III CONGRESSO INTERNACIONAL DE **GESTÃO E TECNOLOGIAS** COINTER - PDVGT 2019

ELABORAÇÃO E CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO DA PONTE AKASHI-KAIKYO

PREPARACIÓN Y CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO DEL PUENTE AKASHI-KAIKYO

PREPARATION AND CONSTRUCTION OF THE AKASHI-KAIKYO BRIDGE PROTOTYPE

Apresentação: Comunicação Oral

Fernanda Gonçalves Oliveira¹; Deisiane Santos de Oliveira²; Lídia Letícia Salvino dos Santos³; Lyálisson José de Melo Fagundes⁴; Adalgisio Silva Aguiar Netto⁵; Pablo Batista Guimarães⁶

DOI: <https://doi.org/10.31692/2358-9728.VICOINTERPDVG.2019.0045>

Resumo

O presente trabalho visa relatar o procedimento para construção do protótipo de uma ponte treliçada utilizando palitos de bambu ligados por cola. O trabalho foi desenvolvido de modo a realizar uma abordagem dos conhecimentos adquiridos no curso de engenharia mecânica de maneira contextualizada e interdisciplinar. Como premissa para proposta, foi utilizada a Ponte Akashi-Kaikyo, a maior ponte suspensa do mundo. Com o estudo da sua estrutura, foi desenvolvido um croqui para a investigação da viabilidade do projeto. Com o mesmo finalizado, foi realizado, no software SolidWorks, o protótipo virtual. O material escolhido para construção foi palito de bambu (diâmetro de 4 mm), substituindo as treliças de ferro e, para a união, massa epóxi bicomponente, suprimindo a solda. As propriedades do palito de bambu foram encontradas, principalmente, ao realizar o ensaio de tração. Os dados encontrados foram submetidos a testes estatísticos para garantir que a amostra representava, com confiabilidade, a população a ser utilizada. Primeiro, ao teste de Shapiro-wilk, para verificar a normalidade das amostras, e depois ao teste de Grubbs, com um nível de confiança de 95%, para retirada de *outliers*. Já os dados referentes ao teste de compressão foram obtidos por pesquisas

¹ Engenharia Mecânica, IFPE – *campus* Recife, e-mail: fgo@a.recife.ifpe.edu.br

² Engenharia Mecânica, IFPE – *campus* Recife, e-mail: dso3@discente.ifpe.edu.br

³ Engenharia Mecânica, IFPE – *campus* Recife, e-mail: ljmfm@discente.ifpe.edu.br

⁴ Engenharia Mecânica, IFPE – *campus* Recife, e-mail: Llss@discente.ifpe.edu.br

⁵ Engenharia Mecânica, IFPE – *campus* Recife, e-mail: Asan1@discente.ifpe.edu.br

⁶ Doutor em Engenharia Mecânica, IFPE – *campus* Recife, e-mail: pabloguimaraes@recife.ifpe.edu.br

bibliográficas. Com as propriedades estabelecidas, foi possível a realização de simulações por elementos finitos no software ANSYS, para determinar a carga distribuída amparada pela ponte. A construção do protótipo físico ocorreu de maneira artesanal, seguindo o projeto preparado. A carga máxima colocada no protótipo físico foi de 383 N, mas a simulação alega que a construção suporta aproximadamente 1000 N. Com o progredir desse trabalho, foram abordados temas como projeto de estrutura metálica e análise do comportamento dos materiais sob a ação de carregamentos, contribuindo significativamente para a formação profissional dos estudantes de engenharia mecânica.

Palavras-Chave: Bambu, Elementos finitos, *SolidWorks*, Tratamento estatístico, Treliça

