 15 fev. 2022.

A empresa Urbem é apenas uma da lista de empresas que fornecem e trabalham com a madeira para o setor de construção civil. Além dela, destaca-se a empresa Crosslam, de Suzano em São Paulo, que também utiliza o CLT em seus projetos.

A Urbem fica no Paraná, com operações em diversos estados do país buscando oferecer ao mercado diferentes tipos de madeira para a construção. O CLT da empresa terá suas características determinadas pelo uso do projeto, como suas dimensões e composição. Através do controle de qualidade, o produto sempre estará com um teor de umidade por volta dos 12%, com as devidas proteções contra intempéries e parasitas, além de levar para o canteiro de obras a organização, facilidade de montagem, menor desperdício e maior limpeza do espaço da obra, ambos fatores que geram maior sustentabilidade e menor custo.

3.2.2.2. Crosslam

A empresa de Suzano, que está no mercado desde 2015, era a única no país a trabalhar com o CLT (também trabalha com o MLC, mas o foco principal se dá no CLT), utilizando a técnica em diversas edificações, como igrejas, residências, entre outros. “Dispomos de máquinas e equipamentos de última geração em nossa indústria, sendo nosso pórtico CNC 05 eixos o ‘estado da arte’ em processamento desse material, o ÚNICO na América Latina.” (Crosslam, 2020).

Além da visita técnica à empresa Rewood já descrita acima, a fábrica da Crosslam foi visitada em Suzano, passando por cada máquina e cada passo do processo de produção tanto dos painéis de MLC quanto dos painéis de CLT.

O processo se inicia com o recebimento e estoque das tábuas de *Pinus* (podendo ser este tratado ou não) e *Eucalyptus*, o que já é pensado com o desde a fase de projeto visto que os carregamentos da madeira vêm de outros estados, como o Paraná. Com isso, ocorre o processo de secagem, onde as peças de *Pinus* têm sua umidade extraída de forma mais natural, já as peças de *Eucalyptus* passam por uma estufa que tem sua temperatura e seus comportamentos controlados para que as tábuas não estourem.

Com as peças “secas”, elas são cortadas em tamanhos utilizáveis, descartando partes desnecessárias, e para isso, são feitas marcas na peça por um operador para que a máquina programada consiga realizar o corte (essa máquina também realiza um “ajuste lateral” das peças). Por fim, essas peças já cortadas são separadas em lotes por tipo, comprimento de projeto necessário, quantidade e largura.

Os lotes são levados ao galpão por ordem de projetos e para que as peças atinjam o comprimento de projeto, elas passam por uma que máquina que faz nos extremos das peças emendas dentais, depois é passado cola nessas emendas, e as peças, seguidas umas das outras, são colocadas sobre uma esteira rolante para que sejam coladas, e o comprimento é atingido, uma serra programada faz o corte da peça. Vale ressaltar que a empresa possui apenas um maquinário para realizar o processo, então por questão de produtividade, esse processo também é realizado manualmente por um determinado número de operadores.

Seguindo o processo para os painéis de MLC, as peças são coladas uma sobre a outra paralelamente e prensadas para que a colagem seja bem feita. Após isso, caso seja necessário algum processo de usinagem, as peças são levadas para o “lado

do CLT”, onde uma máquina programada com extrema precisão realiza o processo, caso contrário, o lote é enviado para o galpão de acabamento.

Figura 25 – Processo de usinagem

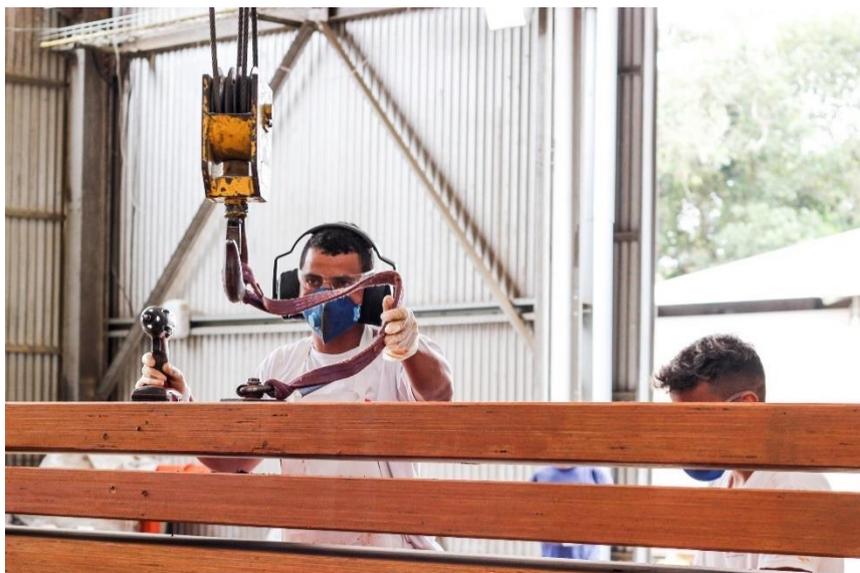


Disponível em: <https://www.crosslam.com.br/site/a-crosslam/>. Acesso em 10 set. 2022.

Já para o processo dos painéis de CLT, o processo é extremamente programado para que não haja desperdício de material, e para isso, vários operários são destinados a esse processo, onde uma primeira camada é disposta sobre uma prensa maior (com pistões laterais para manter as peças bem alinhadas), em seguida, uma máquina controlada por um operário passa cola como um “vai e vem” sobre as peças. Após isso, é colocada a segunda camada, mudando o sentido de orientação em 90° da camada interior, e repete-se o processo cola. Com isso, troca-se o sentido da camada e todo o processo se repete respeitando que o número de camadas deve ser sempre ímpar. Quando finalizadas as camadas, são parafusados pequenos pedaços de manta sobre o painel, no lado onde os pistões entraram, para que não haja deslizamento das peças, e por fim, é colocada uma manta preta e aplicada pressão para finalizar o processo de colagem.

Com os painéis prontos, eles passam pelos processos de usinagem pela máquina precisa já citada acima, para que sejam feitos furos, “encaixes” ou qualquer necessidade de corte de projeto, e depois, são levados para o galpão de acabamento. Vale ressaltar que os painéis chegam a pesar mais de meia tonelada, e para serem transportados (tanto de CLT quanto de MLC), são içados por uma ponte rolante.

Figura 26 – Encaixe para içamento



Disponível em: <https://www.crosslam.com.br/site/visao/>. Acesso em 10 set. 2022.

No galpão de acabamento (este projetado por um próprio engenheiro da empresa tendo todo esqueleto estrutural de madeira), os painéis são lixados, tem os excessos de tamanho cortados de acordo com o projeto, e são finalizados. Com isso, são embalados e reservados para serem transportados para o canteiro de obras.

4. PROJETO DE CÁLCULO

O projeto de cálculo será composto de vigas e pilares de uma estrutura de pórticos de madeira presente em um galpão industrial. Vale ressaltar que todos os valores que não foram obtidos diretamente pelo uso da norma, foram adotados com o objetivo de exemplificar numericamente e não somente com fórmulas o projeto.

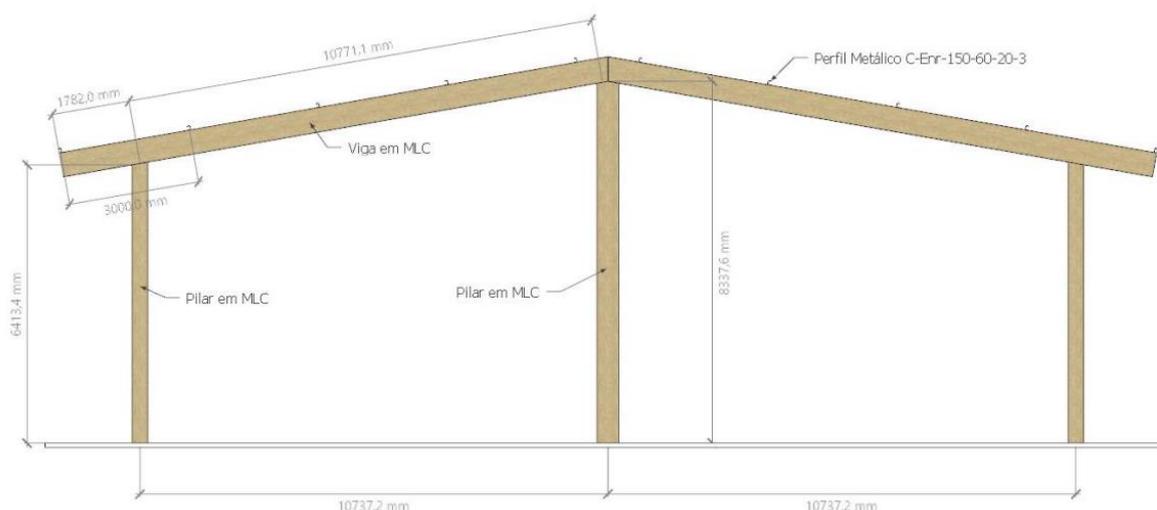
O cálculo será realizado para *Pinus* e *Eucalyptus*, tanto para vigas como pilares, utilizando apenas a NBR 7190/1997, gerando assim, 2 combinações de valores finais que serão comparados.

Pinus taeda

- Viga

Os pórticos tem vãos de 8 m entre si, as vigas terças são constituídas em perfis metálicos com 7,8 kg/m e espaçadas de 3 m entre si, cobertas por telhas com peso de 5,85 kg/m² e sob ação de uma força devida ao vento de sobrepressão de 0,83 kN/m² e de sucção de 0,58 N/m². Além disso, também será considerada uma carga técnica de 25 kg/m² para instalações de outras disciplinas da obra (elétricas, hidráulicas, proteção contra incêndio, refrigeração, etc.).

Figura 27 – Estrutura do pórtico (viga+pilar)



Elaboração própria.

Além dessas informações, será utilizado *Pinus taeda* de classe C30, com densidade aparente de 550 kg/m³, classe de umidade (1), carregamento

preponderante de longa duração e madeira de primeira categoria.

- Chute Inicial

Para iniciar o dimensionamento, considerando as medidas da figura 27, o primeiro passo é realizar um “chute inicial” para a seção da viga. Visto que o projeto busca retratar o mais próximo da realidade, a seção sugerida será de 160 mm x 240 mm, devido ao vão muito grande a ser vencido. Por fim, caso a seção não seja suficiente para ser aprovada nas verificações, a nova seção a ser adotada será de 320 mm x 480 mm (o dobro da seção inicial).

- Cálculos preliminares

- Inclinação da viga

A inclinação da viga é calculada através da diferença entre as alturas do pilar central e do pilar da extremidade, dividido pela largura entre esses 2 pilares:

$$\tan(\alpha) = \frac{8337,6 \text{ mm} - 6413,4 \text{ mm}}{10737,2 \text{ mm}}$$

$$\alpha \sim 10,16^\circ$$

- Cálculo do Coeficiente de Modificação

O coeficiente de modificação é calculado através da seguinte multiplicação:

$$K_{mod} = K_{mod,1} \cdot K_{mod,2} \cdot K_{mod,3}$$

onde:

$$K_{mod,1} = 0,7 \text{ (carregamento preponderante de longa duração)}$$

$$K_{mod,2} = 1,0 \text{ (classe de umidade 1)}$$

$$K_{mod,3} = 1,0 \text{ (madeira de primeira categoria)}$$

$$K_{mod} = 0,7 \cdot 1,0 \cdot 1,0 = 0,7$$

- Cálculo da Resistência à Compressão de cálculo

$$f_{c0,d} = K_{mod} \cdot \frac{f_{c0,k}}{\gamma_w}$$

onde:

- Resistência característica: $f_{c0,k} = 30 \text{ MPa}$ (classe C30)
- Coeficiente de ponderação: $\gamma_w = 1,4$ (compressão)

$$f_{c0,d} = 0,7 \cdot \frac{30 \text{ MPa}}{1,4} = 15 \text{ MPa} = 15000 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

- Cálculo das cargas aplicadas na viga principal

Para o cálculo das cargas, é importante fazer a divisão de como os esforços serão transmitidos até serem aplicados na viga principal, para encontrar os pontos de momentos máximo e mínimo. Com isso:

- O peso das telhas é descarregado nas vigas terças;
- O peso das vigas terças é descarregado na viga principal, porém como força pontual;
- A carga técnica incide diretamente na viga, sendo considerada um carregamento pontual;
- A carga dos ventos incide sobre as telhas, são transferidas para as vigas terças, e depois para a viga principal como força pontual.

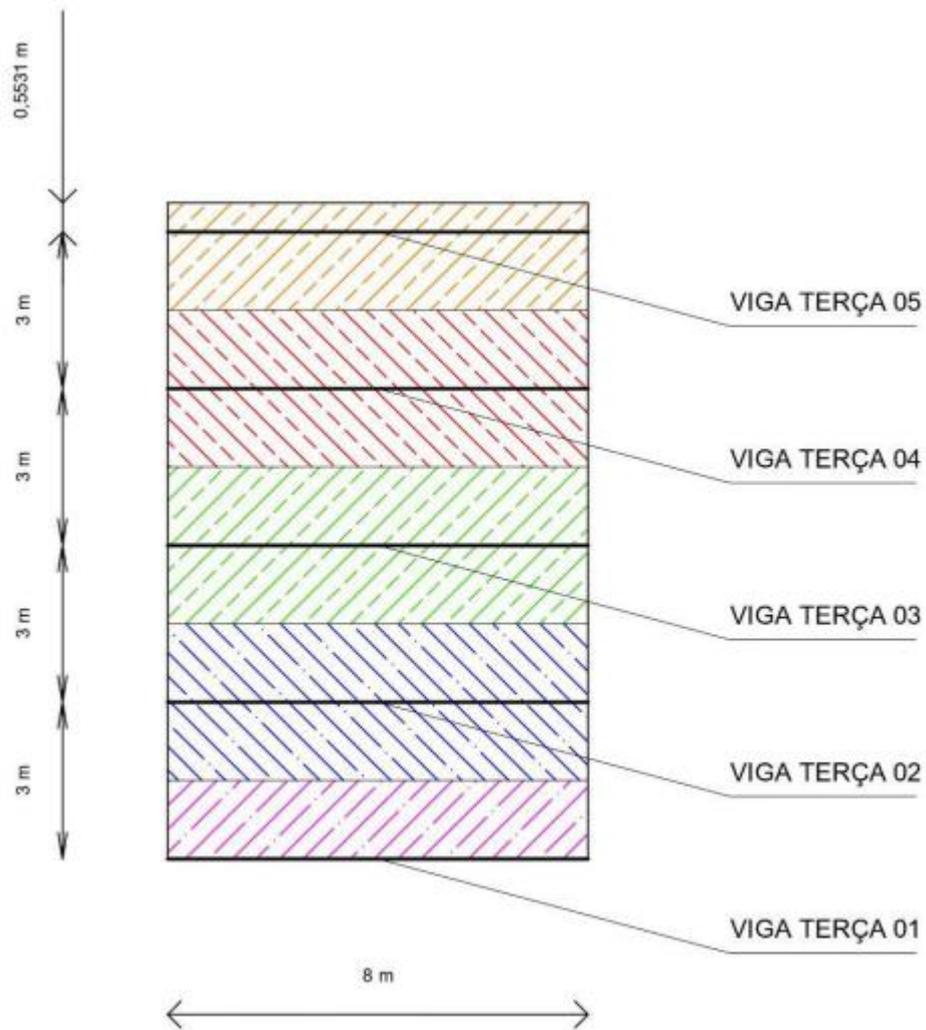
Para este projeto, foi considerado que a carga permanente corresponde à soma dos carregamentos devido ao peso das telhas, das vigas terças, do peso próprio da viga (que depende de sua seção transversal) e da carga técnica. A carga acidental corresponde a carga devido ao vento (sobrepessão e sucção).

- Cargas Permanentes

- Peso das telhas descarregado nas vigas terças

A carga devido às telhas é dada pelo produto da área do telhado (do qual somente metade está calculada, visto que a outra metade é idêntica) pelo peso das telhas. Vale ressaltar que o peso da telha foi pré-determinado anteriormente. Como as vigas terças recebem parte do carregamento devido às telhas, as vigas foram numeradas de 1 a 5, conforme desenho a seguir, para obter a área de influência para cada telha:

Figura 28 – Áreas de influência



Elaboração própria.

