

APRENDIZAGEM DE ESTRUTURAS TRELIÇADAS BASEADA EM COMPETIÇÃO DE PONTE DE MACARRÃO

Carlos Eduardo Angelo Stoco, du.stocco@gmail.com¹
Glenda de Melo Luz, glendaluz29@gmail.com¹
João Gabriel Dias Camilo, jgdiascamilo13@gmail.com¹
Laura Sofia de Andrade, laura.sofia.lsa@gmail.com¹
Daniel Moritz Cieslak, moritzdaniel23@gmail.com¹
Antonio Carlos Valdiero, antoniocvaldiero@gmail.com¹

¹UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Departamento de Engenharia Mecânica, Campus Universitario EMC-CTC, Bairro Trindade, Caixa-postal: 476, 88040-900 - Florianópolis, SC – Brasil

Resumo. O objetivo deste artigo é propor o uso de objetos educacionais na forma de uma competição com pontes treliçadas usando macarrão para o melhor entendimento dos conceitos fundamentais abordados em um curso de mecânica clássica. Partindo do princípio de que a educação de qualidade é um dos pilares do desenvolvimento sustentável, o estudante de engenharia que melhor compreender conceitos de análise estrutural, ao exercer sua profissão, estará mais apto para criar estruturas leves, com menos recursos materiais e preservação ambiental. Assim, propõe-se uma atividade prática como objeto educacional para desenvolver a competência criativa no projeto de estruturas treliçadas, resultando na construção de duas maquetes diferentes de pontes de macarrão com estudo de caso. Como resultado, além de uma compreensão mais profunda de estruturas treliçadas, conceitos e cálculos, espera-se a difusão destas ferramentas-didáticas no estudo comparativo de treliças e a sistematização metodológica deste experimento, que podem auxiliar e orientar futuros engenheiros no desenvolvimento de estruturas mais leves.

Palavras chave: Objetos educacionais. Análise estrutural. Estruturas treliçadas. Esforço normal

Abstract. The idea of this paper is to propose the use of educational objects in the form of a competition with spaghetti bridges for a better understanding of the basic concepts in a classical mechanics course. Based on the principle that quality education is one of the pillars of sustainable development, the engineering student who rightly understands the concepts of structural analysis when exercising his profession, will be capable to create structures with less material resources, preserving in this way the environment. Therefore, practical activity is proposed as an educational object to develop creative competence in the design of truss structures, resulting in the construction of two different types of spaghetti bridges with a case study. As a result, in addition to a deeper comprehension of truss structures, concepts, and calculations, the dissemination of these education tools is expected in the comparative study of trusses and the methodological systematization of this experiment, which can help and lead future engineers in the development of lighter structures.

Keywords: educational objects, structural analysis, truss structures, normal effort

1. INTRODUÇÃO

As competições acadêmicas baseadas na construção de estruturas do tipo pontes de macarrão são um dos mais comuns exemplos da aplicação da teoria de treliças. Algumas universidades e instituições de ensino promovem competições dessas estruturas. No Brasil, a Universidade Federal do Rio Grande do Sul foi a primeira a promover esta competição (Rockenbach, et al., 2013). Outros autores (Ortigara, 2016; De Lacerda Nóbrega et al., 2019) destacam que as competições de ponte de macarrão são mundialmente populares e importantes para a fixação da disciplina de Estática dos Corpos Rígidos e Resistência dos Materiais. Conforme (Silva, 2017), elas começaram nos Estados Unidos, Canadá e Hungria, sendo que a universidade canadense Okanagan College foi a primeira a realizar um evento internacional em 1983, o qual acontece até os dias de hoje (veja Fig. 1).



Figura 1. Concurso de Ponte de Macarrão na universidade Okanagan College (Global News, 2019)

Assim, o presente trabalho é fundamentado nessas competições, com o objetivo principal do estudo e da análise comportamental dos esforços normais submetidos nas estruturas treliçadas a partir da aplicação de cargas, além da validação experimental das teorias abordadas durante a concepção e construção das pontes. Permitindo, dessa forma, uma compreensão mais didática deste assunto fundamental para a formação de futuros engenheiros.

