



SEI-SICITE 2021

Pesquisa e Extensão para um mundo em transformação

Análise aerodinâmica e estrutural de uma estufa agrícola feita de colmos de bambu

Aerodynamic and structural analysis of an agricultural greenhouse made of bamboo culms

Felipe Frizon*, Diego Rizzotto Rossetto[†],

Fabiano Ostapiv[‡]

RESUMO

Estufas agrícolas são estruturas utilizadas visando o controle parcial das condições edafoclimáticas como: temperatura, umidade do ar, radiação, solo, vento e composição atmosférica, aumentando assim a produtividade e a qualidade das plantas cultivadas nesse sistema. O bambu é considerado um material sustentável, por ser renovável, absorver gás carbônico e usar a energia solar para seu crescimento, além de ser facilmente incorporável na natureza ao final do seu ciclo de vida. O objetivo deste trabalho consistiu em analisar a viabilidade técnica do bambu na construção de uma estufa de cultivo protegido, para isso foi analisado o comportamento aerodinâmico e estrutural, visando obter as margens de segurança para essa construção. Com a metodologia de fluidodinâmica computacional foram obtidos os coeficientes de pressão externa da estufa, esses que possibilitaram determinar os esforços devido ao vento atuantes na estrutura. As cargas geradas pela etapa anterior serviram de condição de contorno para uma análise estática linear da estrutura e assim obter as tensões primárias, essas que foram utilizadas no dimensionamento com base em normas internacionais para construção com bambu. Ao fim foram obtidas as margens de segurança entre esforços atuantes e admissíveis, essas que ficaram acima do limite mínimo proposto, validando assim a plausibilidade de uso do bambu como elemento estrutural do modelo de estufa analisado.

Palavras-chave: estufa, bambu, elementos finitos, CFD, análise estrutural

ABSTRACT

Agricultural greenhouses are structures used to partially control soil and climate conditions, such as temperature, air humidity, radiation, soil, wind, and atmospheric composition, thus increasing the productivity and quality of the plants grown in this system. Bamboo is a sustainable material because it is renewable, absorbs carbon dioxide and uses solar energy for its growth, and is easily incorporated into nature at the end of its life cycle. The aim of this paper was to analyze the technical feasibility of bamboo in the construction of a greenhouse for protected cultivation. Thus, the aerodynamic and structural behavior was analyzed, aiming to obtain the safety margins for this construction. With the computational fluid dynamics methodology, the external pressure coefficients of the greenhouse were obtained, which enabled the determination of the wind loads acting on the structure. The loads generated in the previous step served as a boundary condition for a static linear analysis of the structure and thus obtain the primary stresses, which were used in the design based on international standards for bamboo construction. At the end, the safety margins between acting and admissible efforts were obtained, which were above the proposed minimum limit, thus validating the plausibility of using bamboo as a structural element of the greenhouse model analyzed.

Keywords: greenhouse, bamboo, finite elements, CFD, structural analysis

* Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, PR, Brasil; frizon@alunos.utfpr.edu.br

[†] Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Pato Branco; diegorossetto@utfpr.edu.br

[‡] Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, PR, Brasil; fabianoostapiv@utfpr.edu.br



1 INTRODUÇÃO

Atualmente a construção de estufas no sistema de cultivo protegido é mais uma alternativa para driblar as adversidades climáticas e criar um ambiente propício à agricultura, mesmo em regiões onde o clima ou o solo são desfavoráveis. Hoje há no mercado vários materiais utilizados para fabricação dessas estruturas, porém demandam alto custo e matéria prima não renovável como os polímeros sintéticos e os materiais metálicos. Visando a utilização de materiais renováveis muitos agricultores optam pela madeira, principalmente eucalipto, o qual necessita de tratamento químico para suportar as condições de uso. Com isso o custo se eleva e os resíduos do tratamento podem contaminar o meio ambiente (PURQUERIO & TIVELI, 2010).

