

Consumo de Aço em Coberturas de Estádios: Sistema Estrutural em Treliça x Cabos

Esdras Pereira de Oliveira¹
Nelson Szilard Galgoul²

Resumo

O objetivo deste trabalho é apresentar uma comparação do consumo de aço em coberturas de estádios entre o sistema estrutural em treliça e o sistema estrutural em cabos, a partir de um estudo de caso.

Palavras-chave: Consumo de Aço, Sistema Estrutural, Cabos, Treliças.

1 Introdução

O Brasil será sede da Copa do Mundo de 2014. Em virtude das novas exigências da FIFA os estádios brasileiros terão que passar por reformas para adequação às novas exigências ou mesmo serão demolidos para construção de novos estádios. Tendo em vista a grande diversidade de sistemas estruturais existentes, os diferentes tipos de funcionamento estrutural diante das cargas e o custo variado, a abordagem do tema é justificada diante deste momento histórico.

Um dos elementos mais importantes da estrutura dos estádios no que diz respeito ao impacto visual é a sua cobertura. Em virtude disso, a cobertura é a parte que requer maior atenção por parte dos arquitetos e projetistas objetivando dotá-la de linhas harmoniosas, conferindo um aspecto de leveza, e um campo visual desobstruído, limitando a utilização de pilares interiores, obrigando que o sistema de suporte da estrutura seja exterior à estrutura.

Assim, diante da diversidade de sistemas estruturais existentes, este trabalho tem por objetivo comparar o consumo de aço entre o sistema estrutural em treliça e o sistema estrutural em cabos. Para isso adotou-se o estudo de caso do dimensionamento dos elementos principais de um estádio típico com sistema estrutural em cabos e outro em treliça.

2 Cobertura em Cabos

As análises estruturais realizadas no estudo de caso apresentado abaixo, de um estádio típico em cobertura de cabos, foram realizadas através do software de cálculo estrutural ANSYS 13.0. As análises realizadas

utilizaram o método de iteração de Newton-Raphson com análise não linear geométrica. As premissas para a definição da geometria do estádio são:

- Eixo Maior: 240m;
- Eixo Menor: 192m;
- Largura da Área Coberta: 50m.

2.1 Definição da Geometria

O estádio em cabos tem um anel de compressão externo que delimita a estrutura. Tal anel foi idealizado na forma de uma elipse, cujos eixos maior e menor possuem as dimensões informadas anteriormente. Em seguida foram projetados os anéis de tração internos. A distância entre os anéis internos de tração e o anel de compressão externo foi definida como 50 m na direção do eixo menor e 53,5 m na direção do eixo maior.

Foram utilizados dois anéis de tração internos para que a estrutura resista às cargas com sentido para cima e para baixo. A distância na vertical entre os dois anéis internos de tração garante o braço de alavanca para vencer o vão. Tal distância foi considerada como 10% do vão a ser vencido (22 m).

Foram adotados cabos radiais que ligam o anel de compressão externo aos dois anéis de tração internos. Esses dois cabos têm curvaturas opostas para resistirem às cargas de sentido para cima e para baixo. Para garantir a curvatura oposta dos cabos radiais foram colocados quatro cabos verticais igualmente espaçados ligando os cabos radiais superior e inferior. Na extremidade dos cabos radiais foi adicionado um elemento de compressão conectando o anel de tração interno inferior e superior. Este elemento mantém a distância na vertical entre os dois anéis em 22 m, conforme o mencionado. As Figuras 1 e 2 ilustram o exposto.

1 esdraspo@yahoo.com.br

2 Dr.-Ing Professor da Universidade Federal Fluminense nsg@suporte-cp.com.br

A cobertura foi dividida em 36 partes iguais. A cobertura também apresenta simetria em relação aos planos XZ e YZ. Cada quadrante da cobertura apresenta nove conjuntos de cabos, “seções”, com dimensões diferentes. Tais dimensões são apresentadas nas Figuras 2, 3 e na Tabela 1.

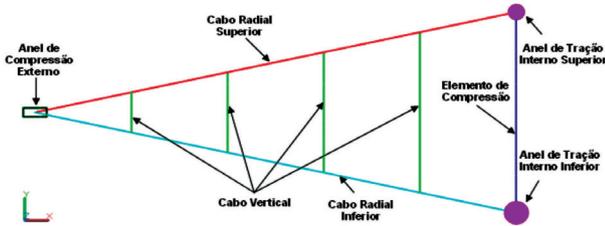


Figura 1 – Divisão da cobertura.

No estudo de caso apresentado, a rigidez e o contraventamento proporcionado pela membrana no plano da cobertura foram simulados através de elementos de cabo. Os elementos de compressão apresentados na Figura 1 também foram contraventados com cabos. A Figura 4 apresenta os contraventamentos.

Os cabos de simulação da membrana foram considerados com a propriedade do aço especial com densidade zero. O diâmetro do cabo foi calculado igualando-se a rigidez axial do cabo com a rigidez axial de uma seção de membrana de dimensões 1500x2 mm.

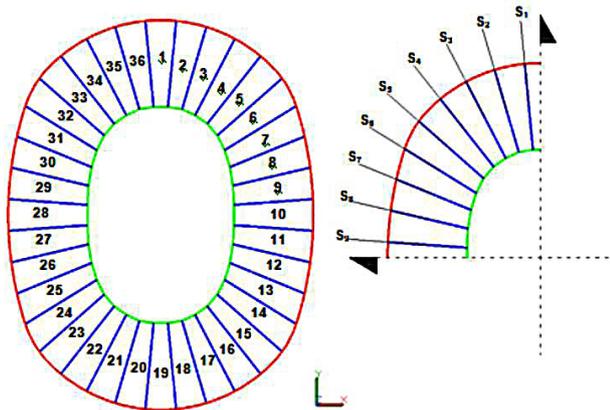


Figura 2 – Dimensões dos elementos estruturais.

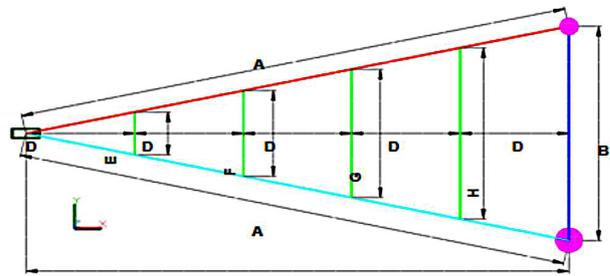


Figura 3 – Dimensões dos elementos estruturais.

No que diz respeito às seções dos elementos estruturais, apresentados nas Figuras 1 e 4, foram adotadas as seções transversais apresentadas abaixo.

- Anel de Compressão Externo: Box 2500 x 1000 x 50,0 mm;
- Anel de Tração Interno Superior: 4 cabos \varnothing 95 mm (\varnothing_{eq} 190 mm);
- Anel de Tração Interno Inferior: 6 cabos \varnothing 110 mm (\varnothing_{eq} 269,4 mm);
- Cabo Radial Superior: \varnothing 95 mm;
- Cabo Radial Inferior: \varnothing 110 mm;
- Cabos Verticais: \varnothing 20 mm;
- Cabos de Simulação da Membrana: \varnothing 6mm;
- Cabos do Contraventamento dos Elementos de Compressão: \varnothing 20 mm;
- Elemento de Compressão: Box 350 x 350 x 25,4 mm

As seções dos elementos de cabo, com exceção dos elementos de simulação da membrana, foram definidas após a realização de diversas análises de modo que após a aplicação das cargas os deslocamentos fossem compatíveis com o Estado Limite de Serviço e as tensões nos cabos fossem compatíveis com o Estado Limite Último.

As seções dos Elementos que trabalham à compressão (anel de compressão externo e elemento de compressão) foram também definidas após a análise de flambagem dos mesmos, que será apresentada mais adiante.

