

ARACNE: PROJETO E EXECUÇÃO DE UMA ESTRUTURA DE COLMOS DE BAMBU

Daniel Albiero (Daniel.albiero@agr.unicamp.br), Antonio L. Beraldo (beraldo@agr.unicamp.br), José A. S. Maciel (amaciel@agr.unicamp.br)
Universidade Estadual de Campinas - Faculdade de Engenharia Agrícola –

RESUMO: Este trabalho trata do cálculo estrutural de um quiosque de bambu construído na Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas, na cidade de Campinas. As peças estruturais constituíram-se em pilares e vigas de bambu *Guadua angustifolia*. A cobertura foi constituída por 8 esteiras triangulares formadas de *Bambusa tuldoides*, cobertas por *Anetherum Bicorné (sapé)*. O principal esforço estrutural que a estrutura pode sofrer é de carga de vento devido ao pouco peso. Foi seguida a Norma NBR 6123, referente a determinação de cargas de vento em estruturas.

Para efeito de simplificação os bambus dos pilares foram considerados como tubos com diâmetro externo de 12 cm e espessura da parede de 3 cm, enquanto as vigas foram consideradas como tubos de diâmetro externo de 7.5 cm e espessura da parede de 2 cm, estes elementos são intercalados a cada 25 cm por um elemento de disco massiço para simular o nó. Nestas aproximações foi utilizado o software ANSYS 5.2 ED (CLARKS LABS, 1995). Após processamento pelo software, foram obtidos os gráficos de Tensão de Von Mises (composição de Tensões principais, flexão e torção tridimensionais), e da tensão de flexão máxima.

Palavras-chave: bambu, estrutura, NBR 6123

ARACNE: DESIGN AND CONSTRUCTION OF A BAMBOO CULM STRUCTURE

ABSTRACT: This work treat of structural calculus of a kiosk of bamboo built at Agricultural Engineering College of State University of Campinas. The structural parts are pillars and beams of bamboo *Guadua angustifolia*. The covering was constituted for 8 triangular mats formed of *Bambusa tuldoides*, covered by *Anetherum Bicorné*. The mean structural request that the build have is the wind load. It was followed the standard NBR 6123, that refers at determination of wind loads in building.

For simplification, the bamboos of pillars were considered like pipes with outer diameter of 12 cm and thickness of wall of 3 cm, the beams was considered like pipes of outer diameter of 7.5 cm e thickness of wall of 2 cm, these elements are separated each one by 25 cm of a massive disc element for to simulate the knot. In these approaches was used the software ANSYS 5.2 ED (CLARKS LABS, 1995). After processing for the software, it was get the Von Mises stress graph, and the maximum bending stress graph.

Keywords:

1. INTRODUÇÃO

O bambu é uma das mais importantes matérias-primas para os países em vias de desenvolvimento (www.brasilis.pro.br). Sob um posto de vista anatômico, os colmos de bambus são constituídos por nós (maciços) e internós (vazios), sendo a segmentação irregular ao longo da altura do colmo, embora tenda a ser mais uniforme no terço médio do mesmo. Embora esse material seja utilizado há milênios, ainda não se dispõe de informações na literatura a cerca das características dos colmos das principais espécies e, principalmente, do comportamento dos colmos quando se constituem em componentes de uma estrutura.

De acordo com MOREIRA e GHAVAMI (1997), os parâmetros relativos à resistência do bambu apresentam grande variabilidade com as condições ambientais e biológicas, tais como: tipo de solo, clima, umidade, espécie, etc. Além disso, outros fatores também são responsáveis pela variabilidade nas características do bambu: idade do colmo, presença e quantidade dos nós, posição ao longo do colmo e teor de umidade, dentre outras (BERALDO, 2006).

MOREIRA e GHAVAMI (1997) constataram que as informações sobre a construção com bambu em sua forma natural referem-se principalmente aos tópicos dos detalhes construtivos, testes macro-físicos e macro-mecânicos, existindo ausência de critérios de dimensionamento, ou critérios de seleção de elementos estruturais resistentes, o que leva à quase ausência de análise estrutural, dando a falsa impressão que esta análise seja impossível, e que as construções em bambu devam ser totalmente intuitivas. Embora não se conheçam os critérios adotados pelos construtores, esse conhecimento vem se difundindo em vários países, sobretudo na Colômbia (HIDALGO LOPEZ, 2003).

BERALDO (1991) afirmou que o emprego de bambu na construção atualmente se faz de forma empírica, baseada geralmente em sistemas tradicionais estabelecidos em cada país. MOREIRA e GHAVAMI (1997) forneceram em um extenso trabalho os principais passos para efetuar uma análise racional das estruturas de bambu, adotando como referência a norma NBR 7190. No entanto, os autores não trabalharam com as considerações relativas à solicitação devida às cargas de vento, sendo o objetivo deste trabalho a aplicação da norma NBR 6123: Forças devido ao vento em edificações, a uma estrutura não convencional construída de colmos de bambu.

Na engenharia estrutural considera-se o vento como sendo uma superposição de turbilhões de dimensões diversas que atingem as estruturas gerando solicitações (BLESSMANN, 1995). Segundo o autor, a causa básica do vento natural é o aquecimento não uniforme da atmosfera, principalmente a partir da energia solar absorvida pela crosta terrestre e irradiada para a atmosfera sob forma de calor, sendo de interesse para a engenharia estrutural conhecer a velocidade média do vento e as flutuações em torno da média, denominadas de rajadas. Estas rajadas têm origem tanto na turbulência do escoamento médio causada pela rugosidade do terreno (natural ou artificial), como por processos de convecção causados por gradientes térmicos. O autor categorizou os ventos fortes da seguinte forma: Ciclones extra-tropicais; ciclones tropicais (quando apresentam velocidade acima de 120 km/h são denominados furacões); tormentas elétricas; linhas de tormenta; tornados; e ventos regionais. A velocidade desses ventos varia de 30 km/h até cerca de 500 km/h (tornados), de acordo com TEIXEIRA *et al.* (2000).

A ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1988) prescreve na norma NBR 6123 os procedimentos de cálculo referentes à determinação da velocidade característica do vento em função da topografia em que se encontra a construção, da velocidade básica do vento, da rugosidade do terreno (natural ou artificial) e da probabilidade de ocorrência do evento extremo. Tendo-se a velocidade característica determinada torna-se possível, por meio da aplicação da norma, determinar a carga de vento que é aplicada à estrutura. Com o valor da solicitação determinado, e a estrutura sendo determinada, torna-se possível através da metodologia de elementos finitos realizar a análise estrutural da estrutura.

Segundo SEGERLIND (1984), o método de elementos finitos é um procedimento numérico utilizado para a obtenção de soluções para problemas de engenharia que utiliza elementos discretos para se obter deslocamentos de junções e de forças de uma estrutura. Esta formulação é denominada de *análise matricial de estruturas*. Este método combina conceitos matemáticos para produzir um sistema linear ou não linear de equações. Basicamente o método de elementos finitos utiliza uma formulação de integrais para gerar um sistema de equações algébricas, usando funções contínuas de partes suaves para aproximação de quantidade e quantidades desconhecidas (SEGERLIND, 1984).

Segundo MEEK (1971), o método de elementos finitos subdivide o domínio do objeto considerado em um número de elementos poligonais cujas propriedades são as mesmas da estrutura original. Em cada domínio, o padrão de deformação ou tensão é assumido como sendo dado por funções de certos valores especificados por pontos (nós), a compatibilidade e as condições de equilíbrio devem ser satisfeitas para estes pontos e para todos os elementos. Este trabalho pretende dar uma contribuição à análise estrutural voltada para construções de bambu na forma de colmos naturais, realizando o cálculo de sollicitação de carga de vento prescrito pela norma NBR 6123. Pretendeu-se comprovar as características de resistência do bambu em casos de ventos fortes, além de aplicar a metodologia de cálculo estrutural por elementos finitos.

MATERIAL E MÉTODOS

Este trabalho apresenta a discriminação das partes estruturais de um quiosque de bambu construído na Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas, na cidade de Campinas. Os pilares foram realizados com bambu *Guadua angustifolia*, de 12 cm de diâmetro e espessura da parede de 3 cm, e vigas com 7,5 cm de diâmetro e 2 cm de espessura da parede. Na fundação utilizou-se concreto convencional, deixando-se engastadas barras de aço de ½”, com 1,50 m, sendo deixados 0,70 m livres para engastar nos pilares de bambu previamente perfurados. Por meio de uma abertura na lateral do colmo se introduziu argamassa de cimento e areia, sendo adotado esse procedimento em todas as ligações. Na cobertura foi utilizadas 8 esteiras triangulares formadas de bambu trançado, da espécie *Bambusa tuldoides*. A estrutura se localiza ao lado do prédio 2 da FEAGRI/UNICAMP, sendo que encontra-se à beira de um talude de 2 m de altura e mais de 45° inclinação (Figura 1). Na cobertura empregou-se sapé (*Anetherum Bicorné*), amarrado às esteiras triangulares de bambu. Utilizou-se fibra de vidro para enrijecer as junções entre os elementos de bambu, além de serem feitas ligações internas nas junções secundárias com o mesmo sistema adotado para os pilares, porém adotando-se barras de aço de ¼” (Figura 4).

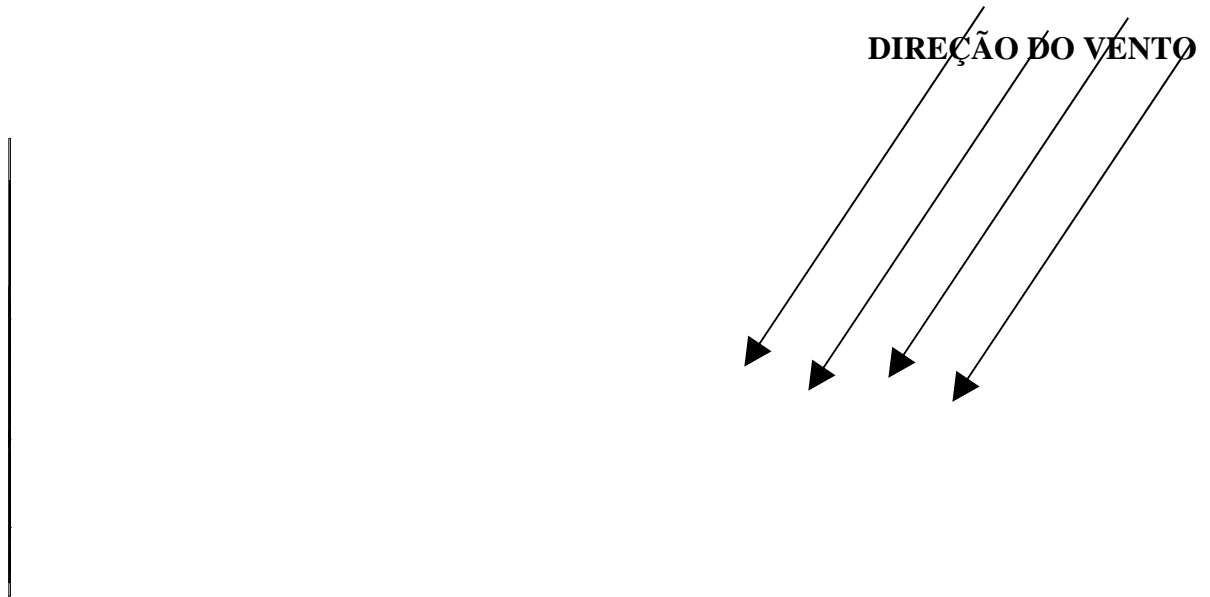


Figura 1. Localização do Quiosque.

No desenvolvimento do cálculo estrutural foram adotados os seguintes valores:

Bambu: EX=140.000 kgf/cm² (Tração); EY= 105.000 kgf/cm² (Flexão); EZ=105.000 kgf/cm² (Flexão)

Argamassa e argamassa com bambu: EX=2.000.000 kgf/cm² (Tração) (aço); EY= 2.000.000 kgf/cm² (Flexão) (aço); EZ=2.000.000 kgf/cm² (Flexão) (aço).

