



Universidade Federal do Pampa

Campus Alegrete

## **RELATÓRIO SOBRE UMA PONTE DE MACARRÃO DO TIPO ESPAGUETE**

|                              |           |
|------------------------------|-----------|
| Gabrielle Alves Santana      | 111151936 |
| Luiz Felipe Stona Leonardi   | 111151834 |
| Onias Pereira de Castro Neto | 111150224 |
| Pedro Brandão Campani        | 121151964 |

**Alegrete, 2015**

## SUMÁRIO

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>1</b> | <b>INTRODUÇÃO.....</b>                     | <b>3</b>  |
| <b>2</b> | <b>EMBASAMENTO TEÓRICO .....</b>           | <b>3</b>  |
| 2.1      | Treliça .....                              | 3         |
| 2.1.1    | Estruturas planas .....                    | 4         |
| 2.1.2    | Estruturas espaciais .....                 | 4         |
| 2.2      | Tipos de pontes treliçadas .....           | 4         |
| 2.3      | Dimensionamento das treliças .....         | 5         |
| 2.3.1    | Método dos nós .....                       | 5         |
| 2.3.2    | Método das seções .....                    | 6         |
| <b>3</b> | <b>MATERIAIS E FERRAMENTAS .....</b>       | <b>7</b>  |
| <b>4</b> | <b>METODOLOGIA .....</b>                   | <b>7</b>  |
| 4.1      | Desenvolvimento do Projeto .....           | 8         |
| 4.1.1    | Dimensionamento em Software .....          | 8         |
| 4.1.2    | Construção da ponte .....                  | 9         |
| <b>5</b> | <b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>       | <b>15</b> |
| <b>6</b> | <b>CONCLUSÕES .....</b>                    | <b>17</b> |
|          | <b>BIBLIOGRAFIA</b>                        |           |
|          | <b>APÊNDICE A CRONOGRAMA</b>               |           |
|          | <b>APÊNDICE B MOLDE 2 e 8</b>              |           |
|          | <b>APÊNDICE C MOLDE 3 e 7</b>              |           |
|          | <b>APÊNDICE D MOLDE 4 e 6</b>              |           |
|          | <b>APÊNDICE E MOLDE 5</b>                  |           |
|          | <b>APÊNDICE F MOLDE APOIOS</b>             |           |
|          | <b>APÊNDICE G VISTA FRONTAL E DETALHES</b> |           |
|          | <b>APÊNDICE H VISTAS LATERAIS</b>          |           |
|          | <b>APÊNDICE I VISTA SUPERIOR</b>           |           |

# **1 INTRODUÇÃO**

As primeiras pontes criadas pelo homem eram feitas com troncos de madeira e pedras. Como parte da história da humanidade, as pontes são conhecidas como símbolo de acesso e conexão, chegando a ser consideradas muitas vezes como um milagre arquitetônico. Com o passar dos anos, as técnicas de construção de pontes foram refinadas, passando daquelas simples construções em madeira para grandes pontes feitas em ferro e aço. O avanço dos estudos da área de pontes, possibilitou o desenvolvimento de técnicas de construção para os vários tipos de pontes, e um desses tipos é a ponte de treliças.

As pontes de treliças são parecidas com as pontes tradicionais, ou “pontes de vigas”, tendo apoios em cada uma de suas extremidades, mas a ponte de treliça possui estrutura de aço ou madeira (treliças) conectando as extremidades, concedendo mais força a estrutura.

Com base nas informações citadas, foi criada a competição de ponte treliçada de macarrão do tipo espaguete, onde a teoria apresentada nas disciplinas de mecânica geral, resistência dos materiais I e II e estabilidade das estruturas I e II pode ser colocada em prática.

Neste trabalho será apresentado o desenvolvimento da ponte de macarrão denominada “Bagageira” que participou da XXIII Competição de Pontes de Espaguete da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). As seções apresentam desde etapas de construção da ponte ao ensaio realizado na competição referida.

