

## 5. Modelagem Computacional

Com o avanço da tecnologia da informação a modelagem computacional das estruturas mediante programas comerciais vem se tornando uma constante realidade nas últimas três décadas, principalmente mediante o uso do método dos elementos finitos. Com estes recursos tornou-se possível a solução rápida e precisa de treliças espaciais, regulares ou não, além de outras estruturas complexas.

A partir dos parâmetros definidos no capítulo anterior e em bibliografia foram elaboradas diversas geometrias de grelhas de dupla camada, e calculadas através do programa SAP2000 versão 12, com o objetivo de estimar os vãos limites suportados e a área total de cobertura proporcionada pela estrutura em cada condição.

Dentre os diversos tipos de geometria que podem ser construídos com treliças espaciais duas foram escolhidas como tipologias usuais: treliças vinculadas às bordas e treliças sobre pilares com capitéis. Além disso, como o sistema proposto possibilita variabilidade arquitetônica, foi realizado um modelo de treliça espacial curva.

Para o cálculo das estruturas foram adotados os parâmetros geométricos médios obtidos através das medições realizadas para os corpos-de-prova de compressão de colmos inteiros de *Phyllostachys aurea*.

- Diâmetro dos elementos: 50mm;
- Espessura das paredes 5,5mm;
- Comprimento das barras entre eixos dos nós 1,5m (de acordo com o explicitado no capítulo anterior, seção quatro, item três).

Como nos ensaios ora realizados não foi possível obter módulos de elasticidade e coeficientes de Poisson, os seguintes parâmetros foram obtidos em bibliografia (Cruz, 2002), de acordo com a classe de material utilizada (tratados por banho quente) tendo sido feita uma média entre os valores

descritos para base, meio e topo, uma vez que o bambu utilizado neste trabalho não fazia distinção de posicionamento no colmo:

- Módulo de elasticidade à tração: 19,67GPa com diafragma e 23,16GPa sem diafragma;
- Módulo de elasticidade à compressão: 21,30GPa com diafragma e 22,67GPa sem diafragma;
- Coeficiente de Poisson à tração: 0,35 com diafragma e 0,25 sem diafragma;
- Coeficiente de Poisson à compressão: 0,25 com diafragma e 0,28 sem diafragma.

Como o programa possui apenas um campo para a definição das relações constitutivas dos materiais, foram adotados os menores valores entre os anteriormente descritos: 19,67GPa para módulo de elasticidade e 0,25 para coeficiente de Poisson.

### 5.1. Trelças Espaciais de Configuração Plana

Trelças espaciais podem ou não estabelecer vínculos perimetrais a outras estruturas, funcionando, geralmente, exclusivamente como coberturas e, portanto responsáveis somente por resistir a esforços verticais. Neste trabalho foram modeladas diferentes geometrias de coberturas contemplando estas diferentes classes: Trelça espacial plana vinculada nos bordos (Figura 75a) e trelça espacial plana desvinculada nos bordos com capitéis (Figura 75b).

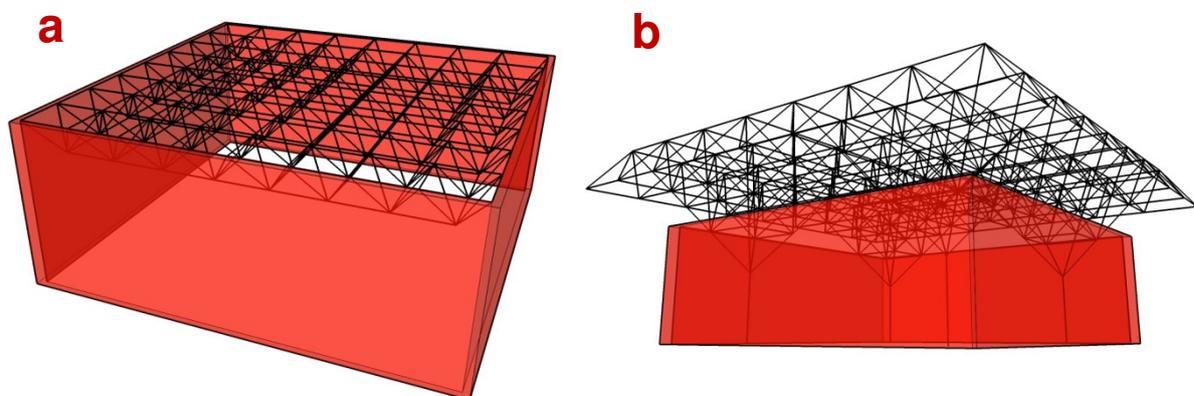


Figura 75: Configurações planas de trelças espaciais a) Vinculada a uma estrutura perimetral e b) Desvinculada no perímetro, sobre capitéis.

### 5.1.1.

#### **Estudo do Carregamento**

O carregamento das estruturas foi montado segundo as normas brasileiras NBR 8800 (Projeto e execução de Estruturas de aço de Edifícios) e NBR6123 (Forças devidas ao Vento em Edificações). No intuito de permitir a comparação entre modelos foram adotadas telhas de aço conforme definidas por Moreira (1991), embora existam atualmente inúmeras soluções mais leves, duráveis e amigáveis ao meio-ambiente. As telhas devem estar apoiadas sobre uma grelha, que pode também ser confeccionada em bambu, montada sobre a camada superior das estruturas. As ações permanentes e variáveis foram consideradas a partir dos seguintes valores:

- Cobertura em telhas de aço:  $0,15 \text{ kN/m}^2$ ;
- Grelha de apoio das telhas (bambu):  $0,04 \text{ kN/m}$ ;
- Sobrecarga da cobertura:  $0,25 \text{ kN/m}^2$ ;
- Peso dos elementos de ligação (nó + 8 ponteiros completos):  $0,055 \text{ kN}$ ;
- Peso próprio por elemento do bambu reforçado (majorado em cerca de 50%, dada a heterogeneidade do material, considerou-se para efeito de cálculo a secção máxima obtida nos ensaios à compressão de colmos reforçados de  $1121,55 \text{ mm}^2$ ):  $0,01384 \text{ kN}$  (comprimento de 1,5m via programa) /  $0,011903 \text{ kN}$  (comprimento de 1,29m real).

