

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

ROBSON AUGUSTO FERREIRA DA SILVA

**AVALIAÇÃO DA REPRESENTATIVIDADE DE MODELOS NUMÉRICOS PARA
ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE PONTES DE ESPAGUETE**

**Alegrete
2017**

ROBSON AUGUSTO FERREIRA DA SILVA

**AVALIAÇÃO DA REPRESENTATIVIDADE DE MODELOS NUMÉRICOS PARA
ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE PONTES DE ESPAGUETE**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia Civil
da Universidade Federal do Pampa, como
requisito parcial para obtenção do Título de
Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Luis Eduardo Kostaschi

**Alegrete
2017**

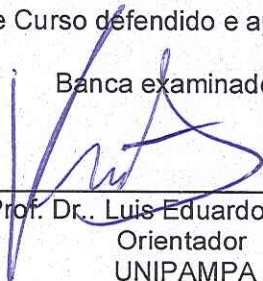
ROBSON AUGUSTO FERREIRA DA SILVA

**AVALIAÇÃO DA REPRESENTATIVIDADE DE MODELOS NUMÉRICOS PARA
ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE PONTES DE ESPAGUETE**

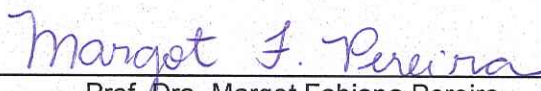
Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia Civil
da Universidade Federal do Pampa, como
requisito parcial para obtenção do Título de
Bacharel em Engenharia Civil.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 30 de junho de 2017.

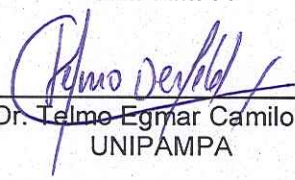
Banca examinadora:



Prof. Dr. Luis Eduardo Kostas
Orientador
UNIPAMPA



Prof. Dra. Margot Fabiana Pereira
UNIPAMPA



Prof. Dr. Telmo Egmar Camilo Deifeld
UNIPAMPA

RESUMO

As incertezas de modelo afetam várias etapas para uma análise de confiabilidade estrutural, desde a descrição das cargas, o sistema e a metodologia pela qual é feita a avaliação dos efeitos da carga no sistema. É extensa a literatura sobre incertezas de modelo e seu efeito na avaliação da confiabilidade estrutural. Um problema recorrente nestes estudos é a falta de recursos para o desenvolvimento de protótipos em escala real que representem adequadamente o comportamento estrutural. Baseado nesses estudos, este trabalho apresenta o dimensionamento e construção de um protótipo de ponte em arco, construída utilizando espaguete e resina epóxi. O dimensionamento da estrutura foi feito considerando as propriedades mecânicas do material disponíveis na literatura. Em escala reduzida mas com o mesmo propósito busca-se ensaiar o protótipo construído e comparar sua resposta estrutural com uma estrutura teórica modelada tridimensionalmente em software de elementos finitos. A modelagem numérica é realizada considerando as propriedades mecânicas das seções da estrutura real ensaiada de forma a fornecer dados o mais precisamente possível ao software de elementos finitos utilizados para simulação numérica. Foram comparadas as rigidezes teóricas e dos modelos testados com o objetivo de verificar se a simulação numérica é capaz de representar adequadamente o comportamento da estrutura. No final são feitas sugestões de metodologia de construção da ponte e de busca por novas rotinas numéricas que possam representar mais fielmente a estrutura.

Palavras-chave: Pontes de espaguete, Método dos elementos finitos, Incertezas de modelo, Protótipos em engenharia estrutural.

ABSTRACT

The model uncertainties affect several steps for a structural reliability analysis, from the description of the loads to the system and the methodology by which the effects of the load in the system are evaluated. Extensive literature has been written hypothesizing on model uncertainties and their effects on the assessment of structural reliability. A recurrent problem in these studies is the lack of resources for the development of real-scale prototypes that adequately represent structural behavior. Based on these studies, this current work presents the design and construction of an arch bridge prototype, built using spaghetti and epoxy resin. The dimensioning of the structure was crafted considering the mechanical properties of the material available in the literature. At a reduced scale but with the same purpose, the effort was consistently maintained to test the constructed prototype and compare its structural response with a theoretical structure modeled three-dimensional in finite element software. Numerical modeling is performed considering the mechanical properties of the real structure sections tested with the goal to provide data as accurately as possible to the finite element software used for numerical simulation. By comparing the theoretical rigidities and the models tested, we aimed to verify if the numerical simulation was adequate in representing the behavior of the actual structure. In the end, suggestions are made regarding the methodology of bridge construction and the search for new numerical routines that can represent the structure more faithfully.

Keywords: Spaghetti Bridges, Finite element method, Model uncertainties, Prototypes in structural engineering.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diferenças entre os resultados dos participantes.....	12
Figura 2 - Relação entre valores calculados e valores medidos.....	13
Figura 3 – Ponte recordista na Okanagan College, Canadá.....	17
Figura 4 – Ponte recordista na UFRGS, Porto Alegre.....	18
Figura 5 - Curva de flambagem elástica.....	20
Figura 6 - Seções tubulares típicas de espaguete.....	23
Figura 7 - Modelo estrutural em MEF, a) projeto inicial; b) projeto melhorado.....	24
Figura 8 – Módulos gerais do programa Abaqus.....	25
Figura 9 - Diagrama de blocos para simulações com o Abaqus.....	26
Figura 10 - Tensão <i>versus</i> deformação pós falha a tração e compressão.....	28
Figura 11 - Curvas tensão <i>versus</i> deformação.....	30
Figura 12 - Evolução do dano em materiais elasto-plásticos.....	31
Figura 13 - Modelos analisados.....	33
Figura 14 - Identificação das barras da treliça do modelo adotado.....	33
Figura 15 - Moldes das pontes.....	36
Figura 16 - Construção dos elementos do arco.....	37
Figura 17 – Construção e secagem das barras de tração após feitas as juntas.....	38
Figura 18 - Montagem do arco.....	39
Figura 19 - Colagem das diagonais.....	40
Figura 20 - Modelos finalizados.....	41
Figura 21 - Curvas tensão <i>versus</i> deformação dos elementos tracionados.....	42
Figura 22 - Ajuste linear da curva tensão <i>versus</i> deformação do CP 1.....	43
Figura 23 - Ensaio de tração.....	44
Figura 24 - CP`s de compressão ensaiados.....	45
Figura 25 - Curvas tensão <i>versus</i> deformação dos CP`s comprimidos.....	45
Figura 26 - Aparato de aplicação dos carregamentos.....	46
Figura 27 - Modelo estrutural em CAD.....	48
Figura 28 - Modelos teórico no Abaqus.....	48
Figura 29 - Curva tensão <i>versus</i> deformação do CP 4.....	50
Figura 30 - Curva teórica média dos ensaios de tração.....	51
Figura 31 - Curvas de rigidez das três réplicas ensaiadas.....	53
Figura 32 - Local da falha no exemplar Ponte 1.....	54
Figura 33 - Local da falha no exemplar Ponte 2.....	54
Figura 34 - Local da falha no exemplar Ponte 3.....	54
Figura 35 - Detalhe das ligações defeituosas.....	55
Figura 36 - Curvas força <i>versus</i> deslocamento dos modelos teóricos.....	56
Figura 37 - Curva força <i>versus</i> deslocamento modelo 2B.....	57
Figura 38 - Deslocamentos nodais no modelo 2B.....	58
Figura 39 - Equivalência de deslocamentos nodais no modelo 2A.....	58
Figura 40 - Simetria de tensões no: a) modelo 1A e b) modelo 2A.....	60
Figura 41 – Modelos 1A e 2A após eliminação das diagonais frágeis.....	61
Figura 42 – Modelo numérico 1B.....	62
Figura 43 - Instabilidade do modelo numérico 1B.....	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dimensionamento das barras de tração.....	34
Tabela 2 - Dimensionamento a compressão.....	35
Tabela 3 - Dados dos ensaios nas diagonais de tração	43
Tabela 4 - Dados obtidos nos ensaios com elementos do arco comprimido.....	46
Tabela 5 - Propriedades do aço e tubos de PVC	49
Tabela 6 - Propriedades utilizadas para seções do arco	50
Tabela 7 - Propriedades das seções das diagonais.....	51
Tabela 8 - Dados do ensaio nas pontes	53
Tabela 9 - Rigidezes dos modelos teóricos.....	59

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

MEF – Método dos Elementos Finitos

PVC – Policloreto de Vinila

CP – Corpo de prova

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 Considerações Iniciais	11
1.2 Justificativa.....	15
1.3 Objetivos Gerais	16
2 CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA	17
2.1 Pontes de Espaguete	17
2.2 Características do material.....	19
2.2.1 Dados sobre resistência a tração	19
2.2.2 Dados referentes a resistência a compressão	19
2.3 MEF para aplicações em pontes.....	21
2.4 Aplicações do MEF em estruturas de pontes de espaguete	22
2.5 Abaqus.....	24
2.6 Introdução do modelo constitutivo no Abaqus/Explicit	26
2.6.1 Material com comportamento frágil: “ <i>Smearred crack model</i> ”	27
2.6.2 Material com comportamento dano plástico: “ <i>Concrete Damaged Plasticity</i> ”	28
2.6.3 Material com comportamento elasto-plástico: “ <i>Ductile Damage Evolution</i> ”	30
3 MATERIAIS E METODOLOGIA	32
3.1 Escolha, dimensionamento e construção do modelo.....	32
3.1.2 - Dimensionamento das seções tracionadas.....	33
3.1.3 - Dimensionamento das seções comprimidas	34
3.1.4 Construção dos modelos.....	35
3.2 Caracterização mecânica do material	41
3.2.1 Barras de tração	41
3.2.3 Barras de compressão	44
3.3 Ensaio nas pontes de espaguete	46
3.4 Desenvolvimento do modelo numérico	47
3.4.1 Geometria e condições de contorno do modelo teórico.....	47
3.4.2 Propriedades do material adotadas no modelo numérico.....	48
3.4.3 Simulações	52
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	53

4.1 Resultados dos ensaios experimentais	53
4.2 Resultados das simulações dos modelos numéricos	55
5 CONCLUSÃO	66
5.1 Sugestões para trabalhos futuros.....	67
REFERÊNCIAS.....	68

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

A engenharia estrutural mesmo que apoiada na área das ciências exatas está rodeada de incertezas (Kaminski, 2007). Segundo o autor, as incertezas não estão apenas fundamentadas na variabilidade observada nas variáveis básicas, mas também em outros parâmetros como, por exemplo, média e variância, que mesmo baseadas em dados observados, não estão livres de equívocos, principalmente devido à quantidade de dados que é geralmente limitada. Modelos matemáticos utilizados na determinação da resposta da estrutura, frequentemente desenvolvidos a partir de simplificações, descrevem a realidade dentro de um grau de aproximação, dessa forma previsões alicerçadas nestes modelos podem ser consideradas imprecisas.

Por último e não menos importante, destacam-se as incertezas relacionadas a fatores humanos, como os erros humanos e as incertezas relacionadas a fatores imprevisíveis que devem ser consideradas em projetos inovadores.

De acordo com Riera *et. al* (2010) os métodos consolidados de projeto e verificação de estruturas demandam a avaliação e consideração das incertezas inerentes. Nas diferentes etapas desse processo estas incertezas podem ser classificadas nos seguintes grupos:

a) Incertezas associadas à aleatoriedade das ações e propriedades dos materiais:

Também denominada incerteza física, descreve a variabilidade intrínseca nas ações (vento, sismo, temperatura, tráfego de veículos, etc.) e nas características dos sistemas estruturais. É o único tipo de incerteza normalmente considerado de forma explícita em normas ou em estudos de confiabilidade.

b) Incerteza de modelo:

O efeito das ações sobre o sistema é determinado mediante o uso de modelo, por exemplo, estruturas de edifícios representadas por meio de modelos de elementos finitos. Critérios de ruptura de seções de barras submetidas a esforço de flexão e torsão combinados também constituem modelos. O erro de previsão, ou seja, a incerteza que ditos modelos induzem no processo é raramente levado em conta.

c) Incerteza fenomenológica:

Uma análise de confiabilidade, assim como o projeto estrutural, deve considerar todos os modos possíveis de falha. Como a possibilidade de que exista um modo desconhecido de falha é sempre real, resulta que avaliações de confiabilidade que não levem em consideração essa incerteza poderão estar subestimando o risco (Riera & Iturrioz, 1998). A incerteza fenomenológica se aplica a situações nas quais o modo de falha não considerado não faz parte dos conhecimentos da Engenharia da época. Quando o desconhecimento está associado ao executor do projeto tem-se um erro humano.

d) Erro humano:

É o erro no projeto ou na construção de uma estrutura devido à inabilidade, descuido ou outras causas, dos profissionais responsáveis. Esta, em estimadores de confiabilidade é também de difícil avaliação (Melchers, 1994).

De acordo com Kaminski (2007), com o objetivo de analisar a confiabilidade estrutural de projetos de torres metálicas de linhas de transmissão, CIGRÉ (1990) conduziu um amplo estudo para identificar a variabilidade da resposta a partir do modelo adotado. O projeto foi submetido a consultorias de projetos de vários países e embora a expectativa inicial era de resultados aproximados em virtude da simplicidade da estrutura, os resultados encontrados foram consideravelmente discrepantes. A Figura 1 mostra os dados de coeficiente de variação (CV) obtidos na condução desse estudo.

Figura 1 - Diferenças entre os resultados dos participantes

	Torre 1			Torre 2		
	CV mínimo	CV máximo	CV médio	CV mínimo	CV máximo	CV médio
Esforço axial estimado nas barras selecionadas	4,4%	22,0%	10,7%	1,2%	42,4%	8,8%
Resistência estimada das barras selecionadas	7,7%	27,9%	14,6%	6,0%	33,2%	18,2%
Resistência estimada da torre	-	-	37,1%	-	-	21,0%

Fonte: Kaminski (2007, pg 62).

Num estudo posterior foram feitas análises de projetos de protótipos das torres com o objetivo de medir os esforços axiais em barras selecionadas e a capacidade

das torres, novamente, os resultados encontrados foram significativamente divergentes como mostrados na Figura 2.

Figura 2 - Relação entre valores calculados e valores medidos.

	Torre 1	Torre 2
Média do esforço calculado nas barras / esforço medido nas barras	0,99 CV = 10,2 %	1,01 CV = 32,8 %
Resistência calculada da torre / resistência medida da torre	0,70	0,64

Fonte: Kaminski (2007, pg 63).

Conforme o autor, fica evidente que a escolha do projetista pela utilização de pórtico espacial ou treliça espacial, consideração de excentricidades, análise linear ou não linear, podem ter um impacto significativo sobre o projeto de uma torre.

Segundo Bulleit (2008), a incerteza do modelo é dividida em duas partes diferentes. Uma é definida como a incerteza relacionada ao quão bem as equações matemáticas podem descrever o comportamento físico da estrutura e a segunda é a incerteza sobre como um modelo de estrutura, como por exemplo, um modelo em elementos finitos, pode prever o comportamento da estrutura.

Ainda afirma que as incertezas que um engenheiro estrutural encontra durante um projeto vêm de uma variedade de fontes. O autor cita quatro dessas incertezas que estão presentes na maioria dos projetos, as quais são:

- Limites estatísticos: Falta de dados suficientes, devido a limitada disponibilidade de recursos para simulação de estruturas em escala real e inclusive protótipos de escala ampliada;
- Limites do modelo: o modelo estrutural utilizado na análise e projeto não inclui ou simplifica muitos aspectos da estrutura, e é possível que o modelo não seja conceitualmente correto;
- Aleatoriedade: as propriedades estruturais, como por exemplo, módulo de elasticidade, resistência do material não são exatamente um único número, mas variam em algum intervalo. As propriedades podem ser variáveis aleatórias;
- Erro humano: é possível que um erro tenha sido feito durante o projeto ou a construção.

Segundo Savoia (2012) o escopo das atividades de engenharia pode ser dividido em duas categorias:

- Categoria 1 - Prever o comportamento da estrutura em condições conhecidas como no caso de testes em laboratório ou, alternativamente, em condições parcialmente conhecidas no caso dos ensaios in loco.
- Categoria 2 - Para projetar uma estrutura, seja um protótipo único ou um produto em série, prescrevendo seu fator de segurança em relação as ações de projeto como as cargas, seja maior que um valor mínimo prescrito por normas. Essa categoria de problema é o típico abordado por um projetista.

O problema de categoria 1 ocorre quando um novo material ou protótipo é testado para conhecer o seu comportamento o melhor possível antes da sua utilização na prática, enquanto que o categoria 2 diz respeito ao teste in-loco de uma estrutura existente, por exemplo, onde seu comportamento é verificado através do ensaio e comparado com a predição de um modelo numérico/teórico para verificar, por exemplo, se ocorreram danos ou mau funcionamento após inspeções.

Em todos os casos, o problema de como abordar a presença de incertezas, como a intrínseca variabilidade do material e falta de conhecimento é muito importante considerando que as propriedades dos materiais são conhecidas com algumas incertezas.

Savoia (2012) ainda comenta que as propriedades do material geralmente variam em relação à estrutura, mas em modelos e cálculos o engenheiro normalmente assume valores constantes. Também os modelos numéricos que formulamos são sempre baseados em hipóteses simplificadoras em relação à geometria da estrutura, as leis constitutivas do material, as interações com outras estruturas e interações da estrutura com ela mesma, no caso, por exemplo, de suas ligações.

A decisão de utilizar o modelo da “Competição de pontes de Espaguete” é devido ao fato de que, como mencionado por Silva (2013), nos dias atuais os equipamentos de laboratório são materiais de alto custo e algumas vezes de difícil acesso, dessa forma, a adoção do recurso Competições de Pontes de Espaguete se torna uma alternativa interessante considerando que o espaguete é um material de baixo custo e pode ser facilmente caracterizado com ensaios simples em laboratório.

De acordo com Yount *et al* (2015), o uso de materiais não convencionais como elementos estruturais para estudos é uma ferramenta importante, pois, assim como os materiais estruturais, os palitos de picolé e fios de espaguete são imperfeitos,

alguns podem se apresentar curvos, deformados ou trincados, enquanto outros podem se apresentar extremamente frágeis, delgados ou rachados. De acordo com ele é fácil observar que nem todos os fios ou palitos possuem o mesmo formato e é necessário a busca por selecionar os melhores elementos inicialmente através de análise visual. Para o autor essa situação é semelhante àquela encontrada na engenharia prática onde materiais de construção perfeitos não estão disponíveis e os profissionais devem dar atenção especial a confiabilidade dos materiais em uso.

Para realizar o estudo destas incertezas em uma estrutura civil o custo pode ser bastante elevado. Reduzindo a escala, mas com o intuito de estudar este problema, no presente trabalho se propõe estudar uma estrutura espacial treliçada de uma ponte construída com espaguete. Como esta ponte é estudada em laboratório sob condições controladas, as incertezas associadas à aleatoriedade das ações são anuladas, porém todas as outras ainda seguem presentes.

1.2 Justificativa

Os modelos estruturais e estruturas em escala reduzida, algumas vezes chamados réplicas de modelos, sempre desempenharam um papel importante na engenharia para a pesquisa e projeto estrutural. (Harris e Sabnis, 1999).