## **2. EMBASAMENTO TEÓRICO**

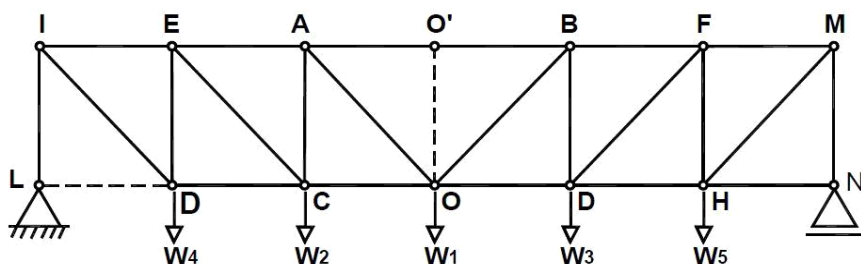
### **2.1 Treliça**

Sendo considerada uma estrutura simples, a treliça é uma solução considerável para vencer grandes vãos. Sua composição é feita através de barras ou elementos retos interligados por nós rotulados ou articulados. A idealização dessas estruturas é dimensionada para dar suporte ao carregamentos nela atuantes. Seu colapso ocorre quando o estado limite último de carregamento é atingido, ou seja, as solicitações superam a capacidade de carga. As treliças podem ainda ser planas ou espaciais.

### 2.1.1 Estruturas Planas

É o conjunto de elementos de construção, interligados entre si, em forma de uma estrutura rígida, com a finalidade de resistir a esforços normais de tração ou compressão. A denominação de treliça plana se deve ao fato de que todos os elementos estão no mesmo plano.

Figura 1 – Exemplo de treliça plana.



Fonte: Salvadori, Heller. 1975.

### 2.1.2 Estruturas Espaciais

Treliça espacial é um caso particular, onde não há um subsistema de planos principais. Seu formato é triangular e sua composição ocorre por intermédio de barras, não coplanares e ligadas umas nas outras por nós, criando assim um elemento estrutural de alta eficiência.

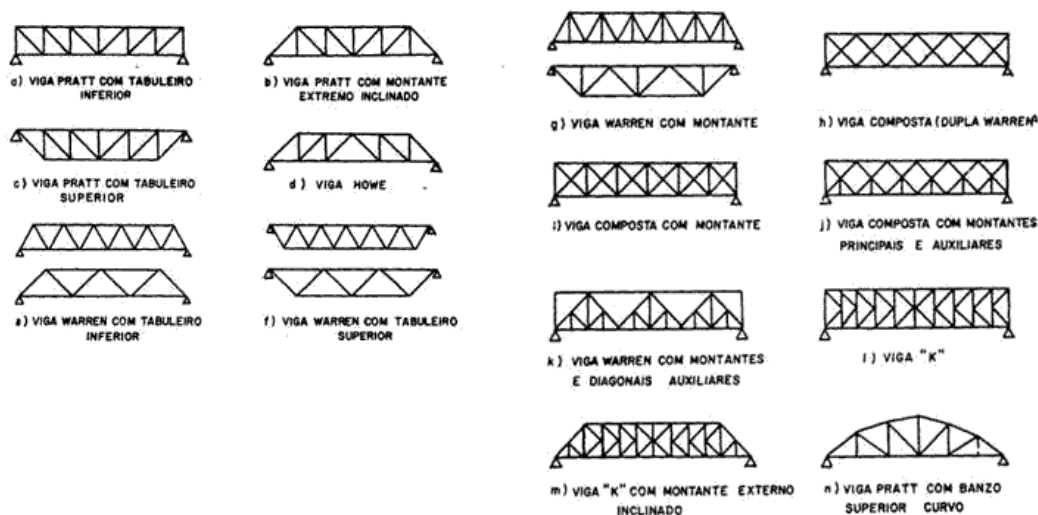
Quando corretamente dimensionadas, as barras e nós que formam a estrutura suportam e distribuem cargas axiais para todo o sistema.

## 2.2 Tipos de Pontes Treliçadas

Conforme citado, as pontes feitas com treliças são um sistema de construção antigo que se tornou popular por seu projeto ser mais econômico que pontes feitas no método tradicional.