#### **5.1.1.1.**

##### **Ação do Vento**

O efeito do vento foi analisado de uma forma global, não se atendo a detalhes localizados. Para o tratamento estatístico das ações de vento, considerou-se que os modelos propostos de estrutura seriam construídos nos arredores da PUC Rio. Segundo a NBR 6123 tem-se para esta região e de acordo com as características das estruturas:

- Velocidade básica do vento:  $V_0 = 38 \text{ m/s}$ ;
- Fator topográfico:  $S_1 = 1,0$ ;
- Fator de rugosidade: (Classe A, altura < 10m)  $S_2 = 0,78$ ;
- Fator estatístico: (Grupo 3)  $S_3 = 0,95$ ;

- Velocidade característica do vento:  $V_k = V_0 * S_1 * S_2 * S_3 = 28,2 \text{ m/s}$ ;
- Pressão dinâmica do vento:  $V_k^2/16 \cong 0,5 \text{ kN/m}^2$

Apenas um ângulo de incidência foi considerado ( $\alpha = 90^\circ$ ), uma vez que a relação entre as dimensões horizontais de todos os modelos é igual a um, apresentando portanto simetria. Considerando-se o ângulo de inclinação da cobertura entre  $0^\circ$  e  $5^\circ$  e que a relação entre a altura e a largura dos modelos é sempre menor que dois, tem-se os coeficientes de pressão e forma externos -1,0 e -0,5, relativos respectivamente à primeira e à segunda metade da cobertura de acordo com a incidência do vento (Figura 76a). O produto destes coeficientes pela pressão dinâmica resulta nas sucções  $0,5 \text{ kN/m}^2$  e  $0,25 \text{ kN/m}^2$ , distribuídas pelas respectivas áreas de influência (Figura 76b).

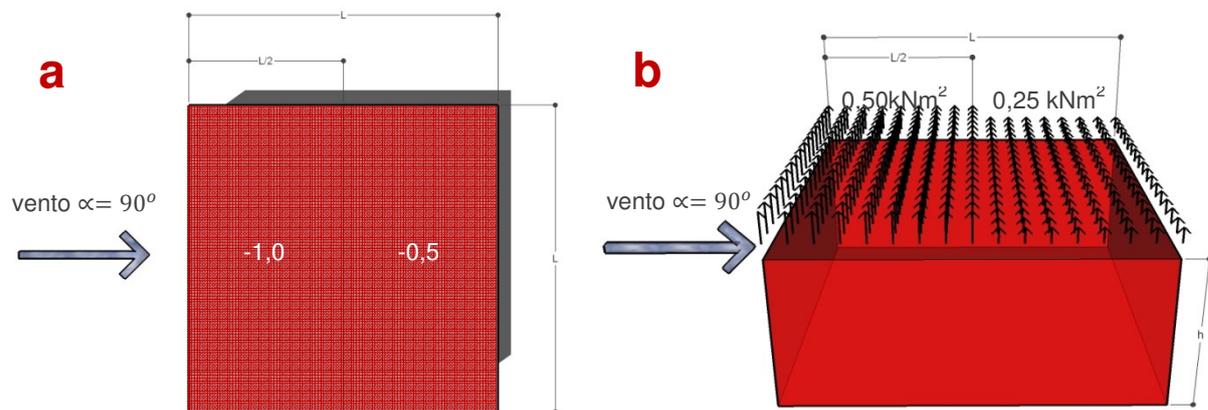


Figura 76: a) Coeficientes de pressão e forma externos em suas áreas de influência na cobertura. b) Sucções externas no telhado.

Para o coeficiente de pressão interno procedeu-se o cálculo expedito, encontrando-se as pressões (Figura 77a) e sucções (Figura 77b) resultantes consideradas nas diferentes combinações de carregamentos em estudo.

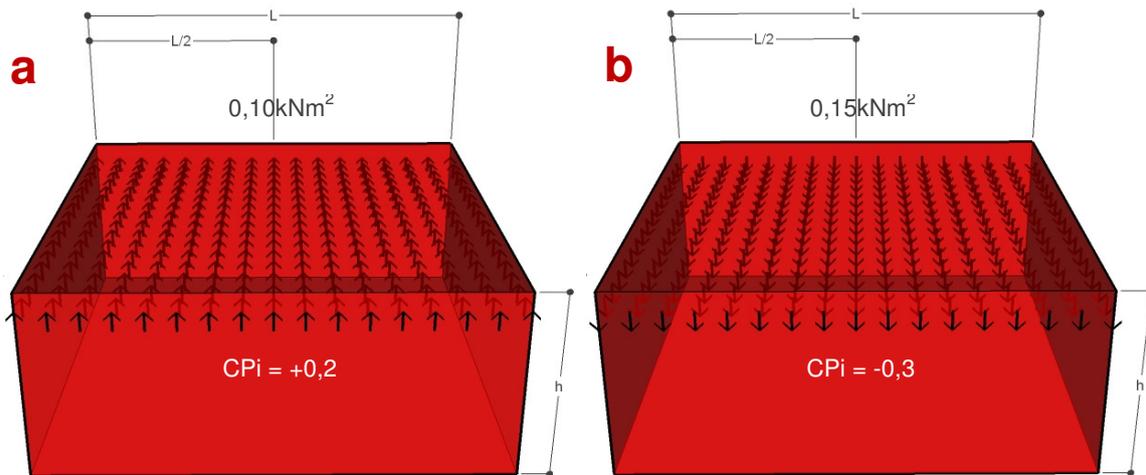


Figura 77: a) Pressão interna. b) Sucção interna.