De acordo com estes, um modelo estrutural pode ser definido como uma representação física de uma estrutura ou uma porção da mesma e geralmente são construídas em escala reduzida.

Heaney *et al* (1970) define um modelo estrutural como qualquer elemento estrutural ou composição de elementos estruturais construídos em uma escala reduzida (em comparação com estruturas em tamanho real) e para o qual leis de similaridade devem ser empregadas para interpretar os resultados dos ensaios.

Essas definições abrangem uma ampla classe de estudos de modelagem em estruturas de protótipo (escala real), como edifícios, pontes, torres, barragens, equipamentos mecânicos, etc. As cargas aplicadas incluem, carregamentos estáticos, dinâmicos, simulação de sismos, de efeitos térmicos e de ação do vento.

Ainda conforme Harris (1999), os métodos e equações de projeto em alguns casos são baseados diretamente no comportamento observado desses modelos de

pesquisa, e portanto, recebem aceitação total pelos projetistas e formuladores de códigos e normas.

A aproximação entre a estrutura e seu modelo de cálculo pode influenciar significativamente os resultados obtidos, assim como a previsão de resposta da estrutura.

Segundo Riera *et. al* (2010), as incertezas dos modelos em problemas lineares, além de sua importância, tem recebido pouca atenção na literatura técnica e a mesma se limita quase exclusivamente a problemas lineares. Mencionam, por exemplo, que o coeficiente de variação (CV) das forças axiais nas barras de torres metálicas treliçadas de linhas de transmissão, associado à incerteza do modelo foi avaliado em aproximadamente 3% por Kaminski (2007).

Considerando o exposto acima o presente pretende abordar o tema das incertezas de modelo utilizando um protótipo de estrutura de ponte, construída de espaguete realizando se uma modelagem tridimensional em um *software* comercial utilizando o método dos elementos finitos e verificar o mesmo pode representar de forma significativa o comportamento real da estrutura.

1.3 Objetivos Gerais

O objetivo deste trabalho é verificar a proximidade entre as respostas experimental e numérica de uma estrutura treliçada de ponte de espaguete.

Os objetivos específicos estão listados a seguir:

- a) Construir e testar pontes de espaguete com características e dimensões pré-determinadas e verificar a variabilidades da resposta experimental;
- b) Encontrar a rigidez da estrutura, das barras submetidas a esforços de tração e compressão e suas variabilidades obtidas experimentalmente;
- c) Construir um modelo de elementos finitos da estrutura de espaguete;
- d) Simulação da ruptura da ponte de espaguete e verificar a proximidade com a resposta experimental.

2 CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Pontes de Espaguete

Competições de projeto e execução de pontes de espaguete têm sido realizadas em diferentes instituições de ensino do mundo todo. Esses eventos têm como objetivo auxiliar estudantes de cursos de engenharia no entendimento dos conceitos de Mecânica dos Sólidos abordados nos anos iniciais dos cursos. É comum observar alunos desmotivados devido à complexidade em relacionar os conceitos físicos e matemáticos estudados em conhecimento aplicável. Desta forma, tal atividade tem sido proposta no intuito de motivar alunos nesses cursos.

As primeiras competições de pontes de espaguete relatadas ocorreram nas instituições de ensino Johns Hopkins University (EUA), Óbuda University (Hungria) e Okanagan College (Canadá).

A primeira instituição a desafiar estudantes do mundo inteiro para a construção de pontes de espaguete que suportem a maior carga e com o menor peso próprio foi a universidade canadense Okanagan College, cujo evento aberto no ano de 1988 teve a participação de 27 equipes de vários países. Naquela ocasião a massa total da estrutura, incluindo espaguetes e resinas, era limitada a 750 gramas, e os carregamentos foram aplicados com incrementos discretos a cada 10 segundos.

Nas competições organizadas pela Okanagan College, a ponte mais resistente desde o evento de 1988 até a competição de 2016 tinha uma massa total de 982 gramas e suportou uma força de 443,58 kgf. Esta ponte fez parte da competição de 2009 e foi projetada e executada por estudantes da Universidade de Győr, Hungria. A Figura 3 mostra o modelo recordista na Okanagan College.

Figura 3 – Ponte recordista na Okanagan College, Canadá



Fonte: Okanagan College (2016, não paginado)

Inspirados nas competições realizadas na Okanagam College, a Universidade Óbuda, Hungria, iniciou recentemente também sua competição mundial de testes em estruturas de pontes de espaguete, evento esse conhecido como REECS – World Championship in Spaghetti Bridge Building que ocorre desde o ano de 2003.

No Brasil, a mais tradicional competição desse porte é realizada pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul e teve início no ano de 2004. De acordo com os organizadores da competição o recorde de carregamento suportado entre as estruturas ali já ensaiadas foi de 234 kgf, modelo apresentado na Figura 4, com testes realizados em condições semelhantes aos ensaios em Okanagam College.

Figura 4 – Ponte recordista na UFRGS, Porto Alegre



Fonte: UFRGS (2016, não paginado).

Nas competições realizadas mundialmente, as regras referentes ao vão livre da estrutura, altura e peso limites são, de forma geral, padronizadas. No projeto dessas estruturas os estudantes usualmente desenvolvem um esboço do modelo de ponte, o qual deve respeitar várias condições e regras da competição, relacionadas as dimensões mínimas e máximas de vão, altura, largura e posição do ponto de carregamento na estrutura.

Após o desenvolvimento de um esquema inicial da ponte é necessário a realização de análises de tensões e esforços internos na estrutura, usando softwares ou abordagem analítica, com o objetivo de determinar as seções transversais de cada membro da treliça, baseado nas propriedades mecânicas do espaguete obtidas experimentalmente. Para uma melhor eficiência do modelo treliçado utilizado são

realizados análises na estrutura a partir da variação da altura, número de nós e disposição dos membros da treliça.

2.2 Características do material

De acordo com Gonzáles *et. al* (2005), as características da massa Barilla nº7 são as apresentadas abaixo.

Dados gerais da massa:

- Diâmetro médio: 1,8 mm
- Área da seção transversal: 2,545 mm²
- Momento de inércia da seção: 0,515 mm⁴
- Comprimento médio de cada fio: 254 mm
- Peso médio de cada fio inteiro: 1 g
- Peso linear: $3,937 \times 10^{-2}$ g/cm
- Módulo de Elasticidade Longitudinal: 3530,4 MPa

2.2.1 Dados sobre resistência a tração

A carga de ruptura por tração para um fio de espaguete, independe do comprimento do fio, foi determinada através do ensaio de 6 corpos de prova submetidos a tração até a ruptura, obtendo dessa forma uma carga média de ruptura para cada fio de 41,8 N.

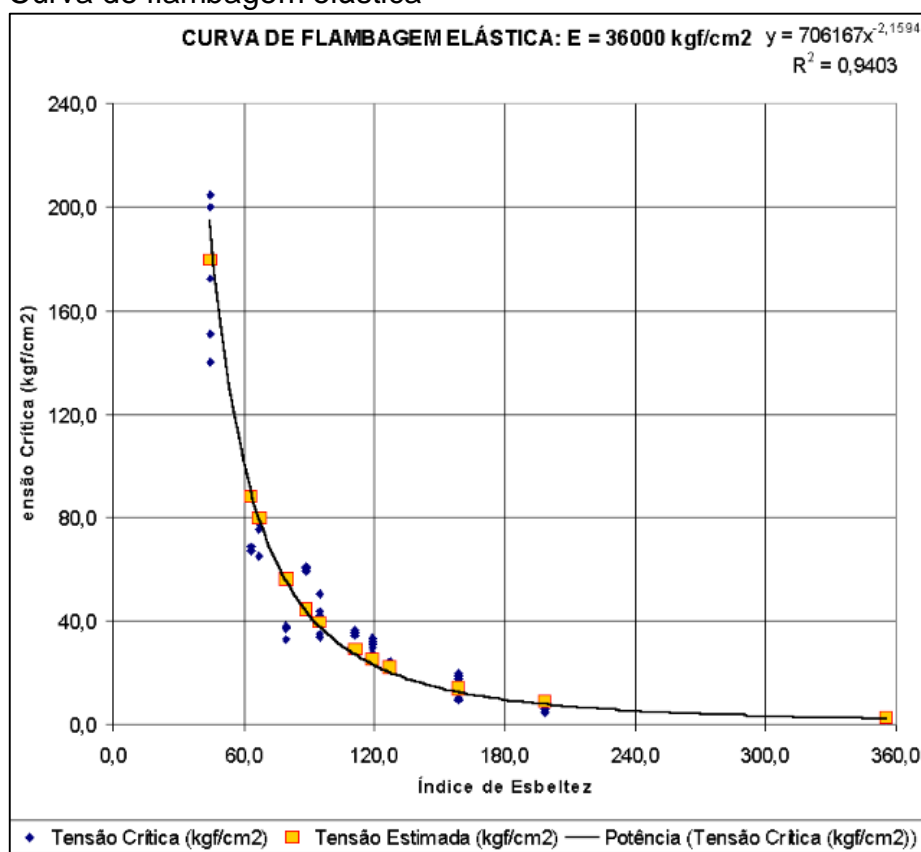
2.2.2 Dados referentes a resistência a compressão

A resistência a compressão também foram ensaiados e apresentados por Gonzáles *et al* (2005). A carga de ruptura por compressão dos fios de espaguete, está diretamente relacionada com o fenômeno da instabilidade, que depende do comprimento do fio de espaguete, de suas condições de vinculação das extremidades e das propriedades geométricas da sua seção transversal.

Para encontrar a quantidade de fios necessários para as barras solicitadas a compressão considera-se que a flambagem ocorre em regime elástico linear de acordo com a equação de Euler e será utilizado a curva de flambagem mostrada na

Figura 5, onde os pontos em azul representam os resultados experimentais, a curva em preto um ajuste de função potência, com $R^2=0,94$ e os pontos em amarelo os resultados para diferentes índices de esbeltez, levando-se em conta um Módulo de Young $E = 3530,4$ MPa.

Figura 5 - Curva de flambagem elástica



Fonte: Gonzáles et al (2005, não paginado).

A equação de Euler pode ser escrita como:

$$P_{crít} = \frac{\pi^2 EA}{\lambda^2}, \quad \lambda = \frac{l_{fl}}{\rho}, \quad \rho = \sqrt{\frac{I}{A}} \quad \dots(1)$$

Onde $P_{crít}$ é o esforço normal de compressão que a barra pode suportar, A é a área da seção transversal, λ é o índice de esbeltez da barra, l_{fl} é o comprimento de flambagem da barra, ρ é o raio de giração e I é o momento de inércia da seção.

Considerando – se que a partir de um certo número de fios de espaguete, a seção transversal tende para uma seção circular, pode – se escrever:

$$A = \pi R^2, \quad I = \frac{\pi R^4}{4}, \quad \rho = \frac{R}{2} \quad \dots(2)$$

E observando também que, em barras rotuladas – rotuladas, o comprimento de flambagem é igual ao comprimento real ou distância entre os nós, obtém – se:

$$N_c = \frac{\pi^3 ER^4}{4l^2}, \quad R = \sqrt[4]{\frac{4N_c l^2}{\pi^3 E}} \quad \dots(3)$$

Ainda que os nós não sejam rotulados, porém rígidos com uniões coladas, a consideração anterior é conservativa pois não se pode garantir o engastamento perfeito das barras nos nós, levando a uma situação intermediária entre a considerada rotulada e a engastada nas duas extremidades.

A partir das considerações acima, o número de fios pode ser obtido dividindo-se a área necessária pela área de cada fio.

$$\text{Número de fios} = \frac{\pi R^2}{\pi r^2} = \frac{R^2}{r^2} = \frac{\sqrt[2]{\frac{4N_c l^2}{\pi^3 E}}}{r^2} = \sqrt{\frac{4N_c l^2}{\pi^3 E r^4}} \quad \dots(4)$$

Onde r é o raio de um fio de espaguete.

Assim, para os dados do espaguete, a equação acima se torna:

$$\text{Número de fios} = \sqrt{\frac{N_c l^2}{27906 r^4}} \text{ para } N_c \text{ em } N, l \text{ e } r \text{ em } mm \quad \dots(5)$$

2.3 MEF para aplicações em pontes

De acordo com Zienkiewicz e Taylor (2000) o MEF é uma técnica numérica que basicamente consiste em encontrar soluções aproximadas para equações diferenciais parciais, dividindo um corpo em pequenas partes conhecidas como elementos finitos. Formulações obtidas a partir do MEF sobre as leis e princípios que regem o comportamento do corpo geralmente resultam em um conjunto de equações simultâneas que podem ser resolvidas por procedimentos diretos ou iterativos. Deste modo, efeitos de carregamento como deformações e tensões podem ser avaliados com maior acurácia. Até o presente momento o MEF tem sido o mais utilizado método de análise estrutural.

Segundo Fu e Wang (2015) quando aplicamos o MEF nas análises de pontes, existem algumas questões e problemas comuns que os engenheiros precisam clarificar. Estas questões incluem: 1- que tipos de elementos devem ser usados para a modelagem das estruturas; 2- quando um modelo 2D é suficiente e quando um modelo 3D é necessário; e 3- Como interpretar corretamente resultados do MEF a

partir da perspectiva da engenharia de pontes, especialmente quando a estrutura é modelada como elementos de placa.

Elementos de treliça (ou barra simples) em uma ponte são elementos lineares com apenas dois nós. Tais elementos possuem somente tração/compressão ao longo do eixo, e a mais importante característica: essas solicitações são constantes ao longo de todo elemento. Os rolamentos de pontes, cabos pré-tensionados e demais cabos em estruturas de pontes podem ser modelados como elementos de treliça.

Os elementos de pórtico ou barra geral são elementos lineares com apenas dois nós. Esses elementos se comportam como uma viga podendo estar sob tração ou compressão axial ou uma combinação de viga e elementos de treliça. A maior parte dos pacotes de MEF combinam os comportamentos de vigas, treliças e elementos submetidos a torção como um elemento de quadro – a maior parte dos elementos usados em análises de pontes.

2.4 Aplicações do MEF em estruturas de pontes de espaguete

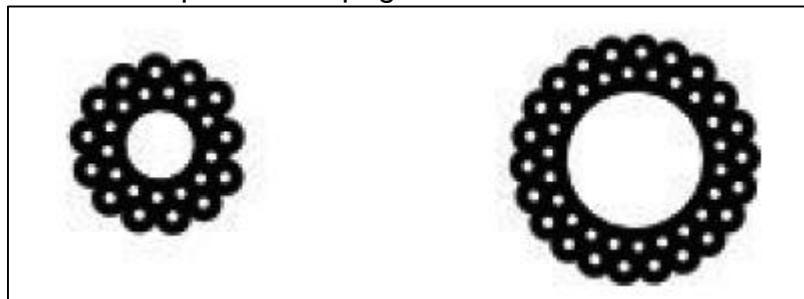
Segundo Beneyto e Gutierrez (2011) nas competições de pontes de espaguete realizadas na Universidad Nacional del Nordeste, previamente aos testes de ruptura realizados nas estruturas os participantes devem apresentar um memorial referente as motivações para a escolha do modelo estrutural adotado e um relatório de cálculo e de procedimentos adotados na simulação numérica da estrutura.

De acordo com esses autores, uma vez determinados as formas geométricas das estruturas procede-se com análises numéricas para obter tensões atuantes nas seções do modelo e verificar a possibilidade ou necessidade de alterações no projeto estrutural ou ainda alterações nas seções transversais. Beneyto e Gutierrez também destacam que as cargas suportadas pelos modelos desenvolvidos têm aumentado consideravelmente, pois, a princípio as estruturas eram consideradas como planas, não se realizando dessa forma, análises tridimensionais.

Conforme Mroginsky *et al* (2009) a utilização da metodologia numérica para análise dessas estruturas tem possibilitado uma melhora do projeto estrutural, como, por exemplo, a utilização de seções tubulares vazadas para as barras solicitadas a compressão, o que eleva o momento de inércia da seção, aumentando sua estabilidade mediante os possíveis efeitos da flambagem utilizando a mesma

quantidade de material. A Figura 6 apresenta as seções tubulares típicas utilizadas nessas estruturas.

Figura 6 - Seções tubulares típicas de espaguete



Fonte: Mroginsky *et al* (2009 - pg 2320)

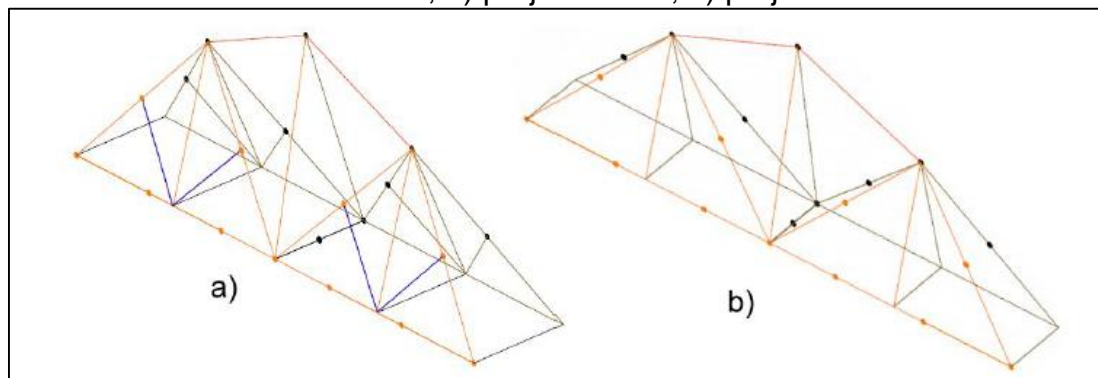
De acordo com Mroginsky *et al* (2009), a partir das análises estruturais realizadas também pode-se afirmar que a quantidade de barras que formam a estrutura é diretamente proporcional a possibilidade de erros de construção, de forma que os modelos utilizados atualmente tendem a ter um menor número de barras em relação aos modelos anteriores. Isto, segundo o autor, tem possibilitado o avanço no estudo da otimização das pontes de espaguete.

Os autores Gutierrez *et al* (2010) destacam que dentre os avanços obtidos a partir do uso do MEF nas análises dessas estruturas pode-se destacar:

- Substituição da análise bidimensional para tridimensional;
- Implementação de metodologia de projeto que limita a tensão das barras à tensão de escoamento;
- Implementação de metodologia de projeto que limita a tensão das barras da estrutura considerando o efeito da flambagem.

Segundo Gutierrez *et al* (2010), a análise numérica permitiu identificar claramente falhas nos esquemas estruturais de algumas pontes, como, por exemplo, barras do modelo que estavam submetidas a esforços muito pequenos ou nenhum esforço. Considerando que nessas estruturas as ligações e o peso da estrutura são questões críticas, os métodos numéricos tem possibilitado avanços significativos no projeto estrutural desses modelos. A Figura 7 demonstra uma ponte de espaguete modelada numericamente na qual a análise numérica permitiu identificar que as barras em azul estavam submetidas a esforço nulo e dessa forma foram excluídas do modelo no projeto.

