



EXPERIÊNCIAS TÁTEIS NO ENSINO DE SISTEMAS ESTRUTURAIS

DOI: 10.37702/2175-957X.COBENGE.2022.4103

Leila Cristina Meneghetti Valverdes - lmeneghetti@usp.br
Universidade de São Paulo

Ruy Marcelo de Oliveira Pauletti - pauletti@usp.br
Universidade de São Paulo

Luís Antônio Guimarães Bitencourt Júnior - luis.bitencourt@usp.br
Universidade de São Paulo

Resumo: Este artigo descreve uma experiência de 'aprender fazendo' realizada durante as disciplinas de Sistemas Estruturais da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo. O experimento teve como objetivo estimular as habilidades dos alunos em projeto, trabalho em equipe, comunicação e resolução de problemas. A atividade envolvia a passagem do projeto de um grupo de alunos para outro grupo por meio de documentação. O segundo grupo era responsável pela construção do modelo em escala de bancada, produzido a partir de canudos de papel conectados por pequenos parafusos, propiciando uma primeira experiência tátil do sistema projetado. Os modelos de bancada produzidos mostraram-se surpreendentemente leves e robustos, com alta qualidade de confecção e precisão dimensional. Os alunos relataram que, ao fazer esses modelos, entenderam como as forças fluem dentro de uma treliça espacial. Em seguida, uma das estruturas projetada foi selecionada para produção de um protótipo em escala relevante com mais de 800 barras e montado por um grupo de 130 alunos em apenas 4 horas. O protótipo expandiu a experiência, aproximando-a da complexidade de problemas reais de engenharia.

Palavras-chave: aprender fazendo, treliça espacial, ensino de engenharia, experiência tátil, sistemas estruturais



EXPERIÊNCIAS TÁTEIS NO ENSINO DE SISTEMAS ESTRUTURAIS

1 INTRODUÇÃO

Ensinar conceitos estruturais para estudantes de arquitetura ou engenharia na era digital comporta uma série de desafios. As novas gerações de estudantes estão mergulhadas no *metaverso*, característica que se reforçou durante o período de restrição às atividades presenciais imposto pela pandemia COVID-19. É de se supor que a experiência das novas gerações em relação à realidade física seja cada vez mais intermediada pelas diferentes camadas de abstração da era digital e do metaverso. O fenômeno de que toda a realidade esteja hoje recoberta por uma camada cibernética, a qual não é apenas uma representação, mas passa de certa forma a fazer parte da coisa representada, já havia sido previsto décadas atrás, por pesquisadores como Derrick de Kerckhove (1995). A tendência de experimentar a realidade de forma aumentada, no metaverso, parece inexorável e deverá ser reforçada nos próximos anos, trazendo possibilidades fascinantes nas formas de experimentar a realidade e intervir sobre ela. Porém, em termos de aprendizado, essa promessa também traz consigo o risco de se atrofiar a experiência tátil do universo físico. Esse dilema é notadamente crucial para o conhecimento das estruturas.

Classicamente, as estruturas eram ensinadas de forma teórica, para gerações de alunos para os quais a experiência tátil era predominante, num mundo pré-digital. Este estudante chegava ao estudo das estruturas com uma percepção tátil mais desenvolvida pelas suas vivências cotidianas, em comparação com os estudantes atuais. A preocupação do professor era mais voltada para teorizar sobre o comportamento dos sistemas estruturais, antes que propiciar uma experiência tátil dos mesmos. Por outro lado, nas novas gerações, cuja atenção se divide entre a realidade palpável e as diversas camadas do metaverso, é de bom alvitre que o ensino presencial procure explorar experiências táteis dos sistemas estruturais no universo físico.

As experiências táteis de ensino de estruturas não são de fato uma nova invenção, sendo um recurso tradicionalmente empregado nos cursos de estruturas para a Arquitetura.

Com efeito, os estudantes de arquitetura privilegiam um conhecimento intuitivo dos sistemas estruturais. Mario Salvadori (1958) acreditava que essa era a primeira grande dificuldade no processo de ensino das estruturas, tarefa usualmente delegada a engenheiros. Salvadori há mais de 50 anos, reconhecia que arquitetos e engenheiros não têm uma linguagem comum, uma vez que o engenheiro é mais analítico e propenso a uma representação matemática das estruturas, enquanto o arquiteto busca um entendimento mais intuitivo. Isso é verdade até hoje, e tem uma grande consequência quando um engenheiro aceita o desafio de ensinar estruturas para arquitetos. Contudo, atualmente o desafio de ensinar estruturas de forma mais intuitiva e tátil se amplia para os estudantes em geral, sejam eles dos cursos de engenharia ou de arquitetura, compensando a tendência atual à imersão no metaverso.