Repensando o uso de materiais na construção para torná-la mais sustentável do ponto de vista ambiental, o bambu aparece como uma proposta eficaz. Isso pois ele é um material com excelentes propriedades mecânicas ao mesmo tempo que não é poluente, não requer grande consumo de energia em seu processo de preparo, sua fonte é renovável e de baixo custo (BERALDO; PEREIRA, 2016).

Segundo Golçalves et al. (2001) mesmo possuindo diversos pontos positivos, o bambu ainda é um material sem muito valor econômico em nossa sociedade. Por esse motivo há uma deficiência quanto a normas e critérios para ensaios e testes de suas propriedades mecânicas, tornando-se onerosa a aplicação estrutural desse material.

O objetivo do presente trabalho consistiu em analisar a viabilidade técnica do bambu na construção de uma estufa de cultivo protegido. Como parâmetro para avaliar o cumprimento do objetivo foram avaliadas as margens de segurança com base no dimensionamento das seções através das equações de estado limite com base em normas internacionais. Para isso foi necessário obter os carregamentos devido à ação do vento através de uma análise por fluidodinâmica computacional e posteriormente avaliar os esforços atuantes na estrutura através de uma análise estrutural estática linear por elementos finitos.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento deste trabalho foi adotado uma estufa de 224 m², do tipo túnel alto. A estrutura é composta por 9 pórticos espaçados a 3,5 m entre si. Cada pórtico é constituído por 1 pilar principal de 4 m de altura, 2 pilares laterais de 2,5 m de altura e 2 pilares de entremeio de 3,6 m de altura, todos espaçados a uma distância de 2,0 m. Sobre a estrutura é aplicada uma cobertura em filme plástico de 200 micras sustentada por arcos com um espaçamento de 1,75 m, esses que são engastados em vigas de ligação que conectam todos os pórticos. A representação gráfica da estufa é apresentada na Figura 1.

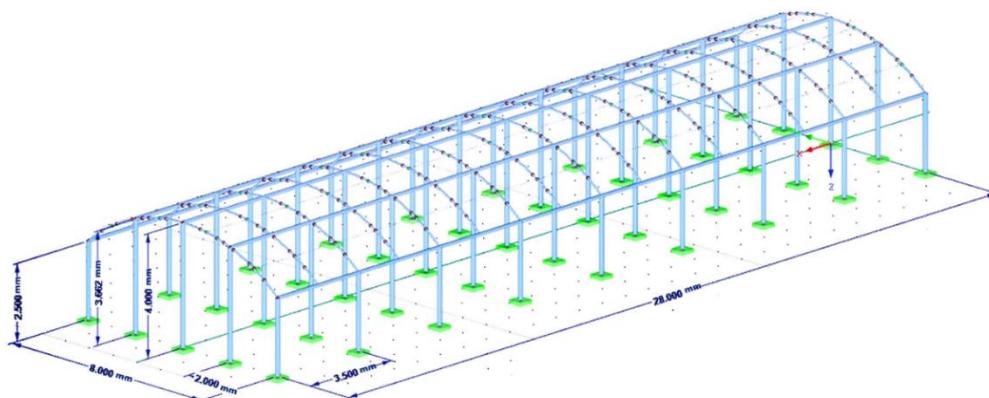
Os bambus utilizados na análise foram considerados como varas adultas das espécies *Dendrocalamus asper* e *Bambusa tuldoides*, isso pois com o amadurecimento dos colmos há uma estabilidade nas propriedades mecânicas. As seções transversais das varas utilizadas são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Seções transversais dos elementos construtivos utilizados

Elemento	Diâmetro externo [mm]	Espessura da parede [mm]	Espécie
Pilares	150	25	<i>Dendrocalamus asper</i>
Vigas	120	20	<i>Dendrocalamus asper</i>
Arcos	60	15	<i>Bambusa tuldoides</i>

Fonte: Autoria própria (2021)

Figura 1 - Representação tridimensional da estufa



Fonte: Autoria própria (2021)

As propriedades mecânicas das espécies utilizadas são apresentadas na Tabela 2 segundo Golçalves et al. (2001).