Todas as ações foram aplicadas nos nós das estruturas. O peso próprio é calculado automaticamente pelo programa, utilizando os dados fornecidos acerca da geometria dos elementos de barra e sua massa específica ( $12\text{kN/m}^3$ ). O peso dos elementos de ligação foi aplicado a todos os nós, o peso da cobertura, a sobrecarga e os efeitos dos ventos foram aplicados na camada superior da estrutura, considerando-se para todos os elementos o pior caso entre as áreas de influência ( $2,25\text{m}^2$ ).

#### 5.1.1.2. Condições de Carregamento

As condições de carregamento foram montadas segundo a NBR 8800, que utiliza o Método dos Estados Limites para o dimensionamento de estruturas, fornecendo os coeficientes de combinação das ações para diversas situações desejadas, onde:

- $G$ : ações permanentes;
- $Q_1$ : ação variável predominante (vento);
- $Q_2$ : sobrecarga;
- $\gamma \geq 1$ : coeficiente de ponderação de cargas;
- $\phi < 1$ : coeficiente de resistência;
- $\psi$ : fatores de combinação de ações.

De acordo com o Método dos Estados Limites Últimos, o dimensionamento deve satisfazer à desigualdade expressa na eq. (5.1), a partir da qual foram montadas as combinações de carregamentos.

$$\gamma_{q_2} * \psi_2 * Q_2 + \gamma_{q_1} * Q_1 + \sum \gamma_g * G_i \leq \phi * R \quad \text{eq. (5.1)}$$

Combinações de Carregamentos:

- Combinação.1.  $1,3G + 1,4Q_{1a} + 1,5 * 0,75Q_2$  , para  $Q_{1a}$  = sucção externa + pressão interna (normal);
- Combinação.2.  $1,3G + 1,4Q_{1b} + 1,5 * 0,75Q_2$  , para  $Q_{1b}$  = sucção externa + sucção interna (normal);
- Combinação.3.  $1,3G + 1,4Q_2$  (normal);
- Combinação.4.  $1,0G + 1,4Q_{1a}$  (normal).

Todas as estruturas foram calculadas considerando os nós como rótulas perfeitas, exceto nos vínculos, nos quais as translações foram restritas. Apenas esforços de tração e compressão foram desenvolvidos nos elementos de barra e os deslocamentos consistiram em três translações avaliadas em cada nó. Os esforços de tração ficam limitados pela resistência dos nós e das ponteiros e os de compressão pela resistência dos nós e elementos de barra.

### 5.1.2.

#### **Treliças vinculadas nos bordos**

No intuito de avaliar os vãos máximos vencidos por este tipo de geometria foram elaborados modelos sucessivamente maiores e simétricos de 25, 36, 49 e 64 (Figura 78) módulos piramidais. Nesta secção serão expostos os resultados obtidos para o maior dos modelos, com 12m de vão e 144m<sup>2</sup> de área coberta. Para simplificar as tabelas de carregamentos, os nós serão divididos em dois grupos, relativos à camada superior, que recebe os elementos de cobertura e à camada inferior (Tabela 25).

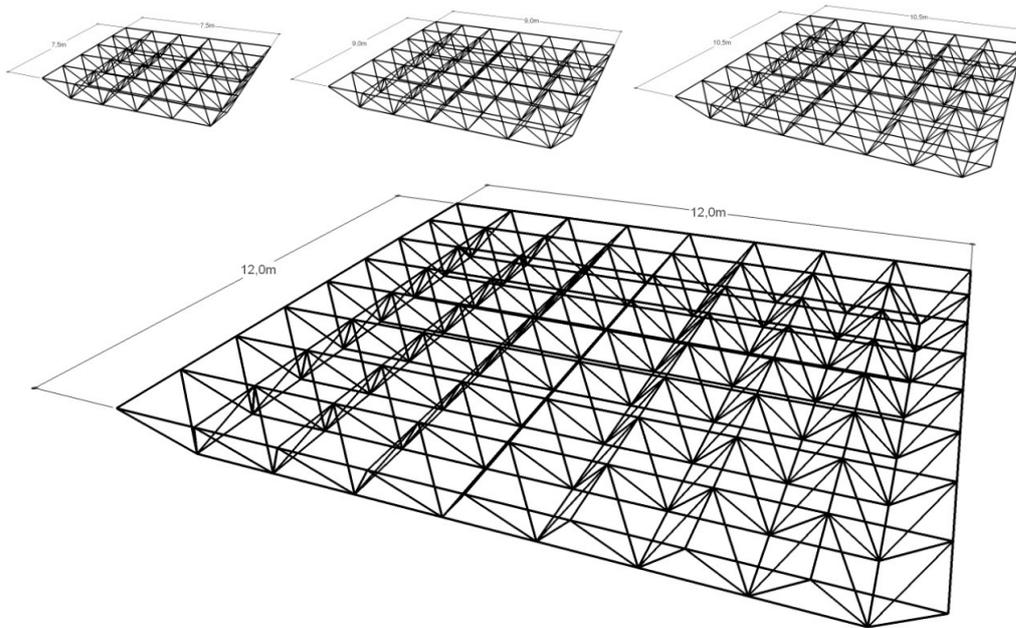


Figura 78: Treliças com 25, 36, 49 e 64 módulos piramidais.