Com as áreas de influência, é possível calcular a carga que é transmitida para cada viga terça, como segue abaixo:

$$F_{viga\ terça} = A_{influência} \cdot P_{telha}$$

Obs.: $1000 \frac{kg \cdot m}{s^2} = 1\ kN$

Para a viga terça 1 (área de cor magenta):

$$F_{viga\ terça\ 1} = (1,5\ m \cdot 8\ m) \cdot \left(5,85 \frac{kg}{m^2} \cdot 9,81 \frac{m}{s^2}\right) = 688,662 \frac{kg \cdot m}{s^2} = 0,689\ kN$$

Para as vigas terças 2, 3 e 4 (possuem áreas de influência de mesmo valor):

$$F_{viga\ terça\ 2} = (3\ m \cdot 8\ m) \cdot \left(5,85 \frac{kg}{m^2} \cdot 9,81 \frac{m}{s^2}\right) = 1377,324 \frac{kg \cdot m}{s^2} = 1,377\ kN$$

$$F_{viga\ terça\ 2} = F_{viga\ terça\ 3} = F_{viga\ terça\ 4} = 1,377\ kN$$

Para a viga terça 5 (área de cor laranja):

$$F_{viga\ terça\ 5} = [(1,5\ m + 0,5531\ m) \cdot 8\ m] \cdot \left(5,85 \frac{kg}{m^2} \cdot 9,81 \frac{m}{s^2}\right) = 942,595 \frac{kg \cdot m}{s^2}$$

$$F_{viga\ terça\ 5} = 0,943\ kN$$

- Peso das vigas terças descarregado na viga principal

Para o peso próprio das vigas terças, segue a mesma lógica do cálculo anterior, porém considerando o fato de serem constituídas por perfis metálicos com densidade linear de $7,8\ kg/m$ e $8\ m$ de comprimento.

$$F_{peso\ próprio\ viga\ terça} = 8\ m \cdot \left(7,8 \frac{kg}{m} \cdot 9,81 \frac{m}{s^2}\right) = 612,144 \frac{kg \cdot m}{s^2} = 0,612\ kN$$

- Carga Técnica

Para a viga terça 1:

$$F_{técnica\ 1} = (1,5\ m \cdot 8\ m) \cdot \left(25 \frac{kg}{m^2} \cdot 9,81 \frac{m}{s^2}\right) = 2943 \frac{kg \cdot m}{s^2} = 2,943\ kN$$

Para as vigas terças 2, 3 e 4:

$$F_{técnica\ 2} = (3\ m \cdot 8\ m) \cdot \left(25 \frac{kg}{m^2} \cdot 9,81 \frac{m}{s^2}\right) = 5886 \frac{kg \cdot m}{s^2} = 5,886\ kN$$

$$F_{técnica\ 2} = F_{técnica\ 3} = F_{técnica\ 4} = 5,886\ kN$$

Para a viga terça 5:

$$F_{técnica\ 5} = [(1,5\ m + 0,5531\ m) \cdot 8\ m] \cdot \left(25\ \frac{kg}{m^2} \cdot 9,81\ \frac{m}{s^2}\right) = 4028,182\ \frac{kg \cdot m}{s^2}$$

$$F_{técnica\ 5} = 4,028\ kN$$

Com todas as forças pontuais calculadas, é possível somá-las e obter as cargas permanentes pontuais de cada viga terça na viga principal:

$$F_{g,viga\ terça\ 1} = 0,689\ kN + 0,612\ kN + 2,943\ kN = 4,244\ kN$$

$$F_{g,viga\ terça\ 2} = 1,377\ kN + 0,612\ kN + 5,886\ kN = 7,875\ kN$$

$$F_{g,viga\ terça\ 2} = F_{g,viga\ terça\ 3} = F_{g,viga\ terça\ 4} = 7,875\ kN$$

$$F_{g,viga\ terça\ 5} = 0,943\ kN + 0,612\ kN + 4,028\ kN = 5,583\ kN$$

- Peso próprio da viga principal

Para o peso próprio da viga principal, além da densidade aparente e da gravidade, o seu valor é multiplicado pela área da seção transversal:

$$P_{próprio\ viga\ principal} = b \cdot h \cdot 550 \cdot 9,81 = 0,16\ m \cdot 0,24\ m \cdot 550\ \frac{kg}{m^3} \cdot 9,81\ \frac{m}{s^2}$$

$$P_{próprio\ viga\ principal} = 207,187\ \frac{kg}{s^2} = 207,187\ \frac{N}{m} = 0,207\ kN/m$$

- Cargas Acidentais (ventos)

- Vento de Sobrepressão

Como a carga devido ao vento é aplicada nas telhas, que descarrega nas vigas terças, e por fim, descarrega na viga principal, o cálculo dessa carga segue o mesmo raciocínio do cálculo do peso das telhas, ou seja, uma carga uniformemente distribuída aplicada em uma área. Vale ressaltar que a força devido ao vento foi pré-determinada, com isso, basta multiplicar esse valor fixo pela área de influência de cada viga terça:

$$F_{q,sobrepressão} = A_{influência} \cdot 0,83 \frac{kN}{m^2}$$

Para a viga terça 1:

$$F_{q,sobrepressão 1} = (1,5 m \cdot 8 m) \cdot \left(0,83 \frac{kN}{m^2}\right) = 9,960 kN$$

Para as vigas terças 2, 3 e 4:

$$F_{q,sobrepressão 2} = (3 m \cdot 8 m) \cdot \left(0,83 \frac{kN}{m^2}\right) = 19,920 kN$$

$$F_{q,sobrepressão 2} = F_{q,sobrepressão 3} = F_{q,sobrepressão 4} = 19,920 kN$$

Para a viga terça 5:

$$F_{q,sobrepressão 5} = [(1,5 m + 0,5531 m) \cdot 8 m] \cdot \left(0,83 \frac{kN}{m^2}\right) = 13,633 kN$$

- Vento de Sucção

Para o vento de sucção, o cálculo é feito da mesma forma que o vento de sobrepressão, porém com o valor da força desse vento sendo diferente.

$$F_{q,sucção} = A_{influência} \cdot 0,58 \frac{kN}{m^2}$$

Para a viga terça 1:

$$F_{q,sucção 1} = (1,5 m \cdot 8 m) \cdot \left(0,58 \frac{kN}{m^2}\right) = 6,960 kN$$

Para as vigas terças 2, 3 e 4:

$$F_{q,sucção 2} = (3 m \cdot 8 m) \cdot \left(0,58 \frac{kN}{m^2}\right) = 13,920 kN$$

$$F_{q,sucção 2} = F_{q,sucção 3} = F_{q,sucção 4} = 13,920 kN$$

Para a viga terça 5:

$$F_{q,sucção 5} = [(1,5 m + 0,5531 m) \cdot 8 m] \cdot \left(0,58 \frac{kN}{m^2}\right) = 9,526 kN$$

Portanto, com as forças calculadas, segue abaixo as figuras contendo a aplicação dessas forças na viga principal pelo software *FTool*. Além disso, vale

- Verificação das condições de segurança

Para verificar as condições de segurança, é necessário obter os valores dos esforços solicitantes pelos diagramas que serão feitos no *FTool*. Com isso, com esses valores fornecidos, é necessário colocá-los na seguinte combinação exigida pela norma:

$$F_d = \gamma_G \cdot \sum_{i=1}^n F_{gk,i} + \gamma_Q \cdot (F_{qk,j} + \sum_{j=2}^n F_{qk,j} \cdot \psi_{0,j})$$

onde:

- F_g : ações permanentes
- F_q : ações acidentais
- γ_G e γ_Q : fatores de segurança
- ψ_0 : fator de combinação

Como há apenas o vento como ação acidental, o que implica em uma minoração para 75%, a combinação fica da seguinte forma:

$$F_d = \gamma_G \cdot F_{permanente} + \gamma_Q \cdot (0,75 \cdot F_{vento_{sobrepessão/sucção}})$$

onde:

- $\gamma_G = 1,4$ (para efeitos desfavoráveis)
- $\gamma_G = 0,9$ (para efeitos favoráveis)
- $\gamma_Q = 1,4$

- Flexo-compressão

Pela norma, as condições de segurança são dadas por:

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

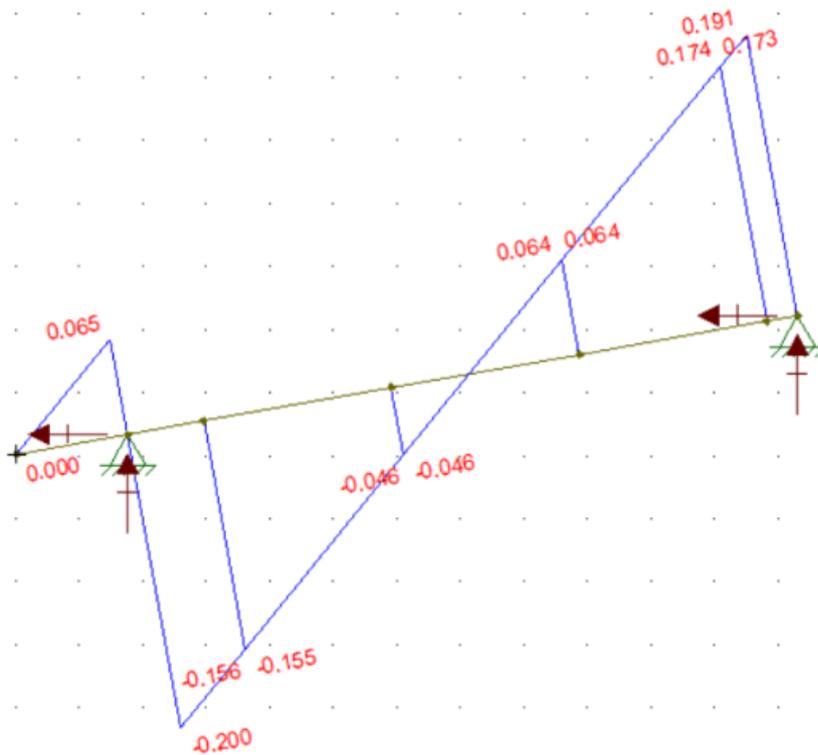
$$\left(\frac{\sigma_{N_{c,d}}}{f_{c0,d}}\right)^2 + K_m \cdot \frac{\sigma_{M_{x,d}}}{f_{c0,d}} + \frac{\sigma_{M_{y,d}}}{f_{c0,d}} \leq 1$$

onde:

- $\sigma_N = \frac{N_d}{A}$
- $\sigma_M = \frac{M \cdot y}{I}$
- $K_m = 0,5$ (seção *retangular*)

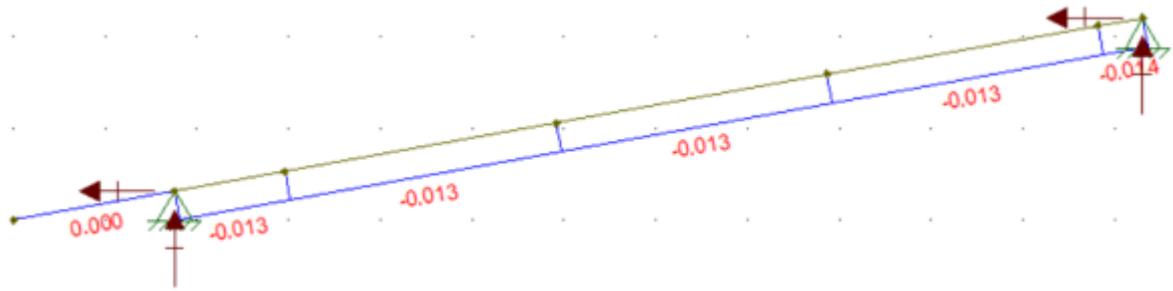
Com base nessas fórmulas, seguem abaixo os diagramas de esforço normal e momento fletor, para obter os valores críticos para cada situação.

Figura 32 – Diagrama de normal devido às cargas permanentes



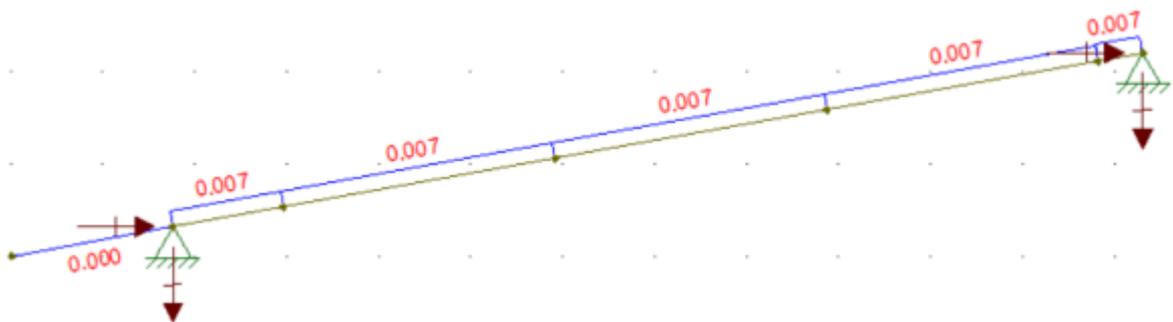
Elaboração própria.

Figura 33 – Diagrama de normal devido ao vento de sobrepressão



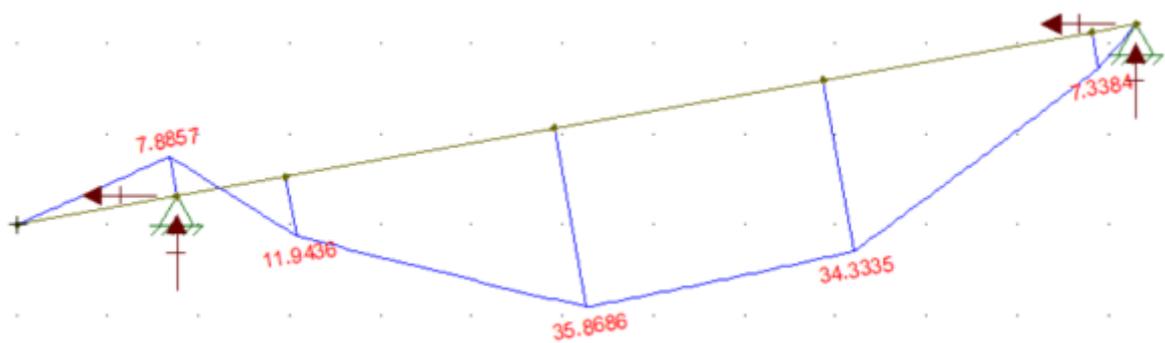
Elaboração própria.

Figura 34 – Diagrama de normal devido ao vento de sucção



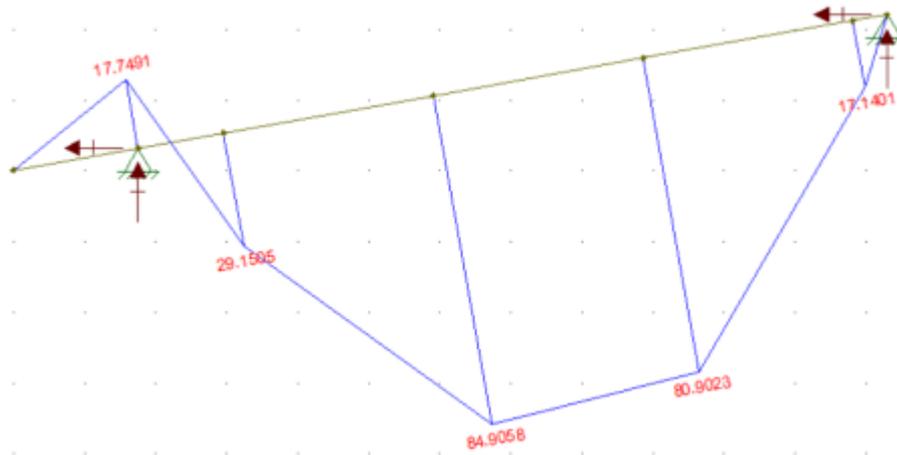
Elaboração própria.

Figura 35 – Diagrama de momento fletor devido às cargas permanentes



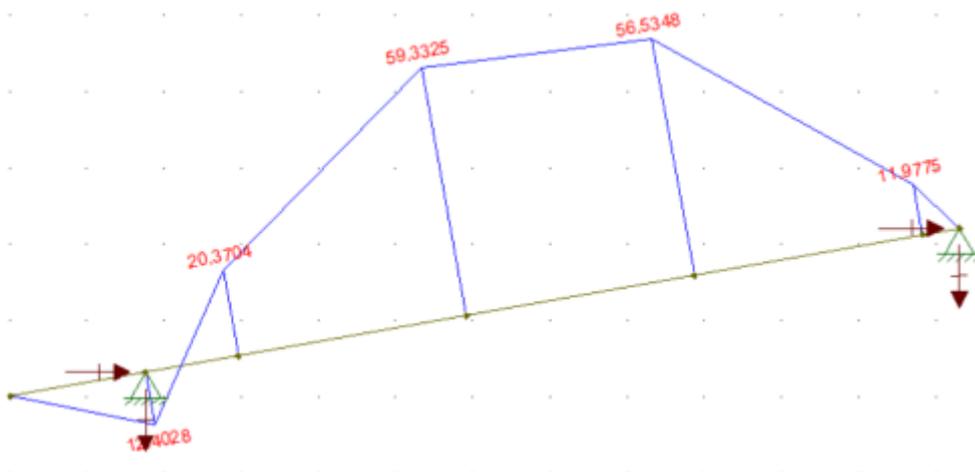
Elaboração própria.

Figura 36 – Diagrama de momento fletor devido ao vento de sobrepressão



Elaboração própria.

Figura 37 – Diagrama de momento fletor devido ao vento de sucção



Elaboração própria.

Com base nos diagramas acima, nota-se que o ponto de maior esforço normal ocorre no apoio da esquerda e o ponto mais crítico de momento fletor ocorre na viga terça 3, logo, realizando as condições de verificação para estes pontos, todos os outros também estarão verificados.

