

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO *EM ENGENHARIA CIVIL*

**INFLUÊNCIA DA INCLINAÇÃO DE ESTRUTURAS DE COBERTURA
NO CONSUMO DE MADEIRA**

Isabella Silva Menezes

São Carlos
2022

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO *EM ENGENHARIA CIVIL*

**INFLUÊNCIA DA INCLINAÇÃO DE ESTRUTURAS DE COBERTURA
NO CONSUMO DE MADEIRA**

Isabella Silva Menezes

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de São Carlos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Estruturas e Geotecnia

Orientador: Prof. Dr. André Luis Christoforo

Coorientador: Prof. Dr. Francisco Antonio Rocco Lahr

São Carlos
2022

Menezes, Isabella Silva

Influência da inclinação de estruturas de cobertura no consumo de madeira / Isabella Silva Menezes -- 2022. 111f.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de São Carlos, campus São Carlos, São Carlos
Orientador (a): André Luis Christoforo
Banca Examinadora: Edna Moura Pinto, Sérgio Augusto Mello da Silva
Bibliografia

1. Estruturas de cobertura de madeira. 2. Treliças planas. 3. Dimensionamento. I. Menezes, Isabella Silva. II. Título.

Ficha catalográfica desenvolvida pela Secretaria Geral de Informática (SIn)

DADOS FORNECIDOS PELO AUTOR

Bibliotecário responsável: Ronildo Santos Prado - CRB/8 7325



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

Folha de Aprovação

Defesa de Dissertação de Mestrado da candidata Isabella Silva Menezes, realizada em 23/12/2022.

Comissão Julgadora:

Prof. Dr. Andre Luis Christoforo (UFSCar)

Profa. Dra. Edna Moura Pinto (UFRN)

Prof. Dr. Sérgio Augusto Mello da Silva (UNESP)

DEDICATÓRIA

*Dedico essa dissertação para minha querida Vó Cida (in memoriam),
que rezou por mim todos os dias e se alegrou comigo quando
fui aprovada no processo seletivo do mestrado.*

Deus que abençoe a senhora, Vó!

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelo dom da minha vida, por todas as graças recebidas e por não me abandonar em nenhum dos momentos difíceis que vivenciei, fortalecendo minha fé a cada dia.

Agradeço a minha família, meus pais Anne e Amarildo e meu irmão Matheus, por serem os primeiros a me encorajarem, por me escutarem todos os dias, me aconselharem quando necessário e por serem o meu porto seguro. Só deixo registrado aqui, de modo singelo e resumido, que não teria conquistado nada na vida se não tivesse essas três pessoas ao meu lado, amo-os incondicionalmente, para sempre.

Agradeço ao meu namorado por me incentivar a conquistar os meus sonhos, mesmo que signifique menos tempos juntos no momento.

Agradeço aos meus colegas da pós-graduação por terem me ajudado nessa jornada do início ao fim, de modo especial ao Iuri Fraga que me motivou a permanecer, mesmo me sentindo perdida no início. Agradeço a Isabela Cássia e ao Gabriel Morgan por compartilharem suas experiências da pós-graduação, facilitando e amenizando um pouquinho as dificuldades dessa etapa. Agradeço as minhas amigas, Gabriela, Paula e Renata por permanecerem ao meu lado após a graduação.

Agradeço a todo corpo docente do Programa de Pós-graduação de Engenharia Civil da UFSCar que contribuíram para o meu amadurecimento profissional.

Agradeço ao Prof. Dr. Sérgio Augusto Mello da Silva e a Prof. Dra. Edna Moura Pinto por todas as sugestões e apontamentos apresentados na banca, que permitiram que essa dissertação se estruturasse da melhor forma possível.

Agradeço ao meu coorientador, Prof. Dr. Francisco Antonio Rocco Lahr, pela oportunidade de cursar uma disciplina de Estruturas de Madeira ministrada por ele, de maneira clara, doce e didática. Por solucionar todas as minhas dúvidas quanto ao tema dessa dissertação, pelas conversas sempre gentis e por ser uma inspiração para continuar essa caminhada na vida acadêmica.

Agradeço ao meu orientador e amigo Prof. Dr. André Luis Christoforo, por me proporcionar uma vivência acadêmica real, mesmo a distância. Por me apresentar a pessoas incríveis, por sugerir e possibilitar o desenvolvimento de artigos além da temática desta dissertação, por me conceder diversas oportunidades únicas e por ter tido paciência comigo em todas as nossas reuniões, cuja a minha ansiedade, às vezes, desencadeava o desespero.

EPÍGRAFE

*"Devemos manter a nossa certeza de que depois dos
dias ruins, os bons virão novamente."*

– Marie Curie

RESUMO

MENEZES, I. S. **Influência da inclinação de estruturas de cobertura no consumo de madeira**. 2022. 111p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2022.

A madeira é frequentemente empregada em estruturas treliçadas de cobertura em razão de suas excelentes propriedades mecânicas. Atualmente, em razão do mercado estar cada vez mais competitivo e da escassez de recursos disponíveis, notou-se um aumento na procura por estruturas com um dimensionamento refinado, no qual a segurança é garantida com um menor consumo de material. Um valor comumente recomendado pelos fabricantes de telha de fibrocimento para um menor consumo de madeira a ser empregado na estrutura de cobertura é a utilização de uma inclinação de 6° ($i=10\%$) entre os banzos da treliça. Nesse contexto, esse trabalho buscou avaliar a influência da inclinação entre os banzos das tesouras do tipo *Howe* e *Pratt* no consumo de madeira, por meio da utilização do *software iTruss*, que realiza a análise estrutural via MEF e considera para o dimensionamento as diretrizes da recém-publicada norma ABNT NBR 7190-1:2022. Por ser a variável principal desse estudo, a faixa de variação para inclinação considerada foi de 5° ($i=9\%$) a 25° ($i=47\%$). De modo a contemplar as mais diversas situações de projeto, foram considerados também dois tamanhos de vão distintos, além de outros parâmetros variáveis como a classe de resistência da madeira e a classe de umidade, totalizando assim em 672 simulações. A inclinação de 6° ($i=10\%$) não apresentou o menor consumo para nenhuma das situações analisadas. A fim de auxiliar na tomada de decisão em projetos estruturais de cobertura em madeira, considerando o consumo de toda a estrutura de cobertura (treliças + terças), foi determinada para todas as situações uma faixa de inclinação ótima de 10° ($i=18\%$) a 12° ($i=21\%$), de modo que o consumo obtido dentro dessa faixa não ultrapasse um acréscimo de 10% do consumo mínimo possível para cada situação.

Palavras-chave: Estruturas de cobertura de Madeira. Treliças Planas. Dimensionamento. Inclinação do telhado. Consumo de Madeira. Modelagem.

ABSTRACT

MENEZES, I. S. **Influence of the slope of roof structures on wood consumption.** 2022. 111p. Dissertation (Master in Civil Engineering) – Federal University of São Carlos, São Carlos, 2022.

Wood is often used in lattice roof structures because of its excellent mechanical properties. Currently, due to the increasingly competitive market and the scarcity of available resources, there has been an increase in demand for structures with a refined design, in which safety is guaranteed with lower consumption of material. A value, commonly recommended by fiber-cement roof tile manufacturers for lower consumption of wood to be used in the roof structure is the use of a 6° (i=10%) inclination between the truss flanges. In this context, this study seeks to evaluate the influence of the inclination between the flanges of Howe and Pratt-type joists on wood consumption, using iTruss software, which performs structural analysis via FEM and considers the guidelines of the recently published ABNT NBR 7190-1: 2022 standard for design. As this is the main variable of this study, the range of variation for slope considered was from 5° (i=9%) to 25° (i=47%). In order to contemplate the most diverse design situations, two different span sizes will also be considered, in addition to other variable parameters such as wood strength class and moisture class, thus totaling 672 simulations. The 6° slope (i=10%) did not present the lowest consumption for any of the situations analyzed. In order to assist decision-making in structural wood roofing projects, considering the consumption of the entire roof structure (trusses + purlins), an optimal pitch range of 10°(i=18%) to 12°(i=21%) was determined for all situations, so that the consumption obtained within this range does not exceed a 10% increase of the minimum possible consumption for each situation.

Keywords: Wooden roofing structures. Plane Trusses. Design. Roof Slope. Wood Consumption. Modeling.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Estruturas de cobertura em madeira.....	15
Figura 1.2 – Configurações de duas treliças tipo <i>Howe</i> com inclinações: (a) $i=38\%$; (b) $i=20\%$. Cotas em metro.....	16
Figura 2.1 – Configuração estrutural do modelo com dois travamentos laterais contínuos. .	20
Figura 2.2 – Histograma para a relação entre a força de contraventamento lateral e a carga crítica de flambagem da diagonal comprimida W2 com (a) um CLC e (b) dois CLC.....	21
Figura 2.3 – Tipo de (a) sistema de cobertura e (b) treliça.....	22
Figura 2.4 – Funcionamento do <i>software iTruss</i>	23
Figura 2.5 – Treliça inserida no <i>iTruss</i> com nós, barras e grupos de barras indicados.	24
Figura 2.6 – Identificação das distâncias nodais consideradas na treliça do tipo (a) <i>Howe</i> e (b) <i>Scissor</i>	25
Figura 2.7 – Tipologia da treliça plana.	27
Figura 2.8 – Custos e pesos obtidos para cada treliça.....	28
Figura 2.9 – Modelos de treliças analisadas.	28
Figura 2.10 – Treliça trapezoidal e indicação de alguns dos parâmetros.	29
Figura 2.11 – Tipologias: (a) <i>Howe</i> ; (b) <i>Pratt</i> ; (c) <i>Belga</i>	31
Figura 2.12 – Configuração do contraventamento para modelo de vão de 18m.....	32
Figura 2.13 – Consumo de madeira dos elementos da treliça <i>Pratt</i> de 10m em função da inclinação.	33
Figura 3.1 – Possíveis caminhos para realização da análise estrutural.....	39
Figura 3.2 – Elementos finitos em estruturas reticuladas planas: (a) Elemento de barra (b) Elemento de viga (c) Elemento de pórtico.	40
Figura 4.1 – Fluxograma das etapas da pesquisa.....	51
Figura 4.2 – Quantidade de treliças analisadas	52
Figura 4.3 – Características da madeira para cada vão.....	53
Figura 4.4 – Quantidade de simulações.....	54
Figura 4.5 – Dimensões da edificação e das aberturas consideradas: (a) planta baixa; (b) fachada frontal. Desenhos sem escala e cotas em metro.....	57
Figura 4.6 – Configurações das barras nas tipologias: (a) <i>Howe</i> ; (b) <i>Pratt</i> . Desenhos sem escala e cotas em metro.	59
Figura 4.7 – Detalhamento do arranjo de telhas para o vão de : (a) 6m; (b) 12m. Desenhos sem escala.	60
Figura 4.8 – Modelo de análise estrutural.	64
Figura 4.9 – Encaixe dos perfis. Cotas em metro.....	65
Figura 5.1 – Altura de cada terço em cada inclinação.....	67
Figura 5.2 – Volume total de terços para vão de: (a) 6 metros; (b) 12 metros.....	67
Figura 5.3 – Alturas dos grupos de barras para treliças tipo <i>Howe</i> : (a) Banzo Inferior; (b) Banzo superior; (c) Diagonal; (d) Montante	69
Figura 5.4 – Volume de cada treliça tipo <i>Howe</i> de 6 metros para classe de resistência de: (a) D20; (b) D30; (c) D40; (d) D50; (e) D60.....	71
Figura 5.5 – Volume de cada treliça tipo <i>Howe</i> de 12 metros para classe de resistência de: (a) D40; (b) D50; (c) D60.....	73
Figura 5.6 – Consumo considerando treliças tipo <i>Howe</i> de 6 metros, classe de umidade 1 e classe de resistência de: (a) D20; (b) D30; (c) D40; (d) D50; (e) D60.....	75
Figura 5.7 – Consumo considerando treliças tipo <i>Howe</i> de 6 metros, classe de umidade 2 e classe de resistência de: (a) D20; (b) D30; (c) D40; (d) D50; (e) D60.....	77
Figura 5.8 – Porcentagem do volume de cada elemento das treliças tipo <i>Howe</i> de 6 metros e terços para classe de umidade 1 e: (a) D20 – 10°; (b) D30 – 9°; (c) D40 – 11°; (d) D50 – 12°; (e) D60 – 12°.....	79
Figura 5.9 – Porcentagem do volume de cada elemento das treliças tipo <i>Howe</i> de 6 metros e terços para classe de umidade 2 e: (a) D20 – 11°; (b) D30 – 10°; (c) D40 – 11°; (d) D50 – 12°; (e) D60 – 12°.....	80

Figura 5.10 – Consumo de cada treliça tipo <i>Howe</i> de 12 metros para classe de umidade 1 e classe de resistência de: (a) D40; (b) D50; (c) D60;.....	81
Figura 5.11 – Consumo de cada treliça tipo <i>Howe</i> de 12 metros para classe de umidade 2 e classe de resistência de: (a) D40; (b) D50; (c) D60;.....	82
Figura 5.12 – Porcentagem do volume de cada elemento das treliças tipo <i>Howe</i> de 12 metros e terças para classe de umidade 1 e: (a) D40 – 12°; (b) D50 – 12°; (c) D60 – 14°	83
Figura 5.13 – Porcentagem do volume de cada elemento das treliças tipo <i>Howe</i> de 12 metros e terças para classe de umidade 2 e: (a) D40 – 16°; (b) D50 – 12°; (c) D60 – 14°	84
Figura 5.14 – Alturas dos grupos de barras para treliças tipo <i>Pratt</i> . (a) Banzo inferior; (b) Banzo superior; (c) Diagonal; (d) Montante	85
Figura 5.15 – Volume de cada treliça tipo <i>Pratt</i> de 6 metros para classe de resistência de: (a) D20; (b) D30; (c) D40; (d) D50; (e) D60.....	87
Figura 5.16 – Volume de cada treliça tipo <i>Pratt</i> de 12 metros para classe de resistência de: (a) D40; (b) D50; (c) D60.....	89
Figura 5.17 – Consumo considerando treliças tipo <i>Pratt</i> de 6 metros para classe de umidade 1 e classe de resistência de: (a) D20; (b) D30; (c) D40; (d) D50; (e) D60.....	91
Figura 5.18 – Consumo considerando treliças tipo <i>Pratt</i> de 6 metros para classe de umidade 2 e classe de resistência de: (a) D20; (b) D30; (c) D40; (d) D50; (e) D60.....	92
Figura 5.19 – Porcentagem do volume de cada elemento das treliças tipo <i>Pratt</i> de 6 metros e terças para classe de umidade 1 e: (a) D20 – 10°; (b) D30 – 10°; (c) D40 – 11°; (d) D50 – 12°; (e) D60 – 12°.....	95
Figura 5.20 – Porcentagem do volume de cada elemento das treliças tipo <i>Pratt</i> de 6 metros e terças para classe de umidade 2 e: (a) D20 – 11°; (b) D30 – 10°; (c) D40 – 11°; (d) D50 – 12°; (e) D60 – 12°.....	96
Figura 5.21 – Consumo considerando treliças tipo <i>Pratt</i> de 12 metros para classe de umidade 1 e classe de resistência de: (a) D40; (b) D50; (c) D60;.....	97
Figura 5.22 – Consumo considerando treliças tipo <i>Pratt</i> de 12 metros para classe de umidade 2 e classe de resistência de: (a) D40; (b) D50; (c) D60;.....	98
Figura 5.23 – Porcentagem do volume de cada elemento das treliças tipo <i>Pratt</i> de 12 metros e terças para classe de umidade 1 e: (a) D40 – 12°; (b) D50 – 12°; (c) D60 – 14°	99
Figura 5.24 – Porcentagem do volume de cada elemento das treliças tipo <i>Pratt</i> de 12 metros e terças para classe de umidade 2 e: (a) D40 – 16°; (b) D50 – 16°; (c) D60 – 16°	100
Figura 5.25 – Porcentagem de economia da treliça <i>Howe</i> em relação a <i>Pratt</i> para as 313 simulações realizadas.	101
Figura 5.26 – Porcentagem do acréscimo do consumo em relação ao consumo mínimo para cada situação, excluindo as terças.	102
Figura 5.27 – Diferença percentual do consumo da inclinação de 6° para as demais inclinações para cada situação, excluindo terças.	103
Figura 5.28 – Porcentagem do acréscimo do consumo em relação ao consumo mínimo para cada situação, incluindo as terças.	104
Figura 5.29 – Diferença percentual do consumo da inclinação de 6° para as demais inclinações para cada situação, excluindo terças.	105

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Estudos sobre treliças planas de madeira utilizando Método dos Elementos Finitos	19
Tabela 2.2 – Estudos com soluções considerando o menor consumo de madeira.	26
Tabela 2.3 – Inclinação ótima encontrada por Ribeiro (2008).	31
Tabela 3.1 – Classes de umidade.....	37
Tabela 3.2 – Classes de carregamento.....	37
Tabela 3.3 – Classes de resistência de espécies de florestas nativas definidas em ensaios de corpos de prova isentos de defeitos.	38
Tabela 3.4 – Ações atuantes em estruturas de cobertura.	39
Tabela 3.5 – Coeficientes de ponderação para combinações últimas normais.	41
Tabela 3.6 – Valores dos fatores de combinação (ψ_0) e de redução (ψ_1 e ψ_2) para as ações variáveis relevantes.....	42
Tabela 3.7 – Dimensões mínimas da seção transversal.	43
Tabela 3.8 – Valores do k_{mod1}	44
Tabela 3.9 – Valores do k_{mod2}	44
Tabela 3.10 – Valores para K_E	48
Tabela 3.11 – Valores limites de deslocamentos para elementos correntes fletidos.	50
Tabela 4.1 – Parâmetros que devem ser respeitados ao elaborar o arranjo de telhas.	58
Tabela 4.2 – Levantamento das ações permanentes atuantes.	61
Tabela 4.3 – Fatores considerados para a definição da velocidade característica do vento.	62
Tabela 4.4 – Parâmetros que variam em função da inclinação.	62
Tabela 4.5 – Coeficientes de ponderação e fatores de combinação e de redução adotados.	63
Tabela 4.6 – Configurações consideradas no perfil para o pré-dimensionamento.	64
Tabela 4.7 – Parâmetros fixos essenciais para o dimensionamento.	64
Tabela 5.1 – Inclinações para as respectivas situações que não foi possível obter resultado.	66
Tabela 5.2 – Inclinação ótima considerando apenas treliças de tipologia <i>Howe</i> de 6 metros	73
Tabela 5.3 – Inclinação ótima considerando apenas treliças de tipologia <i>Howe</i> de 12 metros	74
Tabela 5.4 – Inclinação ótima considerando a estrutura total de tipologia <i>Howe</i> de 6 metros.	78
Tabela 5.5 – Inclinação ótima considerando a estrutura total de tipologia <i>Howe</i> de 12 metros	83
Tabela 5.6 – Inclinação ótima considerando apenas treliças de tipologia <i>Pratt</i> de 6 metros	88
Tabela 5.7 – Inclinação ótima considerando apenas treliças de tipologia <i>Pratt</i> de 12 metros	90
Tabela 5.8 – Inclinação ótima considerando a estrutura total de tipologia <i>Pratt</i> de 6 metros	94
Tabela 5.9 – Inclinação ótima considerando a estrutura total de tipologia <i>Pratt</i> de 12 metros	99
Tabela 5.10 – Faixa de inclinação ótima para estrutura incluindo as terças.....	103

1.	INTRODUÇÃO	14
1.1	Objetivos	17
1.2	Justificativa.....	17
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1	Método dos Elementos Finitos (MEF) para análise estrutural de treliças planas de madeira.....	19
2.2	Consumo de madeira em estruturas treliçadas de cobertura	25
2.2.1	Normas Internacionais.....	27
2.2.2	Norma Brasileira.....	30
2.3	Considerações sobre a revisão bibliográfica	34
3.	ASPECTOS FUNDAMENTAIS	36
3.1	Classificações relevantes para estruturas de madeira	37
3.1.1	Classes de serviço	37
3.1.2	Classes de resistência.....	37
3.2	Ações atuantes e combinações	38
3.2.1	Levantamento das ações atuantes em estruturas de cobertura	38
3.2.2	Análise estrutural.....	39
3.2.3	Combinações dos esforços de cálculo para os Estados Limites Últimos (ELU)	40
3.2.4	Combinações dos deslocamentos de cálculo para os Estados Limites de Serviço (ELS)	42
3.3	Dimensionamento	43
3.3.1	Verificação dos Estados Limites Últimos (ELU).....	43
3.3.1.1	<i>Verificação de elementos submetidos à flexão simples oblíqua.....</i>	<i>45</i>
3.3.1.2	<i>Verificação de elementos submetidos à flexão composta</i>	<i>46</i>
3.3.1.3	<i>Verificação de elementos submetidos à esforços axiais</i>	<i>49</i>
3.3.2	Verificação dos Estados Limites de Serviço (ELS).....	49
4.	METODOLOGIA	51
4.1	Variáveis consideradas.....	52
4.1.1	Variações quanto a geometria.....	52
4.1.2	Variações quanto as propriedades da madeira	53
4.1.3	Quantidade de simulações	54
4.2	Funcionamento do software utilizado	54
4.3	Situações de projeto comuns.....	55
4.3.1	Características da edificação	56
4.3.2	Arranjos de telhas para definição da configuração das barras	58
4.3.3	Ações e carregamentos atuantes	60
4.3.3.1	<i>Ações permanentes.....</i>	<i>61</i>
4.3.3.2	<i>Ações variáveis devido ao vento</i>	<i>61</i>
4.3.3.3	<i>Demais ações variáveis.....</i>	<i>63</i>
4.3.3.4	<i>Resumo dos coeficientes de ponderação e fatores de combinação e de redução</i>	<i>63</i>

4.3.4	Modelo de análise estrutural	63
4.3.5	Configurações para o dimensionamento	64
4.4	Cálculo do Volume e Consumo	65
5.	RESULTADOS.....	66
5.1	Terças.....	66
5.2	Tipologia <i>Howe</i>.....	68
5.2.1	Treliça.....	68
5.2.1.1	<i>Vão de 6 metros</i>	70
5.2.1.2	<i>Vão de 12 metros</i>	73
5.2.2	Estrutura completa: treliças + terças	74
5.2.2.1	<i>Vão de 6 metros</i>	74
5.2.2.2	<i>Vão de 12 metros</i>	81
5.3	Tipologia <i>Pratt</i>	85
5.3.1	Treliça.....	85
5.3.1.1	<i>Vão de 6 metros</i>	86
5.3.1.2	<i>Vão de 12 metros</i>	89
5.3.2	Estrutura completa: treliças + terças	90
5.3.2.1	<i>Vão de 6 metros</i>	90
5.3.2.2	<i>Vão de 12 metros</i>	97
5.4	Comparação entre as tipologias	101
5.5	Faixa de inclinação ótima	102
5.5.1	Estrutura excluindo as terças	102
5.5.2	Estrutura incluindo as terças	103
6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	106
6.1	Sugestões para trabalhos futuros	107
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	108

1. INTRODUÇÃO

A madeira foi um dos primeiros materiais utilizados pelo homem primitivo com a finalidade de construir um abrigo que o protegesse. Ao longo da história, a madeira foi amplamente empregada na construção civil em virtude da facilidade de manuseá-la apenas com o uso de ferramentas rudimentares e de sua vasta disponibilidade. Atualmente, ela permanece sendo um dos principais materiais de construção, juntamente com o aço e o concreto.

Quando comparada com esses outros dois materiais, a madeira se destaca por ser um recurso renovável e, além disso, sua produção exige uma menor quantidade de energia, caracterizando-a como um material sustentável (CALIL JÚNIOR; DIAS, 1997). As suas vantagens não ficam limitadas apenas ao ponto de vista ecológico, com o avanço tecnológico e científico, constatou-se também vantagens quanto ao desempenho de algumas propriedades mecânicas.

A relação da resistência mecânica pela densidade, no material madeira, é superior à encontrada para compressão, no concreto armado, e para tração, no aço (CALIL JÚNIOR; DIAS, 1997; RAMAGE *et al.*, 2017). Outra propriedade relevante é a sua tenacidade, ou seja, a capacidade da madeira de resistir a elevadas solicitações em um curtíssimo intervalo de tempo (CHRISTOFORO *et al.*, 2020). Por todas essas qualidades, a madeira pode ser aplicada em vários elementos estruturais.

No hemisfério Norte, países como Canadá, Estados Unidos, Japão e países escandinavos fazem um uso mais diversificado do material, sendo destacado o uso frequente do sistema *wood frame* em residências. A realidade no Brasil é completamente diferente, apesar de dispor abundantemente de inúmeras espécies de madeira, o preconceito limita a sua ampla utilização na construção civil pelo país.

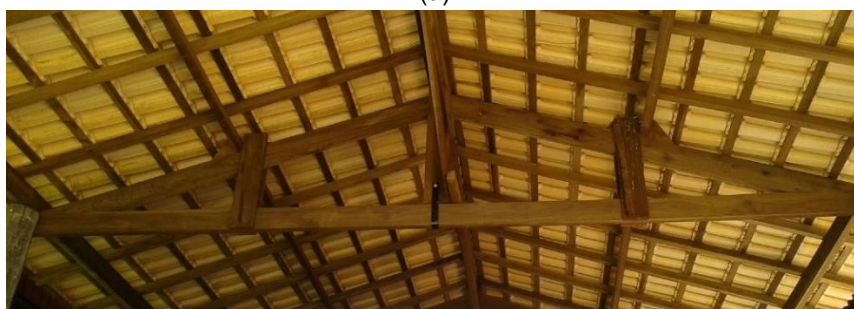
O erro humano é normalmente o responsável por essa desconfiança da qualidade do material, pois a preparação ou utilização inadequada compromete o seu desempenho. Outra possível causa é a pouca divulgação dos prós de aplicar a madeira em peças estruturais no país. Uma possível das opções para reverter essa realidade é o desenvolvimento de cartilhas de recomendações projetuais (OLIVEIRA; PEDRINI; PINTO, 2022).

No Brasil, ainda que na região Sul o emprego da madeira seja um pouco mais difundido, no geral, a aplicação do material no país se restringe a estruturas de cobertura, podendo ser compostas por vigas, arcos ou treliças. A treliça pode ser definida como sendo uma estrutura composta por barras ligadas por meio de nós, na qual não ocorre a transferência de momento entre os elementos. As coberturas de madeira de galpões rurais e industriais são usualmente de treliças planas. É possível também encontrar esse sistema estrutural em coberturas de residências, sendo menos frequente devido ao fato de que esse sistema é indicado para grandes vãos, por ser uma estrutura um pouco mais leve. Exemplos de cobertura com treliças planas são apresentados na Figura 1.1.

Figura 1.1 – Estruturas de cobertura em madeira.



(a)



(b)

Fonte: (a) Sudoeste Paulista Madeiras (2019)¹; (b) Sudoeste Paulista Madeiras (2015)².

¹SUDOESTE PAULISTA MADEIRAS. Publicação Eletrônica. Disponível em: <https://www.facebook.com/sudoeste.madeira.tratada/photos/a.722445807811629/2238590696197125/>. Acesso em: 14 fev. 2022.

²SUDOESTE PAULISTA MADEIRAS. Publicação Eletrônica. Disponível em: <https://www.facebook.com/sudoeste.madeira.tratada/photos/pcb.934042106651997/934041613318713/>. Acesso em: 14 fev. 2022.

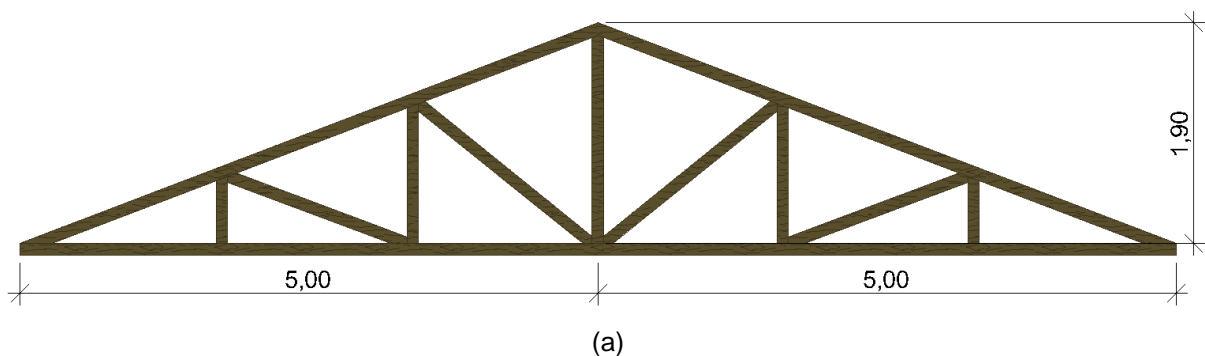
A ABNT NBR 7190 (1997) foi a norma vigente por quase duas décadas e meia que apresentava as diretrizes que regulamentaram os projetos de estruturas de madeira no Brasil. Recentemente, esse documento normativo foi revisado e originou a norma recém-publicada, a ABNT NBR 7190-1 (2022). Sabe-se que as revisões normativas são essenciais para que esses documentos acompanhem o avanço do conhecimento, visando um dimensionamento mais econômico, sem renunciar à segurança.

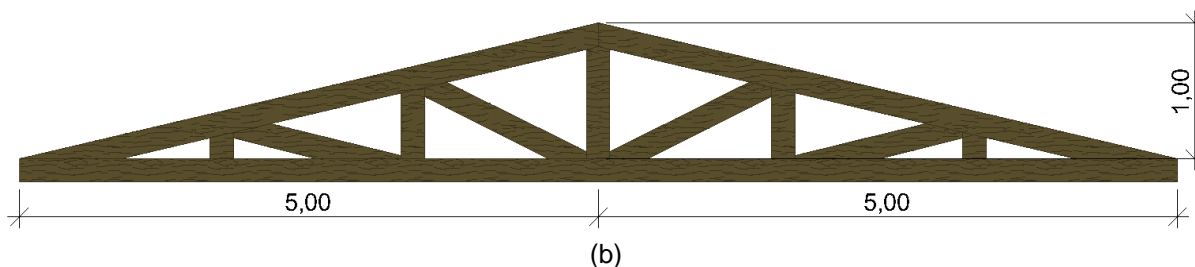
O *software iTruss*, desenvolvido por Fraga (2020), é uma ferramenta oportuna para analisar estruturas treliçadas planas de madeira, pois realiza a análise estrutural via Método dos Elementos Finitos (MEF) e já dimensiona a estrutura de acordo com a nova norma, a ABNT NBR 7190-1 (2022). Além disso, a sua versão mais recente, calcula o volume (m^3) e o consumo (m^3/m^2) de madeira a ser empregado na estrutura analisada, possibilitando uma análise de otimização.

A busca por estruturas enxutas, porém seguras, aumentou consideravelmente nos últimos tempos. Essa é a consequência de um mercado cada vez mais competitivo juntamente com a necessidade de racionalizar os recursos empregados e de reduzir os impactos causados pela construção civil ao meio ambiente. A estrutura otimizada resulta em um menor consumo de material, que contribui para um melhor preço no mercado e ainda diminui a exploração de recursos.

Quando o assunto é economia em estruturas de cobertura em madeira no Brasil, alguns fabricantes de telha de fibrocimento defendem uma suposição empírica, de que, é preferível utilizar uma inclinação (i) de 6° (10%) entre os banzos de uma tesoura de tipologia *Pratt* ou *Howe*, pois consome um menor volume de material, visto que os comprimentos de algumas barras são menores nessa configuração do que quando comparada a outras de inclinações maiores. Na Figura 1.2 são apresentadas duas configurações onde é possível observar que o comprimento do montante diminui, quando a inclinação também diminui.

Figura 1.2 – Configurações de duas treliças tipo *Howe* com inclinações: (a) $i=38\%$; (b) $i=20\%$. Cotas em metro.





Fonte: Elaborado pela própria autora (2022).

No entanto, sabe-se que utilizar inclinações menores resulta em forças mais elevadas e em provável necessidade de reforços nas barras. É possível que, a partir de uma determinada inclinação, esse acréscimo de volume recorrente dos reforços das barras supere o volume reduzido por causa do menor comprimento. Por esse motivo na Figura 1.2b tem-se as barras ilustradas com espessuras maiores, indicando um provável aumento no volume de material empregado na estrutura. Assim, esse trabalho pretende compreender como a inclinação de estruturas de cobertura influencia no consumo de madeira. Os objetivos e a justificativa são apresentados nas subseções a seguir.

1.1 Objetivos

O objetivo principal desse trabalho foi avaliar a influência da inclinação entre os banzos de duas tipologias distintas de tesouras (*Howe* e *Pratt*) no consumo de madeira. Para isso, utilizou-se o *software iTruss*, cuja análise estrutural é feita via Método dos Elementos Finitos (MEF) e o dimensionamento segue as diretrizes da norma recém-publicada, ABNT NBR 7190-1 (2022).

Quanto aos objetivos específicos para cada tipologia, tem-se:

- Analisar a relação entre a redução do volume devido a diminuição do comprimento dos montantes e o acréscimo de volume necessário para reforços nas barras;
- Avaliar a influência das classes de resistência no consumo de madeira.
- Avaliar a influência das classes de umidade no consumo de madeira.
- Definir uma faixa de inclinações ótimas que resulte no emprego de um menor volume de madeira para cada tipologia;

1.2 Justificativa

A madeira é um material que possui propriedades relevantes e sua principal aplicação estrutural no Brasil são em treliças planas de cobertura. Mesmo sendo um material de fonte

renovável, é extremamente interessante ao meio ambiente que seu consumo seja racional, que inevitavelmente resulta também em um preço mais acessível, motivando ainda mais o uso dessa estrutura de cobertura sustentável.

Uma barreira quando se deseja dimensionar estruturas com um menor consumo de madeira é o empirismo, pois, por se tratar de um dos materiais mais antigos, sua utilização se baseia em várias suposições que nem sempre estão corretas. Assim, a não utilização de um criterioso cálculo estrutural, pode resultar em estruturas superdimensionadas, ou seja, um consumo de madeira maior que o necessário para segurança da estrutura.

Sabe-se que o conhecimento empírico deve ser sempre verificado utilizando abordagens científicas que comprovem, ou não, sua veracidade. Para evitar que a sociedade permaneça no erro, fazem-se necessárias pesquisas que busquem verificar as suposições empíricas em projetos de estruturas de madeira.

Portanto, faz-se necessário a verificação de se a inclinação de 10% (6°), usualmente indicada pelos fabricantes de telha de fibrocimento, resulta mesmo em um menor consumo de madeira para quaisquer situações de projeto. Uma vez que, o estudo de otimização de treliças planas de cobertura de Ribeiro (2008), apresenta uma variação da inclinação ótima em função do tamanho de vão analisado, sendo a inclinação ótima de 6° indicada em apenas uma das inúmeras situações analisadas. Esse estudo é melhor detalhado na seção 2.

Diante o exposto, este trabalho se justifica devido à necessidade de investigar exaustivamente a influência da inclinação entre os banzos de tesouras no consumo de madeira.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A presente revisão bibliográfica é dividida em três subseções. A seção 2.1 apresenta trabalhos desenvolvidos nos últimos dez anos que utilizaram o Método dos Elementos Finitos (MEF) para análise estrutural de treliças planas de madeira. Já a seção 2.2 aborda pesquisas relevantes dos últimos anos que utilizaram o consumo de madeira como parâmetro para analisar diversas variáveis e situações de projeto e que indicam soluções mais econômicas. Por fim, a seção 2.3 aponta algumas considerações relevantes sobre a revisão de literatura que reforçam a justificativa deste trabalho.

Para busca dos estudos relacionados aos nichos supracitados, recorreu-se às seguintes bases de dados: Periódicos CAPES, *Engineering Village* (Compendex), *Web of Science*, *Scopus* e *Google Scholar*.

2.1 Método dos Elementos Finitos (MEF) para análise estrutural de treliças planas de madeira

Há uma vasta quantidade de trabalhos que utilizam o Método dos Elementos Finitos (MEF) para análise estrutural de treliças planas de madeira. Com intuito de síntese são apresentadas na Tabela 2.1 as pesquisas mais relevantes, realizadas nos últimos 10 anos, com a indicação do *software* de análise em Elementos Finitos utilizado e o seu respectivo escopo. Posteriormente, são detalhadas as pesquisas que desenvolveram um algoritmo próprio para análise em Elementos Finitos.

Tabela 2.1 – Estudos sobre treliças planas de madeira utilizando Método dos Elementos Finitos

Estudos	Software MEF	Escopo
Song e Lam (2012)	Próprio	Avaliação da carga crítica de flambagem e força de contraventamento lateral de treliças de madeira conectadas por chapas de dentes estampados (CDE).
Debailleux (2013)	Autodesk Robot Structural Analysis	Análise do comportamento estrutural e atual estado de conservação de treliça de madeira histórica na Bélgica
Barbari <i>et al.</i> (2014)	N/A	Verificação da aplicabilidade de um sistema de ligação inovador entre barras de treliça de madeira.
Próprio: Desenvolvido pelos próprios autores.		
N/A: Não consta a informação.		

(continua)

(continuação)

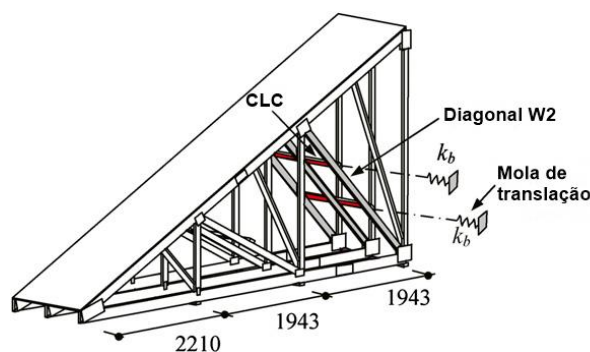
Estudos	Software MEF	Escopo
Burdzik e Skorpen (2014)	Prokon	Análise de flambagem comparativa em estruturas de cobertura treliçadas de madeira com dois diferentes tipos de contraventamento.
Milch <i>et al.</i> (2016)	ANSYS	Análise do comportamento mecânico de uma treliça de madeira histórica de uma igreja na República Tcheca.
Krušínský <i>et al.</i> (2017)	SCIA Engineer	Verificação de condições de confiabilidade definidas por normativas europeias em uma estrutura de cobertura histórica.
Carino e Carli (2018)	Próprio	Avaliação do melhor modo de discretização de treliça de madeira envelhecidas construídas na Itália.
Sejkot <i>et al.</i> (2020)	ABAQUS	Investigação da influência da rigidez de um sistema de contraventamento de madeira na estabilidade fora do plano de uma estrutura de cobertura treliçada.
Qin e Stewart (2019)	ANSYS	Análise de fragilidade da ruptura devido ao vento extremo de treliças de cobertura de madeira na Austrália.
Fraga (2020)	Próprio (<i>iTruss</i>)	Avaliação da influência dos modelos idealizados de ligações no dimensionamento de treliças planas de madeira.
Hermida (2020)	ANSYS	Método que permite considerar valores variáveis de momento de inércia nas barras de treliça de madeira em modelagem.
Navaratnam (2020a, 2020b)	ABAQUS	Análise do efeito do vento dinâmico na rigidez de ligações entre telhado-parede (RTWC) de casas em <i>timber framing</i> .
Moraes <i>et al.</i> (2022)	Próprio	Análise do desempenho mecânico de duas tipologias distintas de treliça de madeira.

Próprio: Desenvolvido pelos próprios autores.
N/A: Não consta a informação.

Fonte: Elaborada pela própria autora (2022).

A pesquisa de Song e Lam (2012) teve como objeto de estudo uma estrutura de treliças planas de madeira com barras conectadas por chapas de dentes estampados (CDE) considerando três situações: sem contraventamento lateral, com apenas um elemento de contraventamento lateral contínuo (CLC) no meio da barra W2 e com dois elementos de CLC (Figura 2.1). Com intuito de investigar a regra prática dos 2%, a qual determina que os elementos de contraventamento devem resistir a 2% da força de compressão atuante em cada elemento comprimido contraventado, foram analisadas a carga crítica de flambagem e a força do contraventamento lateral.

Figura 2.1 – Configuração estrutural do modelo com dois travamentos laterais contínuos.

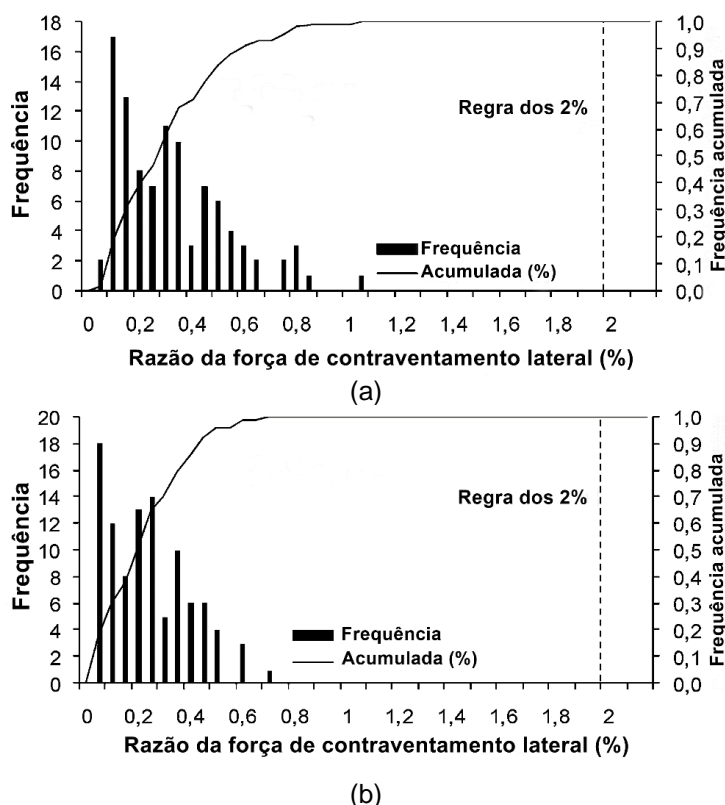


Fonte: Adaptado de Song e Lam (2012, p.1115, tradução nossa).

Para as simulações numéricas, foi desenvolvido um programa utilizando o Método dos Elementos Finitos (MEF), calibrado e validado por experimentos executados por Song *et al.* (2010). Foi verificado, por meio da análise via MEF e de uma análise preliminar de confiabilidade, que a rigidez rotacional fora do plano das ligações em CDE na diagonal W2 tem um efeito significativo na carga crítica de flambagem e na relação de forças de contraventamento lateral desse tipo de treliça (SONG; LAM, 2012).

A relação entre a força de contraventamento lateral e a carga de compressão de uma das diagonais comprimidas da treliça, foi menor que 1% em quase todas as amostragens (Figura 2.2), somente uma única amostragem atingiu o valor próximo a 1,1%, como mostra a Figura 2.2a. Portanto, a regra de ouro, comumente utilizada no dimensionamento de contraventamento lateral norte-americano, é um tanto quanto conservadora para a estrutura analisada, resultando em elementos de contraventamento superdimensionados (SONG; LAM, 2012).

Figura 2.2 – Histograma para a relação entre a força de contraventamento lateral e a carga crítica de flambagem da diagonal comprimida W2 com (a) um CLC e (b) dois CLC.

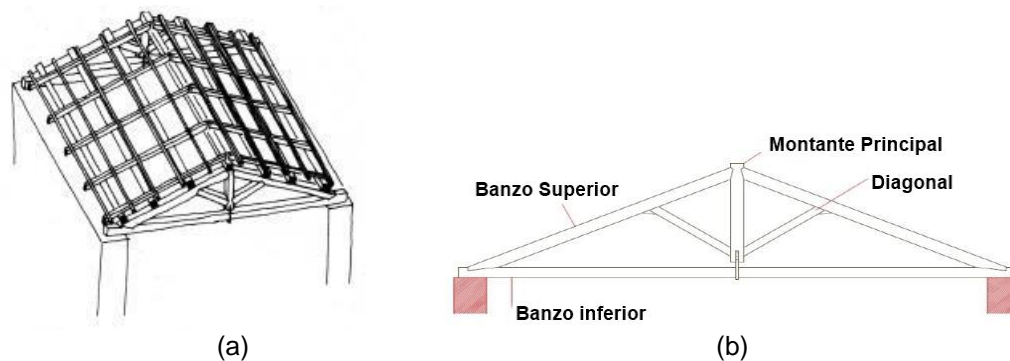


Fonte: Adaptado de Song e Lam (2012, p. 1118, tradução nossa).