Tabela 25: Carregamentos nodais na estrutura.

TIPO DE CARREGAMENTO	CARREGAMENTOS NODAIS NA ESTRUTURA	
	CAMADAS	
	SUPERIOR (81 nós)	INFERIOR (64 nós)
1. SUCÇÃO EXTERNA (0,5kN/m <sup>2</sup> de 1 a 45 e 0,25kN/m <sup>2</sup> de 46 a 81)	1,125	
2. PRESSÃO INTERNA (0,1kN/m <sup>2</sup> )	0,225	
3. SUCÇÃO INTERNA (0,15kN/m <sup>2</sup> )	0,3375	
<b>Q<sub>1a</sub></b> (1+2)	1,35	
<b>Q<sub>1b</sub></b> (1-3)	0,7875	
4. LIGAÇÕES (0.055 kN)	0,055	0,055
5. GRELHA DE COBERTURA (0.04kN/m)	0,12	
6. TELHA DE AÇO (0.15kN/m <sup>2</sup> )	0,3375	
7. <b>Q<sub>2</sub></b> SOBRECARGA (0.25kN/m <sup>2</sup> )	0,5625	
<b>G</b> (sem o peso próprio) (4+5+6)	0,5125	0,055

A estrutura foi avaliada de acordo com as condições de carregamento explicitadas na sub-seção anterior. A Figura 79 mostra as geometrias deformadas, em escala deliberadamente exagerada de modo a facilitar a visualização, decorrentes das diferentes condições de carregamentos a que a estrutura foi submetida. Os resultados máximos relativos aos esforços de tração e compressão, bem como aos deslocamentos nodais verticais e horizontais estão listados na Tabela 26.

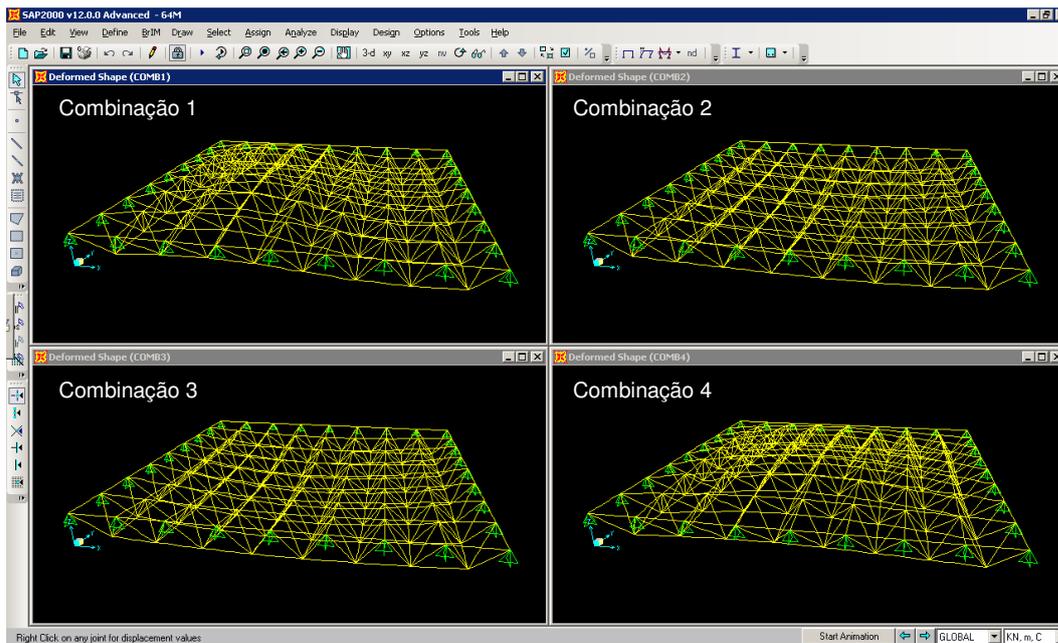


Figura 79: Deformadas das combinações 1, 2, 3 e 4 no programa SAP2000.

Tabela 26: Esforços e deslocamentos máximos.

RESULTADOS	CONDIÇÃO DE CARREGAMENTO			
	1	2	3	4
Esforço máximo de Tração (kN)	0,968	4,671	9,31	2,573
Esforço máximo de Compressão (kN)	1,221	2,219	3,789	5,571
Deslocamento vertical máximo (mm)	0,937	5,523	12,652	6,885
Deslocamento horizontal máximo (mm)	0,358	1,369	2,548	1,606

Os esforços máximos de tração, provenientes da combinação 3, são absorvíveis pelos elementos propostos, de acordo com os parâmetros esperados de resistência dos nós e ponteiros a esta solicitação (10kN). Os maiores esforços de compressão, advindos da combinação 4 também atendem aos parâmetros estabelecidos de estabilidade dos colmos e resistência das ligações. Os deslocamentos verticais máximos são inferiores a um trezentos avos do vão (40mm), de modo que não comprometem a funcionalidade ou a estética da estrutura.

É interessante notar, que em comparação com o trabalho apresentado por Moreira (1991), foi possível, com geometria e condições de carregamento semelhantes, vencer o mesmo vão utilizando ligações feitas com bambu ao invés de aço, muito menos material, uma vez que a espécie *Phyllostachys aurea* é consideravelmente mais esbelta que a *Dendrocalamus giganteus*, e com inércia (da treliça) cerca de um quarto inferior, dado o comprimento dos colmos.

### 5.1.3. Trelças apoiadas sobre capitéis

Com base nos resultados obtidos na secção anterior foi realizado um modelo com 144m<sup>2</sup> de área coberta, com 6m de vão e 3 m de balanço, apoiado em quatro pontos.