As propriedades dos materiais empregados na análise são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 1 – Dimensões dos elementos estruturais para as seções S_1 à S_9 .

Dimensões (m)	Seções								
	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	S_7	S_8	S_9
A	54.58	54.26	54.65	54.83	55.13	53.88	52.02	51.20	51.20
B	22.00	22.00	22.00	22.00	22.00	22.00	22.00	22.00	22.00
C	53.46	53.13	53.53	53.72	54.02	52.75	50.85	50.00	50.01
D	10.69	10.63	10.71	10.74	10.80	10.55	10.17	10.00	10.00
E	4.40	4.40	4.40	4.40	4.40	4.40	4.40	4.40	4.40
F	8.80	8.80	8.80	8.80	8.80	8.80	8.80	8.80	8.80
G	13.20	13.20	13.20	13.20	13.20	13.20	13.20	13.20	13.20
H	17.60	17.60	17.60	17.60	17.60	17.60	17.60	17.60	17.60

De posse de todas as considerações feitas anteriormente a geometria final do estádio é apresentada na Figura 5.

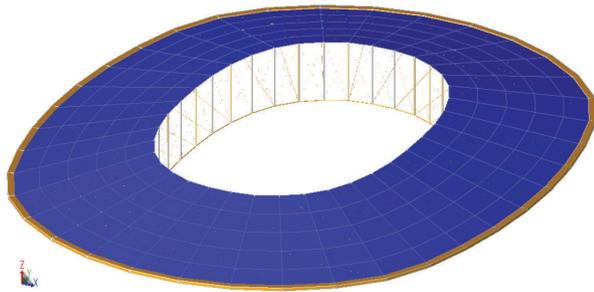


Figura 5 – Geometria final do estádio.

2.2 Definição dos Apoios

Todas as interseções dos cabos radiais com o anel de compressão exterior foram definidas como apoios verticais (Z). Além dos apoios verticais foram definidos oito apoios que restringem a estrutura no plano da cobertura (plano XY). A Figura 6 ilustra o exposto.

2.3 Carregamentos

2.3.1 Cargas Gravitacionais

Foi considerado como carga gravitacional as cargas de peso próprio modelado e não modelado.

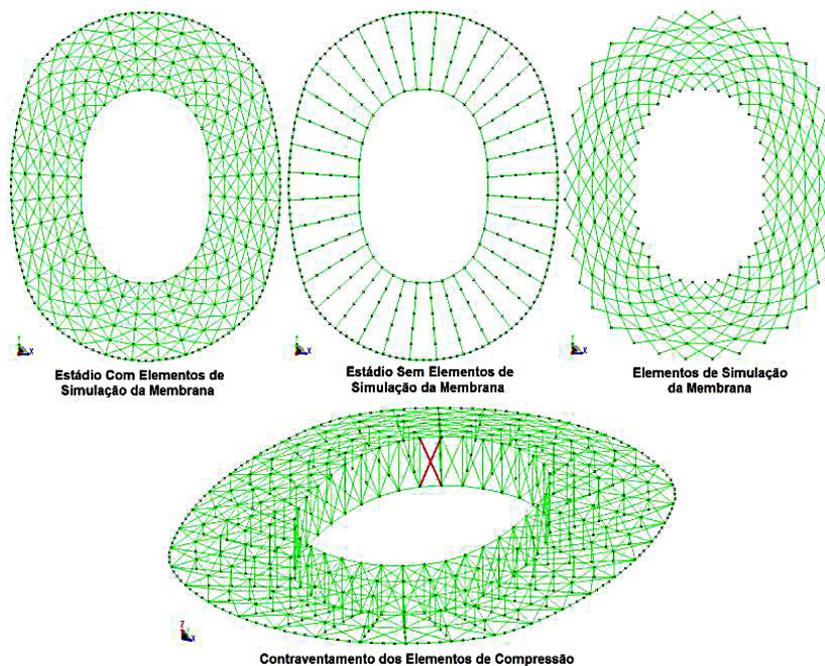


Figura 4 – Elementos de simulação da membrana e contraventamento dos elementos de compressão.

Tabela 2 – Propriedades dos materiais utilizados nas análises.

Propriedades dos Materiais			
Utilização	Tipo	Propriedade	
Cabos	Aço Especial	Módulo de Elasticidade	160 GPa
		Coefficiente de Poisson	0.3
		Módulo de Elasticidade Transversal	61.54 GPa
		Densidade	78.5 kN/m ³
		Tensão de Escoamento	1400 MPa
		Tensão de Ruptura	1570 MPa
Anel de Compressão Externo / Elemento de Compressão	Aço Padrão	Módulo de Elasticidade	210 GPa
		Coefficiente de Poisson	0.3
		Módulo de Elasticidade Transversal	81 GPa
		Densidade	78.5 kN/m ³
		Tensão de Escoamento	345 MPa
Membrana	PTFE (Tipo 4)	Módulo de Elasticidade	1.5 GPa
		Coefficiente de Poisson	0.5
		Módulo de Elasticidade Transversal	0.02 GPa
		Densidade	40 kN/m ³
		Tensão de Ruptura	150 MPa

Foi considerado como peso próprio não modelado à membrana e as passarelas equipamentos. As cargas de peso próprio não modelado foram consideradas como massas, para posterior análise dinâmica da estrutura, não realizada neste trabalho. As cargas inerentes ao peso próprio modelado e não modelado, bem como as localizações das mesmas são apresentadas nas Tabelas 3, 4 e Figuras 9 a 10, respectivamente.

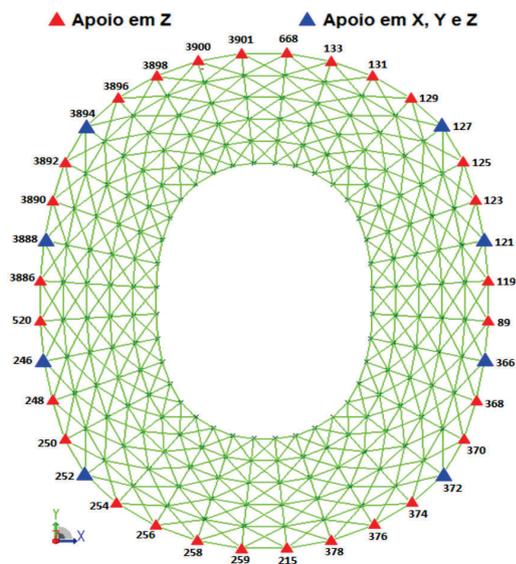


Figura 6 – Pontos de apoio.

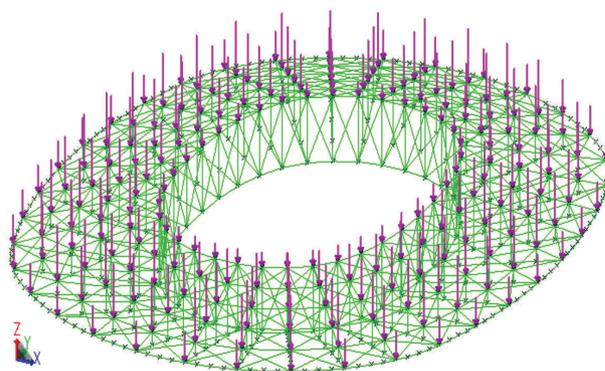


Figura 7 – Peso próprio da membrana.

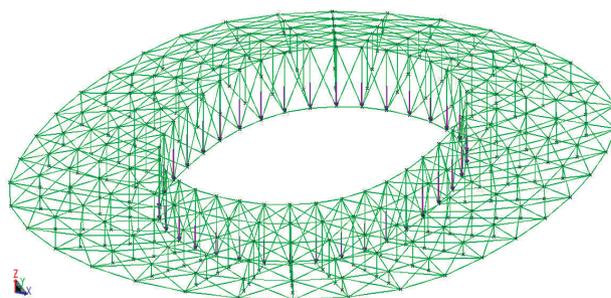


Figura 8 – Peso próprio do sistema de iluminação, som e passarelas.