Emami e Buelow (2016) afirmam que o papel do engenheiro lecionando em uma Escola de Arquitetura é encontrar uma abordagem onde o conhecimento matemático sobre estruturas seja facilitado por meio de métodos intuitivos de aprendizado. Os diversos sistemas estruturais são tipicamente abordados pelos engenheiros dentro de um procedimento analítico, com uma base sólida de matemática, estática e resistência dos materiais. Não raro, muitos estudantes de arquitetura se afastam da matemática, mesmo



sabendo que a matemática é a ferramenta que fornece uma visão estrutural mais profunda. Além disso, a sequência clássica de apresentação das soluções estruturais pode representar a construção de conhecimento mais lógica, mas geralmente está divorciada dos processos de projeto, não auxiliando os princípios básicos da criação arquitetônica (CHIUNI, 2006).

Conforme apontado por Ilkovic *et al.* (2014), os conceitos estruturais devem fornecer ao estudante de arquitetura informações sobre a beleza da construção, como a construção se sustenta e como ela suporta a gravidade ou outras cargas. Além disso, um arquiteto deve sentir o que está acontecendo em uma estrutura sem precisar calculá-la exatamente. Isso, claro, é valioso também quando se ensina estruturas para estudantes de engenharia civil, *ça va sans dire*. Em diferentes áreas do conhecimento, muitos educadores acreditam que as aulas teóricas devem ser complementadas por outras atividades.

Entre outras estratégias, focamos nossa pesquisa de ensino em engenharia no *Learning by Doing*, definido por Tony Bates (2015) como um método de ensino que permite aos alunos testar hipóteses ou ver como conceitos, teorias, procedimentos realmente funcionam. No ensino de arquitetura, Vrontissi (2015) expressa que o modelo físico em particular, tem um lugar significativo no conjunto de ferramentas de ensino, não apenas como meio de (re)apresentação, mas como um meio indispensável capaz de desempenhar um duplo papel: retomar e reflexivo (análise) ou gerador e produtivo (síntese). Além disso, quando os alunos conseguem fazer um modelo físico, a observação dos efeitos do carregamento é imediata, ajudando a desenvolver a percepção do comportamento estrutural.

De fato, aprender fazendo é uma estratégia bem estabelecida nas artes e na Arquitetura, mas geralmente não tão favorecida por professores de estruturas. Em nosso contexto local, a estratégia tem sido ocasionalmente utilizada pelos autores em cursos de graduação e pós-graduação em engenharia civil e arquitetura da Universidade de São Paulo. Relatos sobre alguns predecessores do nosso experimento atual são fornecidos nas referências Pauletti e Chi (2004), Titotto, Pauletti e Deifeld (2005) Pauletti *et al.* (2017) e Bolelli *et al.* (2018). Um primeiro relato da experiência atual sem a fase de protótipo já foi apresentado em Meneghetti, Pauletti e Bitencourt Jr (2019). Atualmente, esse tipo de atividade prática tem sido adotado de forma mais explícita como metodologia de ensino pelos autores, após a criação do GISE, grupo focado na pesquisa de inovação de sistemas estruturais.

Até recentemente, as atividades auxiliares escolhidas pelos autores para exercitar conceitos sobre sistemas estruturais clássicos como treliças, cabos, arcos e pórticos eram em sua maioria simulações computadorizadas. Exemplos de estruturas típicas eram escolhidos pelos professores e a análise orientada no sentido de que os alunos pudessem compreender o comportamento estrutural sob diferentes pressupostos sobre materiais, seções, cargas e condições de apoio. Uma limitação associada a esta prática é que os estudantes de arquitetura às vezes precisam gastar muito tempo, primeiro para aprender a sintaxe dos programas de computador selecionados e depois para analisar os resultados, muitas vezes sem correlacionar os resultados dos modelos numéricos com a base teórica. O problema tornou-se mais perceptível nos últimos anos, talvez devido à chegada de uma nova geração de alunos, dotados de novas formas de raciocínio, às quais os docentes não se adaptam. Uma clara percepção de que os novos alunos de arquitetura estavam perdendo a motivação nas aulas de sistemas estruturais nos motivou a atualizar nossas aulas com novas atividades, que pudessem despertar novamente o interesse pelo estudo de sistemas estruturais.





Neste artigo, relatamos uma experiência acadêmica com forte ênfase na dimensão tátil aplicada ao projeto de treliças espaciais por meio do trabalho colaborativo, desenvolvida durante as disciplinas de Sistemas Estruturais oferecidas para o curso de graduação em Arquitetura e Urbanismo da FAUUSP. A experiência compreendeu a concepção (por meio de croquis e ferramentas de CAD) e produção de maquetes físicas com dimensões de bancada, a exibição dessas maquetes na FAUUSP e a construção de um protótipo em escala relevante, escolhido com base no bom desempenho estrutural da maquete e na simplicidade de projeto.