Figura 7 - Modelo estrutural em MEF, a) projeto inicial; b) projeto melhorado



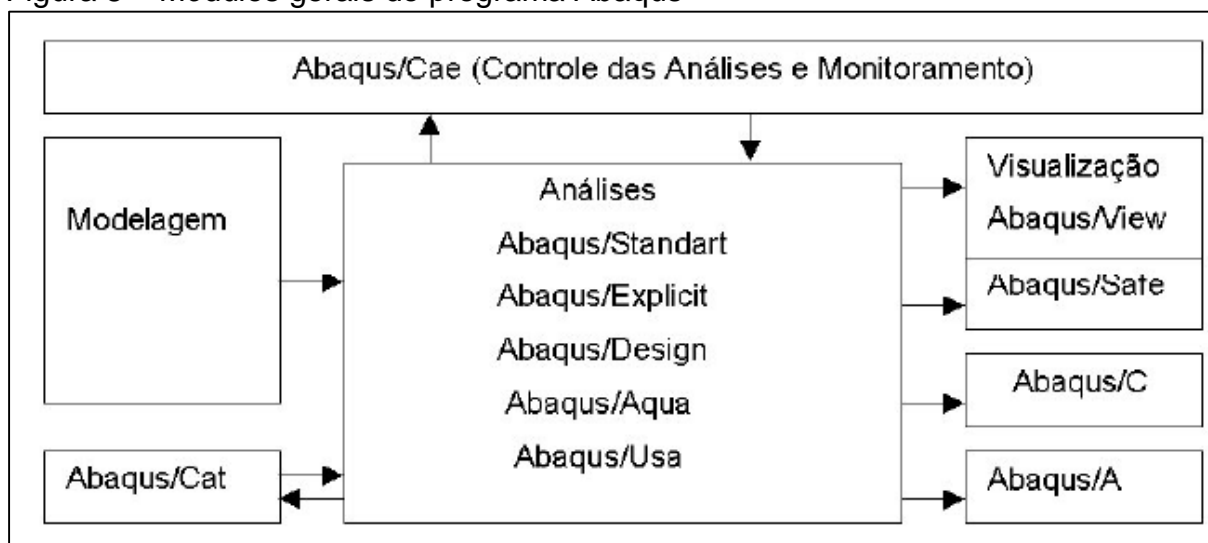
Fonte: Gutierrez *et al* (2010, pg 1980).

2.5 Abaqus

De acordo com Fish e Belytschko (2007) a aplicação do método dos elementos finitos pode se tornar muito complexa, principalmente quando utilizam-se muitos elementos em uma modelagem. Um maior número de elementos finitos fornece um resultado mais preciso, não obstante, exige um trabalho significativamente maior, já que mais cálculos devem ser realizados. Portanto, esse método geralmente é empregado utilizando-se softwares de análise numérica.

Um dos *softwares* comercialmente usados para tais análises é o Abaqus, que disponibiliza suporte para as áreas de pesquisa como, estudo das vibrações, transferência de calor, ondas eletromagnéticas, análise de estruturas, dentre outras. O Abaqus é um programa de caráter bastante geral e de grande versatilidade para aplicações em muitas áreas da engenharia. Consiste de diversos módulos como apresentado na figura 8, dentre os quais os módulos gráficos CAE (pré-processador), Viewer (pós-processador) e os módulos principais STANDARD e EXPLICIT, empregados neste trabalho.

Figura 8 – Módulos gerais do programa Abaqus



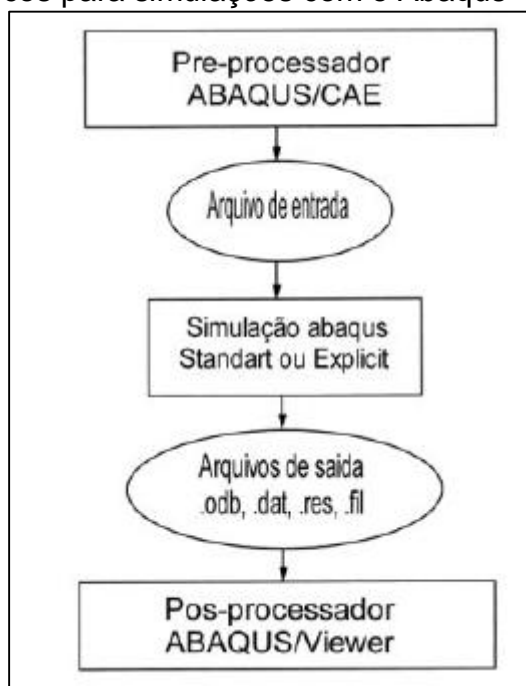
Fonte: Castillo (2003, pg. 45)

O pré-processador ABAQUS/CAE consiste de uma interface gráfica que permite ao usuário uma rápida e eficiente definição da geometria do problema, atribuição das propriedades dos diferentes materiais, aplicação dos carregamentos e das condições de contorno do problema, seleção do número de etapas pretendidas na análise e, finalmente, geração da malha de elementos finitos correspondente ao corpo analisado.

De acordo com Castillo (2003) o programa permite um monitoramento da consistência e adequação do modelo gerado através de ferramentas especiais do ABAQUS/CAE para verificar vários aspectos relacionados com as partições definidas para a geometria do modelo (módulo PART), propriedades mecânicas dos materiais envolvidos (módulo PROPERTY), agrupamento destas partições (módulo ASSEMBLY) e imposição da sequência de passos de análise (módulo STEP) e de sua natureza – linear ou não linear, definição das condições de contorno e dos carregamentos (módulo LOAD), geração da malha de elementos finitos (módulo MESH) e finalmente obtenção do arquivo de entrada (módulo JOB).

Após geração pelo pré-processador do arquivo contendo a entrada de dados do problema, é possível então executar-se a simulação computacional pelo método dos elementos finitos utilizando-se os modelos ABAQUS/STANDARD e ABAQUS/EXPLICIT. A Figura 9 apresenta a sequência de processamento de dados no ambiente do programa Abaqus.

Figura 9 - Diagrama de blocos para simulações com o Abaqus



Fonte: Castillo, Sergio (2003, pg.47)

2.6 Introdução do modelo constitutivo no Abaqus/Explicit

De acordo com Cunha (2005) no estudo do comportamento dos materiais há a necessidade de se escolher leis constitutivas que descrevam da melhor forma possível as propriedades do material.

Conforme Oliveira (2005) o Abaqus disponibiliza uma grande variedade de modelos constitutivos para descrever o comportamento de diversos materiais. Os modelos constitutivos disponíveis do programa permitem respostas elásticas e inelásticas. No caso das respostas inelásticas, além dos modelos plásticos baseados na teoria da plasticidade, estão disponíveis também modelos com conceito da mecânica do dano.

2.6.1 Material com comportamento frágil: “*Smearred crack model*”

Kosteski (2012) comenta que o modelo de ruptura para concreto do Abaqus/Explicit tem características que podem ser utilizadas para materiais com comportamento frágil. Este modelo considera que:

- O comportamento a compressão é sempre elástico linear.
- O comportamento antes de começar o dano é elástico linear.
- Os elementos podem ser removidos quando eles forem totalmente danificados.

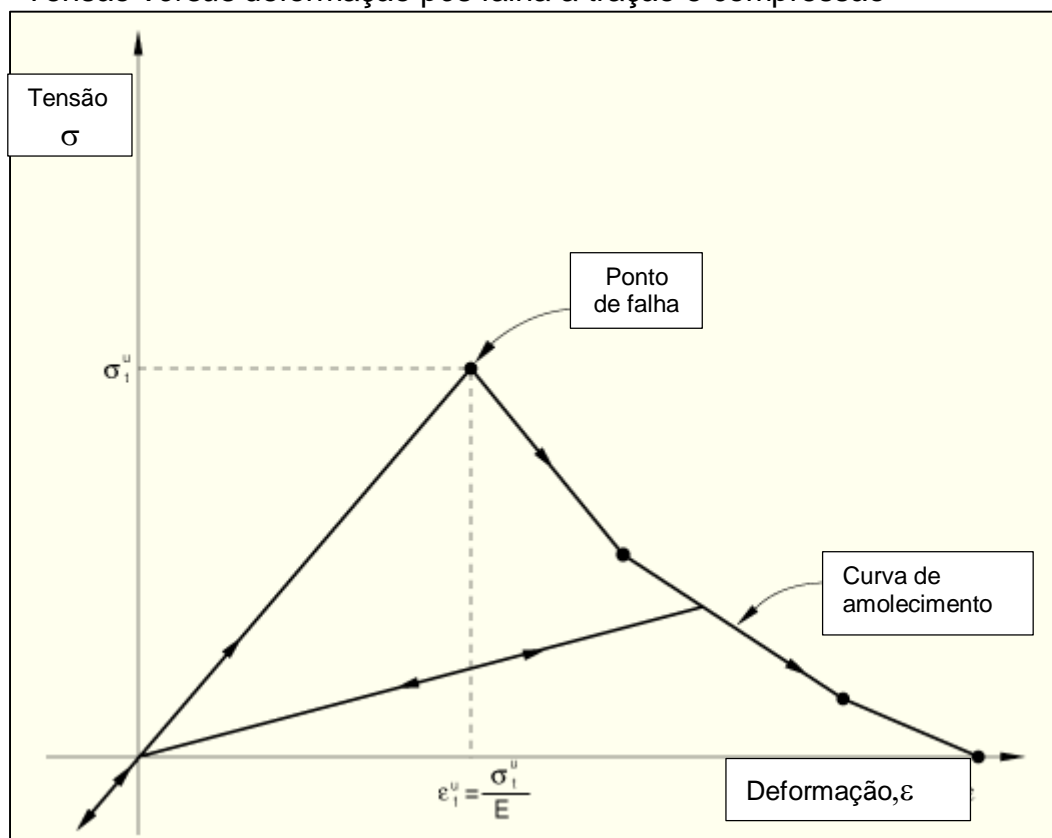
O Abaqus/Explicit utiliza o modelo de fissuras distribuídas (*smearred crack model*) para representar descontinuidades no comportamento frágil do concreto.

Segundo o *Abaqus Analysis User's Manual* (versão 6.13-1) (2013), o modelo de fissuras distribuídas possui as seguintes características:

- Fornece capacidade geral para modelagem de concreto em elementos de viga, de casca, de treliças e elementos sólidos;
- Consiste de uma superfície de escoamento com endurecimento isotrópico que se ativa quando a tensão é predominantemente de compressão e uma independente superfície de detecção de fissuras que determina se um ponto falha por fissuração;
- Usa conceitos de elasticidade de dano orientada (*smearred cracked*) para descrever a parte reversível da resposta do material após a falha por fissuração;
- Requer que o modelo de material elástico do programa seja usado em conjunto para definir as propriedades elásticas do material.

A fissuração é assumida como o aspecto mais importante do modelo e a representação da mesma juntamente com o comportamento pós-fissuração são os aspectos principais da modelagem. O comportamento tensão *versus* deformação à tração e compressão pós falha para esse modelo está apresentado na Figura 10.

Figura 10 - Tensão versus deformação pós falha a tração e compressão



Fonte: Adaptado de Abaqus Analysis User's Manual (2013, não paginado)

2.6.2 Material com comportamento dano plástico: “Concrete Damaged Plasticity”

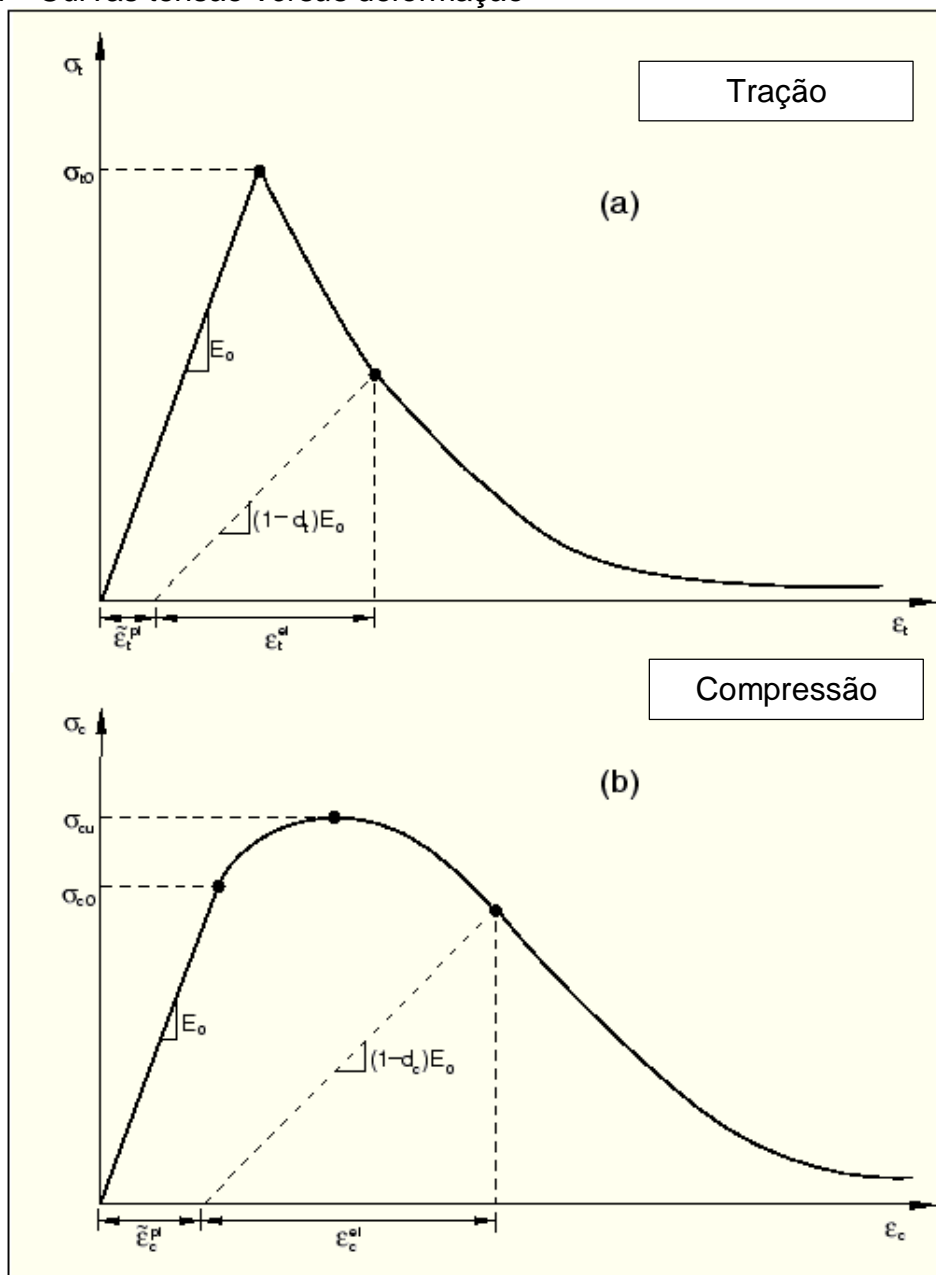
Conforme Oliveira (2005) os principais mecanismos de ruptura do modelo de dano plástico para o concreto, no Abaqus chamado de *Concrete Damaged Plasticity*, são a fissuração na tração e o esmagamento na compressão.

Segundo o *Abaqus/Explicit* (Abaqus Analysis User's Manual (versão 6.13-1), 19.6.13), (2013), o modelo de dano plástico para o concreto tem as seguintes características:

- Fornece uma capacidade geral para modelar concreto e outros materiais quase frágeis em todos os tipos de elementos (vigas, treliças, elementos de casca e sólidos);
- Usa conceitos de elasticidade danificada isotrópica em combinação com tração isotrópica e plasticidade compressiva para representar o comportamento inelástico do concreto;

- Requer que o comportamento elástico do material seja isotrópico e linear.

O modelo pressupõe que a resistência à tração e compressão uniaxial do concreto é caracterizada por plasticidade danificada, onde a evolução da superfície de falha ou escoamento é governada por duas variáveis, ε_t^{pl} (deformação plástica sob tração) e ε_c^{pl} (deformação plástica sob compressão) conectadas aos mecanismos de falha sob tração e compressão respectivamente. A Figura 11a e 11b apresenta as curvas tensão *versus* deformação do concreto sob tração e compressão uniaxial.

Figura 11 - Curvas tensão *versus* deformação

Fonte: Adaptado de Abaqus Analysis User's Manual (2013, não paginado)

2.6.3 Material com comportamento elasto-plástico: “*Ductile Damage Evolution*”

De acordo com Riera (2010) os materiais que tem comportamento dúctil podem ser caracterizados por uma lei constitutiva elasto-plástica com evolução de dano dúctil (*Ductile Damage Evolution*), pois, quando o material tem pouca plasticidade a lei não linear elástica se situa muito próxima a este comportamento antes de alcançar o escoamento.

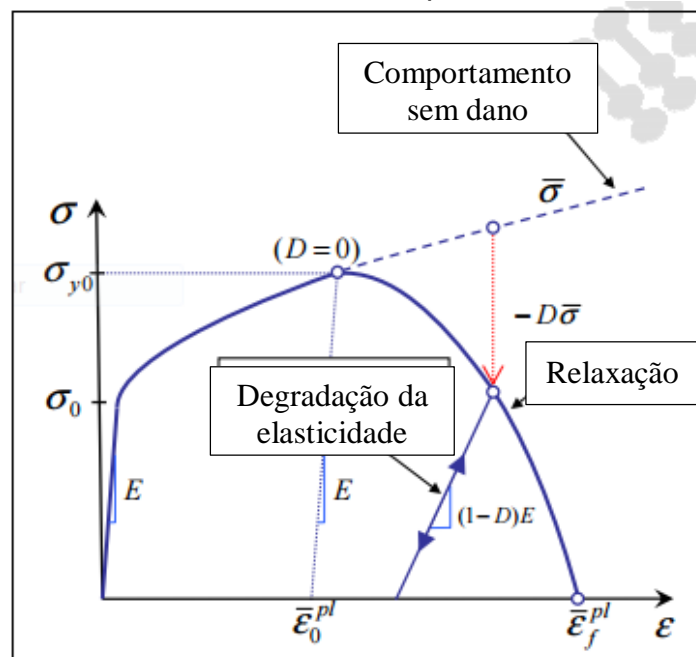
Conforme o Abaqus Analysis User's Manual (versão 6.13-1), a evolução do dano (*Damage evolution*) define o comportamento do material após iniciação do dano, descrevendo a taxa de degradação da rigidez do material uma vez que o critério de iniciação foi satisfeito. Tal formulação é baseada na abordagem de dano escalar:

$$\sigma = (1 - D) * \bar{\sigma} \quad \dots(6)$$

onde $\bar{\sigma}$ é a tensão devido a resposta sem dano. A variável de dano D captura os efeitos combinados de todos os mecanismos de dano ativos e dessa forma quando essa variável é igual a um ($D=1$) o ponto falhou completamente.

Nos materiais elasto-plásticos a evolução do dano se manifesta através de uma suavização da tensão de escoamento e degradação da elasticidade como mostrado na Figura 12.