Além de possibilitar uma visão amplificada deste conteúdo formal, o experimento também assume papel na inserção dos alunos no âmbito da engenharia e sociedade, convergindo com o pensamento de Pereira Filho (2000), uma vez que o entendimento pleno dessa matéria é fundamental para a formação de qualidade dos estudantes de engenharia. É importante ressaltar a questão da evasão nos cursos de engenharia, especialmente nos primeiros semestres, abordado em Watanabe et al. (2010). Nesse sentido, a competição funciona como um incentivo à permanência no curso. A prática dessa ferramenta didática de experimentação, a qual inclui a concepção do projeto, a construção e a realização do ensaio destrutivo dessas estruturas treliçadas, proporciona aos estudantes a impressão e motivação de participar de um processo real, de forma a fomentar o entusiasmo dos jovens em pesquisar, inovar e desenvolver melhor a competência em projetar estruturas mais leves e resistentes. Diante desse contexto, a seção 2 apresenta a metodologia utilizada no desenvolvimento desse experimento, a seção 3 apresenta os resultados obtidos a partir de cálculos, e por fim, na seção 4 são apresentadas as conclusões do presente trabalho.

2. METODOLOGIA

Neste trabalho utiliza-se a metodologia proposta por Valdiero et al. (2011), ilustrada na Fig. 2, onde são elementos fundamentais a definição de desafios interdisciplinares e interturma para o desenvolvimento de objeto educacional. Esta metodologia é utilizada na aprendizagem de estruturas treliçadas baseada em competição de ponte de macarrão. Assim, foram desenvolvidos dois protótipos de pontes com estrutura treliçada feitas com macarrão espaguete. Nesse sentido, pretende-se estimular os estudantes de engenharia, desenvolvendo a criatividade, resolução de problemas e a busca por novos desafios.

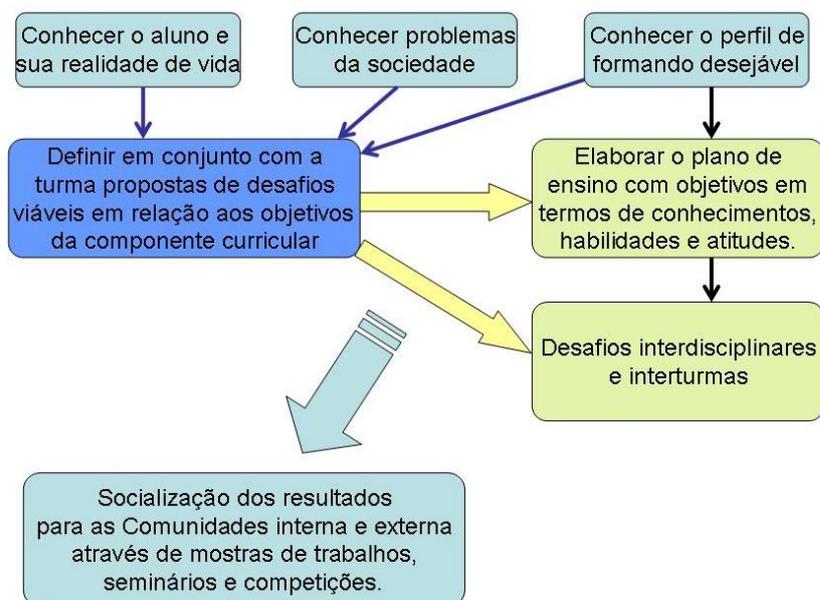


Figura 2. Diagrama esquemático da proposta de metodologia de ensino, em que a competição de ponte de macarrão é um desafio interdisciplinar (Valdiero et al., 2011)

Na fase de escolha, optou-se pela montagem de dois modelos clássicos de treliças, Howe e Pratt (veja Fig. 3), em forma de pontes de espaguete. Essas duas estruturas foram definidas para o experimento devido a sua grande semelhança aparente, como pode ser observada na figura abaixo, em que a diferença visual se dá pelo modo de disposição das barras diagonais centrais, no tipo Pratt elas são dispostas num formato “V”, convergindo para a parte inferior do nó central da treliça, de forma a terem a tendência de sofrer tração, e no tipo Howe, as barras são dispostas da forma oposta, tendo uma propensão a ser submetidas à compressão.