Tabela 2 - Resistência mecânica das espécies de bambu utilizadas.

Propriedade	<i>Dendrocalamus asper</i>	<i>Bambusa tuldoides</i>
Densidade [Kg/m ³]	744	712
Módulo de Elasticidade longitudinal [GPa]	21,9	22,5
Coefficiente de Poisson	0,26	0,26
Resistência à Tração paralela às fibras [MPa]	103,9	85,5
Resistência à Compressão paralela às fibras [MPa]	30,8	26,2
Resistência à Flexão [MPa]	83,2	71,6
Resistência ao Cisalhamento transversal às fibras [MPa]	35,4	41,6

Fonte: Adaptado de Golçalves et al. (2001)

2.2 Determinação dos coeficientes de pressão externa através da metodologia CFD

Como ferramenta de análise para o método de fluidodinâmica computacional foi utilizado o software *Ansys CFX*. Esse software utiliza o método de volumes finitos para a resolução das equações diferenciais de Navier-Stokes. O fluido utilizado na análise foi considerado como newtoniano e incompressível, apresentando escoamento em regime turbulento e uma análise em regime permanente. O modelo foi desenvolvido utilizando elementos tetraédricos com um refinamento de discretização na região de interesse. A dimensão dos elementos na superfície da estufa foi obtida através do modelo de turbulência κ - ϵ .

Para avaliar a qualidade de malha foram utilizadas verificações de ortogonalidade, razão de aspecto e *Skewness* dos elementos constituintes. Além disso avaliou-se a dimensão da primeira camada, aferindo assim se o valor da primeira camada satisfaz a hipótese assumida com base no modelo de turbulência adotado. Após a verificação do modelo foram aplicadas as condições de contorno, onde a velocidade média do vento foi determinada na forma potencial com base na ABNT NBR6123:1988.

Com a aplicação das condições de contorno no modelo, determinou-se então o critério de convergência para a solução da análise. Para isso foi utilizado o padrão RMS (*Root Mean Square*) com um resíduo na ordem de 10^{-4} .



Após a solução do modelo computacional são obtidos os coeficientes de pressão externa (C_{pe}) críticos atuantes na estrutura. Para isso são consideradas as características aerodinâmicas da edificação onde são obtidas as regiões de sobrepessão ($C_p > 0$) e sucção ($C_p < 0$), essas que atuam acima e abaixo da pressão atmosférica respectivamente. A sobrepessão atua na face da edificação em que ocorre a incidência direta do vento (Barlavento) e a sucção na face oposta (Sotavento).

As cargas devido ao vento em uma construção do tipo estufa foram obtidas através da Eq. (1) seguidos critérios definidos pela ABNT NBR16032:2012 onde C_p é a diferença entre os coeficientes de pressão externa e interna, L é a distância entre os pórticos e q a pressão dinâmica definida através da ABNT NBR6123:1988.

$$F = C_p \cdot q \cdot L \quad (1)$$

2.2 Determinação dos esforços atuantes através de uma análise linear estática por elementos finitos

Por se tratar de uma estrutura reticulada e não apresentar tensões localizadas, o modelo da estufa foi elaborado a partir de elementos de viga, ou seja, elementos que o comprimento é predominante em relação à seção transversal. Com isso não foi necessário criar uma malha, visto que a função interpolação do elemento unidimensional é exata e a sua discretização não altera os resultados. Para simplificação do modelo estrutural o bambu foi considerado como um elemento cilíndrico uniforme, sem diafragmas e efeito de conicidade.

As propriedades do material foram inseridas considerando o meio das varas com a presença de nós, mas sem a modificação geométrica devido a simplificação do modelo em elemento de viga, esse que modela os componentes considerando apenas sua linha do centroide.

Para representar as condições de contorno de restrição foram definidos engastamentos fixos entre os pilares e o solo, simplificando uma condição de chumbamento por concreto. Como as ligações mais comuns envolvendo elementos de bambu são feitas por encaixes e cavilhas, as junções entre vigas e pilares foram consideradas fixas, iguais às ligações entre os arcos e as vigas.