Na figura a baixo, exemplos de diferentes modelos de pontes de treliça são apresentados.

Figura 2 – Modelos de pontes treliçadas.



Fonte: UFRGS

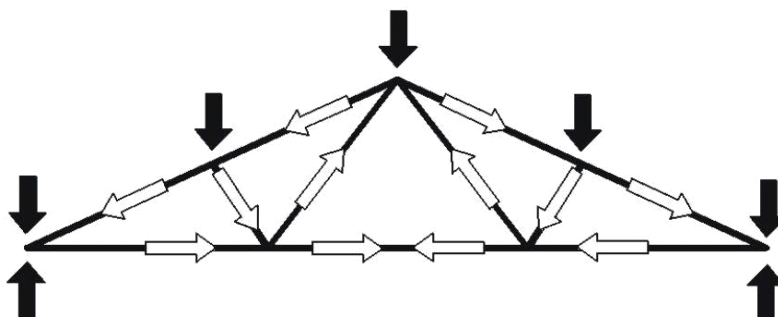
## 2.3 Dimensionamento das Treliças

Os esforços normais nas treliças podem ser obtidos por diferentes metodologias, entre elas: Método dos Nós, Método das Seções (Método de Ritter).

### 2.3.1 Método dos Nós

Também conhecido como Método de Cremona, que é o método mais utilizado para determinação dos esforços normais das barras, essa metodologia consiste em verificar o equilíbrio em cada nó. Primeiramente as reações de apoio são determinadas através das equações da estática, e posteriormente são analisadas o equilíbrio de cada um dos nós.

Figura 3 – Distribuição das forças pelo método dos nós.



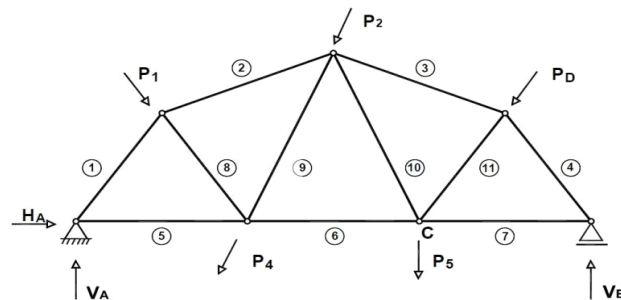
Fonte: Engel, Heino. 1980

Na figura acima, temos um exemplo da distribuição de forças pelo método dos nós, de uma treliça plana.

### 2.3.2 Método das Seções

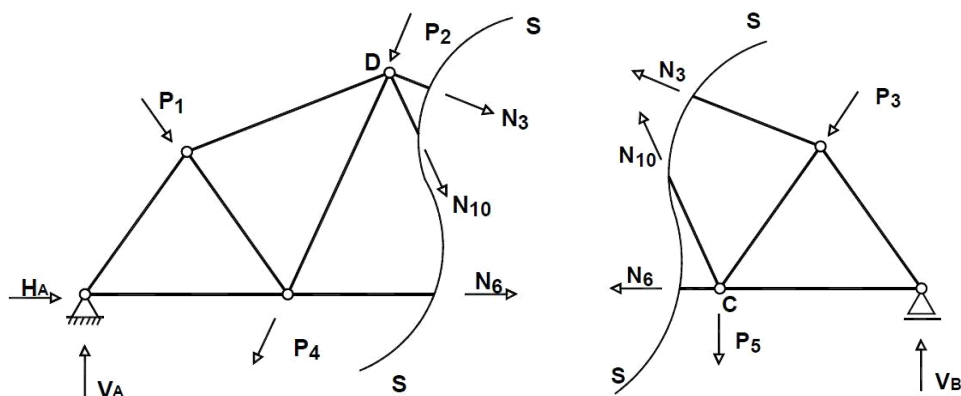
O Método de Ritter consiste em dividir a estrutura em duas partes. A seção analisada deve interceptar a treliça de tal forma que haja apenas 3 incógnitas, representando os esforços atuantes em cada uma das barras, que são determinados através das equações de equilíbrio. Na figura a seguir, temos uma exemplificação desse método.