- Apoio da Esquerda

- Normal

- Carga permanente + vento de sobrepressão

$$N_d = \gamma_G \cdot N_{permanente} + \gamma_Q \cdot (0,75 \cdot N_{vento_sobrepressão})$$

$$N_d = 1,4 \cdot (-0,200) + 1,4 \cdot [0,75 \cdot (-0,013)]$$

$$N_d = -0,294 \text{ kN}$$

- Carga permanente + vento de sucção

$$N_d = \gamma_G \cdot N_{permanente} + \gamma_Q \cdot (0,75 \cdot N_{vento_{sucção}})$$

$$N_d = 0,9 \cdot (-0,200) + 1,4 \cdot [0,75 \cdot 0,007]$$

$$N_d = -0,173 \text{ kN}$$

- Momento fletor

- Carga permanente + vento de sobrepressão

$$M_d = \gamma_G \cdot M_{permanente} + \gamma_Q \cdot (0,75 \cdot M_{vento_{sobrepressão}})$$

$$M_d = 1,4 \cdot 7,886 + 1,4 \cdot [0,75 \cdot 17,749]$$

$$M_d = 29,677 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

- Carga permanente + vento de sucção

$$M_d = \gamma_G \cdot M_{permanente} + \gamma_Q \cdot (0,75 \cdot M_{vento_{sucção}})$$

$$M_d = 0,9 \cdot 7,886 + 1,4 \cdot [0,75 \cdot (-12,403)]$$

$$M_d = -5,926 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Pelos cálculos acima, tem-se que os valores críticos são $N_d = -0,294 \text{ kN}$ e $M_d = 29,677 \text{ kN} \cdot \text{m}$. Logo:

$$\sigma_N = \frac{N_d}{A} = \frac{-0,294}{0,16 \cdot 0,24} = -7,656 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$\sigma_M = \frac{M \cdot y}{I_y} = \frac{29,677 \cdot \frac{0,24}{2}}{\frac{0,16 \cdot 0,24^3}{12}} = 19320,964 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Com os valores das tensões, e tendo que a normal de compressão tem mesmo valor da normal de tração, é possível verificar quanto à flexo-compressão:

$$\left(\frac{-7,656}{15000}\right)^2 + \frac{19320,964}{15000} + 0,5 \cdot \frac{0}{15000} = 1,288 \leq 1 \text{ NÃO OK!}$$

$$\left(\frac{-7,656}{15000}\right)^2 + 0,5 \cdot \frac{19320,964}{15000} + \frac{0}{15000} = 0,644 \leq 1 \text{ OK!}$$

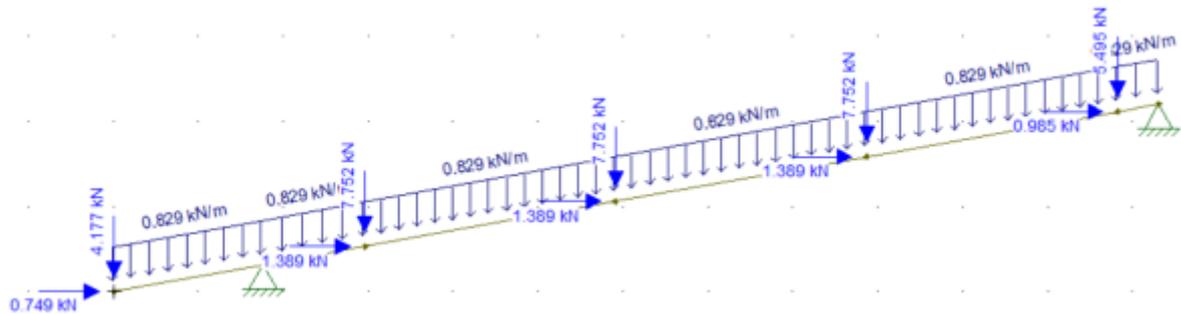
Pela verificação acima, nota-se que a seção adotada não é suficiente para atender à estrutura do projeto, com isso, os cálculos serão refeitos considerando a nova seção já determinada em caso de necessidade (320 mm x 480 mm). Para tal, será calculado o novo peso próprio da seção, implicando em um novo valor de aplicação, e conseqüentemente, novos diagramas de esforços solicitantes.

- Peso próprio da viga principal

$$P_{\text{próprio viga principal}} = b \cdot h \cdot 550 \cdot 9,81 = 0,32 \text{ m} \cdot 0,48 \text{ m} \cdot 550 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

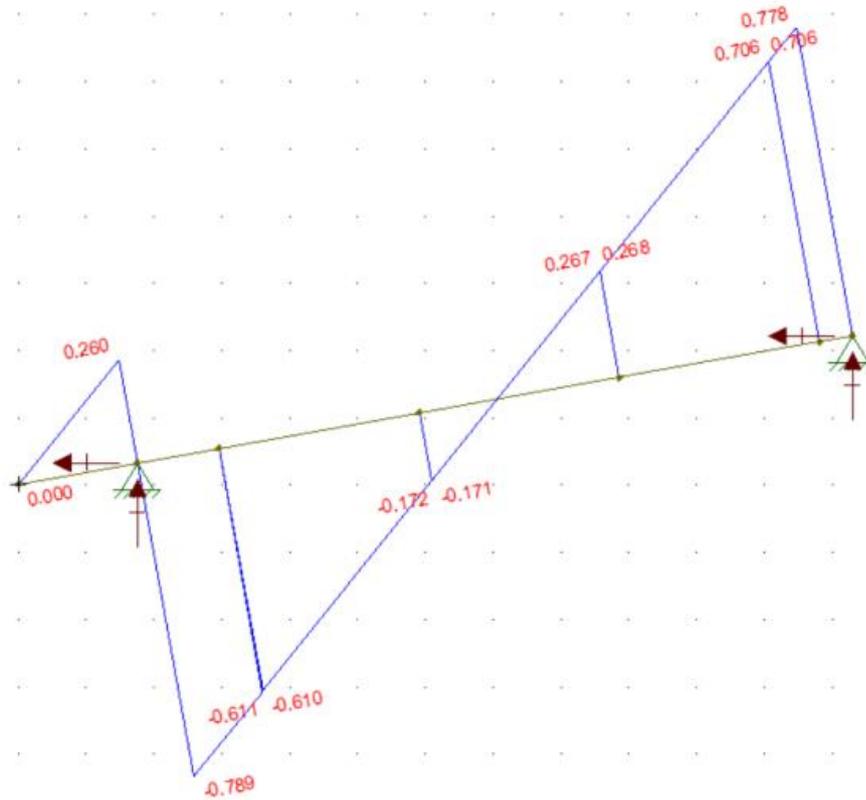
$$P_{\text{próprio viga principal}} = 829 \frac{\text{kg}}{\text{s}^2} = 829 \frac{\text{N}}{\text{m}} = 0,829 \text{ kN/m}$$

Figura 38 – Forças permanentes aplicadas na viga principal com nova seção



Elaboração própria.

Figura 39 – Diagrama de normal com nova seção devido às cargas permanentes



Elaboração própria.

Figura 40 – Diag. de momento fletor com nova seção devido às cargas permanentes



Elaboração própria.

- Apoio da Esquerda

- Normal

- Carga permanente + vento de sobrepessão

$$N_d = \gamma_G \cdot N_{permanente} + \gamma_Q \cdot (0,75 \cdot N_{vento\text{ sobrepessão}})$$

$$N_d = 1,4 \cdot (-0,789) + 1,4 \cdot [0,75 \cdot (-0,013)]$$

$$N_d = -1,118 \text{ kN}$$

- Carga permanente + vento de sucção

$$N_d = \gamma_G \cdot N_{permanente} + \gamma_Q \cdot (0,75 \cdot N_{vento_{sucção}})$$

$$N_d = 0,9 \cdot (-0,789) + 1,4 \cdot [0,75 \cdot 0,007]$$

$$N_d = -0,703 \text{ kN}$$

- Momento fletor

- Carga permanente + vento de sobrepressão

$$M_d = \gamma_G \cdot M_{permanente} + \gamma_Q \cdot (0,75 \cdot M_{vento_{sobrepressão}})$$

$$M_d = 1,4 \cdot 8,858 + 1,4 \cdot [0,75 \cdot 17,749]$$

$$M_d = 31,038 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

- Carga permanente + vento de sucção

$$M_d = \gamma_G \cdot M_{permanente} + \gamma_Q \cdot (0,75 \cdot M_{vento_{sucção}})$$

$$M_d = 0,9 \cdot 8,858 + 1,4 \cdot [0,75 \cdot (-12,403)]$$

$$M_d = -5,051 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Pelos cálculos acima, tem-se que os valores críticos são $N_d = -1,118 \text{ kN}$ e $M_d = 31,038 \text{ kN} \cdot \text{m}$. Logo:

$$\sigma_N = \frac{N_d}{A} = \frac{-1,118}{0,32 \cdot 0,48} = -7,279 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$\sigma_M = \frac{M \cdot y}{I_y} = \frac{31,038 \cdot \frac{0,48}{2}}{\frac{0,32 \cdot 0,48^3}{12}} = 2525,879 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Com os valores das tensões, e tendo que a normal de compressão tem mesmo valor da normal de tração, é possível verificar quanto à flexo-compressão:

$$\left(\frac{-7,279}{15000}\right)^2 + \frac{2525,879}{15000} + 0,5 \cdot \frac{0}{15000} = 0,168 \leq 1 \quad \text{OK!}$$

$$\left(\frac{-7,279}{15000}\right)^2 + 0,5 \cdot \frac{2525,879}{15000} + \frac{0}{15000} = 0,084 \leq 1 \quad \text{OK!}$$

- Viga terça 3

- Normal

- Carga permanente + vento de sobrepressão

$$N_d = \gamma_G \cdot N_{permanente} + \gamma_Q \cdot (0,75 \cdot N_{vento_{sobrepressão}})$$

$$N_d = 1,4 \cdot (-0,172) + 1,4 \cdot [0,75 \cdot (-0,013)]$$

$$N_d = -0,254 \text{ kN}$$

- Carga permanente + vento de sucção

$$N_d = \gamma_G \cdot N_{permanente} + \gamma_Q \cdot (0,75 \cdot N_{vento_{sucção}})$$

$$N_d = 0,9 \cdot (-0,172) + 1,4 \cdot [0,75 \cdot 0,007]$$

$$N_d = -0,147 \text{ kN}$$

- Momento fletor

- Carga permanente + vento de sobrepressão

$$M_d = \gamma_G \cdot M_{permanente} + \gamma_Q \cdot (0,75 \cdot M_{vento_{sobrepressão}})$$

$$M_d = 1,4 \cdot 43,661 + 1,4 \cdot [0,75 \cdot 84,906]$$

$$M_d = 150,277 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

- Carga permanente + vento de sucção

$$M_d = \gamma_G \cdot M_{permanente} + \gamma_Q \cdot (0,75 \cdot M_{vento_{sucção}})$$

$$M_d = 0,9 \cdot 43,661 + 1,4 \cdot [0,75 \cdot (-59,333)]$$

$$M_d = -23,005 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Pelos cálculos acima, tem-se que os valores críticos são $N_d = -0,254 \text{ kN}$ e $M_d = 150,277 \text{ kN} \cdot \text{m}$. Logo:

$$\sigma_N = \frac{N_d}{A} = \frac{-0,254}{0,32 \cdot 0,48} = -1,654 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$\sigma_M = \frac{M \cdot y}{I_y} = \frac{150,277 \cdot \frac{0,48}{2}}{\frac{0,32 \cdot 0,48^3}{12}} = 12229,574 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Com os valores das tensões, e tendo que a normal de compressão tem mesmo valor da normal de tração, é possível verificar quanto à flexo-compressão:

$$\left(\frac{-1,654}{15000}\right)^2 + \frac{12229,574}{15000} + 0,5 \cdot \frac{0}{15000} = 0,815 \leq 1 \quad \mathbf{OK!}$$

$$\left(\frac{-1,654}{15000}\right)^2 + 0,5 \cdot \frac{12229,574}{15000} + \frac{0}{15000} = 0,408 \leq 1 \quad \mathbf{OK!}$$

Como a seção de (320 mm x 480 mm) atendeu à verificação de flexo-compressão, há prosseguimento no cálculo das próximas verificações.

- Cisalhamento

Segundo à norma, a condição a ser atendida é dada por:

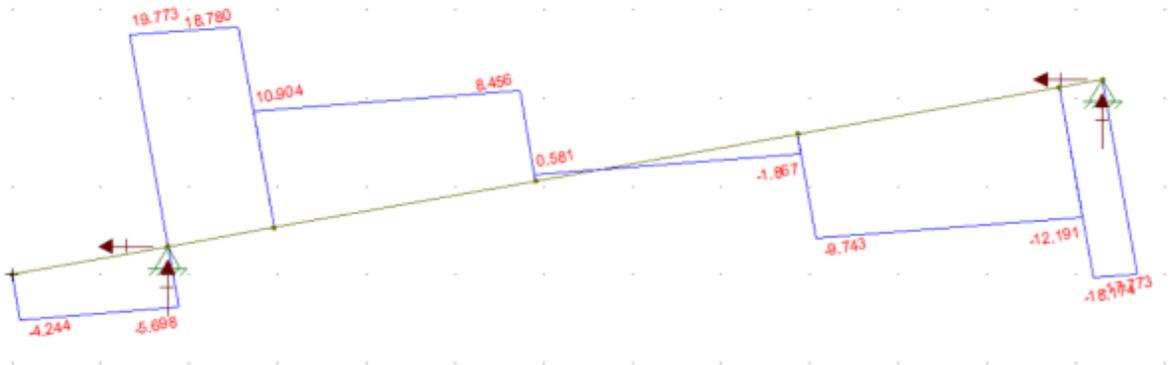
$$\tau_d = \frac{3 \cdot V}{2b \cdot h} \leq f_{v,d}$$
$$f_{v,d} = \frac{K_{mod} \cdot f_{v,k}}{\gamma_{v,w}} = \frac{0,7 \cdot 6}{1,8} = 2,333 \text{ MPa} = 2333,333 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

onde:

- $f_{v,k} = 6 \text{ MPa}$ (conífera C30)
- $\gamma_{v,w} = 1,8$ (coeficiente de minoração)

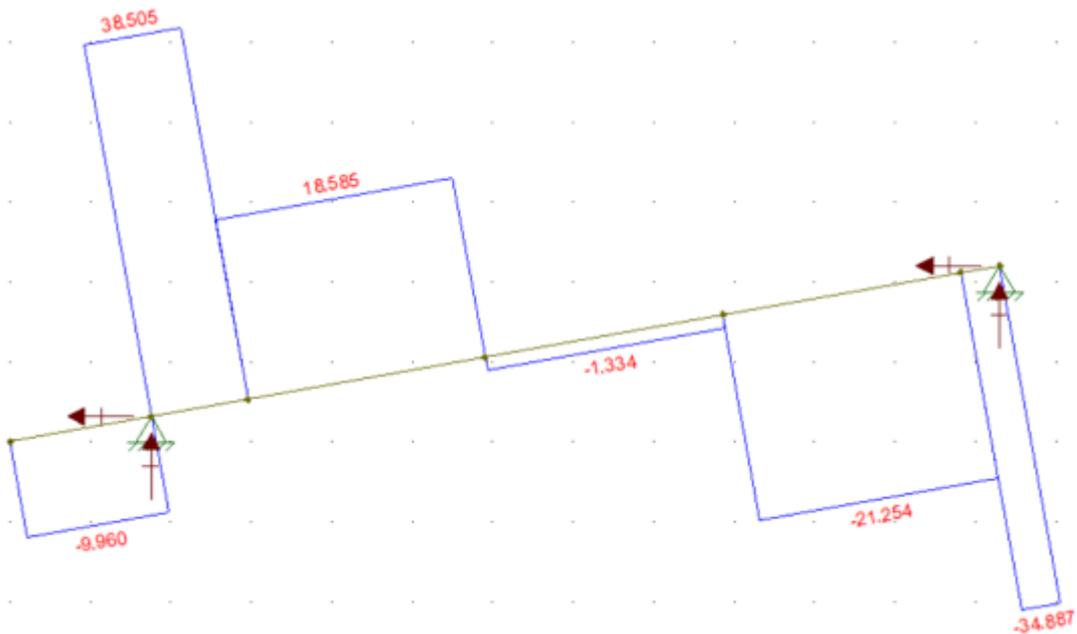
Com isso, para prosseguir com os cálculos, é necessário produzir o diagrama de esforço cortante, para obter o ponto mais crítico e realizar a verificação quanto ao cisalhamento.

Figura 41 – Diagrama de cortante com nova seção devido às cargas permanentes



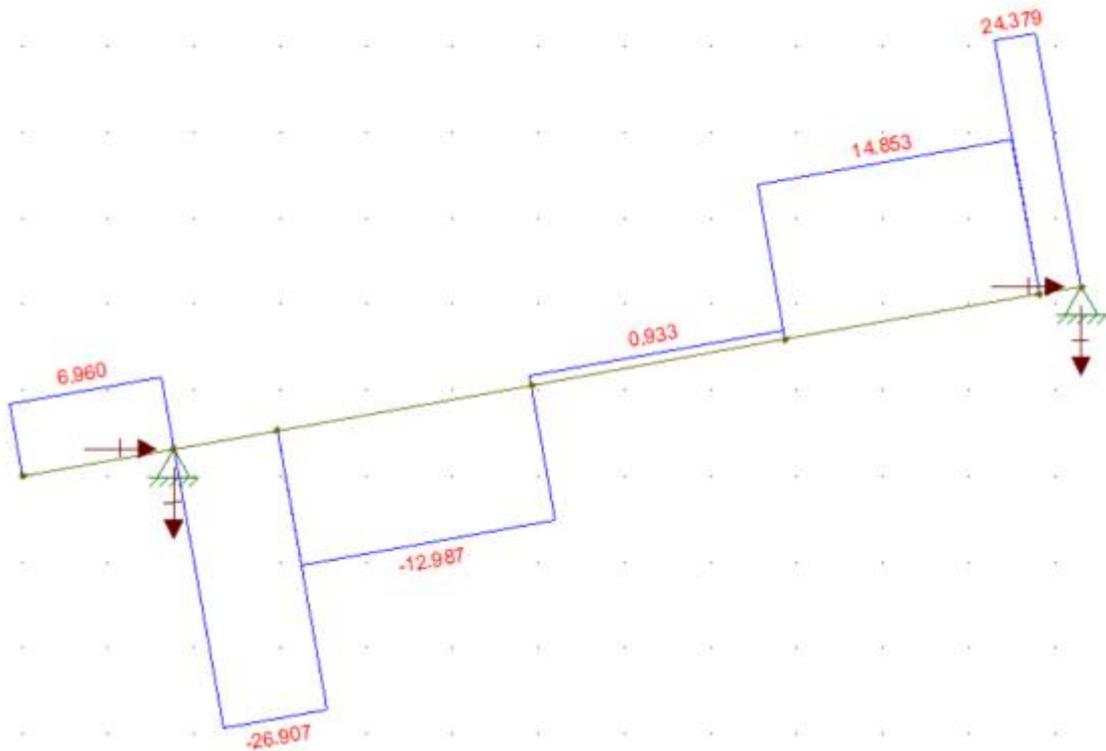
Elaboração própria.

Figura 42 – Diagrama de cortante com nova seção devido ao vento de sobrepressão



Elaboração própria.

Figura 43 - Diagrama de cortante com nova seção devido ao vento de sucção



Elaboração própria.

Com base nos diagramas acima, nota-se que o ponto de esforço cortante mais crítico ocorre no apoio da esquerda, logo, realizando as condições de verificação para este ponto, todos os outros também estarão verificados.

