



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E NATURAIS
CURSO BACHARELADO INTERDISCIPLINAR EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA

ELTON CAIO VIEIRA DE LIMA

**DESENVOLVIMENTO DE UM SIMULADOR DIDÁTICO PARA MODELAGEM E
ANÁLISE ESTRUTURAL DE PROTÓTIPOS DE PONTES TRELIÇADAS
UTILIZANDO THREE.JS**

PAU DOS FERROS

2026

ELTON CAIO VIEIRA DE LIMA

**DESENVOLVIMENTO DE UM SIMULADOR DIDÁTICO PARA MODELAGEM E
ANÁLISE ESTRUTURAL DE PROTÓTIPOS DE PONTES TRELIÇADAS
UTILIZANDO THREE.JS**

Monografia apresentada à Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia.

Orientador: Petrócio Ricardo Tavares de Medeiros, Prof. Dr.

Co-orientador: José Flávio Timoteo Júnior, Prof. Dr.

PAU DOS FERROS

2026

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

L732d Lima, Elton Caio Vieira de.
Desenvolvimento de um simulador de análise
estrutural tridimensional didático para a
modelagem de protótipos de pontes de elementos
treliçados com Three.js / Elton Caio Vieira de
Lima. - 2026.
42 f. : il.

Orientador: Petrucio Ricardo Tavares de
Medeiros.
Coorientador: José Flávio Timoteo Júnior.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Ciência e
Tecnologia, 2026.

1. Simulação. 2. Competição. 3. Pontes de palito
de picolé. 4. Método da rigidez. 5. Treliça. I.
Medeiros, Petrucio Ricardo Tavares de, orient.
II. Timoteo Júnior, José Flávio, co-orient. III.
Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade
com AACR2 e os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Biblioteca Campus Pau dos Ferros
Bibliotecária: Erlanda Maria Lopes da Silva
CRB: 15/966

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

ELTON CAIO VIEIRA DE LIMA

**DESENVOLVIMENTO DE UM SIMULADOR DE ANÁLISE
ESTRUTURAL TRIDIMENSIONAL DIDÁTICO PARA A MODELAGEM DE
PROTÓTIPOS DE PONTES DE ELEMENTOS TRELIÇADOS COM THREE.JS**

Monografia apresentada à Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia.

Defendida em: 06/07/2026.

BANCA EXAMINADORA

Petrúcio Ricardo Tavares de Medeiros, Prof. Dr. (UFERSA)
Presidente

José Flávio Timoteo Júnior, Prof. Dr. (UFERSA)
Membro Examinador

Kennedy Reurison Lopes, Prof. Dr. (UFERSA)
Membro Examinador

Adriana Correia de Moraes
Membro Examinador

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família, principalmente à minha mãe, Cosma, e ao meu pai, Eilzo, por todo o apoio, confiança e fé inabaláveis durante esses anos de faculdade.

Agradeço aos meus amigos e colegas, por todos os momentos de apoio e companheirismo durante a jornada.

Por fim, agradeço aos professores Petrócio e Flávio, pelo apoio, compreensão e cobrança durante a execução deste trabalho.

EPÍGRAFE

“A devoção de tantos se fez carne e sentiu dor.
Essa aflição chega ao fim.
Pois O Ícone cai, e com ele os desígnios e a
caprichosa vontade do Milagre.
E vós ascendereis em corpo e alma.
Atravessando reinos sonhados.
Até o mais alto dos lugares.
Berço de todas as bênçãos.
Sob o amparo de nossos olhares.
Onde ficareis plasmado na pintura da luz e do
tempo.
A Penitência acabou.”