Tabela 3 – Peso próprio modelado.

Peso Próprio Modelado					
Material	Grupo	Peso Linear (kg/m)	Comprimento Total (m)	Total (kg)	Total (ton)
Aço Especial	Anel de Tração Interno Inferior	447.46	370.92	165972.06	
	Anel de Tração Interno Superior	222.57	370.92	82555.69	
	Cabo Radial Inferior	74.60	1927.21	143771.88	
	Cabo Radial Superior	55.64	1927.21	107234.81	507.76
	Cabo vertical	2.47	1584.00	3906.38	
	Cabo de Contraventamento dos Elementos de Compressão	2.47	1750.88	4317.93	
Aço Padrão	Anel de Compressão Externo	2669.00	701.49	1872276.81	
	Elemento de Compressão	258.89	792.00	205039.28	2077.32

Tabela 4 – Peso próprio não modelado.

Peso Próprio Não Modelado			
Ítem	Carga (kg)	Localização	Total (kg)
Membrana	4 kg/m ²	Aplicado nas juntas do cabo radial superior	113747.64
Sistema de iluminação	25 kg/m	Aplicado ao longo do anel de tração inferior	9273.08
Sistema de Som	600 kg	Aplicado na junta de conexão do anel de tração inferior com o cabo radial inferior. Também foi considerada na metade da distância entre seções adjacentes	43200
Passarelas	100 kg/m ²	Considerada com 2,5m de largura ao longo do anel de tração inferior	92726

2.3.2 Cargas De Pretensão

A carga de Pretensão foi determinada de maneira tal que sob quaisquer condições de carregamentos os cabos permanecessem tensionados. A determinação da carga de pretensão foi efetuada através de tentativas. Foram feitas várias análises até a obtenção da pretensão adequada nos cabos que produzisse o melhor resultado. A Tabela 5 apresenta os valores das pretensões nos cabos.

Prétensão nos Cabos	
Grupo	Prétensão (MN)
Anel de Tração Interno Inferior	18.00
Anel de Tração Interno Superior	7.00
Cabo Radial Inferior	6.00
Cabo Radial Superior	4.00
* Cabo Radial Superior - Meio	6.00
Cabo Vertical	1.00

Os cabos radiais superior meio, Figura 9, tiveram que receber uma Pretensão maior que os demais cabos radiais, pois foi a região que apresentou os maiores deslocamentos verticais. Sendo assim quando aumentou-se o valor da Pretensão os deslocamentos na região considerada diminuiram.

2.3.3 Cargas de Águas Pluviais

No presente trabalho foi considerada uma calha, ao longo do anel de compressão externo, de seção quadrada de dimensões 500 x 500 mm. Foi considerado um caso extremo em que todas as saídas da calha estejam entupidas e que falte apenas 20 mm para a calha transbordar. Em tal situação a carga linear ao longo do anel de compressão será de 240 kg/m, distribuída conforme ilustrado na Figura 10.

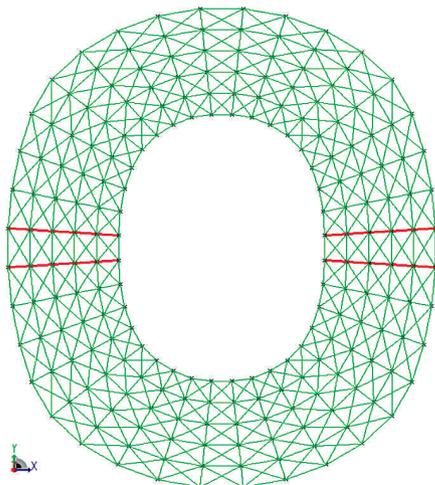


Figura 9 – Identificação do cabo radial superior meio.

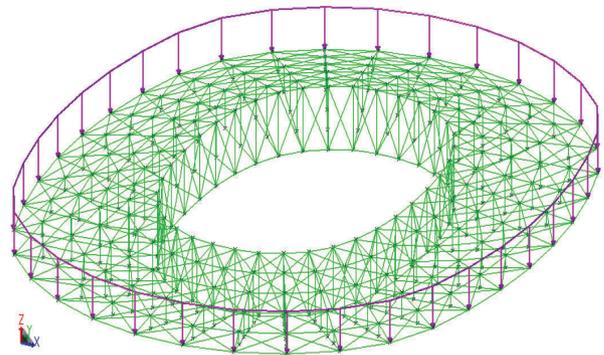


Figura 10 – Carga de águas pluviais.

2.3.4 Sobrecarga

Neste estudo de caso foi considerada uma sobrecarga de 150 kg/m² aplicada na passarela de 2,5 m de largura ao longo do anel de tração interno inferior, conforme ilustrado na Figura 11.

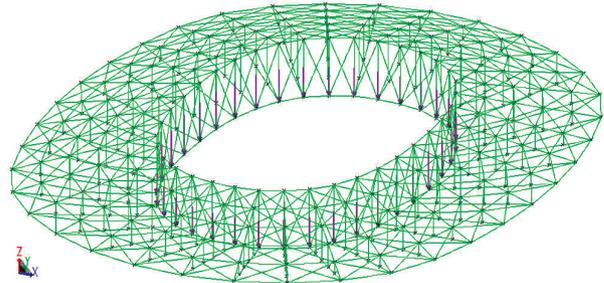


Figura 11 – Sobrecarga nas passarelas.

2.3.5 Cargas de Vento

No estudo de caso apresentado neste trabalho, a localização do estádio é indicada na Figura 12 por um ponto vermelho. Esta figura apresenta as isopletras da velocidade básica V_0 extraída na norma NBR 6123. Como pode ser observada, a velocidade básica V_0 é 30m/s.

Os valores dos coeficientes S_1 , S_2 e S_3 para a determinação da velocidade característica do vento foram extraídos da NBR 6123 e são indicados nas Tabelas 6 e 7 juntamente com as suas características.

O fator S_2 foi extraído da NBR 6123 (Tabela 2 – Fator S_2) e é transcrita a seguir.

De posse da velocidade básica do vento e dos coeficientes S_1 , S_2 e S_3 calcula-se a velocidade característica (V_k) e a pressão dinâmica do vento (q), conforme apresentado a seguir.

$$V_k = V_0 S_1 S_2 S_3 = 30 * 1 * 0,86 * 1 = 25,8 \text{ m/s} \quad 01$$

$$q = 0,613 V_k^2 = 0,613 * 25,8^2 = 408 \text{ N/m}^2 \quad 02$$

Como não se dispôs de um modelo reduzido, o

que seria ideal, conservadoramente foi considerado no modelo a aplicação da pressão dinâmica do vento em toda a estrutura do telhado em dois sentidos: uma carga de 408 N/m² para baixo (PRESSÃO) e outra carga de igual valor de baixo para cima (SUCÇÃO), conforme indicado nas Figuras 13 e 14, respectivamente. Neste trabalho não foi considerada uma carga no plano da cobertura referente ao atrito do vento.

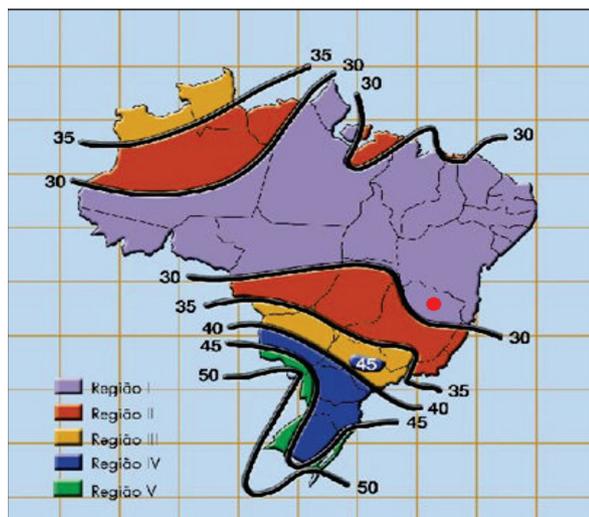


Figura 12 – Isopletas da velocidade básica V_0 e localização do estádio.