- Apoio da Esquerda

- Carga permanente + vento de sobrepessão

$$V_d = \gamma_G \cdot V_{permanente} + \gamma_Q \cdot (0,75 \cdot V_{vento_{sobrepessão}})$$

$$V_d = 1,4 \cdot 19,773 + 1,4 \cdot [0,75 \cdot 38,505]$$

$$V_d = 68,112 \text{ kN}$$

- Carga permanente + vento de sucção

$$V_d = \gamma_G \cdot V_{permanente} + \gamma_Q \cdot (0,75 \cdot V_{vento_{sucção}})$$

$$V_d = 0,9 \cdot 19,773 + 1,4 \cdot [0,75 \cdot (-26,907)]$$

$$V_d = -10,457 \text{ kN}$$

Pelas combinações, o valor mais crítico de cortante é $V_d = 68,056 \text{ kN}$. Logo:

$$\tau_d = \frac{3 \cdot V}{2b \cdot h} = \frac{3 \cdot 68,112}{2 \cdot 0,32 \cdot 0,48} = 665,156 \frac{kN}{m^2} \leq f_{v,d}$$

$$\tau_d = 665,156 \frac{kN}{m^2} \leq f_{v,d} = 2333,333 \frac{kN}{m^2}$$

$$665,156 \frac{kN}{m^2} \leq 2333,333 \frac{kN}{m^2} \quad \mathbf{OK!}$$

- Estabilidade lateral da viga

Para a estabilidade lateral, serão considerados 3 fatores: $\beta_E = 4$ (coeficiente de correção) e $\gamma_f = 1,4$ (coeficiente de ponderação), além disso, o último fator é a relação $\frac{h}{b} = \frac{48 \text{ cm}}{32 \text{ cm}} = 1,5$. Com esses valores, é possível calcular o seguinte coeficiente de correção:

$$\beta_M = \frac{1}{0,26 \cdot \pi} \cdot \frac{\beta_E}{\gamma_f} \cdot \frac{\frac{h^3}{b}}{\left(\frac{h}{b} - 0,63\right)^{\frac{1}{2}}} = \frac{1}{0,26 \cdot \pi} \cdot \frac{4}{1,4} \cdot \frac{1,5^{\frac{3}{2}}}{(1,5 - 0,63)^{\frac{1}{2}}} = 6,889$$

Segundo a norma, a verificação deve ser realizada segundo a seguinte fórmula:

$$\frac{L_1}{b} \leq \frac{E_{c0,ef}}{\beta_M \cdot f_{c0,d}}$$

onde:

- $E_{c0,m} = 14500 \text{ MPa}$ (módulo de elasticidade médio para conífera C30)

- $K_{mod} = 0,7$

- $E_{c0,ef} = E_{c0,m} \cdot K_{mod} = 14500 \cdot 0,7 = 10150 \text{ MPa}$

$$E_{c0,ef} = 10150000 \frac{kN}{m^2} \text{ (mód. de elasticidade efetivo)}$$

- $f_{c0,d} = 15 \text{ MPa} = 15000 \frac{kN}{m^2}$

- $L_1 = 3 \text{ m}$ (distância entre vigas terças)

- $b = 0,32 \text{ m}$ (base da seção)

Substituindo todos os valores, é possível realizar a verificação:

$$\frac{3}{0,32} \leq \frac{10150000}{6,889 \cdot 15000}$$
$$9,375 \leq 98,224 \quad \mathbf{OK!}$$

- Estado limite de serviço

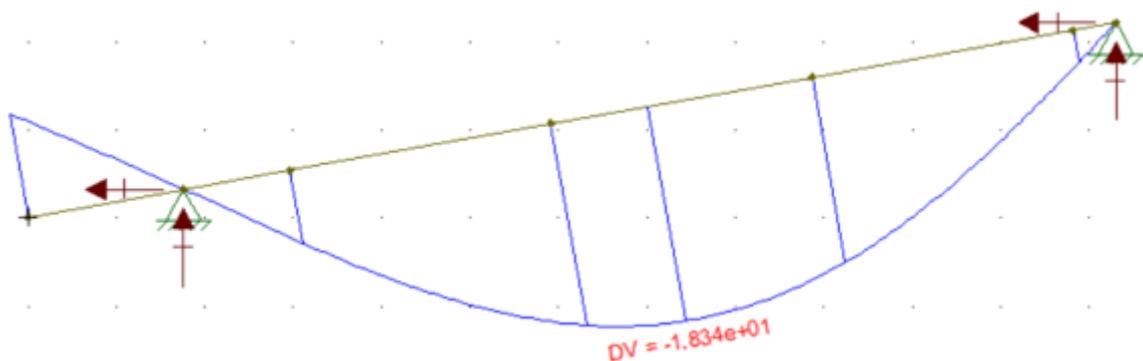
Por fim, a última verificação é quanto ao estado limite de serviço (ELS), onde é analisado o máximo deslocamento vertical devido às forças aplicadas na viga. Com isso, segundo a norma, a combinação de deslocamento vertical devido às cargas permanentes e acidentais é dada por:

$$D_d = \sum_{i=1}^m D_{g_{k,i}} + F_{q_{k,j}} + \sum_{j=1}^n \psi_{2,j} \cdot D_{q_{k,j}}$$

Devido à pressão dinâmica do vento, tem-se $\psi_{2,j} = 0$, com isso, a combinação é simplificada com apenas o primeiro termo da equação, de modo que a verificação depende apenas da flecha devido às cargas permanentes:

$$D_d = \sum_{i=1}^m D_{g_{k,i}}$$

Figura 44 – Deslocamento vertical máximo da viga devido às cargas permanentes



Elaboração própria.

Com o valor do deslocamento, é feita a seguinte verificação:

$$\frac{L}{200} \geq D_d$$

onde:

$$- L = 12,5531 \text{ m (comprimento da viga)}$$

$$\frac{12,5531 \text{ m}}{200} \geq 0,01834 \text{ m}$$

$$0,0628 \text{ m} \geq 0,01834 \text{ m}$$

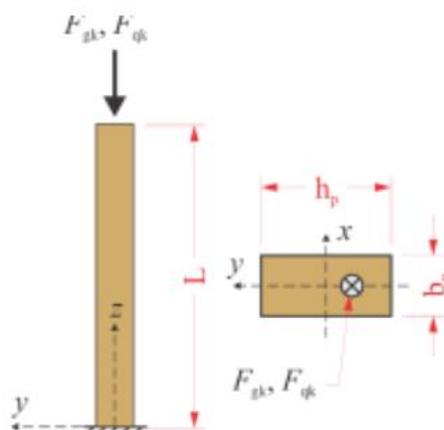
$$62,8 \text{ mm} \geq 18,34 \text{ mm} \quad \mathbf{OK!}$$

Logo, a seção de 320 mm x 480 mm atende às condições de segurança e é suficiente para atender às necessidades de projeto.

- Pilar

Para o pilar, ele será dimensionado para atender o estado limite último (ELU) quanto à flexo-compressão, e estabilidade nas direções x e y. Para tal, foram consideradas as seguintes características para o cálculo:

Figura 45 – Estrutura do pilar



Elaboração própria.

onde:

- $L = 800 \text{ cm}$ (comprimento do pilar)
- $F_{gk} = 2,07 \text{ kN}$ (força permanente devido ao peso da viga principal)
- $F_{qk} = 3,10 \text{ kN}$ (força acidental devido ao vento)
- $e_y = 2 \text{ cm}$ (excentricidade quanto ao CG da seção)
- Classe C20 – $f_{c0,k} = 20 \text{ MPa} = 2 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$
- $K_{mod} = 0,7$
- $\gamma_w = 1,4$

Vale ressaltar que a largura b_p deve ser igual ou superior a largura da viga dimensionada anteriormente. Além disso, para atender seções comerciais, tem-se que a altura h_p deve ser múltipla de 40 mm e a largura b_p múltipla de 140 ou 160 mm.

- Dados do projeto/chute inicial

- $b_p = 32 \text{ cm}$ (igual ao calculado para a viga)
- $h_p = 16 \text{ cm}$ (chute inicial – menor seção comercial possível)
- $f_{vk} = 4 \text{ MPa} = 0,4 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$ (conífera C20)
- $\phi = 0,8$ (classe de umidade 1)
- $L_0 = 2 \cdot L = 2 \cdot 800 \text{ cm} = 1600 \text{ cm}$ (uma extremidade livre e outra engastada)
- $E_{c0,m} = 3500 \text{ MPa} = 350 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$ (módulo de elasticidade médio para conífera C20)

- Momento de Inércia

Para a seção retangular de 32 x 16 cm, tem-se os seguintes momentos de inércia em relação aos eixos x e y:

$$I_x = \frac{b_p \cdot h_p^3}{12} = \frac{32 \text{ cm} \cdot (16 \text{ cm})^3}{12} = 10922,667 \text{ cm}^4$$

$$I_y = \frac{h_p \cdot b_p^3}{12} = \frac{16 \text{ cm} \cdot (32 \text{ cm})^3}{12} = 43690,667 \text{ cm}^4$$

- Resistência na compressão e módulo de elasticidade efetivo

$$f_{c0,d} = f_{t0,d} = \frac{K_{mod} \cdot f_{c,k}}{\gamma_{v,w}} = \frac{0,7 \cdot 2}{1,4} = 1,0 \frac{kN}{cm^2}$$

$$f_{v,d} = \frac{K_{mod} \cdot f_{v,k}}{\gamma_{v,w}} = \frac{0,7 \cdot 0,4}{1,8} = 0,156 \frac{kN}{cm^2}$$

$$E_{c0,ef} = E_{c0,m} \cdot K_{mod} = 350 \cdot 0,7 = 245 \frac{kN}{cm^2}$$

- Solicitações

Como há apenas o vento como ação acidental, o que implica em uma minoração para 75%, a combinação pode ser calculada da mesma forma que no processo de vigas:

$$F_d = \gamma_G \cdot F_{permanente} + \gamma_Q \cdot (0,75 \cdot F_{acidental})$$

- Normal

$$N_{sd} = N_{cd} = 1,4 \cdot F_{g,k} + 1,4 \cdot (0,75 \cdot F_{q,k})$$

$$N_{sd} = N_{cd} = 1,4 \cdot 2,07 + 1,4 \cdot (0,75 \cdot 3,1) = 6,153 \text{ kN}$$

- Momento

$$M_{s,xd} = 1,4 \cdot F_{g,k} \cdot e_y + 1,4 \cdot (0,75 \cdot F_{q,k}) \cdot e_y$$

$$M_{s,xd} = 1,4 \cdot 2,07 \cdot 2 + 1,4 \cdot (0,75 \cdot 3,1) \cdot 2 = 12,306 \text{ kN} \cdot \text{cm}$$

$$M_{s,yd} = 0 \text{ (não há excentricidade no eixo } x)$$

- Flexo-compressão

- Tensão normal

$$\sigma_{N,d} = \frac{N_{cd}}{A} = \frac{6,153 \text{ kN}}{16 \text{ cm} \cdot 32 \text{ cm}} = 0,012 \frac{kN}{cm^2}$$

- Momento devido à ação vertical axial

$$M_{N,d} = N_{c,d} \cdot e_y = 6,153 \cdot 2 = 12,306 \text{ kN} \cdot \text{cm}$$

- Tensão de flexão

$$\sigma_{Mx,d} = \frac{M_{x,d} \cdot \frac{h_p}{2}}{I_x} = \frac{12,306 \text{ kN} \cdot \text{cm} \cdot \frac{16 \text{ cm}}{2}}{10922,667 \text{ cm}^4} = 0,009 \text{ kN/cm}^2$$

Com os valores das tensões, e tendo que a normal de compressão tem mesmo valor da normal de tração, é possível verificar quanto à flexo-compressão:

$$\left(\frac{\sigma_{N_d}}{f_{c0,d}} \right)^2 + K_m \cdot \frac{\sigma_{M_{x,d}}}{f_{c0,d}} + \frac{\sigma_{M_{y,d}}}{f_{c0,d}} \leq 1$$
$$\left(\frac{0,012}{1,0} \right)^2 + 0,5 \cdot \frac{0,009}{1,0} + \frac{0}{1,0} = 0,00464 \leq 1 \quad \mathbf{OK!}$$

$$\left(\frac{\sigma_{N_d}}{f_{c0,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{M_{x,d}}}{f_{c0,d}} + K_m \cdot \frac{\sigma_{M_{y,d}}}{f_{c0,d}} \leq 1$$
$$\left(\frac{0,012}{1,0} \right)^2 + \frac{0,009}{1,0} + 0,5 \cdot \frac{0}{1,0} = 0,00914 \leq 1 \quad \mathbf{OK!}$$

- Instabilidade lateral do pilar

Estabilidade em relação ao eixo x

- Índice de esbeltez (λ)

Para o índice de esbeltez, o primeiro passo é calcular o raio de giração, para posteriormente obter o índice:

$$i_x = \sqrt{\frac{I_x}{b_p \cdot h_p}} = \sqrt{\frac{10922,667 \text{ cm}^4}{32 \text{ cm} \cdot 16 \text{ cm}}} = 4,619 \text{ cm}$$

$$\lambda_x = \frac{L_0}{i_x} = \frac{1600 \text{ cm}}{4,619 \text{ cm}} = 346,395$$

O valor do índice obtido, que é muito maior que o valor limite de 140 para esbeltez, faz com que os cálculos sejam refeitos considerando uma nova seção. Nesse caso, a nova seção será de 42 x 40 cm.

- Momento de inércia nova seção

$$I_x = \frac{b_p \cdot h_p^3}{12} = \frac{42 \text{ cm} \cdot (40 \text{ cm})^3}{12} = 224000,000 \text{ cm}^4$$

$$I_y = \frac{h_p \cdot b_p^3}{12} = \frac{40 \text{ cm} \cdot (42 \text{ cm})^3}{12} = 246960,000 \text{ cm}^4$$

- Resistência e Solicitações

A resistência de compressão paralela às fibras e as solicitações combinadas continuam com os mesmos valores calculados anteriormente pois não dependem da seção transversal do pilar.

- Flexo-compressão

Quanto à flexo-compressão, não é necessário recalculá-la pois o cálculo anterior foi feito para uma seção menor e esta já era adequada, com isso, uma seção maior também já está verificada, como a nova seção de 48 x 44 cm.

- Índice de esbeltez (λ) nova seção

$$i_x = \sqrt{\frac{I_x}{b_p \cdot h_p}} = \sqrt{\frac{224000,000 \text{ cm}^4}{42 \text{ cm} \cdot 40 \text{ cm}}} = 11,547 \text{ cm}$$

$$\lambda_x = \frac{L_0}{i_x} = \frac{1600 \text{ cm}}{11,547 \text{ cm}} = 138,564$$

Como o novo valor do índice obtido se situa entre 80 e 140, a peça é classificada

como esbelta, implicando nos seguintes cálculos para finalizar a verificação quanto à estabilidade do pilar em relação ao eixo x.

- Carga crítica de flambagem ($F_{cr,x}$)

$$F_{cr,x} = \frac{\pi^2 \cdot E_{c0,ef} \cdot I_x}{L_{ef}^2} = \frac{\pi^2 \cdot 245 \text{ kN/cm}^2 \cdot 224000 \text{ cm}^4}{(1600 \text{ cm})^2} = 211,579 \text{ kN}$$

- Excentricidade de primeira ordem decorrente da situação de projeto ($e_{i,x}$)

$$e_{i,x} = \frac{M_{1,d}}{N_{s,d}} = \frac{M_{s,x,d}}{N_{s,d}} = \frac{12,306 \text{ kN} \cdot \text{cm}}{6,153 \text{ kN}} = 2 \text{ cm}$$

- Excentricidade acidental mínima ($e_{a,x}$)

$$e_{a,x} = \frac{L_0}{300} = \frac{1600 \text{ cm}}{300} = 5,33 \text{ cm}$$

- Excentricidade suplementar de primeira ordem ($e_{c,x}$)

$$e_{c,x} = (e_{i,x} + e_{a,x}) \cdot \left(\exp \left(\frac{\phi \cdot (N_{g,k} + \psi \cdot N_{q,k})}{F_{cr,x} - (N_{g,k} + \psi \cdot N_{q,k})} \right) - 1 \right)$$

onde:

- $\psi_1 = 0,3$ e $\psi_2 = 0,2$ (sem predominância de pessoas e de equipamentos fixos)
- $\psi = \psi_1 + \psi_2 = 0,5$
- $N_{g,k} = 1,4 \cdot F_{g,k} = 1,4 \cdot 2,07 = 2,898 \text{ kN}$
- $N_{q,k} = 0,75 \cdot 1,4 \cdot F_{q,k} = 0,75 \cdot 1,4 \cdot 3,1 = 3,255 \text{ kN}$

$$e_{c,x} = (2 + 5,33) \cdot \left(\exp \left(\frac{0,8 \cdot (2,898 + 0,5 \cdot 3,255)}{211,579 - (2,898 + 0,5 \cdot 3,255)} \right) - 1 \right) = 0,129 \text{ cm}$$

- **Excentricidade efetiva de primeira ordem ($e_{1,ef}$)**

$$e_{1,ef} = e_{i,x} + e_{a,x} + e_{c,x} = 2 \text{ cm} + 5,33 \text{ cm} + 0,129 \text{ cm} = 7,459 \text{ cm}$$

- **Verificação quanto à instabilidade**

$$M_{d,x} = N_{sd} \cdot e_{1,ef} = 6,153 \text{ kN} \cdot 7,459 \text{ cm} = 45,895 \text{ kN} \cdot \text{cm}$$

$$\sigma_{Mx} = \frac{M_{x,d} \cdot \frac{h_p}{2}}{I_x} = \frac{45,895 \text{ kN} \cdot \text{cm} \cdot \frac{40 \text{ cm}}{2}}{224000 \text{ cm}^4} = 0,00409 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

$$\sigma_N = \frac{N_{sd}}{A} = \frac{6,153 \text{ kN}}{42 \text{ cm} \cdot 40 \text{ cm}} = 0,00366 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

$$\frac{\sigma_{Mx}}{f_{c0,d}} + \frac{\sigma_N}{f_{c0,d}} < 1$$

$$\frac{0,00409}{1,0} + \frac{0,00366}{1,0} = 0,00776 < 1 \quad \mathbf{OK!}$$

Estabilidade em relação ao eixo y

- **Índice de esbeltez (λ)**

$$i_y = \sqrt{\frac{I_y}{b_p \cdot h_p}} = \sqrt{\frac{246960 \text{ cm}^4}{42 \text{ cm} \cdot 40 \text{ cm}}} = 12,124 \text{ cm}$$

$$\lambda_y = \frac{L_0}{i_y} = \frac{1600 \text{ cm}}{12,124 \text{ cm}} = 131,969 \text{ (peça esbelta)}$$