Figura 4 – Treliça antes de ser separada em seções.



Fonte: Apostila de análise estrutural I

Figura 6 – Seções da treliça



Fonte: Apostila de análise estrutural I

Nesse exemplo, as barras 3, 6 e 10 foram cortadas para exemplificar como funciona método das seções.

### **3 MATERIAIS E FERRAMENTAS**

Os seguintes materiais foram utilizados para a construção da ponte,

- Macarrão da marca Barilla, do tipo: Spaghettoni nº 7, 2 unidades;
- Cola do tipo Resina Epóxi Redelease 1000ml, 1 unidade;
- Tubo de PVC 1/2'', 3,2 metros;
- Adesivo Instantâneo 50ml, 3 unidades;
- Pincel, 3 unidades;
- Lamina Serra, 1 unidade;
- Lixa Massa/Madeira, 1 unidade;
- Luva Supermaw, 7 unidades;
- Acetona 100 ml, 1 unidade;
- Seringa 100 ml, 2 unidades;
- Coletor Universal (pote), 2 unidades;
- Elásticos Amarelos (100 uni.), 1 pacote;
- Estilete Largo, 1 unidade.
- Softwares
  - FTOOL2;
  - AutoCAD 2016;
  - Solid Works.

### **4 METODOLOGIA**

Dentre as muitas opções de pontes treliçadas, para esse projeto optou-se pelo tipo de ponte com o banzo superior curvo, parecido com a ponte da figura 3, letra 'n', diferenciando na parte dos tirantes, que são todos conectados centro de solicitação (aplicação da carga). A escolha por esta forma construtiva justifica-se pelo fato deste modelo apresentar, em situações ideais, ausência de esforços cortantes e momentos fletores. Ainda, conforme a figura 6 uma equiparação entre as solicitações pode obtida, ou seja, os esforços de compressão no banzo apresentam divergência entre seções, bem como as solicitações de tração nos tirantes, quando comparados entre si.

Os parâmetros iniciais de projeto, respeitando os limites impostos pela competição, foram considerados da seguinte maneira: distância entre apoios de 1,06 metros e a altura máxima de 47 centímetros. Os tirantes foram compostos por 6 fios de espaguete e os

componentes do banzo superior por 37 fios dispostos circularmente, apresentados na figura 10 para as barras que compõem o arco, como demonstrado na seção subsequente.

Dados do espagete que são encontrados no site da própria competição:

- Quantia média de fios de espagete no pacote: 500 unidades;
- Peso médio de cada fio: 1g;
- Diâmetro médio: 1,8 mm;
- Área da seção transversal:  $2,545 \times 10^{-2} \text{ cm}^2$ ;
- Momento de inércia da seção:  $5,153 \times 10^{-5} \text{ cm}^4$ ;
- Comprimento médio de cada fio: 25,4 cm;
- Módulo de elasticidade longitudinal: 36000 kgf/cm<sup>2</sup>;
- Carga de ruptura por tração: 4,267 kgf;

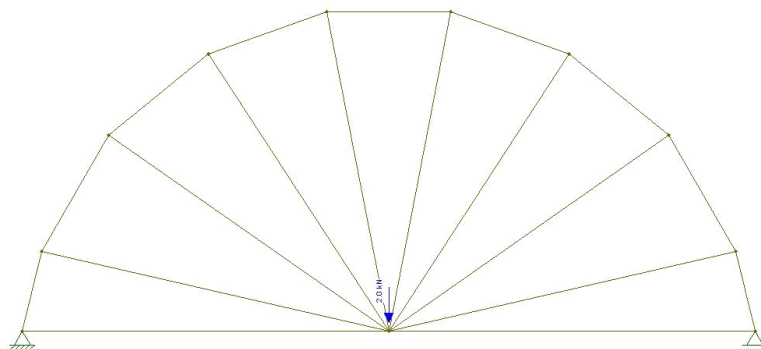
Após as especificações iniciais e o projeto consolidado, elaborou-se um cronograma com atividades Macros de forma a estimar o tempo global necessário para construção do modelo APENDICE A.