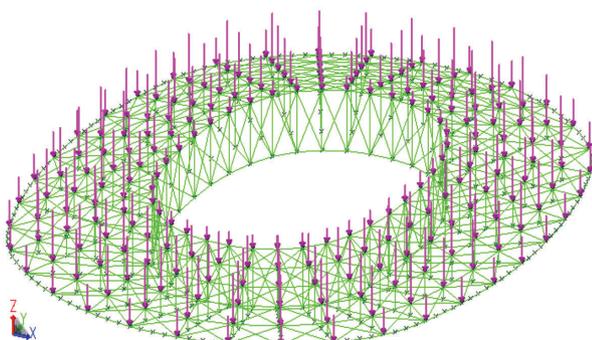


Figura 13 – Vento – pressão.

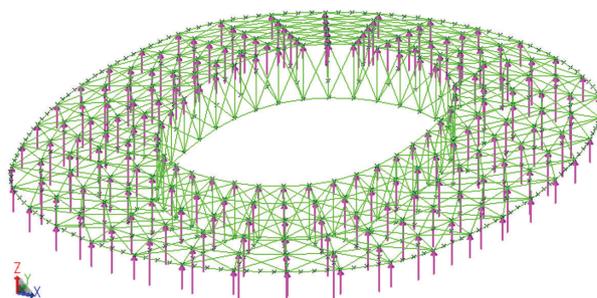


Figura 14 – Vento – sucção.

2.3.6 Combinações

Para a análise estrutural da cobertura do estádio estudado foram consideradas três combinações. A primeira considerando apenas as cargas gravitacionais da estrutura, a segunda considerando as cargas gravitacionais e acidentais – vento (pressão) e a terceira considerando as cargas gravitacionais e acidentais – vento (sucção).

Os coeficientes de ponderação das ações foram considerados conforme o EUROCODE, aplicando-se 1,35 para as cargas gravitacionais e 1,5 para as cargas acidentais, para as combinações primeira e segunda. Para a terceira combinação foram considerados os coeficientes 0,90 para as cargas gravitacionais e 1,5 para as cargas acidentais.

A Tabela 8 apresenta o exposto nos dois parágrafos anteriores.

3 Cobertura em Treliça Espacial

As análises estruturais realizadas no estudo de caso apresentado abaixo, de um estádio típico em cobertura de treliça espacial, foram realizadas através do software de cálculo estrutural SACS. A análise realizada é uma análise estática linear.

Tabela 6 – Coeficientes S_1 , S_2 , S_3 e suas características.

Tabela de Fatores		
Fator	Valor	Descrição
S_1	1.00	Fator Topográfico: Terreno plano ou fracamente acidentado. Rugosidade do Terreno: Categoria V; Terrenos cobertos por obstáculos numerosos grandes, altos e pouco espessos (florestas, centros de grandes cidades, complexos industriais etc.)
S_2	0.86	Dimensões: Classe C; Maior dimensão horizontal ou vertical maior que 50m. Altura sobre o Terreno: $Z = 40m$
S_3	1.00	Fator Estatístico: Grupo 2; Edificações com alto fator de ocupação.

As premissas para a definição da geometria do estádio são:

- Eixo Maior: 240 m;
- Eixo Menor: 192 m;
- Largura da Área Coberta: 50 m.

3.1 Definição da Geometria

A malha da treliça espacial escolhida foi a de pirâmide de base quadrada. A geometria definida para o estádio em estudo bem como suas dimensões são apresentados nas Figuras 15 a 20.

A treliça espacial definida é constituída de módulos, espaçados de 30cm, compreendidos entre tirantes adjacentes. Os tirantes foram idealizados ligados diretamente aos pilares. O espaçamento entre os tirantes foi definido como 12,3 m.

O ponto de conexão entre o tirante e o módulo foi definido como 60% do comprimento total do módulo. As conexões dos elementos tubulares foram consideradas soldadas, onde os elementos tubulares do banzo superior e inferior são passantes e as diagonais são soldadas a estes elementos passantes. O tirante é considerado biarticulado.

Tabela 7 – Tabela da NBR 6123 fator S_z .

z (m)	Categoria														
	I			II			III			IV			V		
	Classe			Classe			Classe			Classe			Classe		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
≤ 5	1,06	1,04	1,01	0,94	0,92	0,89	0,88	0,86	0,82	0,79	0,76	0,73	0,74	0,72	0,67
10	1,10	1,09	1,06	1,00	0,98	0,95	0,94	0,92	0,88	0,86	0,83	0,80	0,74	0,72	0,67
15	1,13	1,12	1,09	1,04	1,02	0,99	0,98	0,96	0,93	0,90	0,88	0,84	0,79	0,76	0,72
20	1,15	1,14	1,12	1,06	1,04	1,02	1,01	0,99	0,96	0,93	0,91	0,88	0,82	0,80	0,76
30	1,17	1,17	1,15	1,10	1,08	1,06	1,05	1,03	1,00	0,98	0,96	0,93	0,87	0,85	0,82
40	1,20	1,19	1,17	1,13	1,11	1,09	1,08	1,06	1,04	1,01	0,99	0,96	0,91	0,89	0,86
50	1,21	1,21	1,19	1,15	1,13	1,12	1,10	1,09	1,06	1,04	1,02	0,99	0,94	0,93	0,89
60	1,22	1,22	1,21	1,16	1,15	1,14	1,12	1,11	1,09	1,07	1,04	1,02	0,97	0,95	0,92
80	1,25	1,24	1,23	1,19	1,18	1,17	1,16	1,14	1,12	1,10	1,08	1,06	1,01	1,00	0,97
100	1,26	1,26	1,25	1,22	1,21	1,20	1,18	1,17	1,15	1,13	1,11	1,09	1,05	1,03	1,01
120	1,28	1,28	1,27	1,24	1,23	1,22	1,20	1,20	1,18	1,16	1,14	1,12	1,07	1,06	1,04
140	1,29	1,29	1,28	1,25	1,24	1,24	1,22	1,22	1,20	1,18	1,16	1,14	1,10	1,09	1,07
160	1,30	1,30	1,29	1,27	1,26	1,25	1,24	1,23	1,22	1,20	1,18	1,16	1,12	1,11	1,10
180	1,31	1,31	1,31	1,28	1,27	1,27	1,26	1,25	1,23	1,22	1,20	1,18	1,14	1,14	1,12
200	1,32	1,32	1,32	1,29	1,28	1,28	1,27	1,26	1,25	1,23	1,21	1,20	1,16	1,16	1,14
250	1,34	1,34	1,33	1,31	1,31	1,31	1,30	1,29	1,28	1,27	1,25	1,23	1,20	1,20	1,18
300	-	-	-	1,34	1,33	1,33	1,32	1,32	1,31	1,29	1,27	1,26	1,23	1,23	1,22
350	-	-	-	-	-	-	1,34	1,34	1,33	1,32	1,30	1,29	1,26	1,26	1,26
400	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,34	1,32	1,32	1,29	1,29	1,29
420	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,35	1,35	1,33	1,30	1,30	1,30
450	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,32	1,32	1,32
500	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,34	1,34	1,34

Fonte: Tabela 2 – Fator S_z , NBR 6123.

Tabela 8 – Combinações para o modelo em cabos.