Visando contribuir com estudos futuros sobre reforços dos banzos inferiores de treliças, Carino e Carli (2018) analisaram uma estrutura de cobertura clássica pré-existente (Figura 2.3a) na região da Lombardia, Itália. A estrutura principal da cobertura foi uma típica treliça de madeira, dada sua geometria na Figura 2.3b, composta por: banzos superiores

inclinados e comprimidos; montante principal que une todos os elementos e está sujeito a leves tensões de tração; diagonais também comprimidas e banzo inferior que forma a base da tesoura. Ressalta-se que nessa tipologia, é comum colocar um suporte entre o montante principal e o banzo inferior para garantir a coplanaridade da estrutura.

Figura 2.3 – Tipo de (a) sistema de cobertura e (b) treliça.



Fonte: Adaptado de Carino e Carli (2018, p. 10216, tradução nossa).

É notável a importância da avaliação de estruturas de madeira devido a possíveis degradações, sejam elas decorrentes do envelhecimento ou da falta de manutenção. Para a tipologia analisada, o banzo inferior está submetido tanto à flexão como à força axial de tração. Ao suportar as tensões de tração, esse elemento anula, quase completamente, as reações horizontais dos banzos superiores inclinados, evitando a transmissão para os elementos de vedação, como por exemplo a alvenaria. Assim, por ser considerado um elemento crucial para a estrutura, o banzo inferior merece uma avaliação mais detalhada e, para tal, foi elaborado um modelo considerando o banzo inferior como elemento sólido tridimensional de 8 nós e as demais partes como elementos lineares de 2 nós (CARINO; CARLI, 2018).

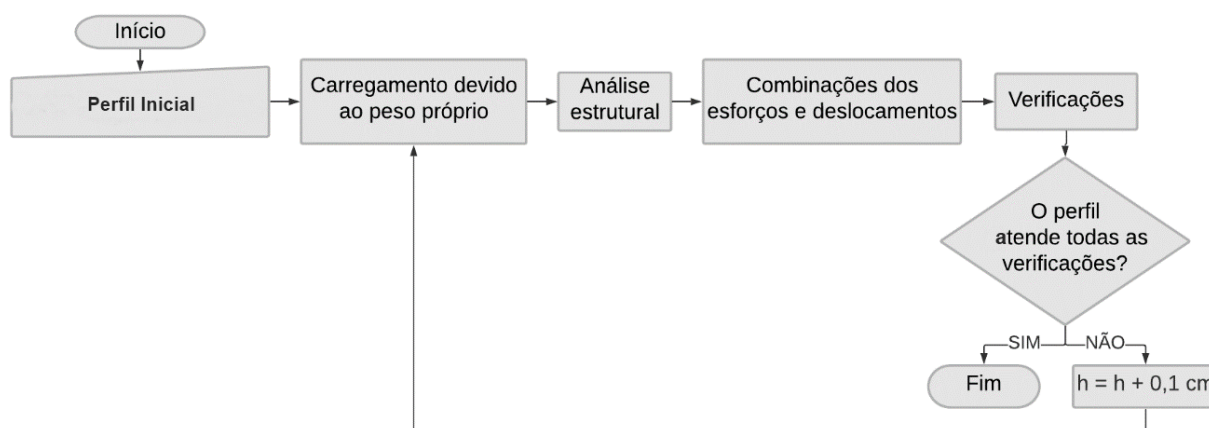
Além disso, também foi simulado um outro modelo considerando todo o sistema com elementos lineares de 2 nós que coincidem com seu eixo, a fim de comparar a análise estrutural obtida. Os modelos com dois diferentes tipos de discretização para o banzo inferior foram analisados por um código computacional baseado nos MEF, sendo mutuamente validados. Por fim, o modo de discretização do banzo inferior como elemento sólido tridimensional de 8 nós mostrou-se válido para avaliar a introdução de reforços no elemento, pois evidenciaram com precisão a variação de tensões dentro da seção transversal (CARINO; CARLI, 2018).

O estudo de Fraga (2020) explorou três situações distintas quanto a modelagem das treliças em Elementos Finitos: a primeira considerando o modelo clássico de treliças, onde todas as barras são consideradas como elementos de barra (perfeitamente rotuladas), a segunda considerando as barras como elementos de pórtico (perfeitamente engastadas) e a terceira considerando os banzos como elementos de pórtico e as diagonais e montantes como

elementos de barra. Além disso, outras duas variações foram abordadas quanto ao modo de aplicação do carregamento do peso próprio (PP): aplicação das ações devido ao PP apenas nos nós onde há terças; aplicação pontuais do PP das terças em seus respectivos nós e aplicação distribuída do PP da treliça ao longo do comprimento das barras. Totalizando assim o estudo de 6 modelos diferentes para analisar a influência dos modelos idealizados de ligações nas dimensões finais das peças.

Para as simulações, foi desenvolvido um programa computacional utilizando a linguagem VB.NET (ambiente do *Visual Studio Community 2019*), que realiza a análise estrutural linear-elástica via Elementos Finitos e o dimensionamento segue as prescrições da ABNT NBR 7190-1 (2022), denominado *iTruss*. O funcionamento do *software* é elucidado no fluxograma da Figura 2.4, onde observa-se o critério de dimensionamento por altura mínima do perfil (FRAGA, 2020).

Figura 2.4 – Funcionamento do *software iTruss*.

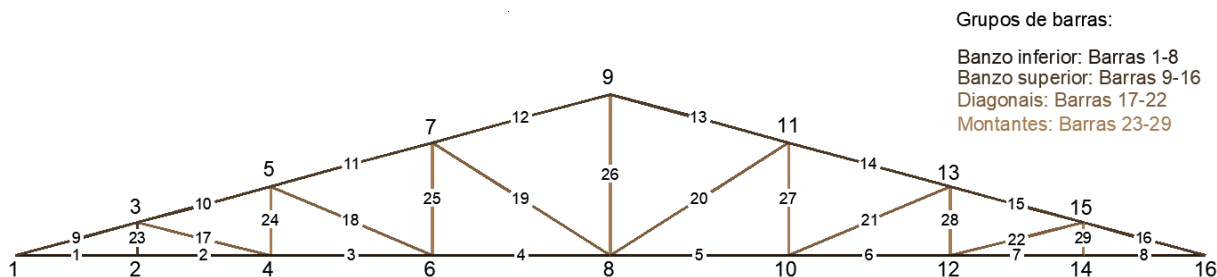


Fonte: Adaptado de Fraga (2020, p. 74).

Constata-se que é estabelecido uma seção transversal inicial para cada grupo de barras (definidos na Figura 2.5) e para a situação inserida são calculados o carregamento devido ao peso próprio, a análise estrutural, a combinação dos esforços e deslocamentos e, por fim, é verificado se as seções adotadas inicialmente atendem todas as exigências normativas, se sim, o processo é finalizado, se não, acrescenta-se 0,10 centímetros na altura inicial do perfil e todo o processo é feito novamente até que todas as verificações normativas sejam satisfeitas, encontrando-se assim a seção transversal segura com a menor altura possível para a situação de projeto analisada. Os valores de esforços e deslocamentos obtidos foram aferidos com o *software* SAP2000 e demonstrou que o código desenvolvido para análise estrutural é confiável com diferenças insignificantes para a estrutura analisada (FRAGA, 2020).

A tipologia *Howe* com 12m de vão foi a adotada por Fraga (2020) e a configuração dela com nós (números com tamanho de fonte maior) e barras (números com tamanho de fonte menor) enumerados é dada na Figura 2.5. Observa-se também que é indicado quais barras compõem o banzo inferior, superior, diagonais e montantes.

Figura 2.5 – Treliça inserida no *iTruss* com nós, barras e grupos de barras indicados.

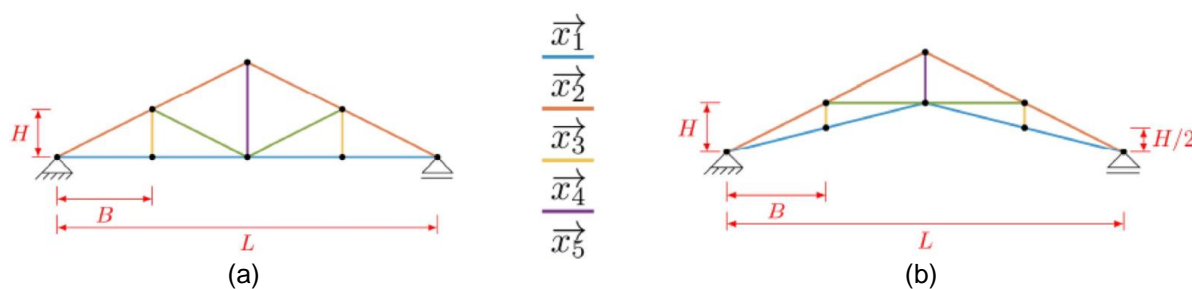


Fonte: Fraga (2020, p. 62).

Após simular todos os seis modelos, notou-se que as barras diagonais e montantes não mostraram variações significativas nos perfis dimensionados para cada modelo, devido ao fato de seus esforços solicitantes serem inferiores aos dos banzos. No entanto, os banzos tanto inferiores quanto superiores demonstraram uma diferença de um pouco mais de 40%, sendo considerado o modelo de rigidez perfeita o que representa o melhor aproveitamento dos perfis. Quanto à variação da aplicação do carregamento devido ao peso próprio, as duas situações analisadas não mostraram oscilações expressivas, comprovando que utilizar a área de influência representa satisfatoriamente o caso real.

Moraes *et al.* (2022) também desenvolveu um código considerando a formulação clássica do MEF para realizar a análise estrutural e determinar os deslocamentos dos nós, as deformações específicas, as tensões e as forças normais em cada barra da treliça analisada, essenciais para o dimensionamento da estrutura. Em um contexto de uma estrutura de cobertura de treliças planas, onde os carregamentos foram devidamente levantados e combinados, foram analisadas treliças de tipologia *Howe* e *Scissor*, apresentadas na Figura 2.6, cada uma delas para sete vãos diferentes: 5m; 7,5m; 10m; 12,5m; 15m; 17,5m e 20m. Explana-se que a tipologia definida nesse trabalho como *Howe*, é denominada como *Pratt* para Moraes *et al.* (2022).

Figura 2.6 – Identificação das distâncias nodais consideradas na treliça do tipo (a) Howe e (b) Scissor.



Fonte: Moraes *et al.* (2022, p. 5).

O desenvolvimento do código ocorreu em ambiente MATLAB e, além da análise em Elementos Finitos, foi implementado também uma otimização estrutural utilizando uma abordagem em algoritmo de inteligência de enxame. A otimização teve como função objetivo o menor peso total da treliça, como restrições as condições estabelecidas na normativa brasileira ABNT NBR 7190 (1997) e como variáveis a base (b_i) e altura (h_i) da seção transversal das barras. Essas variáveis compõem o vetor x_i , onde o índice i representa os tipos de elementos da treliça e são indicados na Figura 2.6 (MORAES *et al.*, 2022).

Após análise dos dados e confirmação dos resultados por meio da análise de variância (ANOVA) com 5% de significância, notou-se que para todas as situações, a tipologia Howe otimizada atingiu um peso menor que a tipologia Scissor otimizada, essa diferença entre tipologias variou de 3% à 19%. Essa comparação do comportamento mecânico entre as tipologias também demonstrou que a treliça Scissor distribuiu melhor os esforços normais, uma vez que seus deslocamentos máximos são mais próximos do deslocamento limite da ABNT NBR 7190 (1997), conseqüentemente, observa-se valores de deslocamento menores para a tipologia Howe (MORAES *et al.*, 2022).

2.2 Consumo de madeira em estruturas treliçadas de cobertura

Na literatura existem alguns trabalhos que, após analisar diversas variáveis e situações de projeto, encontram uma solução que apresenta um menor consumo de madeira na estrutura treliçada de cobertura analisada, sem comprometer a sua segurança. Ressalta-se que são adotadas diferentes condições em cada uma dessas pesquisas, como por exemplo o tipo de estrutura treliçada de cobertura, a norma que norteará o dimensionamento dessa estrutura, entre outras particularidades.

Assim, para efeito de síntese, são apresentados na Tabela 2.2 os trabalhos mais relevantes com essa abordagem e suas principais características. Posteriormente, são descritas as análises de alguns dos estudos, destacando as soluções encontradas. Para

melhor organização foi dividido essa seção em trabalhos cujo dimensionamento da estrutura segue padrões normativos internacionais (seção 2.2.1) e trabalhos que utilizam a norma brasileira (seção 2.2.2).

Tabela 2.2 – Estudos com soluções considerando o menor consumo de madeira.

Origem	Norma	Estudos	Escopo
INTERNACIONAL	<i>Eurocode 5</i> (EN 1995-1-1, 2002)	Šilih, Kravanja e Premrov (2010)	Otimização de treliça trapezoidal com madeira lamelada colada, com vão fixo e variação da inclinação, dentre outras características geométricas, buscando a configuração mais econômica e mais leve.
	<i>Eurocode 5*</i>	Procházka, Böhm e Sviták (2014)	Comparação do consumo de material entre as estruturas treliçadas e estrutura com vigas, para melhor aproveitamento do sótão.
	<i>Eurocode 5</i> (EN 1995-1-1, 2004)	Ençuc <i>et al.</i> (2016)	Comparação do volume de madeira empregado para três diferentes tipos de estruturas de cobertura em madeira
	<i>Eurocode 5</i> (EN 1995-1-1, 2010)	Villar <i>et al.</i> (2016)	Otimização com Algoritmo Genético (AG) visando menor custo e conseqüentemente o menor consumo de madeira em treliças trapezoidais com madeira lamelada colada, com inclinação fixa.
	<i>Eurocode 5</i> (EN 1995-1-1, 2016)	Villar-García <i>et al.</i> (2019)	Otimização com AG de treliça trapezoidal com madeira lamelada colada, com inclinação fixa e dimensões comerciais, dimensionamento tanto da treliça plana isolada como de toda a estrutura treliçada plana em 3D, visando menor custo.
	<i>Eurocode 5*</i>	Zhurtov <i>et al.</i> (2021)	Estudo paramétrico de treliça trapezoidal com ligações de chapas de dentes estampados (CDE), com variação da inclinação no banzo superior, entre outras propriedades geométricas.
BRASILEIRA	ABNT NBR 7190 (1997)	Souza Júnior e Gesualdo (2006)	Otimização de treliças espaciais via AG, com variação de inclinação e classe de resistência da madeira fixa.
	ABNT NBR 7190 (1997)	Souza Júnior <i>et al.</i> (2007)	
	ABNT NBR 7190 (1997)	Ribeiro (2008)	Otimização de treliças planas do tipo <i>Howe</i> , <i>Pratt</i> e <i>Belga</i> via AG, com variação de inclinação e de outras características geométricas.
	ABNT NBR 7190 (1997)	Ribeiro <i>et al.</i> (2016)	Comparação do consumo de materiais empregados em uma estrutura treliçada plana já existente com uma estrutura corretamente dimensionada de classe de resistência inferior à existente. Também foi abordado a comparação do custo final da estrutura.
	ABNT NBR 7190 (1997)	Palludo <i>et al.</i> (2017)	Análise de diversas proporções de aberturas para diferentes áreas da edificação proporcionais, variando os vãos de 8 a 18m. Com intuito de avaliar a configuração que empregue um menor consumo de material com classe de resistência não convencional.
	ABNT NBR 7190 (1997)	Oliveira <i>et al.</i> (2019)	Análise da influência da inclinação no consumo de madeira em treliças <i>Pratt</i> com perfil simples e vão de 10m.
	ABNT NBR 7190-1 (2022)	Fraga <i>et al.</i> (2021)	

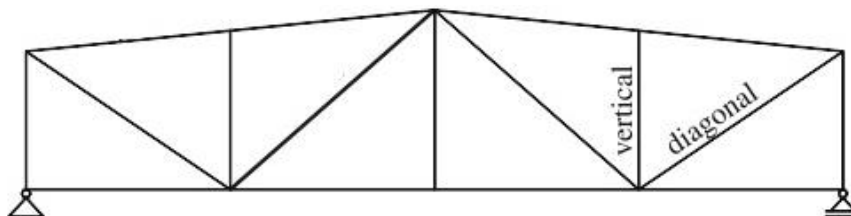
Notas: * Norma provável, não mencionada no estudo. Versão indeterminada.

Fonte: Elaborada pela própria autora (2022).

2.2.1 NORMAS INTERNACIONAIS

O estudo de Šilih, Kravanja e Premrov (2010) realizou a otimização da forma e do dimensionamento discreto de treliças de madeira considerando a flexibilidade das juntas, por meio de uma abordagem de otimização de programação não linear inteira mista aplicando o algoritmo de Aproximações Externas com Relaxamento de Igualdade (OAV/ER). A função objetivo do modelo de otimização visou minimizar os custos da estrutura e um dos parâmetros de otimização foi a variação da inclinação de 0° a 15° para a tipologia de treliça apresentada na Figura 2.7, com um vão fixo de 22,5 metros.

Figura 2.7 – Tipologia da treliça plana.

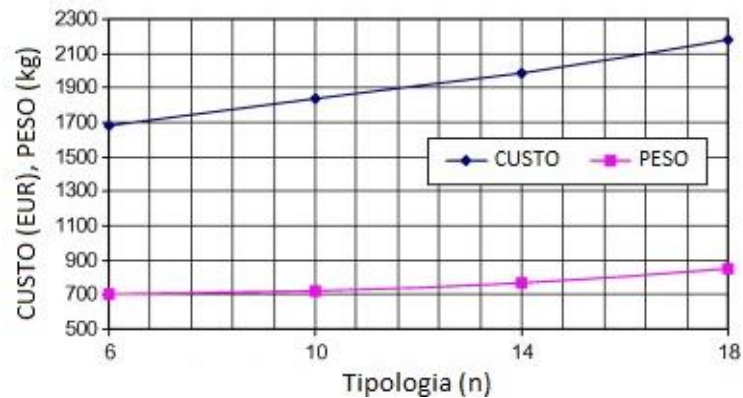


Fonte: Adaptado de Šilih, Kravanja e Premrov (2010).

Foi variado apenas o número de barras diagonais e montantes (barras verticais) de uma treliça para outra ($n=6$, $n=10$, $n=14$ e $n=18$), totalizando em quatro treliças analisadas. As forças e os deslocamentos internos foram calculados pelo Método dos Elementos Finitos (MEF) e o dimensionamento seguiu as diretrizes do EN 1995-1-1 (2002) – *Eurocode 5*, utilizando madeira lamelada colada (ŠILIH, KRAVANJA E PREMROV, 2010).

Como resultado, Šilih, Kravanja e Premrov (2010) chegaram que para essa tipologia a inclinação ótima varia de acordo com o número de barras verticais, não necessariamente diretamente ou inversamente proporcional, visto que para $n=6$ a inclinação ótima foi de $12,63^\circ$, para $n=10$ a inclinação ótima foi de $10,02^\circ$, para $n=14$ a inclinação ótima foi de $11,94^\circ$ e para $n=18$ a inclinação ótima foi de $12,71^\circ$. Concluiu-se que a treliça mais econômica foi aquela que apresentou o menor número de barras diagonais e montantes ($n=6$, conforme observado no gráfico da Figura 2.8) e ainda que a altura da treliça e a inclinação do banzo superior têm uma influência significativa no resultado final.

Figura 2.8 – Custos e pesos obtidos para cada treliça.

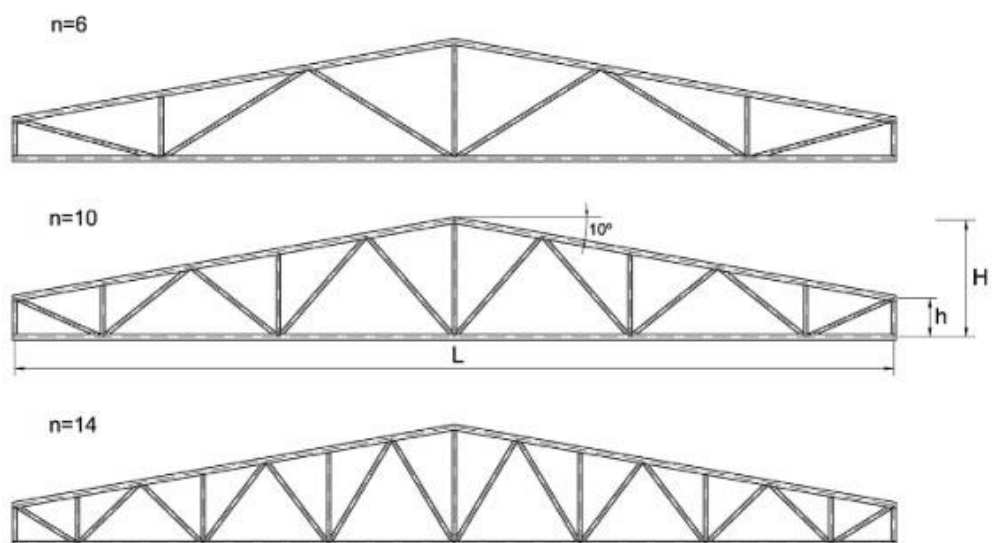


Fonte: Adaptado de Šilih, Kravanja e Premrov (2010).

Além disso, os resultados obtidos comprovaram que a consideração da flexibilidade na articulação é importante. Os deslocamentos devido aos deslizamentos nas ligações equivalem a 40% dos deslocamentos totais e deve-se optar por projetar treliças dessa tipologia mais altas, ou seja, com relação vão/altura menor e com um número menor de elementos (ŠILIH, KRAVANJA E PREMROV, 2010).

Com o intuito de comparar seus resultados, Villar *et al.* (2016) implementaram um código no *software* MATLAB aplicando algoritmo genético. No estudo, foi adotada a mesma classe de resistência da madeira lamelada colada e foram analisados três dos quatro modelos de treliças investigados por Šilih, Kravanja e Premrov (2010), sendo n igual a 6, 10 e 14. Esses modelos são apresentados na Figura 2.9, todos com uma inclinação fixa de 10° .

Figura 2.9 – Modelos de treliças analisadas.



Fonte: Adaptado de Villar *et al.* (2016).

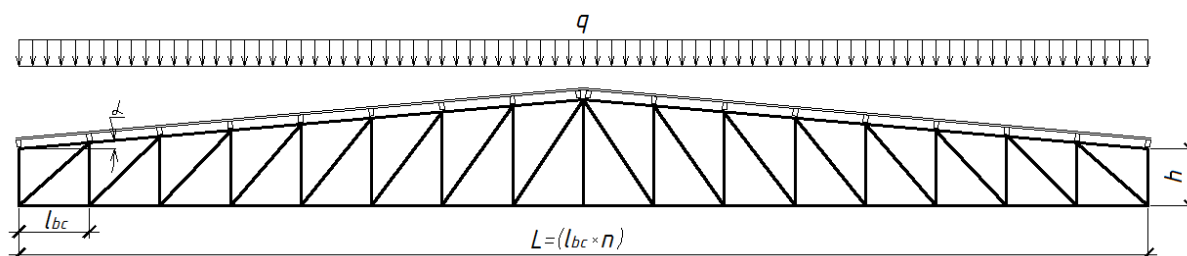
Assim, nesse estudo foram comparados os resultados obtidos e percebeu-se que os valores possuem diferenças significativas por razão de terem utilizado uma versão diferente do *Eurocode 5* (EN 1995-1-1, 2010). É importante destacar também que cada um utilizou um tipo de algoritmo para otimização. As principais variações observadas foram no cálculo dos elementos de fixação e sua influência no deslizamento da ligação. Mesmo utilizando versões de normas e códigos diferentes, a treliça mais econômica encontrada foi a mesma, com $n=6$.

No código desenvolvido por Villar *et al.* (2016) não foram consideradas as dimensões comerciais, ou seja, admitiu-se que as dimensões pudessem ser personalizadas, a otimização foi considerada contínua. Pensando nessa limitação do código, posteriormente, Villar-García *et al.* (2019) implementaram no código a consideração das espessuras e larguras do laminado disponíveis comercialmente no mercado europeu, sendo uma otimização discreta.

Nessa nova pesquisa, Villar-García *et al.* (2019) realizaram a otimização de estruturas de cobertura em madeira lamelada colada em duas e três dimensões. As análises 2D foram realizadas visando a comparação com os estudos de otimização detalhados anteriormente, sendo então adotado o mesmo vão e modelos de treliças da Figura 2.9. Novamente, concluiu-se que a treliça com o menor número de barras foi a mais econômica e está aliada ao laminado de menor espessura (35mm). Nas análises 3D, foi observado que a variação da distância entre treliças e a posição das terças também são variáveis significativas quando se estima a redução de custos.

Um estudo paramétrico determinístico foi realizado por Zhurtov *et al.* (2021), cujo elemento em análise foi uma treliça trapezoidal com ligações feitas por chapas de dentes estampados (CDE), cuja carga foi distribuída conforme demonstrado na Figura 2.10. Os parâmetros investigados foram o número de painéis da treliça (n), a altura da lateral externa da treliça (h), a inclinação do banzo superior (α) e a espessura das barras da treliça (b). Essas variáveis são indicadas também na Figura 2.10, com exceção da espessura.

Figura 2.10 – Treliça trapezoidal e indicação de alguns dos parâmetros.



Fonte: Zhurtov *et al.* (2021, p. 2).

A otimização feita por meio de um algoritmo determinístico proposto teve como função objetivo a minimização do volume de madeira. Os parâmetros ótimos obtidos foram $n=16$, $h=1,3$ metros e $\alpha=7^\circ$ (ZHURTOV *et al.*, 2021).

2.2.2 NORMA BRASILEIRA

Souza Junior e Gesualdo (2006) abordaram a otimização do volume de madeira empregado em estruturas espaciais de barras cruzadas para cobertura por meio do programa computacional denominado OTR (Otimização de Estruturas Reticuladas) que utiliza em seu código o método de algoritmos genéticos. Para a determinação dos esforços, deslocamentos e dimensionamento foi utilizado o *software* GESTRUT desenvolvido por Gesualdo (2005), no qual o dimensionamento seguiu as diretrizes da ABNT NBR 7190 (1997). Foi utilizada uma madeira do tipo conífera e de classe C25, os ângulos de cobertura foram variados de 15° a 45° . O sistema estrutural analisado demonstrou ser mais viável para estruturas de pequenos e médios vãos e a inclinação ótima para o modelo analisado foi de 15° .

A mesma estrutura espacial foi otimizada por Souza Junior *et al.* (2007), pelo mesmo método, porém explorando a influência das dimensões das barras de fechamento e cumeeira no comportamento mecânico global da estrutura. Além de outras variáveis, nessa otimização a variação da inclinação da cobertura foi de 15° a 35° . Como resultado observou-se que as dimensões desses elementos não têm grande influência no deslocamento vertical máximo e que a inclinação ótima foi de 24° para a situação de projeto abordada.

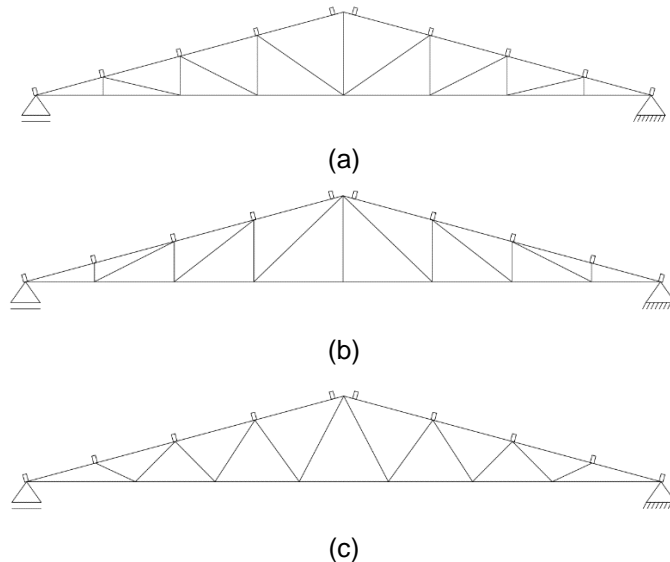
Ribeiro (2008) realizou a otimização de estruturas de cobertura planas de madeira do tipo treliçado utilizando a abordagem em algoritmos genéticos. A otimização foi feita utilizando um programa computacional denominado Otimização de Estruturas Planas (OTP) que é uma adaptação do OTR utilizado por Souza Junior e Gesualdo (2006) e Souza Junior *et al.* (2007). Para a mesma finalidade dos trabalhos supracitados, neste também foi utilizado o *software* GESTRUT.

A otimização de Ribeiro (2008) buscou uma geometria ótima variando a distribuição de barras e a inclinação entre o banzo superior e inferior de 5° a 35° . A função objetivo visou o menor consumo do volume de madeira. O dimensionamento foi realizado de acordo com ABNT NBR 7190 (1997), utilizando a madeira do tipo dicotiledônea de classe C40.

Foram analisadas três tipologias de treliças distintas: *Howe* (Figura 2.11a), *Pratt* (Figura 2.11b) e *Belga* (Figura 2.11c) e para cada uma delas quatro vãos: 10m, 12m, 14m e 15m, para todos os vãos o comprimento da área de cobertura foi de 20m. Também foi variado o número de barras verticais e diagonais das treliças, essas partes são denominadas de

módulos e a variação foi de 4 a 7 módulos, que se refere apenas a quantidade de barras verticais de metade da treliça, devido a simetria. Quanto às terças foram feitas duas variações, uma com suas posições predefinidas automaticamente pelo programa nos montantes e outra com a posição das terças definidas pelo usuário, não necessariamente nos montantes (RIBEIRO, 2008).

Figura 2.11 – Tipologias: (a) Howe; (b) Pratt; (c) Belga.



Fonte: Elaborado pela própria autora (2022).

Os valores de inclinação ótima para terças posicionadas nos montantes encontrados pelo algoritmo de Ribeiro (2008), para cada arranjo estrutural analisado, é exibido na Tabela 2.3. Notou-se que no trabalho de Ribeiro (2008) que os valores de inclinações ótimos são apresentados, porém os mesmos não são discutidos ou analisados. Acredita-se que devido ao fato de que com abordagem utilizada não foi possível estabelecer um comportamento padrão para as inclinações ótimas, visto que elas variam significativamente de modo aleatório quando variado o número de módulos para um mesmo vão e tem comportamento análogo para situação inversa.

Tabela 2.3 – Inclinação ótima encontrada por Ribeiro (2008).

Vãos	10 metros				12 metros				14 metros				15 metros				
	Módulos	4	5	6	7	4	5	6	7	4	5	6	7	4	5	6	7
Inclinação (°)	Howe	11	23	21	22	12	19	17	17	10	9	12	9	17	12	8	8
	Pratt	11	27	25	22	13	18	14	23	12	12	18	6	10	10	8	10

Fonte: Elaborada pela própria autora (2022) com valores de Ribeiro (2008).

Analisando ainda os valores para situação de terças nos montantes encontrados por Ribeiro (2008), observou-se que em algumas situações a treliça Howe apresenta uma

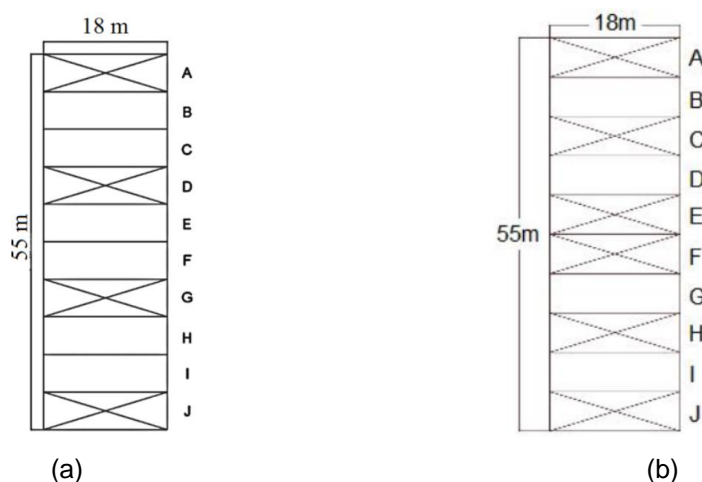
inclinação ótima menor que a tipologia *Pratt*, porém quando comparado o consumo de madeira entre ambas, a *Howe* apresenta um consumo mínimo maior que a *Pratt*.

De modo geral, concluiu-se que o volume da madeira sofre influência do número de módulos, não sendo possível estabelecer um modelo de treliça indicado para qualquer situação. Também foi verificado que o volume aumenta para a situação na qual as posições das terças são definidas pelo usuário, sem coincidir com os montantes. Foi observado também que, para os casos analisados, a tipologia que apresentou um menor consumo de madeira foi a tipologia *Pratt*. É importante destacar que esses resultados foram obtidos utilizando a mesma seção transversal para todos os elementos da treliça, resultando em uma treliça não otimizada totalmente, visto que na prática as seções geralmente são diferentes, mantendo-se geralmente apenas a mesma espessura, pois alguns elementos da treliça são mais solicitados que outros (RIBEIRO, 2008).

Os estudos de Palludo *et al.* (2017) e Oliveira *et al.* (2019) são semelhantes entre si, visto que ambos variam a proporção das aberturas laterais do edifício (1:1, 2:1, 6:1 e cobertura isolada/aberta) e o tamanho dos vãos (8m, 10m, 12m 14m, 16m e 18m), de modo que suas respectivas áreas da edificação mantenham a proporção de aproximadamente 1:3. Ambos consideram a tipologia *Howe* com inclinação de 10° e analisam assim 6 modelos de projetos distintos.

A principal diferença entre os dois trabalhos é a maneira de como são considerados os contraventamentos, sendo dados na Figura 2.12 os contraventamentos adotados para o vão de 18m em cada um dos estudos. Além disso, apesar de ambos utilizarem as mesmas classes de baixa resistência C20 e C30, elas são distribuídas de maneiras distintas, sendo consideradas as terças como C20 e os demais elementos como C30 em Oliveira *et al.* (2019) e uma análise mais criteriosa em Palludo *et al.* (2017).

Figura 2.12 – Configuração do contraventamento para modelo de vão de 18m.



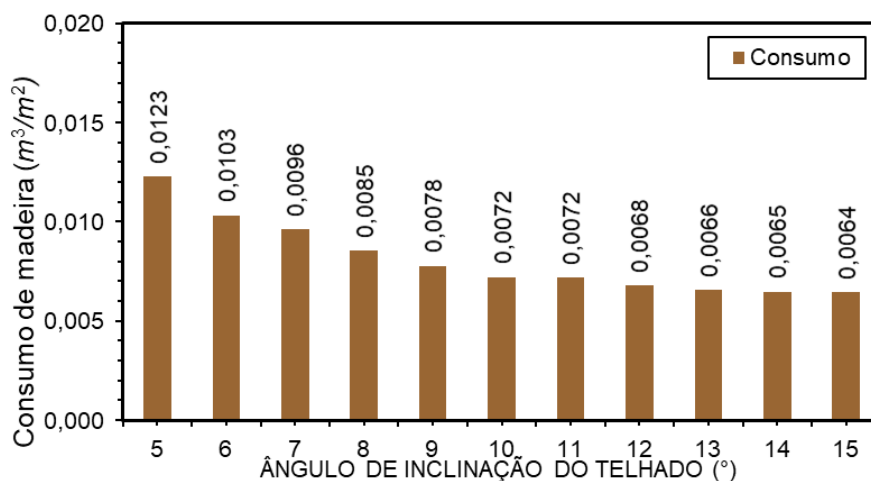
Fonte: (a) Palludo *et al.* (2017); (b) Oliveira *et al.* (2019).

O critério utilizado para avaliar a melhor proporção das aberturas laterais para os edifícios foi o consumo de madeira. Foi encontrada a proporção ótima de abertura como sendo a 1:1 e comprovada a viabilidade técnica de madeiras de baixa resistência em ambos os estudos, de modo de promover a sua utilização em projetos estruturais e aliviar o emprego das tradicionais espécies de elevada resistência normalmente empregadas. Destaca-se ainda que Palludo *et al.* (2017) observou que considerar um vão maior para as terças (5,5m) foi mais vantajoso quando comparado ao convencionalmente utilizado (2,5m - 3,5m).

A inclinação foi a variável principal do estudo realizado por Fraga *et al.* (2021), que trabalhou com uma faixa de variação de 5° (9%) a 15° (27%) em estruturas treliçadas planas, de tipologia *Pratt* com 10 metros de vão e configuração das barras considerando 7 montantes. O dimensionamento seguiu a nova norma ABNT NBR 7190-1 (2022) e em todos os modelos simulados no *software iTruss*, as propriedades da madeira foram mantidas fixas, sendo adotada a classe de resistência D40 e a classe de umidade 1.

Todos os elementos das treliças foram considerados como perfil simples com espessura fixa de 5 centímetros e o modelo estrutural utilizado para representar as ligações entre as barras foi o modelo clássico de treliça. A Figura 2.13 apresenta o consumo de madeira para cada valor de inclinação analisado (FRAGA *et al.*, 2021).

Figura 2.13 – Consumo de madeira dos elementos da treliça *Pratt* de 10m em função da inclinação.



Fonte: Adaptado de Fraga *et al.* (2021).

Os resultados obtidos demonstraram que o consumo de madeira (m³/m²) diminui conforme a inclinação aumenta e, a inclinação ótima consiste no limite máximo da faixa de inclinação adotada (15°), o que indica que essa pode não ser a inclinação ótima global, sendo necessário considerar uma faixa de inclinação maior (FRAGA *et al.*, 2021).

2.3 Considerações sobre a revisão bibliográfica

A revisão bibliográfica mostrou que existem inúmeros trabalhos que utilizam o Método dos Elementos Finitos (MEF) para análise de estruturas de cobertura com treliças planas. Também foi constatado um crescente interesse na utilização do consumo de madeira ou do custo (que é calculado em função do volume de madeira) como parâmetro de avaliação de estruturas treliçadas de cobertura em madeira.

Em relação aos trabalhos que utilizaram o MEF em estruturas treliçadas planas de madeira, concluiu-se que:

- O avanço tecnológico possibilitou o desenvolvimento de ferramentas computacionais exclusivas para pesquisas que, para se atingir o objetivo, necessitem da realização da análise estrutural via MEF adaptada ou não para a análise considerada;
- Pesquisas científicas podem também investigar a procedência das denominadas “regras de ouro”, as quais não possuem comprovações científicas, mas são amplamente empregadas na prática, como observado em Song e Lam (2012);
- Conforme Fraga (2020), a ligação entre as barras da treliça que proporciona um melhor aproveitamento do perfil, considerando o dimensionamento de acordo com a ABNT NBR 7190-1 (2022), é a que considera as barras perfeitamente engastadas, denominado modelo estrutural de pórtico. Esse modelo é diferente do modelo clássico de treliça, geralmente adotado, onde se considera a ação somente de esforços axiais. Constatou-se também ser indiferente o modo de aplicação do carregamento devido ao peso próprio da estrutura.

Por fim, dos trabalhos que buscaram avaliar alguma variável da estrutura com o parâmetro de menor consumo/custo, concluiu-se que:

- Dos estudos estrangeiros, apenas um trabalho considera o sistema de cobertura completo em 3D (ou seja, considera as terças);
- Todos os trabalhos encontrados consideravam uma classe de resistência da madeira fixa para todas as situações variadas;
- A variável mais considerada nas pesquisas foi o número de barras diagonais e verticais da treliça (plana ou espacial) chamados por alguns de “n” ou “m”, demonstrando ter uma influência considerável no consumo de madeira;
- A maioria dos trabalhos citados abordaram a busca por estruturas mais econômicas por meio da otimização e utilizaram um código computacional. O método dos

algoritmos genéticos foi o mais empregado, demonstrando ser um método de otimização eficiente;

- Mesmo que inúmeros estudos variem a inclinação e alcancem um valor ótimo para tal, não é possível compreender ainda como a inclinação influencia no consumo da madeira, sendo o estudo de Fraga *et al.* (2021) aquele que conseguiu elucidar melhor a influência da inclinação. Porém, a faixa de variação da inclinação considerada nele foi pequena (5°- 15°), não sendo possível identificar se a inclinação de 15° é uma inclinação ótima global ou se há outras maiores ainda melhores. Além disso, foi abordado no estudo um único vão e as propriedades da madeira foram consideradas fixas em todas as simulações, condições que não favorecem a compreensão da influência da inclinação.

3. ASPECTOS FUNDAMENTAIS

Por ser uma versão recente da normativa brasileira, nesta seção são descritas as diretrizes que regem os projetos de estruturas de madeira de acordo com a nova norma, a ABNT NBR 7190-1 (2022). Somente as informações técnicas que contribuem com o trabalho desenvolvido são abordadas.

Antes de adentrar nas peculiaridades da normativa supracitada, salienta-se que um dos possíveis sistemas estruturais a serem utilizados e mais frequentemente aplicados em estrutura de cobertura é aquele composto por treliças planas e por terças, que nada mais são do que vigas longitudinais dispostas a modo de ligar uma treliça a outra no sistema. Essa estrutura é considerada principal, visto que quando utilizado telhas cerâmicas, faz-se necessário o uso de uma estrutura secundária, composta por caibros e ripas (PFEIL; PFEIL, 2003).

A definição da tipologia da treliça utilizada nesse sistema treliçado plano tem sua significância, visto que a disposição das barras na tipologia *Howe* (Figura 2.11a) leva a esforços de tração no banzo inferior e no montante e a esforços de compressão na diagonal e no banzo superior, já na tipologia *Pratt* (Figura 2.11b) os esforços no montante e nas diagonais se invertem (PFEIL; PFEIL, 2003). Assim a treliça *Howe*, apesar de ser a tipologia mais tradicionalmente empregada em tesouras de madeira, tem um limite máximo de vão menor que a treliça *Pratt*, sendo a última indicada normalmente para grandes vãos.

Com a tipologia e sistema estrutural definido, inicia-se os próximos passos para se obter o dimensionamento de uma estrutura de cobertura de madeira, sendo subdividida essa seção em partes que promovam uma melhor clareza das informações necessárias. Na seção 3.1 são apresentadas as classes de serviço das estruturas de madeira e algumas classes de resistência da madeira. Na seção 3.2 é explanado brevemente sobre: o levantamento das ações atuantes na estrutura (seção 3.2.1); o Método dos Elementos Finitos para análise estrutural (seção 3.2.2); a combinação dos esforços (seção 3.2.3) no Estado Limite Último (ELU) e a combinação dos deslocamentos (seção 3.2.4) no Estado Limite de Serviço (ELS). O dimensionamento em si é exposto somente na seção 3.3, na qual é detalhado a maneira de se obter as resistências de cálculo e de se realizar as verificações ELU (seção 3.3.1) e ELS (seção 3.3.2). Cabe ressaltar que essas são as etapas de um projeto estrutural, faltando

somente a explanação a respeito do dimensionamento das ligações e detalhamento estrutural, não relevantes para esse trabalho.

3.1 Classificações relevantes para estruturas de madeira

A ABNT NBR 7190-1 (2022) apresenta as classes de serviços de estruturas de madeira e as classes de resistência da madeira. Essas classificações impactam diretamente na resistência da madeira e são exibidas a seguir.

3.1.1 CLASSES DE SERVIÇO

Em uma estrutura de madeira, tem-se como classes de serviços as classes de umidade, dadas na Tabela 3.1, e as classes de carregamento, dadas na Tabela 3.2.

Tabela 3.1 – Classes de umidade.

Classes de umidade	Umidade relativa do ambiente (U_{amb})	Umidade de equilíbrio máxima da madeira (U_{eq})
1	$U_{amb} \leq 65\%$	12%
2	$65\% < U_{amb} \leq 75\%$	15%
3	$75\% < U_{amb} \leq 85\%$	18%
4	$U_{amb} > 85\%*$	$\geq 25\%$

*Durante longos períodos

Fonte: Adaptado da Tabela 1 da ABNT NBR 7190-1 (2022, p.10).

Tabela 3.2 – Classes de carregamento.

Classes de carregamento	Ação variável principal da combinação	
	Duração acumulada	Ordem de grandeza da duração acumulada da ação característica
Permanente	Permanente	Mais de dez anos
Longa duração	Longa duração	Seis meses a dez anos
Média duração	Média duração	Uma semana a seis meses
Curta duração	Curta duração	Menos de uma semana
Instantânea	Instantânea	Muito curta

Fonte: Adaptado da Tabela 4 da ABNT NBR 7190-1 (2022, p. 14).

Para determinar a classe de carregamento, leva-se em consideração a duração acumulada da ação variável considerada como principal na combinação.

