

## ANÁLISE NÃO-LINEAR DE ESTRUTURAS TENSIONADAS

Maria del Pilar Rodriguez Carneiro Gomes \*

\* Universidade Federal do Rio de Janeiro, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo,  
Departamento de Estruturas  
Cidade Universitária, Prédio da Reitoria, Rio de Janeiro, Brasil  
e-mail:pilarrcg@acd.ufrj.br

**Key words:** Estruturas Tensionadas, Coberturas Elípticas Tensionadas, Coberturas de Estádios, Coberturas Elípticas com Anel Central, Elementos Finitos, Análise Não-linear.

**Abstract.** *The subject of this work is to present the structural analysis of a structure idealized by the architect Mauricio Lippi G. Dias. This structure is to cover a bicycle races stadium to be built in Bosque da Barra in Rio de Janeiro. The structure has elliptical projection with 88m in smallest axis and 150m in largest axis. The tensile structure is supported by cables connected to piles located around the elliptical projection. The cables are connected to reinforced concrete foundations outside the elliptical projection. Inside the surface and the cables are connected to a steel ring with 38m diameter located in one ellipse focus. This work presents a finite elements model to design flexible structures by means of a specific computer program prepared by the author. The computer program allows to make physical or geometrically no-linear analysis. Incremental and iterative analyses are made to prepare the limit load curve. Results of the analyses including ring tension, support reactions in the piles, cables tension efforts and the more damaged areas in the surface located in the largest dimensions are presented.*

## 1 INTRODUÇÃO

A estrutura analisada foi idealizada pelo arquiteto Maurício Lippi G. Dias para cobertura de um velódromo a ser construído no Bosque da Barra. Trata-se de um grande estádio coberto para prática de atividades ligadas ao ciclismo.

Esta estrutura é formada por uma cobertura de projeção elíptica que possui 88m no eixo menor e 150m no eixo maior.

A cobertura flexível tensionada se apoia em cabos ligados a mastros que se situam externamente ao redor da projeção elíptica.

Os cabos são ancorados em fundações de concreto armado situados fora da projeção da elipse.

Internamente, a cobertura e os cabos se prendem a um anel metálico de 38m de diâmetro, situado num dos focos da elipse.

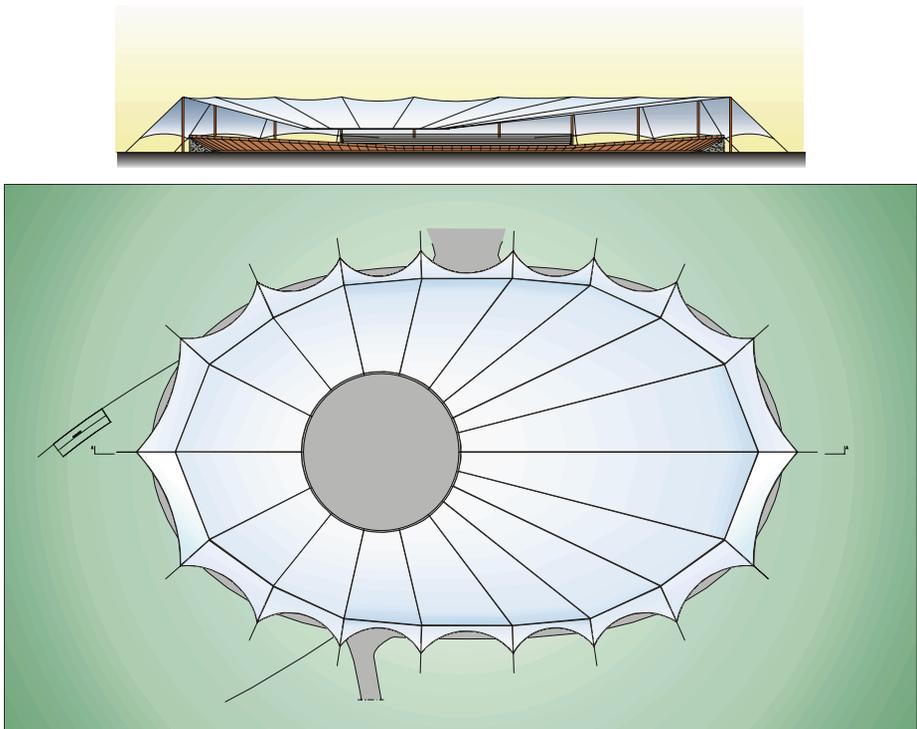


Figura 1: Estrutura tensionada de projeção elíptica para cobertura de um velódromo idealizada pelo arquiteto Maurício Lippi G. Dias

A utilização de um modelo de elementos finitos para o projeto de superfícies flexíveis através de um programa de computador é muito simples e possibilita a otimização do projeto.