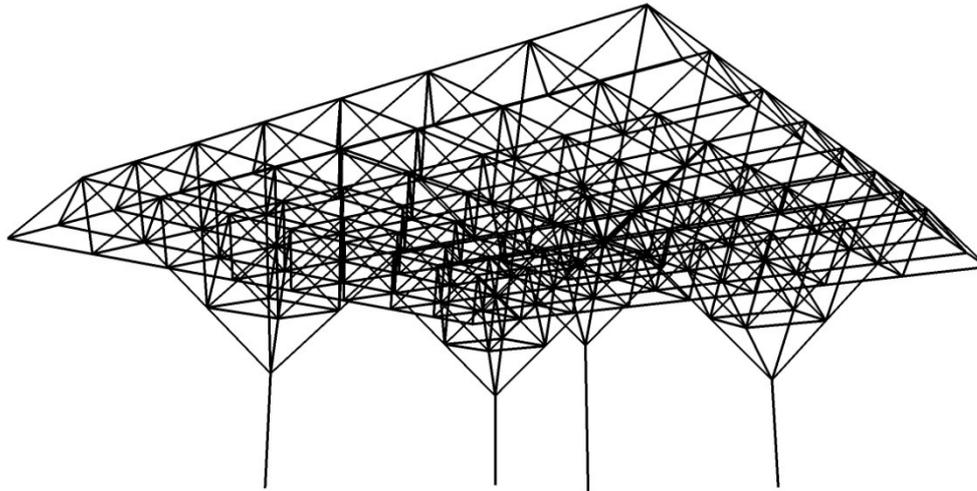


Figura 80: Trelça plana com capitéis, 144m<sup>2</sup> de área coberta.

Tabela 27: Carregamentos nodais na estrutura.

TIPO DE CARREGAMENTO	CARREGAMENTOS NODAIS NA ESTRUTURA	
	CAMADAS	
	SUPERIOR (64 nós)	INFERIORES (101 nós)
1. SUCÇÃO EXTERNA (0,5kN/m2 de 1 a 32 e 0,25kN/m2 de 33 a 64)	1,125	
2. PRESSÃO INTERNA (0,1kN/m2)	0,225	
3. SUCÇÃO INTERNA (0,15kN/m2)	0,3375	
<b>Q<sub>1a</sub></b> (1+2)	1,35	
<b>Q<sub>1b</sub></b> (1-3)	0,7875	
4. LIGAÇÕES (0.055 kN)	0,055	0,055
5. GRELHA DE COBERTURA (0.04kN/m)	0,12	
6. TELHA DE AÇO (0.15kN/m2)	0,3375	
7. <b>Q<sub>2</sub></b> SOBRECARGA (0.25kN/m2)	0,5625	
<b>G</b> (sem o peso próprio) (4+5+6)	0,5125	0,055

A estrutura foi avaliada de acordo com a anterior, considerando as bases dos capitéis como vínculos com translações restritas. A Figura 81 mostra as geometrias deformadas em decorrência das diferentes condições de carregamentos a que a estrutura foi submetida. Os resultados máximos relativos

aos esforços de tração e compressão, bem como aos deslocamentos nodais verticais e horizontais estão listados na Tabela 28.

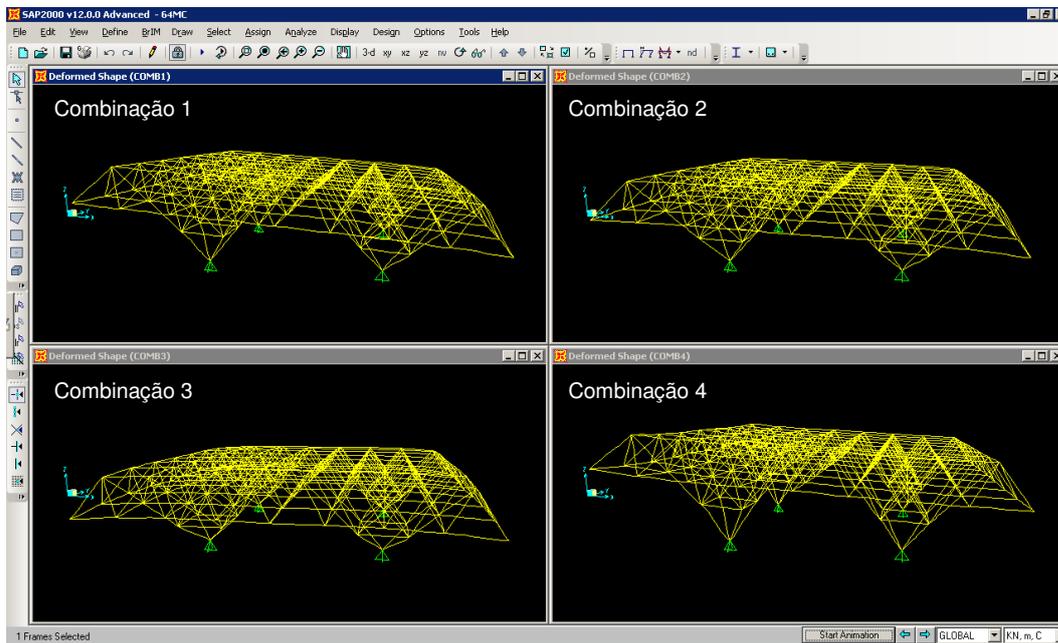


Figura 81: Deformadas das combinações 1, 2, 3 e 4 no programa SAP2000.

Tabela 28: Esforços e deslocamentos máximos.