- **Carga crítica de flambagem ($F_{cr,y}$)**

$$F_{cr,y} = \frac{\pi^2 \cdot E_{c0,ef} \cdot I_y}{L_{ef}^2} = \frac{\pi^2 \cdot 245 \text{ kN/cm}^2 \cdot 246960 \text{ cm}^4}{(1600 \text{ cm})^2} = 233,266 \text{ kN}$$

- **Excentricidade de primeira ordem decorrente da situação de projeto ($e_{i,x}$)**

$$e_{i,y} = \frac{M_{1,d}}{N_{s,d}} = \frac{M_{s_y,d}}{N_{s,d}} = \frac{0 \text{ kN} \cdot \text{cm}}{6,153 \text{ kN}} = 0 \text{ cm}$$

- **Excentricidade acidental mínima ($e_{a,y}$)**

$$e_{a,y} = \frac{L_0}{300} = \frac{1600 \text{ cm}}{300} = 5,33 \text{ cm}$$

- **Excentricidade suplementar de primeira ordem ($e_{c,y}$)**

$$e_{c,y} = (e_{i,y} + e_{a,y}) \cdot \left(\exp \left(\frac{\phi \cdot (N_{g,k} + \psi \cdot N_{q,k})}{F_{cr,y} - (N_{g,k} + \psi \cdot N_{q,k})} \right) - 1 \right)$$

onde:

- $\psi_1 = 0,3$ e $\psi_2 = 0,2$ (sem predominância de pessoas e de equipamentos fixos)

- $\psi = \psi_1 + \psi_2 = 0,5$

- $N_{g,k} = 1,4 \cdot F_{g,k} = 1,4 \cdot 2,07 = 2,898 \text{ kN}$

- $N_{q,k} = 0,75 \cdot 1,4 \cdot F_{q,k} = 0,75 \cdot 1,4 \cdot 3,1 = 3,255 \text{ kN}$

$$e_{c,y} = (0 + 5,33) \cdot \left(\exp \left(\frac{0,8 \cdot (2,898 + 0,5 \cdot 3,255)}{233,266 - (2,898 + 0,5 \cdot 3,255)} \right) - 1 \right) = 0,085 \text{ cm}$$

- **Excentricidade efetiva de primeira ordem ($e_{1,ef}$)**

$$e_{1,ef} = e_{i,y} + e_{a,y} + e_{c,y} = 0 \text{ cm} + 5,33 \text{ cm} + 0,085 \text{ cm} = 5,415 \text{ cm}$$

- **Verificação quanto à instabilidade**

$$M_{d,y} = N_{sd} \cdot e_{1,ef} = 6,153 \text{ kN} \cdot 5,415 \text{ cm} = 33,318 \text{ kN} \cdot \text{cm}$$

$$\sigma_{My} = \frac{M_{y,d} \cdot \frac{b_p}{2}}{I_y} = \frac{33,343 \text{ kN} \cdot \text{cm} \cdot \frac{42 \text{ cm}}{2}}{246960 \text{ cm}^4} = 0,00283 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

$$\sigma_N = \frac{N_{sd}}{A} = \frac{6,153 \text{ kN}}{42 \text{ cm} \cdot 40 \text{ cm}} = 0,00366 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

$$\frac{\sigma_{My}}{f_{c0,d}} + \frac{\sigma_N}{f_{c0,d}} < 1$$

$$\frac{0,00283}{1,0} + \frac{0,00366}{1,0} = 0,00649 < 1 \quad \mathbf{OK!}$$

Logo, a seção de 420 mm x 400 mm atende às condições de segurança e é suficiente para atender às necessidades de projeto.

Eucalyptus citriodora

- Viga

O projeto a ser calculado a seguir é exatamente o mesmo que o anterior, porém utilizando *Eucalyptus citriodora* de classe C30, com densidade aparente de 800 kg/m³, classe de umidade (1), carregamento preponderante de longa duração e madeira de primeira categoria.

Relembrando as medidas da figura 27, os pórticos tem vãos de 8 m entre si, as vigas terças são constituídas em perfis metálicos com 7,8 kg/m e espaçadas de 3 m entre si, cobertas por telhas com peso de 5,85 kg/m² e sob ação de uma força devida ao vento de sobrepressão de 0,83 kN/m² e de sucção de 0,58 N/m². Além disso, também será considerada uma carga técnica de 25 kg/m² para instalações de outras disciplinas da obra (elétricas, hidráulicas, proteção contra incêndio, refrigeração, etc.).

Por fim, vale a ressalva de que todos os processos serão repetidos com o máximo possível de valores iguais, para que fique bem clara a diferença entre o uso de cada tipo de madeira.

- Chute Inicial

Para iniciar o dimensionamento, o “chute inicial” para a seção será de 160 mm x 240 mm, porém, caso a seção não seja suficiente, será adotada uma seção maior que atenda às verificações.

- Cálculos preliminares

- Inclinação da viga

$$\tan(\alpha) = \frac{8337,6 \text{ mm} - 6413,4 \text{ mm}}{10737,2 \text{ mm}}$$

$$\alpha \sim 10,16^\circ$$

- Cálculo do Coeficiente de Modificação

$$K_{mod} = K_{mod,1} \cdot K_{mod,2} \cdot K_{mod,3}$$

onde:

$$K_{mod,1} = 0,7 \text{ (carregamento preponderante de longa duração)}$$

$$K_{mod,2} = 1,0 \text{ (classe de umidade 1)}$$

$$K_{mod,3} = 1,0 \text{ (madeira de primeira categoria)}$$

$$K_{mod} = 0,7 \cdot 1,0 \cdot 1,0 = 0,7$$

- Cálculo da Resistência à Compressão de cálculo

$$f_{c0,d} = K_{mod} \cdot \frac{f_{c0,k}}{\gamma_w}$$

$$f_{c0,d} = 0,7 \cdot \frac{30 \text{ MPa}}{1,4} = 15 \text{ MPa} = 15000 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

onde:

$$f_{c0,k} = 30 \text{ MPa (dicotiledônea C30)}$$

- Cálculo das cargas aplicadas na viga principal

- O peso das telhas é descarregado nas vigas terças;
- O peso das vigas terças é descarregado na viga principal, porém como força pontual;

- A carga técnica incide diretamente na viga, sendo considerada um carregamento pontual;

- A carga dos ventos incide sobre as telhas, são transferidas para as vigas terças, e depois para a viga principal como força pontual.

Para este projeto, foi considerado que a carga permanente corresponde à soma dos carregamentos devido ao peso das telhas, das vigas terças, do peso próprio da viga e da carga técnica, enquanto a carga acidental corresponde a carga devido ao vento.

- Cargas Permanentes

- Peso das telhas descarregado nas vigas terças

Como as vigas terças recebem parte do carregamento devido às telhas, as vigas foram numeradas de 1 a 5, conforme desenho da figura 28, para obter a área de influência para cada telha.

$$F_{viga\ terça} = A_{influência} \cdot P_{telha}$$

Obs.: $1000 \frac{kg \cdot m}{s^2} = 1\ kN$

Para a viga terça 1 (área de cor magenta):

$$F_{viga\ terça\ 1} = (1,5\ m \cdot 8\ m) \cdot \left(5,85 \frac{kg}{m^2} \cdot 9,81 \frac{m}{s^2}\right) = 0,689\ kN$$

Para as vigas terças 2, 3 e 4 (possuem áreas de influência de mesmo valor):

$$F_{viga\ terça\ 2} = (3\ m \cdot 8\ m) \cdot \left(5,85 \frac{kg}{m^2} \cdot 9,81 \frac{m}{s^2}\right) = 1,377\ kN$$

$$F_{viga\ terça\ 2} = F_{viga\ terça\ 3} = F_{viga\ terça\ 4} = 1,377\ kN$$

Para a viga terça 5 (área de cor laranja):

$$F_{viga\ terça\ 5} = [(1,5\ m + 0,5531\ m) \cdot 8\ m] \cdot \left(5,85 \frac{kg}{m^2} \cdot 9,81 \frac{m}{s^2}\right) = 0,943\ kN$$

- Peso das vigas terças descarregado na viga principal

Para o peso próprio das vigas terças, segue a mesma lógica do cálculo anterior, porém considerando o fato de serem constituídas por perfis metálicos com densidade linear de $7,8 \text{ kg/m}$ e 8 m de comprimento.

$$F_{\text{peso próprio viga terça}} = 8 \text{ m} \cdot \left(7,8 \frac{\text{kg}}{\text{m}} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right) = 0,612 \text{ kN}$$

- Carga Técnica

Para a viga terça 1:

$$F_{\text{técnica 1}} = (1,5 \text{ m} \cdot 8 \text{ m}) \cdot \left(25 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right) = 2,943 \text{ kN}$$

Para as vigas terças 2, 3 e 4:

$$F_{\text{técnica 2}} = (3 \text{ m} \cdot 8 \text{ m}) \cdot \left(25 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right) = 5,886 \text{ kN}$$

$$F_{\text{técnica 2}} = F_{\text{técnica 3}} = F_{\text{técnica 4}} = 5,886 \text{ kN}$$

Para a viga terça 5:

$$F_{\text{técnica 5}} = [(1,5 \text{ m} + 0,5531 \text{ m}) \cdot 8 \text{ m}] \cdot \left(25 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right) = 4,028 \text{ kN}$$

Logo, as cargas permanentes pontuais de cada viga terça na viga principal são dadas por:

$$F_{g, \text{viga terça 1}} = 0,689 \text{ kN} + 0,612 \text{ kN} + 2,943 \text{ kN} = 4,244 \text{ kN}$$

$$F_{g, \text{viga terça 2}} = 1,377 \text{ kN} + 0,612 \text{ kN} + 5,886 \text{ kN} = 7,875 \text{ kN}$$

$$F_{g, \text{viga terça 2}} = F_{g, \text{viga terça 3}} = F_{g, \text{viga terça 4}} = 7,875 \text{ kN}$$

$$F_{g, \text{viga terça 5}} = 0,943 \text{ kN} + 0,612 \text{ kN} + 4,028 \text{ kN} = 5,583 \text{ kN}$$

- Peso próprio da viga principal

$$P_{\text{próprio viga principal}} = b \cdot h \cdot 800 \cdot 9,81 = 0,16 \text{ m} \cdot 0,24 \text{ m} \cdot 800 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$P_{\text{próprio viga principal}} = 301,363 \frac{\text{kg}}{\text{s}^2} = 301,363 \frac{\text{N}}{\text{m}} = 0,301 \text{ kN/m}$$

- Cargas Acidentais (ventos)

- Vento de Sobrepressão

$$F_{q,\text{sobrepressão}} = A_{\text{influência}} \cdot 0,83 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Para a viga terça 1:

$$F_{q,\text{sobrepressão } 1} = (1,5 \text{ m} \cdot 8 \text{ m}) \cdot \left(0,83 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}\right) = 9,960 \text{ kN}$$

Para as vigas terças 2, 3 e 4:

$$F_{q,\text{sobrepressão } 2} = (3 \text{ m} \cdot 8 \text{ m}) \cdot \left(0,83 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}\right) = 19,920 \text{ kN}$$

$$F_{q,\text{sobrepressão } 2} = F_{q,\text{sobrepressão } 3} = F_{q,\text{sobrepressão } 4} = 19,920 \text{ kN}$$

Para a viga terça 5:

$$F_{q,\text{sobrepressão } 5} = [(1,5 \text{ m} + 0,5531 \text{ m}) \cdot 8 \text{ m}] \cdot \left(0,83 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}\right) = 13,633 \text{ kN}$$

- Vento de Sucção

$$F_{q,\text{sucção}} = A_{\text{influência}} \cdot 0,58 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Para a viga terça 1:

$$F_{q,\text{sucção } 1} = (1,5 \text{ m} \cdot 8 \text{ m}) \cdot \left(0,58 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}\right) = 6,960 \text{ kN}$$

Para as vigas terças 2, 3 e 4:

$$F_{q,\text{sucção } 2} = (3 \text{ m} \cdot 8 \text{ m}) \cdot \left(0,58 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}\right) = 13,920 \text{ kN}$$

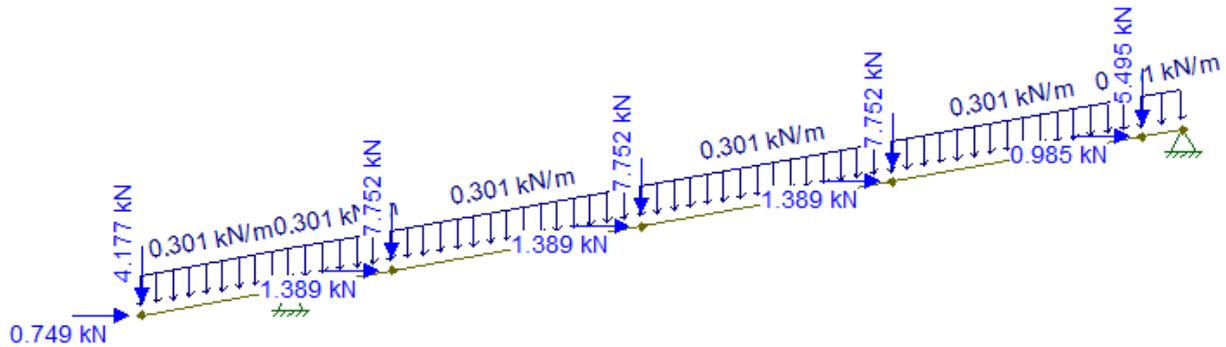
$$F_{q,\text{sucção } 2} = F_{q,\text{sucção } 3} = F_{q,\text{sucção } 4} = 13,920 \text{ kN}$$

Para a viga terça 5:

$$F_{q,\text{sucção } 5} = [(1,5 \text{ m} + 0,5531 \text{ m}) \cdot 8 \text{ m}] \cdot \left(0,58 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}\right) = 9,526 \text{ kN}$$

Portanto, com as forças calculadas, segue abaixo as figuras contendo a aplicação dessas forças na viga principal pelo software *FTool*.

Figura 46 – Forças permanentes aplicadas na viga principal



Elaboração própria.

Como não houve mudança nas cargas de vento e nas áreas de influência, as cargas aplicadas são as mesmas das figuras 30 e 31, para sobrepressão e sucção, respectivamente.

- Verificação das condições de segurança

Para verificar as condições de segurança, é necessário obter os valores dos esforços solicitantes pelos diagramas que serão feitos no *FTool*. Com isso, com esses valores fornecidos, é necessário colocá-los na seguinte combinação:

$$F_d = \gamma_G \cdot F_{permanente} + \gamma_Q \cdot (0,75 \cdot F_{vento_{sobrepressão/sucção}})$$

- Flexo-compressão

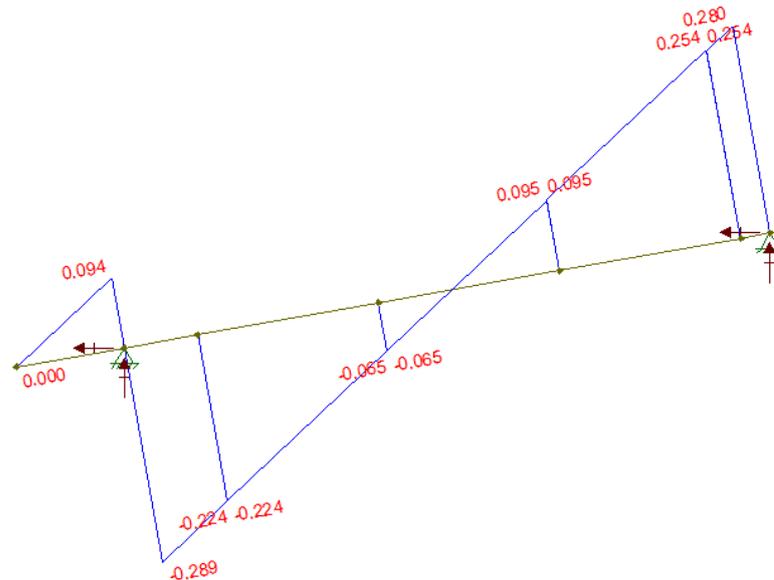
Pela norma, as condições de segurança são dadas por:

$$\left(\frac{\sigma_{N_{t,d}}}{f_{c0,d}}\right)^2 + \frac{\sigma_{M_{x,d}}}{f_{c0,d}} + K_m \cdot \frac{\sigma_{M_{y,d}}}{f_{c0,d}} \leq 1$$

$$\left(\frac{\sigma_{N_{c,d}}}{f_{c0,d}}\right)^2 + K_m \cdot \frac{\sigma_{M_{x,d}}}{f_{c0,d}} + \frac{\sigma_{M_{y,d}}}{f_{c0,d}} \leq 1$$

Com base nessas fórmulas, seguem abaixo os diagramas de esforço normal e momento fletor, para obter os valores críticos para cada situação.

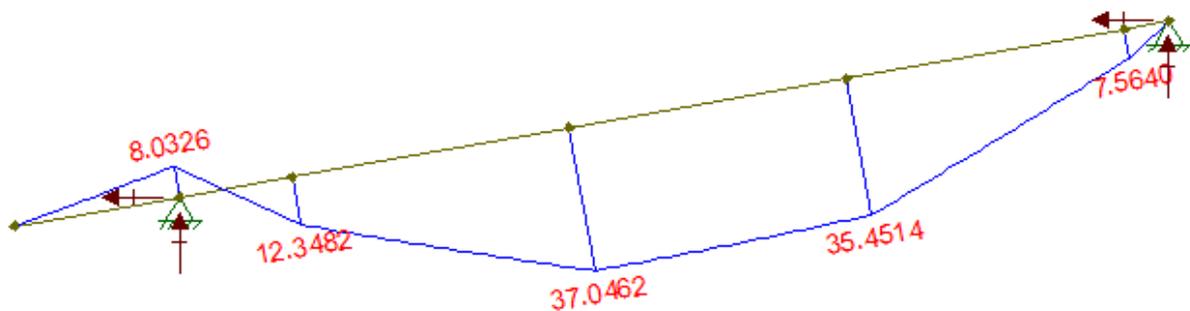
Figura 47 – Diagrama de normal na viga principal devido às cargas permanentes



Elaboração própria.