3.1.2 CLASSES DE RESISTÊNCIA

Consta na nova versão normativa, a ABNT NBR 7190-1 (2022), que as classes de resistências podem ser definidas por dois tipos de ensaios: os de corpos de prova isentos de defeitos e os de peças estruturais. Por serem as mais relevantes para este trabalho, as classes de resistência obtidas por meio de ensaios de corpos de prova isentos de defeitos são dadas na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Classes de resistência de espécies de florestas nativas definidas em ensaios de corpos de prova isentos de defeitos.

Classes	$f_{c0,k}$(MPa)	$f_{v0,k}$(MPa)	$E_{c0,m}$(MPa)	ρ_{ap}(kg/m³)
D20	20	4	10000	500
D30	30	5	12000	625
D40	40	6	14500	750
D50	50	7	16500	850
D60	60	8	19500	1000

Notas:

Valores obtidos de acordo com a ABNT NBR 7190-3 (2022).

Valores referentes ao teor de umidade igual a 12%.

Os valores das classes de resistência para espécies nativas estão disponíveis na Tabela A.1 da ABNT NBR 7190-3 (2022)

Fonte: Tabela 2 da ABNT NBR 7190-1 (2022, p. 12).

As classes de resistência obtidas em ensaios de peças estruturais podem ser encontradas na Tabela 3 da ABNT NBR 7190-1 (2022).

3.2 Ações atuantes e combinações

É imprescindível que as ações atuantes sejam levantadas, aplicadas na estrutura, analisadas e combinadas corretamente, de modo a garantir a segurança e a economia da estrutura. Projetos que não consideram todas as ações atuantes, comprometem a segurança da estrutura e projetos que consideram ações além das que realmente atuam, resulta em uma estrutura superdimensionada e antieconômica. Assim, é pertinente a explanação breve nessa seção sobre este tema.

3.2.1 LEVANTAMENTO DAS AÇÕES ATUANTES EM ESTRUTURAS DE COBERTURA

Ao se projetar uma estrutura de cobertura, um dos primeiros passos, após a definição da geometria, é o levantamento das ações permanentes e variáveis atuantes na estrutura.

As ações permanentes são aquelas que possuem valores estáveis com variações insignificantes durante toda a vida útil da construção. Já as ações variáveis são aquelas que apresentam uma expressiva variação ao longo da vida útil da construção (ABNT NBR 8681, 2003). A Tabela 3.4 sintetiza quais algumas das ações atuantes em uma estrutura de cobertura e a forma de levantamento, de acordo com o seu tipo.

Tabela 3.4 – Ações atuantes em estruturas de cobertura.

Classificação da ação	Ação	Levantamento
Permanentes	Peso próprio da estrutura principal (treliças e terças) e da estrutura secundária ¹	Dimensões da seção transversal multiplicadas pela densidade da madeira.
	Peso próprio das telhas	Catálogo Técnico dos fabricantes das telhas.
	Peso próprio de elementos de contraventamento	Dimensões da seção transversal multiplicada pela densidade do material.
Variáveis	Vento	De acordo com ABNT NBR 6123 (1988).
	Demais ações	De acordo com ABNT NBR 6120 (2019).

Notas:¹ Caibros e ripas onde as telhas podem ser fixadas.

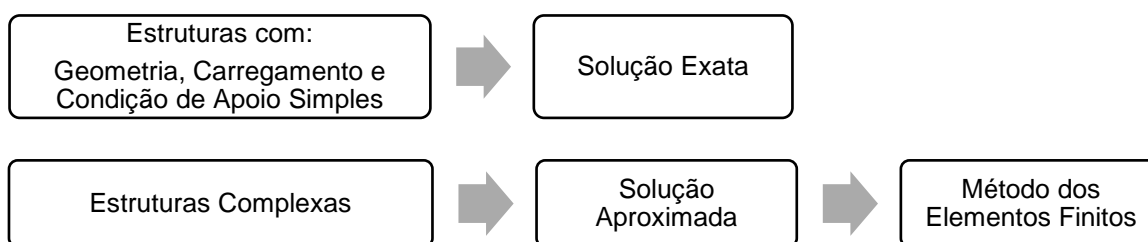
Fonte: Elaborado pela própria autora (2022).

A etapa seguinte ao levantamento de carga é a análise estrutural, brevemente explanada a seguir.

3.2.2 ANÁLISE ESTRUTURAL

Há diversas maneiras de se realizar a análise estrutural de estruturas de cobertura de modo a se obter os esforços, deslocamentos, deformações e tensões decorrentes das ações atuantes, sendo uma delas a utilização do Método dos Elementos Finitos (MEF), bastante eficaz em estruturas treliçadas planas (FRAGA, 2020). A Figura 3.1 ilustra que é possível obter soluções exatas por meio de métodos analíticos para estruturas simples, porém quando se trata de estruturas complexas as soluções são aproximadas e obtidas por métodos numéricos, sendo um deles o Método dos Elementos Finitos (ALVES FILHO, 2013).

Figura 3.1 – Possíveis caminhos para realização da análise estrutural.



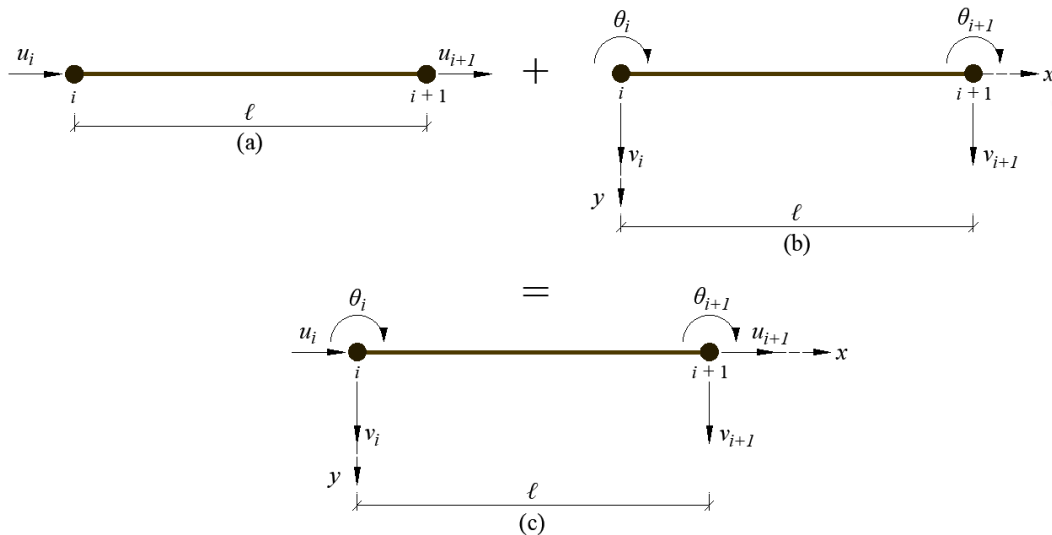
Fonte: Adaptado de Alves Filho (2013, p. 3).

Considerado um método de aproximação de problemas contínuos, o Método dos Elementos Finitos consiste na subdivisão de uma estrutura complexa em pequenos elementos, de modo que o comportamento das partes retrate o comportamento da estrutura original. Essa subdivisão é normalmente chamada de discretização e para isso utiliza-se as equações diferenciais (ZIENKIEWICZ; TAYLOR; ZHU, 2013).

Ressalta-se que para estruturas reticuladas planas é o número de graus de liberdade que define o tipo de elemento finito. Dentre as possibilidades tem-se elemento de barra (Figura

3.2a), elemento de viga (Figura 3.2b) e elemento de pórtico (Figura 3.2c), sendo o último o resultado da combinação dos dois primeiros (FRAGA, 2020).

Figura 3.2 – Elementos finitos em estruturas reticuladas planas: (a) Elemento de barra (b) Elemento de viga (c) Elemento de pórtico.



Nota: u – deslocamentos nodais; θ – rotação; v – translação; (i) e (i+1) – nós.

Fonte: Fraga (2020, p. 41).

Como mencionado na seção 2.1, as ligações entre as barras da treliça podem ser consideradas como rótulas perfeitas (modelo clássico de treliça) ou como perfeitamente rígidas (modelo estrutural de pórtico).

Após realizada a análise estrutural via MEF, os esforços obtidos devem ser combinados para o Estado Limite Último – ELU (seção 3.2.3) e os deslocamentos para o Estado Limite de Serviço – ELS (seção 3.2.4).

3.2.3 COMBINAÇÕES DOS ESFORÇOS DE CÁLCULO PARA OS ESTADOS LIMITES ÚLTIMOS (ELU)

Diferente da versão anterior data 1997, a nova versão da norma brasileira de projetos de madeira direciona que os coeficientes de ponderação e as combinações últimas sigam as premissas da ABNT NBR 8681 (2003).

A ABNT NBR 8681 (2003) divide as combinações para o ELU em três diferentes situações de projeto: uso normal da construção, transitórias e excepcionais. A diferença entre cada combinação está no modo que trata a ação variável e cabe ao projetista definir quais situações de projeto envolvem a estrutura analisada, não sendo necessário realizar todas as combinações em todas as estruturas.

Em linhas gerais, emprega-se a combinação última normal (Equação 1) em estruturas de cobertura, na qual considera-se a atuação total de uma das ações variáveis (denominada como principal) e as demais ações tem seu valor reduzido, por ter baixa probabilidade de ocorrência simultânea.

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

Em que:

F_d – Esforço solicitante de Cálculo;

γ_{gi}, γ_q – Coeficiente de ponderação das ações permanentes e variáveis, respectivamente (Tabela 3.5);

ψ_{0j} – Fator de combinação (Tabela 3.6);

$F_{Gi,k}$ – Esforço solicitante característico devido a ações permanentes;

$F_{Q1,k}$ – Esforço solicitante característico devido a ação variável principal;

$F_{Qj,k}$ – Esforço solicitante característico devido a demais ações variáveis.

Apesar de seguir as diretrizes da ABNT NBR 8681 (2003), uma particularidade da antiga norma de estruturas de madeira é mantida nessa nova versão. A ação variável principal na combinação de Estado Limite Último deve ser 25% reduzida, se o seu tempo de ação for muito reduzido. Por exemplo o vento ou a parcela das cargas móveis devida ao impacto (ABNT NBR 7190-1, 2022). Assim, nesses casos deve-se utilizar a Equação 2 que acrescenta essa multiplicação por 0,75 da variável principal.

$$F_d = \sum_{i=1}^m \gamma_{gi} \cdot F_{Gi,k} + \gamma_q \cdot \left[0,75 \cdot F_{Q1,k} + \sum_{j=2}^n \psi_{0j} \cdot F_{Qj,k} \right] \quad (2)$$

Pela ABNT NBR 8681 (2003) é possível que as ações sejam consideradas separadamente ou conjuntamente. Para ações em conjunto, a normativa apresenta os coeficientes de ponderação do ELU em função do tipo de estrutura considerada, sendo apresentados na Tabela 3.5 os respectivos coeficientes de ponderação de ações permanentes para a edificação do tipo 2, cujas cargas acidentais não excedem o valor de 5 kN/m², que foi a situação considerada no presente trabalho. As ações variáveis geralmente são consideradas separadamente e os respectivos valores dos coeficientes de ponderação são dados na também na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 – Coeficientes de ponderação para combinações últimas normais.

Classificação da ação	Coeficiente de ponderação (γ)
Permanentes (g)	1,4 (Desfavorável) 1,0 (Favorável)
Variáveis (q)	1,5 (sobrecarga na cobertura – ed. comercial) 1,4 (vento)

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 8681 (2003).

Por fim, tem-se a Tabela 3.6, que atribui os valores dos fatores de combinação e redução, de acordo com o tipo de ação variável, sendo exibidas as mais comuns em estruturas de cobertura.

Tabela 3.6 – Valores dos fatores de combinação (ψ_0) e de redução (ψ_1 e ψ_2) para as ações variáveis relevantes.

Ações variáveis	Ψ_0	Ψ_1	Ψ_2
Ações acidentais em locais em que não há predominância de pesos e de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo, nem de elevadas concentrações de pessoas ¹ .	0,5	0,4	0,3
Ações acidentais em locais em que há predominância de pesos de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo, ou de elevadas concentrações de pessoas ² .	0,7	0,6	0,4
Ações acidentais em: bibliotecas, arquivos, depósitos, oficinas e garagens.	0,8	0,7	0,6
Pressão dinâmica do vento nas estruturas em geral.	0,6	0,3	0

Nota:
¹ Edificações residenciais, de acesso restrito.
² Edificações comerciais, de escritórios e de acesso público.

Fonte: Adaptado da Tabela 6 da ABNT NBR 8681 (2003, p.11).

3.2.4 COMBINAÇÕES DOS DESLOCAMENTOS DE CÁLCULO PARA OS ESTADOS LIMITES DE SERVIÇO (ELS)

Tratando-se do Estado Limite de Serviço, a ABNT NBR 8681 (2003) também apresenta três tipos de combinações diferentes: quase permanentes, frequentes e raras, cuja diferença também consiste na abordagem da ação variável.

A ABNT NBR 7190-1 (2022) define que para a avaliação da flecha instantânea deve ser utilizada a combinação rara de serviço, dada na Equação 3.

$$\delta_{inst} = \sum_{i=1}^m \delta_{inst,Gi,k} + \delta_{inst,Q1,k} + \sum_{j=2}^n \psi_{1j} \cdot \delta_{inst,Qj,k} \quad (3)$$

Em que:

δ_{inst} – Deslocamento instantâneo de cálculo;

ψ_{1j} – Fator de redução (Tabela 3.6);

$\delta_{inst,Gi,k}$ – Deslocamento instantâneo característico devido a ações permanentes;

$\delta_{inst,Q1,k}$ – Deslocamento instantâneo característico devido a ação variável principal;

$\delta_{inst,Qj,k}$ – Deslocamento instantâneo característico devido às demais ações variáveis.

Sabe-se que a madeira é um material que possui certas particularidades que a diferenciam dos outros materiais empregados na construção civil, sendo uma delas a “significativa deformação ao longo do tempo (fluência)” (ABNT NBR 7190-1, 2022, p. 65).

Assim, os efeitos de fluência devem ser considerados somente na avaliação das flechas finais, dada na Equação 4.

$$\delta_{fin} = \sum_{i=1}^m \delta_{fin,Gi,k} + \sum_{j=1}^n \delta_{fin,Qj,k} = \sum_{i=1}^m \delta_{inst,Gi,k} \cdot (1 + \phi) + \sum_{j=1}^n \delta_{inst,Qj,k} \cdot \psi_2 \cdot (1 + \phi) \quad (4)$$

Em que:

δ_{fin} – Deslocamento instantâneo de cálculo;

$\delta_{fin,Gi,k}$ – Deslocamento instantâneo característico devido a ações permanentes;

$\delta_{fin,Qj,k}$ – Deslocamento instantâneo característico devido a ações variáveis;

ψ_2 – Fator de redução (Tabela 3.6);

ϕ – Coeficiente de fluência.

O coeficiente de fluência é dado na Tabela 20 da ABNT NBR 7190-1 (2022, p. 66) em função do tipo de material e da classe de umidade.

A próxima etapa consiste no dimensionamento da estrutura.

3.3 Dimensionamento

O dimensionamento de peças de madeira consiste em diversas verificações quanto ao tipo de esforço atuante e estabilidade da peça para os ELU e também uma verificação para o ELS. Reforça-se que todo dimensionamento apresentado nessa seção segue as diretrizes da ABNT NBR 7190-1 (2022).

Os perfis adotados devem se enquadrar nas dimensões mínimas exigidas pela normativa brasileira organizadas na Tabela 3.7.

Tabela 3.7 – Dimensões mínimas da seção transversal.

Tipo de peça	Área mínima (cm ²)	Espessura mínima (cm)
Principal isolada	50	5
Secundária isolada	18	2,5
Principal múltipla	35	2,5
Secundária múltipla	18	1,8

Fonte: Item 9.2.1 da ABNT NBR 7190-1 (2022, p. 68).

3.3.1 VERIFICAÇÃO DOS ESTADOS LIMITES ÚLTIMOS (ELU)

Para realizar as verificações dos Estados Limites Últimos é necessário obter os valores de cálculo de algumas propriedades da madeira. Para valores de resistência, além de se dividir a resistência característica da madeira pelo coeficiente de minoração, deve-se multiplicar também pelos coeficientes de modificação (Equação 5).

$$f_d = k_{mod1} \cdot k_{mod2} \cdot \frac{f_k}{\gamma_m} \quad (5)$$

Em que:

f_d – Resistência de cálculo da madeira;

k_{mod1} – Coeficiente de modificação 1;

k_{mod2} – Coeficiente de modificação 2;

f_k – Resistência característica da madeira;

γ_m – Coeficiente de minoração das propriedades da madeira.

O coeficiente de minoração para ELU tem um valor de 1,4 quando aplicado em tensões normais e de 1,8 para tensões de cisalhamento. Os coeficientes de modificação são obtidos em função das classes de serviços descritas na seção 3.1.1. O coeficiente de modificação 1 (Tabela 3.8) é definido a partir da classe de carregamento e do tipo de madeira e o coeficiente de modificação 2 (Tabela 3.9) considera além do tipo de madeira, a classe de umidade.

Tabela 3.8 – Valores do k_{mod1} .

Classes de carregamento	Tipos de Madeira	
	Madeira serrada Madeira roliça Madeira Lamelada Colada (MLC) Madeira Lamelada Colada Cruzada (MLCC) Madeira Laminada colada (LVL)	Madeira Recompоста
Permanente	0,60	0,30
Longa duração	0,70	0,45
Média duração	0,80	0,65
Curta duração	0,90	0,90
Instantânea	1,10	1,10

Fonte: Adaptado da Tabela 4 da ABNT NBR 7190-1 (2022, p. 14).

Tabela 3.9 – Valores do k_{mod2} .

Classes de umidade	Tipos de Madeira	
	Madeira serrada Madeira roliça Madeira Lamelada Colada (MLC) Madeira Lamelada Colada Cruzada (MLCC) Madeira Laminada colada (LVL)	Madeira Recompоста
1	1,00	1,00
2	0,90	0,95
3	0,80	0,93
4	0,70*	0,90

Nota: *Não é permitido o uso do MLCC para classe de umidade 4

Fonte: Tabela 5 da ABNT NBR 7190-1 (2022, p. 15).

O módulo de elasticidade efetivo é uma das outras propriedades a serem calculadas, obtido pela Equação 6, ao multiplicar os coeficientes de modificação com o módulo de elasticidade médio ($E_{0,med}$).

$$E_{0,ef} = k_{mod1} \cdot k_{mod2} \cdot E_{0,med} \quad (6)$$

Como supracitado, as verificações são de acordo com o tipo de esforço que a peça está submetida. Sabe-se que as terças, são vigas posicionadas nos banzos inclinados que vencem os vãos entre treliças, logo estão submetidas à flexão simples oblíqua. Já as barras da treliça dependem do modelo estrutural adotado de ligações entre as barras: se considerado o modelo estrutural treliça tem-se as verificações dos esforços axiais e se considerado o modelo estrutural pórtico, tem-se as verificações quanto à flexão composta reta (FRAGA, 2020).

3.3.1.1 VERIFICAÇÃO DE ELEMENTOS SUBMETIDOS À FLEXÃO SIMPLES OBLÍQUA

Primeiramente, como supracitado, as terças são os elementos da estrutura de cobertura submetidos à flexão simples. Por estar posicionada nos banzos superiores das tesouras com inclinação (α), tem-se uma flexão simples oblíqua, ou seja, os esforços e conseqüentemente as tensões são decompostas nos dois planos x e y.

As condições para verificação das tensões normais são dadas pelas Equações 7 e 8.

$$\frac{\sigma_{Mx,d}}{f_{m,d}} + k_M \times \frac{\sigma_{My,d}}{f_{m,d}} \leq 1 \quad (7)$$

$$k_M \times \frac{\sigma_{Mx,d}}{f_{m,d}} + \frac{\sigma_{My,d}}{f_{m,d}} \leq 1 \quad (8)$$

Em que:

$\sigma_{Mx,d}$; $\sigma_{My,d}$ – Tensões máximas de cálculo devida às componentes de flexão atuantes nas direções x e y, respectivamente;

$f_{m,d}$ – Resistência de cálculo na flexão, se utilizado a Tabela 3.3, considerar $f_{m,d} = f_{c0,d}$;

k_M – Coeficiente de correção, para seções retangulares $k_M = 0,7$ e para demais seções $k_M = 1,0$.

$f_{c0,d}$ – Resistência de cálculo à compressão paralela às fibras.

As tensões cisalhantes devem ser verificadas nas direções x e y, como representado na Equação 9 e 10, respectivamente.

$$\tau_{x,d} = \frac{V_{x,d} \cdot S_y}{b \cdot I_y} \quad (9)$$

$$\tau_{y,d} = \frac{V_{y,d} \cdot S_x}{b \cdot I_x} \quad (10)$$

Em que:

$\tau_{x,d}; \tau_{y,d}$ – Tensões máximas de cisalhamento atuantes no ponto mais solicitado na direção x e y, respectivamente;

$V_{x,d}; V_{y,d}$ – Força cortante atuante nas seções em estudo nas direções x e y, respectivamente;

$S_x; S_y$ – Momento estático da seção para o ponto onde se quer calcular a tensão;

b – Largura ou somatória das larguras da seção transversal no ponto em estudo;

$I_x; I_y$ – Momento de inércia da seção transversal no ponto em estudo.

A ABNT NBR 7190-1 (2022) também apresenta condições para se dispensar a verificação de instabilidade lateral de vigas fletidas de seção transversal retangular. Então para se isentar da realização da verificação experimental de instabilidade lateral os apoios devem ter suas rotações impedidas e a condição da Equação 11 deve ser atendida.

$$\frac{L_1}{b} \leq \frac{E_{0,ef}}{\beta_M \cdot f_{m,d}} \quad (11)$$

Em que:

L_1 – Comprimento entre pontos adjacentes com deslocamentos laterais impedidos;

b – Largura da seção transversal;

$E_{0,ef}$ – Módulo de resistência efetivo, calculado na Equação 6;

β_M – Coeficiente de correção definido no item 6.5.6 da ABNT NBR 7190-1 (2022, p. 27);

$f_{m,d}$ – Resistência de cálculo na flexão, se utilizado a Tabela 3.3 considerar $f_{m,d} = f_{c0,d}$.

Caso a condição da Equação 11 não for atendida, também é permitido a dispensa se atendida as condições dadas nas Equações 7 e 8 e a nova condição apresentada na Equação 12.

$$\sigma_{c,d} \leq \frac{E_{0,ef}}{\left(\frac{L_1}{b}\right) \cdot \beta_M} \quad (12)$$

Em que:

$\sigma_{c,d}$ – Tensão máxima de cálculo de compressão.

3.3.1.2 VERIFICAÇÃO DE ELEMENTOS SUBMETIDOS À FLEXÃO COMPOSTA

A verificação de elementos submetidos à flexão composta deve ser realizada nas barras de treliça se considerado o modelo estrutural pórtico, visto que ocorrem momentos

fletores de primeira ordem que precisam ser combinados com os esforços axiais atuantes (FRAGA, 2020).

Os elementos flexocomprimidos são considerados verificados se atendidas as condições expressas nas Equações 13 e 14, já os elementos flexotencionados devem atender às condições dadas nas Equações 15 e 16. Ressalta-se que se trata de uma situação de flexão composta reta, pois como “os esforços de flexão geralmente se dão no plano perpendicular (cortante) ou em torno do eixo horizontal X (momento fletor)” em estruturas treliçadas planas, a componente vertical em Y se cancelam nas Equações de 13 a 16 (FRAGA, 2020, p. 58).

$$\left(\frac{\sigma_{Nc,d}}{f_{c0,d}}\right)^2 + \frac{\sigma_{Mx,d}}{f_{m,d}} + k_M \times \frac{\sigma_{My,d}}{f_{m,d}} \leq 1 \quad (13)$$

$$\left(\frac{\sigma_{Nc,d}}{f_{c0,d}}\right)^2 + k_M \times \frac{\sigma_{Mx,d}}{f_{m,d}} + \frac{\sigma_{My,d}}{f_{m,d}} \leq 1 \quad (14)$$

$$\frac{\sigma_{Nt,d}}{f_{t0,d}} + \frac{\sigma_{Mx,d}}{f_{m,d}} + k_M \times \frac{\sigma_{My,d}}{f_{m,d}} \leq 1 \quad (15)$$

$$\frac{\sigma_{Nt,d}}{f_{t0,d}} + k_M \times \frac{\sigma_{Mx,d}}{f_{m,d}} + \frac{\sigma_{My,d}}{f_{m,d}} \leq 1 \quad (16)$$

Em que:

$\sigma_{Nt,d}$ – Tensão máxima de cálculo devida à força normal de tração;

$f_{t0,d}$ – Resistência de cálculo à tração paralela às fibras;

Demais variáveis – Definidas na seção 3.3.1.1.

Os elementos submetidos à flexão composta (tanto flexotencionados quanto flexocomprimidos) também devem ter suas tensões atuantes de cisalhamento verificadas de acordo com as Equações 9 e 10.

Uma outra verificação necessária para elementos submetidos à flexão composta é quanto ao índice de esbelteza, que pode ser calculado pela Equação 17. Tem-se como índice de esbelteza máximo para peças flexotencionadas o valor de 175, já para peças flexocomprimidas o limite é 140.

$$\lambda_x = \frac{L_{0x}}{\sqrt{\frac{I_x}{A}}}; \quad \lambda_y = \frac{L_{0y}}{\sqrt{\frac{I_y}{A}}} \quad (17)$$

Em que:

$\lambda_x; \lambda_y$ – Índice de esbelteza na direção x e y, respectivamente;

$L_{0x}; L_{0y}$ – Comprimento de flambagem nas duas direções, dado pela Equação 18;

$I_x; I_y$ – Momento de Inércia da seção transversal em torno do eixo x e y, respectivamente;

A – Área da seção transversal.

$$L_{0x} = K_E \cdot L_x; \quad L_{0y} = K_E \cdot L_y \quad (18)$$

Em que:

K_E – Coeficiente para modos de flambagem (Tabela 3.10);

$L_x; L_y$ – Comprimento entre vinculações.

Tabela 3.10 – Valores para K_E

Modos de flambagem	0,65	0,80	1,20	1,00	2,10	2,40
Valores de projeto para K_E	0,65	0,80	1,20	1,00	2,10	2,40

Fonte: Adaptado da Tabela 7 da ABNT NBR 7190-1 (2022, p. 25).

Uma particularidade dos elementos flexocomprimidos é que se o índice de esbeltez relativa (Equação 19) em ambas as direções forem menores que 0,3 não é necessária a verificação da sua estabilidade.

$$\lambda_{rel,x} = \frac{\lambda_x}{\pi} \times \sqrt{\frac{f_{c0,k}}{E_{0,05}}}; \quad \lambda_{rel,y} = \frac{\lambda_y}{\pi} \times \sqrt{\frac{f_{c0,k}}{E_{0,05}}} \quad (19)$$

Em que:

$\lambda_{rel,x}; \lambda_{rel,y}$ – Índice de esbeltez relativa na direção x e y, respectivamente;

$E_{0,05}$ – Valor característico do módulo de elasticidade, se necessário considerar $E_{0,05} = 0,7 \cdot E_{c0,med}$;

Nos demais casos, a verificação da estabilidade se faz necessária e as condições das Equações 20 e 21 devem ser atendidas.

$$\frac{\sigma_{NC,d}}{k_{cx} \times f_{c0,d}} + \frac{\sigma_{Mx,d}}{f_{m,d}} + k_M \times \frac{\sigma_{My,d}}{f_{m,d}} \leq 1 \quad (20)$$

$$\frac{\sigma_{NC,d}}{k_{cy} \times f_{c0,d}} + k_M \times \frac{\sigma_{Mx,d}}{f_{m,d}} + \frac{\sigma_{My,d}}{f_{m,d}} \leq 1 \quad (21)$$

Em que:

$k_{cx}; k_{cy}$ – Coeficientes obtidos pela Equação 22.

$$k_{cx} = \frac{1}{k_x + \sqrt{(k_x)^2 - (\lambda_{rel,x})^2}}; k_{cy} = \frac{1}{k_y + \sqrt{(k_y)^2 - (\lambda_{rel,y})^2}} \quad (22)$$

Em que:

$k_x; k_y$ – Coeficientes obtidos pela Equação 23.

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

Em que:

β_c – Fator para peças estruturais que atendam aos limites de divergência de alinhamento.

Esse fator supracitado tem valor igual a 0,2 para madeira maciça serrada e peças roliças. Para madeira lamelada (MLC e MLCC) e madeira laminada (LVL) deve-se considerar somente a metade, ou seja, valor igual a 0,1.

3.3.1.3 VERIFICAÇÃO DE ELEMENTOS SUBMETIDOS À ESFORÇOS AXIAIS

A verificação de elementos submetidos à compressão e tração simples são dadas pelas Equações 24 e 25, respectivamente.

$$\sigma_{Nc,d} = \frac{N_{c,d}}{A} \leq f_{c0,d} \quad (24)$$

$$\sigma_{Nt,d} = \frac{N_{t,d}}{A} \leq f_{t0,d} \quad (25)$$

$\sigma_{Nc,d}; \sigma_{Nt,d}$ – Tensão máxima de cálculo devida à força normal de compressão e de tração, respectivamente;

$N_{c,d}; N_{t,d}$ – Força de compressão e de tração normal de cálculo, respectivamente;

$f_{c0,d}$ – Resistência de cálculo à compressão paralela às fibras.

$f_{t0,d}$ – Resistência de cálculo à tração paralela às fibras;

A – Área Líquida da seção transversal.

Ressalta-se que os elementos comprimidos devem ser verificados também quanto à estabilidade, assim como exemplificado na seção 3.3.1.2 para elementos flexocomprimidos.

3.3.2 VERIFICAÇÃO DOS ESTADOS LIMITES DE SERVIÇO (ELS)

A verificação dos Estados Limites de Serviço (ELS) para estruturas de cobertura consiste simplesmente em comparar o deslocamento atuante na estrutura com os valores

limites dados na Tabela 3.11, avaliando assim o efeito de deslocamentos excessivos na estrutura, que podem afetar a utilização normal da construção ou seu aspecto estético.

Tabela 3.11 – Valores limites de deslocamentos para elementos correntes fletidos.

Tipo	δ_{inst}	δ_{fin}	δ_{netfin}
Vigas biapoiadas ou contínuas	L/300 a L/500	L/150 a L/300	L/250 a L/350
Vigas em balanço	L/150 a L/250	L/75 a L/150	L/125 a L/175

Fonte: Tabela 21 da ABNT NBR 7190-1 (2022, p. 67).

No *software* foram implementados os limites menos restritivos. Esclarecidas as diretrizes fundamentais para o dimensionamento seguindo a norma ABNT NBR 7190-1 (2022), a próxima seção define a geometria e os parâmetros de projeto adotados neste trabalho e toda metodologia aplicada.

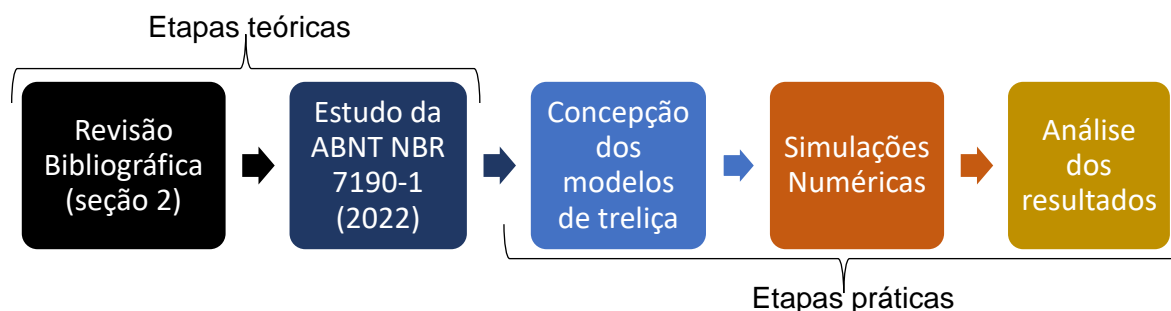
4. METODOLOGIA

O desenvolvimento desse trabalho se iniciou com uma revisão de trabalhos encontrados na literatura que utilizaram o Método dos Elementos Finitos (MEF) como método de análise estrutural de estruturas treliçadas de madeira (seção 2.1) e que analisaram o consumo de madeira empregado em estruturas de cobertura de madeira em função da variação de alguns parâmetros (seção 2.2). Além disso, também foi necessário um estudo mais aprofundado da nova norma, a ABNT NBR 7190-1 (2022), para que se estruturasse a seção 3 deste trabalho com um apanhado de informações propícios para o objeto de estudo e para que se levantasse as possíveis atualizações da norma recém-publicada para o projeto de revisão utilizado por Fraga (2020). As atualizações encontradas são apontadas na seção 4.2.

Posteriormente, foram elaboradas com o auxílio do *software* AutoCAD os modelos de treliças analisados, detalhes das variações que foram consideradas na geometria da treliça podem ser encontrados na seção 4.1.1. Após a concepção dos modelos de treliça, foram realizadas as simulações numéricas utilizando o *software* *iTruss* desenvolvido por Fraga (2020), cujo funcionamento é indicado na seção 4.2. Pode-se classificar os dados de entrada necessários como: quanto a algumas propriedades da madeira, cada modelo de treliça foi analisado como indicado na seção 4.1.2; quanto a situações de projeto e a configurações dos perfis adotados, sendo essas informações comuns a todos os modelos de treliça (seção 4.3). Por fim, os resultados foram analisados de modo a definir uma faixa de inclinação ótima para cada tipologia.

Para melhor compreensão, um fluxograma com toda a metodologia aplicada nesse trabalho foi elaborado (Figura 4.1).

Figura 4.1 – Fluxograma das etapas da pesquisa.



Fonte: Elaborado pela própria autora (2022).

Salienta-se que todos os parâmetros determinados a seguir foram adotados considerando uma situação de projeto com possibilidade de execução.

4.1 Variáveis consideradas

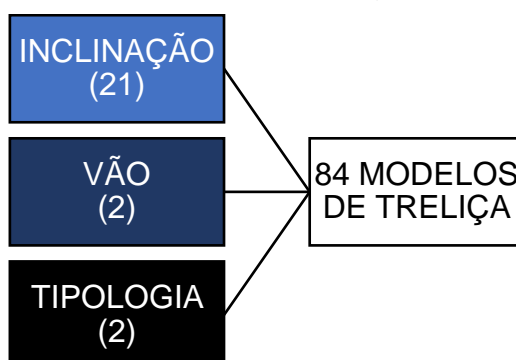
Para compreender de fato a influência da inclinação dos banzos superiores no consumo de madeira, devem ser consideradas outras variáveis além da inclinação. Neste trabalho foram exploradas algumas outras variáveis quanto a geometria da treliça plana, como sua tipologia e o tamanho do vão (seção 4.1.1) e também quanto às propriedades da madeira, como a classe de resistência e de umidade (seção 4.1.2). Definidas as variações consideradas, a quantidade de simulações realizadas é dada na seção 4.1.3.

4.1.1 VARIAÇÕES QUANTO A GEOMETRIA

A principal variável deste trabalho foi a inclinação dos banzos superiores. Esse parâmetro geométrico foi variado de 5° (9%) a 25° (47%), de modo a englobar a inclinação ideal da cobertura pressuposta pelos fabricantes de telha de fibrocimento. Além disso, foram considerados dois diferentes tamanhos de vão, um de 6m e outro de 12m representando, respectivamente, um vão em escala residencial (menor) e industrial (maior).

De modo a ampliar ainda mais as análises, optou-se por analisar não somente a tradicional tipologia *Howe*, mas também a tipologia *Pratt*. Portanto, tem-se a variação quanto a geometria de 21 valores de inclinação, 2 tamanhos de vão e 2 tipologias de treliça, totalizando em 84 modelos diferentes de treliça. Um esquema é dado na Figura 4.2 para ilustrar essa quantificação.

Figura 4.2 – Quantidade de treliças analisadas



Nota: () - Quantidade de valores variados.

Fonte: Elaborado pela própria autora (2022).

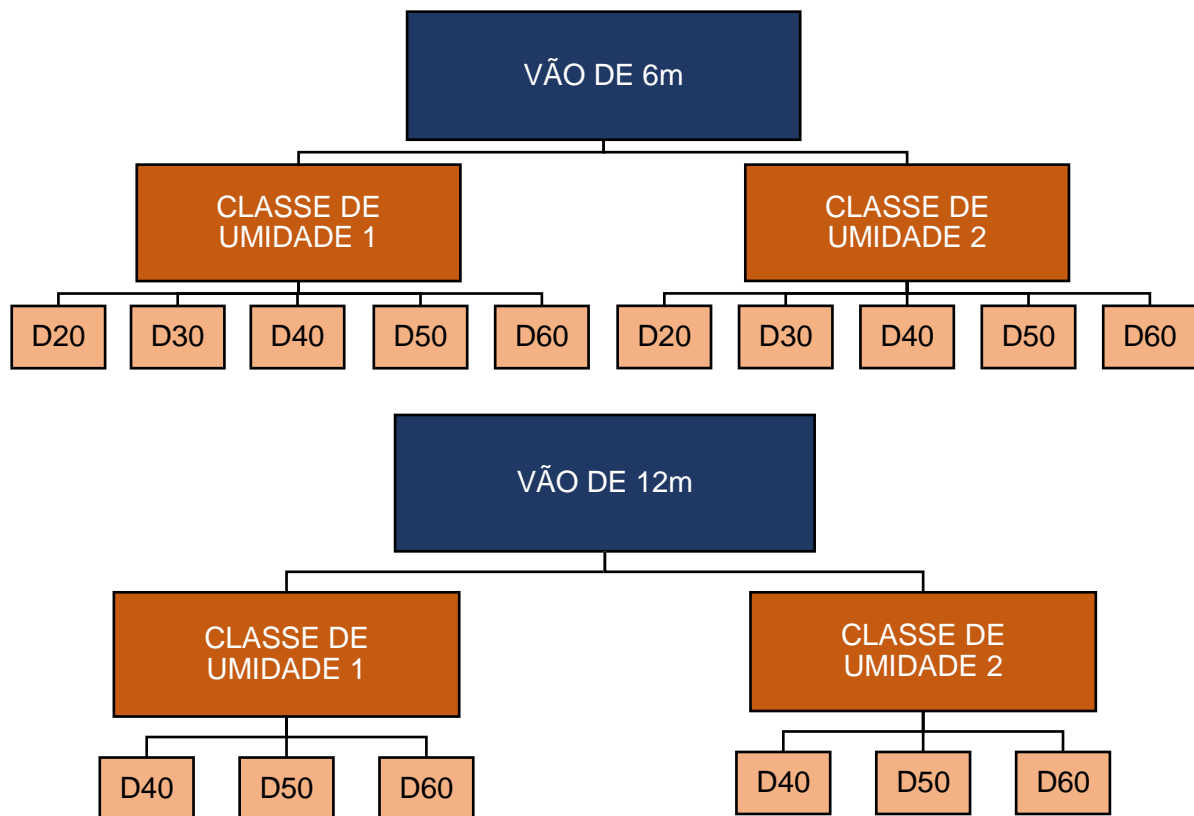
Assim, foram analisadas 42 treliças da tipologia *Howe* e 42 treliças da Tipologia *Pratt*. Ressalta-se que apesar do vão menor ser comumente utilizado em projetos residenciais,

foram aplicadas as mesmas situações de projeto em ambos os vãos. Essas particularidades são melhores detalhadas na seção 4.3.

4.1.2 VARIAÇÕES QUANTO ÀS PROPRIEDADES DA MADEIRA

Todas as treliças foram simuladas para duas das classes de umidade, sendo elas a classe de umidade 1 e 2 (Tabela 3.1). No entanto, as classes de resistência adotadas variam de acordo com o vão da treliça, para aquelas com vão de 6m foram feitas simulações para cada uma das cinco classes de resistência da madeira apresentadas na Tabela 3.3, já para as com vão de 12m foram consideradas apenas as classes D40, D50 e D60. De modo a facilitar a compreensão da configuração seguida é apresentada a Figura 4.3.

Figura 4.3 – Características da madeira para cada vão.



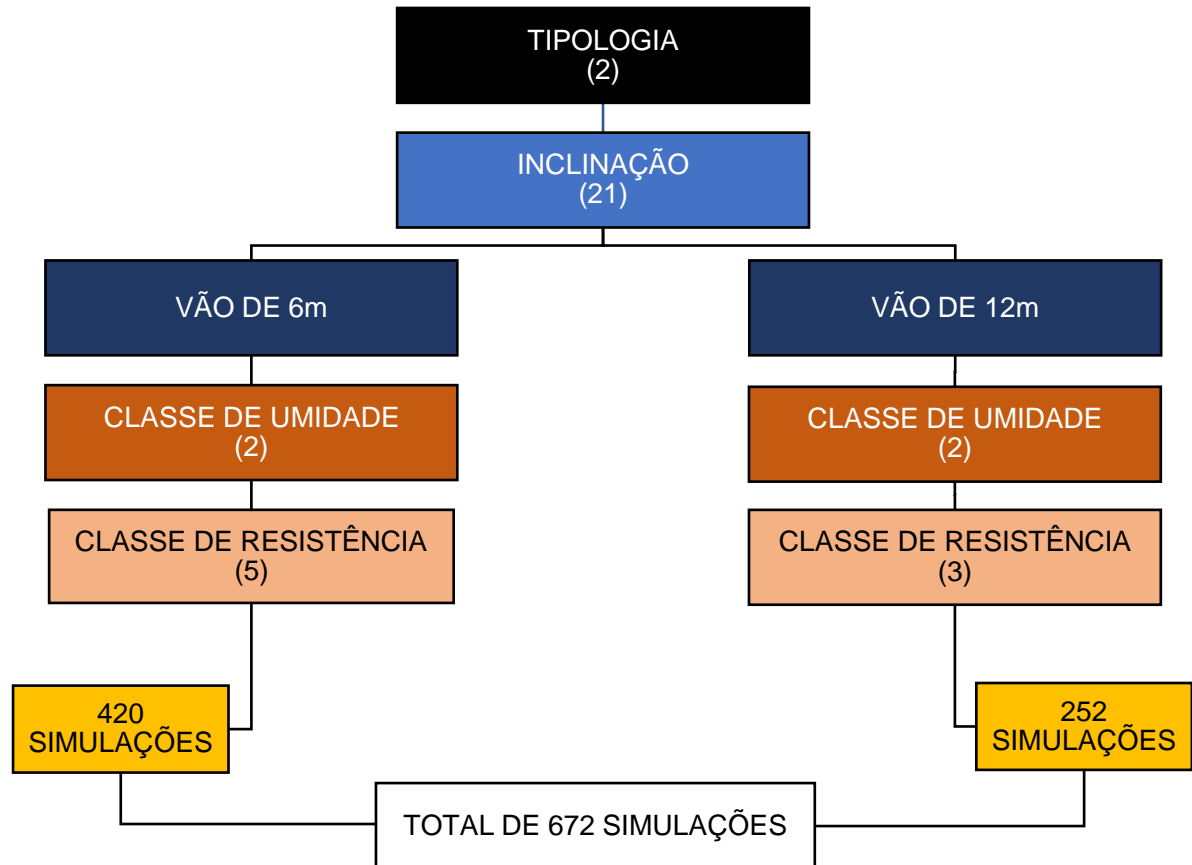
Fonte: Elaborado pela própria autora (2022).

Não foram consideradas as classes D20 e D30 para as treliças com vão de 12m, visto que são resistências não usuais para grandes vãos, pois resultam em estruturas muito robustas, ou seja, com um elevado consumo de material.

4.1.3 QUANTIDADE DE SIMULAÇÕES

Com a quantidade de variáveis definidas, tem-se neste trabalho um total de 672 simulações (Figura 4.4).

Figura 4.4 – Quantidade de simulações



Nota: () - Quantidade de valores variados.

Fonte: Elaborado pela própria autora (2022).

Observa-se na Figura 4.4 que foram 420 simulações para treliças com vão de 6m e 252 simulações para treliças com vão de 12m. Para saber a quantidade de simulações realizadas para cada tipologia basta dividir o total de simulações pela metade, assim tem-se o valor de 336 simulações.

4.2 Funcionamento do software utilizado

Como já mencionado, o *software* que foi utilizado para realizar as simulações é o *iTruss*, desenvolvido por Fraga (2020). Optou-se por esse programa de computador porque ele permite a entrada da treliça plana no formato “DXF”, realiza a análise estrutural pelo Método dos Elementos Finitos (MEF) com processamento elástico linear e dimensiona a estrutura em madeira seguindo as diretrizes da ABNT NBR 7190-1 (2022).