Resumen

Este documento tiene como objetivo informar el procedimiento para construir el prototipo de un puente de armadura utilizando palos de bambú unidos con pegamento. El trabajo se desarrolló para abordar los conocimientos adquiridos en el curso de ingeniería mecánica de forma contextualizada e interdisciplinaria. Como premisa para la propuesta, utilizamos el Puente Akashi-Kaikyo, el puente colgante más grande del mundo. Con el estudio de su estructura, se desarrolló un bosquejo para investigar la viabilidad del proyecto. Con el mismo finalizado, se realizó, en el software *SolidWorks*, el prototipo virtual. El material elegido para la construcción fue un palillo de bambú (4 mm de diámetro), reemplazando las armaduras de hierro y, para unir, una masa epoxi de dos componentes, suministrando la soldadura. Las propiedades del palo de bambú fueron encontradas al realizar la prueba de tracción. Los datos obtenidos se sometieron a pruebas estadísticas para garantizar que la muestra representara de manera confiable a la población a utilizar. Primero, se sometieron a la prueba de Shapiro-Wilk para verificar la normalidad de las muestras, y luego a la prueba de Grubbs, con un nivel de confianza de uno 95% para la eliminación de valores atípicos. Los datos relacionados con la prueba de compresión se obtuvieron mediante investigación bibliográfica. Con las propiedades establecidas, fue posible realizar simulaciones de elementos finitos en el *software* ANSYS para determinar la carga distribuida soportada por el puente. La construcción del prototipo físico se hizo manualmente, siguiendo el proyecto preparado. La carga máxima soportada por el prototipo físico fue de 383 N, pero la simulación afirma que la construcción soporta aproximadamente 1000 N. Con el progreso de este trabajo, temas como el diseño de estructuras metálicas y el análisis del comportamiento de los materiales bajo la acción de cargas, contribuyendo significativamente a la formación profesional de los estudiantes de ingeniería mecánica.

Palabras Clave: Bambú, Elementos finitos, *SolidWorks*, Tratamiento estadístico, el Braguero.

Abstract

This paper aims to report the procedure for the construction of a truss bridge prototype using glue - linked bamboo sticks. The work was developed in order to approach the knowledge acquired in the mechanical engineering course in a contextualized and interdisciplinary way. We used the Akashi-Kaikyo Bridge, the largest suspension bridge in the world. As we studied its structure, a sketch was developed to investigate the viability of the project and when we

finalized it we run a virtual prototype with the SolidWorks software. The material chosen for construction was bamboo toothpick (4 mm diameter) that replaced the iron trusses and instead of the weld we used two-component epoxy mass. The properties of the bamboo stick were found mainly when performing the tensile test. The data obtained were subjected to statistical tests to ensure that the sample reliably represented the population to be used. First, we tested the Shapiro-Wilk test to verify the normality of the samples, and then to the Grubbs test, with a 95% confidence level for outliers removal. The data related to the compression test were obtained by bibliographic research. With the established properties, it was possible to perform finite element simulations in the ANSYS software to determine the distributed load supported by the bridge. The construction of the physical prototype was done by hand, following the prepared project. The maximum load placed on the physical prototype was 383 N, but the simulation claims that the construction supports approximately 1000 N. As we progressed in our work, topics such as steel structure design and analysis of the behavior of materials under the action of loads, contributing significantly to the vocational training of mechanical engineering students.

Keywords: Bamboo, Finite Elements, SolidWorks, Statistical treatment, Truss

Introdução

Com a intensa evolução tecnológica, a realidade tem exigido, cada vez mais, qualificação dos profissionais para adentrar no mercado. A escola, por sua vez, tem um papel fundamental na capacitação dos jovens que aspiram uma vida melhor, transformando-os em cidadãos críticos, participativos e competentes. Por isso, existe uma preocupação constante com os processos de formação e treinamento dos futuros trabalhadores.

Para integrar o estudante gradualmente nos desafios do mercado trabalho, o projeto pedagógico do curso superior de Engenharia Mecânica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco (IFPE), campus Recife (2014), anuncia que:

[...] o currículo [de engenharia mecânica] foi elaborado contemplando as competências profissionais fundamentais, com foco no perfil profissional de conclusão, prevendo situações que levem o participante a vivenciar o processo de ação-reflexão-ação, a mobilizar e articular com pertinência conhecimentos, saberes e valores em níveis crescentes de complexidade. Para tanto, a abordagem dos conhecimentos privilegia os princípios da contextualização e da interdisciplinaridade, agregando competências profissionais relacionadas com as novas tecnologias e à autonomia intelectual necessárias para enfrentar diferentes desafios do mundo do trabalho com criatividade e flexibilidade (IFPE, 2017, p. 38).

Seguindo esses alicerces, o presente trabalho desenvolveu-se de modo aplicar os conhecimentos adquiridos ao longo do curso de engenharia mecânica de maneira

contextualizada e interdisciplinar através da construção do protótipo de uma ponte treliçada, produzida com palitos de bambu ligados com cola, que deverá resistir a uma determinada carga sem se romper ou sofrer deformação.

Entre as pontes dispersas no mundo, merece realce a ponte Akashi-Kaikyo, considerada a maior ponte suspensa do mundo. Escolheu-se então, nesse projeto, criar seu protótipo, seguindo as condições postas anteriormente.

Assim, o objetivo principal deste trabalho é realizar a construção, com palitos de bambu, de um protótipo da ponte Akashi-Kaikyo. Na metodologia será abordado deste a criação do croqui, perpassando pelos procedimentos para determinar as propriedades dos materiais utilizados, o protótipo virtual e a simulação computacional, até a construção física do protótipo e o teste da carga limite.