Como não houve mudança nas cargas de vento e nas áreas de influência, os diagramas de esforço normal são os mesmos das figuras 33 e 34, para sobrepressão e sucção, respectivamente.

Figura 48 – Diag. de momento fletor na viga principal devido às cargas permanentes



Elaboração própria.

Como não houve mudança nas cargas de vento e nas áreas de influência, os diagramas de momento fletor são os mesmos das figuras 36 e 37, para sobrepressão e sucção, respectivamente.

Com base nos diagramas acima e nos diagramas citados, nota-se que o ponto de maior esforço normal ocorre no apoio da esquerda e o ponto mais crítico de momento fletor ocorre na viga terça 3, logo, realizando as condições de verificação para estes pontos, todos os outros também estarão verificados.

- Apoio da Esquerda

- Normal

- Carga permanente + vento de sobrepressão

$$N_d = \gamma_G \cdot N_{permanente} + \gamma_Q \cdot (0,75 \cdot N_{vento_{sobrepressão}})$$

$$N_d = 1,4 \cdot (-0,289) + 1,4 \cdot [0,75 \cdot (-0,013)]$$

$$N_d = -0,418 \text{ kN}$$

- Carga permanente + vento de sucção

$$N_d = \gamma_G \cdot N_{permanente} + \gamma_Q \cdot (0,75 \cdot N_{vento_{sucção}})$$

$$N_d = 0,9 \cdot (-0,289) + 1,4 \cdot [0,75 \cdot 0,007]$$

$$N_d = -0,253 \text{ kN}$$

- Momento fletor

- Carga permanente + vento de sobrepressão

$$M_d = \gamma_G \cdot M_{permanente} + \gamma_Q \cdot (0,75 \cdot M_{vento_{sobrepressão}})$$

$$M_d = 1,4 \cdot 8,033 + 1,4 \cdot [0,75 \cdot 17,749]$$

$$M_d = 29,883 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

- Carga permanente + vento de sucção

$$M_d = \gamma_G \cdot M_{permanente} + \gamma_Q \cdot (0,75 \cdot M_{vento_{sucção}})$$

$$M_d = 0,9 \cdot 8,033 + 1,4 \cdot [0,75 \cdot (-12,403)]$$

$$M_d = -5,793 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Pelos cálculos acima, tem-se que os valores críticos são $N_d = -0,418 \text{ kN}$ e $M_d = 29,883 \text{ kN} \cdot \text{m}$. Logo:

$$\sigma_N = \frac{N_d}{A} = \frac{-0,418}{0,16 \cdot 0,24} = -10,885 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$\sigma_M = \frac{M \cdot y}{I_y} = \frac{29,883 \cdot \frac{0,24}{2}}{\frac{0,16 \cdot 0,24^3}{12}} = 19455,078 \frac{kN}{m^2}$$

Com os valores das tensões, e tendo que a normal de compressão tem mesmo valor da normal de tração, é possível verificar quanto à flexo-compressão:

$$\left(\frac{-10,885}{15000}\right)^2 + \frac{19455,078}{15000} + 0,5 \cdot \frac{0}{15000} = 1,297 \leq 1 \quad \text{NÃO OK!}$$

$$\left(\frac{-10,885}{15000}\right)^2 + 0,5 \cdot \frac{19455,078}{15000} + \frac{0}{15000} = 0,649 \leq 1 \quad \text{OK!}$$

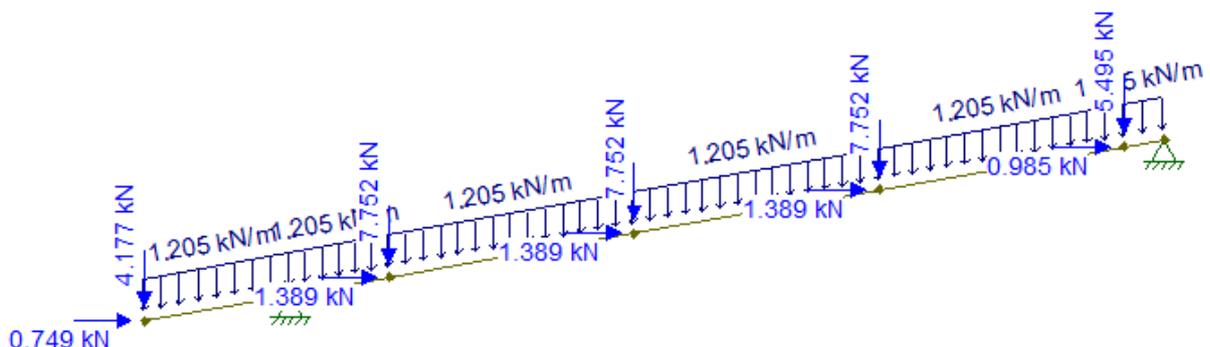
Pela verificação acima, nota-se que a seção adotada não é suficiente para atender à estrutura do projeto, com isso, os cálculos serão refeitos considerando a nova seção de 280 mm x 320 mm. Para tal, será calculado o novo peso próprio da seção, implicando em um novo valor de aplicação, e conseqüentemente, novos diagramas de esforços solicitantes.

- Peso próprio da viga principal

$$P_{\text{próprio viga principal}} = b \cdot h \cdot 800 \cdot 9,81 = 0,32 \text{ m} \cdot 0,48 \text{ m} \cdot 800 \frac{kg}{m^3} \cdot 9,81 \frac{m}{s^2}$$

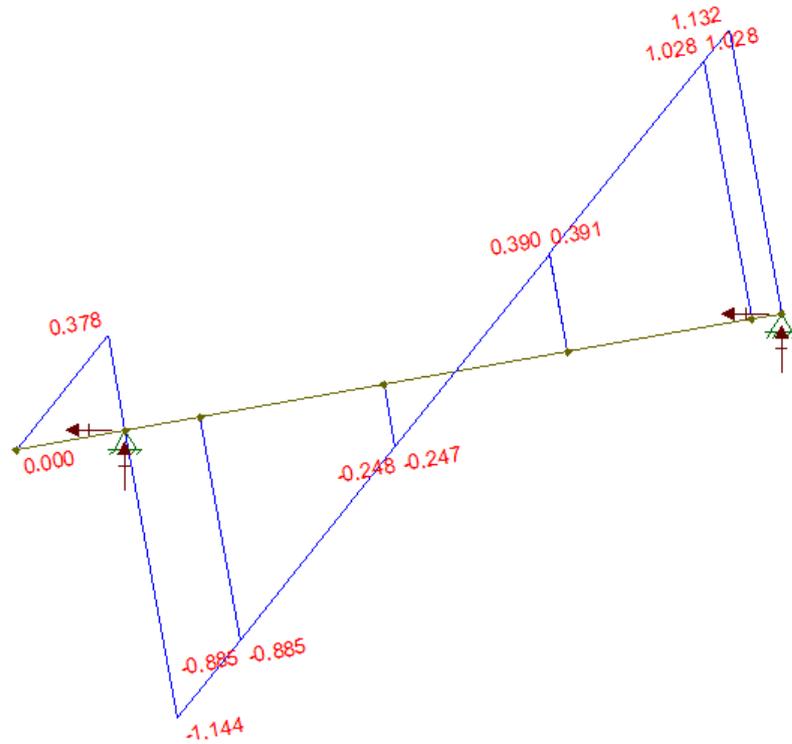
$$P_{\text{próprio viga principal}} = 1205,453 \frac{kg}{s^2} = 1205,453 \frac{N}{m} = 1,205 \text{ kN/m}$$

Figura 49 – Forças permanentes aplicadas na viga principal com nova seção



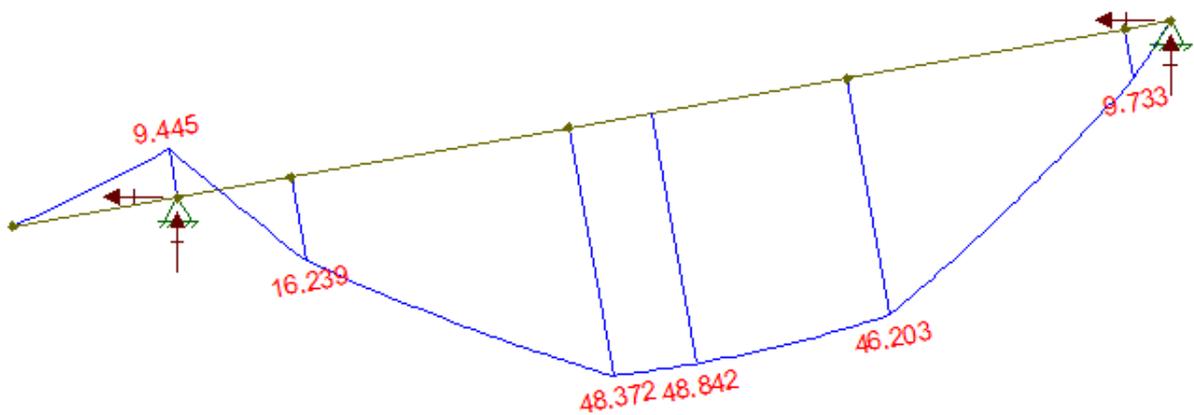
Elaboração própria.

Figura 50 – Diagrama de normal com nova seção devido às cargas permanentes



Elaboração própria.

Figura 51 – Diag. de momento fletor com nova seção devido às cargas permanentes



Elaboração própria.

- Apoio da Esquerda

- Normal

- Carga permanente + vento de sobrepressão

$$N_d = \gamma_G \cdot N_{permanente} + \gamma_Q \cdot (0,75 \cdot N_{vento\ sobrepress\ao})$$

$$N_d = 1,4 \cdot (-1,144) + 1,4 \cdot [0,75 \cdot (-0,013)]$$

$$N_d = -1,615 \text{ kN}$$

- Carga permanente + vento de sucção

$$N_d = \gamma_G \cdot N_{permanente} + \gamma_Q \cdot (0,75 \cdot N_{vento,sucção})$$

$$N_d = 0,9 \cdot (-1,144) + 1,4 \cdot [0,75 \cdot 0,007]$$

$$N_d = -1,022 \text{ kN}$$

- **Momento fletor**

- Carga permanente + vento de sobrepressão

$$M_d = \gamma_G \cdot M_{permanente} + \gamma_Q \cdot (0,75 \cdot M_{vento,sobrepressão})$$

$$M_d = 1,4 \cdot 9,445 + 1,4 \cdot [0,75 \cdot 17,749]$$

$$M_d = 31,859 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

- Carga permanente + vento de sucção

$$M_d = \gamma_G \cdot M_{permanente} + \gamma_Q \cdot (0,75 \cdot M_{vento,sucção})$$

$$M_d = 0,9 \cdot 9,445 + 1,4 \cdot [0,75 \cdot (-12,403)]$$

$$M_d = -4,523 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Pelos cálculos acima, tem-se que os valores críticos são $N_d = -1,615 \text{ kN}$ e $M_d = 31,859 \text{ kN} \cdot \text{m}$. Logo:

$$\sigma_N = \frac{N_d}{A} = \frac{-1,615}{0,32 \cdot 0,48} = -10,514 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$\sigma_M = \frac{M \cdot y}{I_y} = \frac{31,859 \cdot \frac{0,48}{2}}{\frac{0,32 \cdot 0,48^3}{12}} = 2592,692 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Com os valores das tensões, e tendo que a normal de compressão tem mesmo valor da normal de tração, é possível verificar quanto à flexo-compressão:

$$\left(\frac{-10,514}{15000}\right)^2 + \frac{2592,692}{15000} + 0,5 \cdot \frac{0}{15000} = 0,173 \leq 1 \quad \text{OK!}$$

$$\left(\frac{-10,514}{15000}\right)^2 + 0,5 \cdot \frac{2592,692}{15000} + \frac{0}{15000} = 0,086 \leq 1 \quad \text{OK!}$$

- Viga terça 3

- Normal

- Carga permanente + vento de sobrepressão

$$N_d = \gamma_G \cdot N_{permanente} + \gamma_Q \cdot (0,75 \cdot N_{vento_{sobrepressão}})$$

$$N_d = 1,4 \cdot (-0,248) + 1,4 \cdot [0,75 \cdot (-0,013)]$$

$$N_d = -0,361 \text{ kN}$$

- Carga permanente + vento de sucção

$$N_d = \gamma_G \cdot N_{permanente} + \gamma_Q \cdot (0,75 \cdot N_{vento_{sucção}})$$

$$N_d = 0,9 \cdot (-0,248) + 1,4 \cdot [0,75 \cdot 0,007]$$

$$N_d = -0,216 \text{ kN}$$

- Momento fletor

- Carga permanente + vento de sobrepressão

$$M_d = \gamma_G \cdot M_{permanente} + \gamma_Q \cdot (0,75 \cdot M_{vento_{sobrepressão}})$$

$$M_d = 1,4 \cdot 48,372 + 1,4 \cdot [0,75 \cdot 84,906]$$

$$M_d = 156,872 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

- Carga permanente + vento de sucção

$$M_d = \gamma_G \cdot M_{permanente} + \gamma_Q \cdot (0,75 \cdot M_{vento_{sucção}})$$

$$M_d = 0,9 \cdot 48,372 + 1,4 \cdot [0,75 \cdot (-59,333)]$$

$$M_d = -18,765 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Pelos cálculos acima, tem-se que os valores críticos são $N_d = -0,361 \text{ kN}$ e $M_d = 156,872 \text{ kN} \cdot \text{m}$. Logo:

$$\sigma_N = \frac{N_d}{A} = \frac{-0,361}{0,32 \cdot 0,48} = -2,350 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$\sigma_M = \frac{M \cdot y}{I_y} = \frac{156,872 \cdot \frac{0,48}{2}}{\frac{0,32 \cdot 0,48^3}{12}} = 12766,276 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Com os valores das tensões, e tendo que a normal de compressão tem mesmo valor da normal de tração, é possível verificar quanto à flexo-compressão:

$$\left(\frac{-2,350}{15000}\right)^2 + \frac{12766,276}{15000} + 0,5 \cdot \frac{0}{15000} = 0,851 \leq 1 \quad \mathbf{OK!}$$

$$\left(\frac{-2,350}{15000}\right)^2 + 0,5 \cdot \frac{12766,276}{15000} + \frac{0}{15000} = 0,426 \leq 1 \quad \mathbf{OK!}$$

Como a seção de (320 mm x 480 mm) atendeu à verificação de flexo-compressão, há prosseguimento no cálculo das próximas verificações.

- Cisalhamento

Segundo à norma, a condição a ser atendida é dada por:

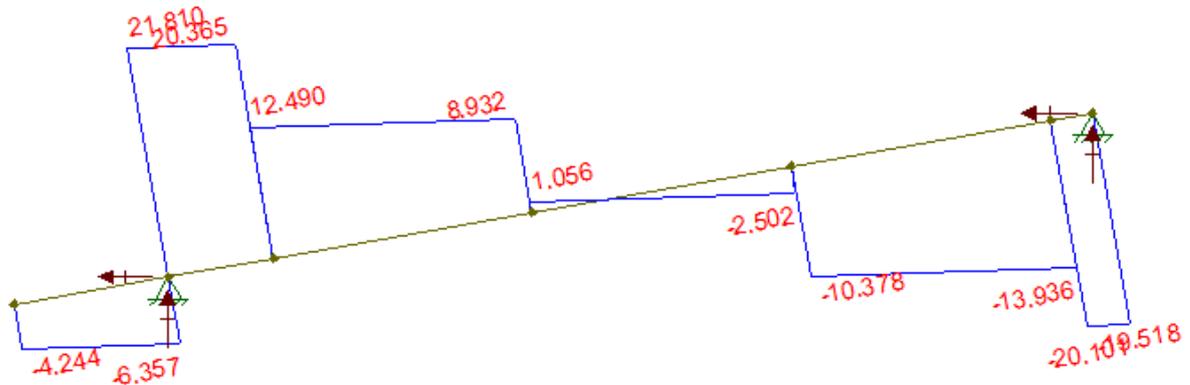
$$\tau_d = \frac{3 \cdot V}{2b \cdot h} \leq f_{v,d}$$
$$f_{v,d} = \frac{K_{mod} \cdot f_{v,k}}{\gamma_{v,w}} = \frac{0,7 \cdot 5}{1,8} = 1,944 \text{ MPa} = 1944,444 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

onde:

- $f_{v,k} = 5 \text{ MPa}$ (dicotiledônea C30)
- $\gamma_{v,w} = 1,8$ (coeficiente de minoração)

Com isso, para prosseguir com os cálculos, é necessário produzir o diagrama de esforço cortante, para obter o ponto mais crítico e realizar a verificação quanto ao cisalhamento.

Figura 52 – Diagrama de cortante com nova seção devido às cargas permanentes



Elaboração própria.

Como por acaso, a nova seção também foi de 32 x 48 cm, e não houve mudança nas cargas de vento e nas áreas de influência, os diagramas de esforço cortante são os mesmos das figuras 42 e 43, para sobrepressão e sucção, respectivamente.

Com base nos diagramas citados e no diagrama acima, nota-se que o ponto de esforço cortante mais crítico ocorre no apoio da esquerda, logo, realizando as condições de verificação para este ponto, todos os outros também estarão verificados.

- Apoio da Esquerda

- Carga permanente + vento de sobrepressão

$$V_d = \gamma_G \cdot V_{permanente} + \gamma_Q \cdot (0,75 \cdot V_{vento_{sobrepressão}})$$

$$V_d = 1,4 \cdot 21,810 + 1,4 \cdot [0,75 \cdot 38,505]$$

$$V_d = 70,964 \text{ kN}$$

- Carga permanente + vento de sucção

$$V_d = \gamma_G \cdot V_{permanente} + \gamma_Q \cdot (0,75 \cdot V_{vento_{sucção}})$$

$$V_d = 0,9 \cdot 21,810 + 1,4 \cdot [0,75 \cdot (-26,907)]$$

$$V_d = -8,623 \text{ kN}$$

Pelas combinações, o valor mais crítico de cortante é $V_d = 70,964 \text{ kN}$. Logo:

$$\tau_d = \frac{3 \cdot V}{2b \cdot h} = \frac{3 \cdot 70,964}{2 \cdot 0,32 \cdot 0,48} = 693,008 \frac{kN}{m^2} \leq f_{v,d}$$

$$\tau_d = 693,008 \frac{kN}{m^2} \leq f_{v,d} = 1944,444 \frac{kN}{m^2}$$

$$693,008 \frac{kN}{m^2} \leq 1944,444 \frac{kN}{m^2} \quad \mathbf{OK!}$$

- Estabilidade lateral da viga

Para a estabilidade lateral, como os cálculos dependem da seção e do módulo de elasticidade, que para classe C30, tem o mesmo valor entre coníferas e dicotiledôneas, tem-se que a seção de 32 x 48 cm é adequada quanto à estabilidade lateral da viga.