Figura 12 - Evolução do dano em materiais elasto-plásticos



Fonte: Adaptado de *Abaqus Analysis User's Manual* (2013, não paginado)

3 MATERIAIS E METODOLOGIA

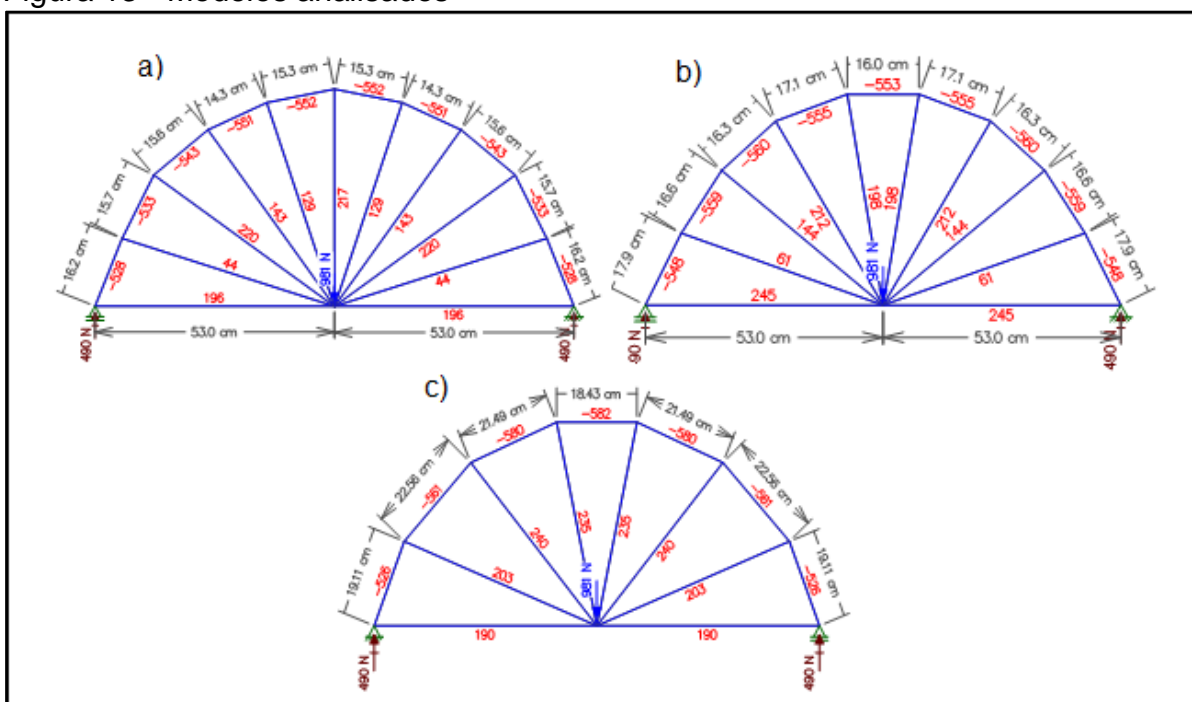
Neste capítulo são apresentadas as características do modelo utilizado e os métodos e procedimentos adotados para o dimensionamento e a execução da estrutura de espaguete.

3.1 Escolha, dimensionamento e construção do modelo

A definição do modelo a ser utilizado consistiu na análise da configuração da distribuição dos esforços nas barras de diferentes modelos treliçados de pontes de espaguete em arco, levando em consideração o fato de que nas competições de pontes de espaguete, o modelo mais utilizado geralmente são as estruturas em formato de arco. Os modelos em 2D analisados previamente à definição do tipo de estrutura a ser construída estão apresentados nas figuras 13 (a,b e c), assim como os valores dos esforços encontrados utilizando o Ftool considerando um carga aplicada no meio do vão de 981N.

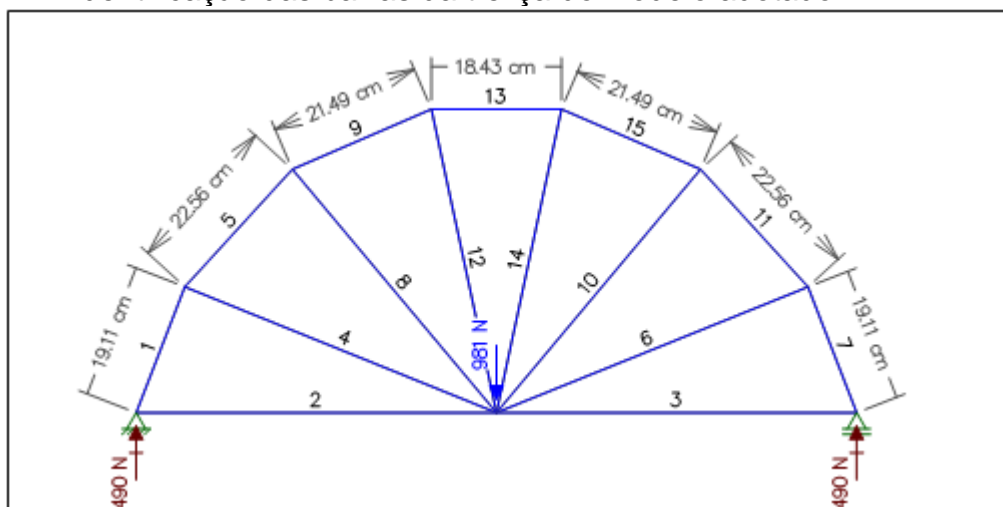
Foi adotado o modelo apresentado na figura 13c devido a distribuição dos esforços internos apresentados por este, simetria das cargas e principalmente pelo menor número de juntas, sendo dessa forma um protótipo de maior facilidade executiva. Nas figuras 13c, e 14 estão apresentados respectivamente, a distribuição dos esforços no modelo adotado e a identificação de cada um dos elementos dessa treliça em 2D.

Figura 13 - Modelos analisados



Fonte: Elaboração própria.

Figura 14 - Identificação das barras da treliça do modelo adotado



Fonte: Elaboração própria

3.1.2 - Dimensionamento das seções tracionadas

Para determinar a quantidade de fios para barras de tração são necessários os seguintes dados:

- Diâmetro de um fio de massa;
- Resistência à tração;
- Esforço normal obtido através do Ftool.

Considerando que os dados acima são todos conhecidos, o dimensionamento das barras de tração foi realizado de acordo com as equações apresentadas abaixo:

$$n = \frac{N_t}{n_i} \quad \dots(7)$$

onde:

n – número de fios de espaguete

N_t – esforço normal de tração na barra

n_i – resistência última a tração de um fio de espaguete

Utilizando a equação 7, conhecendo-se o esforço normal de tração em cada barra obtido a partir do programa FTool e considerando que a resistência a tração de cada fio de espaguete é de aproximadamente 41,8N (ver item 2.2 ou Gonzáles et. al, 2005) a quantidade de fios de espaguete foi calculada para cada elemento tracionado de acordo com a tabela 1.

Tabela 1 - Dimensionamento das barras de tração

Barra	Esforço Normal (Nt)	Carga de ruptura do espaguete (n_i)	Quantidade de Fios (n)
2	190	41,8	4,5
3	190	41,8	4,5
4	203	41,8	4,9
6	203	41,8	4,9
8	240	41,8	5,7
10	240	41,8	5,7
12	235	41,8	5,6
14	235	41,8	5,6

Fonte: Elaboração própria.

Com o objetivo de facilitar o processo construtivo das seções da estrutura submetidas a esforço normal de tração todas os elementos foram construídos com 6 fios de espaguete.

3.1.3 - Dimensionamento das seções comprimidas

Para o dimensionamento das seções comprimidas foi utilizada a equação 5, que foi disponibilizada por Gonzáles et. al (2005) e apresentada no item 2.2 deste trabalho, que obtém o número de fios de espaguete em função da carga e as características geométricas para uma seção tubular maciça.

$$N = \sqrt{\frac{Nc l^2}{27906 r^4}} \quad \dots(5)$$

onde:

N - Número de fios de espaguete

Nc - esforço normal de compressão em cada barra

l - comprimento da barra

r - raio médio de um fio de espaguete

A quantidade de fios calculada para cada seção comprimida estão apresentados na tabela 2.

Tabela 2 - Dimensionamento a compressão

Barra	Esforço Normal (Nc)	Quantidade de Fios (N)
1	526	39
5	561	40
9	580	41
13	582	41
15	580	41
11	561	40
7	526	39

Fonte: Elaboração própria

A quantidade de fios de espaguete necessária para envolver um tubo de PVC de 25 mm são 47 unidades, dessa forma o número de fios para cada seção tubular de macarrão foi padronizada nesta quantidade.

3.1.4 Construção dos modelos

Foram construídos 3 exemplares de pontes de mesmas dimensões e com mesmo processo executivo para realização dos ensaios com as estruturas de espaguete. O procedimento adotado para construção dos mesmos será apresentado detalhadamente a seguir.

Inicialmente os 3 modelos construídos foram desenhados em CAD e reproduzidos em folhas tamanho A0 com a estrutura das pontes em escala 1:1 de forma que em seguida peças de isopor pudessem ser executadas com as dimensões reais da estrutura, configurando dessa forma 3 moldes das pontes como mostrado na Figura 15.

Figura 15 - Moldes das pontes



Fonte: Elaboração própria

Para construção das seções tubulares vazadas da estrutura foram usados como moldes tubos de PVC com diâmetro de 25mm e anéis elásticos que são geralmente utilizados para castração de ovinos. Os tubos de PVC devidamente lubrificados com óleo de soja comum para evitar que os espaguete se aderissem ao mesmo, foram envolvidos com 47 fios de espaguete os quais, posteriormente foram fixados com os anéis elásticos como mostrado na Figura 16. Após os espaguete se encontrarem fixados aos tubos procedeu-se com a aplicação da primeira demão de resina epóxi com um pincel de pintura comum. Após 24 horas de secagem da resina epóxi foram retirados os tubos de PVC da parte interna das seções tubulares de espaguete e procedeu-se com a aplicação de uma nova demão de resina epóxi na parte externa da seção e uma primeira demão no interior do tubo vazado de espaguete. Os elementos são considerados prontos para a montagem da ponte após 4 demãos em sua face externa e interna. A figura 16 também apresenta 3 seções tubulares após finalizadas.

Figura 16 - Construção dos elementos do arco



Fonte: Elaboração própria

As barras de tração foram construídas a partir da união em formato de seção circular de 6 fios de espaguete que são fixados com elásticos ou fio dental até a primeira demão de resina epóxi. Da mesma forma que na construção dos tubos das seções comprimidas, as diagonais de tração são consideradas prontas para a construção da ponte após 4 demãos de resina epóxi. Como o comprimento dos fios de espaguete é menor que o necessário para as barras de tração foi necessária a realização de ligações. Por apresentarem uma seção pequena, as faces a serem coladas foram cortadas em um ângulo de aproximadamente 45 graus, a fim de se aumentar a área de contato entre as barras e como material de reforço da ligação, as juntas foram envolvidas por pequenos fios de macarrão. A figura 17 demonstra uma etapa de construção das barras das seções tracionadas.

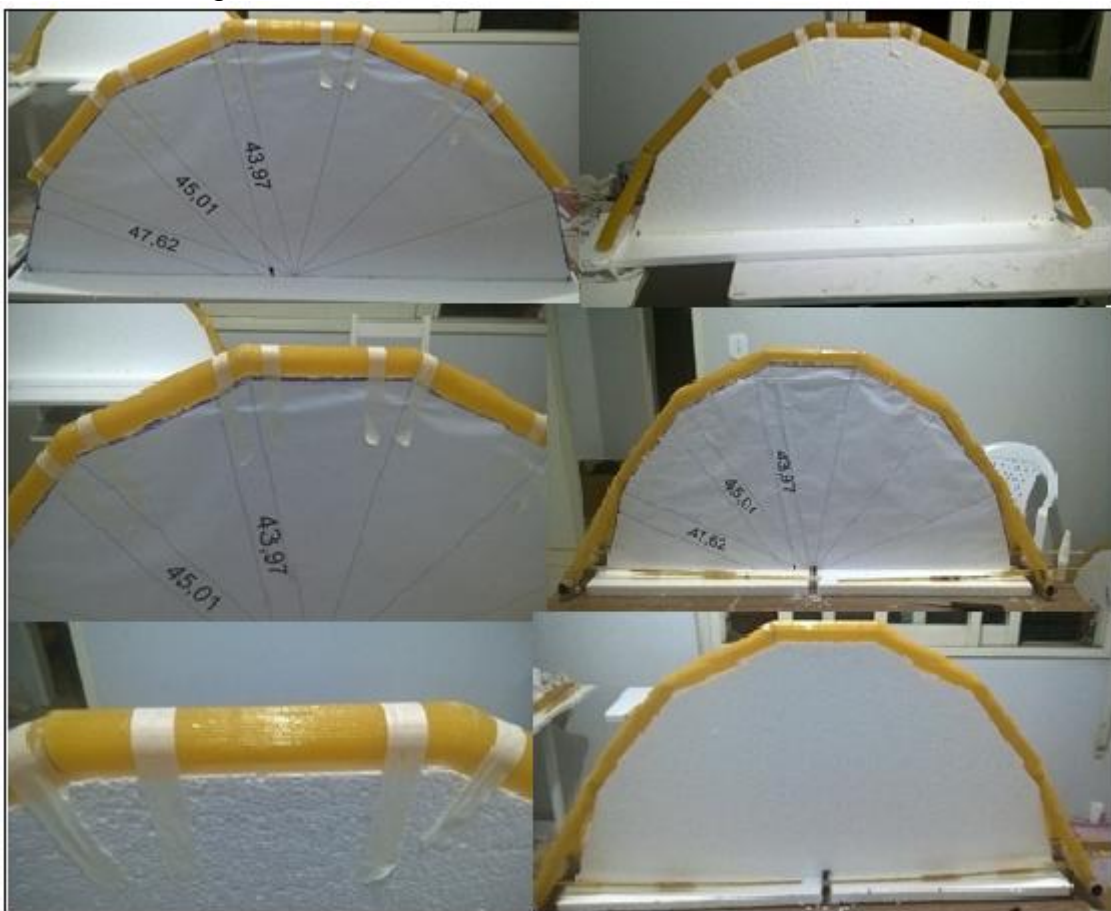
Figura 17 – Construção e secagem das barras de tração após feitas as juntas



Fonte: Elaboração própria

Na etapa em que todos os elementos das seções comprimidas e tracionadas estão devidamente secos após as 4 demãos de resina, procede-se com a montagem da estrutura da ponte no gabarito de isopor mencionado anteriormente. A etapa de montagem da estrutura é iniciada pelo encaixe dos elementos do arco da estrutura. Nessa fase, os elementos são dispostos sobre o gabarito de isopor e feita o acoplamento dos tubos de forma a encontrar o ângulo correto para encaixe dos mesmos. Para realizar o corte dos tubos no ângulo correto utilizou-se uma micro retífica elétrica. No momento em que todas as seções estão devidamente cortadas no ângulo correto os tubos são fixados ao gabarito de isopor com fitas adesivas e posteriormente as juntas são unidas com cola de secagem rápida. As juntas que estão conectadas com a cola rápida mencionada são resinadas somente após a completa montagem da estrutura de espaguete, inclusive com as barras de tração conectadas ao arco e a barra de aço no centro do vão do modelo. A figura 18 apresenta algumas das etapas da construção do arco da estrutura.

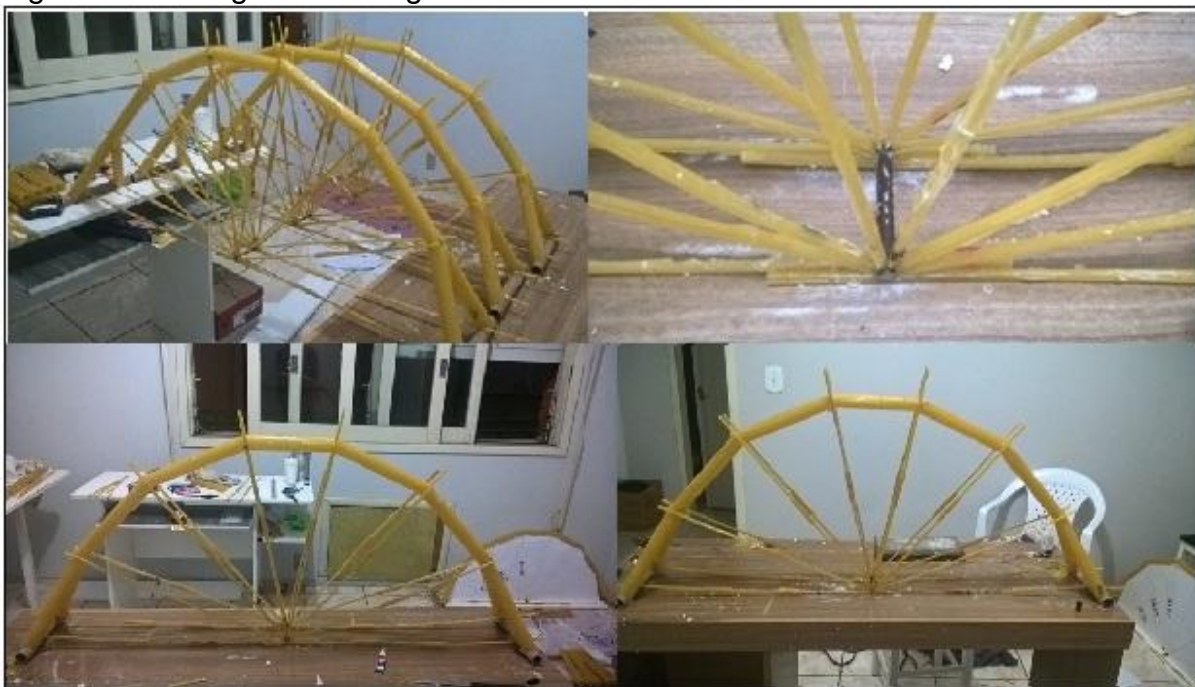
Figura 18 - Montagem do arco



Fonte: Elaboração própria

Após a finalização da montagem do arco e dos apoios da estrutura conduziu-se a colagem dos elementos tracionados que são posicionados dos dois lados do gabarito de isopor nas posições mostradas na Figura 18, tais seções são conectadas ao arco e uma barra de aço posicionada no centro do vão da estrutura com cola de secagem rápida como exemplificado na Figura 19.

Figura 19 - Colagem das diagonais



Fonte: Elaboração própria.

Após a finalização da etapa de montagem do arco e realizada a conexão das diagonais de tração procede-se com a aplicação de 4 demãos de resina nos 3 modelos, a última demão de resina foi aplicada após 28 dias da finalização da montagem dos modelos considerando que a resina epóxi utilizada atinge sua resistência máxima e secagem completa após 7 dias da aplicação de acordo com informações do fabricante. A Figura 20 apresenta os modelos finalizados e após realizadas todas as demãos de cola.