Fundamentação Teórica

Ponte é uma grande estrutura que tem por função interligar dois pontos separados por obstáculos como rios e vales, permitindo o deslocamento tanto de veículos como de pedestres. Para que uma ponte seja segura, além de conhecermos as tensões atuantes, as deformações e a função para qual a mesma foi projetada, devemos escolher o tipo de estrutura a ser utilizada. Essa escolha se dar através dos conhecimentos estruturais, aplicação de ideias inovadoras e estudo em cima de projetos já existentes elaborados por profissionais da área. Uma ponte deve satisfazer aspectos como funcionalidade, economia, eficiência estrutural, durabilidade e estética (LEONHARDT, 1979; PFEIL, 1983, 1979).

Sendo assim, um dos tipos mais comuns é a ponte treliçada, recebendo este nome por conta das estruturas treliçadas que as constitui. São comumente associadas a outro tipo de ponte, formando assim um tipo de estrutura mesclado. De fabricação e montagem bastante simples, as treliças que as compõem dividem a carga de um único ponto para uma área mais ampla, de modo a garantir resistência aos esforços de tração, compressão e impactos. Essas pontes, além de fornecer uma segurança excepcional são bem viáveis economicamente, visto que o material nela utilizado é empregado de forma eficiente (CIVILIZAÇÃO ENGENHEIRA, 2018; ENGENHARIA PORTUGAL, 2018; O PÓRTICO, 2016).

Em 1988 foi dado início à construção do que seria a maior ponte suspensa do mundo, a ponte Akashi-Kaikyo (Figura 1). Finalizada 10 anos depois, teve o intuito de substituir o

deslocamento à barca no estreito de Akashi, Japão, interligando a ilha Awaji com a cidade de Kobe (KITAGAWA, 2004; YIM, 2007).

Figura 1. Ponte Akashi-Kaikyo.

Fonte: YIM (2007)

Para melhor compreensão sobre a ponte, podemos segmentá-la em cinco elementos que serão explanados a seguir (Figura 2).

Figura 2. Subdivisão da ponte Akashi-Kaikyo.

Adaptado: KASHIMA et al. (1998)

Os ancoradouros são estruturas de concreto armado colocados nas extremidades da ponte para realizar a ancoragem. A região de construção dos ancoradouros foi perto das costas nas águas rasas, com sessão circular principal de 85 metros de circunferência, mas a profundidade variou de acordo com a condição geológica da margem onde foi construída (KASHIMA et al., 1998).

Devido aos fortes ventos orientais, a estabilidade aerodinâmica é fundamental para a ponte então, para impor uma baixa resistência à passagem do vento, reduzir a torção e proporcionar a rigidez necessária, foi escolhido um tabuleiro de treliça de ferro com instalação de placas estabilizadoras ao longo do vão central (KITAGAWA, 2004).

Como o ferro é extremamente suscetível à corrosão, robôs foram desenvolvidos para realizar manutenção preventiva identificando desgastes na superfície das treliças eliminando-os. O acesso dos profissionais, quando necessário, é realizado pelos três pórticos construídos abaixo da ponte, evitando a interrupção do tráfego de veículos. O convés acomoda seis pistas para automóveis à velocidade máxima de 100 Km/h, sem área para transeuntes (KITAGAWA, 2004).

O projeto das torres levou em consideração a necessidade de resistência ao vento, a restrição dos cabos principais e a segurança de navegação. Assim, os topos das duas torres que compõem a ponte estão a 297 metros acima do mar e subdivide a ponte em três vãos: O vão central, com 1991 metros, e os laterais, com 960 metros cada. Totalizando 3911 metros de comprimento (KITAGAWA, 2004; YIM, 2007).

As medidas atuais não foram as originalmente projetadas, pois durante a construção ocorreu o terremoto de Kobe que afastou as torres em aproximadamente 0,8 metros. Para resistir aos terremotos da área, as torres foram construídas inteiramente de aço, para facilitar a absorção do choque, e foram instalados amortecedores nas bases de modo que contrabalanceasse o movimento de inclinação, impedindo seu tombamento (KITAGAWA, 2004; YIM, 2007).

Cada torre possui um alicerce de fundação, construído no fundo do mar, com diâmetro de 80 metros e 70 metros de altura. O método de construção foi através da escavação do leito do mar até a profundidade necessária, onde foram instalados caixões de aço preenchidos, posteriormente, com concreto subaquático de baixa geração de calor. Para proteger os betões das correntes marítimas da região, que podem chegar a até 4m/s, foram instalados, circundando-os, camadas de filtrantes junto com *rip-raps* preenchidos com pedra brita (KITAGAWA, 2004; YIM, 2007).