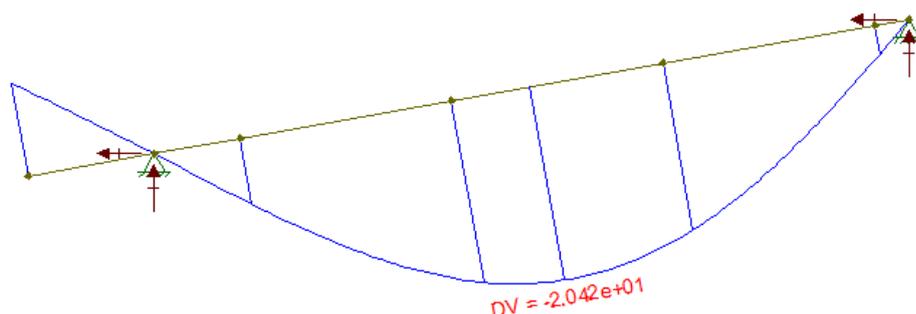
$$E_{co,m} = 14500 \text{ MPa (módulo de elasticidade médio para dicotiledônea C30)}$$

- Estado limite de serviço

Por fim, a última verificação é quanto ao estado limite de serviço (ELS), onde é analisado o máximo deslocamento vertical devido às forças aplicadas na viga. Com isso, segundo a norma e devido à pressão dinâmica do vento ($\psi_{2,j} = 0$), a combinação de deslocamento vertical devido às cargas permanentes e acidentais é dada por:

$$D_d = \sum_{i=1}^m D_{g_{k,i}}$$

Figura 53 – Deslocamento vertical máximo da viga devido às cargas permanentes



Elaboração própria.

Com o valor do deslocamento, é feita a seguinte verificação:

$$\frac{L}{200} \geq D_d$$

onde:

$$- L = 12,5531 \text{ m (comprimento da viga)}$$

$$\frac{12,5531 \text{ m}}{200} \geq 0,02042 \text{ m}$$

$$0,0628 \text{ m} \geq 0,02042 \text{ m}$$

$$62,8 \text{ mm} \geq 20,42 \text{ mm} \quad \mathbf{OK!}$$

Logo, a seção de 320 mm x 480 mm atende às condições de segurança e é suficiente para atender às necessidades de projeto.

- Pilar

Para o pilar, ele será dimensionado para atender o estado limite último (ELU) quanto à flexo compressão, e estabilidade nas direções x e y. E assim como no caso da viga, os processos serão repetidos de tal forma a tornarem as comparações o mais próximas possível. Para tal, são lembradas as seguintes características para o cálculo, conforme figura 45.

$$- L = 800 \text{ cm (comprimento do pilar)}$$

$$- F_{gk} = 3,01 \text{ kN (força permanente devido ao peso da viga principal)}$$

- Dicotiledônea com densidade aparente de $800 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$, logo, será considerada uma força permanente maior que no caso da conífera

$$- F_{qk} = 3,10 \text{ kN (força acidental devido ao vento)}$$

$$- e_y = 2 \text{ cm (excentricidade quanto ao CG da seção)}$$

$$- \text{Classe C20} - f_{c0,k} = 20 \text{ MPa} = 2 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

- $K_{mod} = 0,7$
- $\gamma_w = 1,4$

Vale ressaltar que a largura b_p deve ser igual ou superior a largura da viga dimensionada anteriormente. Além disso, para atender seções comerciais, tem-se que a altura h_p deve ser múltipla de 40 mm e a largura b_p múltipla de 140 ou 160 mm.

- Dados do projeto/chute inicial

- $b_p = 32 \text{ cm}$ (igual ao calculado para a viga)
- $h_p = 16 \text{ cm}$ (chute inicial – menor seção comercial possível)
- $f_{vk} = 4 \text{ MPa} = 0,4 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$ (dicotiledônea C20)
- $\phi = 0,8$ (classe de umidade 1)
- $L_0 = 2 \cdot L = 2 \cdot 800 \text{ cm} = 1600 \text{ cm}$ (uma extremidade livre e outra engastada)
- $E_{c0,m} = 9500 \text{ MPa} = 950 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$ (módulo de elasticidade médio para conífera C20)

- Momento de Inércia

Para a seção retangular de 32 x 16 cm, tem-se os seguintes momentos de inércia em relação aos eixos x e y:

$$I_x = \frac{b_p \cdot h_p^3}{12} = \frac{32 \text{ cm} \cdot (16 \text{ cm})^3}{12} = 10922,667 \text{ cm}^4$$

$$I_y = \frac{h_p \cdot b_p^3}{12} = \frac{16 \text{ cm} \cdot (32 \text{ cm})^3}{12} = 43690,667 \text{ cm}^4$$

- Resistência na compressão e módulo de elasticidade efetivo

$$f_{c0,d} = f_{t0,d} = \frac{K_{mod} \cdot f_{c,k}}{\gamma_{v,w}} = \frac{0,7 \cdot 2}{1,4} = 1,0 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

$$f_{v,d} = \frac{K_{mod} \cdot f_{v,k}}{\gamma_{v,w}} = \frac{0,7 \cdot 0,4}{1,8} = 0,156 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

$$E_{c0,ef} = E_{c0,m} \cdot K_{mod} = 950 \cdot 0,7 = 665 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

- Solicitações

Como há apenas o vento como ação acidental, o que implica em uma minoração para 75%, a combinação pode ser calculada da mesma forma que no processo de vigas:

$$F_d = \gamma_G \cdot F_{permanente} + \gamma_Q \cdot (0,75 \cdot F_{acidental})$$

- Normal

$$N_{sd} = N_{cd} = 1,4 \cdot F_{g,k} + 1,4 \cdot (0,75 \cdot F_{q,k})$$

$$N_{sd} = N_{cd} = 1,4 \cdot 3,01 + 1,4 \cdot (0,75 \cdot 3,1) = 7,469 \text{ kN}$$

- Momento

$$M_{s,xd} = 1,4 \cdot F_{g,k} \cdot e_y + 1,4 \cdot (0,75 \cdot F_{q,k}) \cdot e_y$$

$$M_{s,xd} = 1,4 \cdot 3,01 \cdot 2 + 1,4 \cdot (0,75 \cdot 3,1) \cdot 2 = 14,938 \text{ kN} \cdot \text{cm}$$

$$M_{s,yd} = 0 \text{ (não há excentricidade no eixo } x)$$

- Flexo-compressão

- Tensão normal

$$\sigma_{N,d} = \frac{N_{cd}}{A} = \frac{7,469 \text{ kN}}{16 \text{ cm} \cdot 32 \text{ cm}} = 0,015 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

- Momento devido à ação vertical axial

$$M_{N,d} = N_{c,d} \cdot e_y = 7,469 \cdot 2 = 14,938 \text{ kN} \cdot \text{cm}$$

- Tensão de flexão

$$\sigma_{Mx,d} = \frac{M_{x,d} \cdot \frac{h_p}{2}}{I_x} = \frac{14,938 \text{ kN} \cdot \text{cm} \cdot \frac{16 \text{ cm}}{2}}{10922,667 \text{ cm}^4} = 0,011 \text{ kN/cm}^2$$

Com os valores das tensões, e tendo que a normal de compressão tem mesmo valor da normal de tração, é possível verificar quanto à flexo-compressão:

$$\left(\frac{\sigma_{Nd}}{f_{c0,d}}\right)^2 + K_m \cdot \frac{\sigma_{M_{x,d}}}{f_{c0,d}} + \frac{\sigma_{M_{y,d}}}{f_{c0,d}} \leq 1$$

$$\left(\frac{0,015}{1,0}\right)^2 + 0,5 \cdot \frac{0,011}{1,0} + \frac{0}{1,0} = 0,00573 \leq 1 \quad \mathbf{OK!}$$

$$\left(\frac{\sigma_{Nd}}{f_{c0,d}}\right)^2 + \frac{\sigma_{M_{x,d}}}{f_{c0,d}} + K_m \cdot \frac{\sigma_{M_{y,d}}}{f_{c0,d}} \leq 1$$

$$\left(\frac{0,015}{1,0}\right)^2 + \frac{0,011}{1,0} + 0,5 \cdot \frac{0}{1,0} = 0,0112 \leq 1 \quad \mathbf{OK!}$$

- Instabilidade lateral do pilar

Estabilidade em relação ao eixo x

- Índice de esbeltez (λ)

Para o índice de esbeltez, o primeiro passo é calcular o raio de giração, para posteriormente obter o índice:

$$i_x = \sqrt{\frac{I_x}{b_p \cdot h_p}} = \sqrt{\frac{10922,667 \text{ cm}^4}{32 \text{ cm} \cdot 16 \text{ cm}}} = 4,619 \text{ cm}$$

$$\lambda_x = \frac{L_0}{i_x} = \frac{1600 \text{ cm}}{4,619 \text{ cm}} = 346,395$$

O valor do índice obtido, que é muito maior que o valor limite de 140 para esbeltez, faz com que os cálculos sejam refeitos considerando uma nova seção. Nesse caso, a nova seção, com base em valores comerciais, será de 42 x 40 cm.

- Momento de inércia nova seção

$$I_x = \frac{b_p \cdot h_p^3}{12} = \frac{42 \text{ cm} \cdot (40 \text{ cm})^3}{12} = 224000,000 \text{ cm}^4$$
$$I_y = \frac{h_p \cdot b_p^3}{12} = \frac{40 \text{ cm} \cdot (42 \text{ cm})^3}{12} = 246960,000 \text{ cm}^4$$

- Resistência e Solicitações

A resistência de compressão paralela às fibras e as solicitações combinadas continuam com os mesmos valores calculados anteriormente pois não dependem da seção transversal do pilar.

- Flexo-compressão

Quanto à flexo-compressão, não é necessário recalculá-la pois o cálculo anterior foi feito para uma seção menor e esta já era adequada, com isso, uma seção maior também já está verificada, como a nova seção de 42 x 40 cm.

- Índice de esbeltez (λ) nova seção

$$i_x = \sqrt{\frac{I_x}{b_p \cdot h_p}} = \sqrt{\frac{224000,000 \text{ cm}^4}{42 \text{ cm} \cdot 40 \text{ cm}}} = 11,547 \text{ cm}$$
$$\lambda_x = \frac{L_0}{i_x} = \frac{1600 \text{ cm}}{11,547 \text{ cm}} = 138,564$$

Como o novo valor do índice obtido se situa entre 80 e 140, a peça é classificada como esbelta, implicando nos seguintes cálculos para finalizar a verificação quanto à estabilidade do pilar em relação ao eixo x.

- Carga crítica de flambagem ($F_{cr,x}$)

$$F_{cr,x} = \frac{\pi^2 \cdot E_{c0,ef} \cdot I_x}{L_{ef}^2} = \frac{\pi^2 \cdot 665 \text{ kN/cm}^2 \cdot 224000 \text{ cm}^4}{(1600 \text{ cm})^2} = 574,288 \text{ kN}$$

- **Excentricidade de primeira ordem decorrente da situação de projeto ($e_{i,x}$)**

$$e_{i,x} = \frac{M_{1,d}}{N_{s,d}} = \frac{M_{s_x,d}}{N_{s,d}} = \frac{14,938 \text{ kN} \cdot \text{cm}}{7,469 \text{ kN}} = 2 \text{ cm}$$

- **Excentricidade acidental mínima ($e_{a,x}$)**

$$e_{a,x} = \frac{L_0}{300} = \frac{1600 \text{ cm}}{300} = 5,33 \text{ cm}$$

- **Excentricidade suplementar de primeira ordem ($e_{c,x}$)**

$$e_{c,x} = (e_{i,x} + e_{a,x}) \cdot \left(\exp \left(\frac{\phi \cdot (N_{g,k} + \psi \cdot N_{q,k})}{F_{cr,x} - (N_{g,k} + \psi \cdot N_{q,k})} \right) - 1 \right)$$

onde:

- $\psi_1 = 0,3$ e $\psi_2 = 0,2$ (sem predominância de pessoas e de equipamentos fixos)

- $\psi = \psi_1 + \psi_2 = 0,5$

- $N_{g,k} = 1,4 \cdot F_{g,k} = 1,4 \cdot 3,01 = 4,214 \text{ kN}$

- $N_{q,k} = 0,75 \cdot 1,4 \cdot F_{q,k} = 0,75 \cdot 1,4 \cdot 3,1 = 3,255 \text{ kN}$

$$e_{c,x} = (2 + 5,33) \cdot \left(\exp \left(\frac{0,8 \cdot (4,214 + 0,5 \cdot 3,255)}{574,288 - (4,214 + 0,5 \cdot 3,255)} \right) - 1 \right) = 0,061 \text{ cm}$$

- **Excentricidade efetiva de primeira ordem ($e_{1,ef}$)**

$$e_{1,ef} = e_{i,x} + e_{a,x} + e_{c,x} = 2 \text{ cm} + 5,33 \text{ cm} + 0,061 \text{ cm} = 7,391 \text{ cm}$$

- **Verificação quanto à instabilidade**

$$M_{d,x} = N_{sd} \cdot e_{1,ef} = 7,469 \text{ kN} \cdot 7,391 \text{ cm} = 55,203 \text{ kN} \cdot \text{cm}$$

$$\sigma_{Mx} = \frac{M_{x,d} \cdot \frac{h_p}{2}}{I_x} = \frac{55,203 \text{ kN} \cdot \text{cm} \cdot \frac{40 \text{ cm}}{2}}{224000 \text{ cm}^4} = 0,00493 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

$$\sigma_N = \frac{N_{sd}}{A} = \frac{7,469 \text{ kN}}{42 \text{ cm} \cdot 40 \text{ cm}} = 0,00445 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

$$\frac{\sigma_{Mx}}{f_{c0,d}} + \frac{\sigma_N}{f_{c0,d}} < 1$$

$$\frac{0,00493}{1,0} + \frac{0,00445}{1,0} = 0,00938 < 1 \quad \mathbf{OK!}$$

Estabilidade em relação ao eixo y

- Índice de esbeltez (λ)

$$i_y = \sqrt{\frac{I_y}{b_p \cdot h_p}} = \sqrt{\frac{246960,000 \text{ cm}^4}{42 \text{ cm} \cdot 40 \text{ cm}}} = 12,124 \text{ cm}$$

$$\lambda_y = \frac{L_0}{i_y} = \frac{1600 \text{ cm}}{12,124 \text{ cm}} = 131,969 \text{ (peça esbelta)}$$

- Carga crítica de flambagem ($F_{cr,y}$)

$$F_{cr,y} = \frac{\pi^2 \cdot E_{c0,ef} \cdot I_y}{L_{ef}^2} = \frac{\pi^2 \cdot 665 \text{ kN/cm}^2 \cdot 246960 \text{ cm}^4}{(1600 \text{ cm})^2} = 633,152 \text{ kN}$$

- Excentricidade de primeira ordem decorrente da situação de projeto ($e_{i,x}$)

$$e_{i,y} = \frac{M_{1,d}}{N_{s,d}} = \frac{M_{s,y,d}}{N_{s,d}} = \frac{0 \text{ kN} \cdot \text{cm}}{7,469 \text{ kN}} = 0 \text{ cm}$$

- Excentricidade acidental mínima ($e_{a,y}$)

$$e_{a,y} = \frac{L_0}{300} = \frac{1600 \text{ cm}}{300} = 5,33 \text{ cm}$$

- Excentricidade suplementar de primeira ordem ($e_{c,y}$)

$$e_{c,y} = (e_{i,y} + e_{a,y}) \cdot \left(\exp \left(\frac{\phi \cdot (N_{g,k} + \psi \cdot N_{q,k})}{F_{cr,y} - (N_{g,k} + \psi \cdot N_{q,k})} \right) - 1 \right)$$

onde:

- $\psi_1 = 0,3$ e $\psi_2 = 0,2$ (sem predominância de pessoas e de equipamentos fixos)

- $\psi = \psi_1 + \psi_2 = 0,5$

- $N_{g,k} = 1,4 \cdot F_{g,k} = 1,4 \cdot 3,01 = 4,214 \text{ kN}$

- $N_{q,k} = 0,75 \cdot 1,4 \cdot F_{q,k} = 0,75 \cdot 1,4 \cdot 3,1 = 3,255 \text{ kN}$

$$e_{c,y} = (0 + 5,33) \cdot \left(\exp \left(\frac{0,8 \cdot (4,214 + 0,5 \cdot 3,255)}{633,152 - (4,214 + 0,5 \cdot 3,255)} \right) - 1 \right) = 0,04 \text{ cm}$$

- Excentricidade efetiva de primeira ordem ($e_{1,ef}$)

$$e_{1,ef} = e_{i,y} + e_{a,y} + e_{c,y} = 0 \text{ cm} + 5,33 \text{ cm} + 0,04 \text{ cm} = 5,37 \text{ cm}$$

- Verificação quanto à instabilidade

$$M_{d,y} = N_{sd} \cdot e_{1,ef} = 7,469 \text{ kN} \cdot 5,37 \text{ cm} = 40,109 \text{ kN} \cdot \text{cm}$$

$$\sigma_{My} = \frac{M_{y,d} \cdot \frac{b_p}{2}}{I_y} = \frac{40,109 \text{ kN} \cdot \text{cm} \cdot \frac{42 \text{ cm}}{2}}{246960 \text{ cm}^4} = 0,00341 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

$$\sigma_N = \frac{N_{sd}}{A} = \frac{7,469 \text{ kN}}{42 \text{ cm} \cdot 40 \text{ cm}} = 0,00445 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

$$\frac{\sigma_{My}}{f_{c0,d}} + \frac{\sigma_N}{f_{c0,d}} < 1$$

$$\frac{0,00341}{1,0} + \frac{0,00445}{1,0} = 0,00786 < 1 \quad \mathbf{OK!}$$

Logo, a seção de 420 mm x 400 mm atende às condições de segurança e é suficiente para atender às necessidades de projeto.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Através do cálculo do projeto para os 2 tipos de madeira, apresentado por completo e em detalhes no Apêndice A, foi produzida a seguinte tabela, onde são exibidos os valores finais para cada um dos processos feitos e os valores limites das verificações:

Tabela 1 – Resultados finais *Pinus* e *Eucalyptus*

	<i>Eucalyptus</i>	Verificação	<i>Pinus</i>	Verificação
Viga				
Flexo-Compressão - Apoio Esq.	0,182	< 1 (OK)	0,177	< 1 (OK)
	0,091		0,089	
Flexo-Compressão - Viga Terça 3	0,896	< 1 (OK)	0,858	< 1 (OK)
	0,448		0,429	
Cisalhamento (kN/m ²)	693,008	< 1847,222 (OK)	665,156	< 2216,667 (OK)
Estabilidade Lateral	9,375	< 98,224 (OK)	9,375	< 98,224 (OK)
Estado Limite de Serviço (mm)	20,42	< 62,8 (OK)	18,34	< 62,8 (OK)
Seção Final (mm)	320 x 480	-	320 x 480	-
Pilar				
Flexo-Compressão	0,00599	< 1 (OK)	0,00486	< 1 (OK)
	0,0117		0,00956	
Estabilidade eixo x	0,0098	< 1 (OK)	0,00811	< 1 (OK)
Estabilidade eixo y	0,00821	< 1 (OK)	0,00679	< 1 (OK)
Seção Final (mm)	420 x 400	-	420 x 400	-

Elaboração própria.