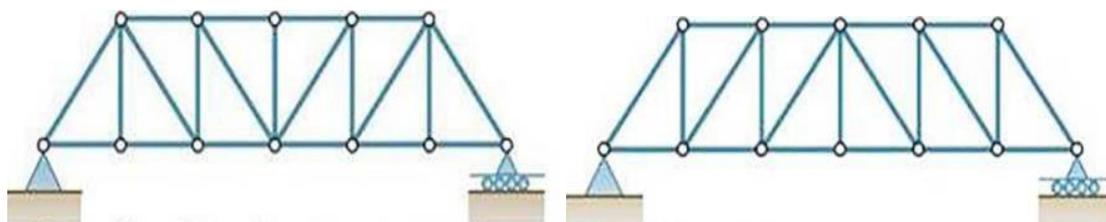


Figura 3. Desenho esquemático das treliças tipo Pratt e Howe, respectivamente (Farias et al., 2020)

Essa disposição afeta diretamente no tipo de esforço normal submetido em cada treliça, tornando mais interessante e entendível o modo em que as forças do tipo tração ou compressão em cada barra podem gerar consequências contrastantes na resistência e suporte máximo de carga em cada treliça. Diante desse cenário, surge uma problemática que precisa ser analisada: estruturas treliçadas são menos resistentes às forças de tração.

Na etapa de confecção e montagem das pontes, foi utilizado o mesmo tipo de macarrão, sendo cada barra composta por fios de espaguete, inclusive os contraventos. Estes são barras laterais explicadas detalhadamente no trabalho recente de Farias et al. (2020), que têm o objetivo de unir duas estruturas treliçadas planas. Como medidas das barras de ambas treliças, decidiu-se utilizar dimensões proporcionais ao Triângulo Pitagórico, sendo 8 centímetros as barras verticais, 6 centímetros barras horizontais e contraventos e 10 centímetros barras diagonais. Para a junção dos nós, utilizou-se dois tipos distintos de colas, divergências essas as quais acredita-se que foram decisivas no suporte de carga das treliças. No modelo Pratt, foi utilizada cola quente para unir as extremidades das barras sendo um material mais flexível que permite uma maior rotação nos nós. No modelo Howe foi utilizada cola tipo epóxi para união dos nós rotulados, mas por ser um material mais rígido dificultou a movimentação.

Como apoios das treliças, foram utilizados canetas e lápis. Para ambos os apoios, aplicou-se cola instantânea entre a caneta e a base da treliça. Porém, enquanto no apoio deslizante a caneta ficou livre, para o apoio fixo ou rotulado, no modelo Pratt foi aplicado um fio de cola quente na superfície para funcionar como uma barreira e evitar uma movimentação horizontal, no modelo Howe foram usadas camadas de papel coladas na superfície como barreira.

Tendo os protótipos em mãos, o próximo passo, a terceira fase, foi submetê-los a ações externas, visando testar os limites da estrutura. Para tanto, foi anexada uma sacola plástica no contravento do nó central de cada ponte. A carga

utilizada foi a água, visto que a densidade é conhecida. Assim, foi adicionado água gradativamente, de 100ml em 100ml, até que a primeira barra da estrutura quebre. Depois disso, os dados foram coletados e analisados de acordo com os métodos dos nós.