Figura 20 - Modelos finalizados



Fonte: Elaboração própria

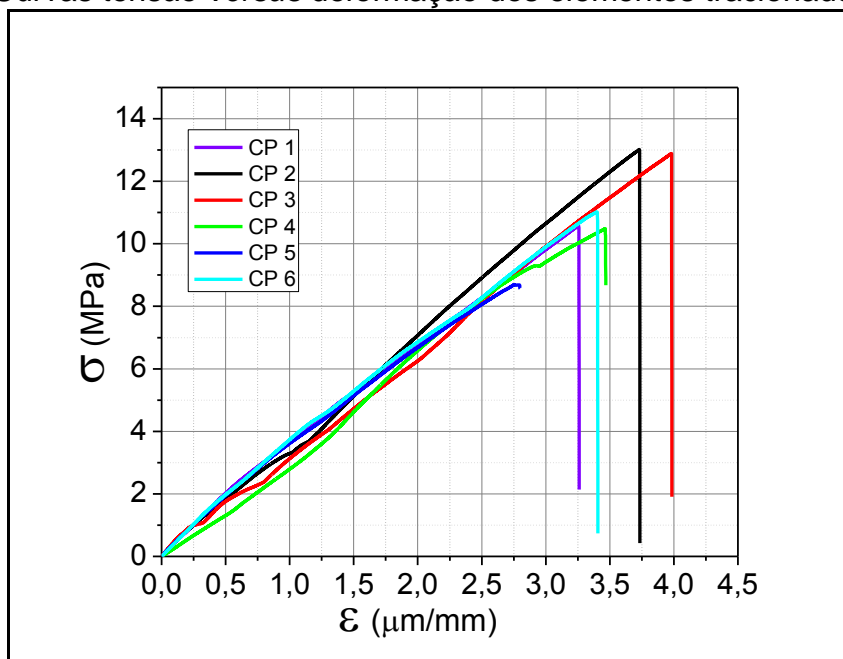
3.2 Caracterização mecânica do material

Foram realizados ensaios de tração e compressão dos elementos que constituem estrutura de espaguete com a finalidade de fornecer propriedades mecânicas obtidas experimentalmente ao *software* de elementos finitos *Abaqus* para a realização da modelagem e simulação numérica.

3.2.1 Barras de tração

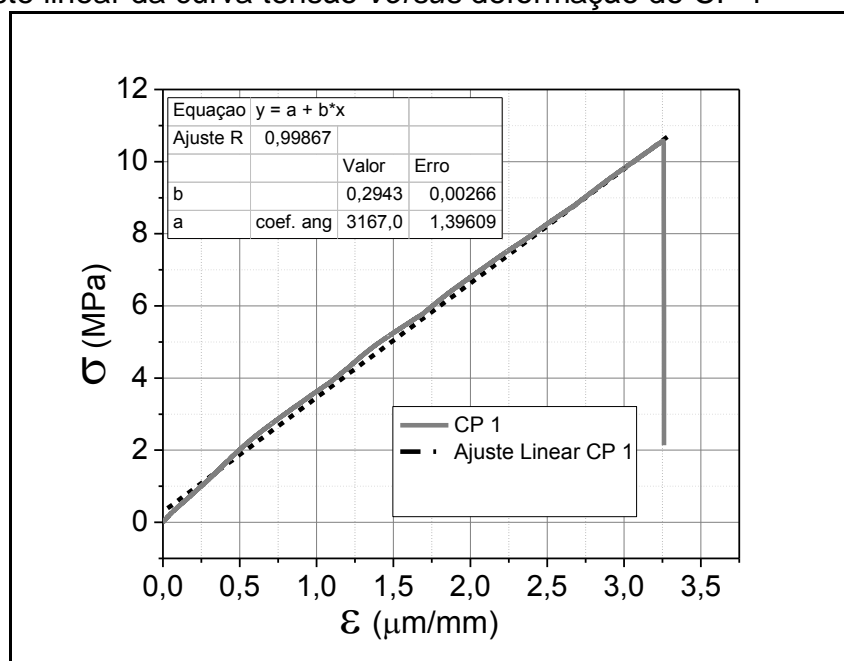
Para os corpos de provas solicitados a tração foram realizados 6 ensaios. Tais corpos de prova possuem a mesma seção transversal, e foram construídos com a mesma metodologia das diagonais que foram utilizadas nas pontes de espaguete. Os ensaios foram realizados no equipamento de ensaio de tração Shimadzu com velocidade de carregamento de 1mm/seg.

Foram obtidos os dados e plotados as curvas tensão *versus* deformação de todos os CP`s ensaiados, as quais são apresentados na Figura 21.

Figura 21 - Curvas tensão *versus* deformação dos elementos tracionados

Fonte: Elaboração própria

Foi feito um ajuste linear dos dados para cada uma das curvas tensão *versus* deformação de todos os corpos de prova das seções solicitadas a tração, que consistiu de um processo analítico baseado no método dos mínimos quadrados que permitiu obter os valores dos dois coeficientes da reta que melhor ajusta ao conjunto dos dados experimentais. Através desse processo foi possível obter o módulo de elasticidade das barras de espaguete que é o coeficiente angular das curvas no gráfico tensão *versus* deformação apresentados na Figura 21. A Figura 22 exemplifica a análise feita com a curva de um dos CP's ensaiados. Procedimento análogo foi realizado para a obtenção do módulo de elasticidade dos demais corpos de prova.

Figura 22 - Ajuste linear da curva tensão *versus* deformação do CP 1

Fonte: Elaboração própria

Os dados referentes aos ensaios realizados nas diagonais de tração estão dispostos na tabela 3.

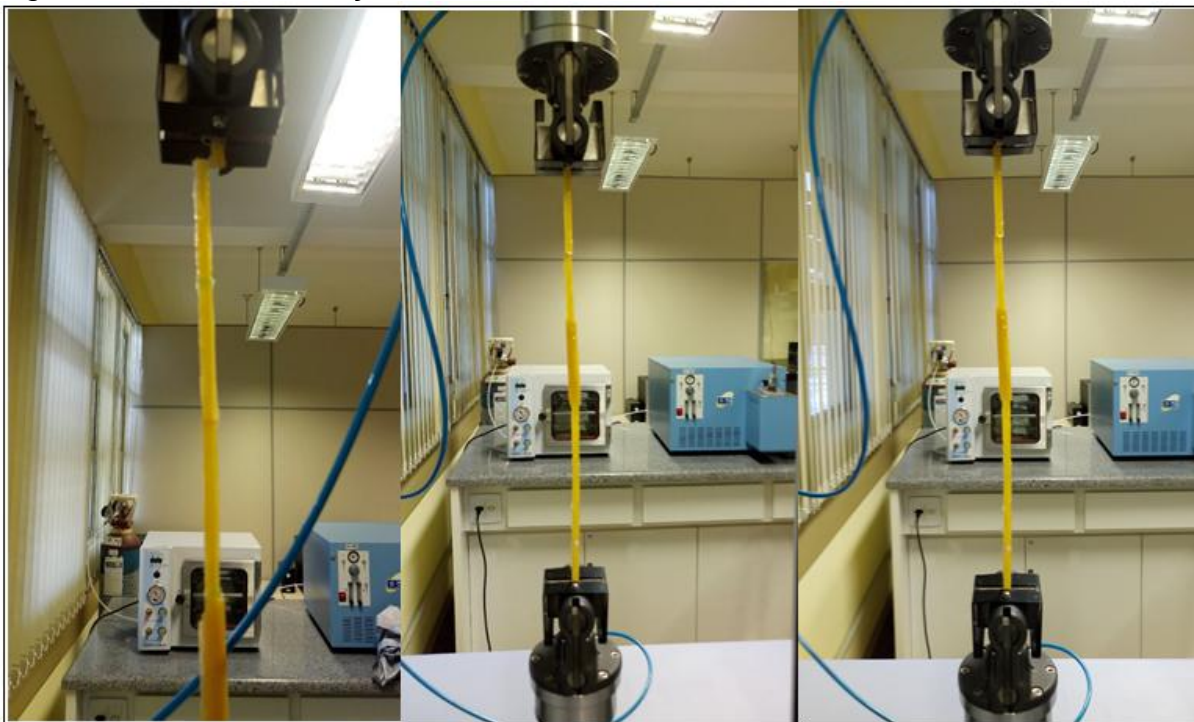
Tabela 3 - Dados dos ensaios nas diagonais de tração

Corpo de Prova	Módulo de elasticidade E (MPa)	σ_{rup} (MPa)	Peso (g)	Densidade (Kg/m ³)	Comprimento (mm)
CP 1	3167,1	10,6	19	3555,1	350
CP 2	3538,3	13	22	4116,4	350
CP 3	3278,7	12,9	26	3742,2	455
CP 4	3399,8	10,5	26,7	3842,9	455
CP 5	3130,4	8,7	20,5	3835,7	350
CP 6	3192,4	11	21	3929,3	350
Média	3284,5	11,1	22,5	3836,9	385
Desvio Padrão	157,3	1,6	3,1	187,1	54,2
CV (%)	4,8	14,6	13,8	4,9	14,1

Fonte: Elaboração própria

A Figura 23 demonstra o ensaio de tração realizado nas diagonais tracionadas. Cabe salientar que nenhuma das barras quebrou na ligação que há nessas seções.

Figura 23 - Ensaio de tração

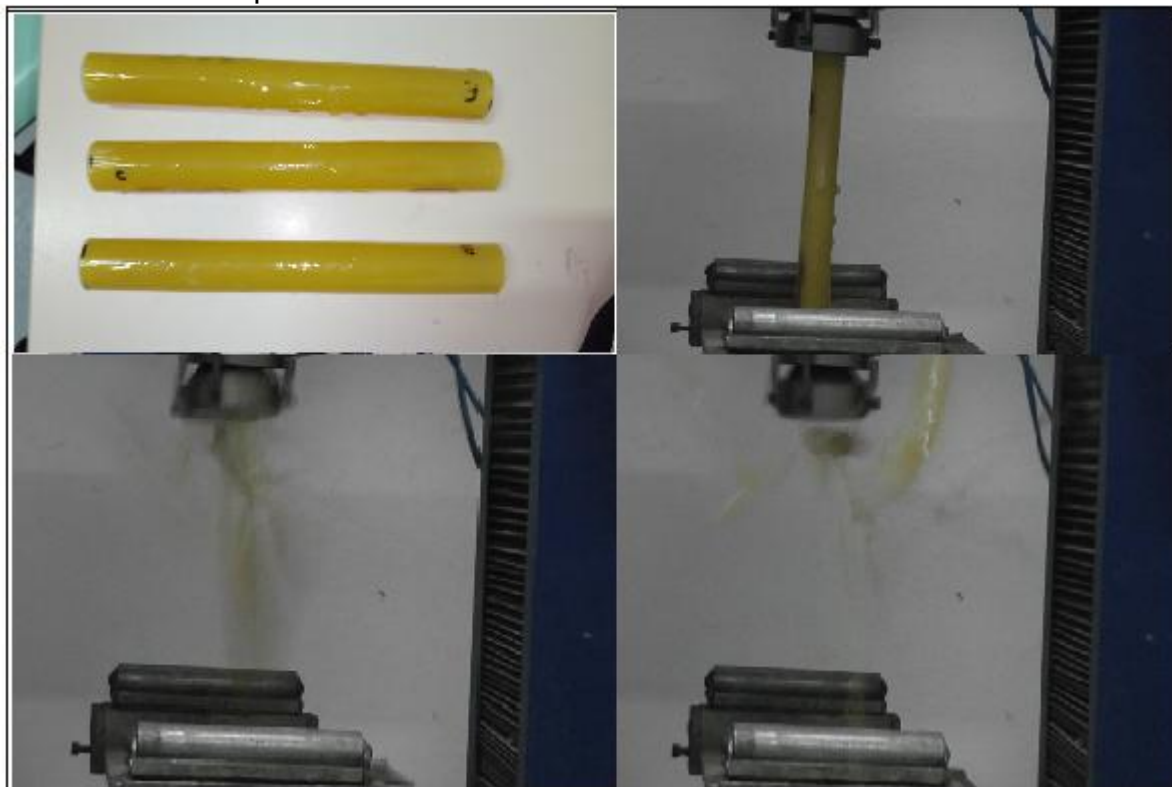


Fonte: Elaboração própria

3.2.3 Barras de compressão

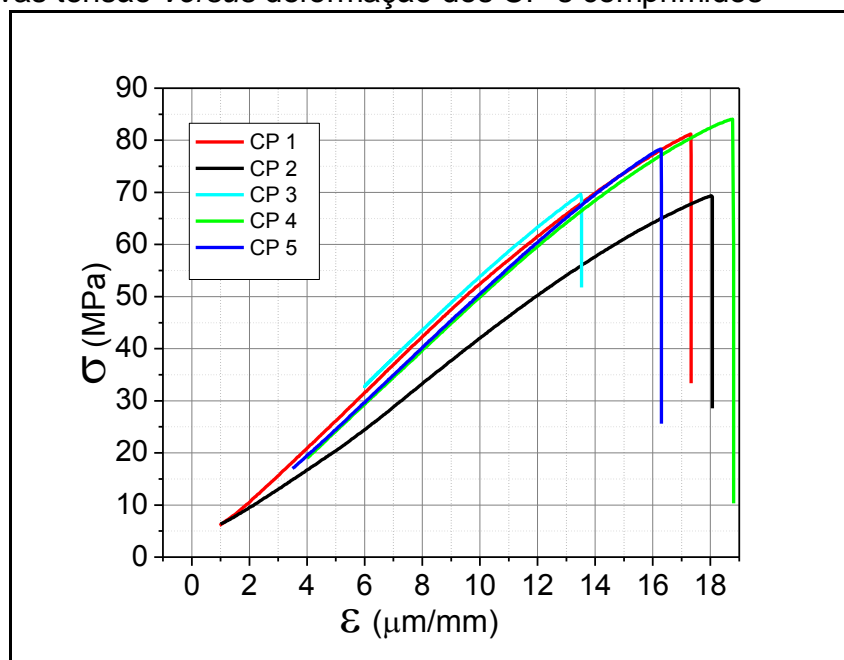
Os elementos da estrutura de espaguete com seção vazada foram submetidos a ensaios de compressão no equipamento de ensaio EMIC com velocidade de carregamento de 1mm/min. Foram ensaiados um total de 5 corpos de prova de seção circular vazados que são os elementos que compõe o arco da estrutura da ponte. A Figura 24 apresenta alguns dos corpos de prova ensaiados antes e durante a execução do ensaio.

Figura 24 - CP's de compressão ensaiados



Fonte: Elaboração própria.

Foram obtidos os dados e plotados as curvas tensão *versus* deformação de todos os corpos de prova ensaiados, as quais são apresentadas na figura 25.

Figura 25 - Curvas tensão *versus* deformação dos CP's comprimidos

Fonte: Elaboração própria

Para obtenção do módulo de elasticidade das barras de compressão foi realizado um ajuste linear dos dados experimentais baseado no método dos mínimos quadrados, procedimento análogo ao realizado para as diagonais tracionadas. As propriedades do material obtidas a partir do ensaio estão dispostas na tabela 4.

Tabela 4 - Dados obtidos nos ensaios com elementos do arco comprimido

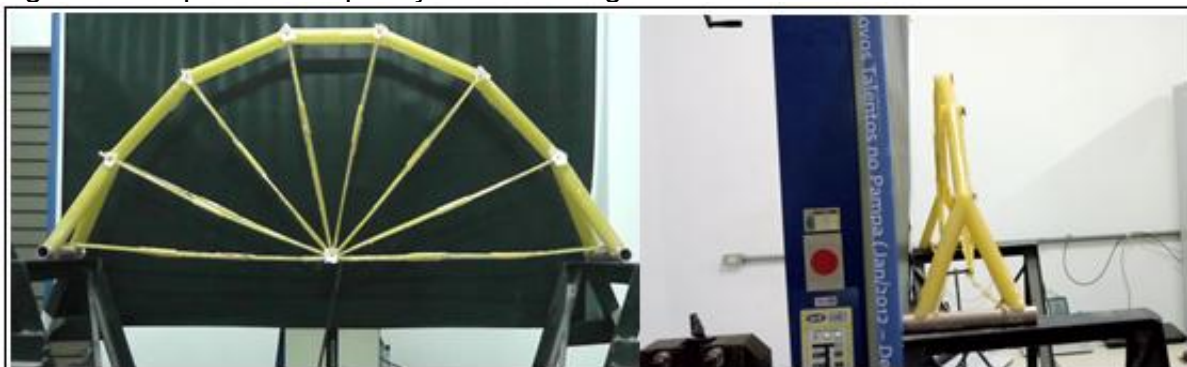
Corpo de Prova	Módulo de Young E (MPa)	Força (N)	σ_{rup} (MPa)	Peso (g)	Densidade (Kg/m ³)	Diâm. ext (mm)	Diâm. int. (mm)	P _{crít} (N)	$\sigma_{crít}$ (MPa)
CP 1	5132,60	8289,00	81,21	58,70	2500,60	29,40	27,10	9765,9	95,7
CP 2	4250,40	7028,70	69,36	56,20	2411,17	29,20	26,90	7917,0	78,1
CP 3	5215,80	7084,10	69,66	57,40	2453,91	29,30	27,00	9819,3	96,6
CP 4	5129,90	8579,90	84,07	56,60	2411,14	29,40	27,10	9760,8	95,6
CP 5	5152,40	7935,90	78,31	50,00	2145,17	29,20	26,90	9597,1	94,7
Média	4976,22	7783,52	76,52	55,78	2384,40	29,30	27,00	9372,03	92,14
Desvio Padrão	407,22	702,12	6,72	3,37	138,74	0,10	0,10	817,65	7,86
CV (%)	8,18	9,02	8,78	6,04	5,82	0,34	0,37	8,72	8,53

Fonte: Elaboração própria.

3.3 Ensaios nas pontes de espaguete

Foram realizados ensaios até a ruptura das 3 pontes de espaguete construídas. Utilizando-se o equipamento EMIC, o carregamento foi aplicado verticalmente na barra de aço locada no centro do vão da estrutura a uma taxa de carregamento de 1mm/min e as estruturas foram dispostas sobre um aparato montado para esse propósito específico como mostrado na Figura 26.

Figura 26 - Aparato de aplicação dos carregamentos



Fonte: Elaboração própria

3.4 Desenvolvimento do modelo numérico

A construção do modelo numérico se deu dentro do ambiente Abaqus CAE. Os elementos da estrutura foram modelados a partir das coordenadas dos nós obtidas no software AutoCAD e posteriormente foram compostas em um elemento tridimensional com as mesmas dimensões dos modelos estruturais reais construídos.

Para a utilização do Abaqus foram necessárias algumas simplificações tais como, consideração da estrutura como um elemento monolítico, onde, as propriedades mecânicas utilizadas são as do compósito resina-espaguete e as ligações dos nós da estrutura foram consideradas juntas perfeitas

3.4.1 Geometria e condições de contorno do modelo teórico

Para a construção do modelo numérico foram utilizados elementos de viga e de treliça disponíveis na biblioteca de elementos do Abaqus. Os elementos dos tubos de PVC nos apoios e a barra de aço posicionada no meio do vão da estrutura foram definidos como elementos BEAM3D em todos os modelos utilizando as seções reais destes elementos.

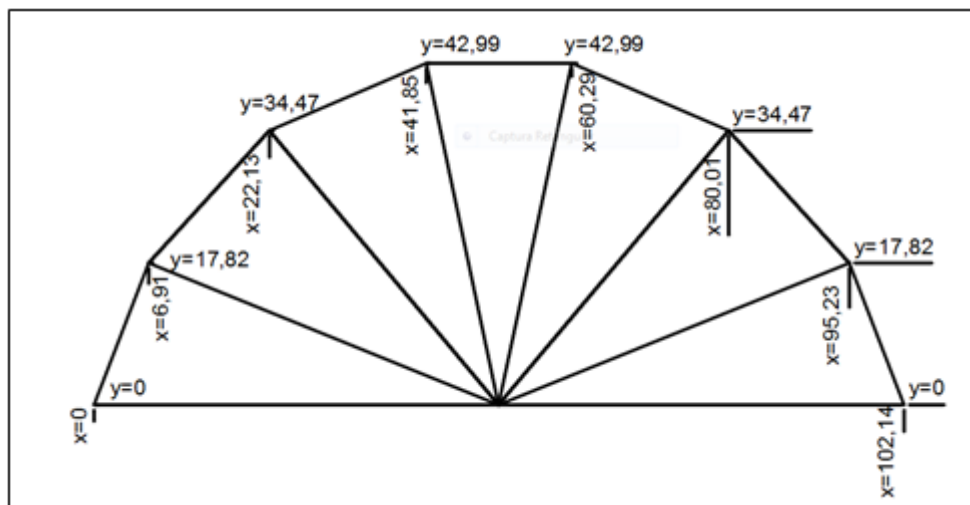
Foram realizadas duas geometrias diferentes, denominadas modelos tipo 1 e 2 como definidas a seguir:

Modelo 1 – Neste modelo foi considerado que a estrutura apresenta todas as ligações das diagonais com o arco no centróide das seções tubulares do arco.