Pela tabela 1, nota-se que *Pinus* e *Eucalyptus* resultaram na mesma seção para vigas e pilares, considerando resistências e dimensões iguais para cada um, além de respeitar as dimensões comerciais, porém, vale destacar que os valores calculados utilizando *Eucalyptus* são maiores 4,21% e 21,85%, na viga e no pilar, respectivamente.

O *Eucalyptus* é uma madeira com densidade aparente 45,5% maior que a densidade aparente do *Pinus*, fator que resultou nas solicitações diferentes entre eles, visto que um material mais pesado por metro cúbico, implicará em peças com peso próprio mais elevado, e conseqüentemente, esforços solicitantes mais altos.

Além desse fator, outro impacto que o *Eucalyptus* possui é na questão de logística e transporte, devido também à sua densidade aparente maior, que faz com

que menos peças de madeira sejam transportadas em um mesmo volume de frota quando comparado ao *Pinus*. E logo ao chegar ao canteiro de obras, é necessário um tempo maior para o recebimento e disposição do produto.

Destaca-se também que o *Eucalyptus* tem o preço médio por metro cúbico um pouco menor que o *Pinus*, o que faz dele economicamente vantajoso no quesito de compra do material.

Vale ressaltar que as solicitações no pilar foram verificadas com extrema folga, o que seria um indício de uma peça superdimensionada, porém, há um fator limitante no início do processo de cálculo para pilar que é o índice de esbeltez, valor que depende do momento de inércia e do raio de giração da peça, ou seja, depende de sua seção transversal; e é limitado a 140, logo, apesar dos valores parecerem superdimensionados, não estão, visto que foram calculados respeitando o limite de esbeltez determinado pela norma.

Com isso, nota-se que para madeiras de classe C30, tem-se uma aproximação dos valores calculados finais, o que tornaria qualquer um dos 2 tipos de madeira (*Pinus* e *Eucalyptus*) uma boa escolha para ser utilizado como solução do projeto em questão, pois são verificados e possuem uma seção dentro dos valores comerciais, tanto para viga quanto para o pilar.

Com ambos os tipos de madeira resultando em uma seção transversal de 32 x 48 cm para a viga principal e em uma seção transversal de 42 x 40 cm para o pilar, qualquer um seria uma boa escolha, porém, apesar do *Eucalyptus* ser mais barato na compra, a melhor escolha como solução do projeto seria o uso do *Pinus*, visto que este possui uma densidade aparente quase 50% menor, logo, teria um custo com transporte de materiais muito menor, o que compensaria o fato de ser um produto mais caro.

Por fim, dentro do contexto completo de projeto, compra e transporte, utilizando resistências iguais para ambos, a solução mais adequada para o projeto é o uso do *Pinus taeda*.

6. NBR 7190/2022

Assim como já comentado acima, o cenário mundial é extremamente favorável à ascensão da madeira, por conta na nova consciência ambiental do ser humano quanto ao meio ambiente, e um dos motivos para a atualização da norma, foi justamente para se adequar à sustentabilidade, mantendo construções com qualidade elevada.

Outra mudança, é o foco na conexão entre arquitetura e estrutura, buscando alcançar a beleza e a segurança na construção, de forma que a atualização levou bastante em consideração a eficiência energética e a durabilidade de uma edificação em madeira.

A nova norma, além de trazer a evolução dos sistemas construtivos, também possui informações quanto ao uso dos novos produtos engenheirados (MLC e CLT), e quanto a novas técnicas construtivas com madeira, como painéis de CLT e treliças de MLC.

Quanto a norma em si, esta passou a ser dividida em 7 partes, onde a parte 1 apresenta as mudanças quanto ao processo de cálculo, a qual será exposta abaixo a fim de apresentar as principais mudanças na forma de calcular um projeto em madeira.

Um dos impactos é quanto a eliminação do $K_{mod,3}$, para madeiras serradas, de modo que os coeficientes de modificação 1 e 2 mantiveram-se da mesma forma, obtidos por tabelas, ou seja, classe de carregamento e tipo do material, e classe de umidade, respectivamente. Porém, vale ressaltar que foram acrescentados alguns detalhes, como mais tipos de madeira e valores mais específicos, para cada um dos coeficientes parciais.

Para madeiras engenheiradas, o $K_{mod,3}$, passou a ser calculado através da multiplicação de fatores, os quais um depende se a peça possui emendas ou não, o segundo depende da curvatura da peça especificada em projeto, e o terceiro depende da classe de temperatura ambiente.

Outro dos impactos, é a utilização do coeficiente de minoração de 1,8 somente no cálculo da tensão de cisalhamento, enquanto na tensão de tração passou a ser recomendado o uso do coeficiente 1,4.

Vale ressaltar também a mudança do termo dicotiledôneas para folhosas para esse tipo de espécie, porém, apesar disso, quando se trata de uma espécie folhosa, a classe de resistência é iniciada pela letra D na nova norma (como por exemplo, D20

ou D30). Além desse detalhe, outra atualização que a norma traz é a maior quantidade de classes de resistência, o que permite apurar melhor e chegar mais próximo do valor real para atingir a demanda do projeto.

Outra mudança relevante se dá na forma como o módulo efetivo de deformação longitudinal é obtido, que passou a ser uma estimativa com base na multiplicação entre os coeficientes parciais de modificação e o módulo de deformação longitudinal médio (sendo que os módulos são na compressão paralela às fibras).

Quanto à estabilidade de pilares, foram levadas em consideração algumas mudanças com base no Eurocode 5, como o cálculo dos índices relativos de esbeltez em ambas as direções da peça, que dependem de fatores como o índice de esbeltez, a resistência à compressão paralela às fibras, e do módulo de elasticidade (apenas 5% desse valor).

Vale ressaltar que os índices relativos de esbeltez devem ser menores ou iguais a 0,3, e simultaneamente, a peça deve passar na verificação quanto à flexo-compressão. Caso contrário, deve ser calculado um novo fator que é multiplicado pela resistência à compressão de cálculo, sendo que este depende do índice relativo de esbeltez e de um segundo valor, que é obtido pelo tipo de madeira (maciça ou colada). Para a estabilidade das vigas, a principal atualização é que o cálculo passou a ser feito com base na flexão, e não na compressão, como calculado no Apêndice A.

Com isso, o cálculo possui fórmulas com novos fatores derivados das características da seção transversal, com o envolvimento dos módulos de elasticidade e de cisalhamento. E nos casos onde existe apenas momento em torno de um dos eixos, é calculado um último fator que leva em consideração a redução da resistência à flexão, visto que nessa situação, a viga sofre uma flambagem lateral, fato que torna seu comprimento efetivo maior que o comprimento real.

Por fim, destaca-se que apesar de não apresentado neste trabalho, o processo de cálculo das ligações entre as peças (como as parafusadas), também passou por significativas mudanças com a atualização da norma, tendo como base o Eurocode 5.

7. CONCLUSÃO

A respeito da madeira, é notória a sua recém ascensão, principalmente, pelos altos e belos edifícios que vêm sendo construídos ao redor do mundo, como nos EUA e na Noruega, o novo Museu de Arte Latinoamericana, no Chile e em prédios como o Amata, com viés e olhar sustentável em meio a tão urbanizada São Paulo, no Brasil.

Esse crescimento passa pelos novos e altamente qualificados estudos sobre o material e como ele é vantajoso quando utilizado como base estrutural, em relação ao concreto e aço, por exemplo, como a maior sustentabilidade, alta resistência e abundância na natureza, visto que a gama de madeira de reflorestamento é muito ampla.

Além disso, o cenário mundial atual é muito propício e favorável à ascensão da madeira, por conta do novo compromisso que as empresas, de modo geral, se veem na posição de assumir para tornar o planeta mais sustentável. Com isso, a madeira que era considerada um material com más características estruturais, vem se transformando no futuro da construção civil.

Quanto ao projeto de cálculo, nota-se que o uso de *Pinus* e *Eucalyptus*, apesar de algumas propriedades diferentes, resultaram em seções de mesmo tamanho, tanto para vigas quanto pilares, logo, utilizando o mesmo valor de resistência inicial, tem-se que não há significativas diferenças entre os tipos de madeira respeitando o tamanho da seção comercial.

Vale destacar que apesar dos cálculos apontarem as mesmas seções, o mais recomendado é que o mesmo tipo de espécie do produto engenheirado seja utilizado em toda a construção, por diversos fatores, como facilitar o recebimento de todo o material no mesmo prazo, tratar com o mesmo fornecedor, o que facilita questões contratuais, além de receber um material que foi tratado e produzido com os mesmos cuidados, logo, terão a mesma procedência.

Por se tratar de um “esqueleto” estrutural (vigas e pilares formando pórticos para sustentar um galpão), a madeira engenheirada utilizada foi o MLC, que são peças maiores feitas a partir da colagem de peças menores, o que torna possível produzir peças finais que vencem grandes vãos, com alta rigidez e robustez, como exemplificado no projeto, onde os pórticos foram distanciados 8 metros entre si, as vigas com comprimento pouco maior que 12 metros e as seções utilizadas que tornaram a peça bastante grande.

Vale ressaltar que se o projeto fosse de paredes, forro e/ou piso, a madeira engenheirada a ser utilizada seria o CLT, que são os painéis montados com camadas sempre ímpares, invertendo em 90° o sentido de orientação a cada camada, formando os painéis que possuem uma alta resistência e excelentes propriedades mecânicas quanto ao suporte de cargas elevadas.

Outro ponto a ser observado, são as mudanças e atualizações da nova norma NBR 7190/2022, onde foram inseridos novos fatores e formas de cálculo para um projeto de madeira. Como principal exemplo, tem-se que pela norma atualizada, o cálculo do projeto estrutural é feito com base na flexão, enquanto um projeto realizado utilizando a norma antiga NBR 7190/1997, é feito com base na compressão.

Apesar da nova norma ter sido publicada e oficializada em junho de 2022, o projeto de cálculo apresentado nesse trabalho foi feito utilizando a norma de 1997, por conta de se tratar do reaproveitamento de um projeto realizado em 2021, quando ainda não havia ocorrido as atualizações. Com isso, o projeto foi otimizado e ampliado de forma a comparar os 2 tipos de madeira mais comumente utilizados no setor atualmente (*Eucalyptus* e *Pinus*).

Apresentada no Apêndice B, nota-se como todo um trabalho foi desenvolvido ao longo dos anos para tornar mais fluida e mais evoluída a forma de calcular um projeto estrutural de madeira através da NBR 7190/2022. Além disso, essa atualização demonstra que o uso da madeira como material estrutural vem aumentando no setor da construção civil, muito influenciado pela nova maneira que o ser humano está passando a compreender sua relação e impacto no meio ambiente.

Por fim, esse trabalho conclui o objetivo de apresentar a história da madeira no setor da construção civil, toda sua evolução e desenvolvimento de material serrado, utilizado da forma mais simples, a material engenheirado, com uso de alta tecnologia; além de apresentar como se dá todo o processo de cálculo de vigas e pilares para um projeto estrutural de madeira, finalizando o conjunto teoria + prática.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, M. L. **Como elaborar monografias**. Belém: Edições Cejup, 1992.
- ALOISIO, A.; PASCA, D.; TOMASI, R.; FRAGIACOMO, M. **Dynamic identification and model updating of an eight-storey CLT building**, v. 213. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.110593. Publicado em junho de 2020.
- AMERICAN FOREST & PAPER ASSOCIATION. **Details for Conventional Wood Frame Construction**. Washington, DC, 2001.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6023: Informação e documentação: referências - elaboração**. Rio de Janeiro, 2000.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190 – Projeto de estruturas de madeira**. Rio de Janeiro, 1997.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190 – Projeto de estruturas de madeira**. Rio de Janeiro, 2022.
- CARLSON, C., **Ascent skyscraper in Milwaukee becomes world’s tallest timber building**. Publicado em ago. de 2022. Disponível em: <https://www.dezeen.com/2022/08/03/ascent-tower-milwaukee-worlds-tallest-timber-building/>. Acesso em: 03 abr. 2023.
- COSTA, A. A. P. **Construção de Edifícios com Cross Laminated Timber (CLT)**. Dissertação (Mestrado) – Porto: Universidade do Porto, 2013.
- CROSSLAM BRASIL. **Crosslam Brasil | CLT Madeira Laminada Cruzada**, c2020. A CROSSLAM está revolucionando o mercado da construção civil no Brasil. Disponível em: <https://www.crosslam.com.br/site/>. Acesso em: 15 fev. 2022.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **Eurocode 5: Design of Timber Structures - Part 1-1: General - Design of timber structures**. Novembro, 2004.
- FAUSTINO, R., **EDIFÍCIOS DE MADEIRA LAMINADA CRUZADA (CLT): SUSTENTÁVEIS E CADA VEZ MAIS POPULARES**. Publicado em 2018. Disponível em: <http://goinggreen.com.br/2018/02/26/edificios-de-madeira-laminada-cruzada-clt-sustentaveis-e-cada-vez-mais-populares/>
- KELLEY, S.J.; LOFERSKI, J.R.; SALENIKOVICH, A.J.; STERN, E.G. **History of timber construction**. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS SPECIAL TECHNICAL PUBLICATION, v. 1351, p. 3-22. DOI: 10.1520/STP13370S. Publicado em 2000.

La construcción del Museo de Arte Latinoamericano avanza a buen ritmo. Publicado em janeiro de 2021. Disponível em: <https://madera-sostenible.com/arquitectura/la-construccion-del-museo-de-arte-latinoamericano-avanza-a-buen-ritmo/>

MASCIA, N. T. **Considerações a respeito da anisotropia na madeira**. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, 1991.

MG HOMES. **MG Homes**, c2014.2015. Disponível em: <http://mghomes.com.br/>. Acesso em: 15 fev. 2022.

MIOTTO, J. L. **Estruturas mistas de madeira-concreto: avaliação das vigas de madeira laminada colada reforçadas com fibras de vidro**. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, 2009.

OLIVEIRA, G. L. **Cross Laminated Timber (CLT) no Brasil: processo construtivo e desempenho**. Dissertação (Mestrado)—São Paulo: Universidade de São Paulo, 2018.

REWOOD. **Rewood | Soluções Estruturais em Madeira Laminada Colada**, c2021. Disponível em: <https://rewood.com.br/>. Acesso em: 16 fev. 2022.

REY, L. **Planejar e redigir trabalhos científicos**. Rio de Janeiro: Edgar Blucher Editora, 1987.

SANTOS, L. M. A. **Madeiras**. Programa de pós-graduação. Brasília: Universidade de Brasília, 2018.

SOUTO, L.G.; BUENO, L.S.; SILVA, P.D., **Técnicas construtivas utilizando madeira e sua evolução histórica**, v. 5, n. 2, p. 63- 64. Publicado em 2016.

TECVERDE. **Tecverde – Construção Civil Eficiente em Wood Frame**, 2022. Construa com a pioneira em tecnologia construtiva industrializada no Brasil. Disponível em: <https://www.tecverde.com.br/>. Acesso em: 16 fev. 2022.

TRIPTYQUE. **Triptyque Architecture**, 2022. AMATA – Floresta Urbana. Disponível em: <https://triptyque.com/em/project/amata-3/>. Acesso em: 09 fev. 2022.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ. **Sistema de Bibliotecas Normas para apresentação de documentos científicos**. Curitiba, 2000.

URBEM. **MADEIRA É CONSTRUÇÃO CIVIL. MADEIRA É INDUSTRIALIZAÇÃO. MADEIRA É MITIGAÇÃO DE CARBONO**, 2023. ATUALIZAÇÃO DA NBR 7190:2022 – AVANÇOS E MELHORIAS PARA O PROJETO DE ESTRUTURAS DE MADEIRA.

Disponível em: <https://urbembr.com/atualizacao-da-nbr-71902022-avancos-e-melhorias-para-o-projeto-de-estruturas-de-madeira/>. Acesso em: 27 mai. 2023.

VILELA, R. **DESEMPENHO ESTRUTURAL DE PLACAS DE CROSS LAMINATED TIMBER SUBMETIDAS À FLEXÃO CAMPINAS 2020**. 2020. 257 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2020.

WOODSOLUTIONS. **WS16 Massive Timber Construction Systems Cross-laminated Timber (CLT)**. Australia, 2018.