Para definição das ações e dos carregamentos, o *software* segue exigências das normas ABNT NBR 6120 (2019), ABNT NBR 6123 (1988) e ABNT NBR 8681 (2003), onde o usuário insere as informações do projeto e escolhe os coeficientes de ponderação das ações. Como já detalhado na revisão bibliográfica (seção 2.1), o usuário pode definir no *iTruss* a maneira que deseja realizar a aplicação do carregamento de peso próprio e qual o modelo estrutural das barras será utilizado na análise estrutural. Essas e outras condições de projeto adotadas são apresentadas na seção 4.3.

Para o dimensionamento da estrutura, esse programa permite ainda a escolha não apenas da classe de umidade e da classe de resistência (variáveis adotadas já apresentadas seção 4.1.2), mas também do tipo de madeira e da classe de carregamento (parâmetros fixos apresentados na seção 4.3.5).

É importante retomar aqui que, para o dimensionamento dos perfis, uma das opções fornecidas no *software* é fixar uma espessura para cada tipo de barra (banzos superior, banzos inferior, montantes, diagonais e terças) de modo que elas atendam as espessuras mínimas estabelecidas na ABNT NBR 7190-1 (2022). Essa foi a opção de dimensionamento utilizada nesse trabalho, visto que o código define como altura, a menor que atenda todos os critérios de verificação. A Figura 2.4 ilustra o funcionamento dessa rotina, ressaltando que a cada iteração acrescenta-se na altura 0,10 centímetros e atualiza-se a carga devida ao peso próprio da treliça.

A versão do *iTruss* utilizado em Fraga (2020) recebeu um upgrade em seu código, cada simulação fornece o volume (m^3) e o consumo (m^3/m^2) de madeira a ser empregada na estrutura dimensionada. Ainda, foi corrigido no código os módulos de elasticidades médios das classes de resistência de espécies de florestas nativas definidas em ensaios de corpos de prova isentos de defeitos (Tabela 3.3) e a fórmula para obter-se a flecha final, visto que a formulação sofreu alterações do projeto de revisão abordado por Fraga (2020) para a ABNT NBR 7190-1 (2022). A formulação correta é a da Equação (4), na qual há uma única parcela devido às cargas variáveis que considera somente o coeficiente de redução (Ψ_2).

4.3 Situações de projeto comuns

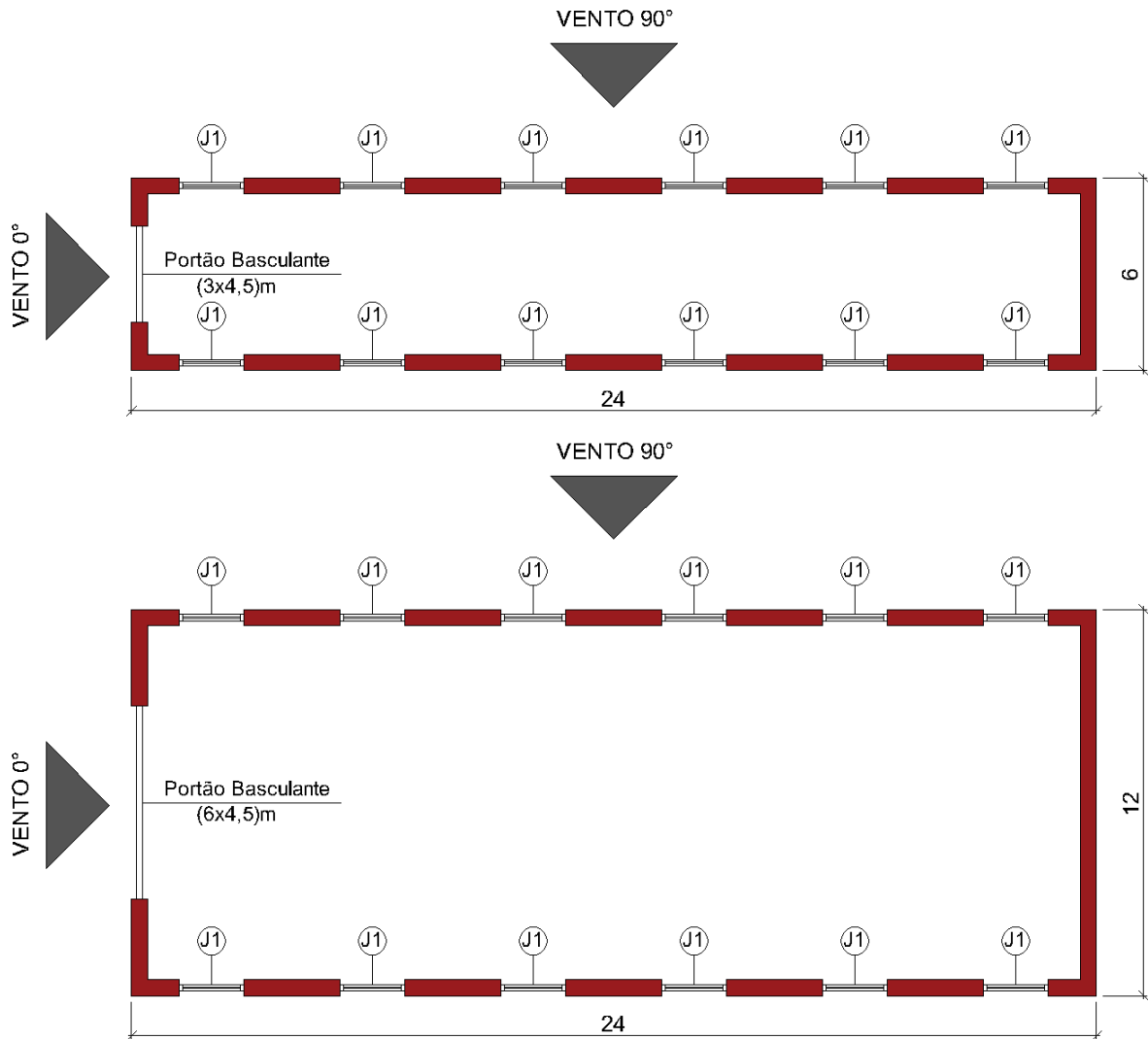
Há algumas situações de projeto que foram consideradas comuns a todas as simulações ou a certo grupo de simulações. São detalhadas nesta seção as características da edificação (seção 4.3.1), os arranjos de telhas (seção 4.3.2), as ações e carregamento atuantes (seção 4.3.3), o modelo estrutural analisado (seção 4.3.4) e algumas configurações para o dimensionamento (seção 4.3.5).

4.3.1 CARACTERÍSTICAS DA EDIFICAÇÃO

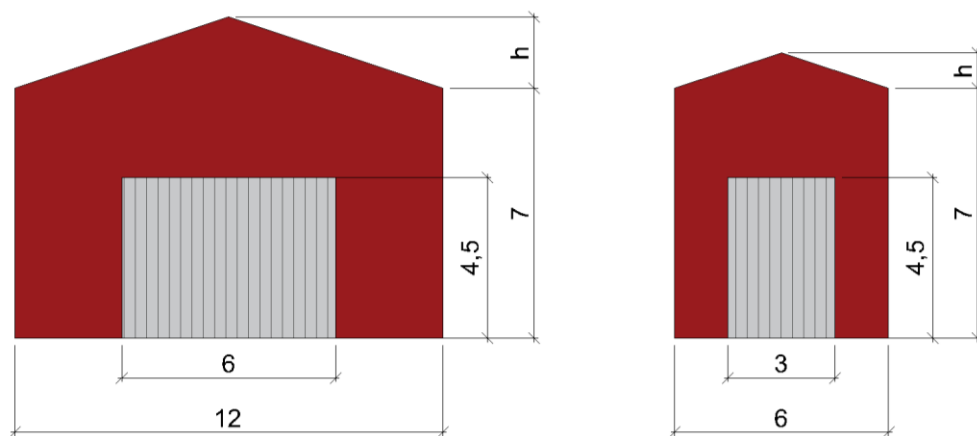
As estruturas de cobertura analisadas foram projetadas para uma edificação com as seguintes características:

- Finalidade da edificação: galpão para armazenamento de materiais e equipamentos (depósito);
- Localização:
 - Classe de umidade 1: São Carlos-SP
 - Classe de umidade 2: Ribeirão Preto-SP
- Cobertura em duas águas simétrico: Sistema treliçado plano com fixação de telhas diretamente nas terças;
- Pé direito: 7 metros;
- Vão Transversal (L): 6 e 12 metros;
- Vãos Longitudinais entre treliças: 6 vãos de 4 metros (totalizando 7 treliças);
- Comprimento longitudinal total: 24 metros;
- Aberturas: (Figura 4.5)
 - Portão (CxL): (3mx4,5m) para vão de 6m e (6mx4,5m) para vão de 12m (de modo a manter a proporcionalidade);
 - Janelas (CxL): (2mx1m) com altura de peitoril de 2m.

Figura 4.5 – Dimensões da edificação e das aberturas consideradas: (a) planta baixa; (b) fachada frontal. Desenhos sem escala e cotas em metro.



(a)



(b)

Nota: h é variável, de acordo com a inclinação.

Fonte: Elaborado pela própria autora (2022).

4.3.2 ARRANJOS DE TELHAS PARA DEFINIÇÃO DA CONFIGURAÇÃO DAS BARRAS

Apesar de já ter sido dito as tipologias das treliças adotadas, tratando-se de uma cobertura de treliças planas, a posição e quantidade de montantes devem ser determinados de acordo com o arranjo de telhas adotado, visto que as terças foram consideradas devidamente apoiadas nos montantes, com exceção das terças de apoio da cumeeira. Como pretende-se analisar uma situação real de projeto, foi definido um arranjo de telhas que atenda as especificações dadas nos catálogos técnicos de fabricantes de telha de fibrocimento.

As telhas consideradas são de fibrocimento onduladas de 6mm de espessura com uma cumeeira de 300mm de aba. Os parâmetros principais para esse tipo de telha e cumeeira estão organizados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Parâmetros que devem ser respeitados ao elaborar o arranjo de telhas.

Inclinação	mínima	5° (9%)	
	recomendada ¹	15° (27%)	
Comprimento de telha ²		1,22m	
		1,53m	
		1,83m	
Balanço livre no sentido de comprimento das telhas	mínimo	0,25m	
	máximo	0,40m	
Recobrimento longitudinal mínimo	5° (9%) ≤ i < 10° (18%)	0,25m	
	10° (18%) ≤ i < 15° (27%)	0,20m	
	15° (27%) ≤ i < 75°	0,14m	
Recobrimento longitudinal máximo ³		0,30m	
Cumeeira (Aba = 0,30m)	Distância entre o furo e a extremidade da cumeeira	0,09 m	
	Distância máxima entre terças de apoio da cumeeira ⁴	5°	0,418 m
		10°	0,414 m
		15°	0,406 m
		20°	0,395 m
		25°	0,381 m

Nota: ¹ Recomendada para melhor aproveitamento das telhas;

² Considerando somente 2 apoios;

³ Recomendado;

⁴ Inclinações diferente das indicadas, considerar parâmetros do grau imediatamente superior;

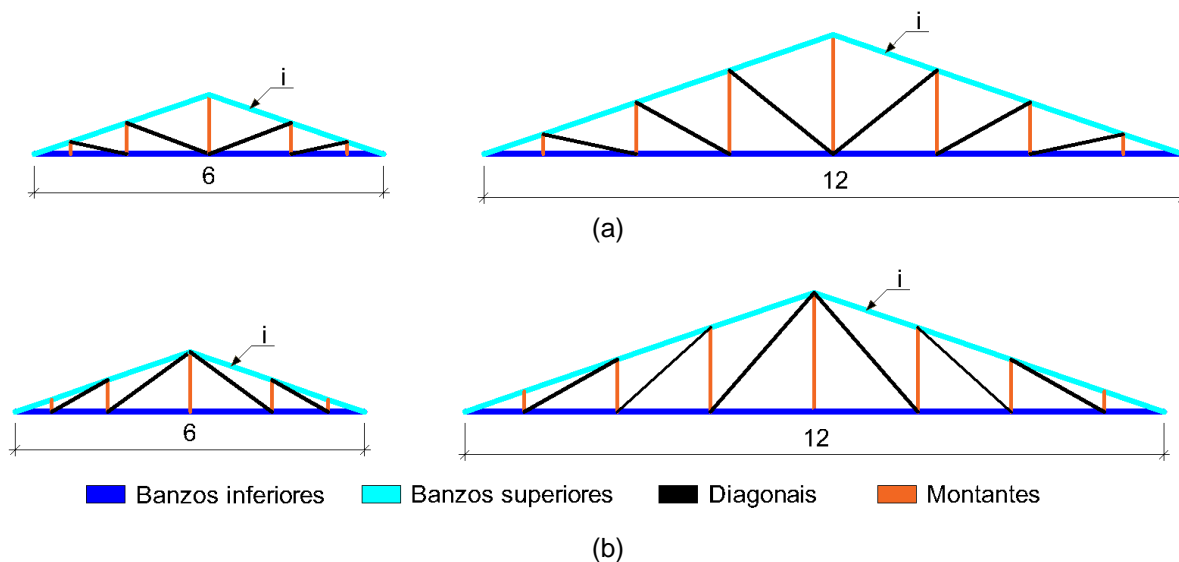
Fonte: ETERNIT (2020).

Sabe-se que para melhor comparação dos resultados, o ideal seria um mesmo arranjo de telhas e uma mesma configuração de barras para todas as simulações, visto que, como constatado na revisão de literatura, a quantidade de montantes influencia também no consumo de material.

Porém, os tamanhos de vãos considerados são muito divergentes e, para conseguir atender todos os limites impostos, em especial o balanço livre no sentido de comprimento de telhas e o recobrimento longitudinal mínimo e máximo, foi definido um arranjo de telhas para cada tamanho de vão, de modo que contemplem uma mesma configuração de barras,

independente da inclinação analisada. As configurações das barras para cada tipologia e vão, são apresentadas na Figura 4.6.

Figura 4.6 – Configurações das barras nas tipologias: (a) Howe; (b) Pratt. Desenhos sem escala e cotas em metro.



Nota:

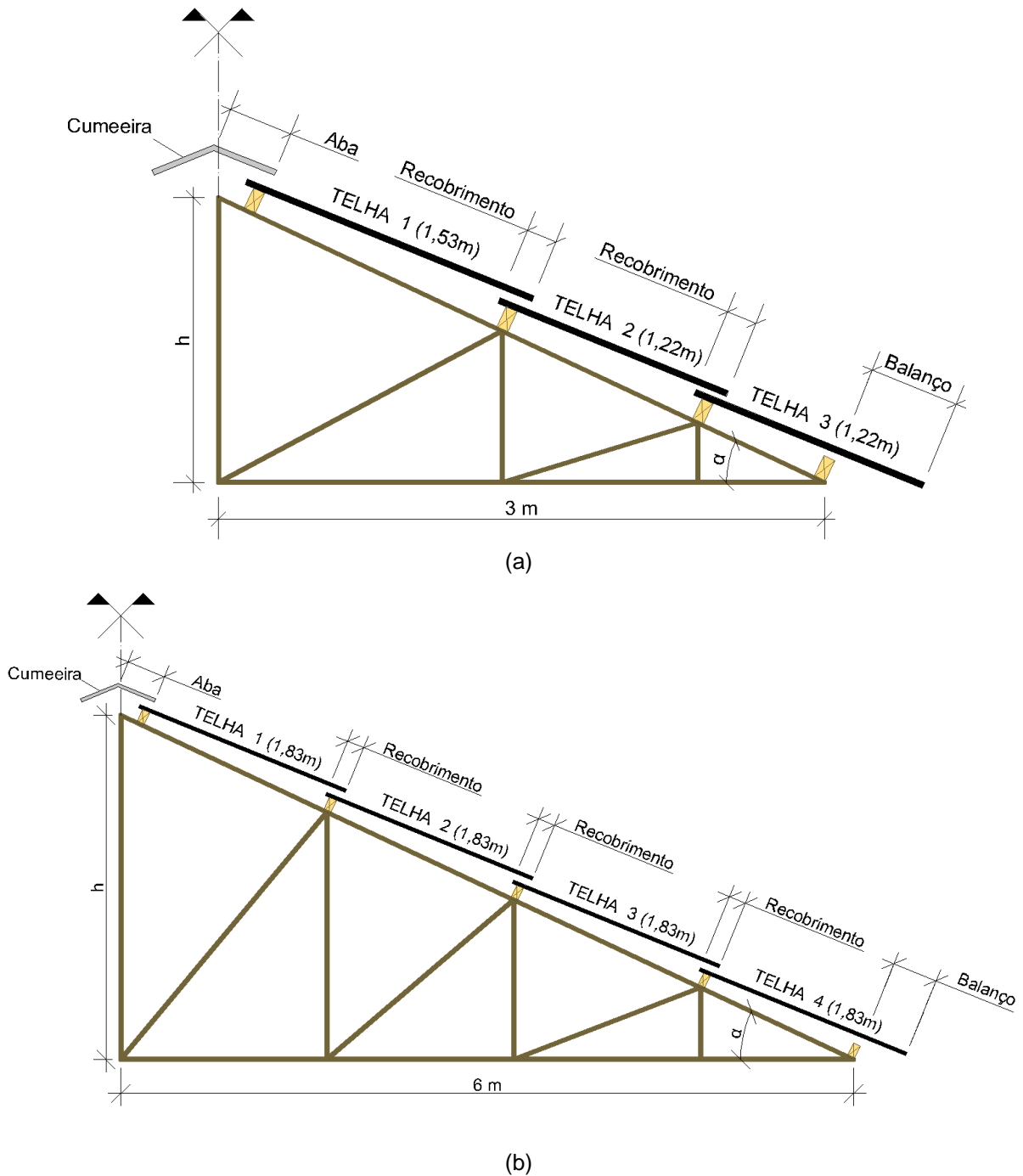
Treliças a esquerda (menor vão): nº de montantes total = 5

Treliças a direita (maior vão): nº de montantes total = 7

Fonte: Elaborado pela própria autora (2022).

Quanto ao arranjo de telhas: para o vão de 6m foram consideradas uma telha de 1,83m e duas telhas de 1,22m em cada água da cobertura; para o vão de 12m foram consideradas quatro telhas de 1,83m em cada água da cobertura. Um detalhamento do arranjo de telhas mencionado é dado na Figura 4.7 na tipologia *Howe*, ilustrando apenas uma água para melhor visualização. Para tipologia *Pratt* a única mudança é a direção das diagonais.

Figura 4.7 – Detalhamento do arranjo de telhas para o vão de : (a) 6m; (b) 12m. Desenhos sem escala.



Fonte: Elaborado pela própria autora (2022).

Salienta-se que, desse modo, as treliças de um mesmo vão possuem áreas de influência muito próximas, independente das variações de inclinação e de tipologias.

4.3.3 AÇÕES E CARREGAMENTOS ATUANTES

O levantamento das ações atuantes na estrutura foi feito seguindo as diretrizes das seguintes normativas brasileiras: ações e segurança nas estruturas – ABNT NBR 8681 (2003),

ações para o cálculo de estruturas de edificações – ABNT NBR 6120 (2019) e forças devidas ao vento em edificações – ABNT NBR 6123 (1988).

4.3.3.1 AÇÕES PERMANENTES

Dentre as diversas vantagens de se utilizar o programa *iTruss*, destaca-se a função de calcular automaticamente a ação devido ao peso próprio dos elementos que compõem a estrutura (barras da treliça e terças), a cada alteração realizada no perfil. Diante disso, nessa seção foram especificadas apenas as ações permanentes decorrentes aos elementos fixados na estrutura.

O peso da telha ondulada de fibrocimento de 6mm considerado foi o médio, visto que foram utilizados arranjos com telhas de comprimento distintos. O catálogo técnico da Eternit (2020) apresenta o valor de 18kg/m² para o tipo de telha considerada. Além disso, é comumente acrescentada a porcentagem de absorção de água da chuva pelo material da telha, como não consta no catálogo técnico essa informação específica, foi adotado um acréscimo de 50%. Essa porcentagem não se refere somente à questão da absorção, como também ao peso próprio dos elementos utilizados para fixar a estrutura. Assim, a Tabela 4.2 apresenta o valor da ação permanente considerada, em kN/m².

Tabela 4.2 – Levantamento das ações permanentes atuantes.

Descrição	Valores g_k (kN/m ²)
Peso próprio das telhas onduladas de fibrocimento com 6mm de espessura	0,18 ¹
Acréscimo de 50% (Absorção de água + peso dos elementos para fixação)	$0,5 \cdot 0,18 = 0,09$
Total	$0,18 + 0,09 = 0,27$ $\cong 0,30$

Nota: ¹ Eternit (2020)

Fonte: Elaborado pela própria autora (2022).

4.3.3.2 AÇÕES VARIÁVEIS DEVIDO AO VENTO

As ações variáveis devido ao vento foram levantadas seguindo as diretrizes da norma específica ABNT NBR 6123 (1988). Nessa seção é detalhado o passo a passo realizado para se obter a ação variável atuante devido ao vento deste projeto.

A velocidade característica do vento é o primeiro parâmetro a ser definido, para se obter esse valor são necessários: a velocidade básica do vento, e outros três fatores. Para a definição da velocidade básica do vento, consultou-se o mapa das isopletas (Figura 1 da ABNT NBR 6123,1988) e foi possível constatar que apesar de ser trabalhado com duas localizações distintas, devido às diferentes classes de umidade, a velocidade básica do vento em ambas consiste em 40m/s. Os demais fatores adotados são descritos na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Fatores considerados para a definição da velocidade característica do vento.

Descrição	Valores
Fator topográfico	
Situação → terreno plano ou fracamente acidentado	$S_1=1,0$
Rugosidade do terreno	
Situação → Categoria IV (Terrenos cobertos por obstáculos numerosos e pouco espaçados, em zona florestal, industrial ou urbanizada).	
Dimensões da Edificação	
Situação Vento 0° → Classe A (a maior dimensão horizontal ou vertical não excede 20 m)	S_2 varia de acordo com a inclinação a ser analisada
Situação Vento 90° → Classe B (a maior dimensão horizontal ou vertical está entre 20 m e 50m)	
Altura sobre o terreno	
Situação → Pé direito de 7m + altura da cumeeira de acordo com a inclinação a ser analisada	
Fator estatístico	
Situação → Grupo 3 (Edificações e instalações industriais com baixo fator de ocupação)	$S_3=0,95$

Fonte: ABNT NBR 6123 (1988).

Como o Fator S_2 varia de acordo com a inclinação analisada, o mesmo acontece com a velocidade característica do vento, sendo encontrado um valor de vento 0° e de vento 90° para cada inclinação. Todos os outros parâmetros que derivam da velocidade característica do vento também são variados junto com a inclinação. A Tabela 4.4 apresenta as equações desses parâmetros que variam de acordo com a inclinação, somente para fins de esclarecimento, visto que o programa *iTruss* calcula automaticamente esses parâmetros para cada situação de projeto inserida.

Tabela 4.4 – Parâmetros que variam em função da inclinação.

Parâmetros	Equações
Velocidade característica do vento (m/s)	$V_k = V_0 \cdot S_1 \cdot S_2 \cdot S_3$
Pressão dinâmica final (N/m ²)	$q = 0,613 \cdot (V_k)^2$
Carregamento de vento na estrutura (N/m ²)	$w_k = (C_e - C_i) \cdot q$

Nota: C_e – Coeficiente de forma externo; C_i – Coeficiente de forma interno;

Fonte: ABNT NBR 6123 (1988).

Tanto os coeficientes de forma externos e internos das paredes e dos telhados também são definidos automaticamente pelo *software*, que segue as diretrizes impostas no item 6 da ABNT NBR 6123 (1988). Para mais informações sobre o funcionamento do *software*, consultar Fraga (2020).

Por ser a ação variável mais crítica, a ação devido ao vento foi considerada a ação variável principal, sendo adotado o carregamento de longa duração, conforme prescrito na ABNT NBR 7190-1 (2022).

4.3.3.3 **DEMAIS AÇÕES VARIÁVEIS**

A norma referente às cargas para o cálculo de estruturas de edificações, a ABNT NBR 6120 (2019), prescreve algumas cargas a serem consideradas em estruturas de cobertura.

Primeiramente, foi considerada uma carga uniformemente distribuída sobre o plano horizontal, o valor dessa sobrecarga de utilização normativa é igual a $0,25\text{kN/m}^2$, devendo ser decomposto sobre o plano horizontal, multiplicando-se o valor pelo cosseno do ângulo de inclinação. Apesar de se ter uma grande variação de inclinação (5° - 25°), quando multiplicado pelo cosseno dos ângulos, tem-se uma variação do valor da sobrecarga muito pequena ($0,25\text{kN/m}^2$ - $0,23\text{kN/m}^2$). Assim, para simplificação e sendo a favor da segurança, foi adotado o valor de $0,25\text{kN/m}^2$ para todas as inclinações.

A outra consideração da normativa é a respeito dos elementos isolados da cobertura (terças, barras dos banzos superiores das treliças) serem projetados para suportar uma carga concentrada de 1kN , na posição mais desfavorável, ou seja, no meio do vão. Esse procedimento também é feito automaticamente pelo *software iTruss*.

4.3.3.4 **RESUMO DOS COEFICIENTES DE PONDERAÇÃO E FATORES DE COMBINAÇÃO E DE REDUÇÃO**

As combinações dos esforços de cálculo para o ELU já foram devidamente detalhadas na seção 3.2.3, os coeficientes de ponderação das ações foram dados na Tabela 3.5 e os fatores de combinação e de redução na Tabela 3.6. Retoma-se na Tabela 4.5 somente os valores adotados nesse trabalho.

Tabela 4.5 – Coeficientes de ponderação e fatores de combinação e de redução adotados.

Ações	Considerado	γ	Ψ_0	Ψ_1	Ψ_2
Permanente (g)	Conjuntamente	1,4(desfavorável)	-	-	-
		1,0 (favorável)			
Variáveis (q)	Separadamente	Vento	0,6	0,3	0
		Sobrecarga (cobertura) ¹	1,5	0,7	0,6

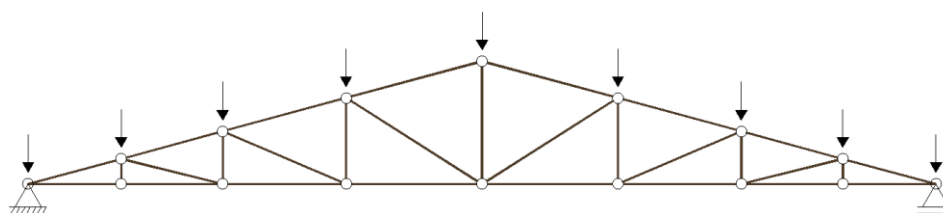
Nota: ¹Edifício comercial

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 8681 (2003).

4.3.4 **MODELO DE ANÁLISE ESTRUTURAL**

O modelo para análise estrutural adotado é dado na Figura 4.8. Foi considerado uma ligação perfeitamente rotulada entre as barras da treliça, levando em consideração que esse é o modelo idealizado comumente empregado por projetistas.

Figura 4.8 – Modelo de análise estrutural.



Fonte: Fraga (2020).

Observa-se também que as condições de contorno consistiram no modelo isostático clássico e que o carregamento do peso próprio foi aplicado de modo pontual nas respectivas áreas de influência. Assim, no *software* foi adotado o modelo I de processamento (FRAGA, 2020).

4.3.5 CONFIGURAÇÕES PARA O DIMENSIONAMENTO

Sabe-se que peças podem ser classificadas como de perfil simples (peça isoladas) ou de perfil múltiplo (peças múltiplas) e que a partir dessa classificação tem-se a espessura mínima a ser utilizada e área da seção transversal mínima. Independente do grupo de elementos que a peça pertença, todas foram consideradas principais e essas medidas mínimas são apresentadas na Tabela 3.7. Seguindo essas determinações, foram adotadas as configurações dadas na Tabela 4.6. Além dessas dimensões, foram considerados para todas as simulações os seguintes parâmetros da Tabela 4.7.

Tabela 4.6 – Configurações consideradas no perfil para o pré-dimensionamento.

Descrição	Grupo de elementos			
	Banzos	Montantes	Diagonais	Terças
Configuração do Perfil	Perfil duplo	Perfil simples	Perfil duplo	Perfil Simples
Espessura fixa (cm)	3	6	3	6
Distância entre peças duplas (cm)	6	-	12	-

Fonte: Elaborado pela própria autora (2022).

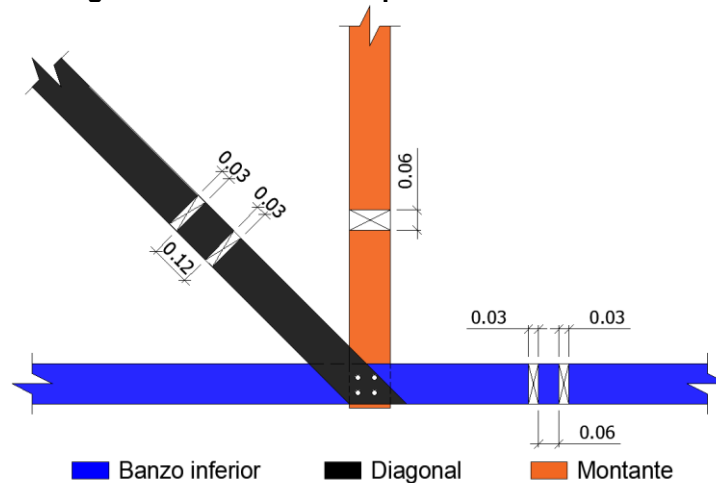
Tabela 4.7 – Parâmetros fixos essenciais para o dimensionamento.

Parâmetro	Situação adotada	
Tipo de Madeira	Serrada	
Classe de carregamento	Longa duração	
Coeficiente de fluência	Classe de umidade 1	0,6
	Classe de umidade 2	0,8

Fonte: ABNT NBR 7190-1 (2022).

Observa-se que todas as seções adotadas são retangulares. A Figura 4.9, ilustra o detalhe do encaixe do banco inferior, diagonal e montante.

Figura 4.9 – Encaixe dos perfis. Cotas em metro.



Nota: Ligação meramente ilustrativa (não dimensionada).

Fonte: Elaborado pela própria autora (2022).

4.4 Cálculo do Volume e Consumo

É importante registrar como foram calculados os valores analisados, assim a Equação 24 apresenta a maneira que foi calculado o volume de uma única treliça, a Equação 25 a formulação para obter o volume de todas as treliças. O volume das terças e o volume da estrutura total utilizaram-se das Equações 26 e 27, respectivamente. Por fim, o modo que foi calculado o consumo tanto para a estrutura total como para somente treliças e somente terças, é dado na Equação 28.

$$Volume_{\text{Única Treliça}} = \sum_{i=1}^4 (b_i \cdot h_i \cdot L_i) \quad (24)$$

$$Volume_{\text{Treliças}} = Volume_{\text{Única Treliça}} \cdot n_{\text{treliças}} \quad (25)$$

$$Volume_{\text{Terças}} = b_{\text{terças}} \cdot h_{\text{terças}} \cdot L_{\text{terças}} \cdot n_{\text{terças}} \quad (26)$$

$$Volume_{\text{Estrutural total}} = Volume_{\text{Treliças}} + Volume_{\text{Terças}} \quad (27)$$

Em que:

i – grupos de barras da treliça;

L – comprimento;

b – base da seção transversal, equivalente a 3cm para perfil simples e 6cm para perfil dupla;

h – altura da seção transversal;

n – número total de treliças ou terças.

$$Consumo = \frac{Volume}{Área_{\text{edificação}}} = \frac{Volume}{A \cdot B} \quad (28)$$

Em que:

A – comprimento da edificação, adotado como 24 metros

B –vão da treliça (6 ou 12 metros);

5. RESULTADOS

Nessa seção são apresentados os resultados obtidos após a aplicação da metodologia detalhada na seção anterior. A seção 5.1 apresenta os resultados para as terças, que são os mesmos, independentemente da tipologia analisada. A seção 5.2 e 5.3, apresentam os resultados obtidos para tipologia *Howe* e *Pratt*, respectivamente. Para cada tipologia, são feitas análises dos resultados considerando uma única treliça e considerando a estrutura de cobertura como um todo, ou seja, todas as treliças e terças que compõem a estrutura. Por fim, a seção 5.4 compara as duas tipologias analisadas e a seção 5.5 define uma faixa de inclinação ótima.

Ressalta-se que não foi possível obter resultados de 46 simulações, cerca de 7% do total estipulado anteriormente (672 simulações), visto que o *software* entrou em *loop* infinito nessas situações pontuais. Foi constatado que um tamanho de espessura de terça maior que o adotado (6 centímetros) solucionaria o problema, contudo a situação foi repassada ao desenvolvedor do programa. As descrições das situações das quais não foram obtidos resultados são dadas na Tabela 5.1, para ambas as tipologias.

Tabela 5.1 – Inclinações para as respectivas situações que não foi possível obter resultado.

Classe de Resistência	D20		D30		D40		D50		D60	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Classe de umidade										
Vão de 6 metros	≥21°	≥19°	≥24°	≥22°	-	-	-	-	-	-
Vão de 12 metros					25°	≥23°	-	25°	-	-

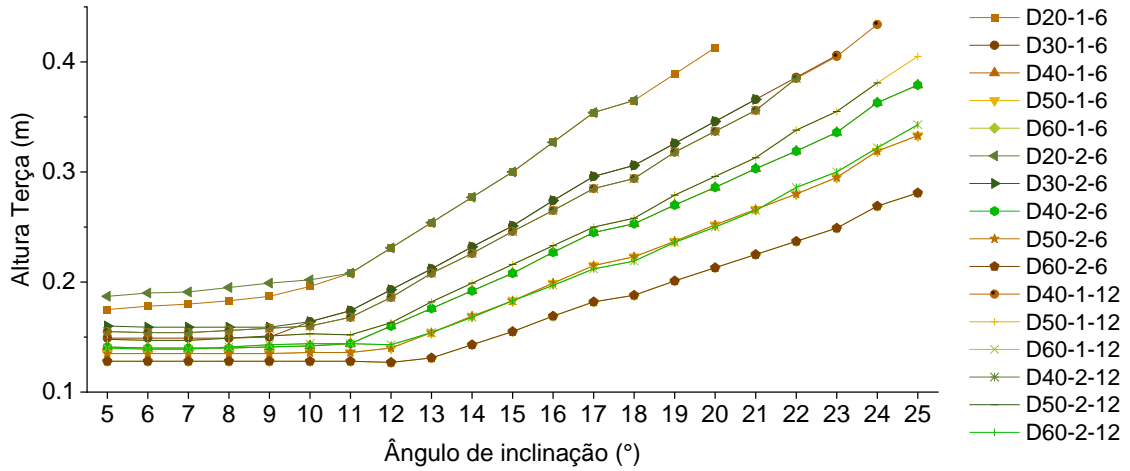
Fonte: Elaborado pela própria autora (2022).

Diante disso, tem-se nos resultados descritos a seguir, um total de 626 simulações, sendo 313 para cada tipologia.

5.1 Terças

A Figura 5.1 apresenta a altura ótima obtida para combinação de classe de resistência, classe de umidade e vão simulados, em função da variável principal, a inclinação.

Figura 5.1 – Altura de cada terça em cada inclinação.



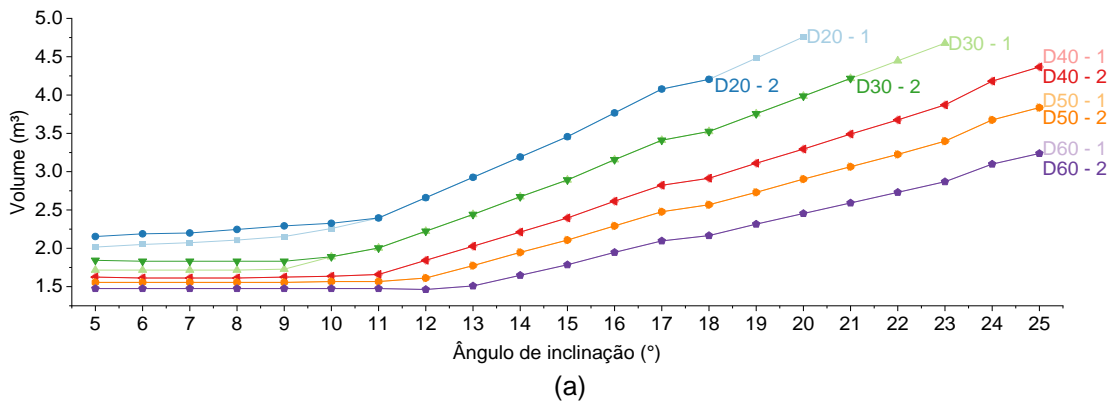
Nota: Classe de Resistência – Classe de umidade – Vão.

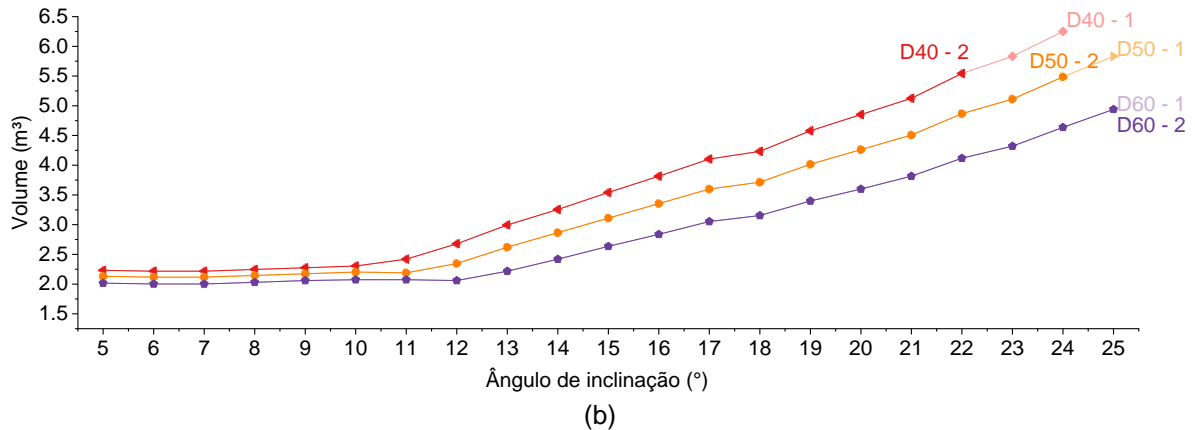
Fonte: Elaborado pela própria autora (2022).

Percebe-se que a altura se manteve constante ou com variação insignificante, em inclinações menores. A partir de 9°- 12° as alturas aumentaram à medida que a inclinação aumentou. Isso ocorre, pois o seno de 25° é aproximadamente 485% maior que o seno de 5°, ou seja, a parcela do Momento fletor em torno do eixo Y e da força cortante no eixo X (parcelas multiplicadas pelo seno da inclinação) também aumentam em função da inclinação, sendo necessária uma altura cada vez maior para atender as verificações que envolvem os respectivos esforços.

É evidente que o comportamento dos volumes das terças foi análogo ao comportamento apresentado anteriormente para as alturas, como mostra a Figura 5.2.

Figura 5.2 – Volume total de terças para vão de: (a) 6 metros; (b) 12 metros.





Nota: Classe de Resistência – Classe de umidade

Fonte: Elaborado pela própria autora (2022).

Como a Figura 5.2 apresenta um gráfico para cada vão analisado, constatou-se que para o vão de 6 metros, nas classes de resistência D20 e D30, a classe de umidade 2 apresentou um volume um pouco maior que a classe de umidade 1, nas primeiras inclinações analisadas (5°-10°), tendo praticamente o mesmo volume a partir de 11° (variação muito pequena). Já para as classes D40, D50 e D60, tanto para o vão de 6 metros como para o de 12 metros, a variação de volume para cada classe de umidade foi mínima, sendo imperceptível no gráfico plotado.

Ressalta-se que o número total de terças é diferente para cada vão, sendo igual a 8 terças para o vão de 6 metros e igual a 10 terças para o vão de 12 metros.

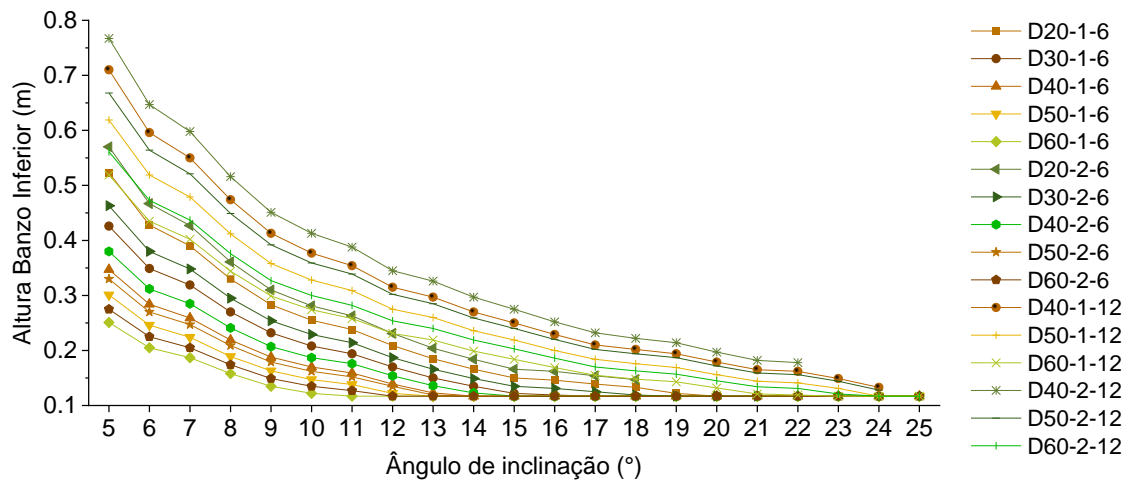
5.2 Tipologia Howe

Considerando que as terças apresentam um volume maior para inclinações maiores, optou-se por analisar não apenas uma única treliça isoladamente (seção 5.2.1), mas também a estrutura completa composta por todas as treliças e terças (seção 5.2.2).

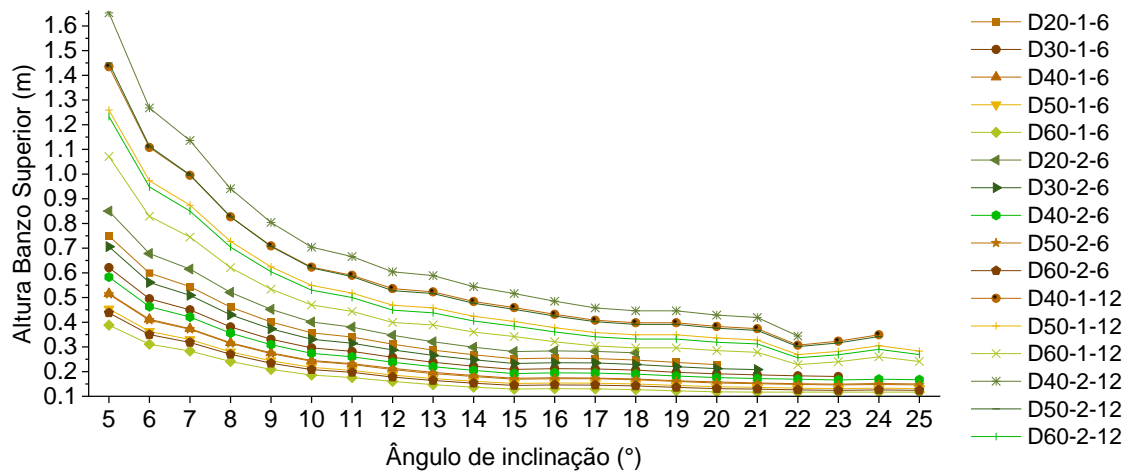
5.2.1 TRELIÇA

Para entender o comportamento de cada grupo de barras da treliça, foi elaborada a Figura 5.3, a qual apresenta a altura dos grupos de barra para cada situação analisada.