Foram considerados os seguintes Limites de Resistência:

Bambu: Tração st= 3.515 kgf/cm² ; Flexão sf= 2.760 kgf/cm²

Argamassa e argamassa com bambu: Tração st= 5000 kgf/cm² (aço CA 50); Flexão sf= 5000 kgf/cm² (aço CA 50).

O principal esforço estrutural que a estrutura poderá sofrer é devido à carga de vento, visto que as cargas das esteiras de bambu e do revestimento de sapé podem ser negligenciadas devido ao pouco peso. Supõe-se que em condições de chuva todo o sapé com a esteira pesem, no máximo, 100 kgf, sendo este peso desprezível quando comparado com a carga da estrutura em compressão. Os esforços de tração que a estrutura poderá sofrer são muito mais importantes, devido aos ventos de grande intensidade que acometem a região de Campinas. Foi considerada carga estrutural própria de 500 kgf (vigas e pilares de bambus, argamassa, barras de aço, esteira de bambu e sapé), distribuída sobre a estrutura.

Segundo a Norma NBR 6123, referente à determinação de cargas de vento em estruturas, a força sobre os nós de uma estrutura é determinada pela seguinte fórmula:

$$CV = 0,613 \cdot V_k^2 \cdot c_p \cdot A_f \quad (1)$$

Onde:

CV = carga do vento, kgf;

V_k = velocidade característica do vento, m/s;

c_p = coeficiente de pressão;

A_f = área frontal, m².

Sendo:

$$V_k = V_a \cdot S_1 \cdot S_2 \cdot S_3 \quad (2)$$

Onde: V_a = velocidade básica (tabelada por região), m/s;
 S_1 = fator topográfico; S_2 = fator de rugosidade; S_3 = fator estatístico.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

De acordo com a norma, tem-se:

Pelo mapa fornecido pela norma tem-se como velocidade básica para Campinas a velocidade de $V_a=45$ m/s \rightarrow 162 km/h.

Fator topográfico para talude, seguindo a fórmula determinada para inclinações maiores do que 17° :

$$S_1=1+(2,5-z/d)*0,31 \quad (3)$$

Onde: z = altura da construção, m;
 d = desnível do talude, m.

Portanto para $z = 5$ m, e desnível de 2m tem-se que $S_1= 1,0$.

Fator de rugosidade: considerando que a construção pertence à categoria 4, e classe 1 então $S_2=0,79$.

De acordo com o Fator estatístico tem-se $S_3=0,95$.

Então: $V_k=45*1,0*0,79*0,95= 34$ m/s

Considerando-se que a estrutura é simétrica, e é orientada no sentido leste-oeste, as direções de ataque do vento tem a mesma reação na estrutura, assim: considerando vento a 0° e 90° , em relação à estrutura tem-se pela norma: $C_p = -1,3$ (sucção)

Área frontal de cada água furtada: $A_f= 5$ m². Pela **Figura 7**, percebe-se que o projeto arquitetônico gerou uma área excedente frontal ao ataque do vento; esta área é equivalente a $\frac{1}{2}$ da área de duas águas furtadas, $A_f= 5$ m². Assim, a área total de ataque pelo vento é de $A_{ft}= 10$ m².

$$C_v=0,613*34^2*1,3*10 = 9212 \text{ kgf.}$$

As forças aplicadas à estrutura são essencialmente de sucção, ou seja, no sentido de arrancar a estrutura de seus suportes, já que as brocas de argamassa são representadas por engastamentos sem nenhuma liberdade. Assim sendo, as principais preocupações se referem aos esforços de tração e flexão nos elementos. Considerou-se que esta solicitação seja dividida em 4 esteiras completas; os pontos de aplicação desta força foram considerados como se fossem atuantes no baricentro das mesmas. Para efeito de cálculo cada uma destas forças foi dividida nos três nós de cada esteira triangular, como mostra a **Figura 7**. Fazendo a divisão de forças em cada nó, como indicado na **Figura 5**, e considerando que cada esteira está inclinada 40° , como mostra a **Figura 6**, os valores são apresentados na Tabela 3, e considerando as propriedades mecânicas dos bambus, apresentadas na Tabela 4 (BERALDO, 1991), serão consideradas os pilares como tubos com diâmetro externo de 12 cm e espessura da parede de 4 cm, enquanto as vigas serão consideradas como tubos de diâmetro externo de 7.5 cm e espessura da parede de 2 cm, estes elementos são intercalados a cada 25 cm por um elemento de disco maciço para simular o nó, para as vigas com diâmetro de 7.5 e altura do disco de 0.5 cm, e para os pilares com diâmetro de 12 cm e altura do disco de 1 cm, serão considerados elementos mistos os bambus com preenchimento de concreto armado, assim para os pilares serão considerados cilindros mássicos com características do bambu e do concreto, tendo altura de 70 cm, e

diâmetro de 12 cm, e as vigas com altura de 50 cm e diâmetro de 7.5 cm, **Figura 5**. Nos pilares e nas vigas, as extremidades foram preenchidas com argamassa, sendo 70 cm para os pilares e 50 cm para as vigas. Nestas aproximações, e considerando a utilização do software ANSYS 5.2 ED, foram considerados estes elementos estruturais como sendo elementos PIPE 16 para os tubos e para os discos, sendo que para os discos a espessura do tubo foi aproximada para 99% do raio do tubo, o que perfaz uma aproximação viável para cálculo realizado pelo ANSYS. Os elementos da estrutura foram divididos em vigas e pilares, conforme mostra a **Tabela 2**.

Após o processamento dos dados pelo software ANSYS 5.2, foram obtidos os gráficos de Tensão de Von Mises (composição de Tensões principais, flexão e torção tridimensionais), e da tensão de flexão máxima. Pela **Figura 9** pode-se obter a localização e o valor da Máxima tensão de Von Mises, valores positivos significam tração, negativos compressão. Considerando-se que a sollicitação máxima das peças se dá como tração de 1095 kgf/cm², tem-se que a estrutura suporta tal sollicitação, visto sua mínima resistência à tração ser de 1265 kgf/cm² (BERALDO, 1991).