RESULTADOS	CONDIÇÃO DE CARREGAMENTO			
	1	2	3	4
Esforço máximo de Tração (kN)	1,895	2,349	3,244	6,6
Esforço máximo de Compressão (kN)	2,816	7,339	10,112	2,171
Deslocamento vertical máximo (mm)	1,5	3,012	3,435	2,625
Deslocamento horizontal máximo (mm)	0,628	0,809	0,402	0,782

Os maiores esforços de compressão, advindos da combinação 3 estão localizados nos nós basais dos capitéis, que poderiam ser substituídos por outro tipo de ligação (nós de aço com geometria semelhante por exemplo) sem qualquer prejuízo ao sistema estrutural, no caso de se considerar o esforço de compressão máximo absorvido pelos nós de bambu laminado contraplacado igual ao de tração. Nesse caso o esforço máximo à compressão nos elementos de ligação de bambu passaria a ser de 9,752kN, dentro dos limites de solicitação. Entretanto, considerando que os nós tendem a resistir melhor à compressão que à tração, de acordo com o estabelecido na seção 2 do capítulo anterior, a estrutura atende aos parâmetros estabelecidos de estabilidade dos colmos e resistência das ligações. Os esforços máximos de tração, provenientes

da combinação 4, são absorvíveis pelos elementos propostos, de acordo com os parâmetros esperados de resistência dos nós e ponteiros a esta solicitação (10kN). Os deslocamentos verticais máximos são bastante inferiores a um trezentos avos do vão (20mm), não comprometendo o funcionamento ou a estética do sistema estrutural.

Extrapolando a situação de resistência das ligações de bambu a compressão para 20kN em equivalência à carga crítica de flambagem dos elementos de barra, foi elaborado um novo modelo com 324m<sup>2</sup> de área coberta com 9m de vão e 4,5m de balanço em todo o contorno.

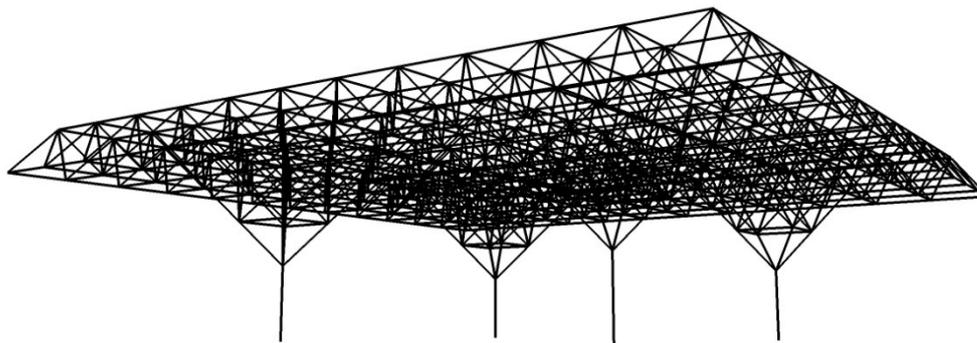


Figura 82: Treliça plana com capitéis, 324m<sup>2</sup> de área coberta.

Tabela 29: Carregamentos nodais na estrutura.

TIPO DE CARREGAMENTO	CARREGAMENTOS NODAIS NA ESTRUTURA	
	CAMADAS	
	SUPERIOR (144 nós)	INFERIORES (189 nós)
1. SUCÇÃO EXTERNA (0,5kN/m <sup>2</sup> de 1 a 64 e 0,25kN/m <sup>2</sup> de 65 a 144)	1,125	
2. PRESSÃO INTERNA (0,1kN/m <sup>2</sup> )	0,225	
3. SUCÇÃO INTERNA (0,15kN/m <sup>2</sup> )	0,3375	
<b>Q<sub>1a</sub></b> (1+2)	1,35	
<b>Q<sub>1b</sub></b> (1-3)	0,7875	
4. LIGAÇÕES (0,055 kN)	0,055	0,055
5. GRELHA DE COBERTURA (0,04kN/m)	0,12	
6. TELHA DE AÇO (0,15kN/m <sup>2</sup> )	0,3375	
7. <b>Q<sub>2</sub></b> SOBRECARGA (0,25kN/m <sup>2</sup> )	0,5625	
<b>G</b> (sem o peso próprio) (4+5+6)	0,5125	0,055

A Figura 83 mostra as geometrias deformadas em decorrência das diferentes condições de carregamentos a que a estrutura foi submetida. Os resultados máximos relativos aos esforços de tração e compressão, bem como aos deslocamentos nodais verticais e horizontais estão listados na Tabela 30.