Combinação	Cargas	Descrição	Coefficiente
1	Cargas	Peso Próprio Modelado	1.35
	Gravitacionais	Peso Próprio Não Modelado	1.35
	Cargas de Pretensão		1.00
2	Cargas	Peso Próprio Modelado	1.35
	Gravitacionais	Peso Próprio Não Modelado	1.35
	Águas Pluviais		1.50
	Cargas Acidentais	Sobrecarga	1.50
	Vento (Pressão)		1.50
Cargas de Pretensão		1.00	
3	Cargas	Peso Próprio Modelado	0.90
	Gravitacionais	Peso Próprio Não Modelado	0.90
	Cargas Acidentais	Vento (Sucção)	1.50
Cargas de Pretensão		1.00	

Neste estudo de caso não foi modelado o estádio inteiro. Optou-se por modelar cinco módulos adjacentes com o objetivo de avaliar o comportamento estrutural dos elementos da treliça e fazer a otimização dos mesmos.

Partindo-se de uma seção transversal tubular de 101,6 x 2,1 mm para todos os elementos, foram realizadas várias análises otimizando as seções para que todos os elementos apresentassem ao final do processo de otimização razão de tensão inferior a 0,8. As Figuras 18 a 20 apresentam as seções transversais ao final do processo de otimização.

A seção transversal do tirante é tubular $\varnothing 355,6$ x 27 mm.

Foram modelados três grupos de placas com densidade corrigida para simular os telhados superior, inferior e o forro de vidro. A Figura 21 apresenta a localização das placas.

As propriedades dos materiais empregados na análise são apresentadas na Tabela 9.

De posse de todas as considerações feitas anteriormente a geometria final do estádio é apresentada na Figura 22.

3.2 Definição dos Apoios

Todas as interseções dos tirantes, elementos do banzo superior e inferior com os pilares foram definidas

como apoios de restrição aos deslocamentos e rotações liberadas. A Figura 23 ilustra o exposto.

3.3 Carregamentos

3.3.1 Cargas Gravitacionais

As cargas gravitacionais são constituídas pelas cargas de peso próprio modelado e não modelado. Foi considerado como peso próprio não modelado a estrutura secundária, as passarelas, equipamentos e serviços. As cargas inerentes ao peso próprio modelado e não modelado, Tabelas 10 a 12, bem como a localização das mesmas, Figuras 24 a 28, são apresentadas abaixo.

3.3.2 Cargas de Águas Pluviais

No presente trabalho foi considerada uma calha ao longo da última terça de seção quadrada de dimensões 500 x 500 mm. Foi considerado um caso extremo em que todas as saídas da calha estejam entupidas e que falte apenas 20 mm para a calha transbordar. Em tal situação a carga linear ao logo do anel de compressão será de 240 kg/m.

3.3.3 Sobrecarga

Neste estudo de caso foi considerada uma sobrecarga de 150 kg/m² aplicada na passarela de 3,0 m de largura ao longo da extremidade do balanço.

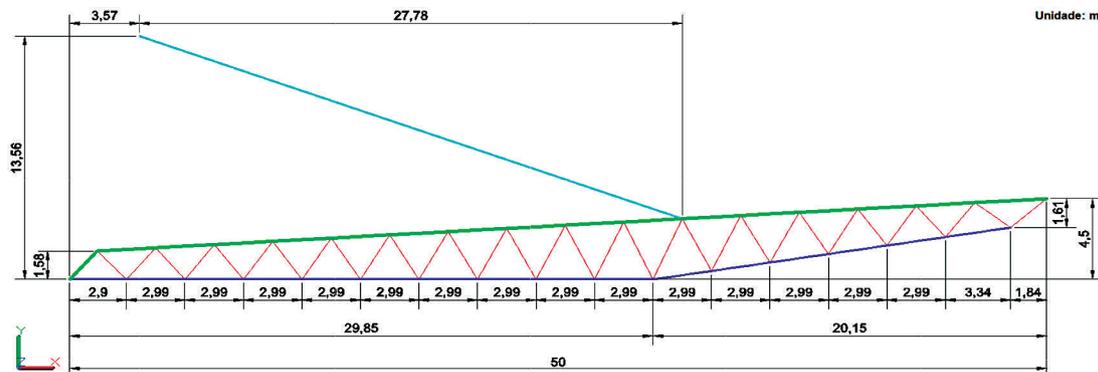


Figura 15 – Dimensões do estádio em treliça.

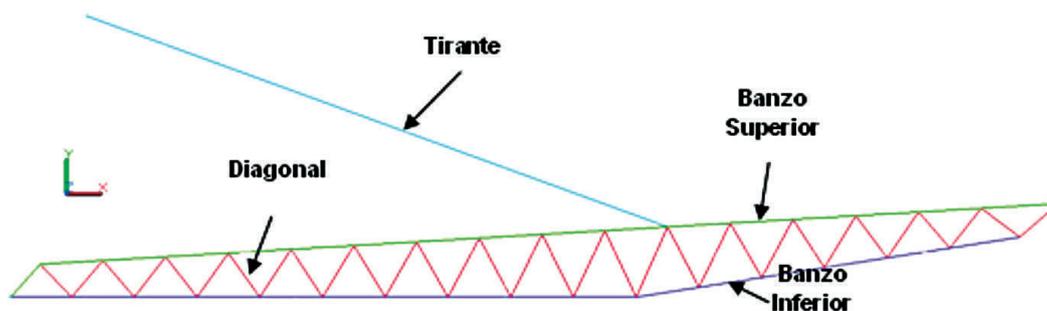


Figura 16 – Nomenclatura dos elementos da treliça.

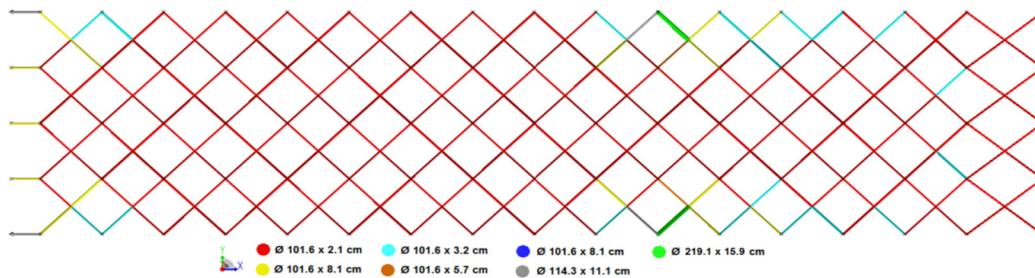


Figura 19 – Seção transversal dos elementos – diagonais.

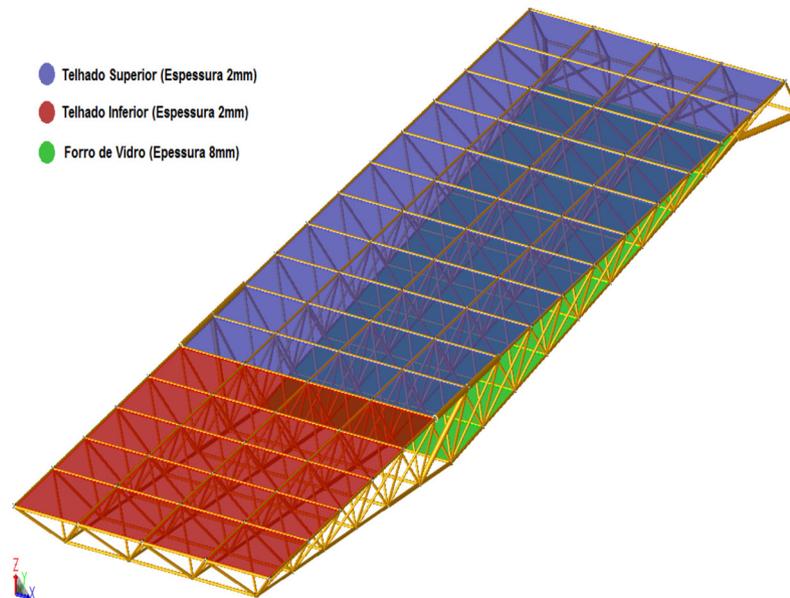


Figura 20 – Placas de simulação dos telhados e forro de vidro.