2 TRELIÇAS ESPACIAIS

As treliças espaciais são sistemas estruturais leves, empregados para cobrir grandes vãos. Tradicionalmente, geometrias regulares eram usadas para reduzir custos, usando membros e conexões padronizadas. Atualmente, com o advento das ferramentas de projeto paramétrico, BIM, roteadoras CNC e robôs, as treliças espaciais estão recebendo uma atenção renovada, pois a variação do comprimento das barras e as conexões feitas sob medida permitem produzir geometrias complexas, de forma livre e de dupla curvatura, sem custos adicionais proibitivos. É o caso, por exemplo, da treliça espacial utilizada para estruturar o revestimento altamente curvo do Heydar Aliyev Center (2013), projetado pelos arquitetos Zaha Hadid e Patrick Schumacher (Figura 1). No entanto, as conexões permanecem como componentes dispendiosos de treliças espaciais. Um sistema de conexão tradicional e de baixo custo é obtido simplesmente amassando as extremidades dos tubos metálicos, que são então conectados por parafusos. O método reduz significativamente a resistência geral e a estabilidade da estrutura, se comparado a outros tipos de conexões, mas os custos implícitos de material extra podem ser compensados pela redução dos custos de produção e mão de obra. Por mais precário que seja para estruturas reais, o sistema possibilita a fácil produção de modelos e protótipos, sendo portanto adotado na experiência acadêmica descrita neste trabalho.

Figura 1: Heydar Aliyev Center [créditos: (a) Iwan Baan, Dezeen ; (b) disponível e bwncy.com].



3 UMA EXPERIÊNCIA TÁTIL

A atividade foi dividida em três fases: (1) fase de projeto (2) fase de construção dos modelos de bancada e (3) fase de construção do protótipo em escala relevante.

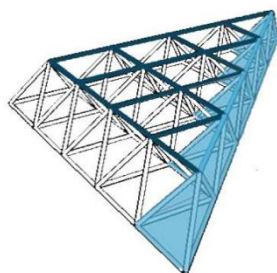
3.1 Fase 1: Projeto

Durante a fase de projeto, os alunos foram convidados a pesquisar sobre treliças espaciais típicas e referências arquitetônicas relevantes e projetar alguma estrutura atraente, como resposta a um partido arquitetônico escolhido livremente. As dimensões das estruturas reais também eram livres, mas o sistema deveria ser constituído por uma treliça com cerca de 100 módulos (por exemplo, uma grelha quadrada de 10x10), necessitando assim de várias centenas de barras. O projeto deveria considerar um modelo produzido com canudos de papel, com barras de cerca de 10cm de comprimento (obtidos cortando-se um canudo de papel típico ao meio). Assim, os modelos totais teriam cerca de 1m de largura. A classe era composta por cerca de 180 alunos, divididos em 19 grupos. Os grupos foram incentivados a produzir modelos que gerassem superfícies de curvatura simples ou dupla, tendo sempre em conta que uma geometria mais complexa iria requerer maior variabilidade das barras e maior complexidade de montagem. Ao final da fase de projeto, os grupos entregaram um relatório eletrônico, acompanhado de um pôster impresso, para serem exibidos e avaliados pelos pares. A avaliação deveria considerar a correção do projeto, a clareza e a estrutura lógica e as qualidades formais tanto do relatório quanto do pôster. Considerou-se inicialmente que a avaliação dos relatórios seria realizada pelos professores, e que os pôsteres receberiam notas tanto dos professores quanto de uma avaliação interpares envolvendo toda a classe. No entanto, alguns alunos argumentaram que não queriam competir entre si e, finalmente, a turma votou pelo cancelamento do processo de avaliação por pares, com a avaliação feita exclusivamente pelos professores.

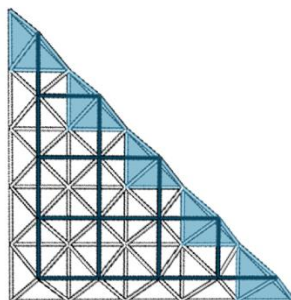
Os alunos do grupo 6 aproveitaram esta atividade para aprender modelagem paramétrica utilizando o componente Grasshopper do Rhino. A primeira forma estudada pelo grupo é mostrada na Figura 3. A configuração espacial desta forma foi projetada buscando a simetria no meio da estrutura. De acordo com a descrição do grupo, a proposta engloba dois espaços arquitetônicos que se lançam na paisagem envolvente. Dando continuidade à ideia, a treliça espacial foi composta por uma malha retangular com altura constante e membros de diferentes comprimentos.