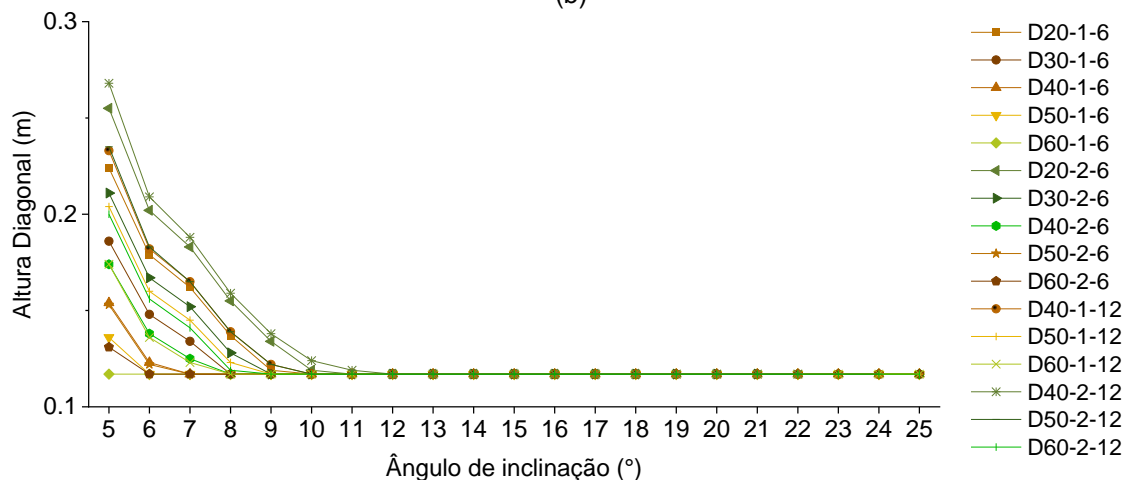
Figura 5.3 – Alturas dos grupos de barras para treliças tipo Howe: (a) Banzo Inferior; (b) Banzo superior; (c) Diagonal; (d) Montante



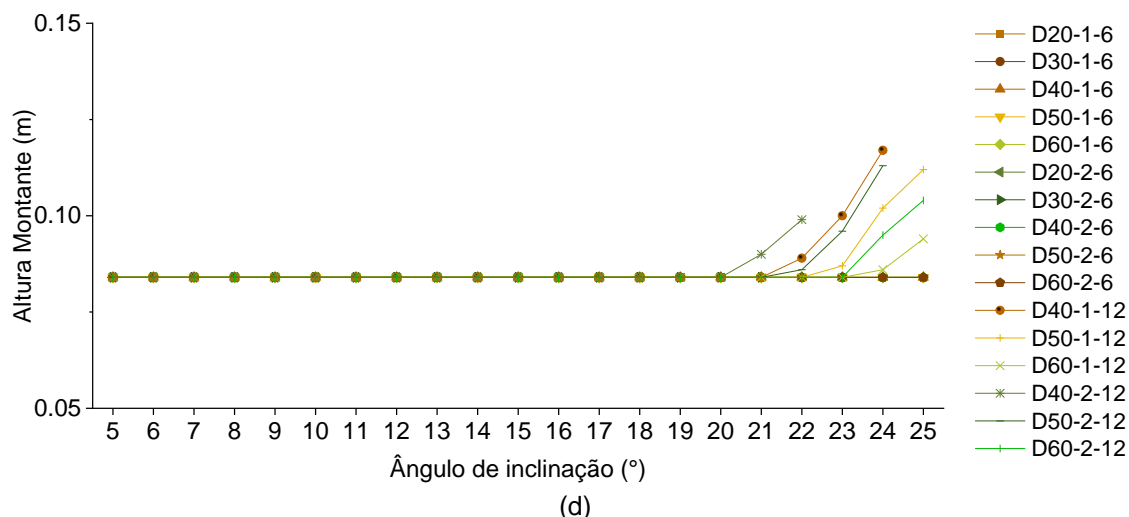
(a)



(b)



(c)



Nota: Classe de Resistência – Classe de umidade – Vão.

Fonte: Elaborado pela própria autora (2022).

As alturas dos banzos (Figura 5.3a e Figura 5.3b) diminuíram com o aumento da inclinação, independente da classe de resistência, classe de umidade e do tamanho do vão analisado. Nas inclinações próximas ao limite superior da faixa de inclinação analisada, a variação de altura foi mínima, tendendo a um comportamento constante.

As alturas das diagonais (Figura 5.3c), nos primeiros valores de inclinação analisados, apresentaram comportamento semelhante as alturas dos banzos, porém aproximadamente na inclinação de 12°, as alturas das diagonais se tornaram constantes, recebendo o valor da altura mínima para se obter a área mínima estipulada pela ABNT NBR 7190-1 (2022).

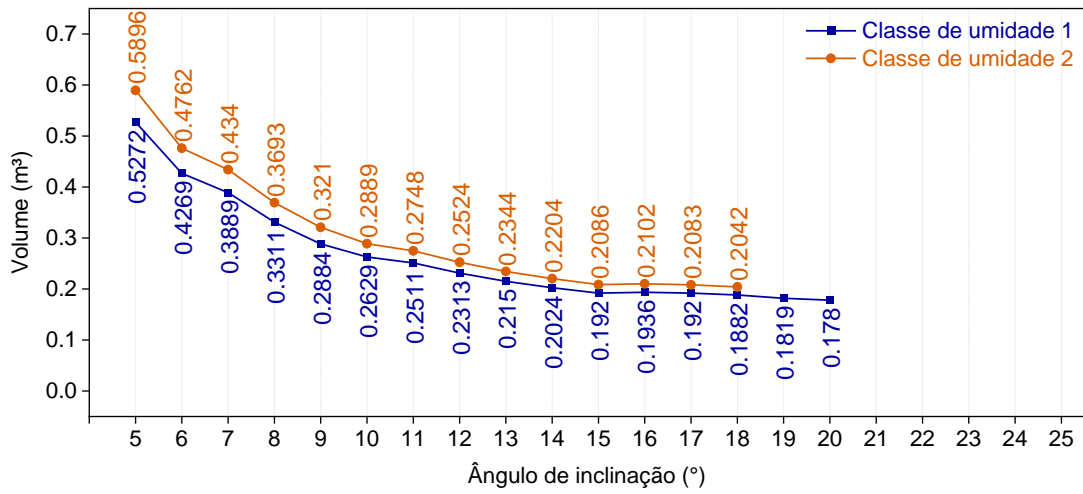
As alturas dos montantes (Figura 5.3d) apresentaram comportamento constante para o vão de 6 metros, equivalente a altura mínima possível para que se atenda a área mínima estipulada pela normativa. No entanto, para o vão de 12 metros, a partir da inclinação de 20°, a altura aumentou com o aumento da inclinação.

A seguir, são apresentados os volumes de uma única treliça, para cada situação simulada.

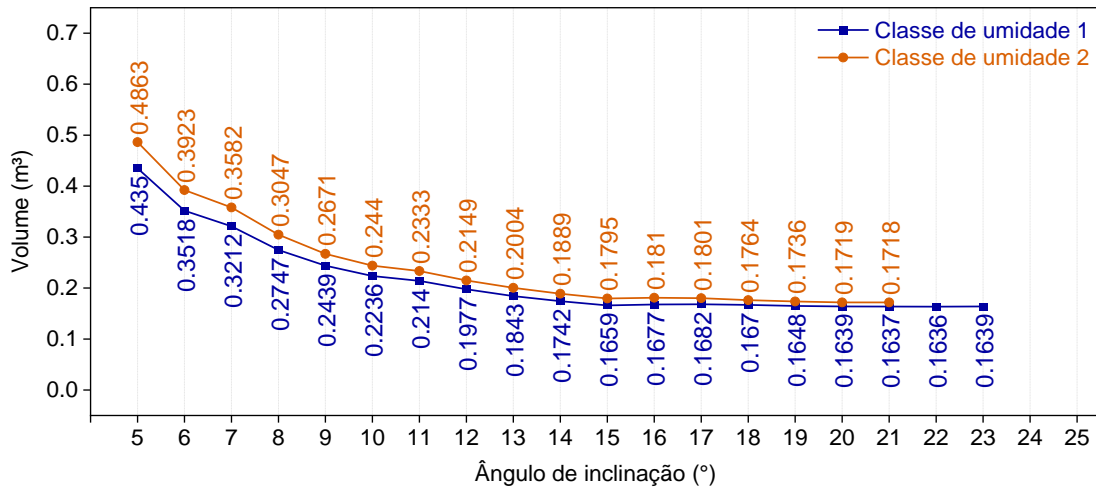
5.2.1.1 VÃO DE 6 METROS

A Figura 5.4 apresenta o volume de uma única treliça de tipologia *Howe*, presente na estrutura, com vão de 6 metros, para cada classe de resistência (D20, D30, D40, D50 e D60), comparando os valores das duas classes de umidade analisadas (1 e 2).

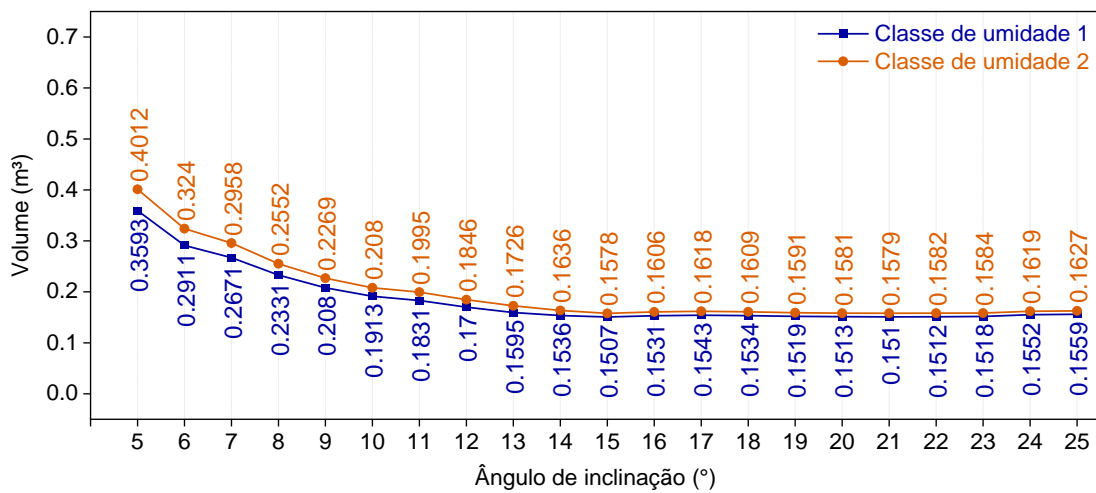
Figura 5.4 – Volume de cada treliça tipo *Howe* de 6 metros para classe de resistência de: (a) D20; (b) D30; (c) D40; (d) D50; (e) D60.



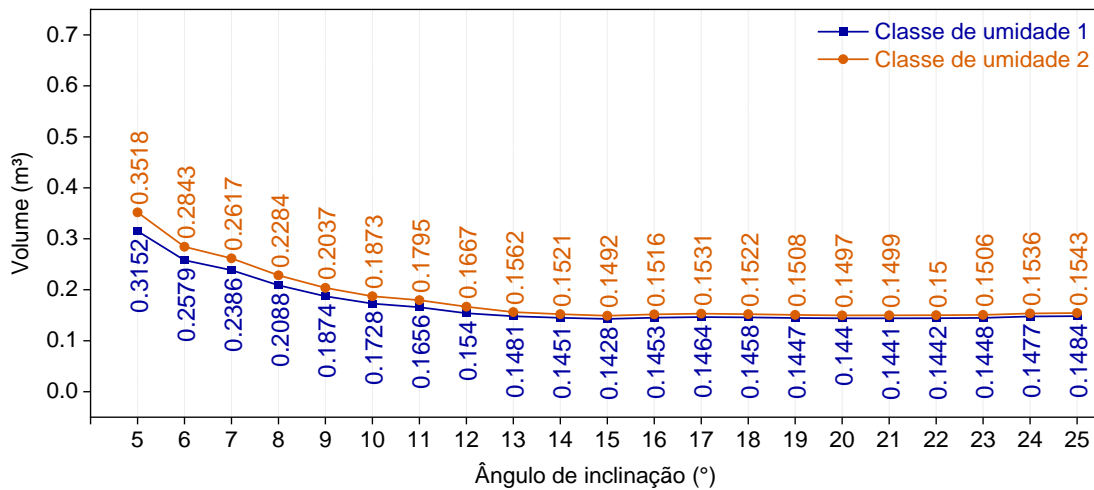
(a)



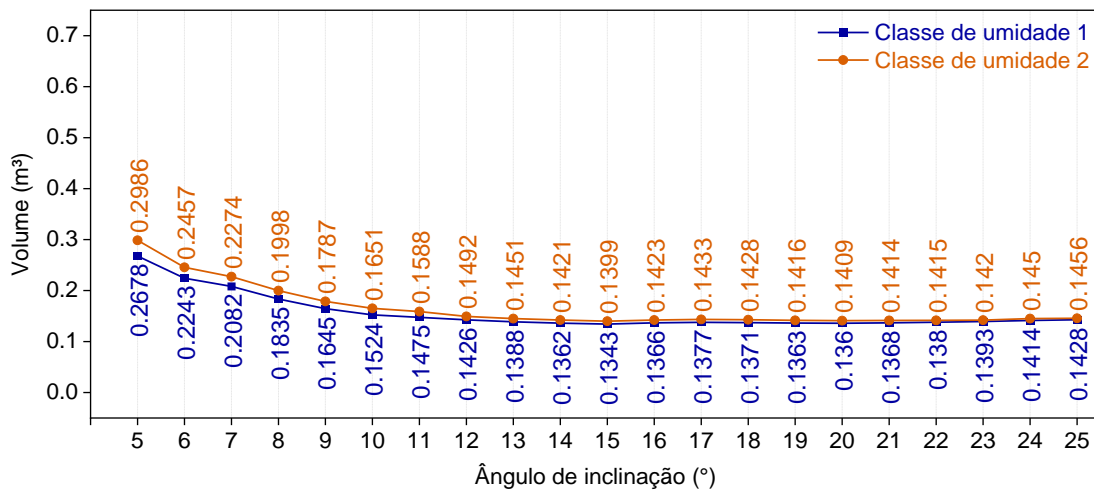
(b)



(c)



(d)



(e)

Fonte: Elaborado pela própria autora (2022).

Para a classe D20 (Figura 5.4a) e D30 (Figura 5.4b), percebe-se que para as últimas inclinações da faixa analisada, não foi possível obter um resultado, conforme detalhado no início da seção 5. Com os valores de volume obtidos, percebeu-se que o volume tende a diminuir com uma inclinação maior. Assim, para a classe D20, encontrou-se uma inclinação ótima de 20° para classe de umidade 1 e 18° para classe de umidade 2. Já para a classe D30 a inclinação ótima para classe de umidade 1 e 2 foram, respectivamente, 22° e 21°. Por fim, dessas duas classes, foi notado que o menor volume encontrado coincidiu com a maior inclinação que foi possível simular, exceto para classe D30 de umidade 1.

O comportamento dos volumes para as classes D40 (Figura 5.4c), D50 (Figura 5.4d) e D60 (Figura 5.4e) foi diferente, visto que foi encontrado um volume mínimo em uma das inclinações e, posteriormente, em inclinações maiores, o volume aumentou. Ressalta-se que foi encontrada a mesma inclinação ótima para essas classes de resistência, independente da classe de umidade analisada, sendo o valor igual a 15°.

A Tabela 5.2 apresenta as inclinações ótimas encontradas, considerando apenas a treliça isoladamente.

Tabela 5.2 – Inclinação ótima considerando apenas treliças de tipologia Howe de 6 metros

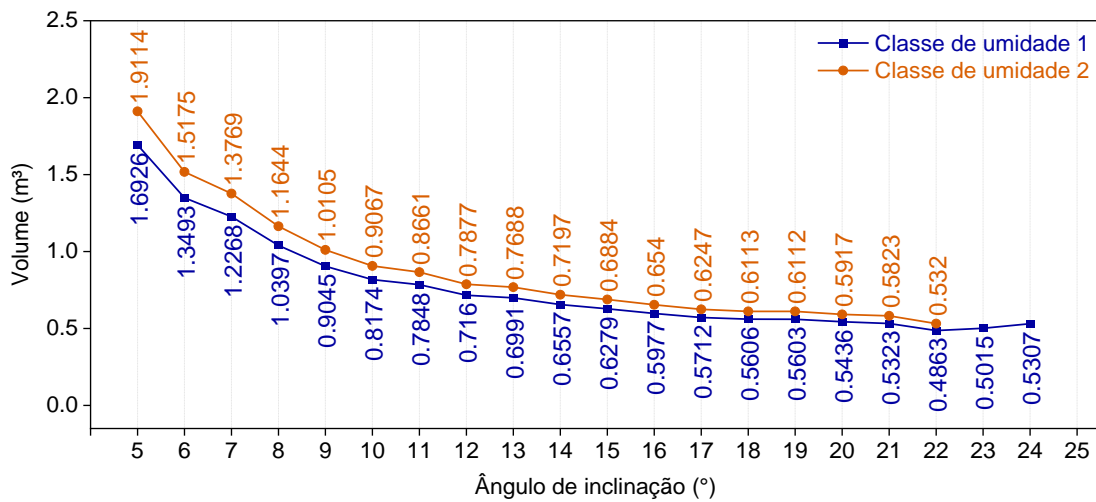
Classe de Resistência	D20		D30		D40		D50		D60	
Classe de umidade	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Inclinação ótima (°)	20	18	22	21	15		15		15	

Fonte: Elaborado pela própria autora (2022).

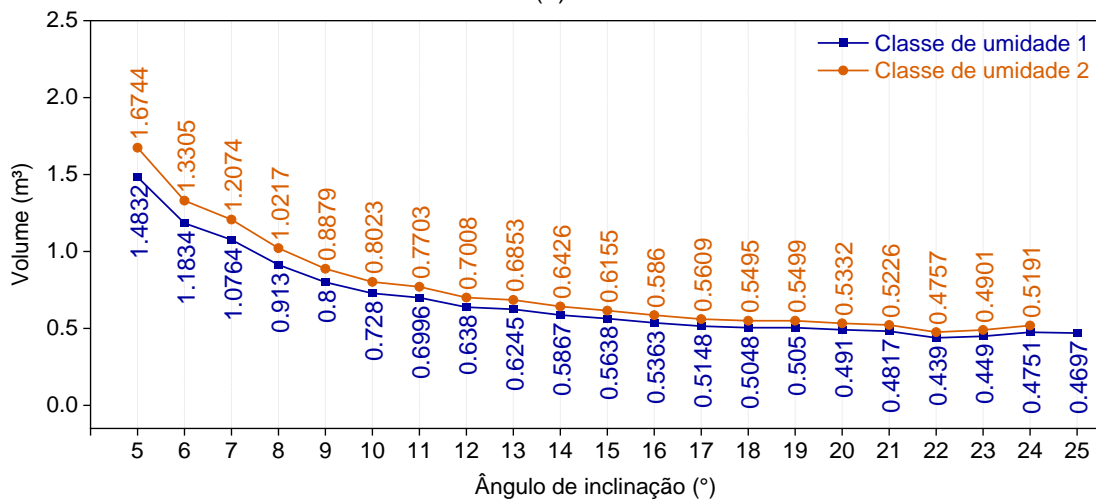
5.2.1.2 VÃO DE 12 METROS

De modo análogo a seção anterior, os volumes de uma única treliça Howe de 12 metros, são indicados na Figura 5.5, para as classes de resistência analisadas (D40, D50 e D60), comparando as classes de umidades 1 e 2.

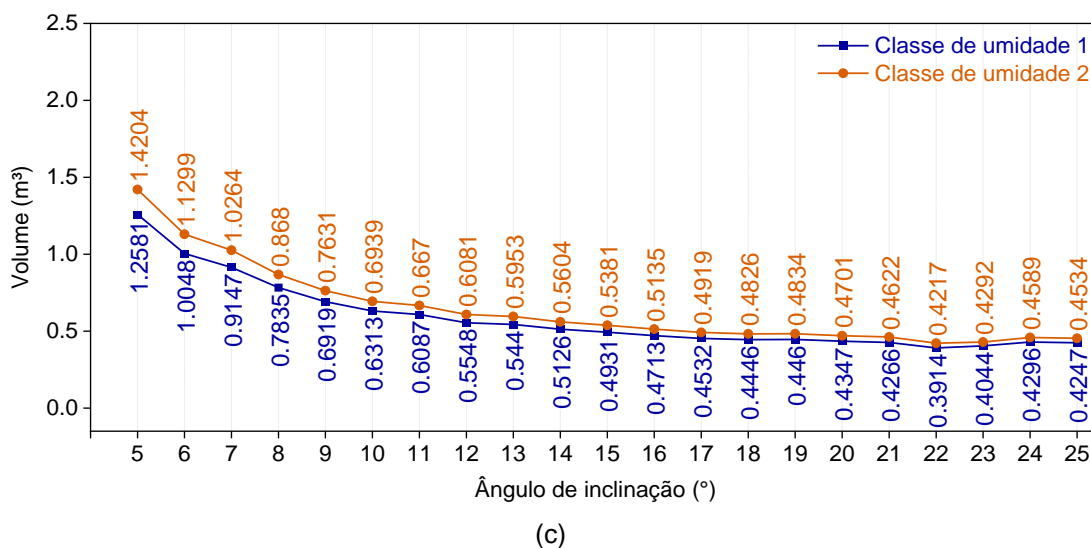
Figura 5.5 – Volume de cada treliça tipo Howe de 12 metros para classe de resistência de: (a) D40; (b) D50; (c) D60.



(a)



(b)



Fonte: Elaborado pela própria autora (2022).

A inclinação de 22° foi a inclinação ótima, ou seja, aquela que resultou em um menor volume de madeira a ser empregado em treliças *Howe* de 12 metros para todas as situações analisadas, como indica a Tabela 5.3. Como explicado anteriormente, para a classe D40 e D50, também existiram casos de inclinações que não foram possíveis encontrar um resultado (conforme Tabela 5.1).

Tabela 5.3 – Inclinação ótima considerando apenas treliças de tipologia *Howe* de 12 metros

Classe de Resistência	D40		D50		D60	
Classe de umidade	1	2	1	2	1	2
Inclinação ótima (°)	22		22		22	

Fonte: Elaborado pela própria autora (2022).

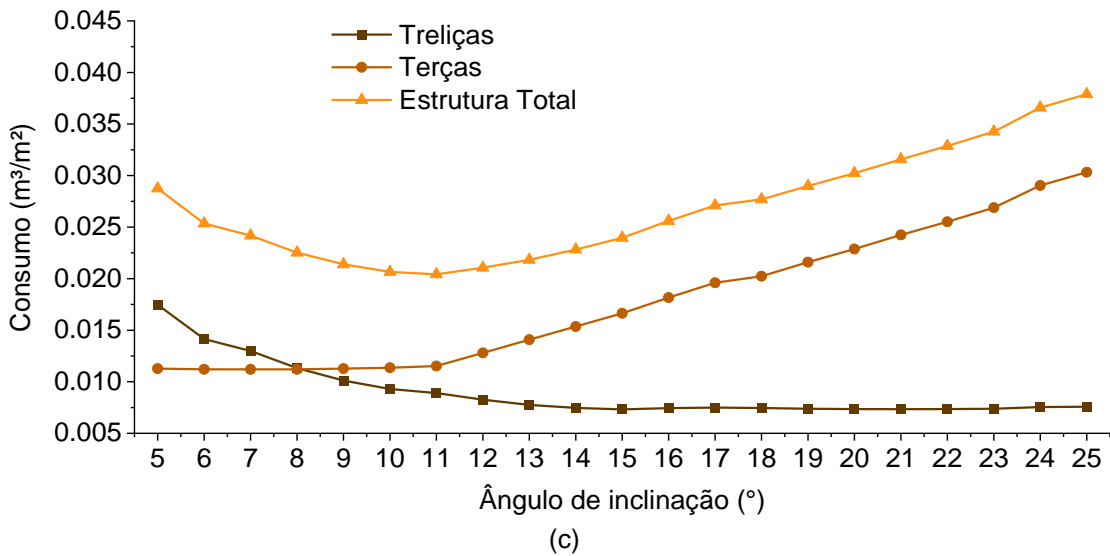
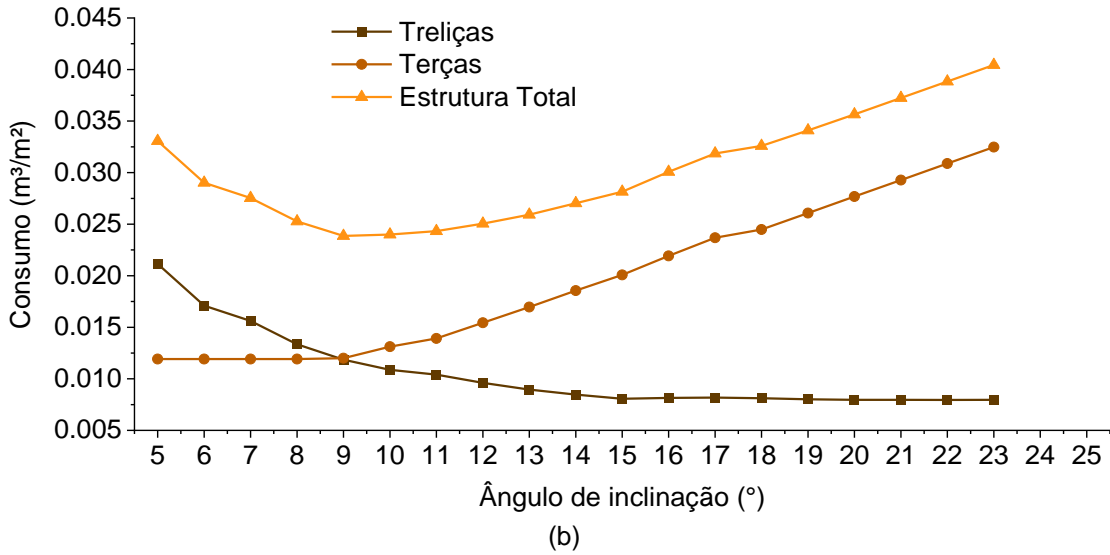
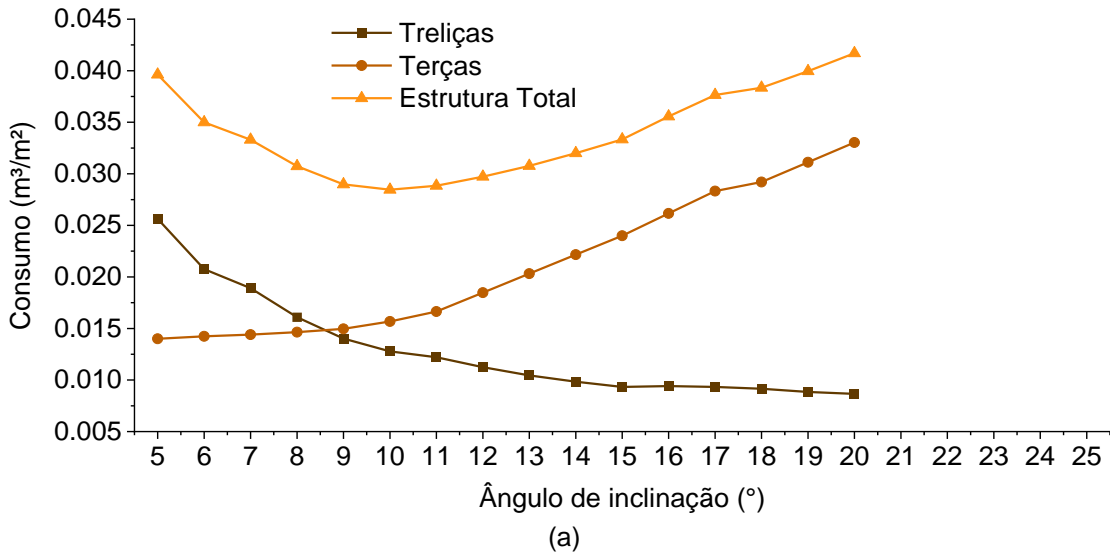
5.2.2 ESTRUTURA COMPLETA: TRELIÇAS + TERÇAS

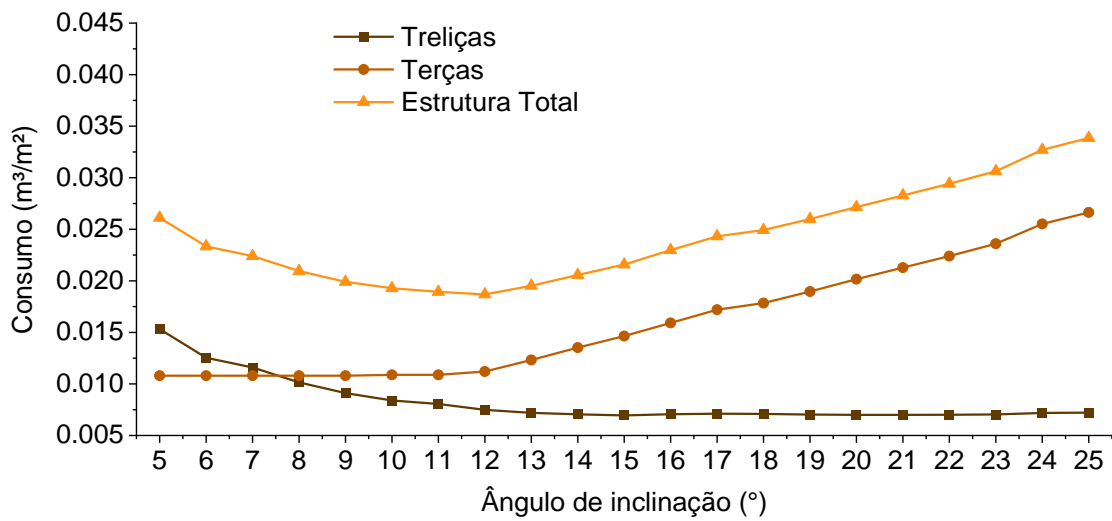
As terças apresentaram volume menor nas inclinações iniciais da faixa analisada. Já as treliças os volumes foram menores, na maioria dos casos, nas inclinações finais da faixa estipulada. Por essa razão, optou-se por comparar também o comportamento do consumo em função das inclinações, considerando três situações: somente as terças, somente as treliças e a estrutura completa (terças + treliças). Os dados foram divididos para o vão de 6 metros (seção 5.2.2.1) e vão de 12 metros (seção 5.2.2.2).

5.2.2.1 VÃO DE 6 METROS

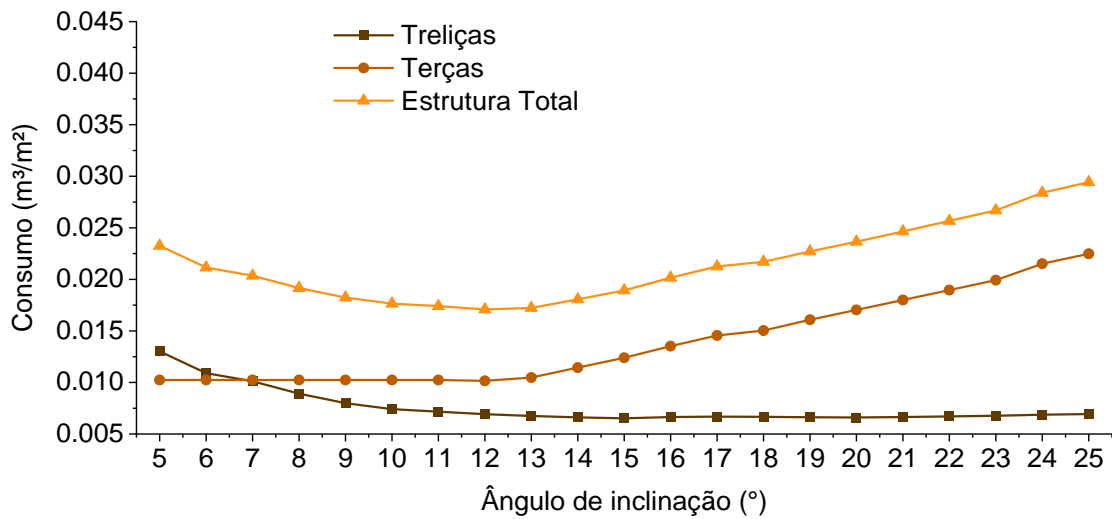
A Figura 5.6 apresenta o consumo para cada classe de resistência, considerando a tipologia *Howe* de 6 metros e a classe de umidade 1. Os gráficos fazem a comparação do consumo em função da inclinação, de todas as treliças, de todas as terças e da estrutura total (treliças + terças).

Figura 5.6 – Consumo considerando treliças tipo Howe de 6 metros, classe de umidade 1 e classe de resistência de: (a) D20; (b) D30; (c) D40; (d) D50; (e) D60.





(d)



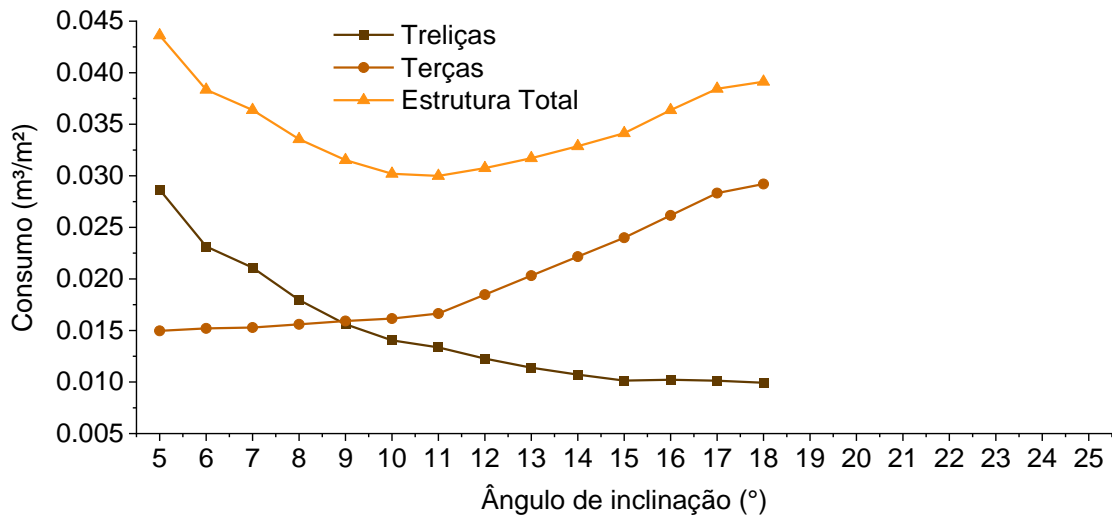
(e)

Fonte: Elaborado pela própria autora (2022).

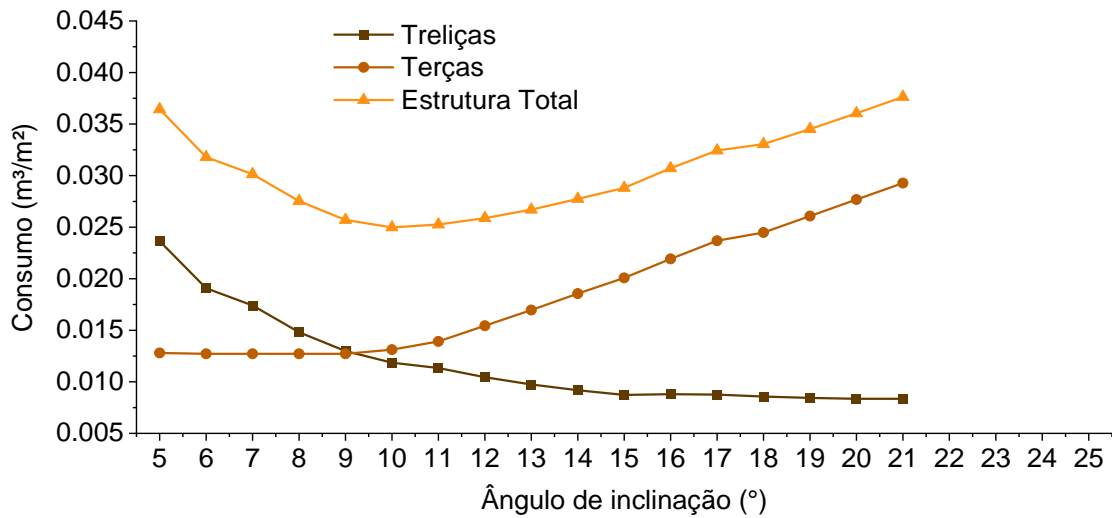
De modo geral, como mencionado anteriormente, o consumo da trelça diminuiu, com o aumento da inclinação, ou seja, são inversamente proporcionais. Já o comportamento do consumo das terças se deu de maneira crescente, ou seja, aumentou com o aumento da inclinação. Assim, para essa situação analisada, considerando a estrutura como um todo, tem-se uma faixa de inclinação ótima de 9° a 12°.

Do mesmo modo, foram feitas comparações considerando trelça de tipologia Howe de 6 metros e classe de umidade 2, dadas na Figura 5.7.

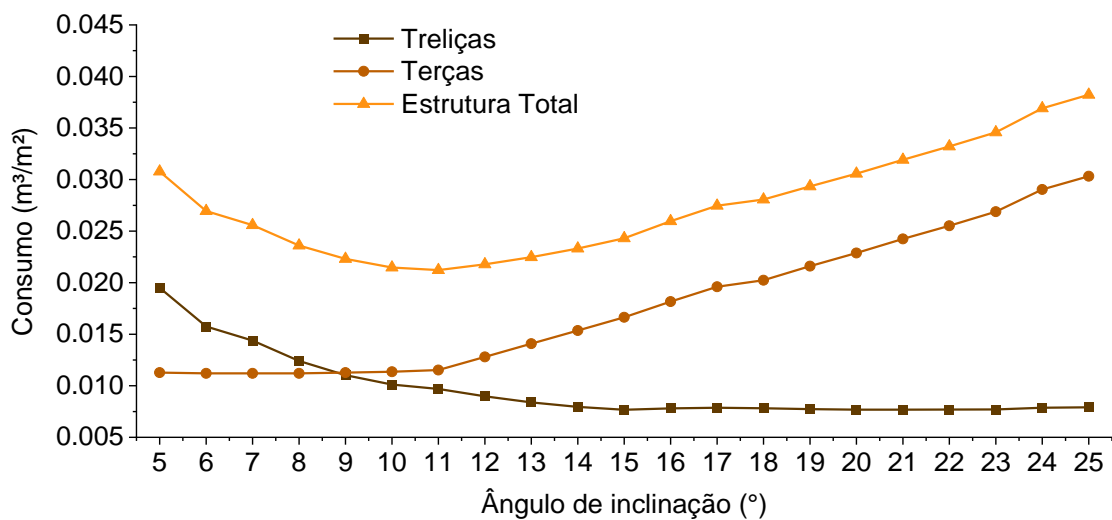
Figura 5.7 – Consumo considerando treliças tipo *Howe* de 6 metros, classe de umidade 2 e classe de resistência de: (a) D20; (b) D30; (c) D40; (d) D50; (e) D60.



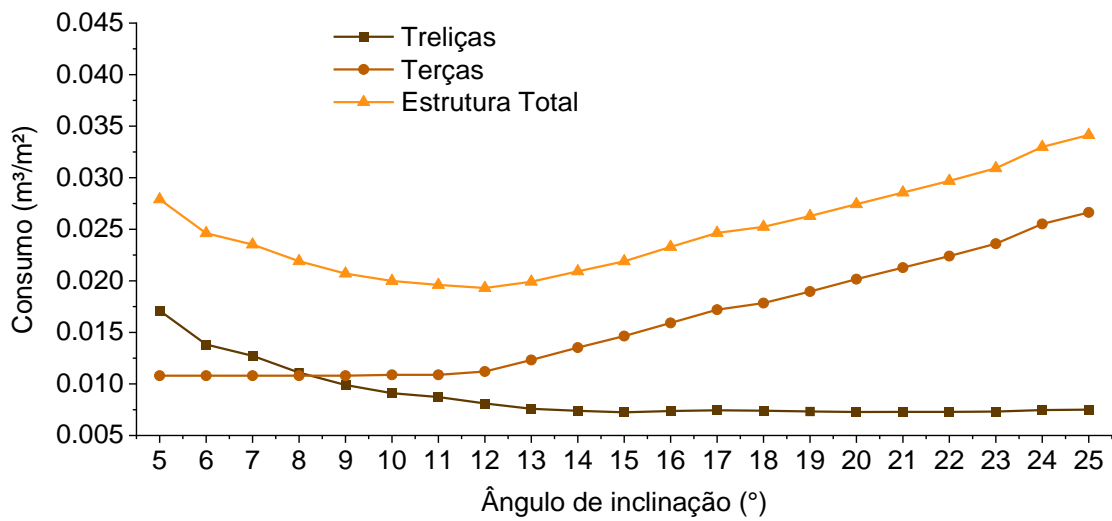
(a)



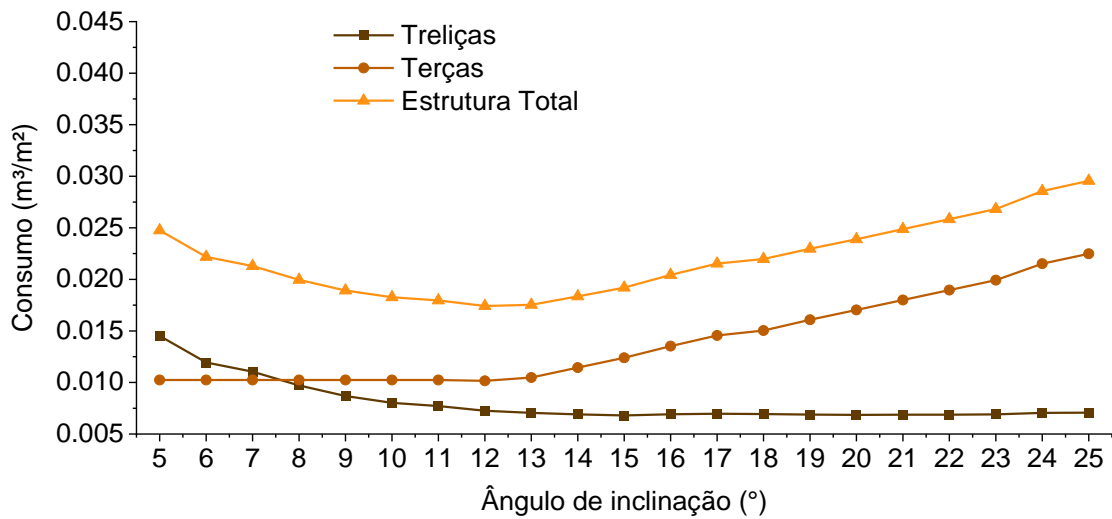
(b)



(c)



(d)



(e)

Fonte: Elaborado pela própria autora (2022).

O comportamento foi o mesmo, porém, para a classe de umidade 2 a faixa de inclinação ótima foi de 10° a 12°. Assim, considerando a estrutura total, encontrou-se, para cada situação, as inclinações ótimas indicadas na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Inclinação ótima considerando a estrutura total de tipologia Howe de 6 metros.