Os fios estruturais utilizados nos cabos de sustentação foram aperfeiçoados, objetivando a necessidade do projeto. O aumento da resistência à tração para 1800 N/mm² sem a perda de ductilidade ocorreu através das modificações dos ingredientes metálicos e entrelaçamento dos fios para fazer os cabos, o que ocasionou na redução da quantidade de aço utilizado. A conexão entre as duas torres é realizada pelos dois cabos portantes parabólicos, onde se utilizam cabos mais finos, na configuração pendural verticais, para se atar ao tabuleiro. Para prevenir a corrosão causada pela água do mar, foi desenvolvido um sistema que injeta um ar desumidificador dentro dos cabos (KITAGAWA, 2004; YIM, 2007).

Metodologia

Neste capítulo será descrito os métodos e materiais utilizados para a construção do modelo em escala reduzida da ponte Akashi-Kaikyo. Para melhor compreensão, as etapas realizadas foram fragmentadas em subcapítulos ordenadas cronologicamente.

Todo desenvolvimento do trabalho ocorreu nos laboratórios do IFPE, campus Recife. A parcela computacional do projeto sucedeu, majoritariamente, no Laboratório de Mecânica Computacional, enquanto a construção física efetuou-se, principalmente, na oficina mecânica do Laboratório Multiusuário de Dosimetria Numérica. Ocasionalmente outros laboratórios foram usados de acordo com as necessidades.

Croqui e escolha dos materiais

A confecção do croqui é o primeiro passo a ser executado na elaboração de um projeto, sendo essencial no estímulo da criatividade e na investigação da viabilidade do mesmo. Aplicando os conhecimentos de desenho técnico mecânico, notou-se que a construção de toda a extensão da ponte ficaria inviável para transporte. Sendo assim, enfatizou-se a construção ao vão central da ponte (Figura 3).

Figura 3. Scanner do croqui.

Fonte: Próprio (2019)

Com o croqui finalizado, a concepção da ponte se torna mais palpável. Mas antes de repassar a elaboração para um modelo 3D, é necessário definir os materiais a serem utilizados na construção física. Para substituir as treliças de ferro da ponte foi selecionado, devido facilidade de acesso, a abundância no mercado e a relação de custo benefício, o palito de madeira de bambu da marca *Bompack* (Figura 4).

Para união dos palitos, foi escolhida a massa epóxi bicomponente da Durepoxi (Figura 4), por sua capacidade de modelagem e boa fixação na madeira, sendo ideal para quando se precisa de uma união extraforte e resistente. Sua utilização consiste em misturar, em partes iguais, as duas massas nela presente, até adquirir uma massa homogênea, e depois aplicar na região desejada. Após secagem, a cola pode ser envernizada, serrada ou lixada (LOCTITE, [s.d.]).

Figura 4. Palito de bambu Bompack e Massa epóxi bicomponente da Durepoxi, respectivamente.

Fonte: Próprio (2019)

Protótipo virtual

O desenho virtual 3D da ponte foi elaborado no software *SolidWorks*, na versão 2014. Os palitos de bambu têm a forma cilíndrica, sendo representado por um tubo rígido com 4 mm e aplicado na união entre eles a ferramenta *Welding* (soldagem). Nesse protótipo virtual foram utilizadas diferentes escalas para não ocorrer desproporcionalidade entre as dimensões e também não se tornar inviável para construção, transporte e armazenamento (Figura 5).

Figura 5. Vista lateral e isométrica do vão central adaptado da ponte Akashi-Kaikyo, respectivamente.

Fonte: Próprio (2019)

Simulação computacional por métodos dos elementos finitos

O software escolhido para realizar as simulações do protótipo da ponte a ser construída foi o ANSYS (versão 19.2), baseado no Método dos Elementos Finitos. Este software permite prever a segurança e a viabilidade do projeto se conhecemos os esforços o qual vai ser submetido. Para realizar a simulação no software foi necessário criar um novo material com as seguintes propriedades dos palitos de bambu: (I) Densidade; (II) Resistência Final à tração; (III) Resistência máxima à tração; (IV) módulo de elasticidade; (V) limite de escoamento; (VI) Resistência Final à compressão; (VII) Resistência máxima à compressão e; (VIII) coeficiente de Poisson.

