



20º POSMEC

SIMPÓSIO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

Um estudo do comportamento de cúpulas reticuladas com placas estruturais de fechamento

Autora:

Núbia DOS SANTOS SAAD FERREIRA

Orientadora:

Sônia Aparecida GOULART DE OLIVEIRA

As cúpulas reticuladas possibilitam coberturas leves e arquitetonicamente agradáveis, destinadas a vencer grandes vãos, com forma geométrica favorável ao recebimento e distribuição de cargas, com predominância de solicitações axiais (TIMOSHENKO, 1953). Apresentam notória viabilidade técnica e econômica, pois propiciam racionalização no uso dos materiais, favorecendo a industrialização das construções, com emprego de peças pré-fabricadas e, além disso, apresentam pequenos deslocamentos nodais (AVRAM; ANASTASESCU, 1984). Constata-se sua expressiva utilização em âmbito internacional (TAKENAKA CORPORATION, 2010), o que comprova seu eficiente comportamento estrutural. Todavia, no Brasil, não é prática corrente o emprego deste tipo estrutural, necessitando-se difundir sua utilização, com o desenvolvimento de metodologias de projeto (FERREIRA; PARTEL, 2010). Tem-se particular interesse ao emprego da madeira, justificado por fatores de natureza econômica, ambiental e social. Apresenta-se um estudo do comportamento estrutural de tais sistemas o mais próximo do real, para diversos arranjos da malha reticulada triangular, visando oferecer dados para a busca do dimensionamento com maior economia nos projetos.

No cálculo convencional de cúpulas reticuladas é considerada a contribuição estrutural apenas dos elementos lineares. Tendo-se o fechamento da malha através de placas constituídas de materiais estruturais, tais elementos também são solicitados, na prática, aliviando as cargas dos elementos lineares. Nesse caso, é interessante realizar o cálculo da estrutura constituída pelos elementos de barra juntamente com os de placa, para maior aproveitamento do material com conseqüente redução de custos. O acréscimo de rigidez que os elementos de placa proporcionam à estrutura reticulada denomina-se efeito diafragma, no qual as placas contribuem com rigidez adicional ao conjunto de barras, de forma distribuída, permitindo um comportamento global da cúpula próximo ao de uma casca esférica.

Foi feita uma avaliação do efeito diafragma para alguns tipos de cúpulas, com arranjo estrutural formado por triângulos constituídos por elementos de barras principais, travados internamente por elementos de barra secundários, com fechamento em elementos de placa de madeira compensada, visando avaliar, comparativamente, parâmetros geométricos, esforços atuantes nas barras e deslocamentos nodais, considerando-se ou não a participação estrutural dos elementos de placa. A análise deste problema foi feita via método dos elementos finitos usando o programa computacional Ansys® (ANSYS, 2010), com pré-processamento de dados realizado pelo software Gestrut (GESUALDO, 2010).

Foram considerados quatro arranjos de malha com modulação triangular para uma mesma cúpula (vão de 20 m e flecha de 5 m), com seis setores da casca esférica, divididos em seu contorno em quatro, cinco ou seis segmentos, conforme ilustra a Fig. 1, para quatro divisões dos setores.

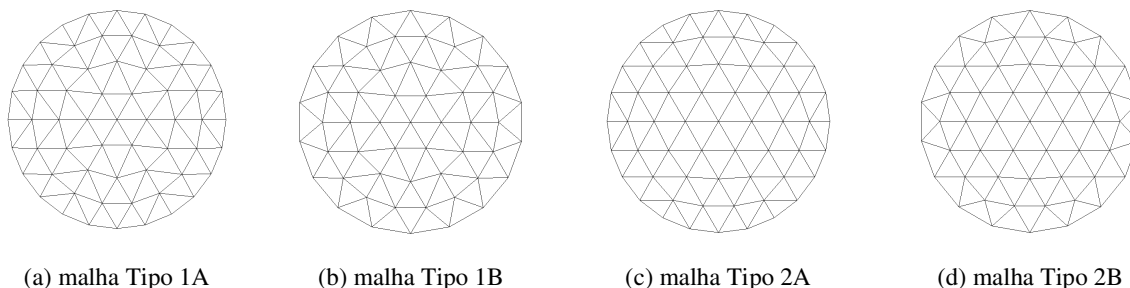


Figura 1: Arranjos de malhas considerados, com seis setores com quatro divisões em cada um.
Fonte: Gestrut (GESUALDO, 2010).

A escolha do número de setores foi baseada na prática corrente das cúpulas reticuladas, observada a partir do levantamento bibliográfico realizado, e as variações das divisões foram escolhidas para que não se tivesse grande diferença nos comprimentos das barras, que foram consideradas de mesma seção transversal.

O programa Gestrut (GESUALDO, 2010) destinado ao cálculo de estruturas tridimensionais reticuladas, apresenta um pré-processador de entrada e geração de dados, que possibilita a modelagem das malhas de maneira fácil e rápida. Salienta-se que a geração de dados para o sistema estrutural em análise é complexa, pelo fato da estrutura ser tridimensional e cada barra ter diferentes inclinações em relação às diversas direções que caracterizam a estrutura reticulada.