Na última etapa, foi realizada a análise estática das duas pontes treliçadas. Para isso, a fim de proporcionar uma compreensão mais didática dessa etapa, foi escolhida como sistema lógico dessa análise a metodologia didática esse método consiste em 5 passos, que envolvem a compreensão do problema, a elaboração do Diagrama de Corpo Livre (DCL) com a definição do sistema de coordenadas de referência, a aplicação das leis do equilíbrio estático juntamente com a análise dos resultados obtidos. A partir dos cálculos das reações externas e os esforços normais das barras de cada treliça a por meio do método dos nós (Meriam e Kraige, 2009), foi possível fazer uma comparação dos esforços normais submetidos em cada treliça e promover uma discussão da problemática abordada na fase de escolha dos tipos de treliças. Na seção 3 apresentam-se os resultados do trabalho.

3. RESULTADOS

Este capítulo tem o intuito de mostrar a parte teórica do experimento, por meio do cálculo das reações nos elementos das treliças. Utilizando a metodologia descrita anteriormente, faz-se a análise estática dos dois tipos de treliça conforme cada um dos passos descritos a seguir. Quando se trata de treliça, é importante mencionar que os nós são considerados apoios rotulados, ou seja, permitem apenas forças de solitação interna normais.

3.1. Compreensão do problema (1º. Passo)

Como anteriormente mencionado na metodologia, a problemática gira em torno de descobrir a força máxima aguentada por cada ponte. Para tanto, é necessário explicitar os detalhes de uma estrutura treliçada. Primeiramente, a treliça é formada por barras unidas por nós, geralmente no formato triangular (Meriam e Kraige, 2009). Como a estrutura precisa dilatar, conexões rebitadas, grandes parafusos, pinos ou até mesmo a soldagem constituem esses nós.

Ademais, um dos apoios da base é rotulado, com restrição de movimento no eixo x e y, mas livre para rotacionar no plano formado por estes eixos. Outro apoio é deslizante, apenas com restrição de movimento no eixo y. Ao garantir essas circunstâncias, temos condições de analisar uma estrutura estaticamente determinada.

3.2. Diagramas de Corpo Livre (DCL) (2º. Passo) e Definição do Sistema de Referência (3º. Passo)

Nessa etapa é feito o DCL, em que são ilustradas todas as forças externas e de reações atuantes sobre o corpo com o objetivo de possibilitar uma visualização mais didática do experimento. Como força externa há a carga aplicada sobre a treliça no nó central no ponto médio do contravento, representada por P_a . Já as reações externas nos apoios são identificadas como F_{ay} e F_{ax} no nó A, e F_{by} no nó B. Como origem do plano cartesiano foi escolhido o nó A em ambos diagramas.