Neste trabalho foi utilizado um programa de computador desenvolvido pelo autor, baseado no método dos elementos finitos, que utiliza elementos do tipo Serendipity, Heterosis ou Lagrangian que podem ser discretizados em camadas de materiais iguais ou diferentes.

O programa de computador utilizado permite fazer análises física ou geometricamente não lineares.

A integração a ser utilizada nas análises pode ser opcionalmente escolhida como reduzida ou seletiva.

O programa analisa as estruturas para diferentes incrementos de carga, fornece os respectivos deslocamentos, permite a preparação da curva da carga limite e destaca as regiões dos elementos onde o material da superfície flexível atinge o limite da tensão de tração, nas diferentes camadas em que o elemento foi discretizado.

Na estrutura pesquisada são feitas análises incremental iterativas que permitem solicitar a estrutura até atingir a carga limite.

São apresentados os resultados obtidos nas análises que incluem a tração no anel interno, as reações nos apoios constituídos pelos mastros, os esforços de tração nos tirantes e as regiões mais solicitadas da cobertura situadas nas partes mais extensas e próximas ao anel central.

Utilizando estes resultados é possível visualizar a relação que deve existir entre cargas verticais, resistência da membrana da cobertura, tração nos cabos, resistência do material do anel central bem como fazer o dimensionamento dos mastros.

Através dos recursos da Análise Dimensional é possível preparar gráficos que relacionam estes resultados e a partir dos gráficos analisar estruturas semelhantes.

Análises similares à apresentada podem ser feitas para qualquer tipo de estrutura, independentemente de sua forma ou carregamento.

Existe uma grande vantagem em fazer estas análises e a partir dos resultados preparar gráficos para estruturas semelhantes. Desta maneira é possível otimizar as estruturas tanto no que se refere a forma como ao uso do material.

O ideal seria sempre adequar a forma da estrutura ao tipo de material da cobertura evitando o superdimensionamento das estruturas reduzindo ao máximo o peso das coberturas.

A otimização é possível quando se utilizam os recursos computacionais apresentados neste trabalho aliados a utilização dos gráficos baseados na Análise Dimensional.

## 2 MODELO DE ELEMENTOS FINITOS

A cobertura foi discretizada em elementos do tipo Serendipity de 8 nós. Os elementos utilizados neste programa de computador são divididos em varias camadas e desta forma é possível o acompanhamento dos resultados da plastificação dos elementos do ao longo da espessura.

Nesta estrutura foram utilizados apenas 9 elementos constituídos de 8 camadas. Os resultados foram obtidos nos pontos de Gauss. As análises incremental iterativas podem ser fisica ou geometricamente não-lineares. A integração utilizada pode ser reduzida ou seletiva.

Neste caso foram feitas análises não lineares geometricas utilizando integração reduzida. Os resultados foram obtidos em 4 pontos de Gauss.

A seguir esta apresentado o modelo da estrutura dando ênfase as coordenadas dos nós que permitiram a elaboração do modelo de elementos finitos.

Devido a simetria da estrutura em relação ao eixo maior da elipse foi analisada metade da estrutura o que permitiu que o modelo tivesse apenas 9 elementos e 48 nós.

O limite dos elementos coincide com a divisão da cobertura pelos cabos que ligam o anel central aos mastros externos. Desta forma as reações nos mastros são as reações nos nós externos e as trações no anel devido aos tirantes aparecem nos nós dos elementos que estão sobre o anel.

A membrana terá as costuras principais sobre os cabos e as partes a serem costuradas tem as dimensões dos elementos finitos.