Modelo 2 – As ligações das diagonais com o arco foram consideradas excêntricas, o que é mais próximo da realidade, já que as diagonais são coladas de forma externa ao arco da ponte. Nestes modelos foi utilizada um contato tipo “tie” que vincula de forma rígida os nós das diagonais ao do arco correspondente, assim se um nó tem um deslocamento os outros deverão sofrer o mesmo deslocamento.

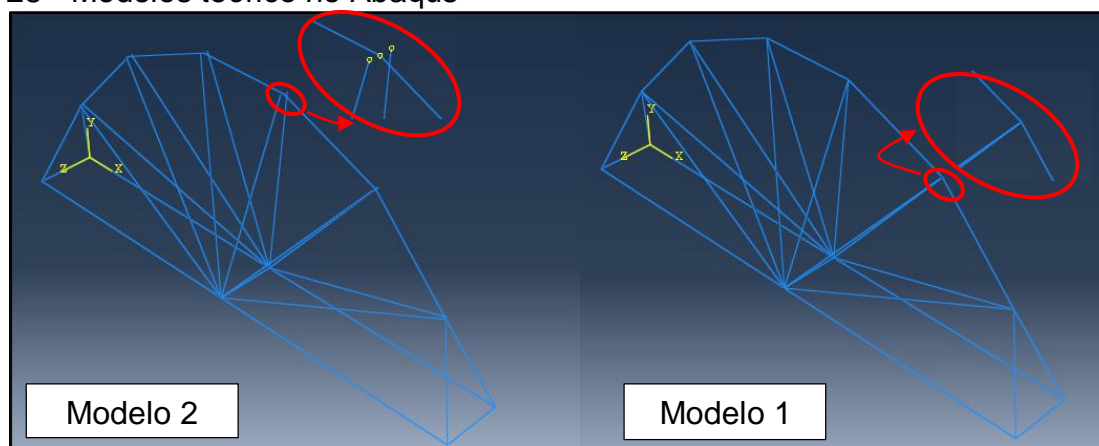
A modelagem das partes foi realizada considerando que os elementos da treliça eram linhas e após a montagem do elemento tridimensional foram definidas as seções transversais correspondentes de acordo com os modelos experimentais construídos. As figuras 27 e 28 apresentam o esquema da estrutura com suas respectivas coordenadas e a estrutura teórica modelada no Abaqus dos modelos tipo 1 e 2.

Figura 27 - Modelo estrutural em CAD



Fonte: Elaboração própria.

Figura 28 - Modelos teórico no Abaqus



Fonte: Elaboração própria.

Nos apoios do modelo numérico foram restritos os deslocamentos nas direções z e y, direções vertical e transversal da estrutura e no ponto central da barra de aço no meio do vão da ponte foi aplicado um deslocamento prescrito na direção vertical.

3.4.2 Propriedades do material adotadas no modelo numérico

Para a barra de aço posicionada no meio do vão da estrutura foi utilizado o elemento BEAM 3D, pois, nessa seção há esforços de flexão devido à posição de aplicação da carga e dessa forma não pôde ser considerada como elemento de treliça. Os tubos plásticos que estão posicionados nos apoios foram definidos com as mesmas propriedades da barra de aço, esta simplificação não incorre em alterações

no comportamento estrutural devido ao fato de que esse material possui uma resistência significativamente superior aos elementos das diagonais e do arco da estrutura.

A tabela 5 apresenta as propriedades mecânicas e dimensões dos materiais aço e PVC adotados para a confecção do modelo teórico.

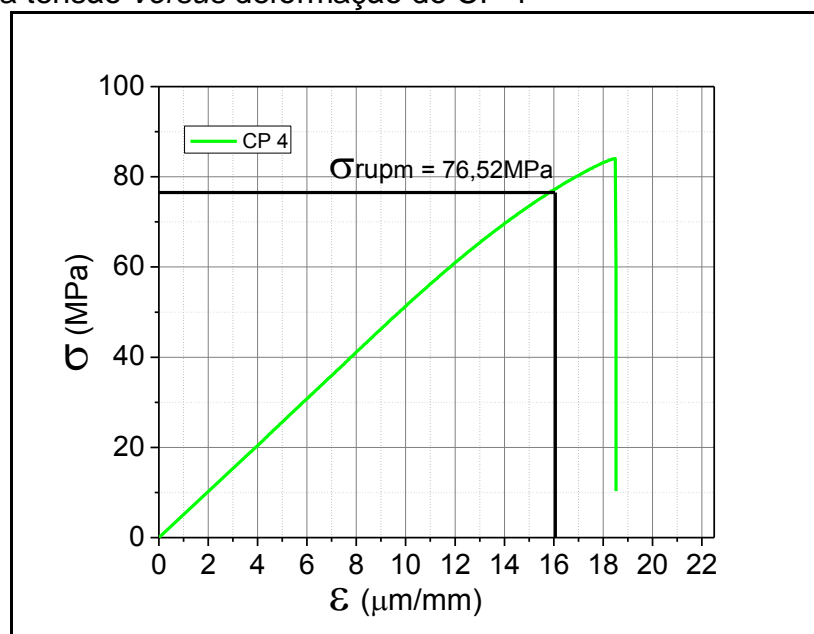
Tabela 5 - Propriedades do aço e tubos de PVC

Material	Diâmetro (mm)	Comprimento (cm)	Módulo de Elasticidade (GPa)
Tubo PVC	25	15	210
Aço	8	5	210

Fonte: Elaboração própria.

Arco de compressão:

Observa-se na Figura 29 e no item 3.2.3 os elementos do arco possuem uma curva tensão deformação linear até valores próximos da ruptura, porém, apresenta uma pequena não linearidade no final do ensaio. A partir dos dados obtidos nos ensaios observou-se que o módulo de elasticidade do CP 4 era o mais próximo da média de todos os corpos de prova, dessa forma, a curva tensão *versus* deformação desse ensaio foi adotada no modelo e considerada até a tensão de ruptura média de todos os ensaios. A Figura 29 mostra a curva tensão *versus* deformação do CP 4 e a tabela 6 apresenta as propriedades adotadas na simulação numérica para as seções tubulares do arco da estrutura.

Figura 29 - Curva tensão *versus* deformação do CP 4

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 6 - Propriedades utilizadas para seções do arco

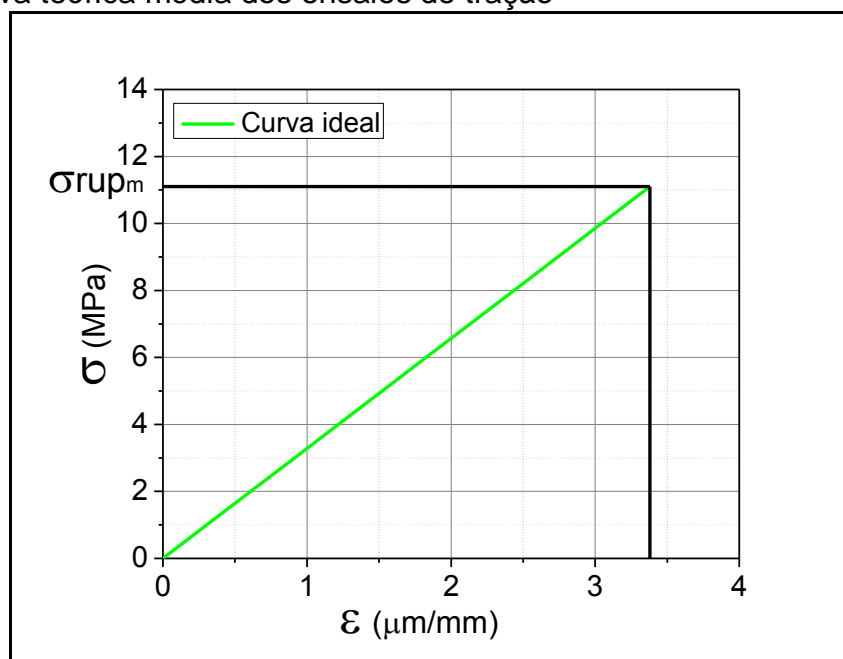
Material	Densidade (Kg/m ³)	Diâmetro externo (mm)	Diâmetro interno (mm)	Módulo de Elasticidade E (MPa)	σ_{rupm}
Seções do arco	2384,4	29,3	27	5129,9	76,52

Fonte: Elaboração própria.

Diagonais de tração:

As propriedades mecânicas dos elementos que constituem as diagonais tracionadas do modelo teórico foram definidas considerando que esse material tem comportamento linear elástico até a tensão de ruptura média e dessa forma foi elaborado uma curva tensão versus deformação teórica dos elementos tracionados, onde tal curva possui um coeficiente angular igual ao módulo de elasticidade médio dos 6 CP's submetidos ao ensaio de tração. A Figura 30 apresenta a curva teórica mencionada anteriormente e a tabela 7 mostra as propriedades adotadas para a modelagem numérica das diagonais.

Figura 30 - Curva teórica média dos ensaios de tração



Fonte: Elaboração própria.

Tabela 7 - Propriedades das seções das diagonais

Material	Densidade (Kg/m ³)	Seção transversal (mm ²)	Módulo de Elasticidade E (MPa)	σ_{rupm} (MPa)
Seções das diagonais	3836,9	15,27	3284,5	11,1

Fonte: Elaboração própria.

Foram considerados também dois modelos referentes às propriedades do material que são denominados modelos tipo A e B:

Modelo A – Neste modelo foi considerando o arco constituído por um material elasto-plástico com evolução de dano dúctil seguindo a forma da curva tensão deformação da figura 29 e dados da tabela 6. Para isto se utilizaram elemento de viga tridimensionais, BEAM 3D. As diagonais foram simuladas com as propriedades mostradas na figura 30 e tabela 7 e foi considerado dano frágil (concrete smeared cracking) para representar o comportamento das mesmas. Nas diagonais utilizou-se elementos de treliça espacial (TRUSS 3D).

Modelo B – Nessa modelagem tanto o material do arco como o das diagonais foi representado utilizando uma relação constitutiva de plasticidade de concreto (Ductile Damage Evolution) seguindo as propriedades definidas

para cada tipo de elemento. Foram utilizados elementos de treliça espacial (TRUSS 3D) para representar o arco e as diagonais.

3.4.3 Simulações

Resumindo foram simulados 4 modelos combinando as condições geométricas e as relações constitutivas apresentadas:

- a) **Modelo 1A** – Simulação numérica considerando o arco como um material elasto-plástico com evolução de dano dúctil e diagonais consideradas dano frágil (concrete smeared cracking), na adoção de suas respectivas relações constitutivas. Nessa simulação foi considerado que a estrutura apresenta todas as ligações das diagonais com o arco no centróide das seções tubulares do arco.
- b) **Modelo 1B** – Relação constitutiva de plasticidade de concreto para todos os elementos da treliça e ligações das diagonais com o arco também no centróide das seções tubulares.
- c) **Modelo 2A** – Simulação numérica considerando o arco elasto-plástico com evolução de dano dúctil e as diagonais dano frágil. As ligações das diagonais com o arco foram consideradas excêntricas.
- d) **Modelo 2B**- Relação constitutiva de plasticidade de concreto para as diagonais e arco. As ligações da diagonais com o arco foram consideradas excêntricas com relação ao centróide das seções tubulares do arco.

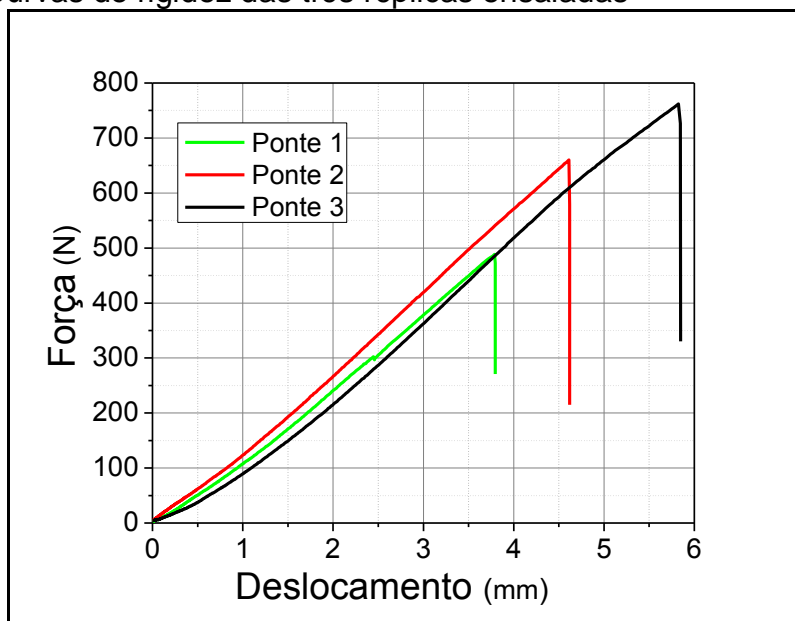
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados encontrados com os ensaios feitos com as estruturas reais e modelos teóricos das estruturas de espaguete.

4.1 Resultados dos ensaios experimentais

Os dados obtidos a partir dos ensaios realizados nas pontes de espaguete estão apresentados na tabela 8, assim como, as características de cada exemplar construído e rigidezes das estruturas encontradas a partir do gráfico força *versus* deslocamento de cada uma das réplicas. A figura 31 apresenta as curvas força *versus* deslocamento dos 3 exemplares testados.

Figura 31 - Curvas de rigidez das três réplicas ensaiadas



Fonte: Elaboração própria

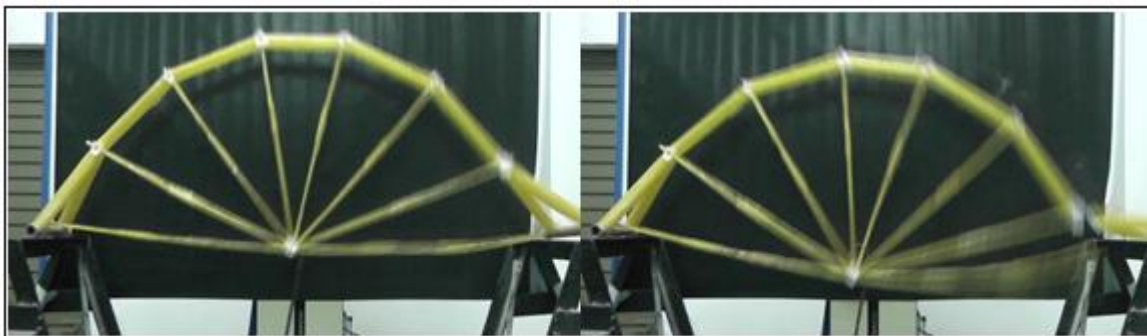
Tabela 8 - Dados do ensaio nas pontes

Estrutura	Peso (g)	Carga suportada (N)	Rigidez (N.mm)
Ponte 1	827	488,44	132,08
Ponte 2	845	660,21	146,71
Ponte 3	852	762,00	146,57

Fonte: Elaboração própria.

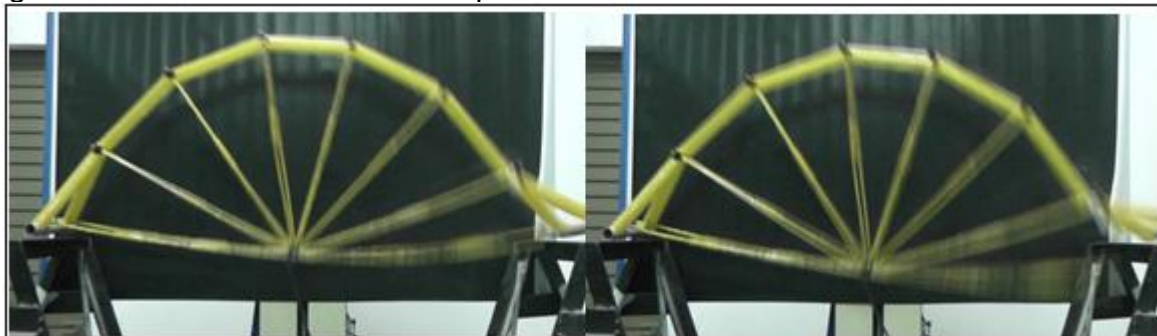
Durante a realização dos ensaios observou-se que a falha nas pontes se deu de forma semelhante, onde as 3 estruturas romperam na ligação do arco com os apoios, o que indica uma falha no processo construtivo das estruturas. As Figuras 32, 33 e 34 mostram o ponto de ruptura das estruturas durante a aplicação do carregamento.

Figura 32 - Local da falha no exemplar Ponte 1



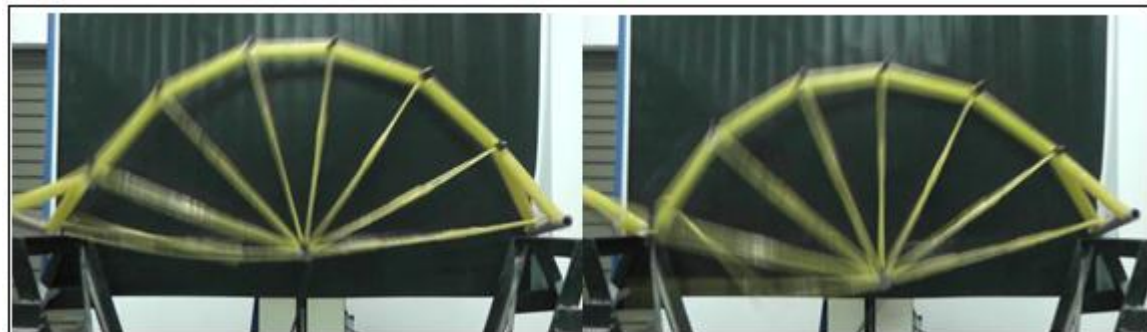
Fonte: Elaboração própria

Figura 33 - Local da falha no exemplar Ponte 2



Fonte: Elaboração própria

Figura 34 - Local da falha no exemplar Ponte 3



Fonte: Elaboração própria.

Estas falhas ocorreram devido a alguns trechos sem preenchimento por resina epóxi ou contato entre as seções tubulares de espaguete que se mostraram pontos frágeis, como mostrado na Figura 35.