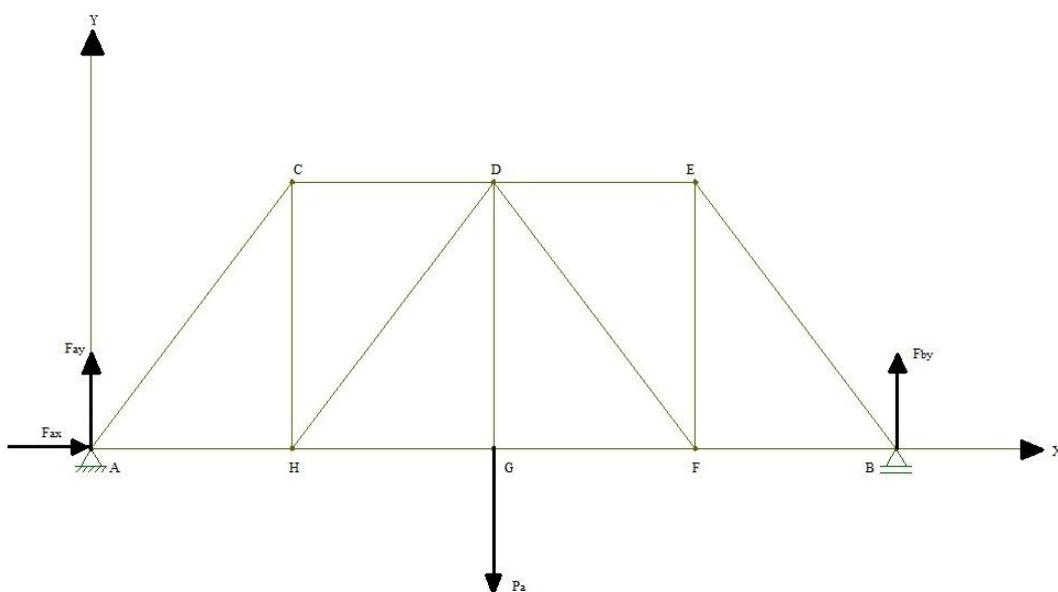


Figura 4. Diagrama de corpo livre da treliça Howe

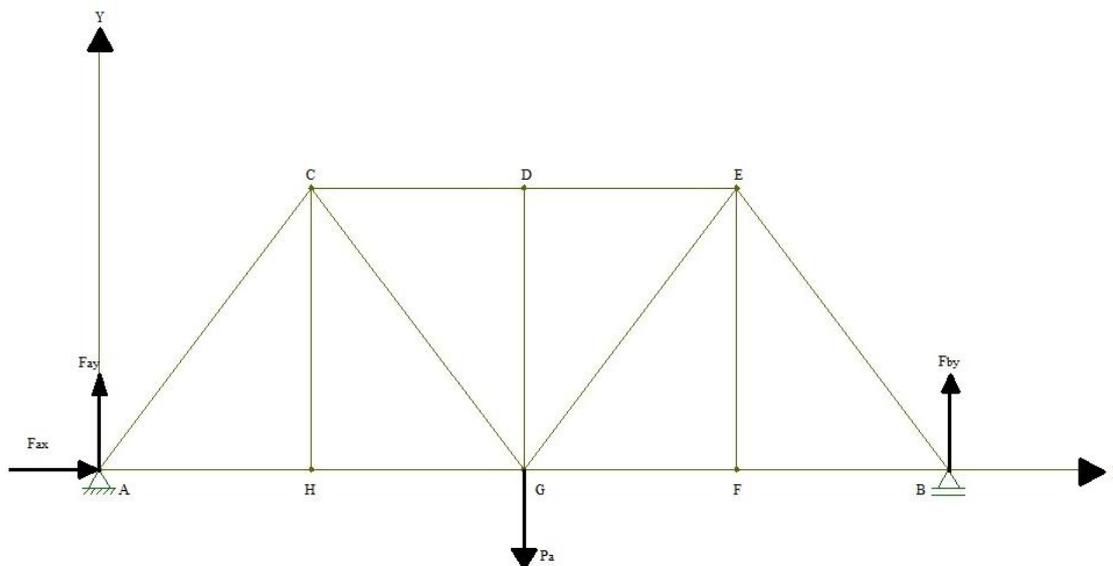


Figura 5. Diagrama de corpo livre da treliça tipo Pratt

3.3. Aplicação das leis do equilíbrio estático (4º. Passo) e análise dos resultados do ensaio (5º. Passo)

Como resultado da aplicação da Lei de Newton e a aplicação do método dos nós para a treliça tipo Howe, foram obtidas as seguintes relações:

$$F_{ax} = 0 \quad (1)$$

$$F_{ay} = F_{by} = F_{ch} = F_{ef} = \frac{P_a}{2} \quad (2)$$

$$F_{ac} = F_{dg} = F_{be} = F_{fd} = \frac{5P_a}{8} \quad (3)$$

$$F_{ah} = F_{bf} = F_{cd} = F_{ed} = \frac{3P_a}{8} \quad (4)$$

$$F_{hg} = F_{gf} = \frac{3P_a}{4} \quad (5)$$

$$F_{gd} = P_a \quad (6)$$

Em que P_a é a força de ação aplicada no contravento, que é dividida pelas duas estruturas treliçadas laterais. Assim, cada metade da carga é aplicada no nó localizado no meio da estrutura treliçada. No caso da treliça Howe, a carga total aferida no experimento foi 3.924N. Logo, cada treliça plana recebe no nó central 1.962N na iminência do colapso. F_{ay} e F_{ax} são forças de reação no apoio A. F_{by} é a força de reação no apoio B. Em relação ao tipo, F_{ac} , F_{cd} , F_{dg} , F_{be} , F_{ed} e F_{fd} são forças de compressão e F_{ah} , F_{ch} , F_{hg} , F_{gf} , F_{gd} , F_{bf} , F_{ef} são forças de tração. A Figura 7 foi gerada no software Ftool diversos autores (Veiga et al., 2020; De Oliveira et al., 2017) expressam a importância da utilização de softwares para o auxílio na análise estrutural e uma melhor visualização das forças internas nas barras e seus respectivos valores na treliça

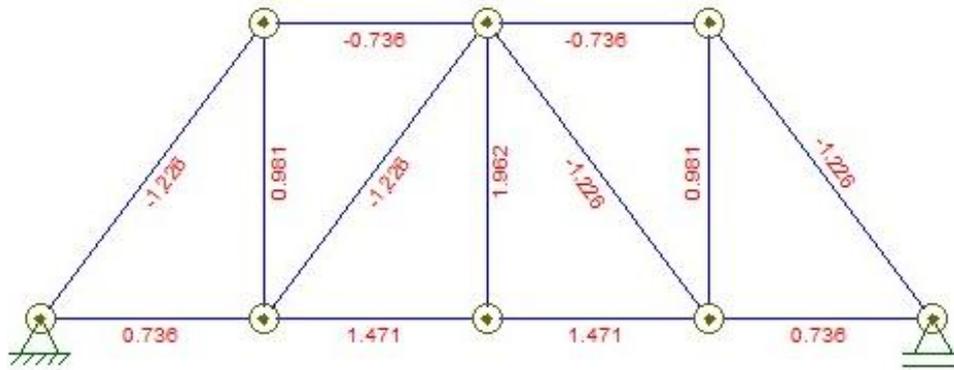


Figura 6. Análise do software Ftool da treliça tipo Howe. Sinal negativo indica compressão

Agora aplicando as leis de Newton e o método dos nós para a treliça tipo Pratt, obtêm-se as seguintes relações:

$$F_{ax} = F_{ch} = F_{dg} = F_{fe} = 0 \quad (7)$$

$$F_{ay} = F_{by} = \frac{P_a}{2} \quad (8)$$

$$F_{ac} = F_{cg} = F_{ge} = F_{be} = \frac{5P_a}{8} \quad (9)$$

$$F_{ah} = F_{hg} = F_{gf} = F_{bf} = \frac{3P_a}{8} \quad (10)$$

$$F_{cd} = F_{de} = \frac{3P_a}{4} \quad (11)$$

No experimento realizado na estrutura tipo Pratt (Fig.7), foi obtido 13.734 N como carga máxima total. Consequentemente, cada estrutura treliçada plana recebe 6.867 N no nó central. As considerações em relação a P_a , F_{ay} , F_{ax} e F_{by} são as mesmas em relação à análise anterior.

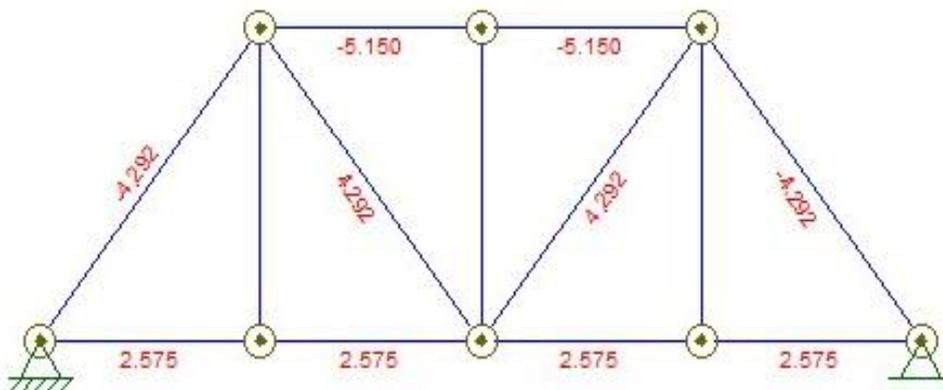


Figura 7. Análise do software Ftool da treliça tipo Pratt, sinal negativo indica compressão