Como forma de considerar as cargas devido a utilização da estufa foi adotado de acordo com a ABNT NBR16032:2012 uma sobrecarga de $0,25 \text{ kN/m}^2$, além disso foi considerado o peso próprio dos elementos construtivos definidos pela densidade do material e o volume dos componentes. Com esses esforços associados as condições de vento à 0 e 90° foram geradas 46 combinações de cargas, sendo 32 combinações de estado limite ultimo e 14 combinações de estado limite de serviço divididas em raras e frequentes.

Com a definição do modelo estrutural, das propriedades dos materiais, aplicação das restrições e das cargas, foi processada uma análise estática linear, visando a obtenção das reações de momentos fletores, esforços cortantes, esforços normais e deslocamento de todos os elementos construtivos. Esses resultados servem como entradas para o dimensionamento dos componentes e consequentemente a obtenção das margens de segurança para a estufa

2.3 Dimensionamento e verificação das seções

Para a verificar as seções foi utilizado um método de estado limite proposto por Kaminski (2016). Com esse método foram obtidos os admissíveis para momento fletor, esforço cortante, tração axial, compressão axial e para os esforços combinados de tração + flexão e compressão + flexão. Para o admissível de deslocamento máximo foi considerado o critério de estufa de classe B com cobertura flexível da ABNT NBR16032:2012.

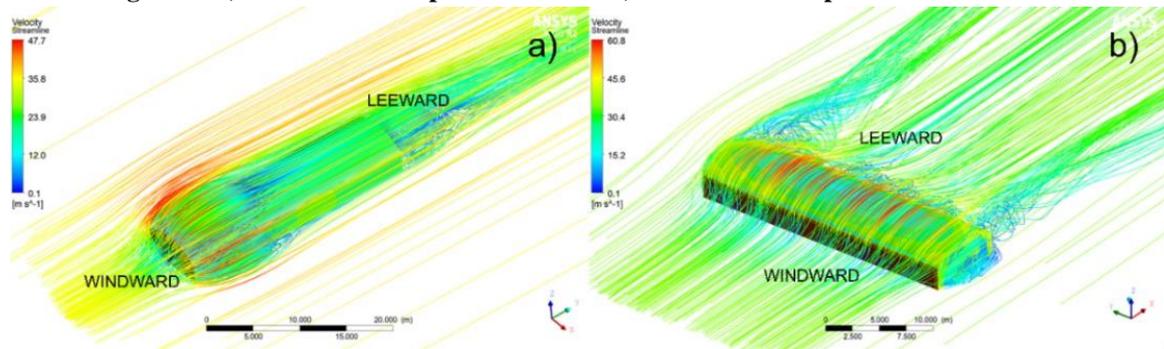
As margens de segurança foram calculadas visando demonstrar o quão longe uma peça está da falha estrutural, visando uma margem mínima de 15%. A Equação (2) representa como são obtidas essas margens.

$$MS_{\%} = \left(\frac{Admissível}{Atuante} - 1 \right) \times 100 \quad (2)$$

3 RESULTADOS

Com base nas linhas de fluxo apresentadas na Figura 2 é possível observar que são gerados vórtices na face a sotavento, ou seja, o lado oposto onde sopra o vento e nas laterais da estrutura, locais esses em que ocorre separação do fluxo. Observa-se também que o vento que incide a barlavento, na face onde o vento incide diretamente é escoado para as laterais e para a parte superior da estrutura, provocando assim um aumento da velocidade nesses pontos.