No capítulo posterior será descrito como essas propriedades foram obtidas. No próprio ANSYS foi realizado, novamente a modelagem da ponte, também em 3D, e gerado uma malha computacional que apresentou 1197 nós e 751 elementos (Figura 6). As duas torres foram fixadas para simular a base ao qual a ponte é conectada. Levando em consideração que pontes são submetidas à cargas distribuídas (como carros e caminhões), ainda no setup, foram aplicadas cargas distribuídas para verificação do peso máximo que o protótipo da ponte pode suportar. Vale salientar que os cabos não foram representados no ANSYS, pois para este trabalho são apenas para fins de ilustração, porque não vão ser submetidos a esforços (diferentemente da prática, onde os cabos são um componente estrutural).

Figura 6. Geometria com a malha gerada para realizarmos as simulações.

Fonte: Próprio (2019)

Propriedades do material

Para obter a densidade dos palitos, foram obtidos um conjunto de seis amostras e retirado a média, a mediana e o desvio padrão (S). Os resultados finais, sem tratamento estatístico, estão na Tabela 1.

Tabela 1. Densidade das amostras do palito de bambu.

Amostras	1	2	3	4	5	6	S	Média	Mediana
Densidade (g/cm ³)	0,8527	0,7906	0,7786	0,6868	0,6933	0,6415	0,0793	0,7406	0,7359

Fonte: Próprio (2019)

Algumas das propriedades citadas, essenciais para a simulação da ponte, só podem ser obtidas através da realização de ensaios mecânicos. Assim, foi realizado o ensaio destrutivo de tração no Laboratório de Ensaios Mecânicos, do IFPE campus Recife. O ensaio consistiu em fixar o corpo de prova na Máquina Universal de Ensaio InterMetric IM-10 que provocou, a uma taxa constante, uma força axial de modo a aumentar comprimento da peça até a ruptura. Vale salientar que a máquina utilizada não é a mais apropriada para esse corpo de prova, pois foi utilizada menos de 10% da capacidade da mesma.

O corpo de prova utilizado possuía diâmetro menor do que o padrão recomendado pela NBR 5162 ($\varnothing$ 12,8 mm) (IFSUL, 2019), o que inviabilizou o estreitamento na região central. Em consequência, as rupturas deram-se na região de fixação da garra. Como também é estabelecido que o comprimento da seção deve ser, pelo menos, quatro vezes maior do que o diâmetro (IFSUL, 2019), foi realizado amostragens com comprimentos de 50 mm.

O resultado do ensaio foi registrado computacionalmente pelo próprio software do equipamento (Tesc versão 4.00), onde o gráfico (tensão X deformação) é criado simultaneamente de acordo com a carga aplicada (Figura 7). A partir das curvas tensão-deformação é possível averiguar que o material é classificado como frágil, já que logo após o valor de tensão máxima o material se rompe (IFSUL, 2019).

Ao total, foram realizados os ensaios com seis amostras. O desvio padrão, a média e a mediana dos dados obtidos por esse ensaio, sem tratamento estático, estão na Tabela 2.

A resistência máxima à compressão e o coeficiente de Poisson são dadas pelo ensaio destrutivo de compressão, que não pode ser realizado, devido à limitação da máquina em relação ao diâmetro do corpo de prova. Como recurso, foi realizada uma pesquisa bibliográfica para conseguir os dados. MURAD (2007) realizou na sua dissertação um compilado das propriedades físicas, mecânicas e meso-estrutural de várias espécies de bambu estudadas na Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

Figura 7. Relatório do ensaio de tração

Relatório de Ensaio

Escoam. ES1 - ponto da curva correspondente ao escoamento convencional: : 0,000 %

MPa					mm	
Corpo	Tensão	Tensão	Tensão	Módulo	Deformação	Deformação
de prova	Força Máxima	Ruptura	Escoamento	Elasticidade	Força Máxima	Ruptura
S	10,78888	8,09115	0,11098	5785,33136	1,16905	1,09545
Média	69,00000	64,66667	0,06350	6705,83333	7,83333	8,00000
Mediana	66,00000	63,50000	0,01400	6639,50000	8,00000	8,00000

Fonte: Próprio (2019)

Tratamento estatístico

Como estamos utilizando uma amostra para representar a população de palitos a serem utilizados, é necessário realizar um tratamento estatístico. Verificar a existência de outliers (um número que é muito maior ou menor que o resto dos números) nos dados obtidos é essencial, pois a presença de outliers em um conjunto amostral modifica, drasticamente, as conclusões obtidas (OLIVEIRA; GUIMARÃES, 2019).