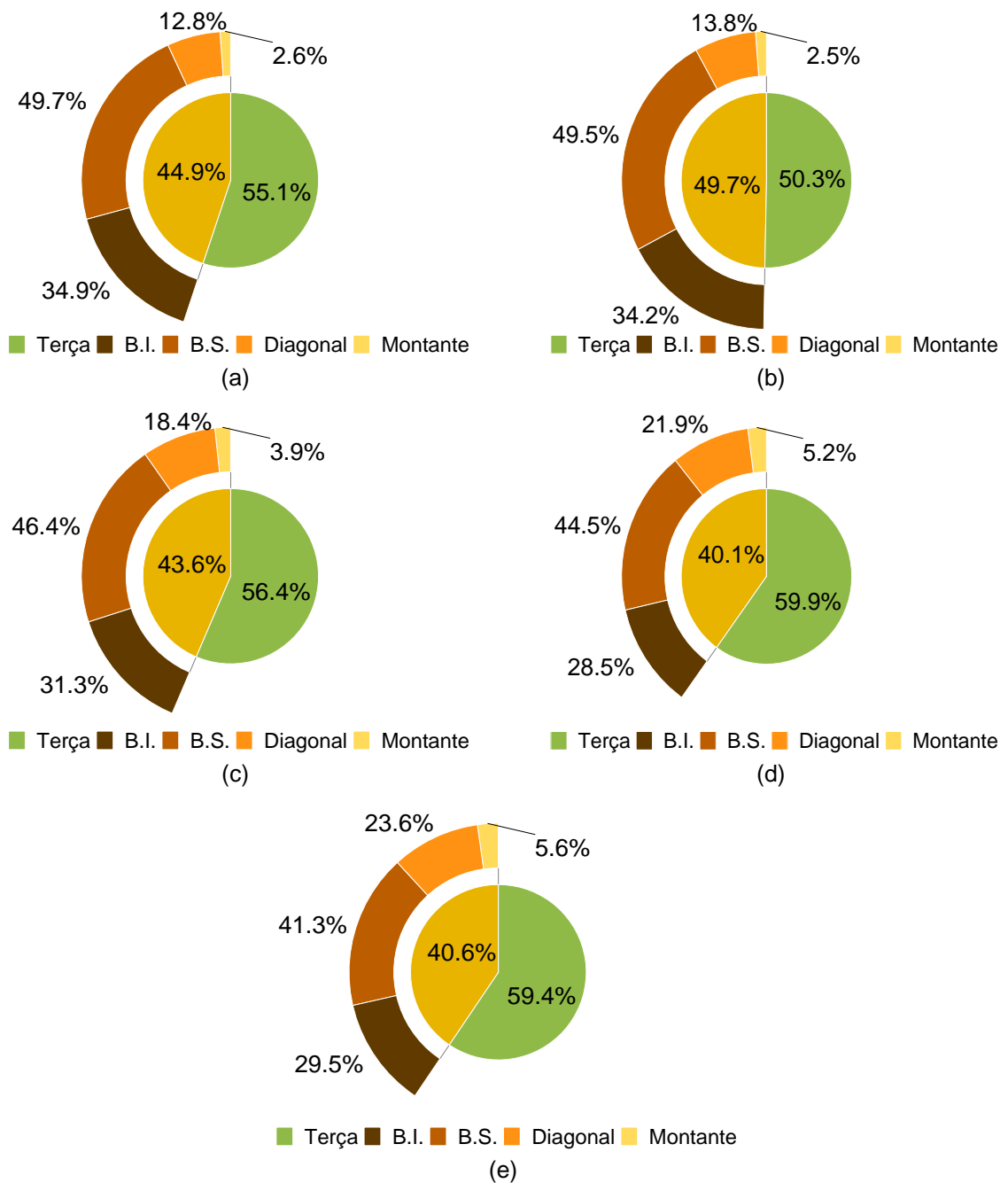
Classe de Resistência	D20		D30		D40		D50		D60	
Classe de umidade	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Inclinação ótima (°)	10	11	9	10	11		12		12	

Fonte: Elaborado pela própria autora (2022).

Percebe-se que a inclinação ótima variou de acordo com a classe de umidade somente para a classe D20 e D30. Para as demais foi encontrada uma única inclinação ótima para ambas as classes de umidades.

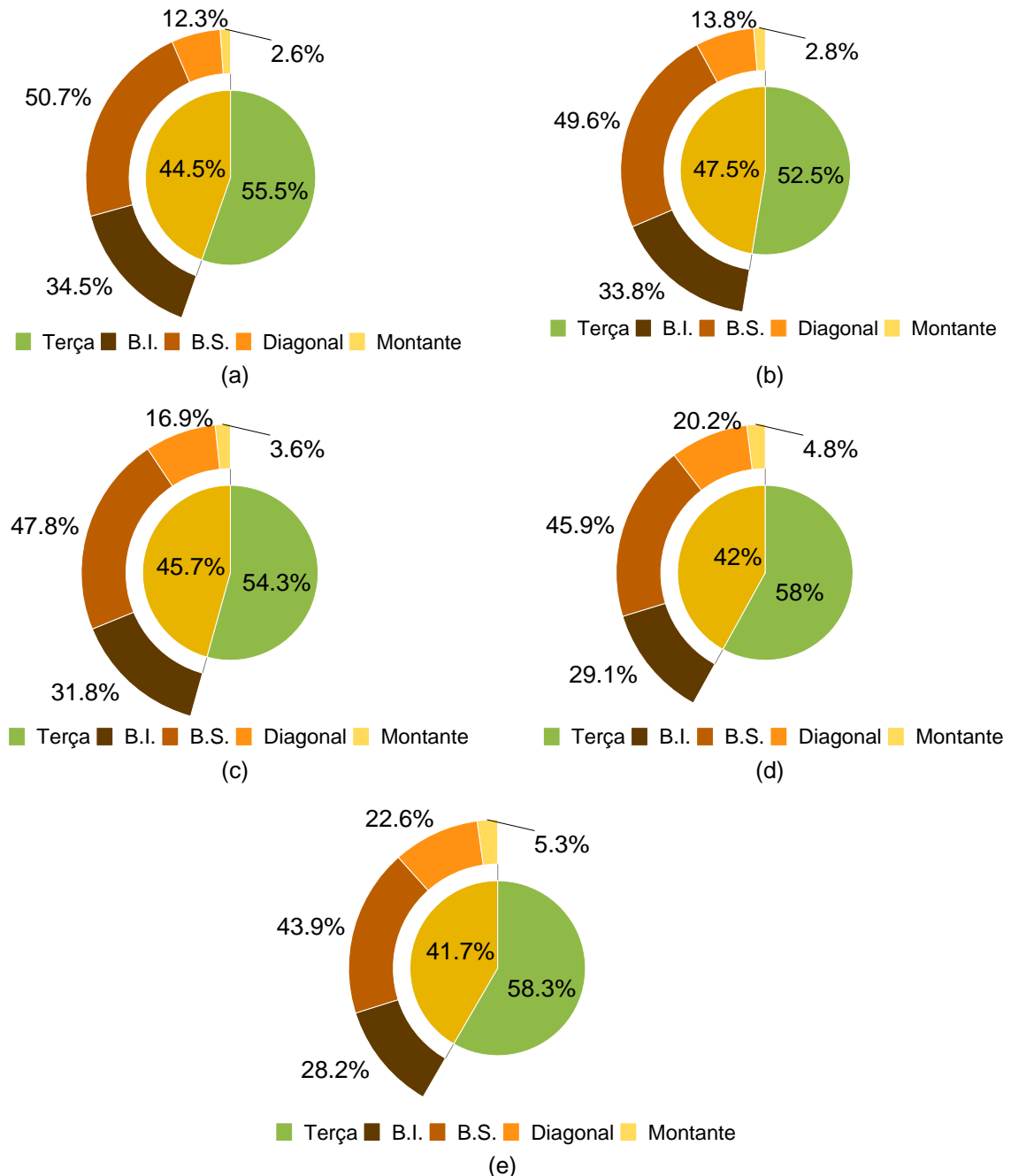
Por fim, trabalhando somente com as inclinações ótimas especificadas na Tabela 5.4, determinou-se a porcentagem de volume das terças e de cada elemento da treliça (banzo inferior – B.I., banzo superior – B.S., diagonal e montante). Essas porcentagens são apresentadas na Figura 5.8 e Figura 5.9, respectivamente, para classe de umidade 1 e 2. Importante destacar que o volume das terças é o mesmo para ambas as classes de umidade.

Figura 5.8 – Porcentagem do volume de cada elemento das treliças tipo Howe de 6 metros e terças para classe de umidade 1 e: (a) D20 – 10°; (b) D30 – 9°; (c) D40 – 11°; (d) D50 – 12°; (e) D60 – 12°.



Fonte: Elaborado pela própria autora (2022).

Figura 5.9 – Porcentagem do volume de cada elemento das treliças tipo *Howe* de 6 metros e terças para classe de umidade 2 e: (a) D20 – 11°; (b) D30 – 10°; (c) D40 – 11°; (d) D50 – 12°; (e) D60 – 12°.



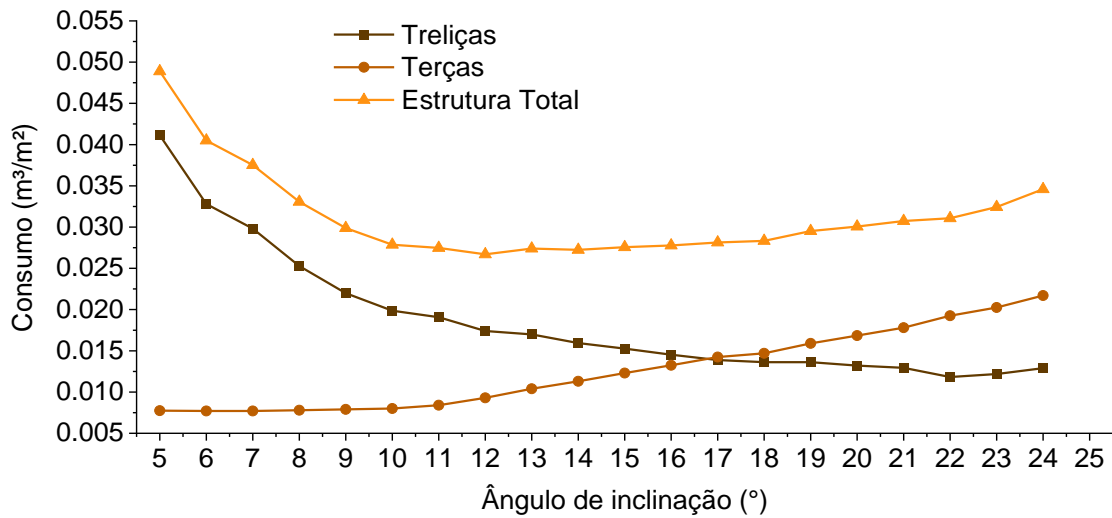
Fonte: Elaborado pela própria autora (2022).

Portanto, nota-se que para treliças *Howe* de 6 metros, em todas as classes de resistência e para todas as classes de umidade, a porcentagem de volume das terças foi superior a 50% do volume total da estrutura. Além disso, o volume do banzo superior (B.S.) foi o que apresentou maior porcentagem de volume dentro dos elementos da treliça, variando aproximadamente de 41% a 50% do volume total da treliça.

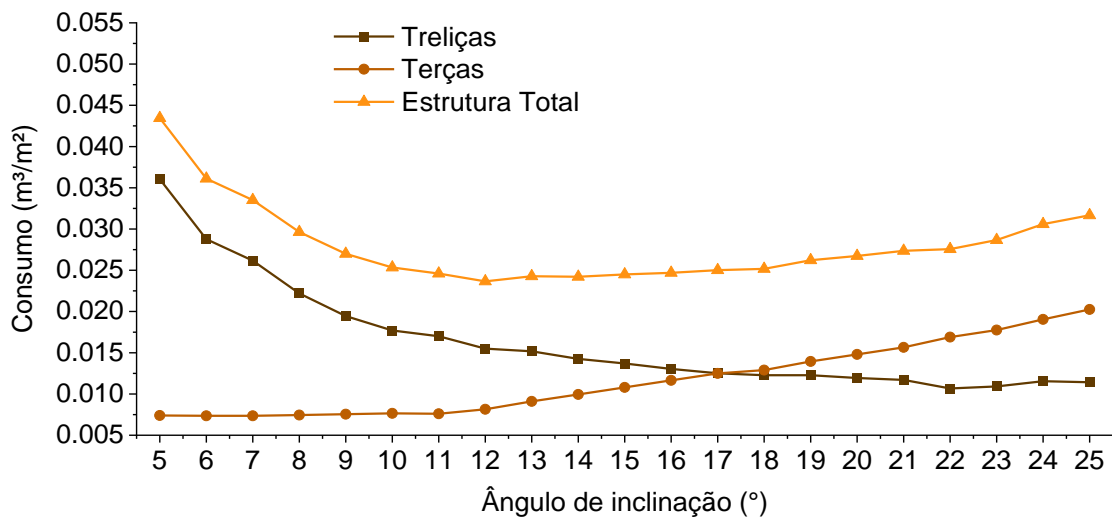
5.2.2.2 VÃO DE 12 METROS

De maneira análoga, são apresentadas as comparações dos consumos de todas as treliças, de todas as terças e da estrutura total (treliças + terças), na Figura 5.10 e Figura 5.11, sendo considerado respectivamente, classe de umidade 1 e 2.

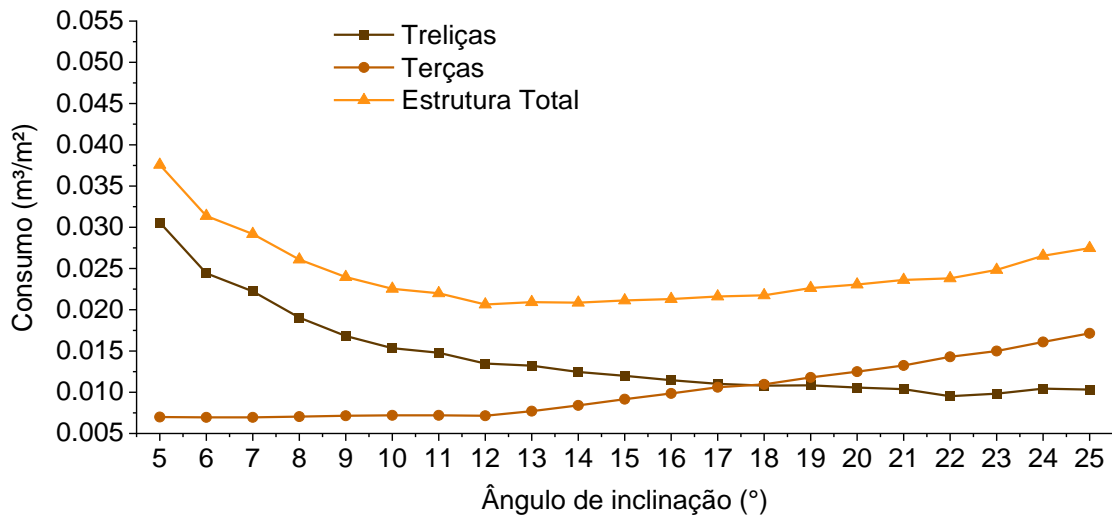
Figura 5.10 – Consumo de cada treliça tipo Howe de 12 metros para classe de umidade 1 e classe de resistência de: (a) D40; (b) D50; (c) D60;.



(a)



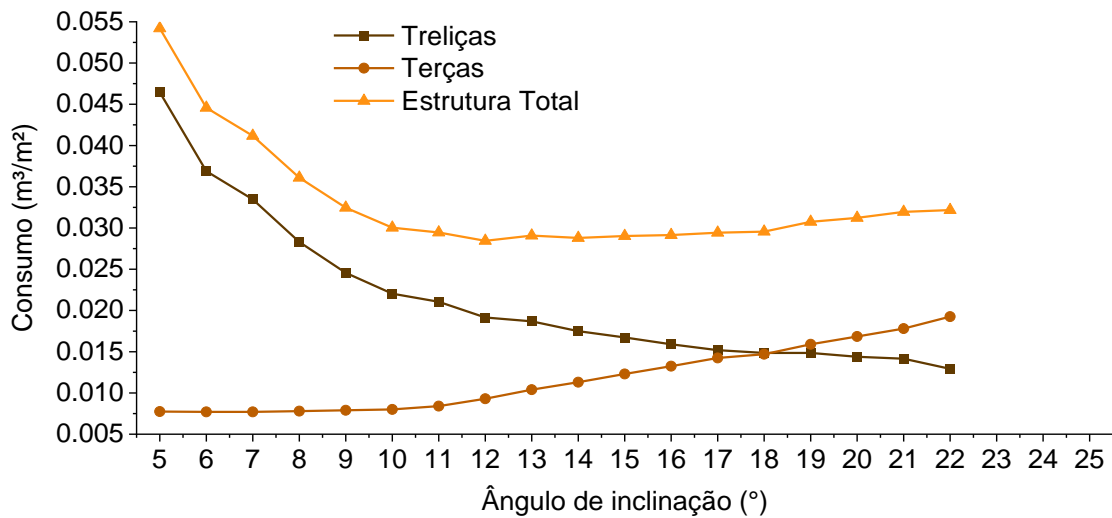
(b)



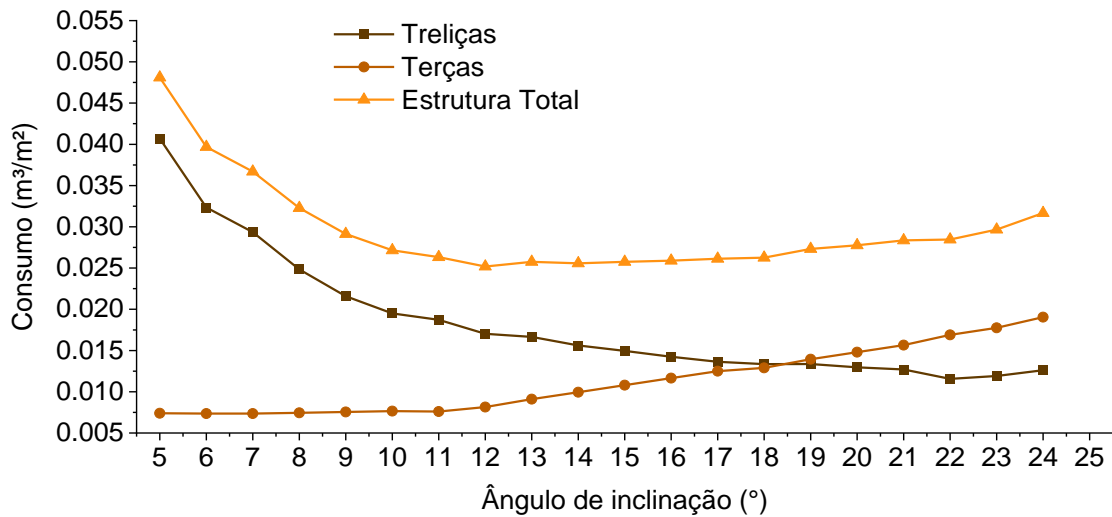
(c)

Fonte: Elaborado pela própria autora (2022).

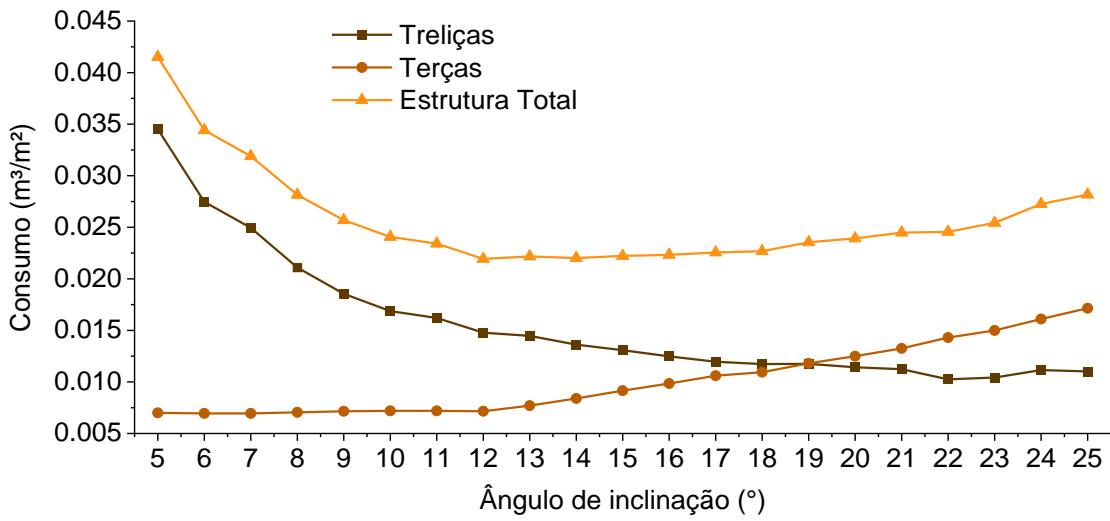
Figura 5.11 – Consumo de cada treliça tipo Howe de 12 metros para classe de umidade 2 e classe de resistência de: (a) D40; (b) D50; (c) D60;.



(a)



(b)



(c)

Fonte: Elaborado pela própria autora (2022).

Assim, constatou-se que, diferente da situação exposta para os vão de 6 metros, as linhas de consumo das terças e treliças se invertem em inclinações mais elevadas. Tanto para classe de umidade 1 como para classe de umidade 2, foi encontrada uma única inclinação ótima igual a 12°, independente da classe de resistência. De modo a facilitar a compreensão, é dada a Tabela 5.5.

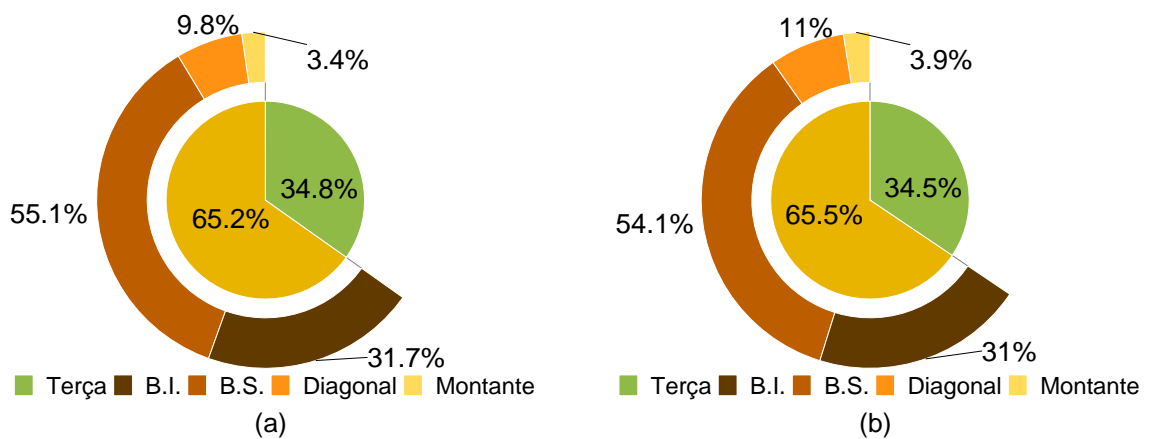
Tabela 5.5 – Inclinação ótima considerando a estrutura total de tipologia Howe de 12 metros

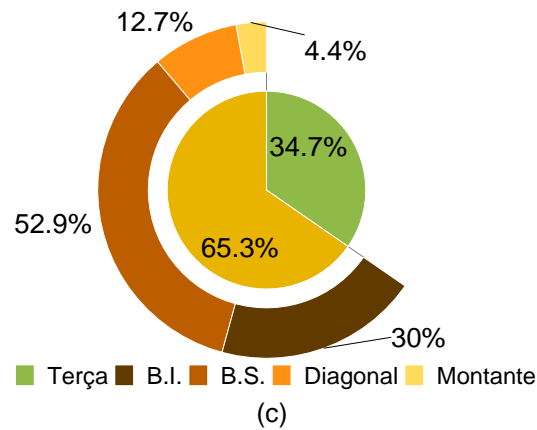
Classe de Resistência	D40		D50		D60	
Classe de umidade	1	2	1	2	1	2
Inclinação ótima (°)	12		12		12	

Fonte: Elaborado pela própria autora (2022).

A Figura 5.12 e Figura 5.13 indicam, para a inclinação de 12°, a porcentagem do volume das terças e dos componentes da treliça em relação ao volume total da estrutura (treliças + terças), sendo classe de umidade 1 e 2, respectivamente.

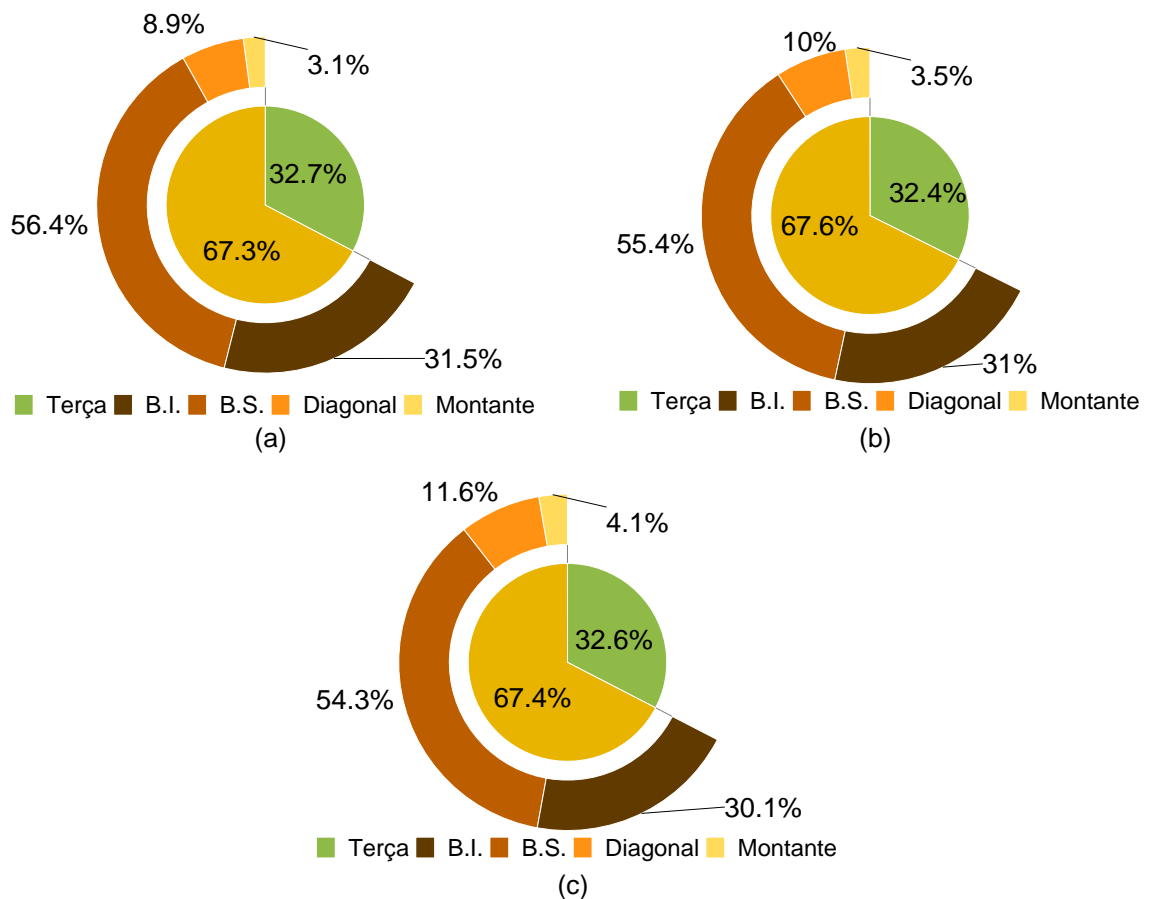
Figura 5.12 – Porcentagem do volume de cada elemento das treliças tipo Howe de 12 metros e terças para classe de umidade 1 e: (a) D40 – 12°; (b) D50 – 12°; (c) D60 – 12°





Fonte: Elaborado pela própria autora (2022).

Figura 5.13 – Porcentagem do volume de cada elemento das treliças tipo Howe de 12 metros e terças para classe de umidade 2 e: (a) D40 – 12°; (b) D50 – 12°; (c) D60 – 12°



Fonte: Elaborado pela própria autora (2022).

Para o vão de 12 metros, a predominância passou a ser do volume das treliças, tendo as terças apenas uma porcentagem de volume de 32% a 35%. Porém, entre os elementos da treliça permaneceu a predominância do banzo superior, variando em uma faixa de 52% a 57% do volume total de treliças.

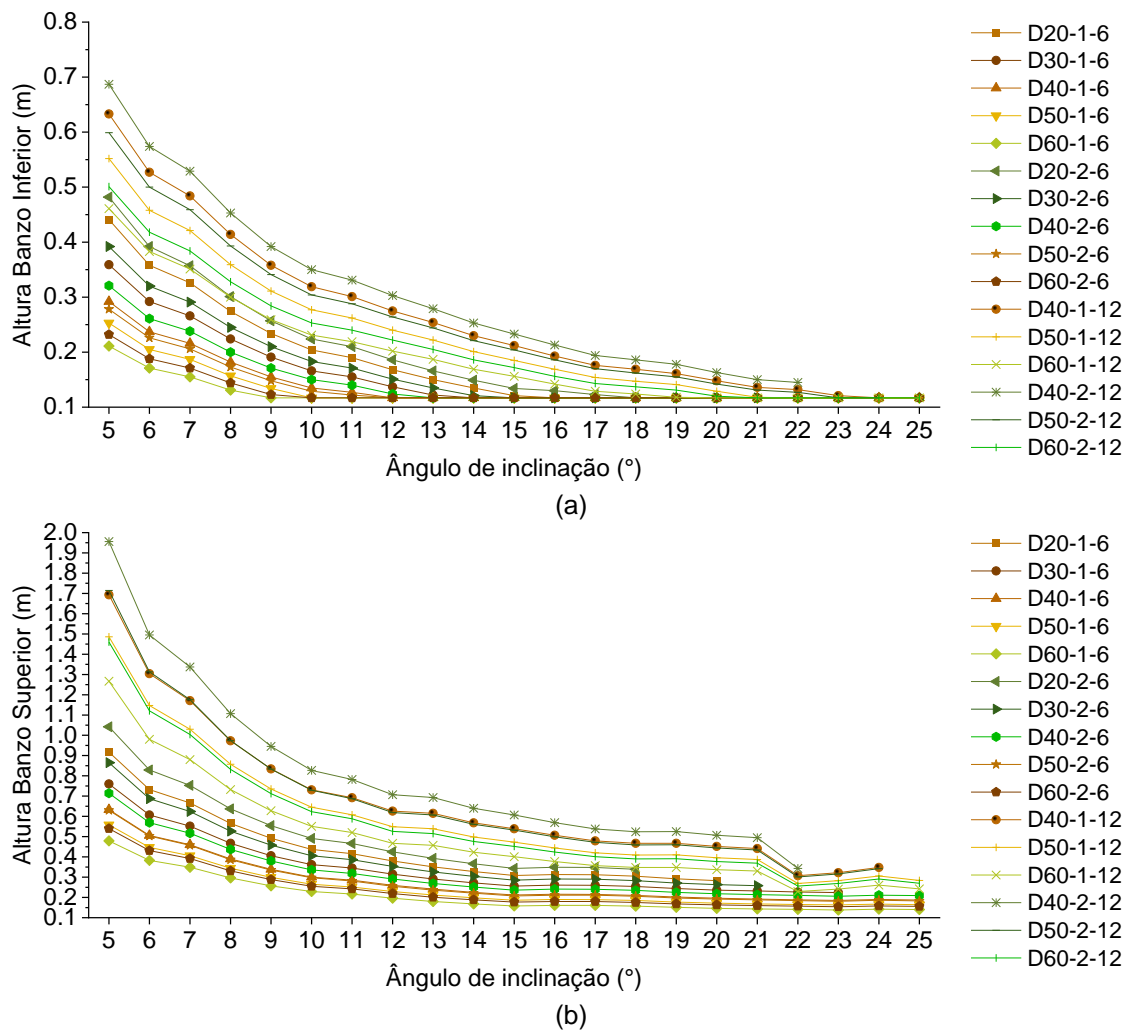
5.3 Tipologia Pratt

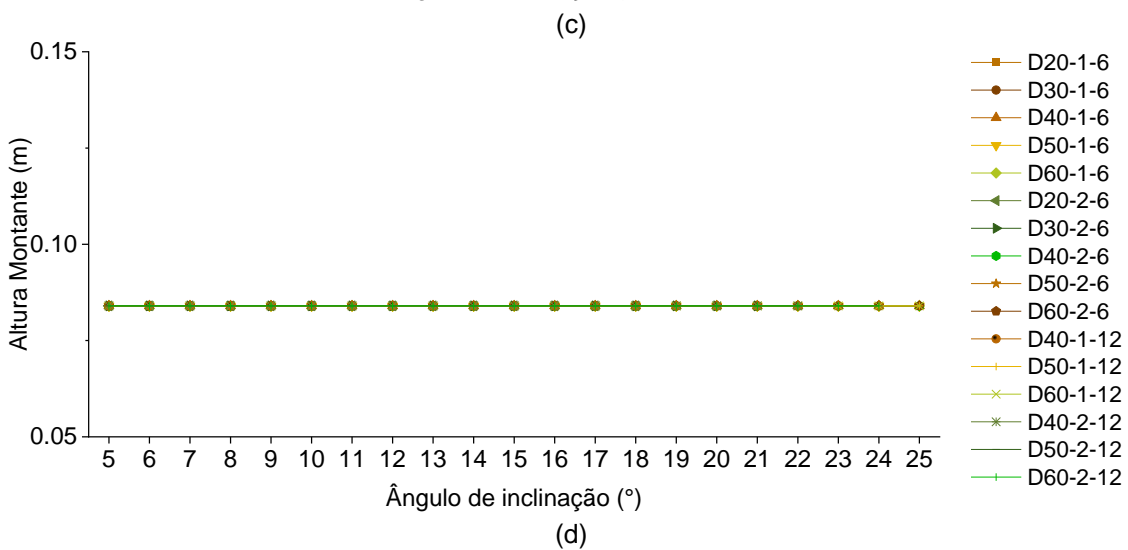
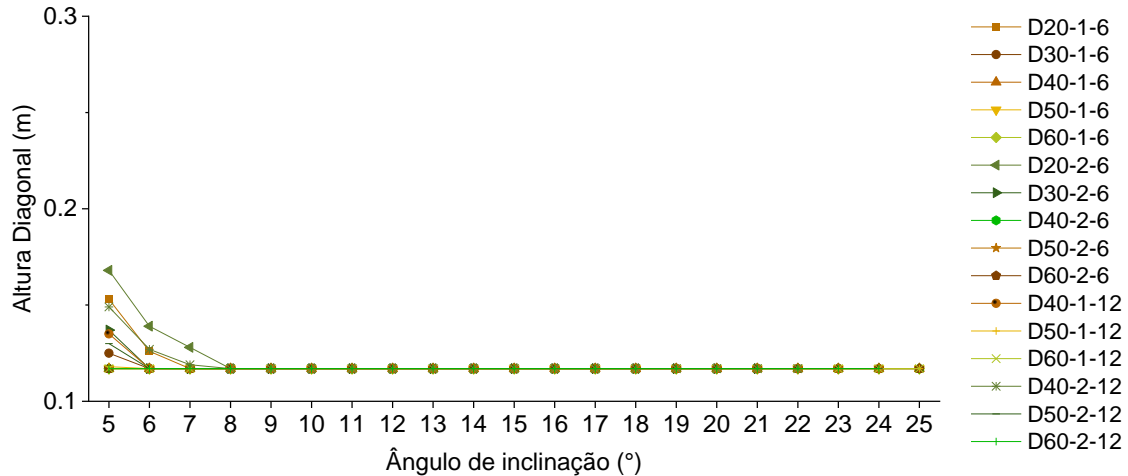
As mesmas análises realizadas para tipologia *Howe* foram feitas para a tipologia *Pratt* e são apresentadas nessa seção. Logo, aqui também se dividiu as análises considerando uma única treliça (seção 5.3.1) e a estrutura completa (seção 5.3.2).

5.3.1 TRELIÇA

A Figura 5.14 indica a altura de cada grupo de barras para treliças de tipologia *Pratt* em função da inclinação.

Figura 5.14 – Alturas dos grupos de barras para treliças tipo Pratt: (a) Banzo Inferior; (b) Banzo superior; (c) Diagonal; (d) Montante





Nota: Classe de Resistência – Classe de umidade – Vão.

Fonte: Elaborado pela própria autora (2022).

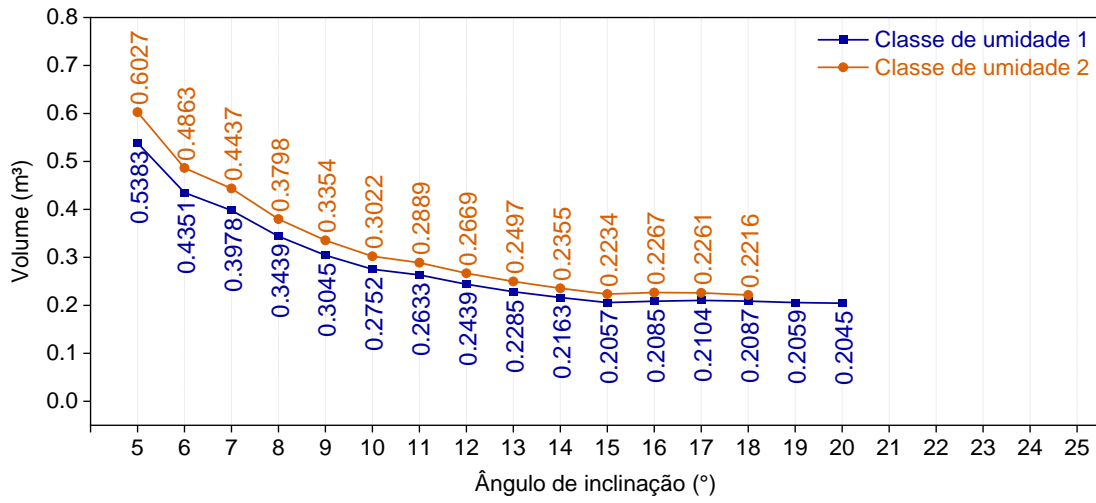
A Figura 5.14a e 5.14b, indicam, respectivamente, que as alturas do banzo inferior e do banzo superior tiveram comportamento decrescente, ou seja, a altura diminuiu com o aumento da inclinação. As alturas das diagonais (Figura 5.14c) demonstraram um comportamento semelhante apenas nas inclinações mais baixas analisadas (5°- 8°), encontrando-se uma altura constante para as demais inclinações. Essa altura constante foi a mínima para obter-se a área mínima prevista na normativa brasileira. Por fim, na Figura 5.14d, nota-se que para os montantes a altura foi mínima e constante para todas as inclinações analisadas.

Os volumes de uma única treliça de tipologia *Pratt* são analisados a seguir.

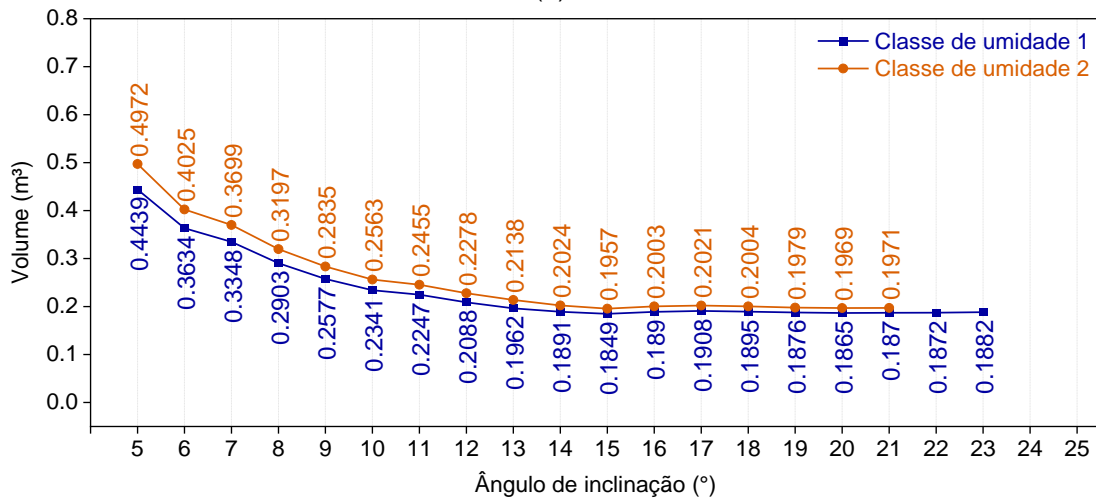
5.3.1.1 VÃO DE 6 METROS

Para o vão de 6m, foi avaliado o volume de uma única treliça *Pratt* que compõe a estrutura, sendo os valores plotados em função da inclinação na Figura 5.15.

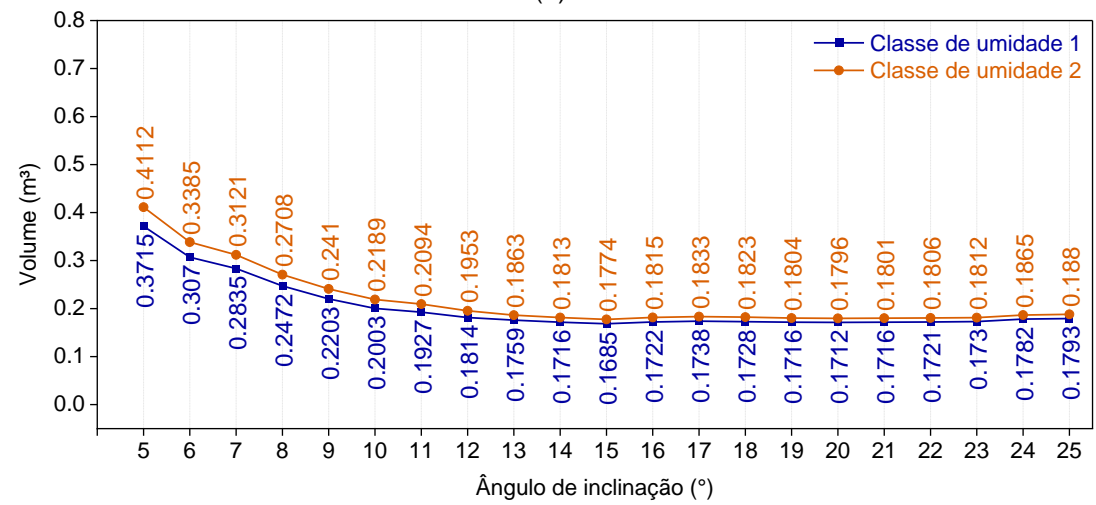
Figura 5.15 – Volume de cada treliça tipo Pratt de 6 metros para classe de resistência de: (a) D20; (b) D30; (c) D40; (d) D50; (e) D60.



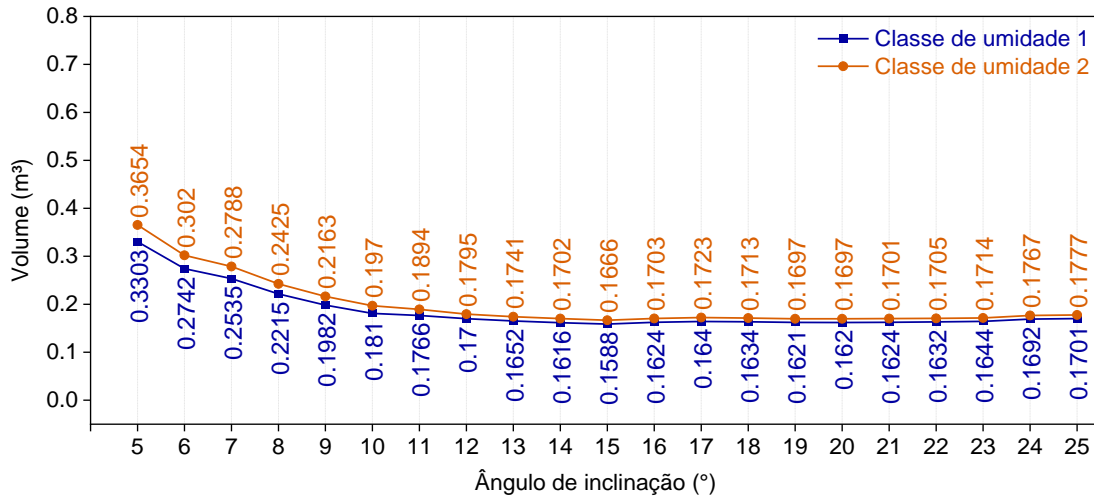
(a)



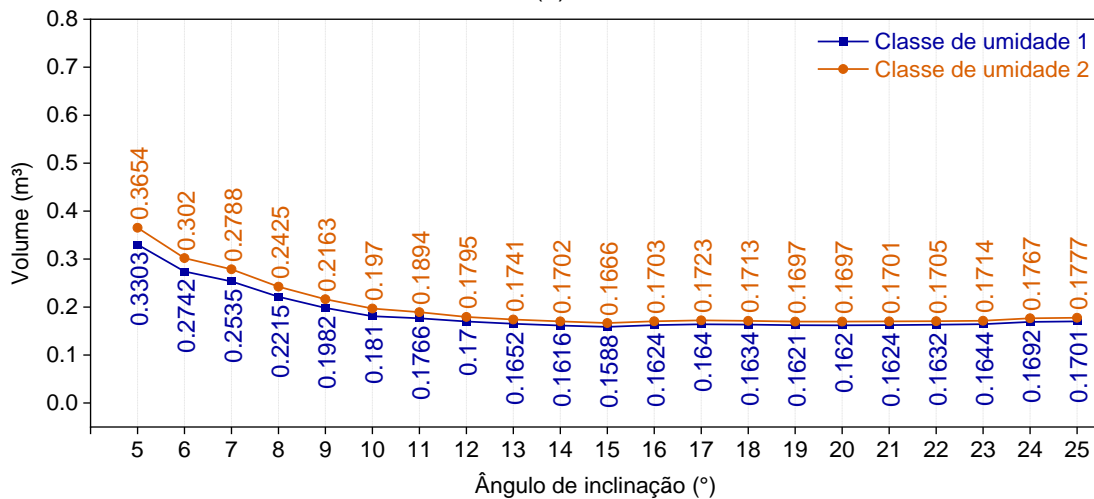
(b)



(c)



(d)



(e)

Fonte: Elaborado pela própria autora (2022).