Na **Figuras 9** tem-se a localização e os valores das máximas tensões de flexão, sendo obtido o valor de 3109 kgf/cm², valor este que supera o valor mínimo para a resistência a flexão que é de 763 kgf/cm². No entanto, nos pontos onde ocorre esta sollicitação existe um reforço interno de argamassa, sendo que na tração o aço trabalha suportando estas sollicitações, considerando que nas regiões em sollicitação existem barras de aço CA 50 de ½” no pilar e ¼ dobrada na viga, perfazendo ½” tem-se uma área de aço de 1,26 cm² para o pilar e 1,26 cm² para a viga. Considerando-se o limite de 5000 kgf/cm² do aço CA50, tem-se uma carga suportável de 6300 kgf, **Figura 10**. Observa-se que a máxima carga na flexão é de 3184 kgf, portanto, a argamassa armada suporta a sollicitação e, conseqüentemente, a estrutura torna-se viável tecnicamente.

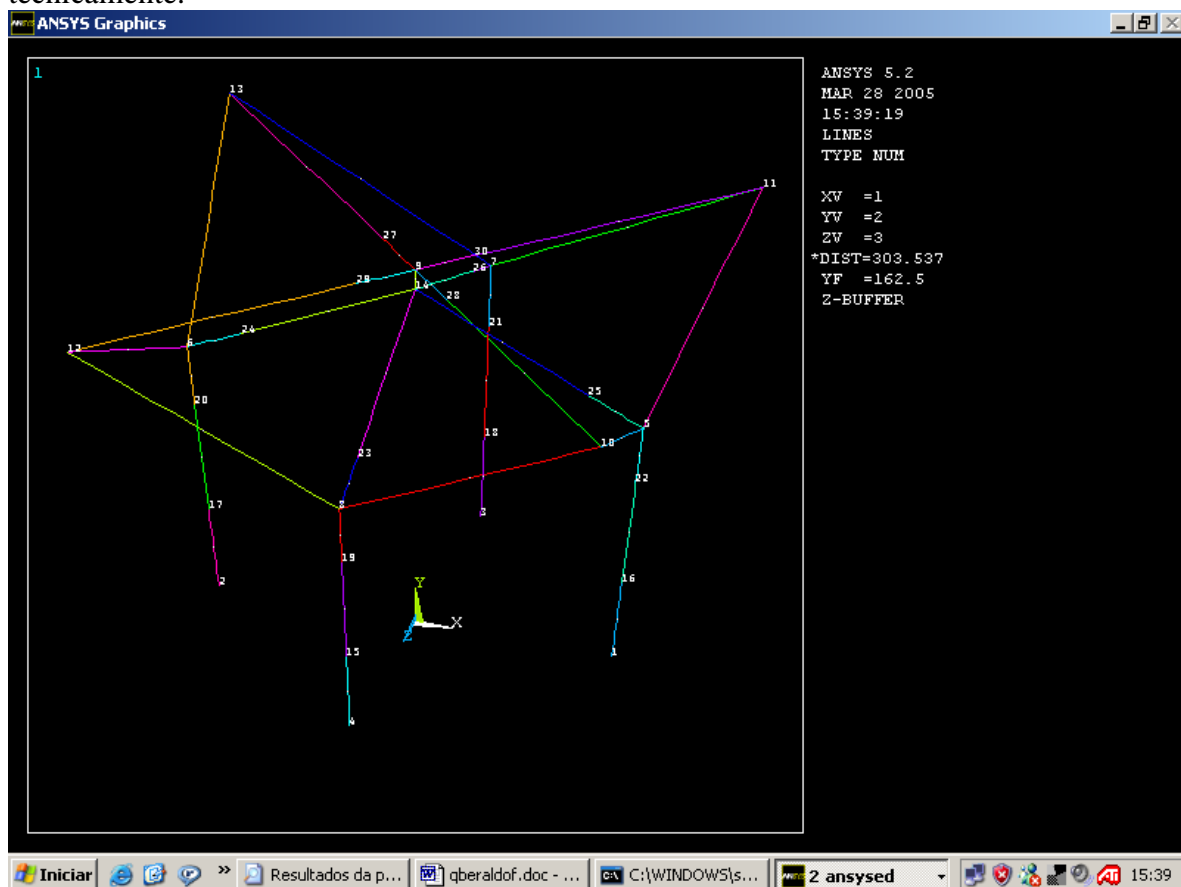


Figura 2- Montagem da estrutura (nós).

Tabela 1- Coordenadas dos nós.

Número do nó	Coordenada X (cm)	Coordenada Y (cm)	Coordenada Z (cm)
1	162	0	0
2	-162	0	0
3	0	0	-162
4	0	0	162
5	188	216	0
6	-188	216	0
7	0	216	-188
8	0	216	188
9	0	325	0
10	220	325	200
11	220	325	-200
12	-220	325	200
13	-220	325	-200
14	0	307	0
15	0	69	170
16	170	69	0
17	-170	69	0
18	0	69	-170
19	0	164	182
20	-182	164	0
21	0	164	-182
22	182	164	0
23	0	238	143
24	-143	238	0
25	143	238	0
26	0	238	-143
27	-37	325	-34
28	37	325	34
29	-37	325	34
30	37	325	-34