## 4.1 Desenvolvimento do Projeto

### 4.1.1 Dimensionamentos em software

Definido o modelo, sua composição foi inserida no software FTOOL2 contemplando as dimensões pré-estabelecidas. Aplicou-se na simulação uma carga de 2 kN no centro da ponte para verificar com o propósito de determinar os esforços atuantes em cada um dos componentes e equipará-los às especificações de tração e compressão dos fios apresentados pelo organizadores da competição. O modelo estrutural está apresentado na figura 5.

Figura 5 – Dimensionamento FTOOL2.

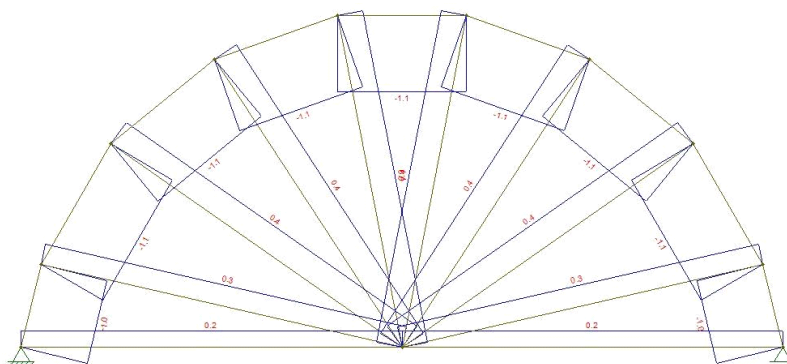


Fonte: Própria



Após a inserção do modelo no software com o carregamento atuante, as solicitações foram obtidas, conforme a figura 6

Figura 6 – Diagrama de esforço normal



Fonte: Própria

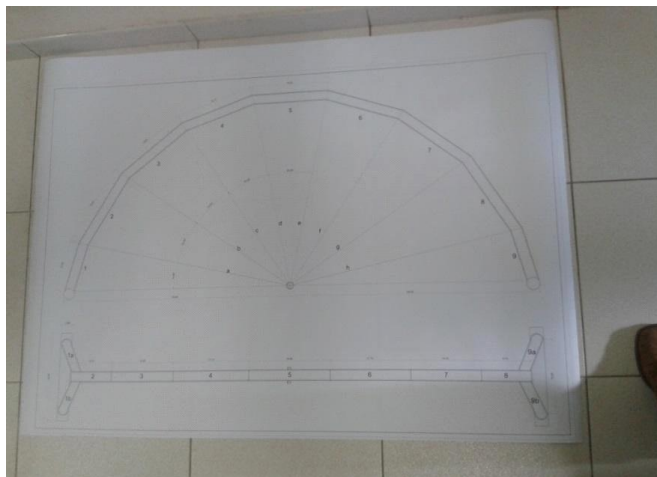
Ainda, entre os softwares utilizados, o SolidWorks permitiu a modelagem plana dos componentes do banzo superior. Esses moldes apresentados nos APÊNDICES B, C, D, E e F permitiram uma elevada acurácia nos recortes necessários aos componentes do arco.

Por fim, o detalhamento das vistas, apresentadas nos APÊNDICES G, H e I do projeto foi realizado através do software AutoCad.

#### 4.1.2 Construção da Ponte

Inicialmente, optou-se pela plotagem e impressão das pranchas feita no AutoCad em escala real. A primeira cópia foi fixada para melhor acompanhamento dos detalhes de construção e a segunda utilizada na confecção do suporte detalhado nas seções subsequentes, figura 7.

Figura 7 – Fixação do desenho em escala real



Fonte: Própria

Posteriormente, realizou-se os primeiros passos para confecção dos componentes arco principal conforme a figura 8. Esta montagem consiste em envolver os fios de espaguete em um tubo de PVC que possui o diâmetro externo de dimensão igual ao diâmetro interno do componente descrito em projeto (20mm). Sua montagem foi sucedida pela primeira demão de resina Epóxi. Foram realizadas 3 demãos externas e 1 interna em cada segmento durante a execução do projeto. Detalhes de intervalos são encontrados no cronograma APÊNDICE A.