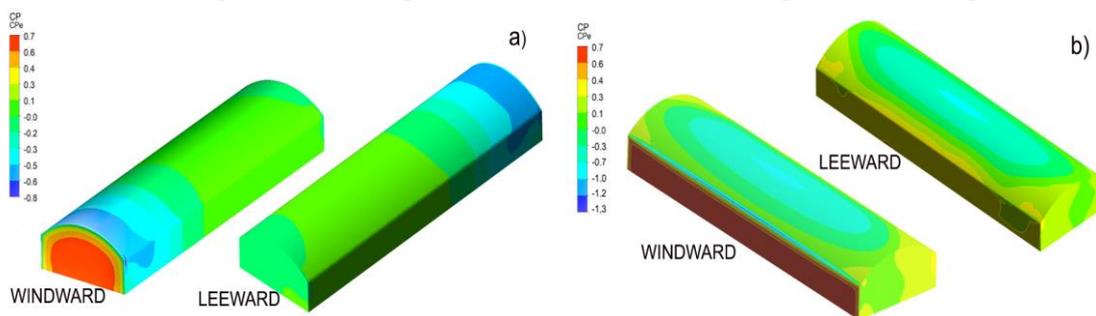
Figura 2: a) Linhas de fluxo para vento a 0° b) Linhas de fluxo para vento a 90°.



Fonte: Autoria própria (2021)

A Figura 3 apresenta a distribuição dos coeficientes de pressão externa atuantes na estufa para as condições de vento a 0° e a 90°

Figura 3: a) Coeficientes de pressão externa para vento a 0° b) Coeficiente de pressão externa para vento a 90°.



Fonte: Autoria própria (2021)

Através da análise estrutural linear estática com auxílio do software *Dlubal RFEM*, foram obtidos os esforços e os deslocamentos atuantes na estrutura. Com um tratamento de dados foram encontradas as condições críticas, essas que são apresentadas na Tabela 3.



Tabela 3: Deslocamento e Esforços críticos atuantes na estrutura

Atuantes	Pilares	Vigas	Arcos
Deslocamento Máximo [mm]	16,9	7,60	21,9
Momento Fletor Máximo [N.mm]	11450000	4710000	1200000
Esforço Cortante Máximo [N]	15230	3380	3380
Esforço Normal Máximo [N]	9660	11420	8120

Fonte: Autoria própria (2021)

Através da Eq. (2) foram obtidas as margens de segurança apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4: Margens de segurança para os elementos analisados em relação a diferentes esforços.

Margens de Segurança	Pilares	Vigas	Arcos
Margem mínima aceitável	15%	15%	15%
Deslocamento	58%	54%	33%
Momento Fletor	93%	171%	19%
Força Cortante	486%	1589%	599%
Tração Axial	10464%	5619%	2132%
Compressão Axial	244%	56%	63%
Tração + Flexão	99%	98%	95%
Compressão + Flexão	99%	98%	95%

Fonte: Autoria própria (2021)

4 CONCLUSÃO

Ao fim das análises foi constatado que o bambu pode ser incorporado em estruturas desse tipo como uma alternativa aos materiais convencionais. Isso pois apresenta viabilidade técnica conforme foi determinado através do dimensionamento, onde todas as margens de segurança atingiram valores superiores ao requisito mínimo esperado. Vale salientar para trabalhos futuros a importância de ensaios mecânicos para a determinação das propriedades do material e um estudo prático aprofundado acerca das junções entre os elementos.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 16032/2012: Estrutura de estufa e viveiro agrícola – Requisitos de projeto, construção e reparação. Rio de Janeiro, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6123/1988: Forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro, 1988
- BERALDO, A.L.; PEREIRA, M. A. R. Bambu de corpo e alma. Bauru – SP: Canal 6 Editora. 2016. 2ª edição.
- GONÇALVES, M.T.T., PEREIRA, M.A. dos R., GONÇALVES, C.D. Ensaio de resistência mecânica em peças laminadas de bambu. IN: Congresso brasileiro de engenharia agrícola, 29, 2000, Fortaleza
- KAMINSKI, S.; Structural use of bamboo: Part 4: Element design equations. Available from: <https://www.researchgate.net/publication/314151504> Structural use of bamboo Part 4 Element design equations [accessed June 25, 2020] - 2016
- PURQUERIO, L.F.V.; TIVELLI, S.W. Manejo do ambiente em Cultivo Protegido. Piracicaba – SP: IAC, Instituto Agrônomo de Campinas. 2010.