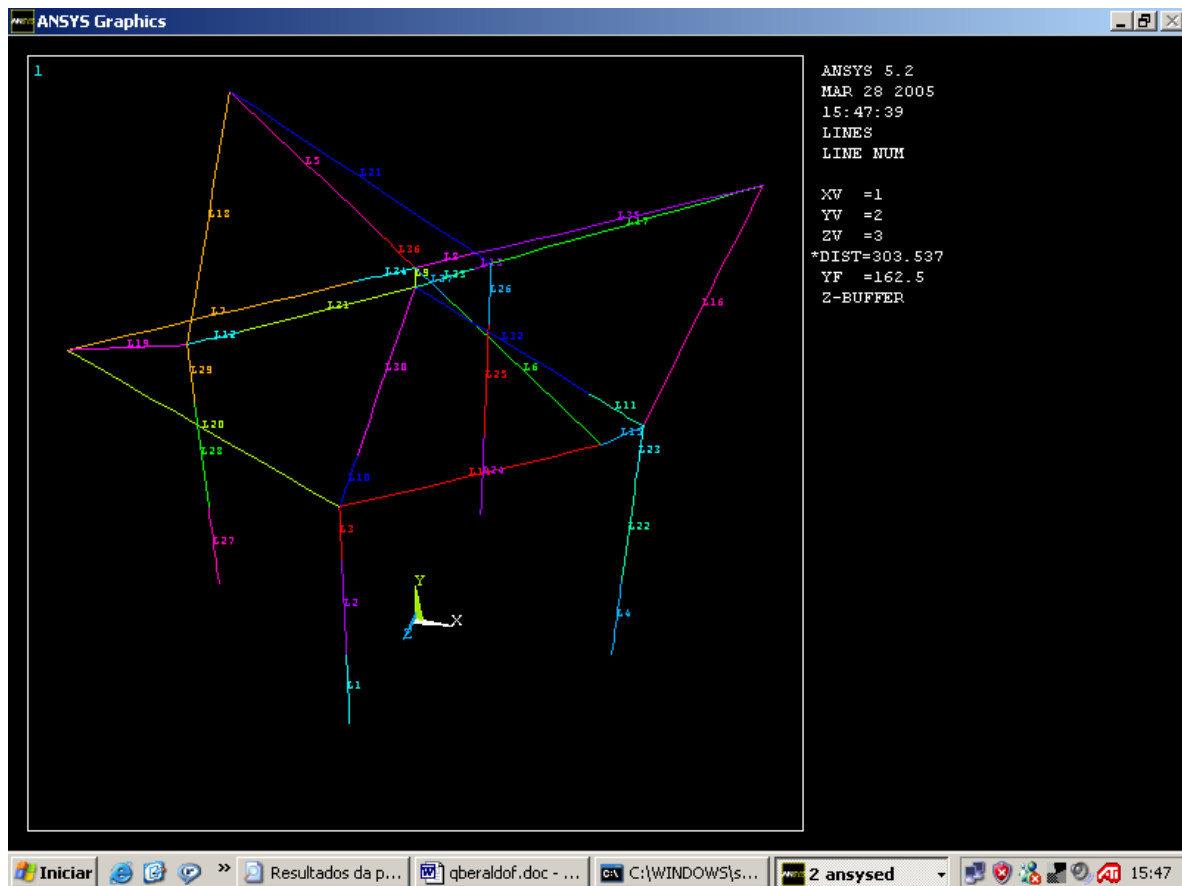


Figura 3. Montagem da estrutura (vigas e pilares).

Tabela 2. Características das vigas e pilares

Número da Linha	Comprimento (cm)	Tipo de Elemento
1	69.6	1
2	95.7	1
3	52.2	1
4	69.6	1
5	247.	2
6	247.	2
7	247.	2
8	50.5	2
9	18.0	1
10	50.1	2
11	50.1	2
12	50.1	2
13	50.1	2
14	246.	2
15	230.	2
16	230.	2
17	246.	2

18	230.	2
19	230.	2
20	246.	2
21	246.	2
22	95.7	1
23	52.2	1
24	69.6	1
25	95.7	1
26	52.2	1
27	69.6	1
28	95.7	1
29	52.2	1
30	159.	2
31	159.	2
32	159.	2
33	159.	2
34	50.5	2
35	247.	2
36	50.5	2
37	50.5	2