Figura 8 – Confecção dos Elementos



Fonte: Própria

A confecção dos tirantes foi realizada em paralelo à construção dos segmentos do arco. Após aplicação da resina nestes elementos, sua disposição foi tal que garantiu

uma maior linearidade conforme a figura 9. Considerando que um único espaguete não tem o tamanho necessário para vencer o vão entre o arco e o ponto central de aplicação de carga, a composição dos tirantes foi feita através do transpasse entre diferentes fios do material, garantindo uma possível equidade na distribuição dos esforços.

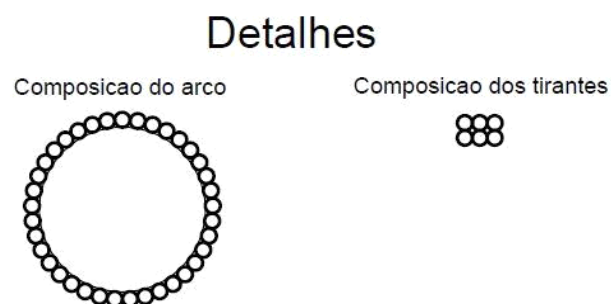
Figura 9 – Confeção dos Tirantes



Fonte: Própria

Detalhes das configurações de encaixe dos fios para as secções transversais dos elementos adotadas podem ser observados na figura 10. Foram necessários 37 fios para a composição de cada segmento do arco e 6 fios na análise da seção transversal dos tirantes.

Figura 10 – Detalhamento das secções



Fonte: Própria

A montagem do suporte responsável por apoiar os processos de conexão entre os elementos do arco foi feita com o auxílio da segunda cópia do desenho anteriormente

descrito. O suporte, figura 11, além de auxiliar para similaridade do projeto com o modelo real, tornou-se importante nas etapas de transporte e manuseio da ponte durante o traslado da ponte para a competição.

Figura 11 – Suporte em isopor



Fonte: Própria

Em seguida, os componentes do arco foram recortados, com o auxílio de uma máquina policorte, nas dimensões descritas em projeto e fixados um a um constituindo ao final o arco. Utilizou-se uma barra de aço para construção (vergalhão) de 8 mm de diâmetro e 60 mm de largura, conforme exigências da competição, fixada no centro inferior do arco principal para aplicação do carregamento. Nas extremidades (apoios), foi fixado um tubo de PVC para água fria de 20mm de diâmetro e 200 mm de comprimento. Posteriormente a montagem do arco e apoios, uma extremidade decada um dos tirantes foi pré-fixada no ponto de aplicação e a outra estendida ao encontro de dois componentes circulares do arco principal, figura 12. A seguir, foram realizados os recortes necessários para descarte dos materiais excedentes.

Figura 12 – Confeção do arco e fixação dos tirantes.



Fonte: Própria

A fixação dos tirantes e melhor distribuição da carga foi idealizada através da confecção de um semicírculo em resina, utilizada no restante dos componentes, cujo propósito foi envolver todos os tirantes ligados ao ponto de aplicação da carga, conforme figura 13.

Figura 13 – Molde semicírculo para elemento de distribuição da carga



Fonte: Própria

Após esse procedimento, uma nova demão de resina foi necessária, bem como uma análise minuciosa nas ligações. Alguns pontos foram considerados críticos, devido a falhas ocorridas durante as aplicações anteriores de resina. Essas regiões, consideradas



possíveis ameaças, foram preenchidas com resina epóxi com o propósito de equalizar a distribuição dos carregamentos.