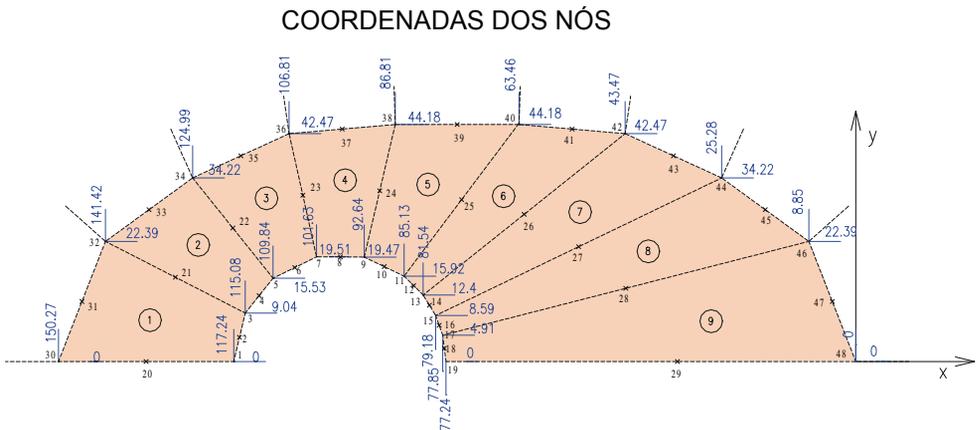


Figura 2: Modelo de elementos finitos e coordenadas dos nós

### 3 REAÇÕES NOS PONTOS DE APOIO DOS CABOS NO ANEL CENTRAL E NOS MASTROS

Foi considerada uma carga uniformemente distribuída vertical devido a peso próprio e eventuais sobrecargas. A carga considerada foi de  $250 \text{ kgf/m}^2$  e para cargas menores ou diferentes basta fazer uma redução ou correção correspondente.

Através de uma análise dimensional podem ser analisadas estruturas semelhantes com dimensões proporcionais.

Para a carga de  $250 \text{ kgf/m}^2$ , a resultante da força horizontal sobre o mastro que coincide com o nó 48 será de 2000 tf quando a cobertura atingir a carga limite de plastificação. Neste instante a tração no anel será de 800 tf.

Utilizando estes resultados é possível controlar a relação que deve existir entre cargas verticais devido a peso próprio e sobrecargas, resistência da membrana da cobertura, tração nos cabos, resistência do material do anel central e dimensionamento dos mastros.

Pela análise dos valores dos esforços obtidos verifica-se que será necessário utilizar cabos de aço de alta resistência e deverão ser feitos detalhes especiais tanto na ligação dos cabos com o anel como no apoio dos mesmos nos mastros. O anel também deverá receber especial atenção e merece ter um projeto bem detalhado.

Tratando-se de uma cobertura de grandes dimensões justifica-se uma otimização do projeto escolhendo uma cobertura leve e resistente.

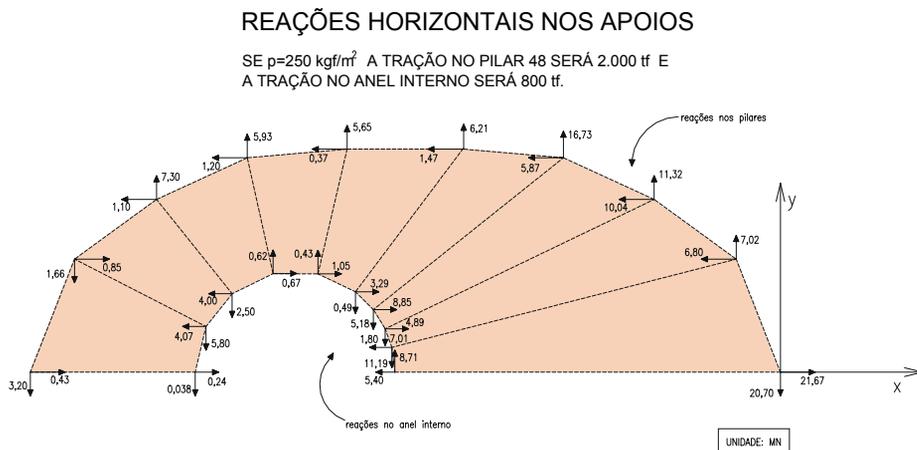


Figura 3: Componentes X e Y das reações horizontais dos cabos nos pontos de ligação com o anel e os mastros