Com o auxílio desse software, as malhas principais foram geradas e suas unidades triangulares foram divididas por barras horizontais secundárias, paralelas às horizontais principais, conforme exemplificado na Fig. 2 (a), para a malha do Tipo 1A, com quatro divisões dos setores. Depois, foram inseridos nós dividindo as barras horizontais principais e secundárias em segmentos iguais, para que fossem gerados elementos de placa triangulares, através do software Ansys (ANSYS, 2010), como ilustra a Fig. 2 (b).

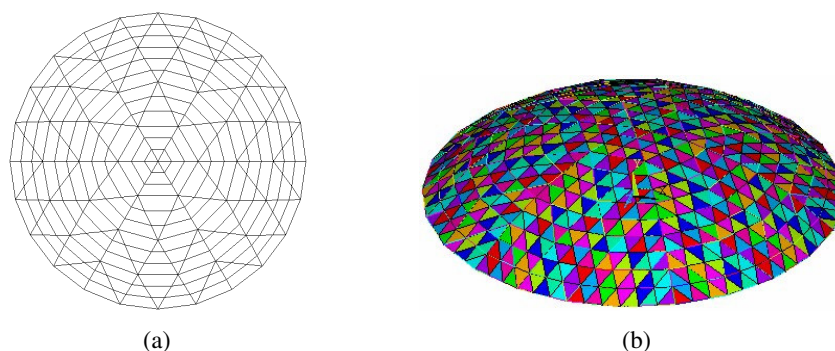


Figura 2: Malha do Tipo 1A: (a) com barras principais e secundárias geradas pelo Gestrut e (b) com placas estruturais inseridas via Ansys.

Para o cálculo, além dos aspectos geométricos apresentados (cujos dados estão resumidos na Tab. 1), foram considerados os seguintes parâmetros:

- barras (*beam* 4) de seção 6 cm x 12 cm em madeira classe C-30: módulo de deformação longitudinal $E = 480 \text{ kN/cm}^2$ e transversal $G = 24 \text{ kN/cm}^2$;
- placas (*shell* 63) em madeira compensada com espessura 18 mm: $E_x = 620 \text{ kN/cm}^2$, $E_y = 536 \text{ kN/cm}^2$ e $G_{xy} = 94 \text{ kN/cm}^2$;
- apoios simples (restrições de translações e giros livres) nos nós do contorno da malha principal;
- extremidades contínuas das barras;
- carregamento: peso próprio dos elementos estruturais.

A partir das análises geométricas, verificaram-se os seguintes aspectos:

- As malhas dos Tipos B, com menos nós, proporcionam maior economia em conectores para ligação, reduzindo-se a mão-de-obra empregada, e a malha 1B apresenta maior redução desta

última, devido à menor variação de comprimentos das barras, favorecendo mais ainda a industrialização e montagem das peças. Por outro lado, a malha 2B ainda apresenta menor consumo total de material.

- Todavia, a malha 2A possibilita a redução de consumo de material, devido aos seus menores comprimentos das barras. Isto significa que se pode conseguir peças com seções transversais menores, cabendo-se avaliar, para cada projeto, se esta redução é superior à conferida pela malha do Tipo 2B.
- Portanto, segundo a geometria, as malhas que resultam em projetos mais econômicos são: 2A e 2B.

Tabela 1: Dados geométricos das malhas consideradas.

Tipo de Malha		Nº de nós	Nº de barras	Nº de L^(*) diferentes	Somatório de L^(*) [m]	Menor L^(*) [m]	Maior L^(*) [m]	Volume [m³]
64 (6 setores e 4 divisões)	1A	61	156	11	460	2,61	3,58	3,32
	1B	55	144	9	441	2,71	3,54	3,18
	2A	61	156	15	455	2,31	3,30	3,28
	2B	55	144	14	439	2,70	3,47	3,16
65 (6 setores e 5 divisões)	1A	91	240	16	569	2,09	2,90	4,10
	1B	85	228	13	553	2,16	2,89	3,98
	2A	91	240	22	563	1,81	2,66	4,05
	2B	85	228	21	549	2,09	2,63	3,95
66 (6 setores e 6 divisões)	1A	127	342	22	678	1,74	2,44	4,88
	1B	121	330	18	664	1,79	2,44	4,78
	2A	127	342	31	670	1,48	2,24	4,82
	2B	121	330	30	658	1,70	2,18	4,74

(*) L = comprimento de barra

A partir das análises de deslocamentos nodais, verificaram-se os seguintes aspectos:

- A consideração da rigidez das placas proporcionou redução considerável nos valores de deslocamentos dos nós, sendo esta redução maior, quanto mais dividida for a malha.
- Comparando-se valores de deslocamentos para a mesma divisão de malha nos quatro tipos de modulação, por exemplo: 64-1A, 64-1B, 64-2A e 64-2B, o Tipo 2A com consideração do efeito diafragma é o que apresenta menores valores desta medida.
- Considerando-se a rigidez das placas, os nós das malhas Tipo 2 apresentaram deslocamentos menores que as do Tipo 1, e o contrário aconteceu ao se desprezar tal rigidez.
- Em todas as situações, as malhas do Tipo A apresentaram menores deslocamentos de nós, que as correspondentes do Tipo B, para a consideração da rigidez das placas.
- Portanto, em termos de deslocamentos, a malha que confere o menor deslocamento nodal é a mais dividida (malha 66 dentre as consideradas) do Tipo 2A, levando-se em consideração a rigidez das placas. Ao ser desprezada esta contribuição estrutural, a malha 66 Tipo 1A é a escolhida para se obterem menores valores de deslocamentos verticais.