Obs: Elemento 1=Pilar; Elemento 2=Vigas

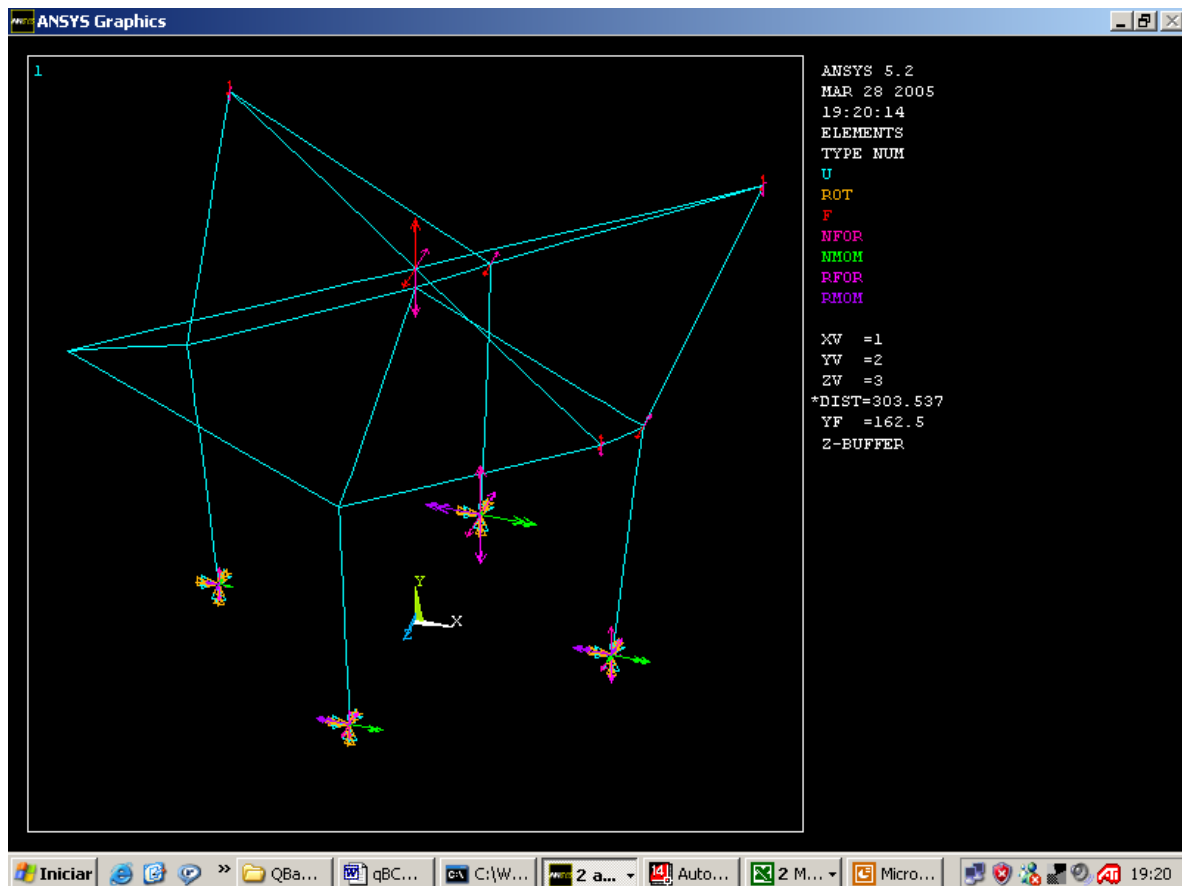


Figura 4. Sistema de forças e reações forças (U, restrição em deslocamento; Rot, restrição em rotação; F, força; NFor, força normal; MMom, momento normal; RFor, Força de Reação; RMom, momento de reação).

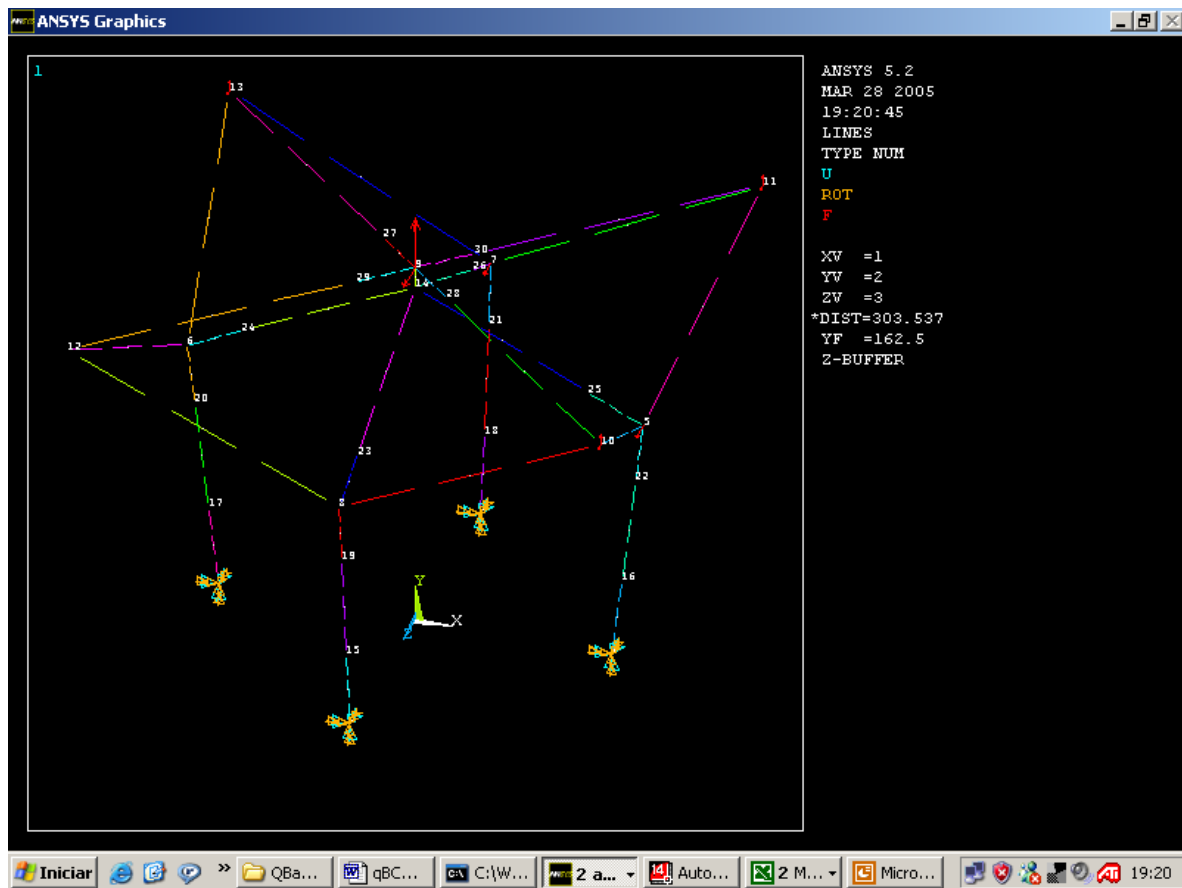


Figura 5. Divisão das vigas e pilares em elementos (nós e internós do bambu).

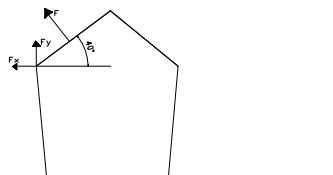


Figura 6. Disposição das forças em relação às esteiras de bambu.

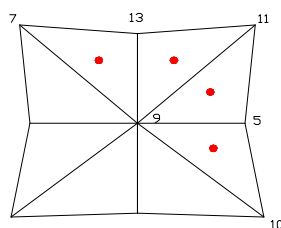


Figura 7. Baricentros das coberturas, os pontos vermelhos indicam os pontos de aplicação da força resultante, os números indicam os nós onde as componentes das forças são distribuídas.

Tabela 3. Disposição e Valores das forças.

Nó de aplicação da força	Componente da Força	Valor (kgf)
5	FY	991.0
5	FZ	1175.00
7	FY	991.0
7	FZ	1175.00
9	FY	2480.0
9	FZ	2938.0
10	FY	495.00
10	FZ	586.00
11	FY	495.00
11	FZ	586.00
13	FY	495.00
13	FZ	586.00

Obs: $F_x = F \cdot \cos(40)$; $F_y = F \cdot \sin(40)$

Tabela 4. Características mecânicas do Bambu (BERALDO, 1991).