#### 4 REAÇÕES VERTICAIS NOS PONTOS DE APOIO DOS CABOS NOS MASTROS

A seguir são apresentadas as reações verticais nos pontos de ligação dos tirantes com os mastros considerando uma carga uniformemente distribuída vertical devido a peso próprio e eventuais sobrecargas de  $250 \text{ kgf/m}^2$  devendo para cargas menores ou diferentes fazer uma redução ou correção adequada.

Através de uma análise dimensional também podem ser analisados estes esforços em estruturas semelhantes com mesma relação de proporcionalidade.

Para a carga de  $250 \text{ kgf/m}^2$ , a resultante da força vertical sobre o mastro que coincide com o nó 48 será de  $2,155 \text{ MN}$  quando a cobertura atingir a carga limite de plastificação.

Utilizando estes resultados é possível controlar a relação que deve existir entre cargas verticais, resistência da membrana da cobertura, tração nos cabos, resistência do material do anel central e dimensionamento dos mastros.

Pela ordem de grandeza dos esforços obtidos verifica-se que a estrutura analisada é de grande porte o que justifica a utilização de uma cobertura leve.

Neste caso além da beleza arquitetônica consegue-se, usando a cobertura flexível, uma excelente solução no que se refere a ventilação e iluminação natural.

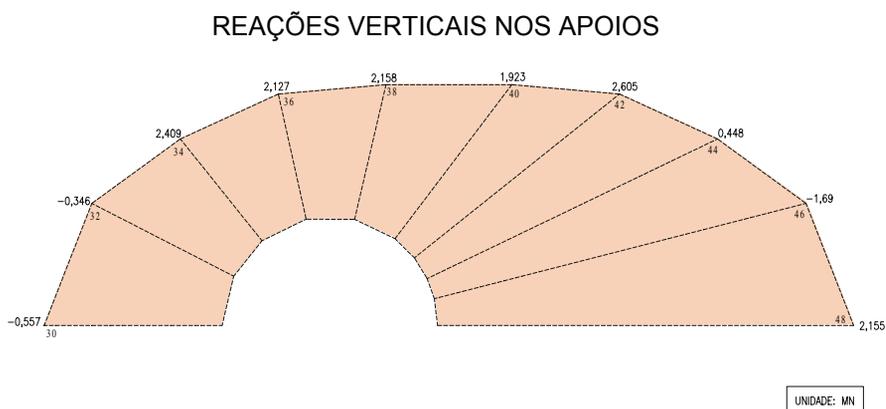


Figura 4: Reações verticais nos pontos de apoios dos cabos na ligação com os mastros

### 5 ÁREAS MAIS SOLICITADAS DA MEMBRANA DE COBERTURA

Fazendo uma análise incremental iterativa é possível solicitar a membrana até atingir a carga limite que plastifica por tração o material da cobertura.

As regiões plastificadas podem ser observadas no modelo nos elementos através da espessura, pois, a plastificação é indicada nos pontos de Gauss ao longo das camadas.

Nesta estrutura, como pode ser observado na figura, a plastificação ocorre nos elementos #6, #7, #8 e #9 próximo a região do anel.

A plastificação é obtida nos pontos de Gauss, nas diferentes camadas em que o elemento foi dividido ao longo da espessura.

A numeração dos pontos de Gauss, bem como a numeração das camadas de baixo para cima esta indicada na figura.

Nessas partes da membrana poderia ser utilizada uma cobertura de maior espessura ou de um material de maior resistência a tração. Seria portanto possível otimizar o uso do material da membrana reforçando apenas estas áreas.