Por meio dos dados obtidos com os cálculos, pode-se ter do que esperar do experimento prático e quais barras iriam estar sob maior força de tração e compressão. No caso da treliça tipo Howe (Fig.4), a barra DG estaria sob a maior força de tração e todas as barras diagonais estariam sob a mesma (e maior) força de compressão. No caso da treliça tipo Pratt (Fig. 5), as barras CG e GE estão sob a maior força de tração e as barras CD e DE estão sob a maior força de compressão.

Verifica-se que de acordo com os dados obtidos, que as barras sob maior tração foram as primeiras a quebrar (veja Fig. 8). No caso da treliça tipo Howe, observou-se que as barras DG, GH e FG, as que estavam submetidas a uma maior tração, realmente, foram as primeiras a quebrar. Já na treliça tipo Pratt, verificou-se que a barra CG foi a primeira a quebrar, sendo uma das barras com a maior tensão interna

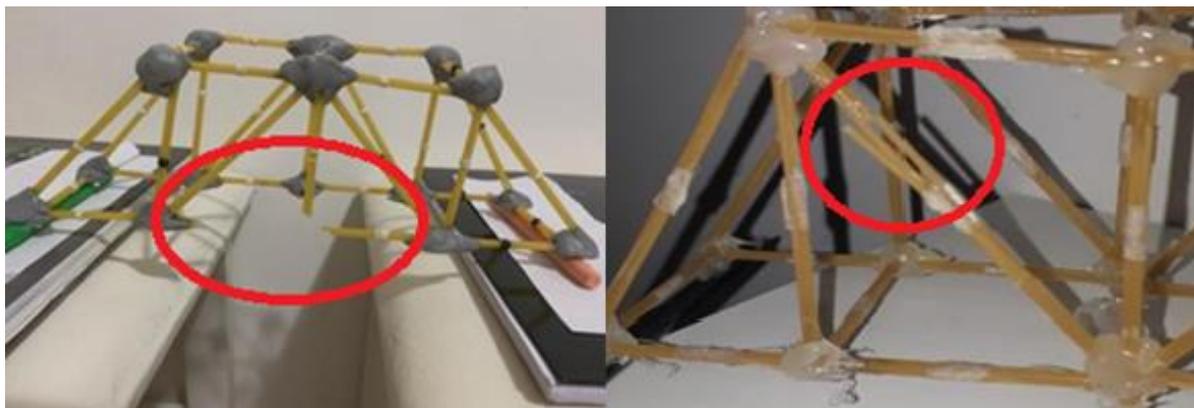


Figura 8. Fotografias ilustrando a ruptura das barras dos modelos Howe e Pratt no experimento (autoria própria)

4. CONCLUSÕES

Verificou-se que o modelo Pratt apontou resultados mais eficientes quanto à resistência do que o modelo Howe. Pôde-se perceber também, que a diferença no material que uniu as barras das treliças teve sua parcela de interferência nos resultados, visto que a cola quente permite uma maleabilidade sutil, necessária na estrutura, enquanto a cola epóxi torna a mesma mais rígida e inflexível. Já sobre os cálculos, observou-se que, como esperado, as barras sujeitas a maior força de tração foram as primeiras a romper. Além disso, também foi observado que existiam barras sem esforços internos, ou seja, essas barras poderiam ser retiradas da estrutura sem causar dano à ponte.