Tabela 9 – Propriedades dos materiais – modelo em treliça.

Propriedades dos Materiais			
Utilização	Tipo	Propriedade	
Elementos da Treliça Espacial	Aço Padrão $F_y=248\text{MPa}$	Módulo de Elasticidade	200 GPa
		Coefficiente de Poisson	0.3
		Módulo de Elasticidade Transversal	77.24 GPa
		Densidade	78.49 kN/m ³
		Tensão de Escoamento	248 MPa
Tirante	Aço Padrão $F_y=345\text{MPa}$	Módulo de Elasticidade	200 GPa
		Coefficiente de Poisson	0.3
		Módulo de Elasticidade Transversal	77.24 GPa
		Densidade	78.49 kN/m ³
		Tensão de Escoamento	345 MPa
Placas de Simulação do Telhado	Aço Padrão $F_y=248\text{MPa}$	Módulo de Elasticidade	200 GPa
		Coefficiente de Poisson	0.3
		Módulo de Elasticidade Transversal	77.24 GPa
		Tensão de Escoamento	248 MPa
		Densidade (Telhado Superior)	50 kN/m ³
		Densidade (Telhado Inferior)	40 kN/m ³
		Densidade (Forro de Vidro)	3125 kN/m ³

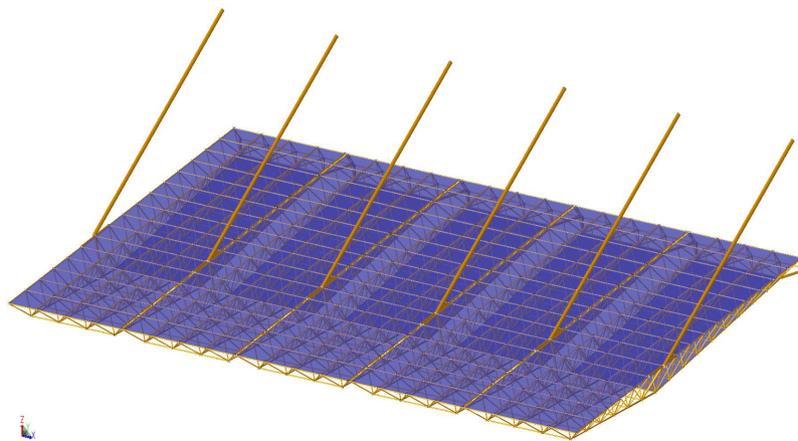


Figura 22 – Geometria final do estádio.

Tabela 10 – Peso próprio modelado – elementos da treliça.

Peso Próprio Modelado						
Material	Seção	Peso Linear (kg/m)	Comprimento Total (m)	Total (kg)	Total (ton)	
	Æ101.6 x 2.1 mm	5.15	6879.2	35448.66		
	Æ101.6 x 3.2 mm	7.77	375.8	2918.243		
	Æ101.6 x 4.4 mm	10.55	172.4	1818.343		
	Æ101.6 x 5.7 mm	13.48	36	485.3058		
	Æ101.6 x 8.1 mm	18.68	234.4	4377.98		
	Æ114.3 x 7.9 mm	20.73	90.5	1876.017		
Aço Padrão Fy=248MP	Æ114.3 x 11.1 mm	28.25	61.1	1726.09	69.46	
	Æ114.3 x 13.5 mm	33.56	121.2	4067.396		
	Æ141.3 x 9.5 mm	30.88	29.9	923.2721		
	Æ141.3 x 12.7 mm	40.28	90.9	3661.239		
	Æ141.3 x 15.9 mm	49.17	30.3	1489.899		
	Æ219.1 x 14.3 mm	72.22	32.7	2361.746		
	Æ219.1 x 15.9 mm	79.68	36	2868.421		
	Æ219.1 x 18.3 mm	90.62	60	5437.329		
Aço Padrão Fy=345MP	Æ355.6 x 27 mm	218.801781	177.48	38832.94		38.83

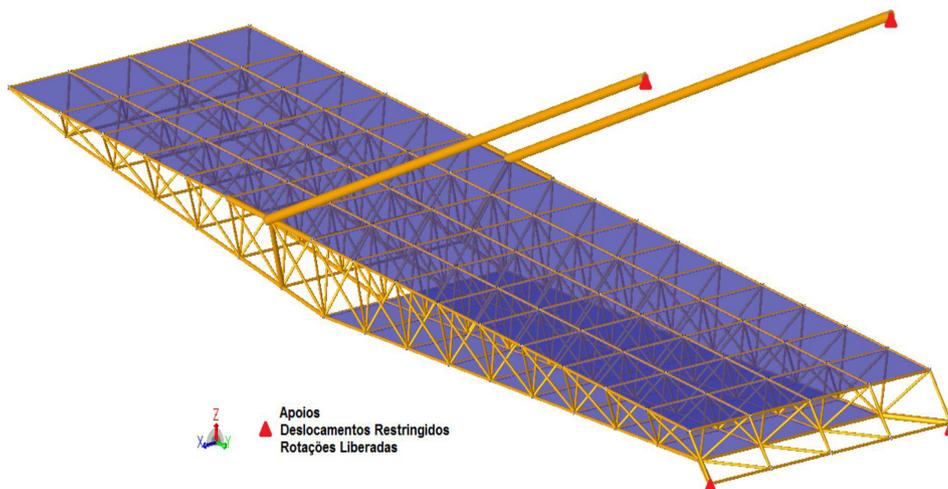


Figura 23 – Pontos de apoio.

Tabela 11 – Peso próprio modelado – placas.

Peso Próprio Modelado					
Material	Placa de Simulação	Peso (kg/m ²)	Área Total (m ²)	Total (kg)	Total (ton)
Aço Padrão Fy=248MP	Telhado Superior	10	1980	19800	
	Telhado Inferior	8	1212.82	9703	35.38
	Forro de Vidro	6.25	940.95	5881	

Tabela 12 – Peso próprio não modelado.

Peso Próprio Não Modelado			
item	Carga (kg)	Localização	Total (ton)
Estrutura Secundária	15 kg/m ²	Aplicado nas placas do telhado superior	29.7
Sistema de Iluminação	25 kg/m	Aplicado ao longo da extremidade do balanço	1.5
Sistema de Som	600 kg	Aplicado na extremidade do balanço um de cada lado do módulo. Também foi considerada na metade da largura do módulo	6
Passarelas	100 kg/m ²	Considerada com 3,0m de largura ao longo da extremidade do balanço	18

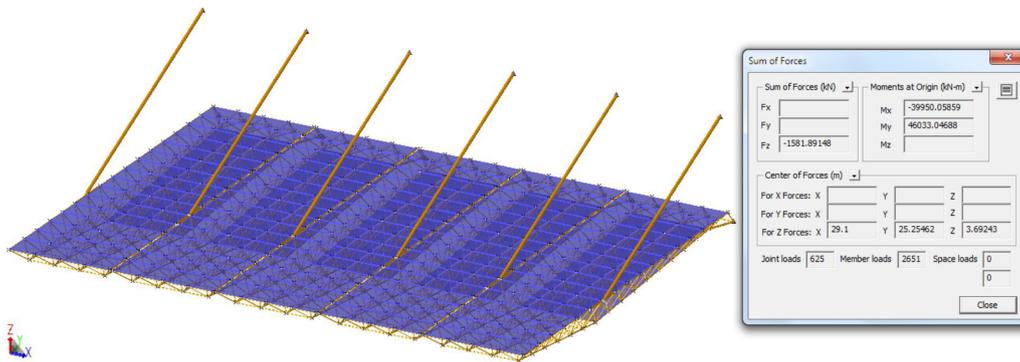


Figura 24 – Peso próprio modelado.