	Resistência a Tração (kgf/cm ²)	Resistência a Flexão (kgf/cm ²)	Módulo de Elasticidade a Tração (kgf/cm ²)	Módulo de Elasticidade a Flexão (kgf/cm ²)
Máximo	3515	2760	316395	220000
Mínimo	1265	763	140620	105465

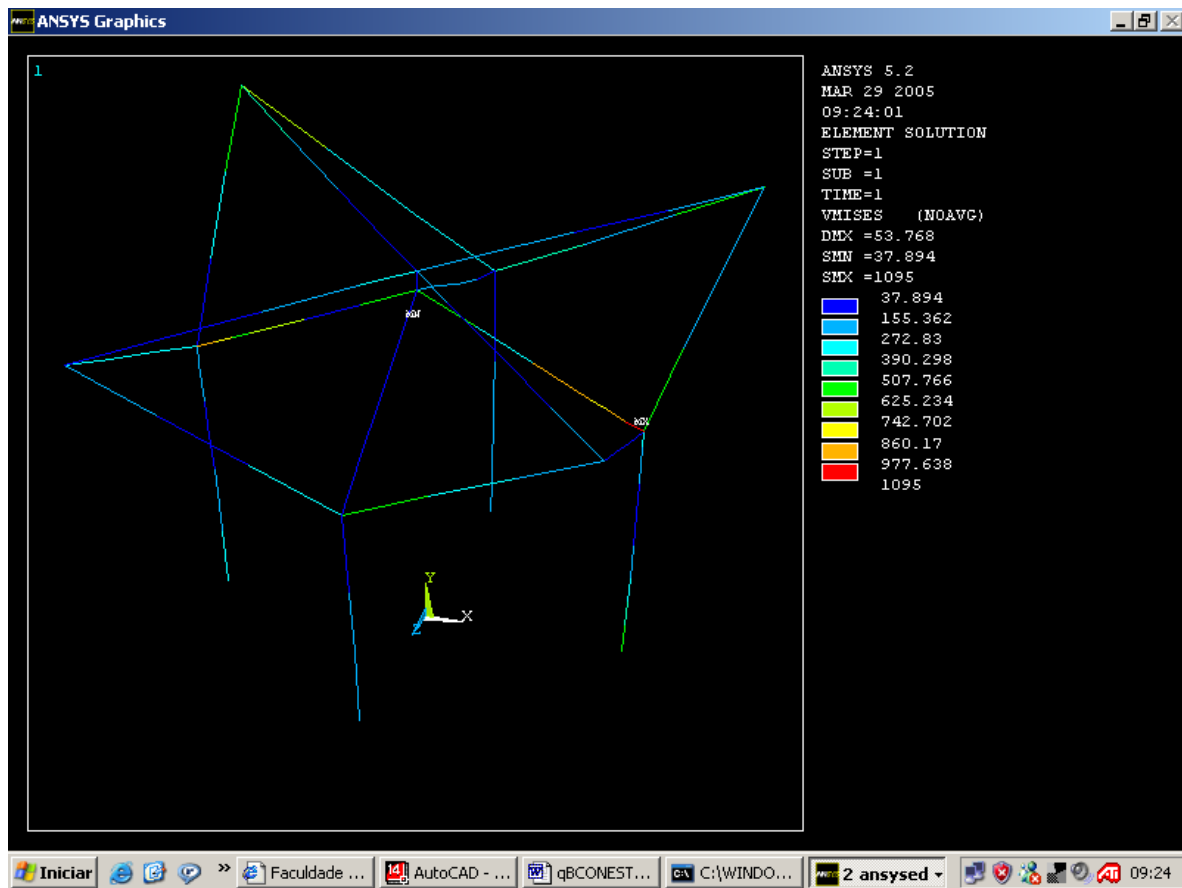


Figura 8. Tensão de Von Mises na estrutura, vista isométrica, valores em kgf/cm^2 .