Em uma situação real, essa análise deixaria a estrutura mais leve e pouparia recursos ambientais em construções civis, contribuindo com o décimo primeiro objetivo de desenvolvimento sustentável, “Cidades e Comunidades Sustentáveis” (Rede Brasil do Pacto Global, 2020). Assim, relacionando os resultados obtidos em ambas as análises, podemos concluir que o experimento prático se aproximou muito dos resultados previstos na teoria. Contribui-se para a aprendizagem do tópico de Treliças na disciplina de Estática, lecionada em diversos cursos de Engenharia, pois a prática proposta contribuiu para o entendimento da teoria formando um todo único do saber. Outrossim, incentivou-se o uso de ferramentas computacionais para auxílio aos cálculos de engenharia.

5. AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio do Departamento de Engenharia Mecânica (EMC), da Universidade Federal de Santa Catarina – Brasil, nos projetos “Identificação da não linearidade de atrito para fins de inovação e projeto de máquinas inteligentes” (SIGPEX, no. 202002173) e “Desenvolvimento de Soluções Criativas com Controle Numérico” (SIGPEX, no. 202002437). Os autores são agradecidos, também, aos estudantes e integrantes do grupo de pesquisa por trás dos projetos citados e ao coordenador de projetos e professor orientador Antonio Carlos Valdiero, o qual também participou ativamente na construção do presente artigo.

6. REFERÊNCIAS

- De Lacerda Nóbrega, A, de Sousa Ferreira, A.L., Weibull, J.K. e de Carvalho, R.A. 2019. "Ponte de macarrão." *Revista Tecnológica da Universidade Santa Úrsula* 2.1: 17.
- De Oliveira, W.C. e da Silva, J.C, 2017. “Confecção de pontes de macarrão como apoio aos processos de ensino e de aprendizagem em engenharia”.*Revista Univap*, Vol. 22, n. 40, p. 391.
- Farias, R.B.D., de Jesus, V.L. e de Oliveira, A.L., 2020. “Uma maquete da estrutura em treliças simples triangulares para o ensino de estática”. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, Vol 42.
- Global News, 2019. “1-2 finish for brothers at Okanagan spaghetti bridge building contest”. 29 Jan. 2021 < <https://globalnews.ca/news/5014870/1-2-finish-for-brothers-at-okanagan-spaghetti-bridge-building-contest/>>.
- Meriam, J.L e Kraige, L.G, 2009. “Engineering mechanics: statics”, John Wiley & Sons, New York, 6ª edição.
- Ortigara, Y.V.B, 2016. “Competição Acadêmica-Pontes de Macarrão”.
- Pereira Filho, O., 2000. “Formação de engenheiros capazes de atuar como agentes transformadores”, *In Congresso brasileiro de ensino de engenharia*, Vol 28.
- Rede Brasil do Pacto Global, 2020. “Objetivos De Desenvolvimento Sustentável (ODS)”. 29 Jan. 2021 < <https://www.pactoglobal.org.br/ods> >.
- Rockenbach, D.T., Laguemann, C.H., Costa, M., Salvador, P., Tremarin, R.C., e Silveira, J.D.I., 2013. “Desafio de inovação tecnológica-ponte de espaguete”. *Anais do Salão de Ensino e de Extensão*, p. 391.

- Silva, R.A.F.D., 2017. “Avaliação da representatividade de modelos numéricos para análise do comportamento de pontes de espaguete”.
- Valdiero, A.C., Bortolaia, L.A. e Rasia, L.A, 2011. “Desenvolvimento de uma bancada didática para ensaio de pórticos como objeto educacional na engenharia. *In Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia COBENGE*.
- Veiga, J., de Alencar Carvalho, C.V. e Rodrigues, C.K, 2020. “Uma proposta pedagógica com o software FTOOL para apoio ao ensino da estática baseado na teoria dos registros de representação semiótica”. *Revista de Educação, Ciências e Matemática*, Vol. 10, n. 1.
- Watanabe, F.Y., Ogashawara, O., Montagnoli, A.N. e Rubert, J.B, 2010. “Desenvolvimento de Atividades de Projeto nas Disciplinas de Iniciação à Engenharia”. *Anais COBENGE*.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.