Figura 1: Treliça espacial projetada pelo grupo 2

Projeção axonométrica de um
segmento



Vista superior



Vista 3D

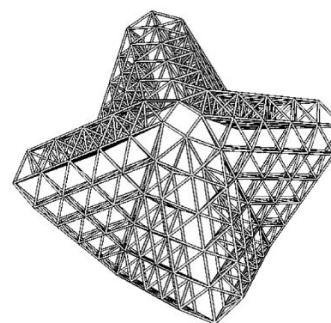


Figura 2: Primeiro estudo de forma do grupo 6

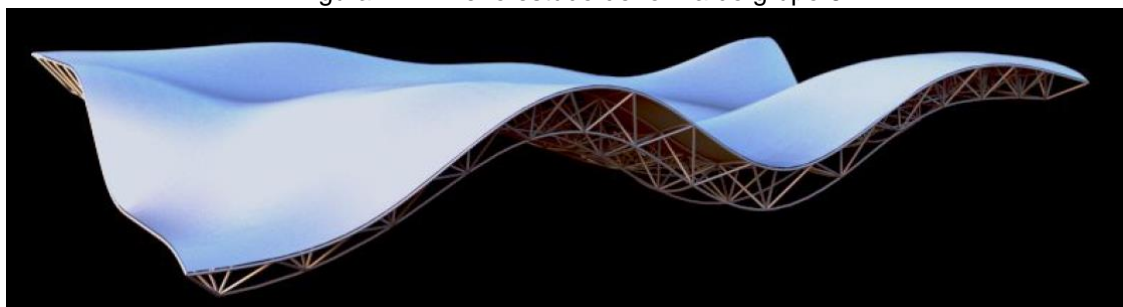
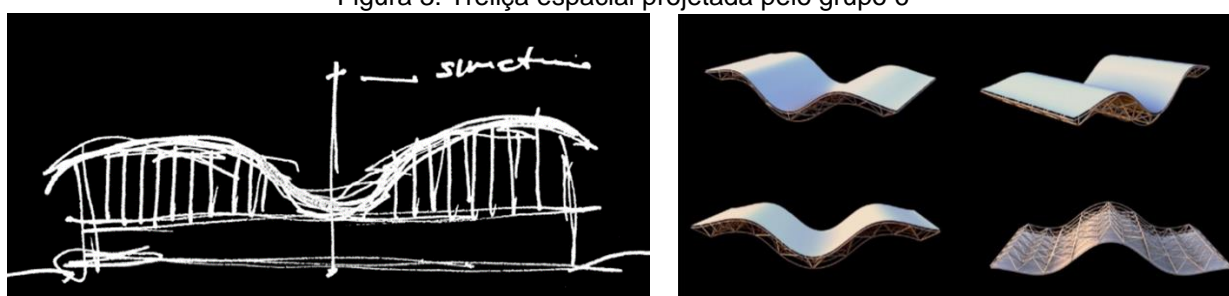
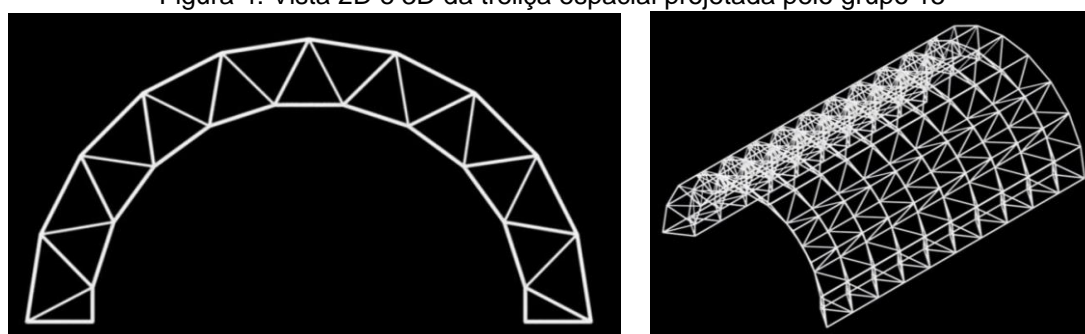


Figura 3: Treliça espacial projetada pelo grupo 6



Outra treliça espacial simples, mas estruturalmente eficiente, foi projetada pelo grupo 15. A estrutura foi composta por banzos circulares superiores e inferiores ligados por diagonais dispostas como pirâmides quadradas regulares e por travessas longitudinais, sendo que todas as barras possuíam o mesmo tamanho. O grupo relatou que escolheu esta forma modular devido à repetibilidade dos elementos e uma estética arquitetônica diferenciada.