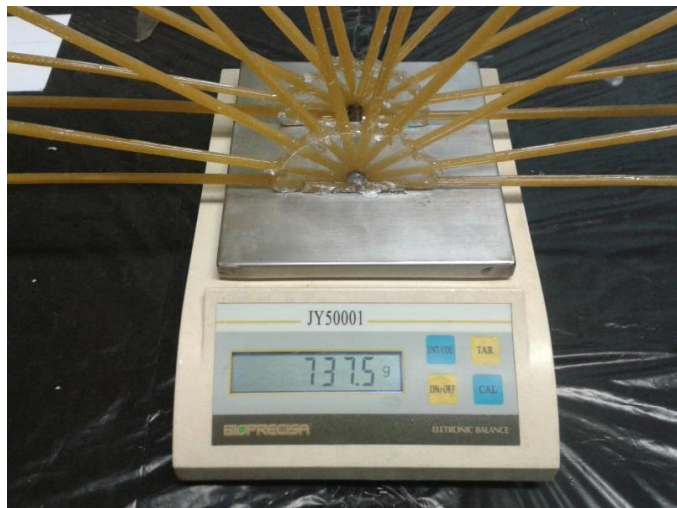
Figura 14 – Visualização da construção final do projeto



Fonte: Própria

Considerando que a massa total do elemento acabado é um critério para participação, bem como característica de desempate, no evento, essa variável foi obtida através de uma balança de precisão, expressando o valor de 737,5g, apresentado na figura 15

Figura 15 – Pesagem da estrutura



Fonte: Própria

Finalizando o processo de montagem, a ponte de espaguete foi disposta em uma embalagem adequada para manter sua integridade durante o transporte ao local da competição.

## 5 RESULTADO E DISCUSSÕES

A ponte foi submetida ao carregamento na XXIII Competição de Pontes de Espaguete - Semestre 2015/1 - Escola de Engenharia – UFRGS. O ensaio, realizado na competição, quantificou a carga de 102 Kgf, levando a estrutura à ruptura e obtendo a 4a. posição geral da competição.

A competição é apresentada *on-line* e sua gravação pode ser obtida através do portal de vídeos Youtube para acesso livre. Através deste recurso é possível analisar qualitativamente o momento de ruptura da estrutura da ponte durante o ensaio. Dessa forma, um exame detalhado do vídeo em questão foi realizado na tentativa de identificar o *frame* que apresenta o momento da ruptura. Diante dessa imagem, são elencadas possíveis razões de falhas estruturais do colapso, conforme figura 16.

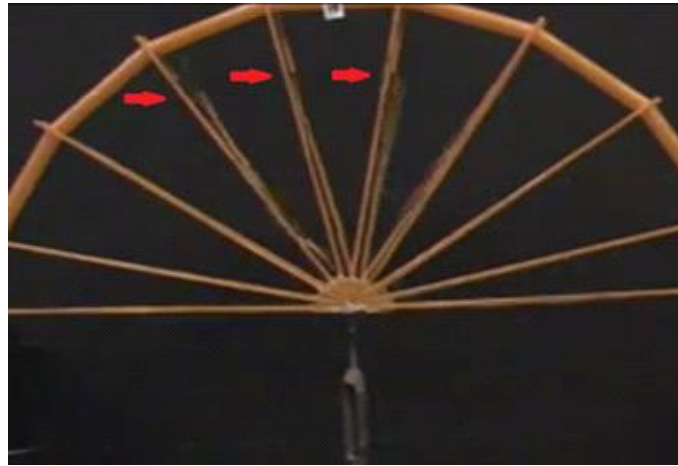
Figura 16 – Visualização do momento da ruptura



Fonte: UFRGS

Algumas considerações podem ser descritas quanto à figura 17. O colapso na estrutura foi iniciado pelo rompimento dos tirantes traseiros. Quanto a esta falha, acredita-se que o fator causador foi a excentricidade no carregamento aplicado.