Para detectar essa anomalia no conjunto de dados obtidos, existem diversos métodos. Mas, é necessário admitir que os dados encontrados provêm de uma distribuição normal (OLIVEIRA; GUIMARÃES, 2019). Para essa determinação foi utilizado o software ACIC NORMALIDADE (Figura 8), desenvolvido pelo grupo de pesquisa Toleranciamento e Metrologia do IFPE *campus* Recife (TOLERANCIAMENTO E METROLOGIA, 2019).

Este software realiza os seguintes teste de normalidade: Cramer-von Mises, Kolmogorov Smirnov, análise gráfica e Shapiro-Wilk. Sendo o último utilizado nesse trabalho. O teste foi realizado para cada coluna da Tabela 2 e para densidade da Tabela 1. Esse teste afirmou que todas as variáveis analisadas provem de uma população com distribuição normal, com nível de confiabilidade de 95%.

Como todos foram considerados provenientes de uma população normal é possível realizar o teste de outliers. Essa análise foi realizada no software ANALYSIS (Figura 8), que realiza o teste de Grubbs, utilizado neste trabalho, com um nível de confiança de 95%. O software apresenta quais valores são outliers, a média aritmética e o desvio padrão do conjunto amostral resultante após a retirada dos valores indesejados (OLIVEIRA; GUIMARÃES, 2019).

Figura 8. Tela inicial do software ACIC Normalidade e ANALYSIS, respectivamente.

Fonte: Próprio (2019)

Utilizando o método de Grubbs, o ANALYSIS detectou como *outlier* somente o dado da deformação de ruptura da amostra 6. Em consequência, toda a amostra foi descartada, sendo os dados resultantes apresentados na Tabela 3 para as cinco amostras resultantes.

Tabela 3. Dados após tratamento estatístico.

	MPa				mm		g/cm ³
	Tensão Força Máxima	Tensão Ruptura	Tensão Escoamento	Módulo Elasticidade	Deformação		Densidade
					Força Máxima	Ruptura	
S	10,75	7,34	0,03	5886,57	0,84	0,55	0,079
Média	71,00	66,60	0,02	5727,00	8,20	8,40	0,74
Mediana	68,00	65,00	0,00	2322,00	8,00	8,00	0,74

Fonte: Próprio (2019)

Construção

Com a finalização da simulação de teste de carga distribuída, foi dado início a construção do protótipo físico da ponte projetada. Para seguir na íntegra a proposta, foi realizado a plotagem das vistas ortogonais da ponte na escala 1:1 (Figura 9)

Figura 9. Folha A0 com a ponte em escala 1:1.

Fonte: Próprio (2019)

As vistas foram empregues para segmentar os palitos das treliças e da torre nas dimensões necessárias e realizar a colagem. Para evitar que a cola danificasse o papel, uma camada de fita durex foi aplicada. Como o palito de bambu utilizado não possuía uma boa flexibilidade, foram utilizados para fazer os arcos vareta de bambu, unidas, formando um

diâmetro final de 4 mm, mas nos cabos de sustentação foram utilizados os palitos novamente (Figura 10), já que ambos neste projeto são componentes meramente estético para o protótipo.

Figura 10. Construção do protótipo físico.

Fonte: Próprio (2019)

Resultados e Discussão

A escala utilizada no comprimento da ponte 3D projetada é de 1:4000 em comparação com a ponte Akashi-Kaikyo existente. Assim, o comprimento total apresentado foi de, aproximadamente, 1000 mm. No tabuleiro a escala adotada foi de 1:250 (deixando-a com, aproximadamente, 14,2 mm de largura, 56 mm de altura e 57 mm de comprimento de um nó da treliça para o outro). A altura empregada nas duas torres foi de 500 mm e a distância entre elas foi de 240 mm. Nas fundações o diâmetro utilizado foi de 15mm.

O desenho em perspectiva do protótipo virtual feito no SW pode ser visualizado na Figura 5. A partir desse modelo 3D é possível gerar as projeções ortogonais, vistas em 2D, automaticamente no *SolidWorks*. Neles são feitos os detalhamentos das cotas para auxiliar na construção física do protótipo (Figura 11).

RECEIVED AT THE U.S. CUSTOMS AND BORDER PROTECTION, 10000 WILLOW CREEK, AUSTIN, TEXAS 78758-5001, U.S.A.

As simulações de carga distribuídas realizadas no ANSYS foram feitas com o intuito de verificar o peso máximo que o protótipo da ponte pode suportar sem romper. Os valores de tensões obtidos em cada uma das simulações foram comparados com a tensão de ruptura obtida nos testes de tração (64,67 MPa) dos palitos de bambu. Pelos resultados das simulações, o protótipo da ponte pode suportar cerca de 1000N (aproximadamente, 100 Kg), utilizando carga distribuída (Figura 12).