Figura 4: Vista 2D e 3D da treliça espacial projetada pelo grupo 15



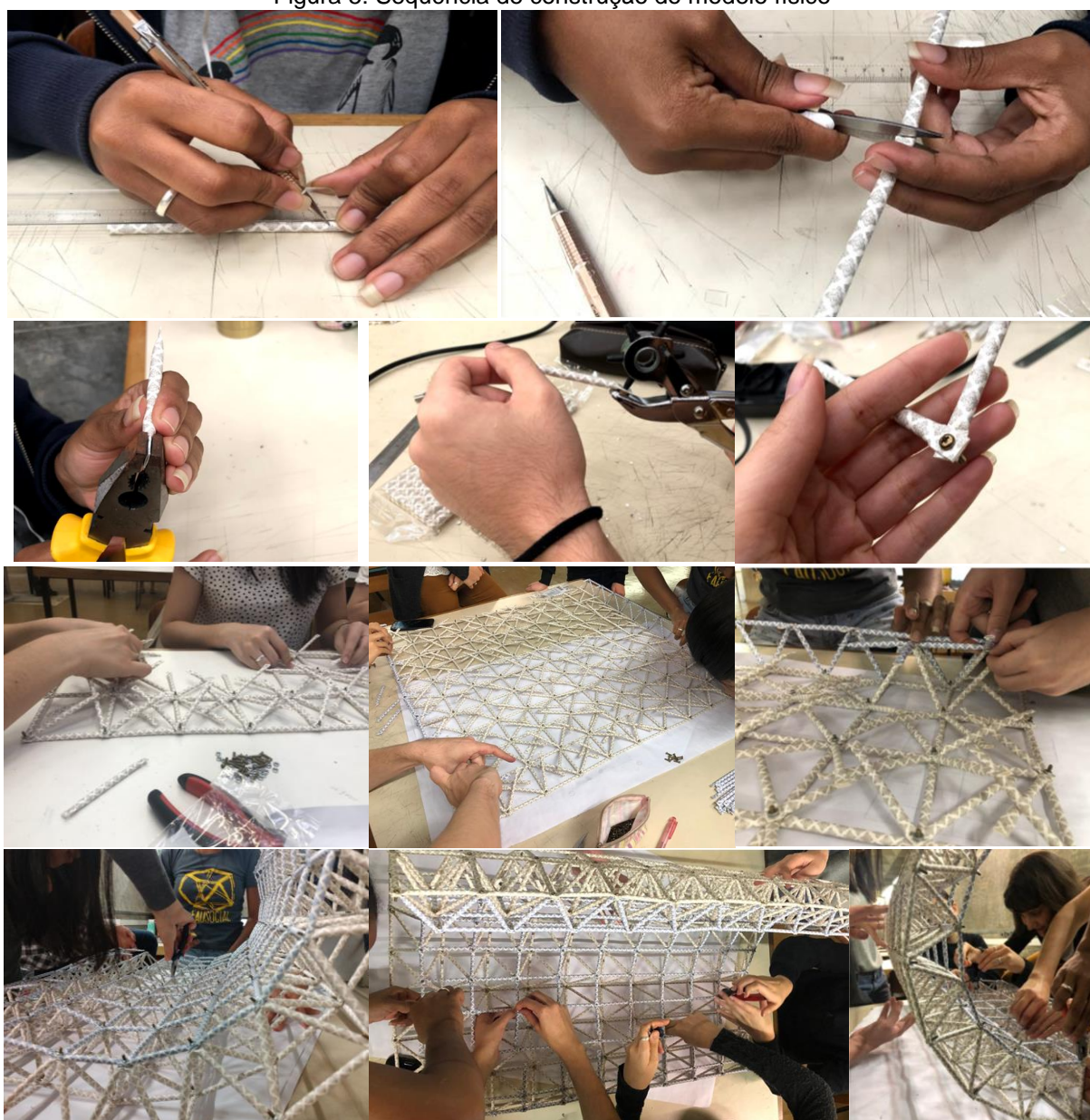
3.2 Fase 2: Construção dos modelos de bancada

Durante a fase de construção, cada grupo produziu um modelo físico, escolhido entre um dos projetos propostos pelos demais grupos. Portanto, cada grupo atuou tanto como construtor, para construir um projeto de um terceiro, quanto como cliente, cujos projetos foram construídos por algum outro construtor. A escolha dos projetos começou com um grupo indicado pelos professores, seguido pelo grupo cujo desenho foi escolhido. Em uma ocasião essa sequência foi encerrada e outro grupo foi designado para reiniciá-la. Os grupos executaram o projeto escolhido de acordo com suas especificações escritas,



algumas vezes propondo modificações, que deveriam ser aprovadas pelo grupo projetista. Os professores interviram em algumas divergências entre projetistas e construtores. Em alguns casos, os projetos foram simplificados pelos autores, a pedido dos construtores. Um grupo não conseguiu montar seu modelo e concluiu que o projeto original era muito complicado e estruturalmente instável. Os professores concederam tempo extra para o projetista e o construtor revisarem o projeto e, finalmente, um modelo satisfatório foi alcançado.

Figura 5: Sequência de construção do modelo físico



O material necessário (canudos de papel, parafusos, porcas e furadores de ilhós) foi fornecido pelo Departamento de Tecnologia da Construção da FAUUSP. Em alguns casos, foi necessário algum material adicional (como cordas ou ilhós de latão), adquiridos pelos próprios alunos.





A Figura 6 mostra a execução do projeto do grupo 15 pelo grupo 8. Processos semelhantes foram realizados para a produção da maioria dos modelos. Primeiramente os canudos de papel foram cortados de acordo com dimensões específicas. Em seguida, as extremidades dos elementos de canudos de papel foram amassadas e perfuradas, e as barras foram conectadas. Vale ressaltar que um modelo típico apresentava cerca de 800 membros de treliça e 220 nós. No início, muitos alunos eram refratários a realizar uma tarefa tão árdua, mas a maioria dos alunos se sentia recompensada com os resultados. A Figura 7 mostra alguns modelos físicos e grupos de alunos durante o dia da entrega.

Figura 6: Alguns grupos de construtores e seus modelos no dia da entrega.



3.3 Fase 3: Exibição dos modelos de bancada na FAUUSP

Como reconhecimento dos resultados alcançados, para sensibilizar e convidar novos alunos para as aulas de sistemas estruturais, os alunos envolvidos no experimento organizaram uma exposição dos seus modelos físicos no átrio da FAUUSP (Figura 8).