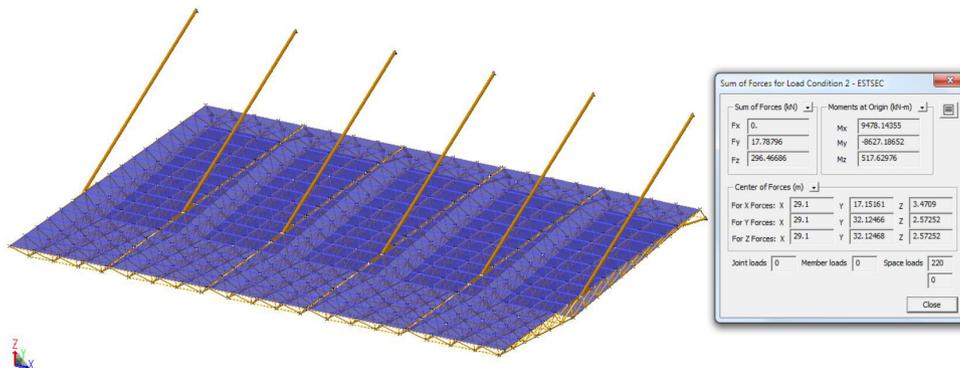


Figura 25 – Peso próprio da estrutura não modelada.

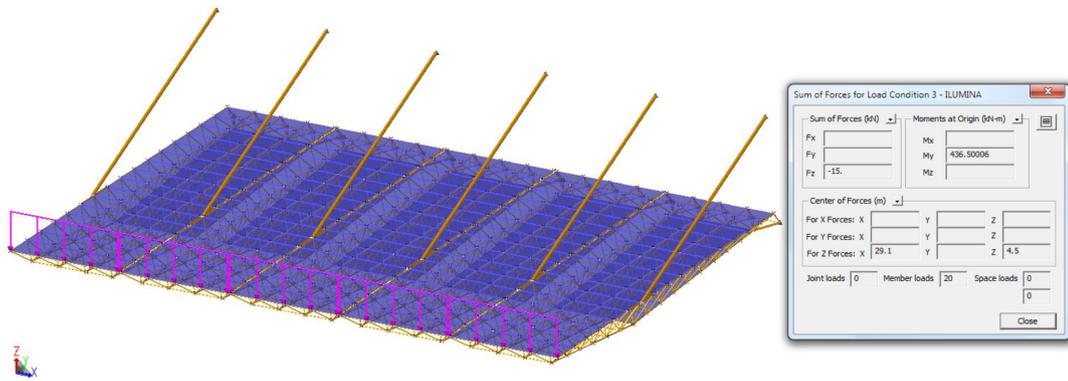


Figura 26 – Peso próprio do sistema de iluminação.

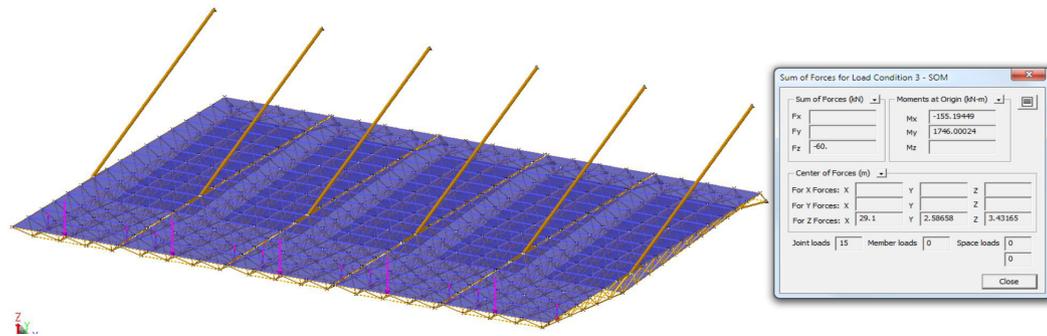


Figura 27 – Peso próprio do sistema de som.

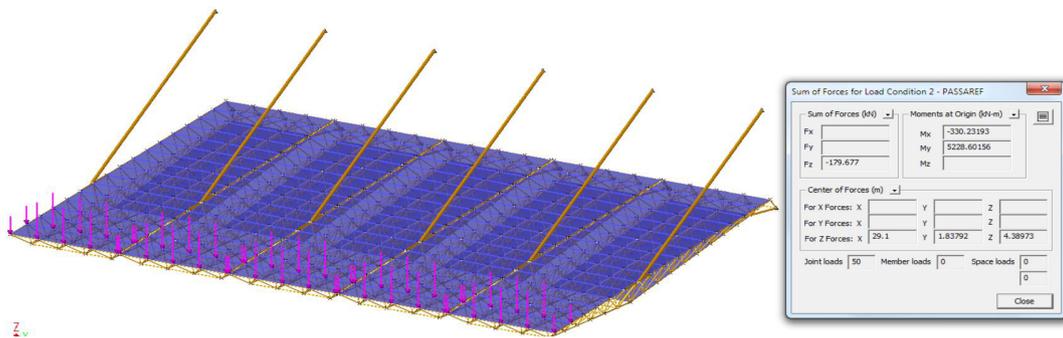


Figura 28 – Peso próprio das passarelas.

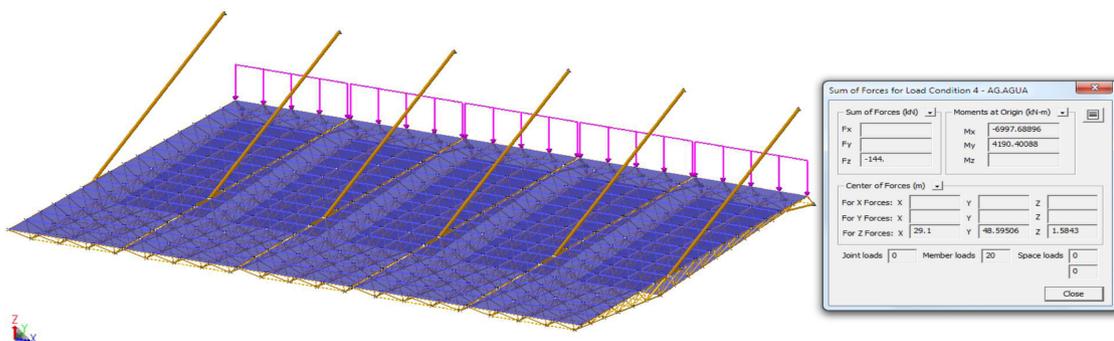


Figura 29 – Carga de águas pluviais.

3.3.4 Cargas de Vento

No que diz respeito às cargas de vento, são válidas as mesmas considerações feitas no item 2.3.5, inclusive a localização do estádio, o cálculo da pressão dinâmica do vento e a aplicação deste carregamento. As Figuras 31 e 32 apresentam a aplicação da carga de vento considerando a pressão dinâmica do vento perpendicular à placa.

3.4 Combinações

Para a análise estrutural da cobertura do estádio estudado foram consideradas duas combinações críticas. A primeira considerando as cargas gravitacionais e acidentais – vento (pressão) e a

segunda considerando as cargas gravitacionais e acidentais – vento (sucção).

Os coeficientes de ponderação das ações foram considerados conforme o EUROCODE, aplicando-se 1,35 para as cargas gravitacionais e 1,5 para as cargas acidentais. Para a segunda combinação foram considerados os coeficientes 0,90 para as cargas gravitacionais e 1,5 para as cargas acidentais. A Tabela 13 apresenta o exposto

4 Comparação Entre os Estudos de Caso

A comparação realizada neste item é referente ao peso próprio por unidade de área projetada de cada um dos sistemas estruturais de cobertura de estádios estudados.