Enrique Cabeza & Enrique Colinet,

Blasphemous II

RESUMO

A Competição de Pontes com Palitos de Picolé (CP3) da UFERSA integra conhecimentos teóricos e práticos de engenharia, contexto no qual o auxílio de ferramentas computacionais tornou-se indispensável para o planejamento e verificação eficiente dos modelos estruturais. No entanto, as soluções de *software* predominantes são frequentemente proprietárias, de alto custo e apresentam uma curva de aprendizagem acentuada, criando barreiras para estudantes iniciantes e evidenciando a escassez de ferramentas gratuitas específicas para este nicho. Diante desse cenário, este trabalho propõe o desenvolvimento de um *software* de simulação estrutural de código aberto (*open-source*), concebido com foco didático e visual para atender às demandas particulares da CP3, garantindo acessibilidade e precisão técnica. A metodologia baseia-se na implementação de uma arquitetura de *software* fundamentada em tecnologias *web*, utilizando a biblioteca gráfica Three.js para renderização e interação em tempo real, abrangendo desde a modelagem dos protótipos até a validação dos cálculos estruturais simulados. Adicionalmente, o estudo englobou uma etapa de validação prática caracterizada como pesquisa de levantamento, na qual aplicou-se um formulário estruturado aos discentes. Essa etapa permitiu avaliar a usabilidade, a interface e a eficácia didática do sistema a partir da experiência real dos usuários, consolidando a viabilidade da ferramenta como um recurso educacional complementar.

Palavras-chave: simulação; competição; pontes de palito de picolé; método da rigidez; treliça.

ABSTRACT

The Popsicle Stick Bridge Competition (CP3) at UFERSA integrates theoretical and practical engineering knowledge, a context in which the aid of computational tools has become indispensable for the efficient planning and verification of structural models. However, the predominant software solutions are often proprietary, costly, and present a steep learning curve, creating barriers for novice students and highlighting the scarcity of free tools specific to this niche. Given this scenario, this work proposes the development of an open-source structural simulation software, designed with a didactic and visual focus to meet the specific demands of CP3, ensuring both accessibility and technical accuracy. The methodology relies on the implementation of a web-based software architecture, utilizing the Three.js graphics library for real-time rendering and interaction, encompassing everything from prototype modeling to the validation of simulated structural calculations. Additionally, the study included a practical validation stage characterized as a survey, in which a structured questionnaire was administered to the students. This stage allowed for the evaluation of the system's usability, interface, and didactic effectiveness based on the actual experience of the users, consolidating the viability of the tool as a complementary educational resource.

Keywords: simulation; competition; popsicle stick bridges; stiffness method; truss.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	–	Exemplo de treliça de ponte.....	19
Figura 2	–	Matriz de Rigidez Local.....	22
Figura 3	–	Exemplo de treliça simples na simulação, com palitos em vermelho indicando força interna de compressão, e em azul indicando força interna de tração.....	26
Figura 4	–	Interface do menu principal da simulação.....	27
Figura 5	–	Interface do menu de contexto dos elementos da simulação.....	27
Figura 6	–	Diagrama básico de uso e interação do simulador.....	29
Figura 7	–	Interface geral do simulador.....	30

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1	–	Nível de experiência com simuladores estruturais dos participantes da pesquisa.....	31
Gráfico 2	–	Percentual de participação dos participantes da pesquisa em competições de palito de picolé.....	32
Gráfico 3	–	<i>Softwares</i> de simulação estrutural utilizados pelos participantes da pesquisa.....	32
Gráfico 4	–	Facilidade de entendimento dos participantes da pesquisa quanto à inserção de palitos no simulador.....	33
Gráfico 5	–	Facilidade de entendimento dos participantes da pesquisa quanto à rotação de palitos no simulador.....	33
Gráfico 6	–	Percentual de participantes da pesquisa que recorreram ao tutorial ou ajuda externa para utilizar o simulador.....	34
Gráfico 7	–	Tempo necessário para a montagem de uma ponte simples dos participantes da pesquisa.....	35
Gráfico 8	–	Satisfação dos participantes da pesquisa quanto à anexação de dois ou mais palitos na simulação.....	35
Gráfico 9	–	Satisfação dos participantes da pesquisa quanto à correção de posição ou rotação dos palitos na simulação.....	36
Gráfico 10	–	Satisfação dos participantes da pesquisa quanto ao <i>feedback</i> visual ao inserir palitos na simulação.....	37
Gráfico 11	–	Satisfação dos participantes da pesquisa quanto à clareza visual dos palitos após rotacioná-los.....	37
Gráfico 12	–	Satisfação dos participantes da pesquisa quanto à clareza visual dos palitos após anexação uns com os outros.....	38
Gráfico 13	–	Satisfação dos participantes da pesquisa quanto à confiabilidade do <i>software</i> na construção do protótipo físico da ponte.....	39
Gráfico 14	–	Satisfação dos participantes da pesquisa quanto ao uso em geral do <i>software</i>	39