Figura 8: Exibição dos modelos na FAUUSP



3.4 Fase 4: Construção do protótipo em escala relevante

A treliça projetada pelo grupo 15, mostrada na Figura 5, foi escolhida para ser produzida em escala relevante devido ao fato de ser uma estrutura com apenas quatro comprimentos de barras diferentes. As barras eram constituídas de perfil tubular de aço com 25,4mm de diâmetro e 0,6mm de espessura. Os banzos da treliça, tanto os dos arcos como as longarinas foram produzidos a partir de tubos inteiros, com trechos amassados e perfurados, para compor os nós da treliça. As diagonais foram cortadas e tiveram suas extremidades amassadas e perfuradas. A união de todas as barras que convergem para um determinado nó foi feita por meio de um único parafuso. A Figura 9 mostra o quantitativo das barras por tipo de elemento e suas dimensões. A treliça completa era composta por 848 barras e deveria ser montada em apenas 4 horas por uma turma de cerca de 130 alunos. Se por um lado um grande número de alunos permitia a divisão de trabalho, por outro lado requeria um esforço de sincronização. As estratégias de montagem foram discutidas com o grupo em sala de aula e o resultado pode ser visto na Figura 10.

Previamente a execução do protótipo foi feita a montagem de apenas um arco que compõe a estrutura, com o intuito de testar a viabilidade e ganhar experiência. A viabilidade foi confirmada pelos alunos e professores, e o arco pode ser visto na Figura 11.

As irregularidades do terreno dificultaram a conexão das duas metades da treliça, o que levou a um certo atraso em relação as quatro horas de montagem previamente programadas. Em linhas gerais a tarefa atingiu os objetivos de propiciar à classe uma experiência de materialização, em escala relevante, de um sistema estrutural estudado durante o semestre, passando pelas principais fases de produção de uma estrutura, permitindo aos alunos atuar como projetista e construtores, com uma visão dos problemas típicos entre esses dois atores. A Figura 12 mostra alguns detalhes da montagem final do protótipo.

Figura 9: Quantitativo das barras para montagem do protótipo da treliça espacial

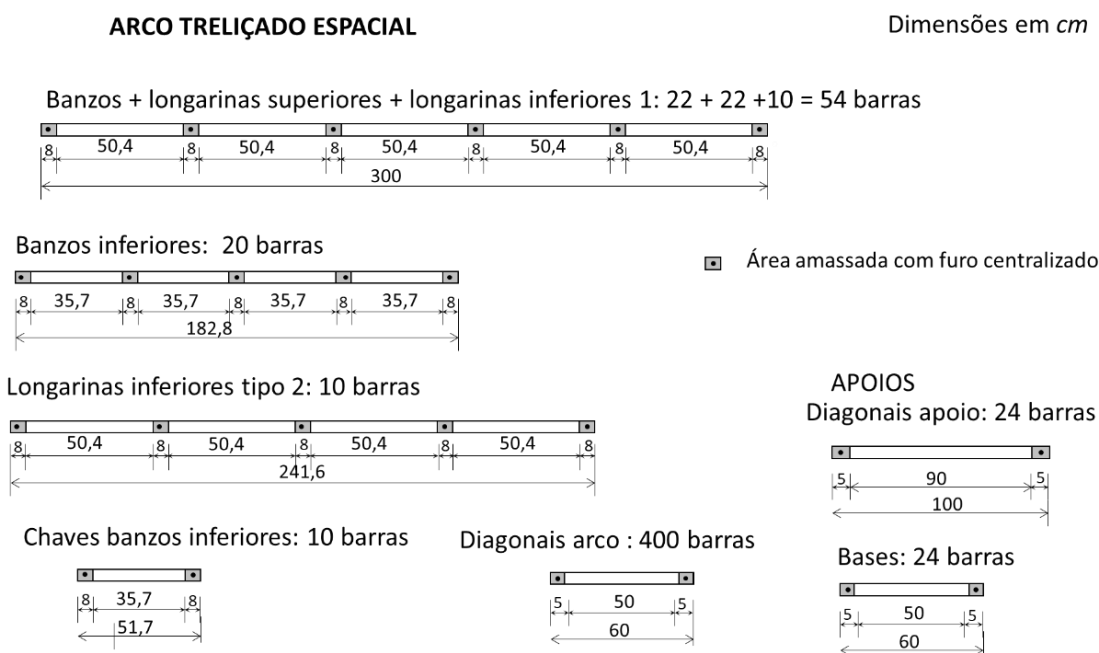


Figura 10: Planejamento em sala de aula da montagem do protótipo completo, a ser realizada por 11 grupos de alunos, em apenas 4 horas