Para algumas das inclinações finais da faixa de inclinação analisada não foram encontrados resultados, como detalhado no início da seção 5.

Foram encontradas inclinações ótimas diferentes apenas para classe de resistência D20, cujo valor foi de 20° e 18° para a classe de umidade 1 e 2, respectivamente. Para as demais classes de resistência, a inclinação ótima encontrada foi de 15°, independente da classe de umidade. Essas informações são expostas claramente na Tabela 5.6.

Tabela 5.6 – Inclinação ótima considerando apenas treliças de tipologia Pratt de 6 metros

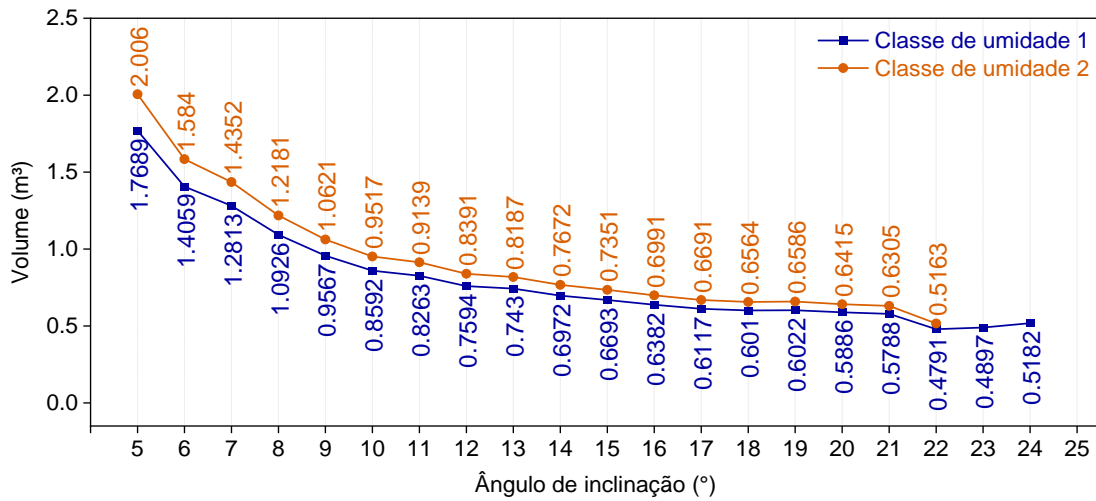
Classe de Resistência	D20		D30		D40		D50		D60	
Classe de umidade	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Inclinação ótima (°)	20	18	15		15		15		15	

Fonte: Elaborado pela própria autora (2022).

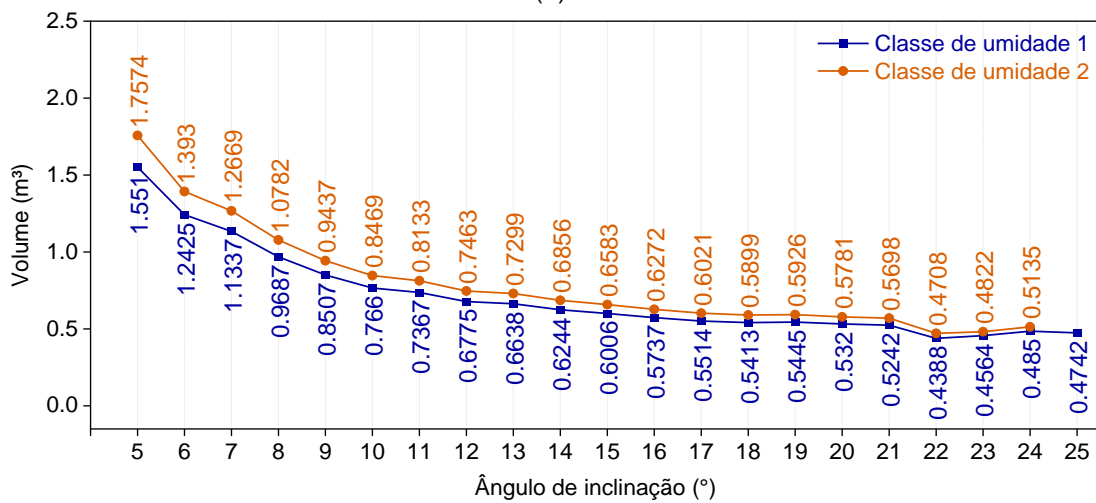
5.3.1.2 VÃO DE 12 METROS

Para o vão de 12 metros de treliças com tipologia *Pratt*, também foram analisados os volumes considerando apenas uma treliça presente na estrutura. Esses valores são apresentados na Figura 5.16.

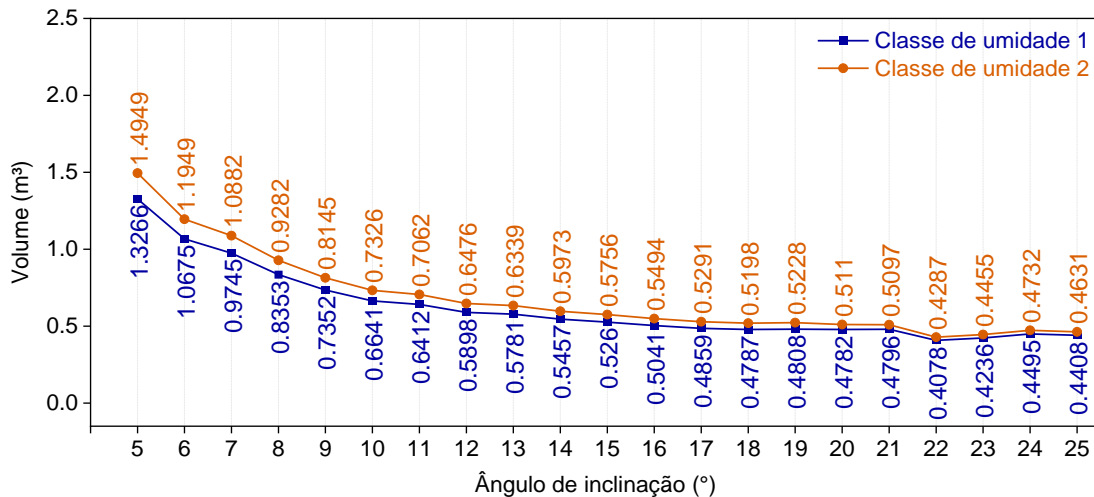
Figura 5.16 – Volume de cada treliça tipo *Pratt* de 12 metros para classe de resistência de: (a) D40; (b) D50; (c) D60.



(a)



(b)



(c)

Fonte: Elaborado pela própria autora (2022).

Também não foi possível obter os resultados em algumas simulações nas classes D40 e D50, considerando o vão de 12 metros (conforme Tabela 5.1). No entanto, foi encontrado um mesmo valor de inclinação ótima (22°) para todas as classes de resistência, independente da classe de umidade analisada, conforme apresentado na Tabela 5.7.

Tabela 5.7 – Inclinação ótima considerando apenas treliças de tipologia Pratt de 12 metros

Classe de Resistência	D40		D50		D60	
Classe de umidade	1	2	1	2	1	2
Inclinação ótima (°)	22		22		22	

Fonte: Elaborado pela própria autora (2022).

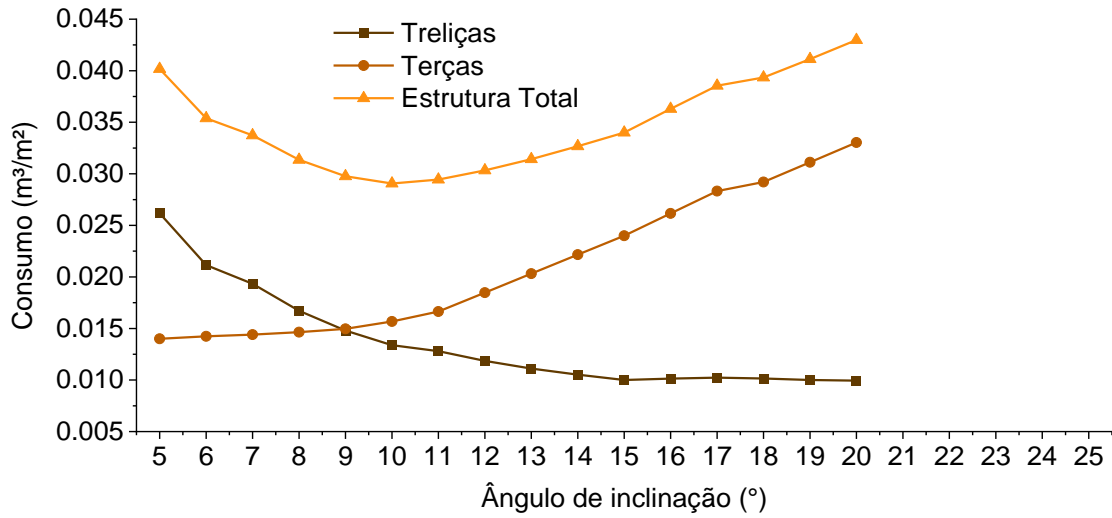
5.3.2 ESTRUTURA COMPLETA: TRELIÇAS + TERÇAS

Assim como feito para a tipologia Howe na seção 5.2.2, o consumo da madeira também foi analisado optando-se por considerar tanto a estrutura completa (treliças + terças), quanto o comportamento de cada uma delas individualmente, sendo essa seção subdividida em análises para o vão de 6 metros (seção 5.3.2.1) e 12 metros (seção 5.3.2.2).

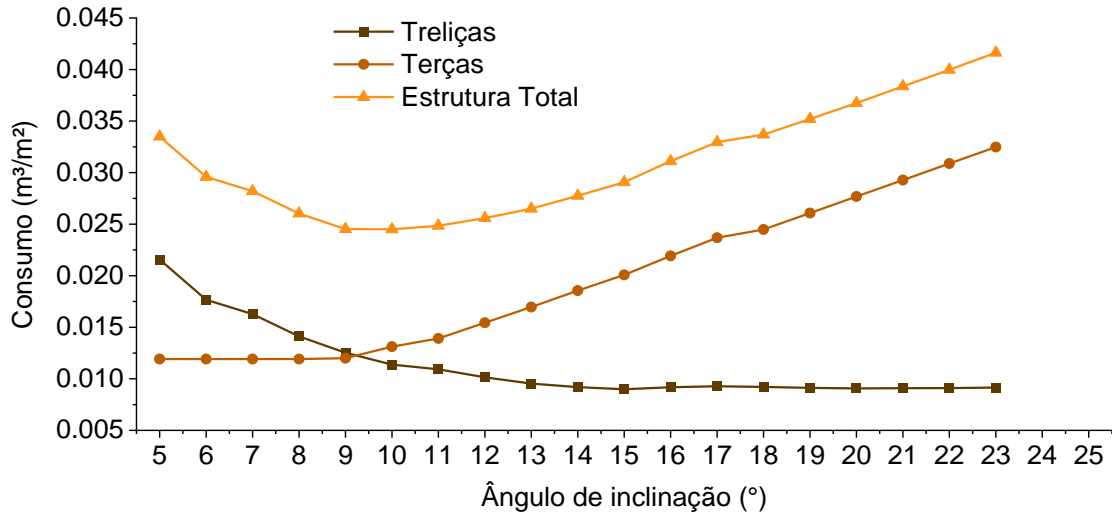
5.3.2.1 VÃO DE 6 METROS

Considerando um vão de 6 metros, para classe de umidade 1, a Figura 5.17 apresenta o consumo considerando três situações: apenas as treliças, apenas as terças e a estrutura total, ou seja, as duas primeiras somadas. O mesmo foi feito para a classe de umidade 2 na Figura 5.18.

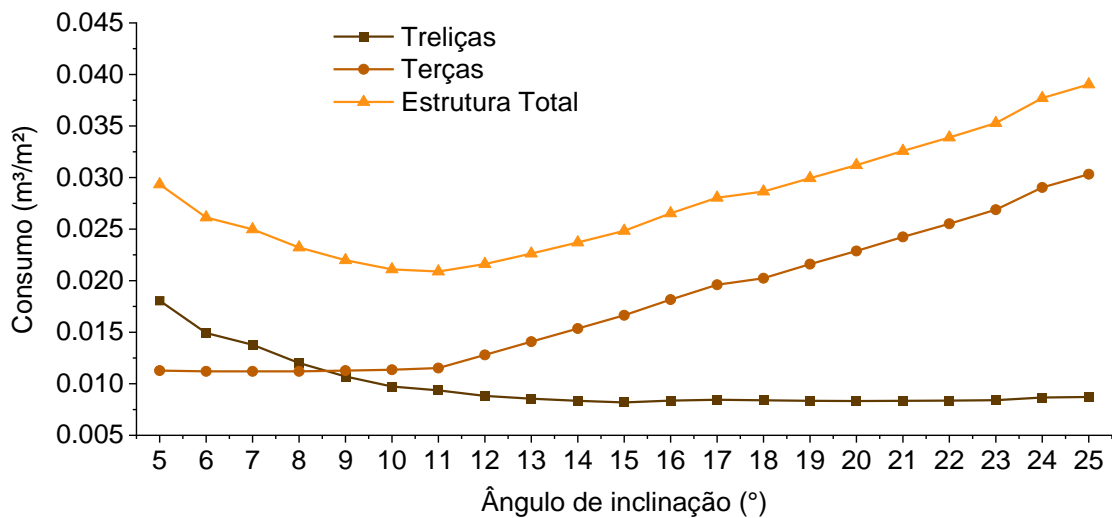
Figura 5.17 – Consumo considerando treliças tipo Pratt de 6 metros para classe de umidade 1 e classe de resistência de: (a) D20; (b) D30; (c) D40; (d) D50; (e) D60.



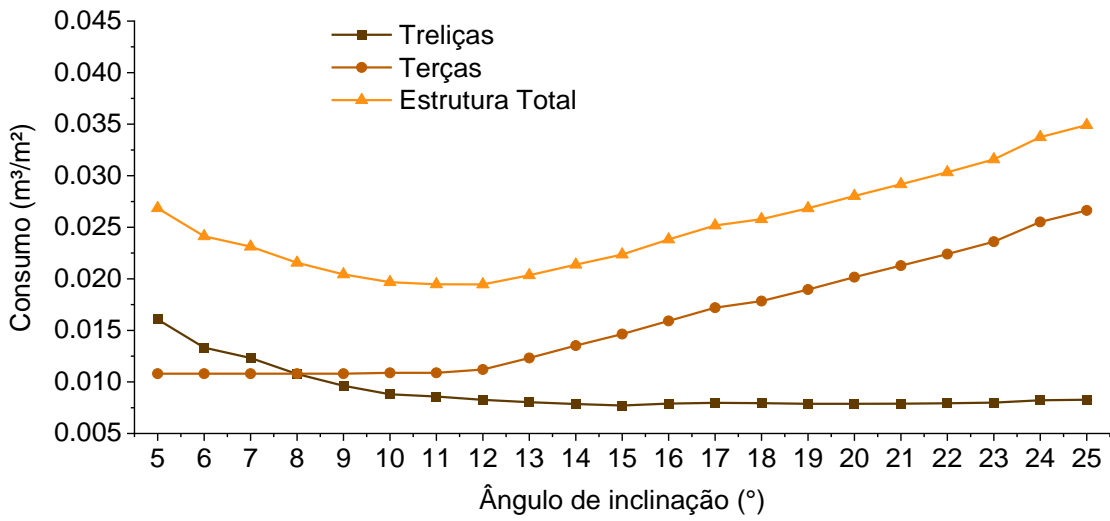
(a)



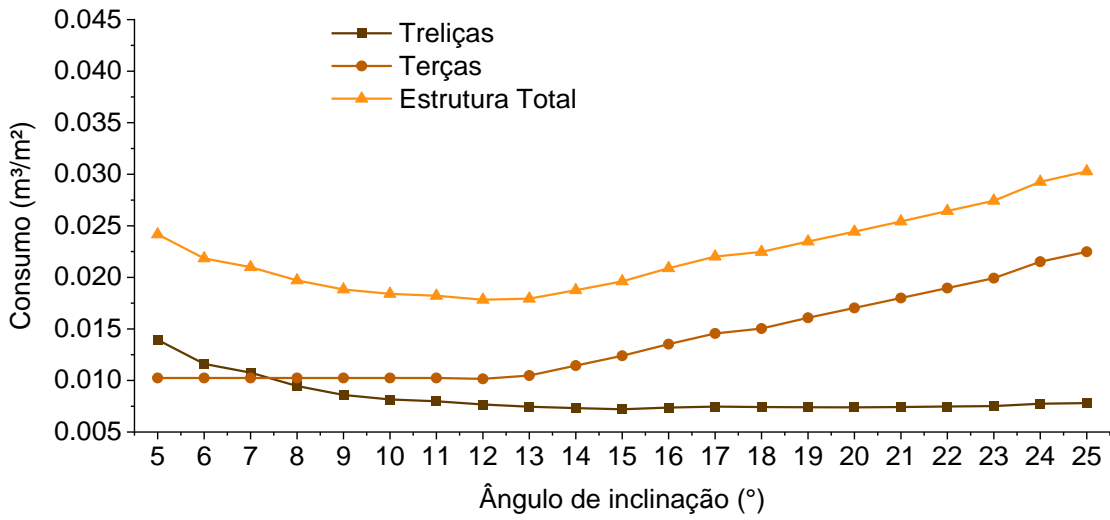
(b)



(c)



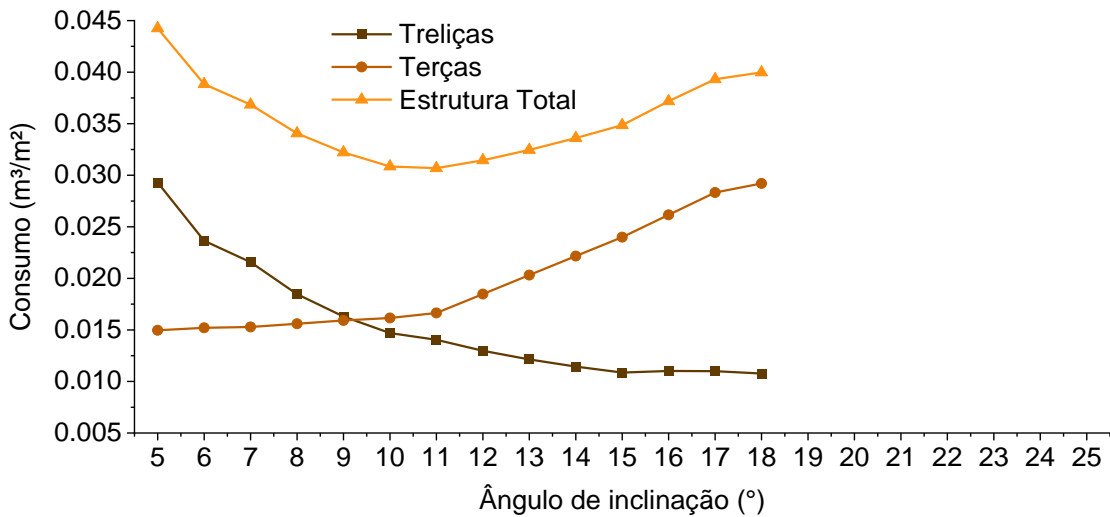
(d)



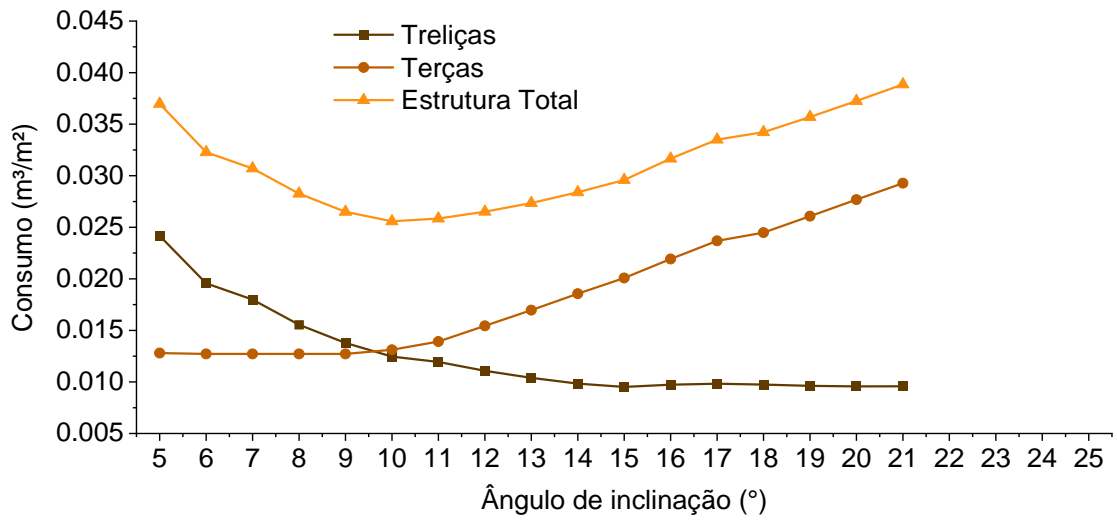
(e)

Fonte: Elaborado pela própria autora (2022).

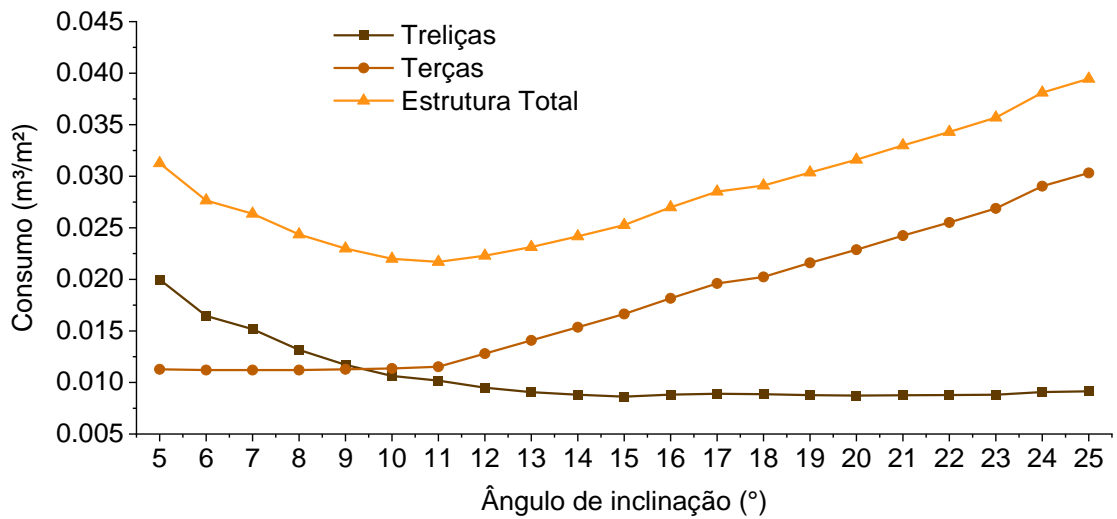
Figura 5.18 – Consumo considerando treliças tipo Pratt de 6 metros para classe de umidade 2 e classe de resistência de: (a) D20; (b) D30; (c) D40; (d) D50; (e) D60.



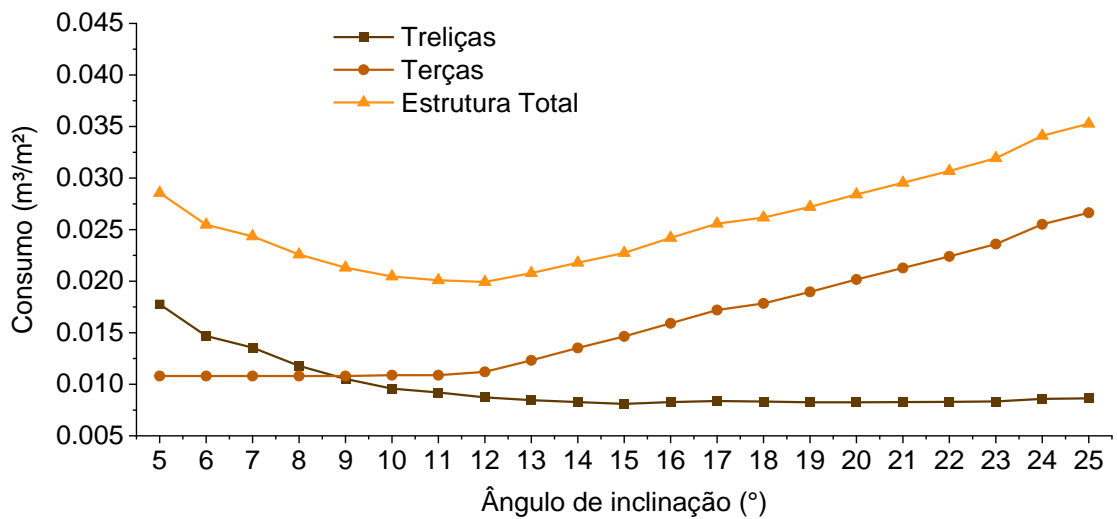
(a)



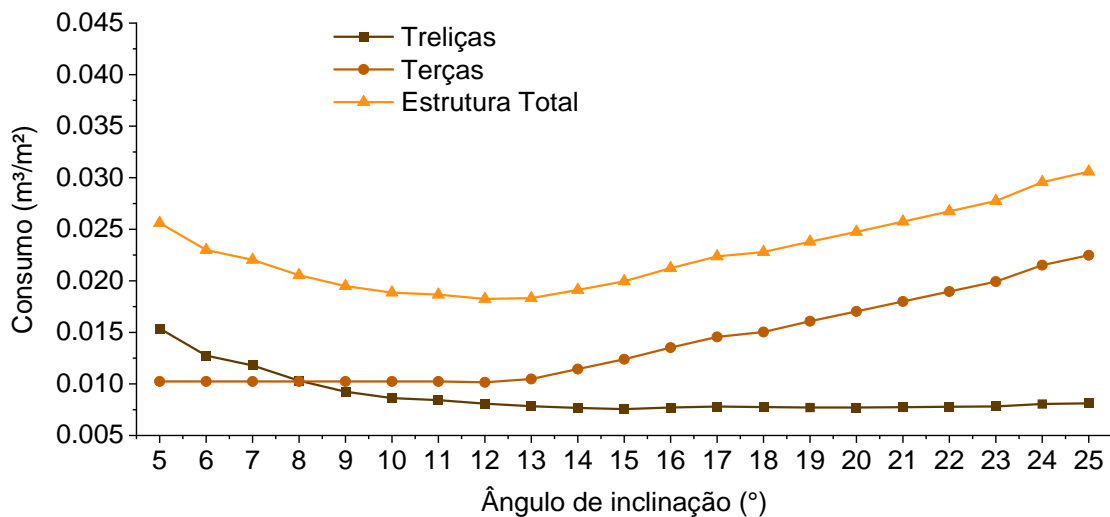
(b)



(c)



(d)



(e)

Fonte: Elaborado pela própria autora (2022).

Para o vão de 6 metros de tipologia *Pratt* tanto para a classe de umidade 1 quanto para classe de umidade 2, a intersecção das linhas das treliças e terças ocorreu próximo ao limite inferior da variação da inclinação (7°-10). Considerando a estrutura completa (ou total), foram obtidas as inclinações ótimas dadas na Tabela 5.8 para cada situação. Observa-se que há uma divergência de inclinação ótima em relação a classe de umidade apenas para classe de resistência D20.

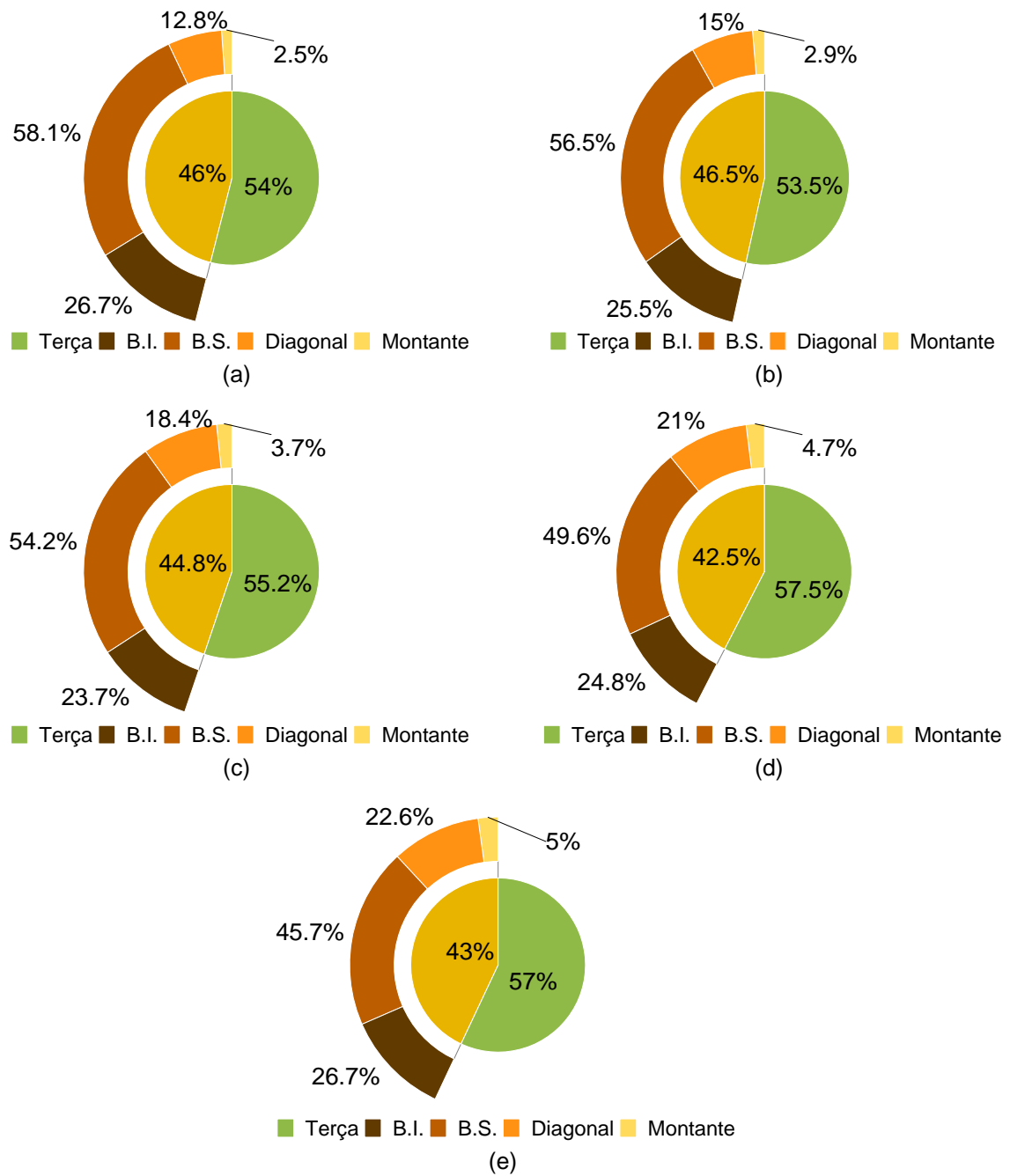
Tabela 5.8 – Inclinação ótima considerando a estrutura total de tipologia *Pratt* de 6 metros

Classe de Resistência	D20		D30		D40		D50		D60	
Classe de umidade	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Inclinação ótima (°)	10	11	10		11		12		12	

Fonte: Elaborado pela própria autora (2022).

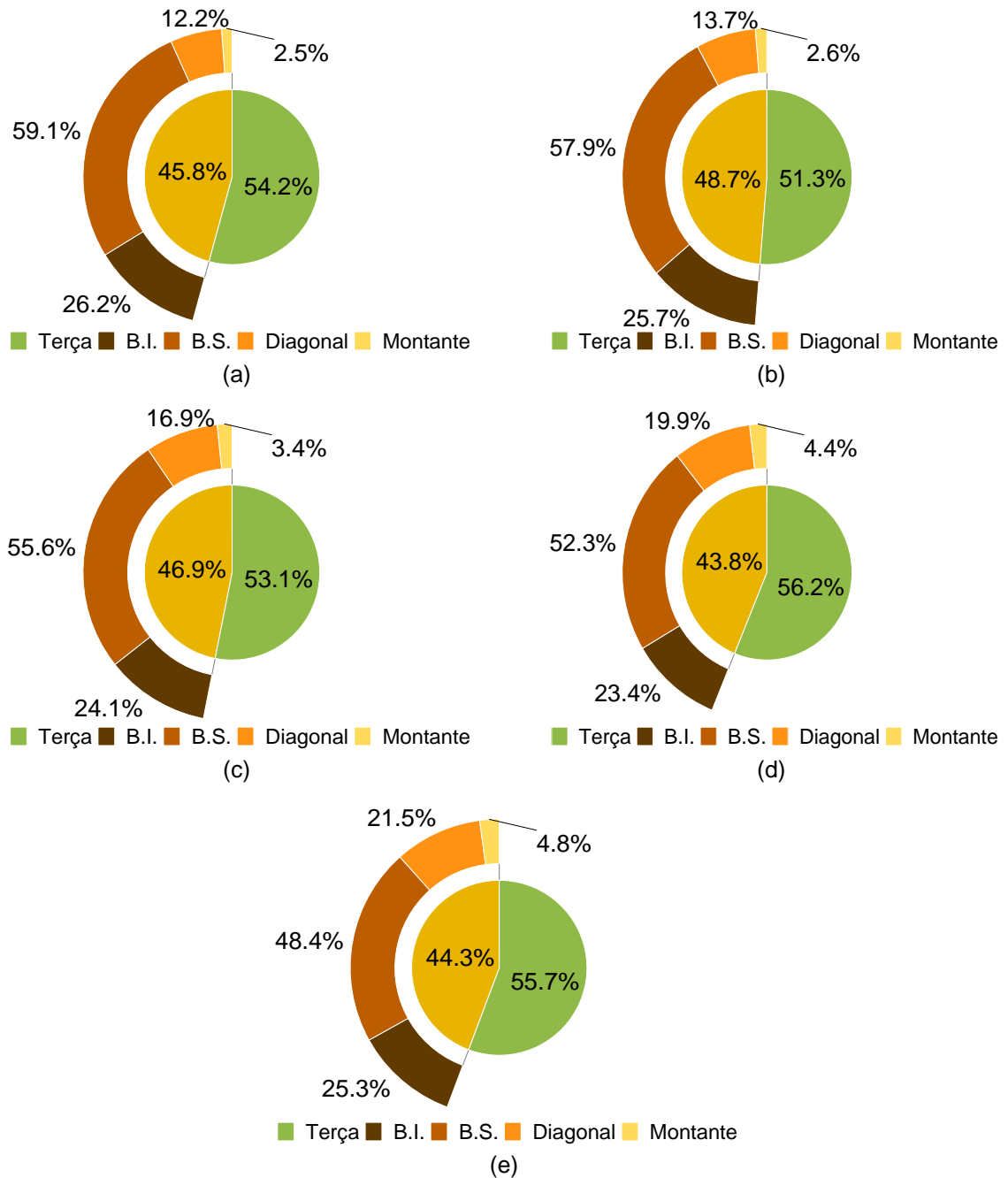
Para cada classe de umidade e levando em consideração as inclinações ótimas apresentadas na Tabela 5.8, foram calculadas as porcentagens de volumes das terças e de cada elemento de barra da treliça de tipologia *Pratt*. Para a classe de umidade 1, tem-se a Figura 5.19 e, para a classe de umidade 2, a Figura 5.20.

Figura 5.19 – Porcentagem do volume de cada elemento das treliças tipo Pratt de 6 metros e terças para classe de umidade 1 e: (a) D20 – 10°; (b) D30 – 10°; (c) D40 – 11°; (d) D50 – 12°; (e) D60 – 12°.



Fonte: Elaborado pela própria autora (2022).

Figura 5.20 – Porcentagem do volume de cada elemento das treliças tipo Pratt de 6 metros e terças para classe de umidade 2 e: (a) D20 – 11°; (b) D30 – 10°; (c) D40 – 11°; (d) D50 – 12°; (e) D60 – 12°.



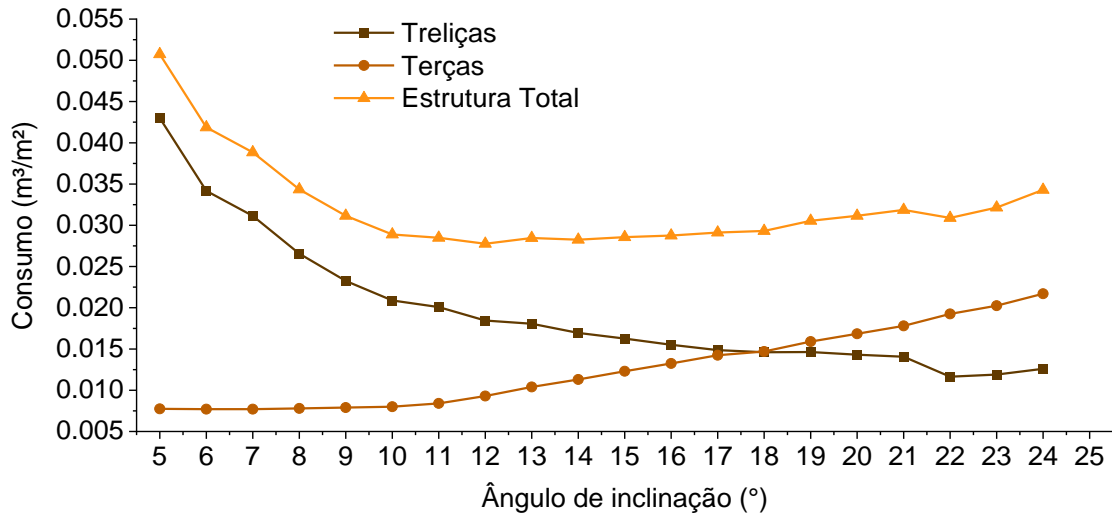
Fonte: Elaborado pela própria autora (2022).

Em suma, independente da situação analisada, o volume de terças correspondeu a uma faixa de 51% a 58% do volume total de madeira empregado na estrutura completa. Agora o grupo de barras da treliça que apresentou maior porcentagem de volume foi o banzo superior (B.S.), dentro de uma faixa de 45% a 59% do volume de madeira total das treliças da estrutura.

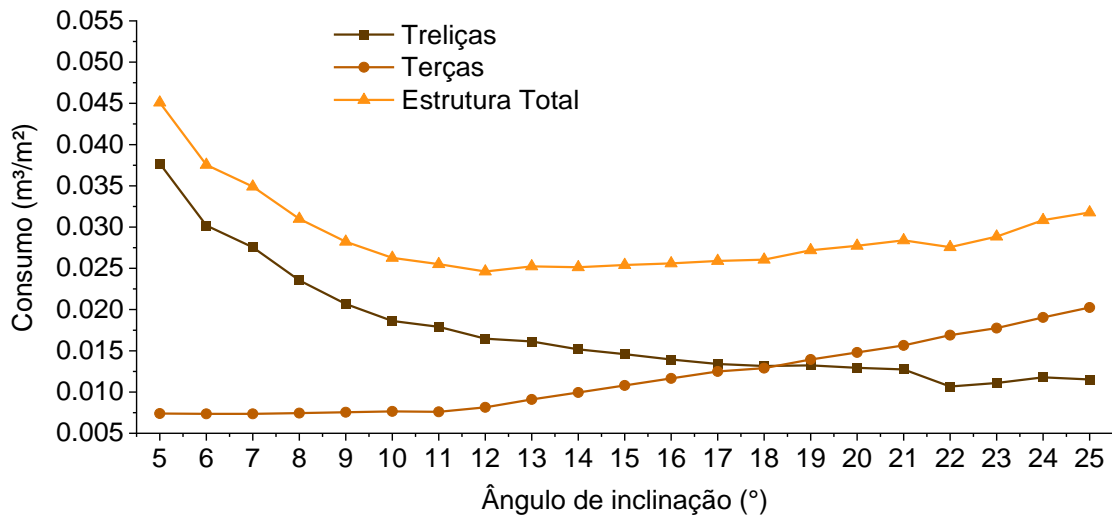
5.3.2.2 VÃO DE 12 METROS

O consumo considerando tipologia *Pratt* de 12 metros é apresentado na Figura 5.21 para classe de umidade 1 e na Figura 5.22 para classe de umidade 2.

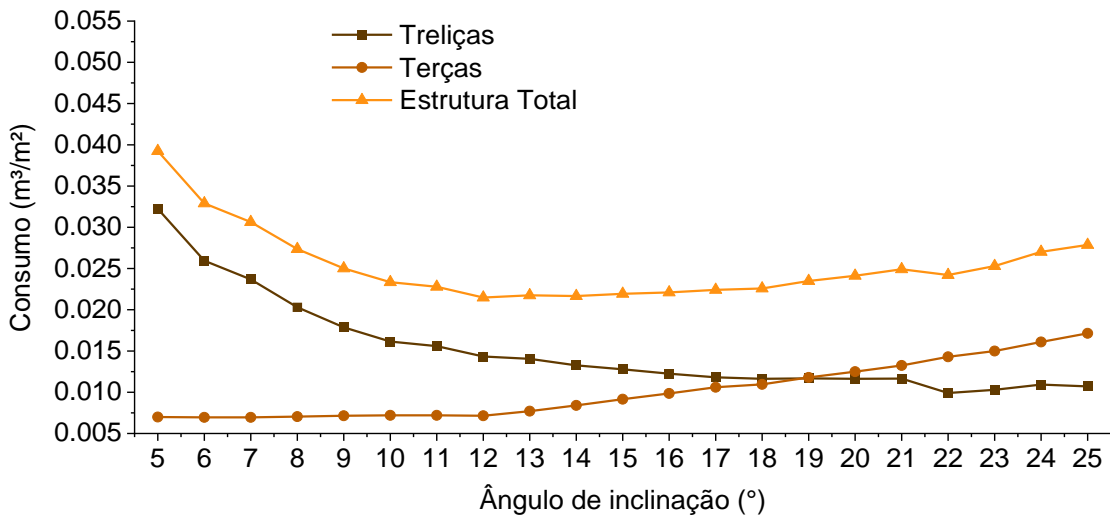
Figura 5.21 – Consumo considerando treliças tipo *Pratt* de 12 metros para classe de umidade 1 e classe de resistência de: (a) D40; (b) D50; (c) D60;



(a)



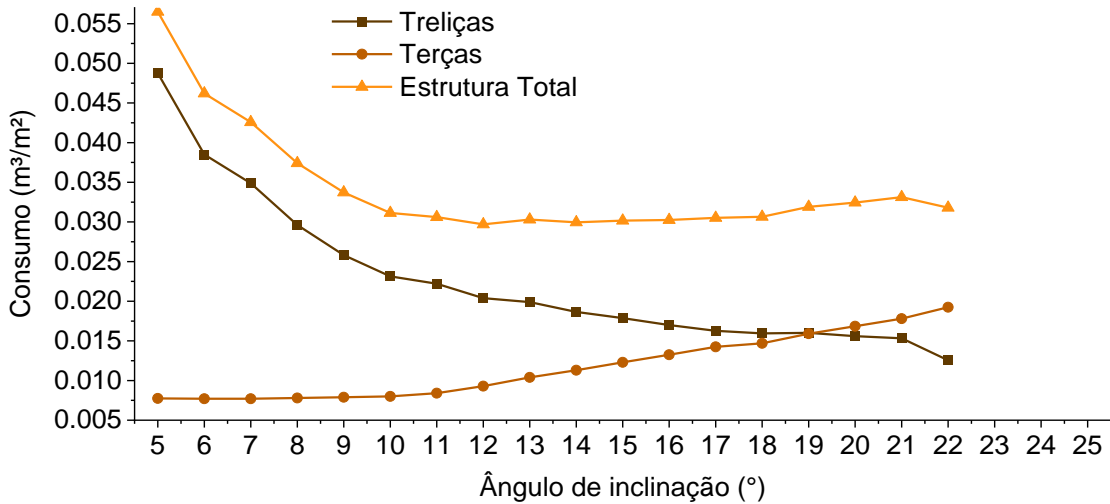
(b)



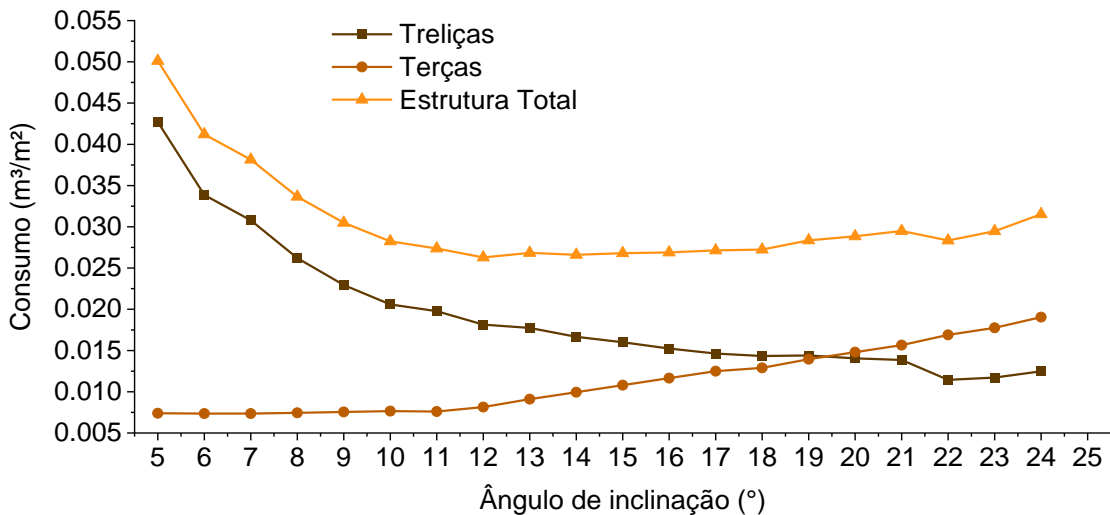
(c)

Fonte: Elaborado pela própria autora (2022).