Figura 35 - Detalhe das ligações defeituosas



Fonte: Elaboração própria

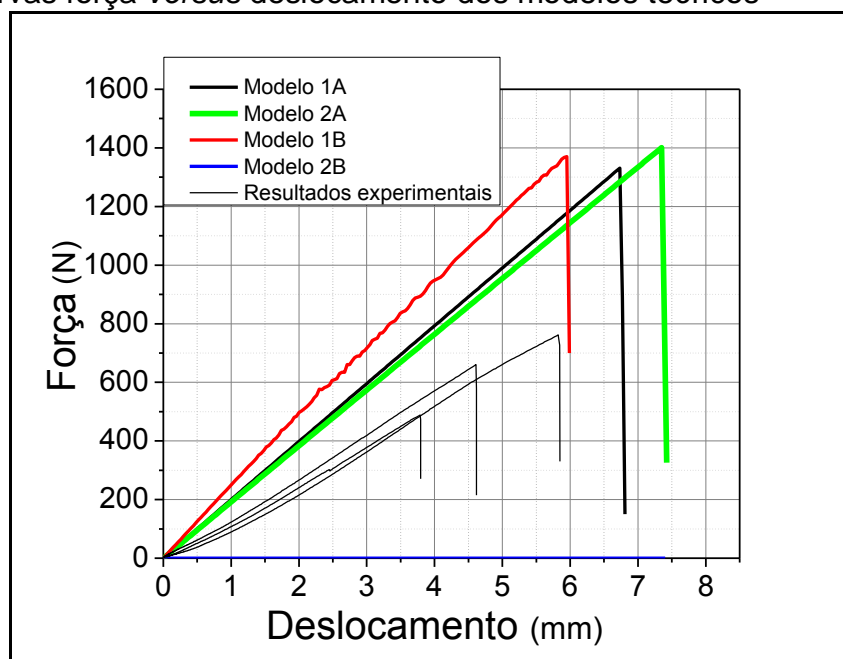
4.2 Resultados das simulações dos modelos numéricos

Neste tópico estão apresentados os resultados obtidos a partir das simulações realizadas com os 4 modelos numéricos.

Os 4 modelos numéricos foram simulados com uma malha grossa tendo um elemento finito por cada barra e com uma malha refinada de dimensão 0,05m o que resulta em 11 elementos nas diagonais e 5 elementos nas seções do arco.

A Figura 36 apresenta as curvas forças *versus* deslocamento dos modelos teóricos com 1 elemento por barra simulados, juntamente com as curvas de força *versus* deslocamento dos modelos experimentais.

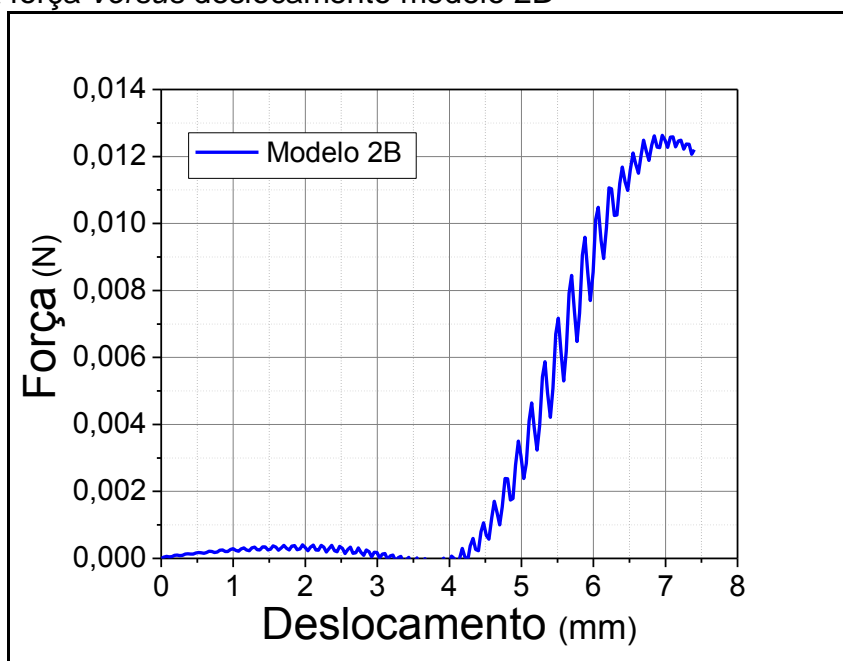
Figura 36 - Curvas força *versus* deslocamento dos modelos teóricos



Fonte: Elaboração própria

A figura 37 apresenta a curva de rigidez do modelo teórico 2B individualmente em virtude das características peculiares apresentadas a partir da simulação desse modelo.

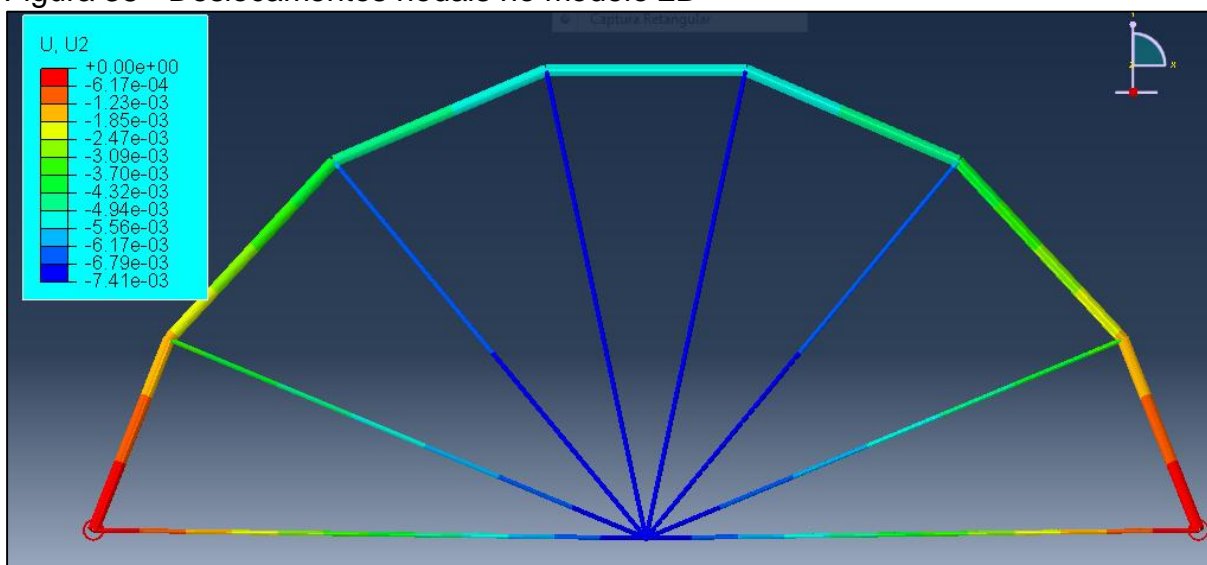
Figura 37 - Curva força versus deslocamento modelo 2B



Fonte: Elaboração própria.

A discrepância entre os valores de rigidez obtidos entre o modelo 2B que foi simulado como elemento de treliça nas diagonais e no arco e os demais modelos pode ser creditada ao fato de que nesta simulação a combinação da ligação excêntrica das barras da diagonal com o arco a ferramenta “tie” do Abaqus não desempenhou sua função da mesma forma que no modelo 2A. Dessa maneira pôde-se observar que os deslocamentos nodais não foram de mesma magnitude, onde, os deslocamentos do arco nas conexões com as diagonais não se corresponderam, como exemplificado na Figura 38.

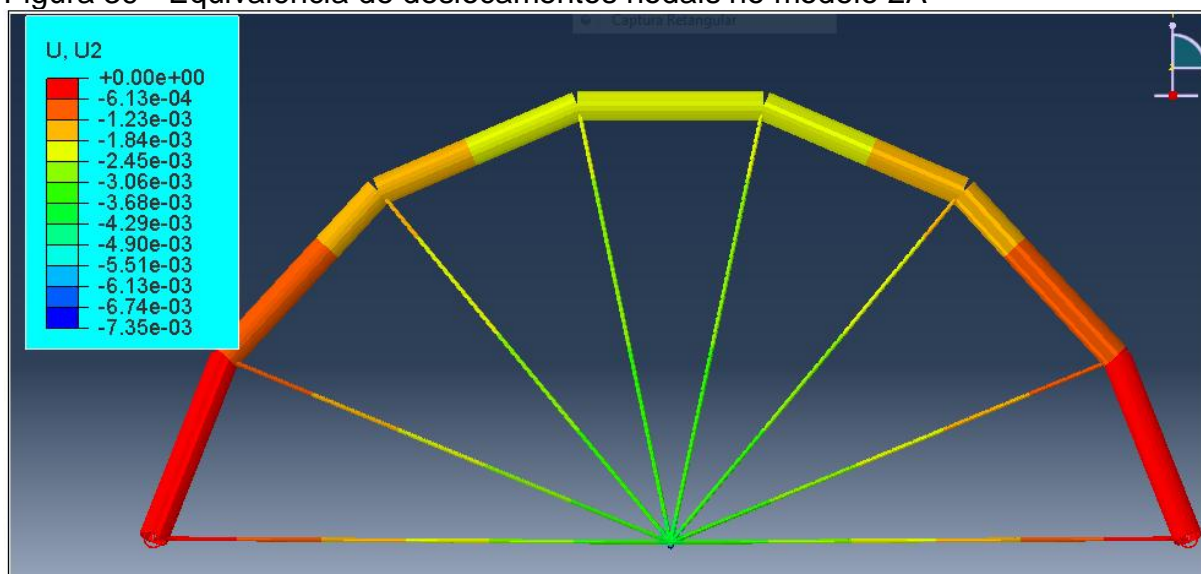
Figura 38 - Deslocamentos nodais no modelo 2B



Fonte: Elaboração própria.

Utilizando a ferramenta de visualização dos deslocamentos do Abaqus observa-se que nas ligações do arco com as diagonais não há correspondência de deslocamentos, fato esse, que é observado através da diferença de coloração entre diagonais e arco nos nós. No modelo 2A que também foi modelado como elemento de ligações excêntricas entre arco e diagonais observou-se, diferentemente do modelo 2B correspondência entre essas movimentações como mostrado na Figura 39.

Figura 39 - Equivalência de deslocamentos nodais no modelo 2A



Fonte: Elaboração própria.

A partir da análise dos modelos 2A e 2B verifica-se que embora o deslocamento máximo de ambos seja de aproximadamente 7mm, no modelo 2B não há movimentação do arco concomitantemente com as diagonais.

Foi feita uma análise de regressão linear, baseado no método dos mínimos quadrados para se obter as rigidezes dos modelos teóricos a partir dos dados força e deslocamento gerados na simulação numérica e tais valores estão apresentados na tabela 9.

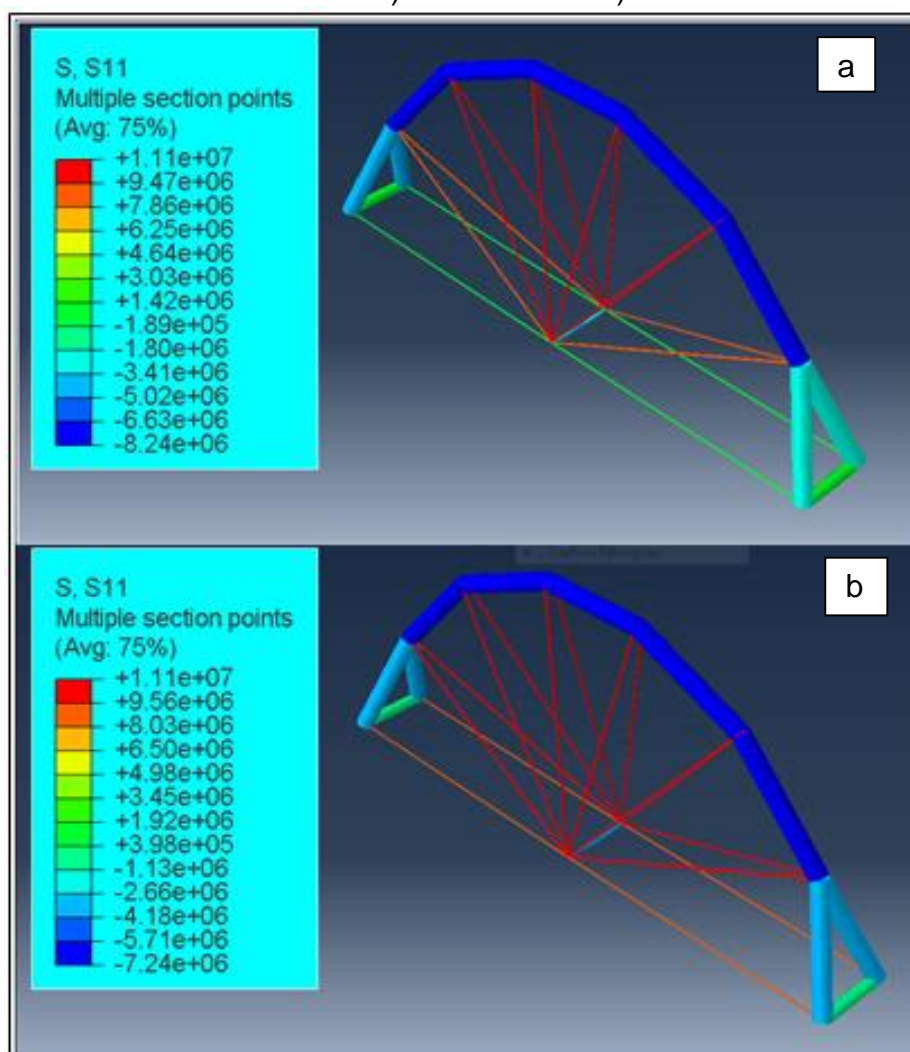
Tabela 9 - Rigidezes dos modelos teóricos.

Estrutura	Malha Fina		Malha Grossa	
	Rigidez (N.mm)	Carga de ruptura (N)	Rigidez (N.mm)	Carga de ruptura (N)
Modelo 1A	197,51	1331,24	197,55	1336,8
Modelo 2A	190,5	1400,97	191,02	1405,12
Modelo 1B	200,7	1370,19	202,5	1389,5

Fonte: Elaboração própria.

Nas simulações numéricas dos modelos 1A e 2A, com os 2 tipos de malha utilizadas, pode-se observar que as diagonais são excluídas do modelo quando alcançam a tensão de ruptura o que corrobora o comportamento do material ao se utilizar a lei constitutiva de material “smeared cracking model” mencionado por Kostas (2012) no item **2.6.1**. Na simulação desses modelos também se observa uma distribuição simétrica dos carregamentos no último quadro antes da ruptura das diagonais frágeis. A Figura 40a e 40b demonstra os modelos teóricos 1A e 2A simulados com malha de 1 elemento, no último quadro antes da exclusão dos elementos tracionados quando rompidos.

Figura 40 - Simetria de tensões no: a) modelo 1A e b) modelo 2A



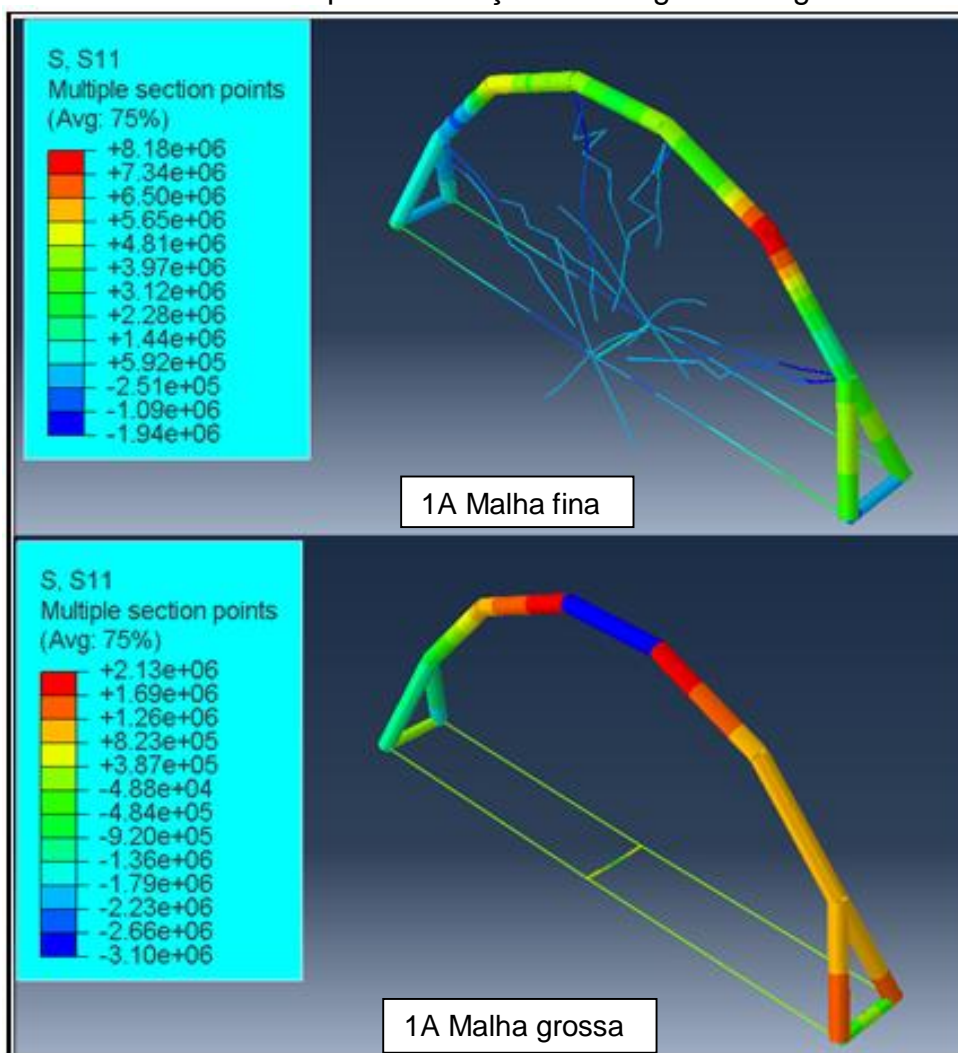
Fonte: Elaboração própria.

Os modelos numéricos 1A e 2A que foram modeladas no arco com lei constitutiva de dano dúctil e diagonais dano frágil, romperam com tensão principal nos elementos tracionados de aproximadamente 11MPa e tensão de compressão no arco de 8,24MPa para o modelo 1A e 7,24 MPa no modelo 2A como pode ser observado nas figuras 40a e 40b. É importante ressaltar que as tensões apresentadas na legenda da interface do software estão em Pascal (Pa). Também é interessante salientar que o arco está trabalhando entre 9 e 12% de sua resistência máxima, segundo o modelo, quando as diagonais chegam a sua tensão última. No modelo 1A de malha fina quando as diagonais chegam a sua tensão última o arco está submetido a uma tensão de 9,24MPa.

A configuração dos modelos 1A com malha grossa e malha fina, após a ruptura e exclusão dos elementos tracionados, estão apresentando na Figura 41. As barras

de tração nos elementos de malha fina não são eliminadas completamente do modelo, no entanto, pode se observar que já se encontram danificadas.