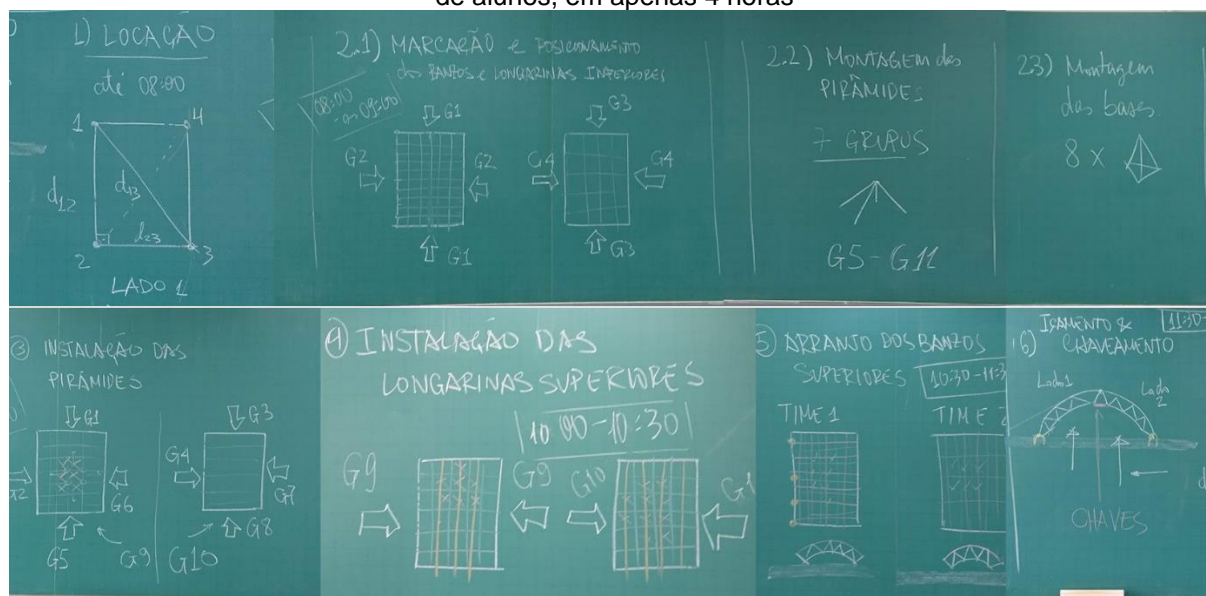


Figura 11: Montagem de um único arco, em preparação da montagem do protótipo completo

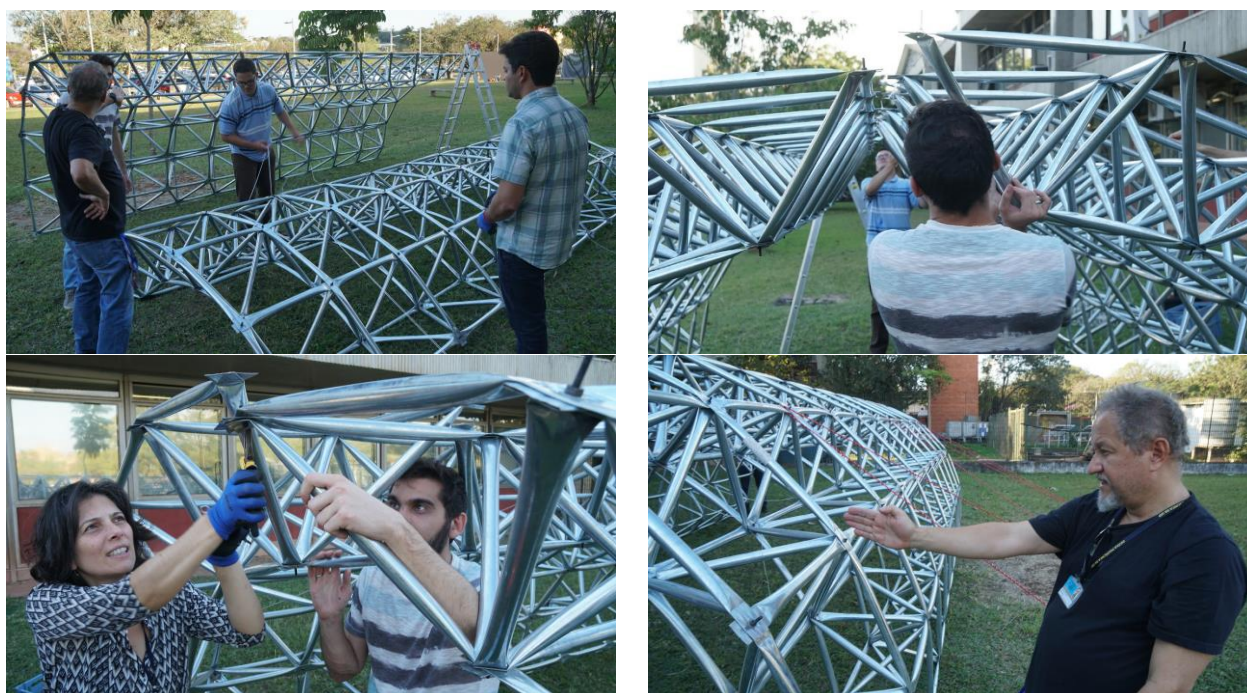


4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esse artigo lança a hipótese –ainda especulativa, mas merecedora de aprofundamento em futuras pesquisas–, de que a tendência de experimentar a realidade de forma aumentada deverá ser reforçada nos próximos anos, trazendo possibilidades fascinantes nas formas de experimentar a realidade e intervir sobre ela antecipadamente, tornando, porém, cada vez mais importante trazer para o ensino de engenharia oportunidades de experiência tátil do universo físico.