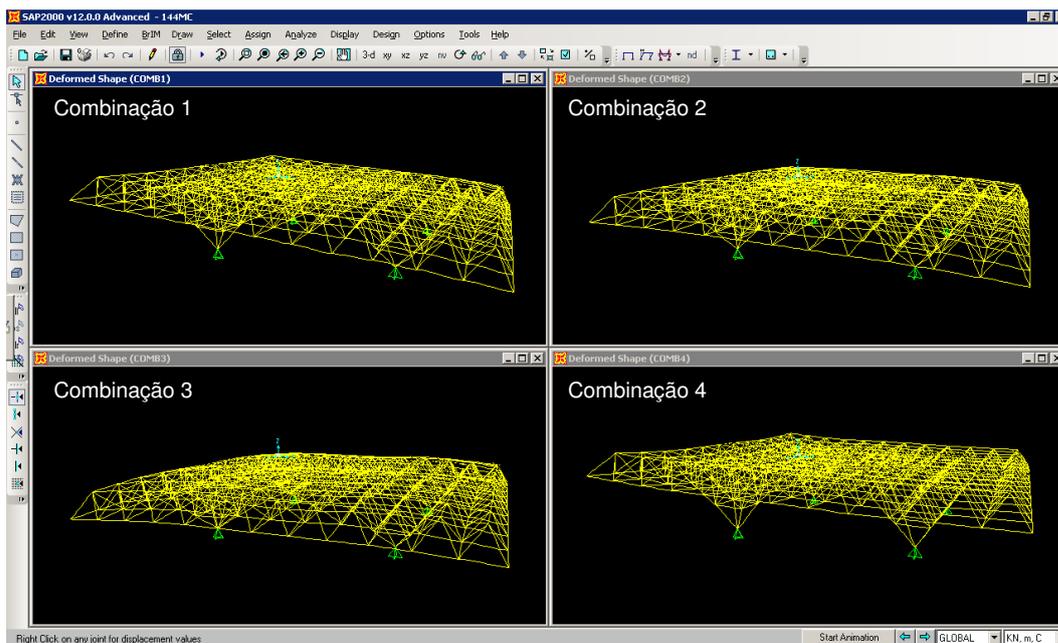


Figura 83: Deformadas das combinações 1, 2, 3 e 4 no programa SAP2000.

Tabela 30: Esforços e deslocamentos máximos.

RESULTADOS	CONDIÇÃO DE CARREGAMENTO			
	1	2	3	4
Esforço máximo de Tração (kN)	4,371	4,702	6,588	16,349
Esforço máximo de Compressão (kN)	6,103	17,451	24,821	4,283
Deslocamento vertical máximo (mm)	5,517	11,828	14,013	10,681
Deslocamento horizontal máximo (mm)	1,689	2,484	1,735	2,266

Os maiores esforços de compressão, provenientes da combinação 3 e de tração, advindos da combinação 4 estão localizados nos nós dos capitéis, que poderiam ser substituídos por outro tipo de ligação sem qualquer prejuízo ao sistema estrutural. Substituindo os módulos piramidais basais dos capitéis (20 nós em toda a estrutura, sendo 5 de cada base e 32 barras, 8 por base), os esforços máximos à tração e compressão nos elementos de ligação de bambu passariam a ser de respectivamente 8,91kN e 13,404kN, portanto dentro dos limites de solicitação. Nesse caso os nós poderiam ser substituídos por nós de aço com dimensões semelhantes (exceto espessura que seria consideravelmente inferior) às da ligação utilizada, ao passo que as barras por elementos reforçados de *Dendrocalamus giganteus* ou *Phyllostachys pubescens*, que por serem naturalmente mais robustos, teriam carga crítica de flambagem mais elevada, para o mesmo comprimento de barras. Os deslocamentos nodais

verticais estão bastante abaixo do limite de um trezentos avos do vão, não causando qualquer tipo de comprometimento ao sistema estrutural proposto.

## **5.2. Trelças Espaciais de Configuração Curva**

Conforme anteriormente explicitado, o sistema de pinça ideal associado à ponteira, para uso concomitante com os nós de bambu laminado contraplacado permite inclinações em duas direções, possibilitando variabilidade formal, mediante a variação do tamanho dos elementos de barra que compõem a estrutura. Variando o tamanho entre 1,2m e 1,8m das barras circunferenciais à estrutura é possível criar coberturas mais ou menos arqueadas, côncavas e convexas. A partir destes parâmetros existe a possibilidade de mudar o eixo da estrutura, viabilizando a construção de edificações cilíndricas, paredes retas, com curvas simples ou senoidais. Outra opção permitida pelas ligações é a formação de ângulos retos, possibilitando a criação de fechamentos retangulares e coberturas em duas águas, além de formas ogivadas, se associadas às modalidades curvas. É viável ainda variar o tamanho das barras nos dois sentidos, permitindo a criação de parabolóides hiperbólicas e outras formas orgânicas. Nesses casos, todavia a relação entre os tamanhos das barras e as curvaturas não é tão óbvia, requerendo modelagens específicas de geometria e comprimentos fora de padrão para os elementos.

No intuito de melhor ilustrar esta liberdade arquitetônica foi elaborado um modelo, com a curvatura máxima admitida pelas pinças, o que implica em módulos piramidais padrão com barras de 1,5m, inclinados entre si, compondo uma grelha externa em retângulos de 1,5m por 1,8m vencendo um vão de aproximadamente 9,5m (Figura 84).

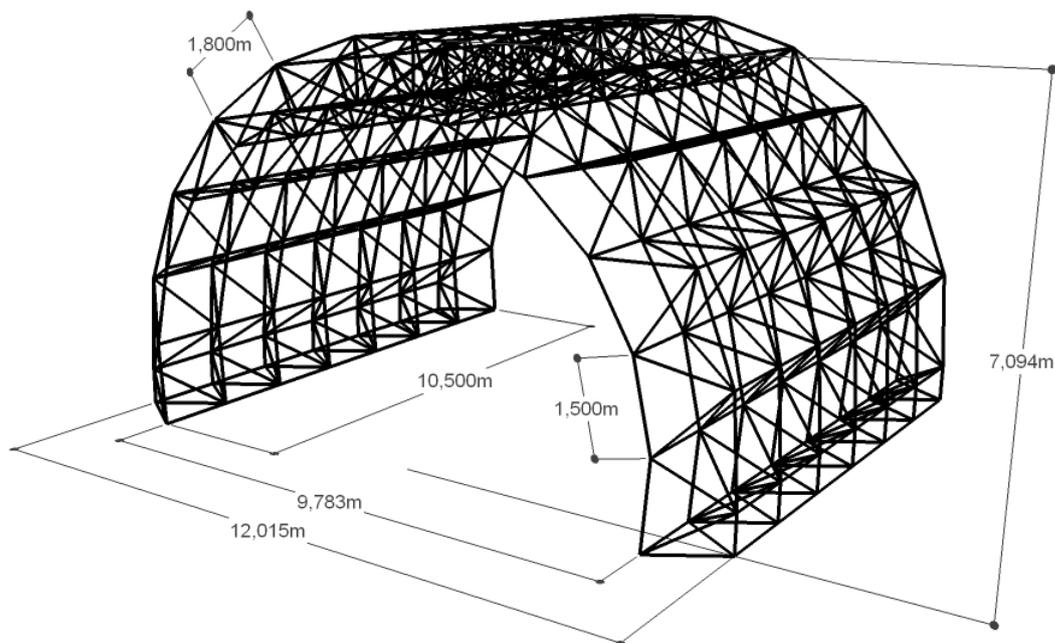


Figura 84: Treliça espacial de configuração curva.