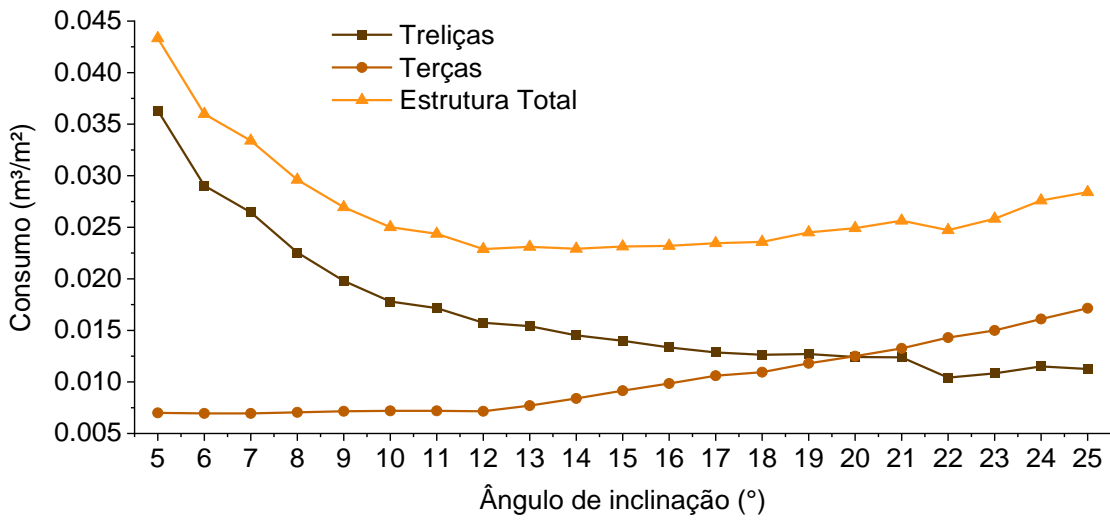
Figura 5.22 – Consumo considerando treliças tipo Pratt de 12 metros para classe de umidade 2 e classe de resistência de: (a) D40; (b) D50; (c) D60;.



(a)



(b)



(c)

Fonte: Elaborado pela própria autora (2022).

Na Tabela 5.9 são apresentadas as inclinações ótimas para cada classe de resistência e de umidade. Observa-se independente da classe de resistência e umidade em questão, foi encontrada a inclinação ótima de 12°.

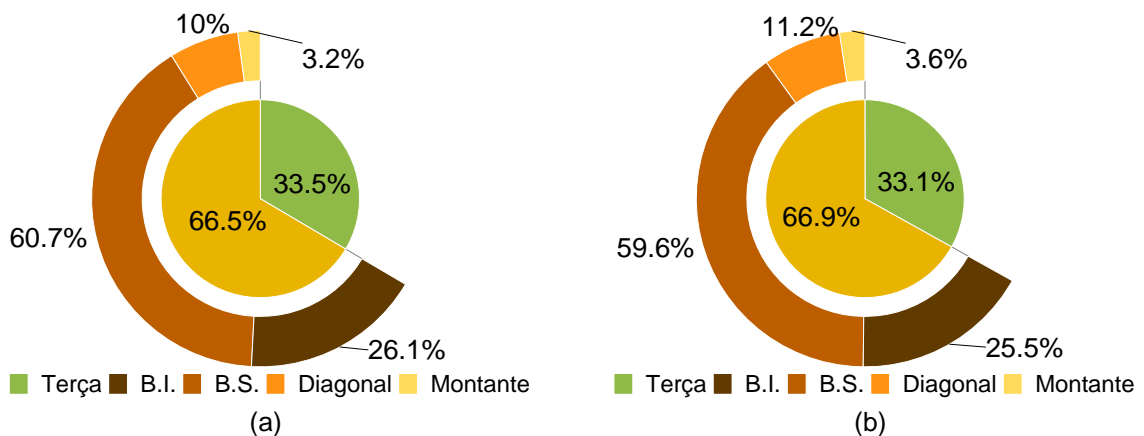
Tabela 5.9 – Inclinação ótima considerando a estrutura total de tipologia Pratt de 12 metros

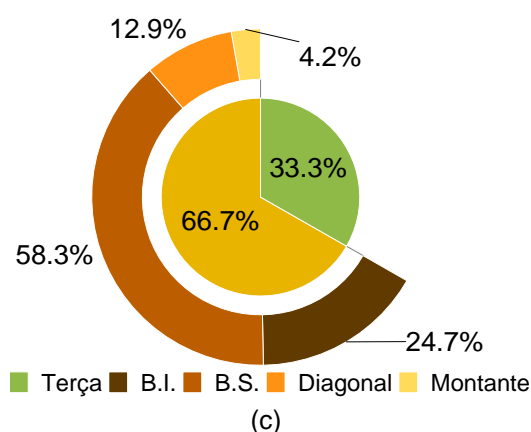
Classe de Resistência	D40		D50		D60	
Classe de umidade	1	2	1	2	1	2
Inclinação ótima (°)	12		12		12	

Fonte: Elaborado pela própria autora (2022).

Considerando a inclinação de 12°, são apresentadas as porcentagens do volume de cada grupo de barras da treliça e também das terças na Figura 5.23 e Figura 5.24, respectivamente, para classe de umidade 1 e 2.

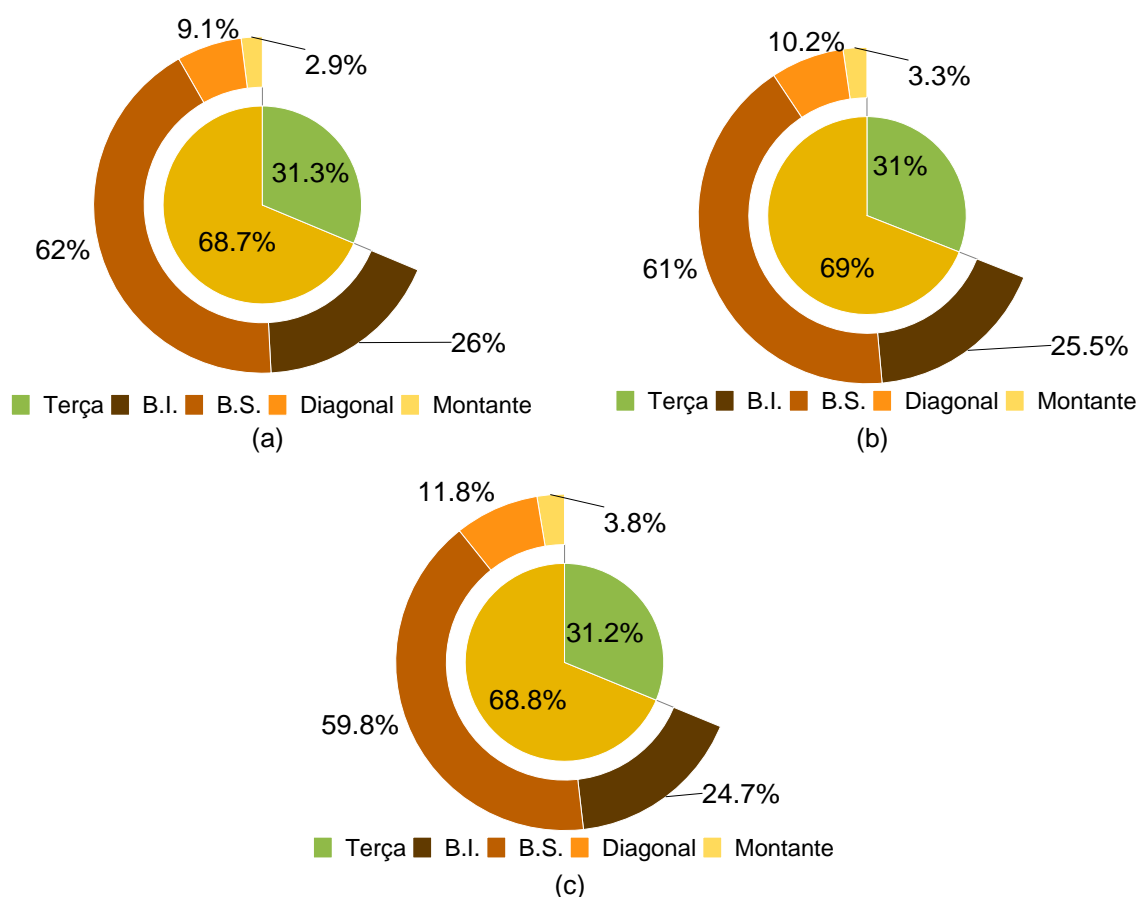
Figura 5.23 – Porcentagem do volume de cada elemento das treliças tipo Pratt de 12 metros e terças para classe de umidade 1 e: (a) D40 – 12°; (b) D50 – 12°





Fonte: Elaborado pela própria autora (2022).

Figura 5.24 – Porcentagem do volume de cada elemento das treliças tipo Pratt de 12 metros e terças para classe de umidade 2 e: (a) D40 – 16°; (b) D50 – 16°; (c) D60 – 16°



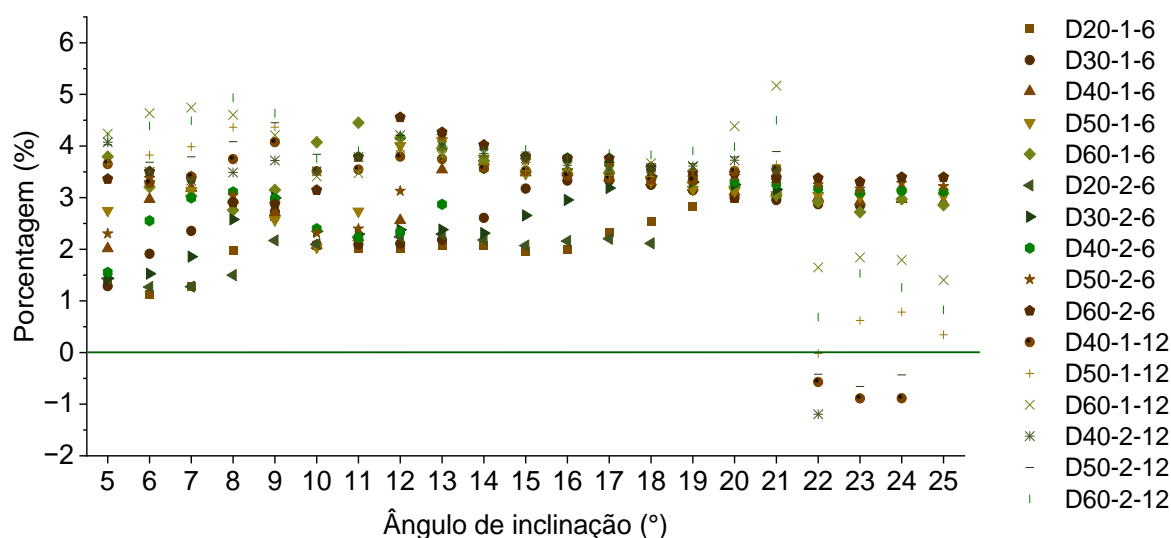
Fonte: Elaborado pela própria autora (2022).

Ainda que para o vão de 12 metros, permaneceu sendo a maior porcentagem aquela equivalente ao volume do banzo superior (em torno de 58% - 62% do volume total da treliça), quando considerado o volume total da estrutura, foi o volume total de madeira empregado nas treliças que prevaleceu, em uma faixa de 66% a 69%.

5.4 Comparação entre as tipologias

Foram comparadas o consumo das duas tipologias para cada situação analisada e encontrou-se as porcentagens de economia da tipologia *Howe* em relação a tipologia *Pratt*, dadas na Figura 5.25. Os valores positivos (>0) indicam que a *Howe* é mais econômica que a *Pratt* e os valores negativos (<0) indicam o inverso.

Figura 5.25 – Porcentagem de economia da treliça *Howe* em relação a *Pratt* para as 313 simulações realizadas.



Nota: Classe de Resistência – Classe de umidade – Vão.

(+) *Howe* mais econômica que *Pratt*, (-) *Howe* menos econômica que *Pratt*

Fonte: Elaborado pela própria autora (2022).

Percebe-se na Figura 5.25 que na maioria das simulações realizadas para cada tipologia, a tipologia *Howe* demonstrou ser mais econômica que a tipologia *Pratt*, diferente do expresso em Ribeiro (2008). A média de economia da treliça *Howe* para *Pratt* foi de aproximadamente 3,03%, sendo o mínimo de economia de 0,35% e o máximo de 5,17%. A *Howe* se mostrou antieconômica apenas em 8 das 313 simulações analisadas, em uma faixa de 0,02%-1,20%.

Apesar do estudo de Ribeiro (2008) indicar que a tipologia *Pratt* apresenta valores de consumo menor que a tipologia *Howe*, é necessário destacar que em Ribeiro (2008) a situação que se assemelha a uma das abordadas neste trabalho é o modelo 2, que considera também o vão da treliça de 12 metros e a situação de $m=4$ (isto é, 4 módulos para meia treliça equivale a 7 montantes totais). Porém não é possível afirmar se possuem a mesma configuração de barras, ou seja, o mesmo comprimento de montantes e diagonais, ainda que ambos trabalhem com a tipologia *Howe* e *Pratt*. Assim, pode-se atribuir a esse fato essa divergência de qual tipologia seria mais econômica.

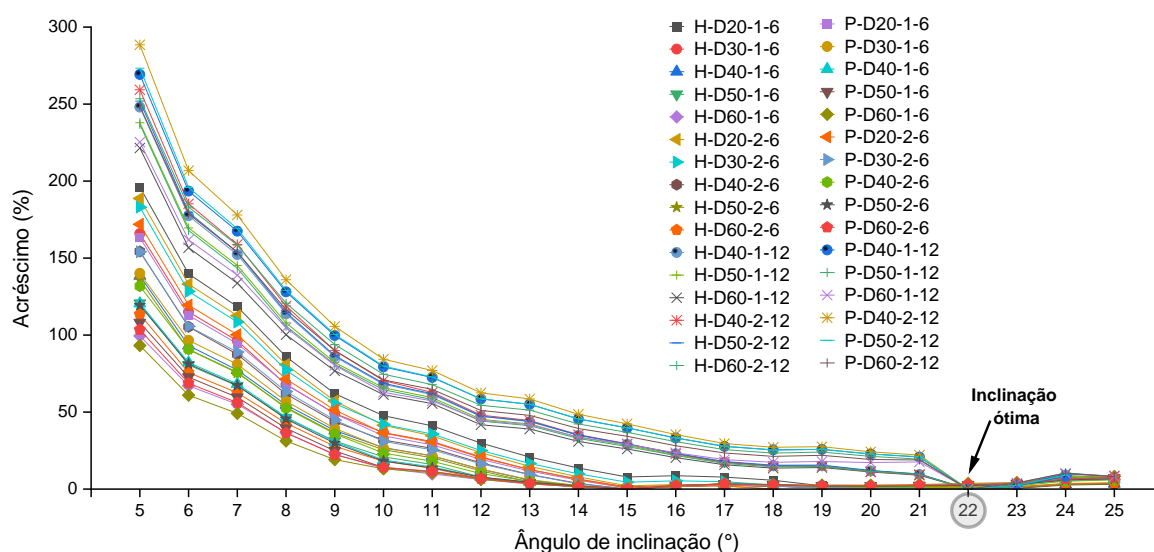
5.5 FAIXA DE INCLINAÇÃO ÓTIMA

Nessa seção são definidas as faixas de inclinação ótima e, para isso, foram realizadas análises considerando ou não as terças, respectivamente, seção 5.5.1 e seção 5.5.2.

5.5.1 ESTRUTURA EXCLUINDO AS TERÇAS

Pela Figura 5.26, é visível que apesar daquelas considerando 6 metros de vão terem um consumo mínimo em uma inclinação diferente, compensa-se adotar uma única inclinação para ambas as tipologias e todas as situações, com valor igual a 22°. Em razão de que se adotada uma faixa, considerando as situações para o vão de 12 metros, a uma inclinação inferior a 22° implicaria em um acréscimo de 20% do consumo mínimo possível. Para aquelas com 6 metros, cujo consumo mínimo foi dado na inclinação de 15°, 18° ou 20°, o acréscimo foi de até aproximadamente 4% para inclinação de 22°.

Figura 5.26 – Porcentagem do acréscimo do consumo em relação ao consumo mínimo para cada situação, excluindo as terças.



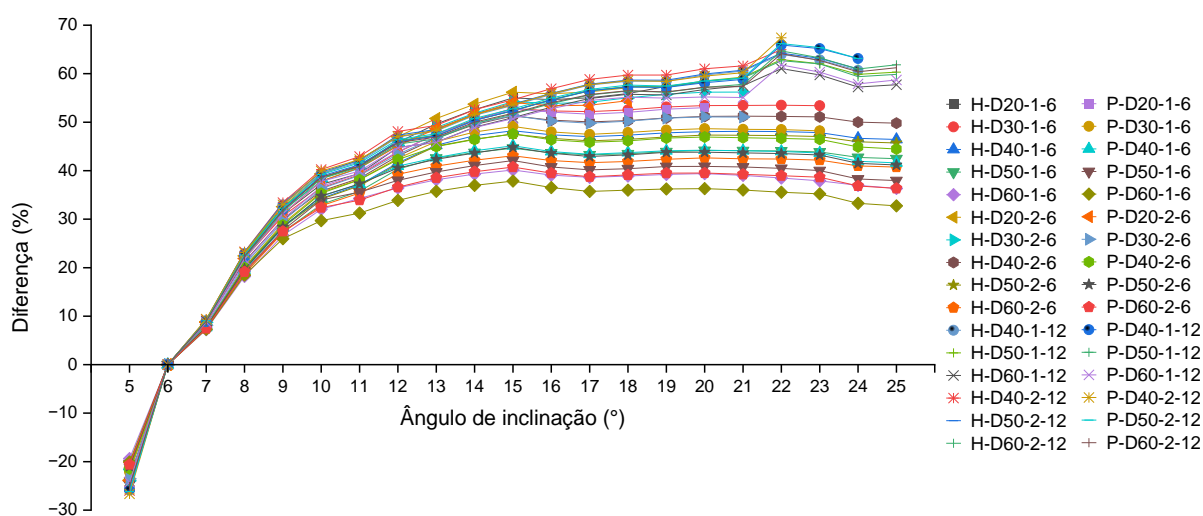
Nota: Tipologia -Classe de Resistência – Classe de umidade – Vão.

Fonte: Elaborado pela própria autora (2022).

Como apontado anteriormente, foi comprovado que a inclinação de 15° encontrada por Fraga *et al.* (2021), para o vão de 10 metros, pode não ser a inclinação ótima global se ampliada a faixa de inclinação analisada.

Comparando-se o volume obtido para a inclinação de 6° com as demais inclinações (Figura 5.27), considerando apenas o volume respectivos das treliças, foi constatado que qualquer inclinação maior que 6° é mais econômica, independente da tipologia, vão, classe de resistência e de umidade adotada. A porcentagem de economia encontrada varia de 7,20% a 67,40%, a depender da inclinação e situação analisada.

Figura 5.27 – Diferença percentual do consumo da inclinação de 6° para as demais inclinações para cada situação, excluindo terças.



Nota: Tipologia - Classe de Resistência – Classe de umidade – Vão.
(+) Redução; (-) Acréscimo

Fonte: Elaborado pela própria autora (2022).

5.5.2 ESTRUTURA INCLUINDO AS TERÇAS

Como as inclinações ótimas encontradas foram semelhantes tanto para a tipologia *Howe* como para tipologia *Pratt* e, como o objetivo deste trabalho foi definir uma faixa de inclinação ótima independente do vão, da classe de resistência e da classe de umidade, determinou-se uma faixa de inclinação ótima para ambas tipologias, dada na Tabela 5.10.

Tabela 5.10 – Faixa de inclinação ótima para estrutura incluindo as terças

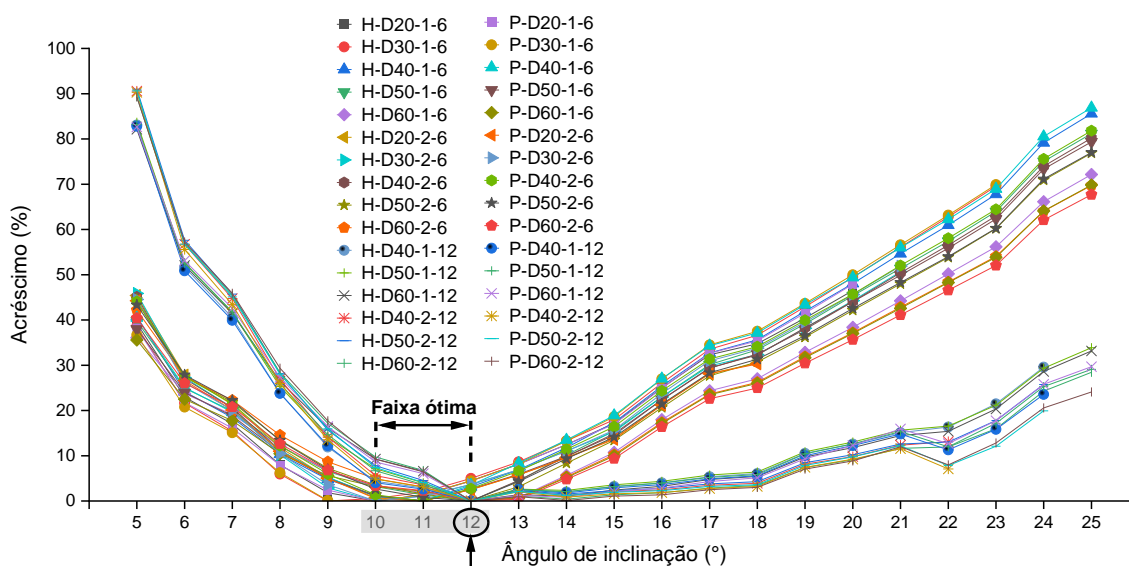
Inclinação ótima (°)	
Limite inferior	Limite superior
10	12

Fonte: Elaborado pela própria autora (2022).

Os limites foram determinados considerando inclinações cujo volume fosse até 10% maior que o volume mínimo de cada situação, como mostra a Figura 5.28. Apesar da inclinação ótima variar de 9° a 12°, para uma única situação foi encontrado o valor de 9° que acarreta para outras situações um acréscimo de até 20%, não compensando considerar tal inclinação para a faixa de inclinação ótima.

Assim como feito para a estrutura sem a consideração das terças, aqui também poderia ser determinada uma única inclinação ótima, visto que 12° foi o valor de inclinação ótima para 20 das 32 situações, nas outras 12 situações que apresentaram outros valores de inclinação ótima, o volume encontrado para 12° sofre apenas 5% de acréscimo em relação ao volume mínimo possível para cada situação.

Figura 5.28 – Porcentagem do acréscimo do consumo em relação ao consumo mínimo para cada situação, incluindo as terças.



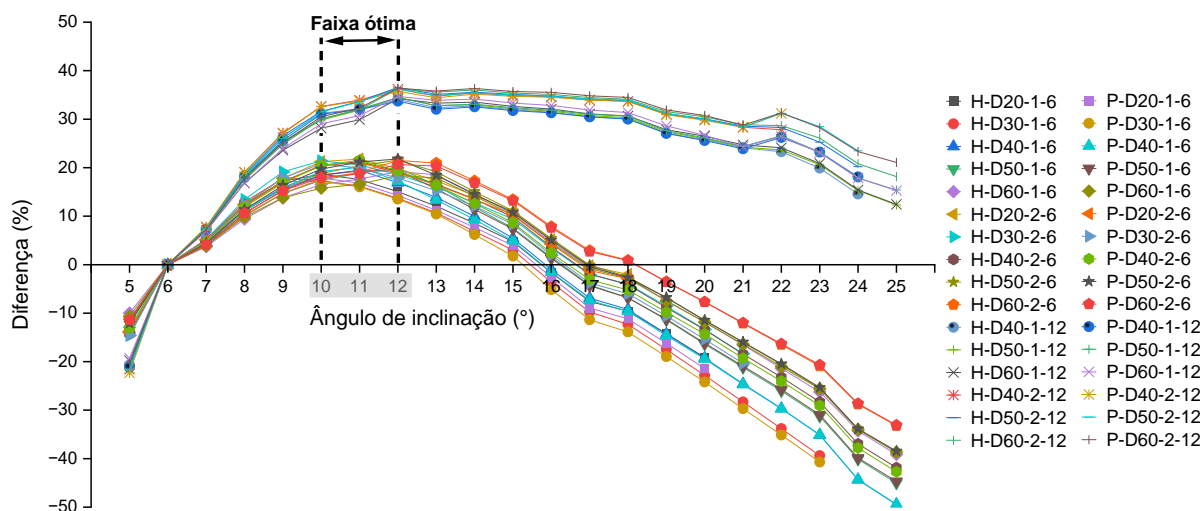
Nota: Tipologia -Classe de Resistência – Classe de umidade – Vão.

Fonte: Elaborado pela própria autora (2022).

Comparando os resultados obtidos com os encontrados por Ribeiro (2008), percebe-se certa coerência, visto que a situação de Ribeiro (2008) que mais se assemelha a uma das analisadas nesse trabalho (para o vão de 12 metros, a consideração da autora de 4 módulos equivale a consideração do presente trabalho de 7 montantes totais) encontrou inclinação ótima de 12° e 13° (Tabela 2.3) para *Howe* e *Pratt*, respectivamente.

Para a faixa de inclinação ótima definida na Tabela 5.10, conclui-se que considerando um vão de 6 metros, classe de umidade 1 ou 2 e qualquer classe de resistência ou considerando um vão de 12 metros, classe de umidade 1 ou 2 e classe de resistência D40, D50 ou D60, pode-se reduzir o volume total da estrutura de 13,50% a 36,40% de quando utilizado a inclinação 6° (Figura 5.29), comprovando que a inclinação de 6° não foi a mais econômica, como afirmado por alguns fabricantes de telha de fibrocimento.

Figura 5.29 – Diferença percentual do consumo da inclinação de 6° para as demais inclinações para cada situação, excluindo terças.



Nota: Tipologia - Classe de Resistência – Classe de umidade – Vão.
(+) Redução; (-) Acréscimo

Fonte: Elaborado pela própria autora (2022).

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esse estudo contribuiu para compreender a influência da inclinação das tesouras em estruturas treliçadas planas de cobertura no consumo de madeira, de modo a facilitar a tomada de decisão dos projetistas e verificar a suposição empírica feitas por alguns fabricantes de telha de fibrocimento de que 6° (10%) de inclinação resulta em um menor consumo de madeira. Considerando os resultados obtidos, concluiu-se que:

- Em algumas inclinações e classes de resistência não foram obtidos resultados pelo programa (*loop* infinito), porém foi constatado que como solução seria necessário um valor maior que 6 centímetros para a base da seção transversal da terça para essas situações;
- A classe de umidade apresentou influência apenas em classes de menor resistência (para *Howe* D20 e D30 e para *Pratt* apenas D20), numa escala de variação de 1° a 2°;
- As alturas das terças se mantiveram constantes nas primeiras inclinações, no entanto a partir de 9° - 12° em todas as situações analisadas, as alturas aumentaram com o aumento da inclinação;
- As alturas dos banzos demonstram um comportamento decrescente em relação a inclinação, em ambas as tipologias. As diagonais demonstram uma variação decrescente da altura somente em relação às primeiras inclinações (*Howe* de 5° à 10° e *Pratt* de 5° à 8°), mantendo a altura constante igual a mínima possível nas demais inclinações. Por fim, os montantes mantêm, na tipologia *Pratt*, a altura mínima permitida em todas as inclinações e, na tipologia *Howe*, o comportamento foi constante até a inclinação de 20°, onde começou a apresentar um comportamento crescente;
- Avaliar o volume de uma única treliça, permitiu encontrar inclinações ótimas, sem a consideração das terças, cujos valores poderão ser aplicados em futuras pesquisas que considerem propriedades geométricas ou da madeira diferentes para as terças. Porém, para uma conclusão mais efetiva da influência, a análise da estrutura completa provou-se essencial;
- Considerando a estrutura completa em ambas as tipologias, para o vão de 6 metros, as terças compõem cerca de 50% - 60% do volume total da estrutura. Já para o vão de 12 metros, destaca-se as treliças com cerca de 65% - 69% do volume total;

- Em ambas as tipologias, foi obtida a composição de cada grupo de barras em relação ao volume total da treliça presente na estrutura completa. Ordenando-os daquele com maior contribuição para o com menor contribuição tem-se: banzo superior (cerca de 50%), banzo inferior, diagonal e montante;
- As estruturas de tipologia *Howe* apresentaram ser mais econômicas que a as de tipologia *Pratt* em 97,40% das simulações realizadas;
- Considerando o consumo somente das treliças, pode-se definir uma inclinação ótima de 22° para todas as situações analisadas, visto que, apesar de algumas situações existirem uma outra inclinação com consumo menor, a variação foi somente de até 4%;
- Considerando o consumo da estrutura completa, ou seja, tanto o consumo das treliças quanto o consumo das terças, foi definida uma faixa de inclinação ótima sendo de 10° a 12° para qualquer situação analisada nesse trabalho, sendo apresentado somente um acréscimo de até 10% do consumo mínimo possível para cada situação;
- A inclinação de 6° não foi considerada como inclinação ótima, ou seja, não resultou em um menor consumo de madeira em nenhuma das simulações. Pelo contrário, perdeu somente para a inclinação de 5° a posição de inclinação mais antieconômica, para o caso sem considerar as terças. Já para casos em que as terças foram consideradas, o consumo na inclinação de 6° apresentou-se superior ao da faixa de inclinação ótima estipulada, porém demonstrou-se mais econômica que inclinações maiores que 16°, além da inclinação de 5°.

6.1 Sugestões para trabalhos futuros

Para trabalhos futuros são apresentadas as seguintes sugestões:

- Avaliar tamanhos de vãos dentro da faixa analisada (de 6 a 12 metros) e também superiores, considerando as mesmas variáveis. De modo a verificar se a influência da inclinação possui o mesmo comportamento para os demais vãos;
- Substituir o tamanho da espessura da terça para um valor superior ao utilizado nesse trabalho (> 6 centímetros), de modo a conseguir resultados para todas as inclinações dentro da faixa estabelecida nesse trabalho (5°-25°), considerando as mesmas variáveis;
- Implementar o dimensionamento das ligações e verificar se a inclinação ótima fica dentro da faixa de inclinação ótima apresentada nesse trabalho, considerando as mesmas variáveis;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES FILHO, A. **Elementos finitos**: a base da tecnologia CAE. São Paulo, Editora Érica, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6120**: Cargas para o cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro, ABNT, 2019.

_____. **ABNT NBR 6123**: Forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro: ABNT, 1988.

_____. **ABNT NBR 7190**: Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro: ABNT, 1997.

_____. **ABNT NBR 7190-1**: Projeto de estruturas de madeira – Parte 1: Critérios de dimensionamento. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

_____. **ABNT NBR 7190-3**: Projeto de estruturas de madeira – Parte 3: Métodos de ensaio para corpos de prova isentos de defeitos para madeiras de florestas nativas. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

_____. **ABNT NBR 8681**: Cargas para o cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

BARBARI, M.; CAVALLI, A.; FIORINESCHI, L.; MONTI, M.; TOGNI, M. Innovative connection in wooden trusses. **Construction and Building Materials**, v. 66, p. 654–663, 2014. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.06.022.

BURDZIK, W. M. G.; SKORPEN, S. A. Metal–strip bracing versus diagonal timber bracing in timber trussed tiled roofs. **Engineering Structures**, v. 75, p. 1–10, 2014. DOI: 10.1016/j.engstruct.2014.05.038.

CALIL JÚNIOR, C.; DIAS, A. A. Utilização da madeira em construções rurais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 1, n. 1, p. 71–77, 1997. DOI: 10.1590/1807-1929/agriambi.v1n1p71-77.

CARINO, C.; CARLI, F. Finite Element Modeling and Analysis of Aged Timber Trusses located in Northern Italy. **International Journal of Applied Engineering Research**, v. 13, n. 12, p. 10215-10219, 2018.

CHRISTOFORO, A. L.; ALMEIDA, D. H. de; VARANDA, L. D.; PANZERA, T. H.; LAHR, F. A. R. Estimation of wood toughness in Brazilian tropical tree species. **Engenharia Agrícola**, v. 40, n. 2, p. 232–237, 2020. DOI: 10.1590/1809-4430-eng.agric.v40n2p232-237/2020.

DEBAILLEUX, L. Structural Analysis of Gothic Roof Trusses in View of their Conservation. Case Study of St. Paul's Cathedral, Liège (Belgium). **Advanced Materials Research**, v. 778, p. 895–902, 2013. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.778.895.

ENȚUC, S.; SECU, A.; ȚĂRANU, N.; FLOREN, I.; MAXINEASA, S.-G.; OPRI, G. A COMPARATIVE STUDY OF TIMBER STRUCTURES FOR PITCHED ROOFS. **Bul. Inst. Politehnic, Iași**, v. 62, n. 66, p. 12, 2016.

ETERNIT. **Telhas de fibrocimento CRFS** (cimento reforçado com fio sintético). 2020/21. Catálogo Técnico. p. 118.

EUROPEAN COMMITTEE OF STANDARDIZATION. **EN 1995-1-1**: Eurocode 5 – Design of timber structures: part 1.1: general common rules and rules for buildings. Brussels: CEN, 2002.

_____. **EN 1995-1-1**: Eurocode 5 – Design of timber structures: part 1.1: general common rules and rules for buildings. Brussels: CEN, 2004.

_____. **EN 1995-1-1**: Eurocode 5 – Design of timber structures: part 1.1: general common rules and rules for buildings. Brussels: CEN, 2010.

_____. **EN 1995-1-1**: Eurocode 5 – Design of timber structures: part 1.1: general common rules and rules for buildings. Brussels: CEN, 2016.

FRAGA, I. F. **Influência dos modelos idealizados de ligações no dimensionamento de treliças planas de madeira**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2020. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/13385>. Acesso em: 29 maio 2021.

FRAGA, I. F.; MORAES, M. H. M. de; MENEZES, I. S.; ARROYO, F. N.; ALMEIDA, J. P. B. de; RODRIGUES, E. F. C.; MASCARENHAS, F. R.; AQUINO, V. B. de M.; SILVA, S. A. M.; LAHR, F. A. R.; JÚNIOR, W. M. P.; CHRISTOFORO, A. L. Influence of roof slope on timber consumption in plane trusses design. **BioResources**, v. 16, n. 4, p. 6750–6757, 2021. DOI: 10.15376/biores.16.4.6750-6757.

HERMIDA, J.; CABALEIRO, M.; RIVEIRO, B.; CAAMAÑO, J. C. Two-dimensional models of variable inertia from LiDAR data for structural analysis of timber trusses. **Construction and Building Materials**, v. 231, p. 117072, 2020. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117072.

KRUŠINSKÝ, P.; GOCÁL, J.; AUGUSTÍNKOVÁ, L.; CAPKOVÁ, E.; KORENKOVÁ, R. Proportions and static Analysis of a Historical Truss in a Rural House in Vápenná Village. *In*: R-S-P SEMINAR 2017 THEORETICAL FOUNDATION OF CIVIL ENGINEERING, 26., 2017, Varsóvia. **MATEC Web of Conferences**. [S. l.]: EDP Sciences, 2017. v. 117, p. 00093. DOI: 10.1051/mateconf/201711700093.

MILCH, J.; TIPPNER, J.; SEBERA, V.; KUNECKÝ, J.; KLOIBER, M.; NAVRÁTIL, M. The numerical assessment of a full-scale historical truss structure reconstructed with use of traditional all-wooden joints. **Journal of Cultural Heritage**, v. 21, p. 759–766, 2016. DOI: 10.1016/j.culher.2016.04.006.

MORAES, M. H. M.; FRAGA, I. F.; PEREIRA JUNIOR, W. M.; CHRISTOFORO, A. L. COMPARATIVE ANALYSIS OF THE MECHANICAL PERFORMANCE OF TIMBER TRUSSES STRUCTURAL TYPOLOGIES APPLYING COMPUTATIONAL INTELLIGENCE. **Revista Árvore**, v. 46, p. e4604, 2022. DOI: 10.1590/1806-908820220000004.

NAVARATNAM, S.; GINGER, J.; HUMPHREYS, M.; HENDERSON, D.; WANG, C.-H.; T.Q. NGUYEN, K.; MENDIS, P. Comparison of wind uplift load sharing for Australian truss- and pitch-framed roof structures. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 204, p. 104246, 2020a. DOI: 10.1016/j.jweia.2020.104246.

NAVARATNAM, S.; HUMPHREYS, M.; MENDIS, P.; NGUYEN, K. T. Q.; ZHANG, G. Effect of roof to wall connection stiffness variations on the load sharing and hold-down forces of Australian timber-framed houses. **Structures**, v. 27, p. 141–150, 2020b. DOI: 10.1016/j.istruc.2020.05.040.

OLIVEIRA, B. L. F. de; PEDRINI, A.; PINTO, E. M. Recomendações projetuais para edificações de madeira no clima quente e úmido. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, v. 13, p. e022013, 2022. DOI: 10.20396/parc.v13i00.8655766.

OLIVEIRA, G. O. B.; PINHEIRO, R. V.; ARROYO, F. N.; ALMEIDA, D. H. de; ALMEIDA, T. H. de; SILVA, D. A. L.; CHRISTOFORO, A. L.; LAHR, F. A. R. Technical Feasibility Study of the Use of Softwoods in Lattice Structure “Howe” Type for Roofing (Gaps between 8-18 Meters). **Current Journal of Applied Science and Technology**, v. 35, n. 4, p. 1–8, 2019. DOI: 10.9734/cjast/2019/v35i430188.

PALLUDO, D. F.; PINHEIRO, R. V.; ALMEIDA, D. H.; ARROYO, F.; ALMEIDA, T. H.; TAKEDA, M. de C.; CHRISTOFORO, A. L.; LAHR, F. A. R. Timber Use in Truss Structures for Roof (“Howe” Type – 8 to 18 Meters). **International Journal of Materials Engineering**, v. 7, n. 5, p. 93–99, 2017. DOI: 10.5923/j.ijme.20170705.03.

PFEIL, W.; PFEIL, M. **Estruturas de madeira**. 6. Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2015. 224 p. ISBN 978-85-216-1385-5.

PROCHÁZKA, J.; BÖHM, M.; SVITÁK, M. Diverse Influence of user-economic aspects to truss and rafter roof systems and their comparison. **Wood Research**, v. 59, n. 3, p. 449–458, 2014.

QIN, H.; STEWART, M. G. System fragility analysis of roof cladding and trusses for Australian contemporary housing subjected to wind uplift. **Structural Safety**, v. 79, p. 80–93, 2019. DOI: 10.1016/j.strusafe.2019.03.005.

RAMAGE, M. H.; BURRIDGE, H.; BUSSE-WICHER, M.; FEREDAY, G.; REYNOLDS, T.; SHAH, D. U.; WU, G.; YU, L.; FLEMING, P.; DENSLEY-TINGLEY, D.; ALLWOOD, J.; DUPREE, P.; LINDEN, P. F.; SCHERMAN, O. The wood from the trees: The use of timber in construction. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 68, p. 333–359, 2017. DOI: 10.1016/j.rser.2016.09.107.

RIBEIRO, A. C. dos S.; VASCONCELOS PINHEIRO, R.; BORGES DE MACEDO, L.; LUIS CHRISTOFORO, A.; ANTONIO ROCCO LAHR, F. Comparative Study of Wood Consumption in Structures of Concrete Roof. **International Journal of Materials Engineering**, v. 6, n. 3, p. 85–91, 2016. DOI: 10.5923/j.ijme.20160603.04.

RIBEIRO, L. M. P. **Otimização e Dimensionamento de Treliças Planas de Madeira Empregando o Método dos Algoritmos Genéticos**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2008. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/14108>. Acesso em: 5 maio 2021.

SEJKOT, P.; ORMARSSON, S.; VESSBY, J.; KÄLLSNER, B. Numerical out-of-plane stability analysis of long span timber trusses with focus on buckling length calculations. **Engineering Structures**, v. 204, p. 109670, 2020. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.109670.

ŠILIH, S.; KRAVANJA, S.; PREMROV, M. Shape and discrete sizing optimization of timber trusses by considering of joint flexibility. **Advances in Engineering Software**, v. 41, n. 2, p. 286–294, 2010. DOI: 10.1016/j.advengsoft.2009.07.002.

SONG, X.; LAM, F.; HUANG, H.; HE, M. Stability Capacity of Metal Plate Connected Wood Truss Assemblies. **Journal of Structural Engineering**, v. 136, n. 6, p. 723–730, 2010. DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000163.

SONG, X.; LAM, F. Stability Analysis of Metal-Plate-Connected Wood Truss Assemblies. **Journal of Structural Engineering**, v. 138, n. 9, p. 1110–1119, 2012. DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000502.

SOUZA JUNIOR, D. A. de; GESUALDO, F. A. R. Aplicação do método dos algoritmos genéticos na minimização do consumo de madeira de estruturas espaciais com barras cruzadas para coberturas. **Madeira: arquitetura e engenharia**, v. 7, n. 19, 2006. Disponível em: <http://madeira.set.eesc.usp.br/article/view/220>. Acesso em: 1 fev. 2022.

SOUZA JUNIOR, D. A. de; QUEIROZ, C. M. M.; MARROQUES, L. de F. S.; NARIMATSU, G. A.; GESUALDO, F. A. R. Avaliação de estruturas reticuladas de madeira em duas águas. **Madeira: arquitetura e engenharia**, v. 8, n. 20, 2007. Disponível em: <http://madeira.set.eesc.usp.br/article/view/191>. Acesso em: 1 fev. 2022.

VILLAR, J. R.; VIDAL, P.; FERNÁNDEZ, M. S.; GUAITA, M. Genetic algorithm optimisation of heavy timber trusses with dowel joints according to Eurocode 5. **Biosystems Engineering**, v. 144, p. 115–132, 2016. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2016.02.011.

VILLAR-GARCÍA, J. R.; VIDAL-LÓPEZ, P.; RODRÍGUEZ-ROBLES, D.; GUAITA, M. Cost optimisation of glued laminated timber roof structures using genetic algorithms. **Biosystems Engineering**, v. 187, p. 258–277, 2019. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2019.09.008.

ZHURTOV, A.; HEZHEV, T.; KARDANGUSHEV, A.; NASTUYEV, M.; OSMANOV, I. Algorithm for parametric optimization of a trapezoidal wooden truss on metal tooth plates. **E3S Web of Conferences**, v. 281, p. 01040, 2021. DOI: 10.1051/e3sconf/202128101040.

ZIENKIEWICZ, O. C.; TAYLOR, R. L.; ZHU, J. Z. **The finite element method: its basis and fundamentals**. 7 ed., Amsterdam, Elsevier, Butterworth-Heinemann, 2013.