A partir das análises de esforços que solicitam as barras, verificaram-se os seguintes aspectos:

- A consideração da rigidez das placas proporcionou redução considerável nos valores de esforços nas barras, sendo esta redução menor, quanto mais dividida for a malha.
- Considerando-se o efeito diafragma, a malha Tipo 2A é mais indicada que a 1A e, também, a malha 1B é mais indicada que a 2B.
- Constata-se que, considerando-se o efeito diafragma, a melhor malha em termos de esforços normais é a do Tipo 2A e, sem levar em conta tal efeito, é a do Tipo 1A.
- Portanto, com relação aos esforços, a malha que confere o menor valor do mesmo é 64 Tipo 2A, se for considerada a contribuição estrutural das placas e, se não, a malha 66 Tipo 1A.

Resumem-se na Tab. 2, as situações descritas.

Considerando-se a rigidez das placas, as cúpulas do Tipo 2A, com os menores comprimentos das barras, somados aos menores esforços atuantes, permitirão seções transversais menores para as barras, tanto pela estabilidade (relacionada com a esbeltez das barras) como pela resistência. Nota-se que, com menores

divisões da malha, as barras ficam menos solicitadas, e a maior ou menor divisão da malha será definida pela resistência e custo dos elementos de placa confrontado com o volume dos elementos de barra. Para a malha do Tipo 2B, os valores de esforços e deslocamentos são ligeiramente superiores aos do 2A. Desta forma, é necessário fazer uma avaliação do custo de conectores e da madeira utilizados, para se concluir qual das duas confere maior economia global.

Tabela 2: Resumo comparativo com indicação das malhas com menores valores dos parâmetros analisados.

Tipo de Malha	Parâmetros Analisados					
	Geometria				Deslocamentos e Solicitações	
	Nº de nós e barras	Variação de L ^(*)	L ^(*) Individual	L ^(*) e Volume Totais	Deslocamentos Verticais - Nós	Esforços - Barras
1A					sem placa 66-1A	sem placa 66-1A
1B						
2A					com placa 66-2A	com placa 64-2A
2B						

(*) L = comprimento de barra

Por outro lado, ao se desprezar o efeito diafragma, percebe-se que as malhas de configuração em círculos concêntricos do Tipo 1A, com maiores divisões da malha, apresentam menores valores de deslocamentos e solicitações, possibilitando peças de menor seção transversal, conduzindo à redução no custo da madeira, com menores seções e menor volume final. Porém, com a malha mais dividida, tem-se, obviamente, maior quantidade de conectores. Há que se confrontar o custo destes elementos de ligação, com os das peças de madeira, que pode ser serrada ou laminada colada (cujo custo é superior ao da serrada).

Em resumo, ao se escolher a melhor configuração geométrica para a malha da cúpula, há que se avaliarem os custos dos elementos estruturais: barras, placas e conectores, para os pares: considerando-se o efeito diafragma: 2A e 2B e desprezando-se o efeito diafragma: 1A e 1B.

Referências

- ANSYS, Inc. **Ansyst[®], Version 12.0**. Canonsburg – PA, 2010.
- ARREDONDO, C. P.; HOLZAPFEL, A. R. H. **Sistemas estructurales em madera**. Facultad de Arquitectura, Construcción y Diseño - Universidad Del Bio-Bio. Concepción – Chile: Editorial A. Pinto, 1990. p. 31-32, Cuaderno 7.
- AVRAM, C.; ANASTASESCU, D. **Space structures - development in civil engineering**: particular structures. Amsterdam – Holand: Elsevier Science Publisher, 1984. p. 101-137.
- FERREIRA, N. S. S.; PARTEL, H. Projeto e construção de uma estrutura de cobertura em cúpula utilizando o sistema VARAX e MLC. In: CALIL JUNIOR, C.; MOLINA, J. C. **Coberturas em estruturas de madeira**: exemplos de cálculo. São Paulo: Editora PINI, 2010. p. 185-201.
- GESUALDO, F. A. R. **Gestrut - análise de estruturas tridimensionais reticuladas, Versão educacional**. Uberlândia: [s.n.]. Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, 2010.
- TAKENAKA CORPORATION. **Architecture engineering construction – sports facilities (domes and stadiums) – multi purpose facilities**. Disponível em: <http://www.takenaka.co.jp/takenaka_e/dome_e/>. Acesso em: 3 out. 2010.
- TIMOSHENKO, S. P. **History of strength of materials**. New York: McGraw-Hill, 1953.