### PLASTIFICAÇÃO NOS ELEMENTOS

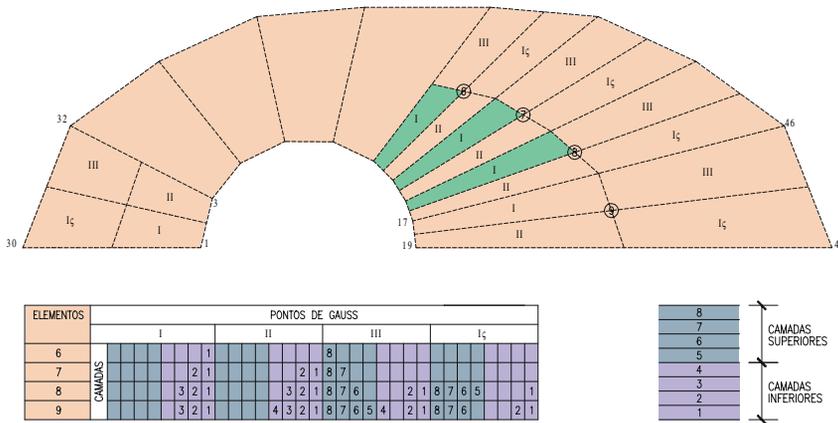


Figura 5: Áreas mais solicitadas da membrana de cobertura onde o material deveria ser mais resistente.

## 6 CONCLUSÕES

Foi mostrado neste trabalho que utilizando um modelo bem simples de elementos finitos e analisando os resultados de computador é possível controlar a relação que deve existir entre cargas verticais, resistência da membrana da cobertura, tração nos cabos, resistência do material do anel central e determinar os esforços que permitem o dimensionamento dos mastros onde se apoia a cobertura.

Em trabalhos futuros estes resultados do programa de computador em conjunto com os recursos da Análise Dimensional serão utilizados para preparação de gráficos que permitirão analisar e otimizar estruturas semelhantes.

As estruturas tensionadas podem ser analisadas com relativa facilidade usando programas de computador baseados no método dos elementos finitos. Utilizando um programa de computador com elementos do tipo Serendipity, Heterosis ou Lagrangian é possível fazer análises incrementais iterativas até alcançar a carga limite com poucos elementos e reduzido esforço computacional.

## 7 AGRADECIMENTOS

Ao arquiteto Maurício Lippi G. Dias pela idealização da estrutura, pela participação na preparação dos dados de entrada no computador e dos desenhos de apresentação dos resultados desta análise.

## 8 REFERÊNCIAS

- [1] Gomes, Maria del Pilar Rodriguez, *Elasto-plastic and Geometrically Non-linear Analysis of Shells by Finite Element Method*, COPPE/UFRJ, pp131,(1993).
- [2] Carneiro, Fernando Luiz Lobo Barboza ,UFRJ, (1993).
- [3] Gomes, Maria del Pilar Rodriguez, *Analysis of Shell Structures With Similar Shapes*, Proceedings of Joint Conference of Italian Group of Computational Mechanics and Ibero-Latin American Association of Computational Methods in Engineering, XVII CILAMCE, Padova, Italy, (1996).
- [4] Gomes, Maria del Pilar Rodriguez, *Graphics to determinate the limit load of shells with similar shapes*, Proceedings of Fourth International Colloquium on Computation of Shell & Spatial Structures, IASS-IACM 2000, Chania-Crete, Greece, (2000).
- [5] Gomes, Maria del Pilar Rodriguez, *Salle Omnisport Shell Design and Construction*, Proceedings of International Colloquium on Theory, Design and Realization of Shell & Spatial Structures, IASS-2001, Nagoya, Japan, (2001).
- [6] Gomes, Maria del Pilar Rodriguez, *Análise de estruturas tensionadas de projeção elíptica para cobertura de estádios esportivos*, I Simpósio Nacional sobre Tensoestruturas São Paulo, Brasil, (2002).

Endereço para correspondência:

Maria del Pilar A. M. Rodriguez Carneiro Gomes

Condomínio Aldeia de Itaipu, Rua C, No. 12

CEP:24355-260 Itaipu- Niterói- Rio de Janeiro –Brasil

E-mail: [pilarrcg@acd.ufrj.br](mailto:pilarrcg@acd.ufrj.br)

Tel: ++55 021 2709-2914 Fax:++55 021 2608-0388