Gráfico 15	–	Confiança dos participantes da pesquisa quanto ao uso do <i>software</i> para o projeto de pontes.....	40
Gráfico 16	–	Opinião dos participantes da pesquisa quanto à fidelidade do <i>software</i> em relação às restrições da competição.....	41
Gráfico 17	–	Opinião dos participantes da pesquisa quanto à completude ferramental do <i>software</i>	41

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CPP	Competição de Protótipos de Ponte
CP3	Competição de Pontes com Palito de Picolé
GPU	<i>Graphics Processing Unit</i>
API	<i>Application Programming Interface</i>
CAD	<i>Computer-Aided Design</i>
CAE	<i>Computer-Aided Engineering</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	16
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	18
2.1	Estruturas e resistência dos materiais.....	18
2.2	Modelagem estrutural com palitos de picolé.....	19
2.3	O Método da Rigidez.....	21
2.4	<i>Softwares</i> similares.....	23
3	METODOLOGIA	25
3.1	Tecnologias utilizadas.....	25
3.1.1	JavaScript.....	25
3.1.2	Three.js.....	26
3.1.3	HTML5 e CSS3.....	27
3.2	Análise estrutural do simulador.....	27
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	30
5	CONCLUSÃO.....	44
	REFERÊNCIAS	46

1 INTRODUÇÃO

Sediada no centro multidisciplinar de Pau dos Ferros, a Competição de Pontes com Palitos De Picolé (CP3) da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA) ocorre desde 2014, unindo professores e estudantes de diversos cursos das áreas de tecnologia e engenharia com o intuito de proporcionar a aplicabilidade de conhecimentos teóricos quanto a design, cálculo estrutural, resistência de materiais e análise de carga, além de estimular a criatividade e o trabalho em equipe. Dentre os critérios de avaliação da competição, estética e estimativa do valor de colapso são aqueles que mais se beneficiam de um planejamento de análise estrutural bem executado. Durante o processo de modelagem, as estruturas dos protótipos de pontes podem ser projetadas por métodos manuais bem estabelecidos como o método dos nós (Silva; N. Júnior, 2022) ou também com o auxílio de programas de computador.

Durante todas as etapas da CP3, aplicações computacionais, como o FTool, AutoCAD e o SketchUp, são utilizadas para auxiliar os processos de planejamento e execução dos protótipos das pontes (Silva; Sousa; Timóteo Júnior, 2024). Essas aplicações possibilitam aos grupos de participantes da competição desenvolverem seus próprios modelos de pontes ou verificarem modelos clássicos de forma rápida e interativa (Silva; N. Júnior, 2022). Entretanto, apesar da grande relevância do uso de programas de computador no âmbito da Competição de Pontes com Palito de Picolé, muitos dos programas mais utilizados atualmente são *softwares* proprietários (como o próprio AutoCAD ou SketchUp, por exemplo), que exigem licenças pagas para sua utilização. Além disso, é exigida uma curva de aprendizagem elevada para a utilização desses programas, no qual alunos iniciantes apresentam dificuldades para aprender as ferramentas desses programas (López; Ramos, 2021). A partir desses fatores, torna-se perceptível a ausência de iniciativas voltadas para o desenvolvimento de *softwares* designados especificamente para a CP3, em especial os de caráter didático e que sirvam como alternativas gratuitas para as aplicações pagas.

Propomos, portanto, neste trabalho, o desenvolvimento de um protótipo funcional de uma aplicação web designada para a simulação estrutural das pontes para a Competição de Pontes com Palitos de Picolé da Universidade Federal Rural do Semi-Árido, hospedado no site: <https://eltonlima01.github.io/tcc/>. A aplicação tem por objetivo abranger as principais etapas do processo de construção dos protótipos de pontes e, além de buscar coerência e precisão com os resultados das pontes de palito reais, a aplicação é concebida com foco didático e visual, visando facilitar o uso por estudantes e professores, mas também contará

com ferramentas para análises mais técnicas e detalhadas dos elementos estruturais simulados. Além disso, a aplicação será de código aberto (*open-source*), no qual o código fonte é disponibilizado para todos os participantes, podendo ser modificado por qualquer um deles (Warger, 2002). Dessa forma, não apenas a aplicação fica de uso gratuito, mas também pode evoluir e se adaptar pela própria comunidade acadêmica e profissional. Esse paradigma torna possível o desenvolvimento de *softwares* voltados especificamente para o ensino de engenharia, alinhados a demandas pedagógicas, como interfaces intuitivas, exemplos de usos direcionados ao contexto didático e integração com conteúdos já trabalhados em ambiente de aula.