Para além da especulação, entendemos que esta experiência põe em relevo que o ensino eficaz requer criatividade e inovação. Não encontramos nenhuma regra rígida a ser seguida, mas algumas estratégias podem ajudar os professores a promover o pensamento crítico e a proatividade nos alunos. A modelagem física e a experimentação tátil revelam-se ferramentas para materializar os pensamentos e as dimensões mais abstratas de representação dos entes da engenharia, bem como instrumentos de aprendizagem de resolução de problemas. Acreditamos que a turma saiu do experimento com maior confiança e prontidão para estudar questões mais complexas.

Figura 12: Montagem final do protótipo



AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem às turmas de alunos de PEF2602 e PEF2603 envolvidas na nos diversos projetos e maquetes e na produção do protótipo escolhido. Também se reconhece o apoio do Departamento de Tecnologia da Construção (AUT) da FAUUSP para a aquisição do material de produção das maquetes e do Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica (PEF) da EPUSP para a produção do protótipo.

REFERÊNCIAS

BATES, Tony. **Teaching in a Digital Age: guidelines for designing teaching and learning**. Creative Commons Attribution – Non Comercial Internation License, 2015.

BOLELLI, Paula et al. Design and construction of a membrane-tensegrity sculpture, in **Proceedings** of the IASS Symposium 2018 - Creativity in Structural Design, July 16-20, 2018, MIT, Boston, USA.

CHIUNI, Michele. 'Less is more: a design-oriented approach to teaching structures in Architecture', in Building Technology Educators' Symposium, **Proceedings**, Maryland, USA, August 2006.

DE KERCKHOVE, Derrick. **The skin of culture: investigating the new electronic reality**. Kogan Page, London, 1988.

EMAMI, Niloufar; BUELOW, Peter. Teaching structures to architecture students through hands-on activities, Canadian International Conference on Advances in Education, Teaching & Technology, **Proceedings** of the EduTeach Annual Symposium 2016, Toronto, Canada, July 16-17, 2016.



ILKOVIC, Jàn; ILKIVICOVÁ L'ubica; SPACEK, Robert, **To think in architecture, to feel in structure: Teaching Structural Design in the Faculty of Architecture**, Global Journal of Engineering Education, vol. 16, pp. 59-65, 2014.

MENEGHETTI, Leila C.; PAULETTI, Ruy M.O.; BITENCOURT Jr., Luís A. G., An academic experiment on the design of spatial truss models and teamwork, in **Proceedings** of the IASS Annual Symposium 2019 – Structural Membranes 2019 -Form and Force 7 – 10 October 2019, Barcelona, Spain.

PAULETTI, Ruy Marcelo *et al.* A Minimal Surface Membrane Sculpture, in **Proceedings** of the IASS Annual Symposium – 'Interfaces: architecture. engineering. science', Sept. 25 - 28th, 2017, Hamburg, Germany.

PAULETTI, Ruy Marcelo, CHI, J.Y. Modelling and construction of the 'Dodecoid', an inflated, double-skin dodecahedron, in **Proceedings** of the IASS 2004 Symposium - Shell and Spatial Structures: from Models to Realization, Montpellier, 2004.

SALVADORI, Mario. **Teaching structures to Architects**, Journal of Architectural Education, vol. 13, pp. 5-8, 1958.

TITOTTO, Silvia L.M.C.; PAULETTI, Ruy Marcelo; DEIFELD, T. E.C. The Monument to the Futile Form II: Conception, Simulation and Realization of a Tensegrity-Membrane Structure, in **Proceedings** of the II Simposio Latinoamericano de Tensoestructuras, Caracas - Venezuela, May 4-5, 2005.

VRONTISSI, Maria. The physical model in structural studies within architecture education: paradigms of an analytic rationale? in Future Visions: **Proceedings** of the IASS Annual Symposium 2015, Amsterdam, The Netherlands, August 17-20, 2015.

HANDS-ON EXPERIENCE IN THE TEACHING OF STRUCTURAL SYSTEMS

Abstract: *This article describes a 'learning by doing' experience carried out during the Structural Systems courses at the Faculty of Architecture and Urbanism at the University of São Paulo. The experiment aimed to stimulate students' skills, related to design, teamwork, communication and problem-solving. The activity involved handing over the project from one group of students to another, through documentation. The second group was responsible for building a tabletop model produced from paper straws connected by small screws, providing a first tactile experience of the projected system. The tabletop models proved to be surprisingly light and robust, with high manufacturing quality and dimensional accuracy. Students reported that the production of these models helped to understand how forces flowed within a spatial truss. Afterwards, the class chose one model as a reference to produce a larger prototype, with more than 800 bars, assembled by a group of 130 students in just 4 hours. The construction of the prototype expanded not only the tactile experience of the structural system but brought it closer to the complexity of real engineering problems.*

Keywords: *learning by doing, spatial truss, engineering education, tactile experience, structural systems*