B: Simulação
 Direct Stress
 Type: Direct Stress
 Unit: Pa
 Time: 1
 04/06/2019 12:46

8,0608e6 Max

6,1394e6
 4,218e6
 2,2965e6
 3,7507e5
 -1,5464e6
 -3,4678e6
 -5,3893e6
 -7,3107e6
-9,2321e6 Min

0,000 0,350 0,700 (m)

Fonte: Próprio (2019)

Ponte Física

A construção do protótipo físico foi feita por partes utilizando os desenhos das vistas, tanto laterais, como frontais e superiores, para que pudéssemos ter uma espécie de molde, onde foram construídas as diversas partes de forma separada, para no final uni-las umas às outras e assim obtermos o tabuleiro, que são unidas as torres, que dão a vez para os cabos de sustentação, finalizando a construção.

Para construção da ponte foram utilizados 200 palitos de churrasco de madeira de bambu com diâmetro de 4 mm e comprimento de 300 mm. Para a união dos mesmos, foi usado, ao total, 2,5Kg de massa epóxi bicomponente. Nos arcos, foram utilizadas finas vareta de bambu devido sua flexibilidade.

A ponte construída seguiu o detalhamento das projeções ortogonais obtidas a partir do modelo 3D. Ao fim da construção a ponte ficou com ao total 100 cm de comprimento, 55 cm de altura e 15 cm de largura, se igualando ao modelo projetado. A massa final da ponte, foi de aproximadamente 3,3 Kg. Na Figura 13 é possível visualizar a lateral e a vista isométrica da ponte finalizada.

Figura 13. Vista lateral e isométrica da ponte construída.

Fonte: Próprio (2019)

Teste de carga

Foi realizado um teste de carga para saber se a construção da ponte estava compatível com o estabelecido em projeto e verificar a ocorrência de eventuais fenômenos resultante dos efeitos da tração e compressão ocasionada pela carga sobre a estrutura. Como previamente determinado durante as simulações, espera-se que a ponte suporte uma carga, no máximo, de 1000N distribuídos ao longo do tabuleiro.

Como não pretendesse testar a capacidade máxima da ponte, e sim verificar a ocorrência de flechas visível a olho nu ao longo da ponte e flambagem nos palitos situados nas torres, optou-se em colocar uma carga distribuída de 383 N (aproximadamente 39,04 Kg) no vão central do tabuleiro, zona mais afetada durante as simulações com cargas (Figura 12). Todavia, não houve alterações visíveis na ponte, o que leva a entender que ela é capaz a suportar uma carga maior na região e ao longo da ponte.

Para tal teste, foram utilizados dez tijolos (com massa média de 2,2 Kg) e dois bloquetes de cimento (massa média de 7,5 Kg) como corpo de prova, ilustrado na Figura 14. Esses materiais se tornaram mais viáveis ao teste por apresentar uma boa área de contato sobre a ponte, e possibilita o arranjo de modo empilhado, permitindo a injeção de carga de modo gradiente, facilitando o acompanhamento das reações na ponte.

Todos os corpos de prova utilizados tiveram suas massas determinada por uma balança digital portátil com precisão de 0,01 Kg no Laboratório de Mecânica Computacional. Nesse mesmo ambiente, foram realizado o teste no qual dois tijolos, na vertical, foram colocados na parte do tabuleiro central e acima deles foram sendo posicionados mais tijolos de modo a não tombar sobre os cabos de sustentação, até chegar aos bloquetes, como mostra a segunda imagem da Figura 14.

Figura 14. Corpos de provas, tijolos e bloquete de cimento, totalizando 39,04 Kg no teste de carga.

Fonte: Próprio (2019)

Conclusões

No presente projeto foi construído um protótipo físico baseado na ponte Akashi Kaikyo, utilizando cola epóxi e palitos de bambu. O protótipo consistiu no vão central da ponte (em

escala), onde a estrutura do tabuleiro foi alterada ao retirar a passarela de manutenção e substituí-la por uma fileira de treliça com o mesmo perfil das laterais. O arco e os cabos de sustentação foram mantidos, mas no projeto desenvolvido possuíam apenas fins estéticos e não estruturais.

A ponte construída possui 100 cm de comprimento, 55 cm de altura, 15 cm de largura e uma massa de aproximadamente 3,3 kg. Na simulação feita por meio do método de elementos finitos, a estrutura é capaz de suportar 1000N de carga distribuída em seu tabuleiro, sem sofrer danos estruturais. Já no teste de carga físico, utilizou-se tijolos e bloquetes de cimento, totalizando uma carga de 383 N. Os equipamentos majoritariamente utilizados foram concedidos pelo IFPE campus Recife.