Figura 41 – Modelos 1A e 2A após eliminação das diagonais frágeis

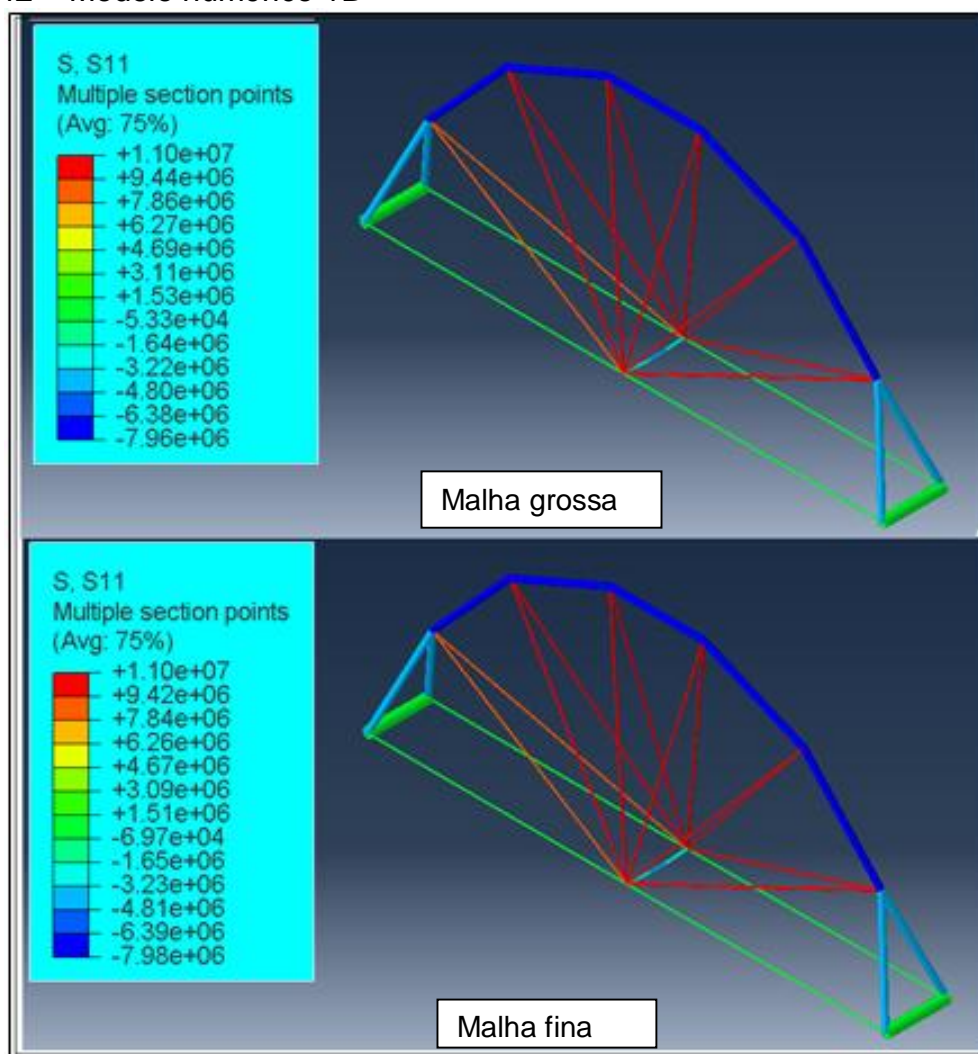


Fonte: Elaboração própria.

O modelo numérico 1B em virtude das propriedades constitutivas dos materiais adotada para os elementos dessa estrutura não apresenta ruptura visível ao fim da simulação. Isso possivelmente se deve ao fato de que a utilização do material “*Concrete Damaged Plasticity*” a estrutura se plastifica não sendo possível observar danos nas diagonais ou nos elementos do arco.

A Figura 42 exibe o modelo teórico 1B de malha fina e malha grossa, um quadro antes da instabilidade, onde se nota a simetria de tensões em toda a estrutura.

Figura 42 – Modelo numérico 1B



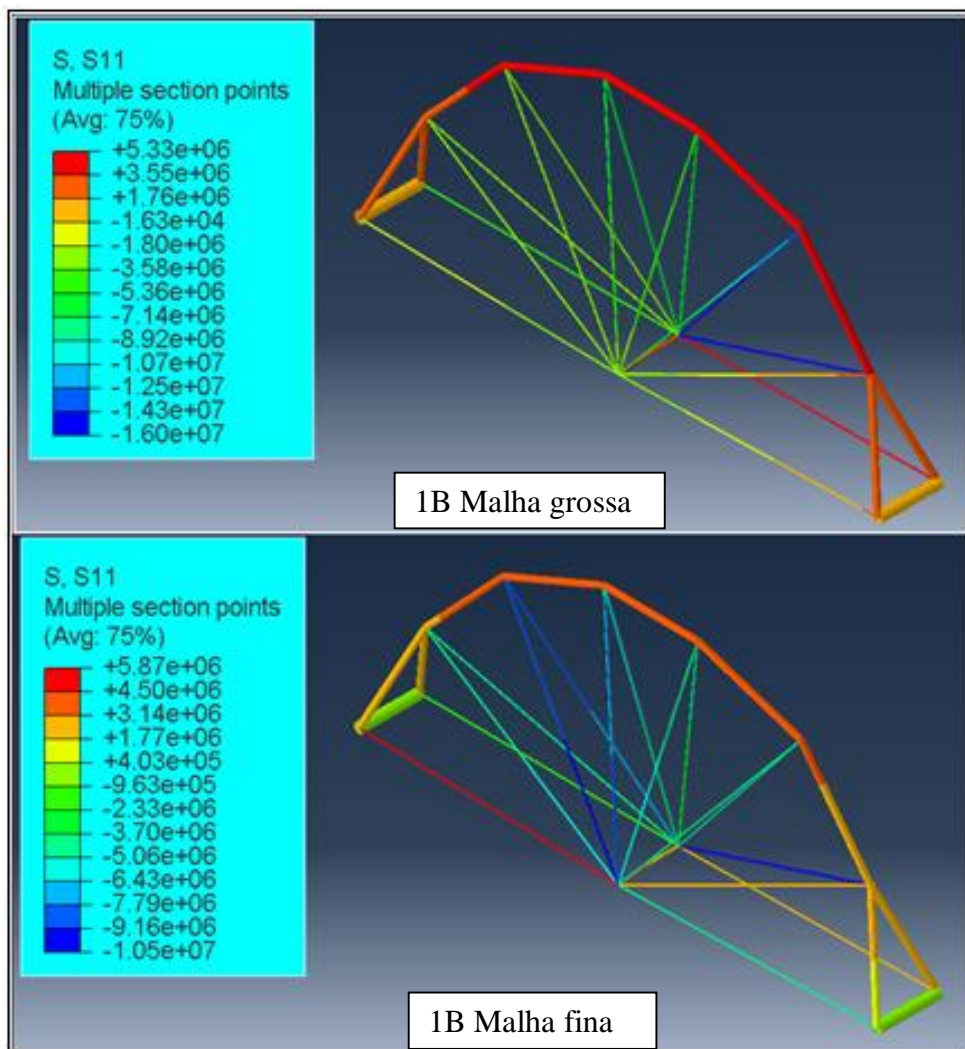
Fonte: Elaboração própria.

Cabe salientar que o modelo teórico 1B, em consequência da lei constitutiva de material utilizada, o “*Concrete Damaged Plasticity*” teve o arco modelado com elemento de treliça (TRUSS 3D), pois, o programa não permite a combinação desse material com o elemento de viga (BEAM 3D – B31). Nesse sentido foi necessário restringir a movimentação do arco em sua direção transversal, pois, os elementos de treliça não possuem inércia, por conseguinte, só possuem resistência na direção do eixo e a não utilização dessas restrições tornava a simulação dessa estrutura instável.

Após as diagonais atingirem uma tensão de tração de aproximadamente 11MPa, ainda com a utilização das restrições no arco a estrutura apresenta um comportamento não estável como mostrado na Figura 43. Nessa etapa (fim do comportamento estável) o arco apresenta tensão de compressão de aproximadamente 8MPa, como foi apresentado anteriormente na Figura 42. Com este

modelo também se encontra que o arco está muito pouco solicitado no momento de ruptura.

Figura 43 - Instabilidade do modelo numérico 1B



Fonte: Elaboração própria.

Na simulação do modelo 1B após o início dessa fase não estruturalmente estável do modelo, notam-se tensões de tração no arco e de compressão nas diagonais, o que não representa um comportamento adequado para este tipo de estrutura. No entanto, nessa simulação não há rompimento visível de nenhum membro estrutural, dessa forma, o que indica o colapso da estrutura, portanto, é a desestabilização. O modelo teórico 2B foi omitido desta análise em função de não ter apresentando um comportamento estrutural lógico àquele esperado, como pôde ser observado na curva de rigidez desse modelo apresentado na Figura 37.

Em todos os modelos simulados observou-se que a adoção de uma malha refinada nos 4 casos considerados não resultou em uma grande diferença na resposta da estrutura, de forma que a rigidez se manteve em valores muito próximos. As rigidezes numérica superiores aos valores obtidos nos ensaios experimentais pode ser sustentada devido a consideração que são feitas na modelagem numérica, onde as ligações entre os elementos do arco e entre as diagonais e arco são consideradas juntas rígidas, no entanto, a estrutura real certamente apresenta alguma flexibilidade nessas uniões.

Outro fator importante é que nos testes realizados com os 3 modelos construídos para os ensaios experimentais, observou-se que os elementos tracionados se encontravam com um determinado relaxamento, em virtude do período de tempo ao qual as estruturas estavam em repouso até o momento do ensaio. O fato da estrutura se manter em repouso por um período de aproximadamente 2 meses fez com que os elementos da diagonais apresentassem uma determinada flexão, talvez em função do peso próprio do compósito resina-espaguete. Na modelagem numérica as diagonais são consideradas completamente tensionadas (esticadas), de forma que esse pode vir a ser um motivo do aumento da rigidez global do modelo.

Considerando o exposto por Kaminski (2007), mencionando as incertezas de modelo, neste trabalho pôde ser verificada a presença desses fatores em pelo menos duas frentes, sendo a primeira relacionada a discrepância entre as rigidezes numéricas e experimentais que pode ser creditada a um erro humano, onde as estruturas reais apresentaram falhas nas ligações e dessa forma romperam com uma carga abaixo daquela para a qual foram projetadas. Também verificaram-se fatores relacionados as incertezas do material, pois, inicialmente, os dados utilizados para o dimensionamento das barras de tração foram os disponibilizados por Gonzáles (2005), porém, nos ensaios realizados se observou uma resistência abaixo do previsto nos ensaios do autor, nas diagonais com ligação. Os ensaios de Gonzáles et al (2005) apresentam uma resistência a tração para cada fio de macarrão de 41,8N, no entanto, nos testes realizados neste trabalho, as diagonais, que possuem 6 fios de espaguete e uniões reforçadas apresentaram uma carga de ruptura média de 169N com CV de 21,02%.

Ainda considerando o exposto por Kaminski (2007) e Savoia (2012), no modelo numérico as considerações feitas com relação as ligações das diagonais com o arco podem não corresponder a situação do modelo real, pois, na modelagem numérica,

tais uniões são consideradas uniões perfeitas, o que pode ter levado a valores de rigidezes maiores nos modelo teóricos.

5 CONCLUSÃO

No presente trabalho realizou-se um estudo numérico e experimental de uma estrutura treliçada de uma ponte construída de espaguete. Três estruturas de espaguete foram dimensionadas usando software livre de análise bidimensional e construídas considerando os dados de resistência a tração e compressão do espaguete disponibilizados na literatura por Gonzáles et al (2005). Dos elementos que compõe o arco de compressão e as diagonais tracionadas das estruturas construídas foram retiradas amostras e caracterizados mecanicamente com o objetivo determinar as propriedades do material para fornecer dados o mais fielmente possível ao software de elementos finitos para a realização das simulações numéricas. A modelagem numérica também foi realizada considerando as características geométricas médias dos elementos do arco e diagonais ensaiados e na definição das leis constitutivas buscou-se aqueles materiais disponíveis no Abaqus com curvas que mais se ajustavam ao comportamento do espaguete, a tração e compressão. As três estruturas construídas foram ensaiadas utilizando um equipamento para aplicação de cargas, onde o carregamento pode ser considerado quase-estático, devido à baixa velocidade de aplicação dos incrementos de carga, impedindo dessa forma, cargas de impacto na estrutura de espaguete. Os modelos testados não resistiram à carga de projeto e falharam todos devido a uma junta deficiente na união do arco com os apoios.

Analisando a parte experimental do trabalho pode-se ressaltar que os arcos de compressão estão superdimensionados já que suportam em média uma carga de 7,8 KN com um coeficiente de variação de 9%. Já as diagonais tracionadas suportam em média 1,7 KN tendo um coeficiente de variação de 21,02%. No entanto, nos testes se observou que a ruptura aconteceu em uma das uniões do arco com os apoios nas três réplicas ensaiadas. Isto aconteceu por uma falha no modelo construtivo. À vista disso, neste trabalho o erro humano na confecção da ponte foi decisivo na resistência última da estrutura.

Quando se analisam as simulações realizadas observa-se que, ainda que com a inserção das propriedades médias dos materiais de forma mais realística possível, não se conseguiu representar a rigidez da estrutura. As diferentes formas de modelar tanto a geometria como os materiais não apresentaram grandes ganhos nos

resultados. Também se verificou que o refinamento da malha não aportou benefícios significativos. Todos os modelos simulados falharam nas diagonais.

Da análise em conjunto, numérico-experimental, pode-se ver que como o peso da estrutura não alcançou o limite máximo permitido que é geralmente adotado em competições de pontes de espaguete, que é de 900g, as barras das diagonais poderiam ser reforçadas. Também como o arco de compressão é significativamente mais resistente, sendo que no momento da ruptura atingiu aproximadamente 12% da tensão de ruptura média das seções tubulares ensaiadas, poderia ser diminuída sua seção e buscar otimizar a estrutura de forma que todas as seções trabalhem de uma forma mais eficiente.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

A seguir são apresentadas as sugestões para trabalhos futuros:

- Estudar os motivos da diferença da rigidez entre o modelo numérico e experimental.
- Busca por métodos de construção que eliminem ou reduzam os problemas nas ligações da estrutura, principalmente na união entre o arco e os apoios, como por exemplo, utilização de programas de planificação.
- Busca por métodos de construção das seções do arco com diâmetros menores de forma que mais material possa ser destinado as diagonais e as juntas, sabendo-se que esses são os pontos críticos da estrutura.
- Quanto a simulação numérica, encontrar métodos ou rotinas numéricas que possibilitem a flexibilização da ligações do modelo teórico e das diagonais de modo que represente de forma mais fiel a estrutura real.
- Projeto de pesquisa ou ensino que trabalhe a aplicação dos métodos dos elementos finitos na simulação dessas estruturas, otimização e que se possa construir uma quantidade significativa de protótipos deste tipo de modelo, para que os resultados estatísticos de ensaios possam ser mais confiáveis.

REFERÊNCIAS

ABAQUS/Explicit, Version 6.13, Dassault Systèmes Americas Corp. – Abaqus Analysis User`s Manual – versão 6.13-1 – [manual], 2013

BENEYTO, Pablo A.; MROGINSKI, Javier L.; PODESTÁ, Juan M.; GUTIÉRREZ Guillermo F.; HECTOR, A. Di Rado. **Apoyo a la enseñanza del método de elementos finitos mediante la realización de um concurso de reticulados especiales**. Asociación Argentina de Mecánica Computacional XXX, 2011. p. 2315-2323.

BULLEIT, W. (2008). **Uncertainty in Structural Engineering**. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, 13, 24-30.

CASTILLO, Sergio. **Modelagem estática e sísmica da barragem de terra de Pomacocha**. [Dissertação] Rio de Janeiro: PUC RIO, 2003.

CIGRÉ - Conseil International des Grands Réseaux Electriques (1990), “**An experiment to measure the variation in lattice tower design**”, *Report 22-90 (WG08)* 17, 1990.

CUNHA, P.C. **Comportamento crítico e pós-crítico de placas dobradas**. [Dissertação] – Rio de Janeiro: Curso do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil do Centro Técnico Científico, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2005.

FISH, Jacob; BELYTSCHKO, Ted. **A first course in finite elements**. Chichester, England: John Wiley & Sons Ltd, 2007.

FU, C. C.; WANG, S. **Computational Analysis and Design of Bridge Structures**. Boca Raton: CRC Press, 2015.

GONZÁLEZ, L. A. S.; MORSCH, I. B.; MASUERO, J. R. **Didactic games in engineering teaching** – case: spaghetti bridges design and building contest. In: International Congress of Mechanical Engineering. Ouro Preto: ABCM, 2005.

HARRIS, H. G.; SABNIS, G. **Structural Modeling and Experimental Techniques** - Boca Raton: CRC Press, 1999.

HEANEY, A. C. **The Versatile Structural Model Kit.**- University of New South Wales, Australia, 1980.

ITURRIOZ, Ignacio; KOSTESKI, L.E; RIERA; Jorge D. **Model uncertainty in the non-linear numerical determination of the response of large structures.** Anais de XXXIV - Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural, 2010.

KAMINSKI, J. JR. (2007): “**Incertezas de modelo na análise de torres metálicas em treliça de linhas de transmissão**”, [Tese], PPGEC, UFRGS, Porto Alegre, Brasil, 2007.

KOSTESKI, L.E. **Aplicação do Método dos Elementos Discretos formado por barras no estudo do colapso de estruturas.** [Tese] - Porto Alegre: Curso do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2012.

MELCHERS, R. E. **Structural Reliability. Analysis and Prediction.**-Chichester: Ellis Horwood Series in Civil Engineering, 1987.

MROGINSKI, Javier L.; Gutierrez, Guillermo J.; Beneyto, Pablo A.; DI RADO, Ariel. **Optimización topológica de sistemas estructurales bidimensionales discretos mediante algoritmos genéticos.** Mecánica Computacional, 2009. p. 2657-2674

Oliveira, J.F. **Estudo teórico-experimental da influência das cargas cíclicas na rigidez de vigas de concreto armado.** [Tese] – São Carlos: Curso do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil (Engenharia de Estruturas), Escola de Engenharia de São Carlos – EESC - USP, 2005.

Riera, J. D., and Iturrioz, I., (1998). **Discrete elements model for evaluating impact and impulsive response of reinforced concrete plates and shells subjected to impulsive loading.** Nuclear Engineering and Design, 179, 135-144.

SAVOIA, M. (2012). **The Role of uncertainties in Structural Engineering. Problems: How to manage them in simulation and design.** *Structural Engineering*, Giornate AICAP in memoria di Cestelli Guidi, Roma, University of Bologna, 1-11.

SILVA, Luís Miguel Freitas da. **Criação e Implementação de um Laboratório Pedagógico de Estruturas na Universidade do Minho.** [Dissertação]. Minho – Portugal: Escola de Engenharia, 2013.

TAYLOR, R. L.; ZIENKIEWICZ, O. S. **The Finite Element Method**. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2000. v.1.

WEBSITE de Universidade Okanagan College: **Spaghetti bridge building contest**. Disponível em: <www.okanagancollege.bc.ca/page17338.aspx>. Acesso em: 15/03/2017

WEBSITE UFRGS: **Competição de pontes de espaguete da UFRGS**. Disponível em: <www.ppgec.ufrgs.br/segovia/espaguete/index.html> Acesso em: 15/03/2017

YOUNT, Tristan; MACLACHLAN, Duncan; LYON, Bob; FARSHADFAR, Omid; **Popsicle stick bridge project manual**; Anais do CEO301/Spring. University of Kansas, 2015. p. 50-61.