Figura 17 – Visualização do momento da ruptura

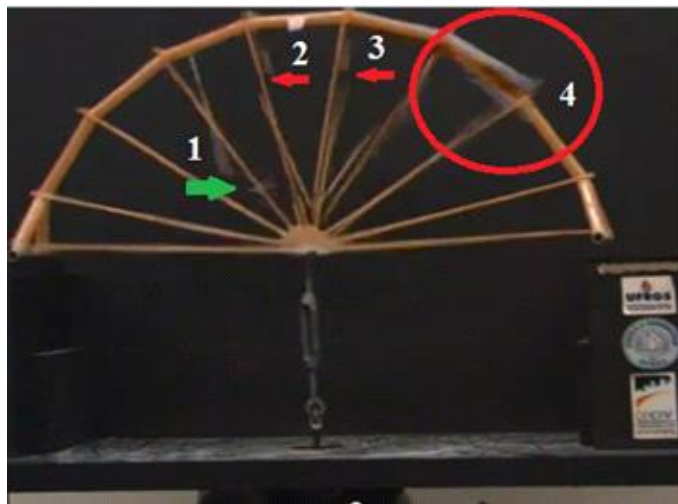


Fonte: UFRGS

Na figura 18, foi observado que no ponto 1 ocorreu a primeira ruptura. Esta afirmação justifica-se devido ao fato de, entre os três tirantes rompidos, apresentar o ponto em estudo a maior distância entre as extremidades rompidas do mesmo tirante,

Nota-se também que, imediatamente após a falha dos tirantes, o arco principal se rompeu (destaque circular no ponto 4).

Figura 18 – Visualização do momento da ruptura



Fonte: UFRGS

Perdida a capacidade de suporte dos tirantes 1, 2 e 3, uma redistribuição interna dos esforços faz-se necessária na busca estrutural por um comportamento estático. Qualitativamente, pode-se observar que o novo ponto crítico desenvolvido no elemento passa a ser aquele representado pelo número 4, levando a estrutura à ruína.



## **6 CONCLUSÕES**

O desenvolvimento do projeto permitiu aos integrantes do grupo, alunos da disciplina de Resistência dos Materiais II, assimilar em situações práticas, os conteúdos obtidos em sala de aula. Adicionalmente, despertou o interesse destes por atividades extraclasse que promovem a interação intra e extrainstitucional.

Quanto aos procedimentos de projeto, montagem e análise dos resultados, conclui-se que as falhas oriundas das solicitações evidenciam a importância dos cuidados indispensáveis durante desenvolvimento construtivo.

Recomenda-se para trabalhos futuros, simulações numéricas e ensaios destrutivos que antecedam competições dessa magnitude. Dessa forma, os pontos fracos encontrados durante a elaboração desse projeto podem ser trabalhados, com o intuito de aproximar os resultados esperados aos obtidos.

## **BIBLIOGRAFIA**

ALUAÇO, Tecnologia e Arte em Estruturas Metálicas e Espaciais. Disponível em: <[http://www.aluaco.com.br/padroes\\_geometricos/padroes\\_sistestrutural.html](http://www.aluaco.com.br/padroes_geometricos/padroes_sistestrutural.html)>. Acesso em: 01 de julho 2015.

DE ALMEIDA, Maria Cascão Ferreira. **Apostila de Elementos de Mecânica das Estruturas – Estruturas Isostáticas**. UFRJ, Rio de Janeiro.

DE LIMA, Luciano Rodrigues Ornelas. Material de aula da disciplina de Resistência dos Materiais IV. **Treliças**. Disponível em: <<http://www.labciv.eng.uerj.br/rm4/trelicas.pdf>>. Acesso em: 28 de junho 2015.

GRUPEX, Grupo de Experimentação em Estruturas. **Apostila De Análise Estrutural I**. UFSC. Santa Catarina. Agosto de 2009.

JOHNSON, Scott. **Pontes construídas utilizando estruturas treliçadas**. Disponível em: <[http://www.ehow.com.br/pontes-construidas-utilizando-estruturas-trelicadas-info\\_147956/](http://www.ehow.com.br/pontes-construidas-utilizando-estruturas-trelicadas-info_147956/)>. Acesso em: 27 de junho 2015.

UFRGS. **Competição de Pontes de Espaguete**. Disponível em: <<http://www.ppgec.ufrgs.br/segovia/espaguete/index.html>>. Acesso em: 25 de junho 2015.