A construção desse projeto possibilitou a aplicação de conhecimentos interdisciplinar obtidos até o momento, no curso superior de Engenharia mecânica. No desenvolvimento do croqui foi estimulado a criatividade e a aplicação dos conhecimentos adquiridos na disciplina de desenho técnico-ofertada no 1º período do curso. Para indicar as propriedades dos materiais utilizados, se fez necessário a utilização das disciplinas de Ensaios dos materiais - ofertada no 8º período - e Estatística-oferecida no 3º período. Na projeção do protótipo virtual, foram aplicadas as ferramentas das disciplinas de Desenho mecânico auxiliado por computador - 2º período do curso e Estática, 3º período. A simulação computacional, através de métodos de Elementos Finitos, explorou os conhecimentos da cadeira optativa Elementos Finitos, 7º período. Com relação a construção do protótipo físico explorou-se as cadeiras de Metrologia e Prática de Oficina, fornecidas respectivamente, no 4º e 6º período. Além das disciplinas mencionadas anteriormente, também foi colocado em prática os conhecimentos obtidos em Redação Técnica para a escrita do presente trabalho.

Pode-se concluir que o projeto proposto atingiu o objetivo de utilizar os conhecimentos adquiridos nas disciplinas do curso superior de Engenharia mecânica de forma contextualizada e interdisciplinar, introduzindo os estudantes nos desafios que encontrarão em suas futuras carreiras profissionais.

Referências

CIVILIZAÇÃO ENGENHEIRA. **Pontes: Conheça as 4 principais estruturas para a Engenharia Civil.** Disponível em: <<https://civilizacaoengenheira.wordpress.com/2018/02/23/pontes-conheca-as-4-principais-estruturas-para-a-engenharia-civil/>>. Acesso em: 13 maio. 2019.

ENGENHARIA PORTUGAL. **Tipos de Pontes.** Disponível em: <<http://www.engenhariapt.com/2013/04/12/tipos-de-pontes/>>. Acesso em: 23 abr. 2019.

IFPE. **Engenharia mecânica: PROJETO PEDAGÓGICO DO CURSO.** Recife, 2017.

IFSUL. **Ensaio de tração: NBR 5162.** Pelotas. Disponível em: <http://www2.pelotas.ifsul.edu.br/~adccg/lib/exe/fetch.php?media=mc_aula_03_-_ensaio_de_tracao.doc>. Acesso em: 23 abr. 2019.

KASHIMA, S. et al. Construction of Akashi Kaikyo bridge foundation. **IABSE symposium**, v. 79, p. 69–76, 1998.

KITAGAWA, M. Technology of the Akashi Kaikyo Bridge. **Structural Control and Health Monitoring**, v. 11, n. 2, p. 75–90, abr. 2004.

LEONHARDT, F. **Construções de concreto**, vol. 6: Princípios básicos da construção de pontes de concreto. Rio de Janeiro, Editora Interciencia, 1979.

LOCTITE. **DUREPOXI.** Disponível em: <<http://www.loctite-consumo.com.br/pt/produtos/durepoxi.html#!par-productdetails-panel>>. Acesso em: 30 maio. 2019.

MURAD, José Roberto de Lima. **As propriedades físicas , mecânicas e meso-estrutural do bambu Guadua weberbaueri do Acre.** 2007. 121 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

O PÓRTICO. **Os 6 tipos mais comuns de pontes.** Disponível em: <<http://o-portico.blogspot.com/2016/11/os-6-tipos-mais-comuns-de-pontes.html>>. Acesso em: 13 maio. 2019.

OLIVEIRA, J. E. F. DE; GUIMARÃES, P. B. **ANALYSIS SOFTWARE PARA DETECÇÃO DE OUTLIERS VERSÃO 1.0.** Disponível em: <<https://sites.google.com/site/analysisoutliers/>>. Acesso em: 21 maio. 2019.

PFEIL, Walter. **Pontes: Curso Básico.** Campus ed. 1983.

PFEIL, W. **Pontes em Concreto Armado.** Livros Técnico e Científico ed. 1979.

TOLERANCIAMENTO E METROLOGIA (Recife). **ACIC NORMALIDADE.** 2019. Disponível em: <<https://sites.google.com/site/acicnormalidade/sobre>>. Acesso em: 21 maio 2019.

YIM, W. T. The Bridge Engineering 2 Conference Akashi Bridge. **Proceedings of Bridge Engineering 2 Conference 2007**, n. April, p. 10, 2007.