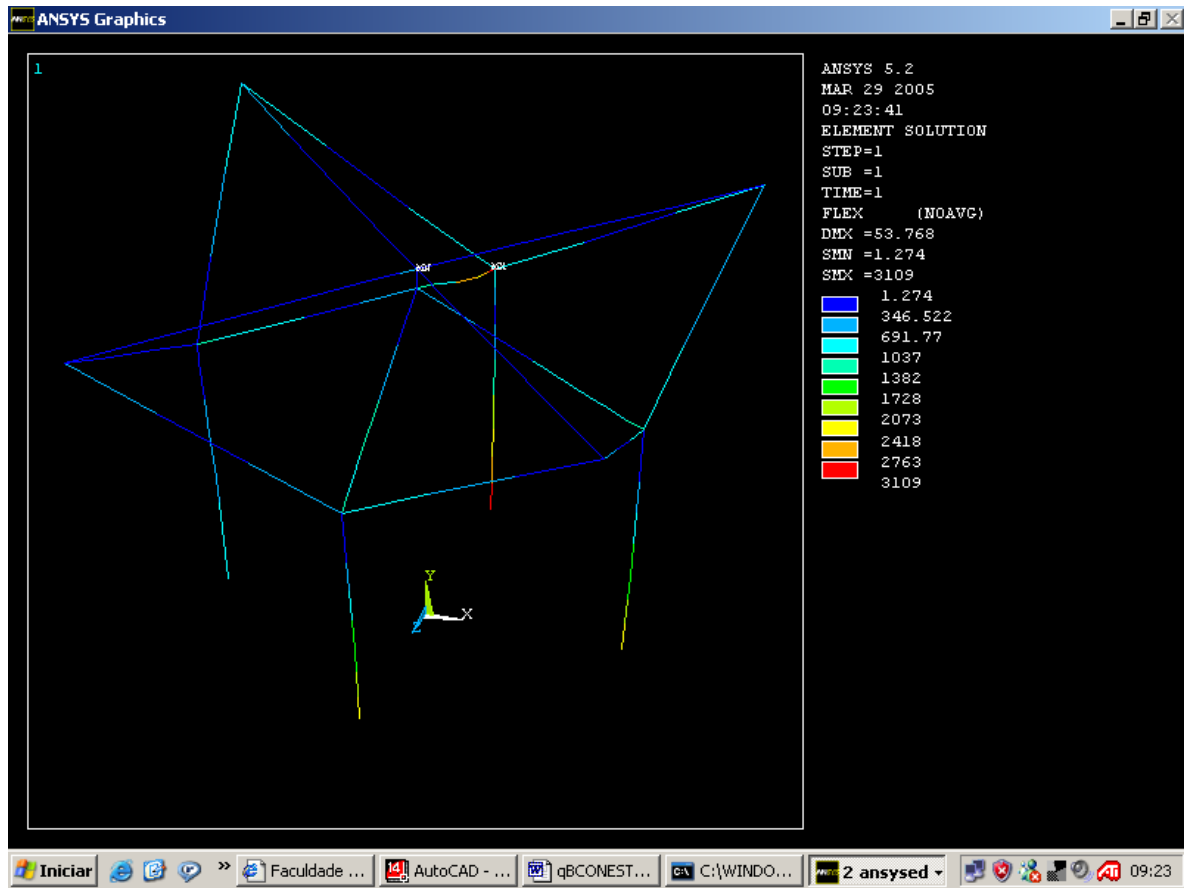


Figura 9. Tensão de flexão, vista isométrica, valores em kg/cm^2 .

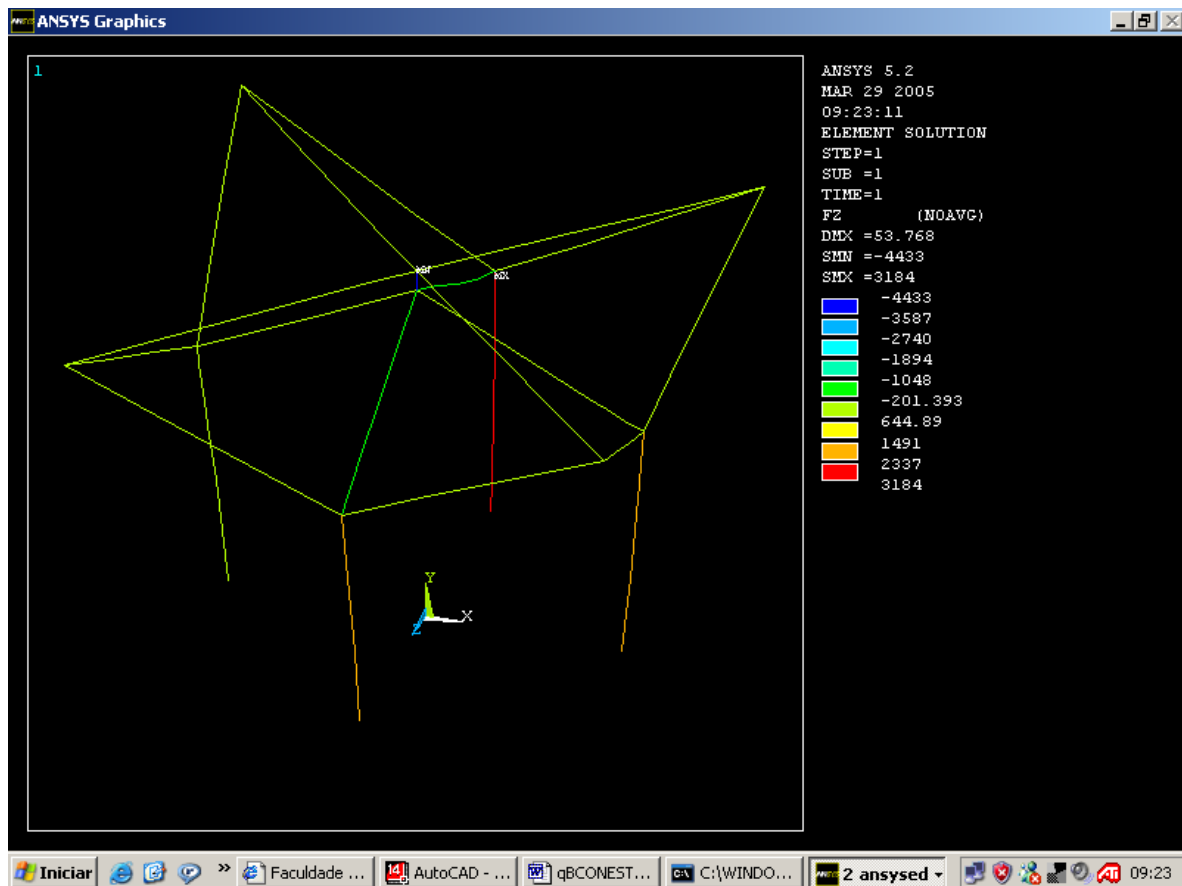


Figura 10. Carga máxima na flexão, valores em kgf.

CONCLUSÕES

Baseado nos resultados obtidos percebe-se que o bambu, na estrutura analisada, suportaria a solicitação aplicada pelo vento, por haver sido devidamente reforçado. A metodologia de cálculo prescrita pela norma NBR 6123 é de simples aplicação tendo a característica de privilegiar a segurança, devido aos fatores de segurança de valor elevado. O método de elementos finitos se mostrou rápido e prático, possibilitando efetuar-se a análise da estrutura com precisão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT. **NBR 6123: Forças devidas ao vento em edificações**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1988.
- ALBIERO, D; SILVA, M. J. M. **Projeto de uma estrutura de Madeira para Telhado**. 38 p. Relatório Técnico para avaliação da Disciplina FA976, Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas, 2001.
- BERALDO, A. L.; NAAS, I. A.; FREIRE, W. J. **Construções Rurais: Materiais**. Rio de Janeiro: Editora LTC, 1991.
- BERALDO, A. L. **O bambu**. <http://: www.brasilis.pro.br >, acesso em 10/01/2006.
- BLESSMANN, J. **O vento na engenharia estrutural**. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 1995.
- HIDALGO LOPEZ, O. **Bamboo: the gift of Gods**. Mc Graw Hill. 2003.

MEEK, J. L. **Matrix structural analysis**. 1º Ed. McGraw- Hill Inc, New York. 1971.

MOREIRA, L. E.; GHAVAMI, K. **Dimensionamento de estruturas de bambu**. In Materiais não convencionais para construções rurais. Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 26. SBEA, 1997.

SEGERLIND, L. J. **Applied finite element analysis**. 2º Ed. John Wiley and Sons, New York. 1984.