O carregamento das estruturas foi montado segundo as normas brasileiras NBR 8800 (Projeto e execução de Estruturas de aço de Edifícios), no entanto não foram consideradas cargas variáveis, devidas ao vento, uma vez que para coberturas curvas com relação entre flecha e corda maiores que 0,2 (no caso tem-se aproximadamente 0,6), não há tabelas na norma de vento, constando a recomendação de análises dinâmicas específicas que fogem do escopo da presente dissertação. Assim sendo as ações permanentes adotadas foram as mesmas utilizadas para os demais modelos e somente a condição de carregamento 3 (anteriormente descrita) foi aplicada.

Tabela 31: Carregamentos nodais na estrutura.

TIPO DE CARREGAMENTO	CARREGAMENTOS NODAIS NA ESTRUTURA	
	CAMADAS	
	EXTERNA (98 nós)	INTERNA (104 nós)
1. LIGAÇÕES (0,055 kN)	0,055	0,055
2. GRELHA DE COBERTURA (0,04kN/m)	0,12	
3. TELHA DE AÇO (0,15kN/m <sup>2</sup> )	0,3375	
4. <b>Q<sub>2</sub></b> SOBRECARGA (0,25kN/m <sup>2</sup> )	0,5625	
<b>G</b> (sem o peso próprio) (1+2+3)	0,5125	0,055

A Figura 85 mostra a geometria deformada em decorrência da combinação de carregamentos a que a estrutura foi submetida. Os resultados máximos relativos aos esforços de tração e compressão, bem como aos deslocamentos nodais verticais e horizontais estão listados na Tabela 32.

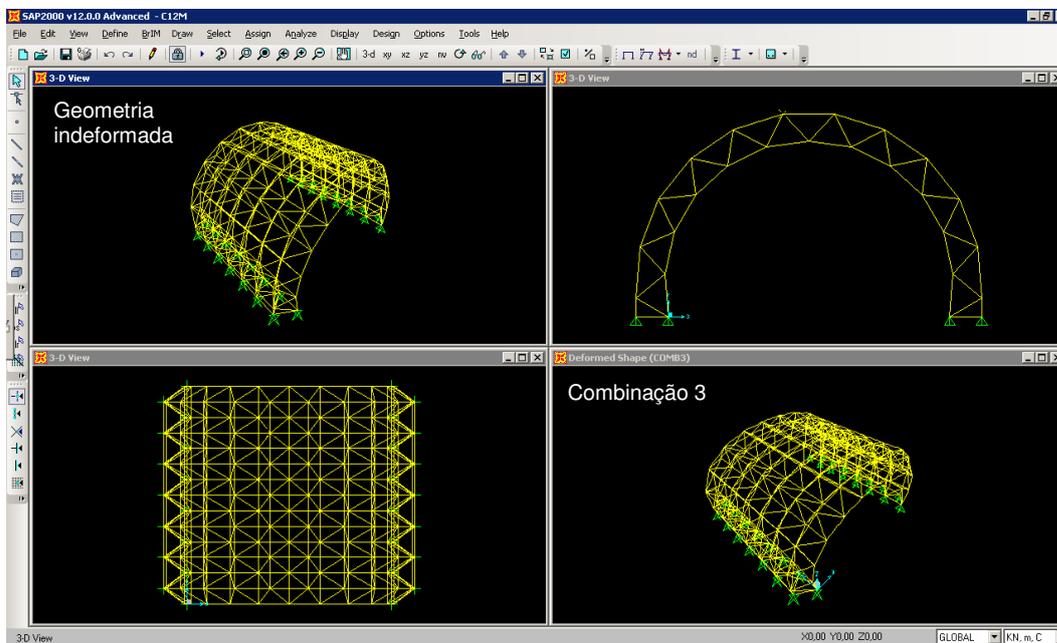


Figura 85: Geometria indeformada em perspectiva, vista frontal, vista de topo e geometria deformada pela ação da combinação de carregamentos 3.

Tabela 32: Esforços e deslocamentos máximos.

RESULTADOS	CONDIÇÃO DE CARREGAMENTO			
	1	2	3	4
Esforço máximo de Tração (kN)	-	-	1,976	-
Esforço máximo de Compressão (kN)	-	-	8,562	-
Deslocamento vertical máximo (mm)	-	-	4,027	-
Deslocamento horizontal máximo (mm)	-	-	1,597	-

Por conta da configuração em arco, na condição de carregamento estudada os elementos são mais submetidos à compressão, o que pode se mostrar vantajoso, levando em consideração que os parâmetros de resistência dos elementos são mais elevados quando submetidos a este tipo de carregamento. Os esforços máximos obtidos sob a combinação de carregamentos 3 são absorvíveis pelos elementos. Os deslocamentos nodais verticais estão bastante abaixo do limite de um trezentos avos do vão, não causando qualquer tipo de comprometimento ao sistema estrutural proposto.