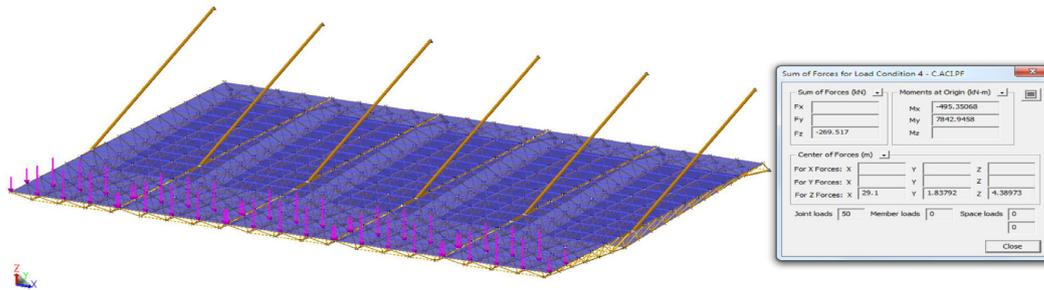


Figura 30 – Sobrecarga nas passarelas.

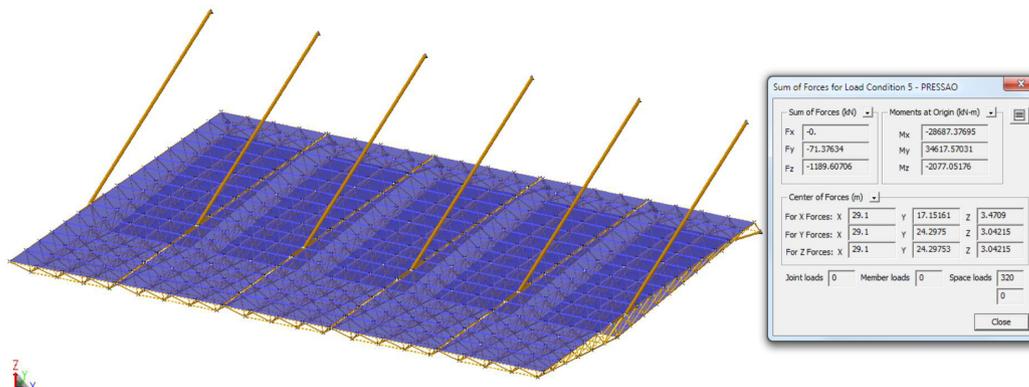


Figura 31 – Vento – pressão.

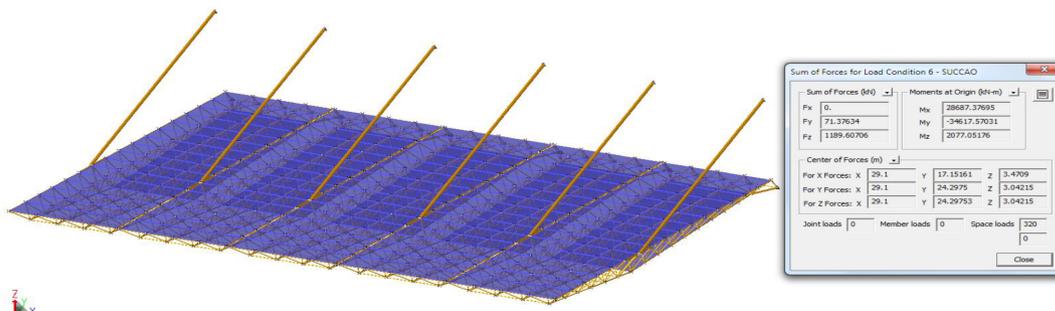


Figura 32 – Vento – sucção.

O estádio de cobertura em cabos apresentou uma área projetada de 27823,61 m². Já o estádio em treliça espacial apresentou uma área projetada de 2915,7 m².

O peso próprio total do sistema estrutural em cabos, de acordo com a Tabela 3, foi de 2585,08 ton. Já o sistema estrutural em treliça, de acordo com a tabela 10, foi de 108,29 ton.

Logo, o peso próprio por unidade de área do estádio em cabos foi de 92,91 kg/m², enquanto que o do estádio em treliça foi de 37,14 kg/m².

Desconsiderando, para o estádio em cabos, o peso próprio do anel de compressão externo, o peso próprio da estrutura é de 712,8 ton e o peso por unidade de área projetada é de 25,62 kg/m². Já para o estádio em treliça espacial, desconsiderando o peso próprio dos tirantes, o peso próprio da estrutura é de 69,46 ton e o peso por unidade de área projetada é de 23,82 kg/m². A Tabela 14 exhibe um resumo do exposto nos parágrafos anteriores.

5 Conclusões

Aparentemente o sistema estrutural em cabos se apresenta como o mais leve, entretanto a necessidade da existência de um anel de compressão externo robusto torna a estrutura mais pesada. Por isso, do ponto de vista do peso próprio por unidade de área projetada e, por conseguinte do consumo de materiais, o sistema estrutural em treliça se mostra mais atraente, por apresentar menor consumo de materiais e consequentemente menor preço.

Apesar do sistema estrutural em cabos se mostrar marcante do ponto de vista arquitetônico, necessita de mão de obra muito especializada tanto para a execução tanto para o projeto, o que no final acaba por encarecer o projeto como um todo. Já o sistema estrutural em treliça tem o conhecimento acerca do comportamento estrutural bastante difundido, o que torna o projeto como um todo mais barato.

6 Referências Bibliográficas

- ESDRAS P. OLIVEIRA. (2012). Sistemas estruturais de coberturas de estádios. Universidade Federal Fluminense (UFF). Dissertação de mestrado.
- JORG SCHLAICH, RUDOLF BERGEMENN. Light Structures.
- BUCHUCHHOLDT, H.A. (1985). An Introduction to Cable roof Structures. Cambridge, Cambridge University Press. 257p.
- KATHERINA S. (2004). Wide Span Cable Structures. University of California, Berkeley. Dissertação de Mestrado.
- HIZURU OBATA, SASQUIA. Arquitetura Têxtil: Aplicações em Coberturas de Eventos Exacta [en línea] 2008, 6 (Julio-Diciembre) <<http://redalyc.uaemex.mx/src/inicio/ArtPdfRed.jsp?iCve=81011748009>>

Tabela 13 – Combinações.

<i>Tabela de Combinações</i>			
<i>Combinação</i>	<i>Cargas</i>	<i>Descrição</i>	<i>Coefficiente</i>
1	<i>Cargas Gravitacionais</i>	<i>Peso Próprio Modelado</i>	1.35
		<i>Peso Próprio Não Modelado</i>	1.35
	<i>Cargas Acidentais</i>	<i>+ guas Pluviais</i>	1.5
		<i>Sobrecarga</i>	1.5
		<i>Vento (Pressão)</i>	1.5
2	<i>Cargas Gravitacionais</i>	<i>Peso Próprio Modelado</i>	0.9
		<i>Peso Próprio Não Modelado</i>	0.9
	<i>Cargas Acidentais</i>	<i>Vento (Sucção)</i>	1.5

Tabela 14 – Tabela resumo da comparação.

<i>Comparação</i>					
<i>Sistema Estrutural</i>	<i>+ rea Projetada (m²)</i>	<i>Peso Próprio Total (ton) - A</i>	<i>Peso Próprio (ton) - B</i> <i>* Cabos - Sem Anel de Compressão Externo</i> <i>* Treliça - Sem Tirantes</i>	<i>Peso Próprio por Unidade de + rea Projetada (kg/m²) - A</i>	<i>Peso Próprio por Unidade de + rea Projetada (kg/m²) - B</i>
<i>Em Cabos</i>	27823.61	2585.08	712.8	92.91	25.62
<i>Em Treliça Espacial</i>	2915.7	108.29	69.46	37.14	23.82