O presente trabalho encontra-se estruturado da seguinte maneira: o Capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica necessária, abordando desde os princípios de análise estrutural e resistência dos materiais aplicados a treliças, até às especificidades da modelagem física com palitos e o estado da arte das ferramentas computacionais existentes. O Capítulo 3 descreve a metodologia adotada, detalhando a arquitetura do *software*, as tecnologias gráficas empregadas e o processo de implementação. No Capítulo 4, são apresentados os resultados obtidos, com ênfase na discussão dos dados recolhidos pelo questionário de usabilidade e na validação da aceitação tecnológica da ferramenta. Por fim, o Capítulo 5 traz as considerações finais, retomando os objetivos alcançados e sugerindo perspectivas para a continuidade e aprimoramento do *software* em trabalhos futuros.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo apresenta a fundamentação teórica necessária para a compreensão, modelagem e validação da aplicação computacional proposta. Detalham-se aqui os princípios fundamentais da análise estrutural e resistência dos materiais, as formulações matriciais do Método da Rigidez Direta, bem como as particularidades físicas das pontes de palitos e o estado da arte das soluções de software existentes no ensino de engenharia.

2.1 Estruturas e resistência dos materiais

No contexto de engenharia civil, define-se estrutura como um sistema de elementos conectados para suportar cargas ou solicitações impostas. Durante esse processo, a estrutura pode sofrer colapso ou deformações que podem comprometer sua funcionalidade. Nesse sentido, além da estética e funcionalidade, os engenheiros devem levar como fator crucial para o processo de projeto de estruturas a segurança do edifício (Hibbeler, 2013). Assim, a análise estrutural tem por objetivo, a partir de idealizações e técnicas de análise, garantir que uma edificação suporte cargas sobre ela impostas sem sofrer colapso ou deformações excessivas. Para o desenvolvimento de um simulador de protótipos de pontes, torna-se fundamental a compreensão dos conceitos de estática e mecânica dos materiais que regem o comportamento físico dessas estruturas.

A estática dedica-se ao estudo do equilíbrio de corpos, sendo este o princípio fundamental para a análise de qualquer estrutura que se pretenda imóvel. A condição de equilíbrio estático exige que a estrutura não sofra translação nem rotação sob a ação de forças externas. Matematicamente, isso implica que o somatório de todas as forças coplanares (F) e o somatório de todos os momentos (M) atuantes sobre o corpo devem ser nulos em relação a qualquer eixo de referência coordenado:

$$\Sigma F_x = 0$$

$$\Sigma F_y = 0$$

$$\Sigma M = 0$$

Segundo Hibbeler (2011), a força é a representação da ação de um corpo sobre o outro, podendo ocorrer por contato direto ou à distância. Já o momento é a grandeza que mensura a tendência dessa força em provocar a rotação do corpo ao redor de um ponto ou

eixo. Em uma análise escalar simplificada, a magnitude do momento é dada pelo produto da força pela distância perpendicular (d) até o ponto de giro, conhecido como braço de alavanca:

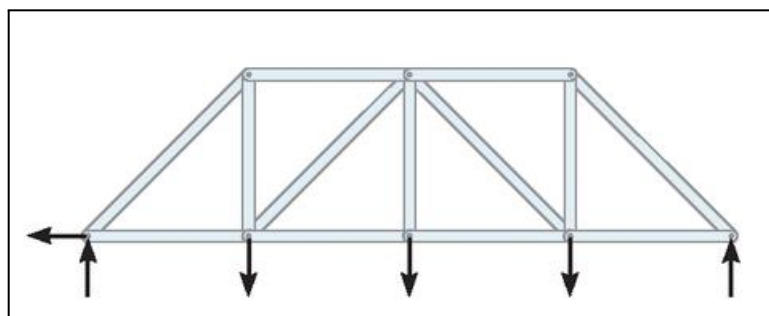
$$M = F \cdot d$$

A compreensão dessas grandezas é o ponto de partida para o estudo do comportamento estrutural. No contexto de pontes, as forças externas (como o peso de veículos ou o peso próprio da estrutura) são denominadas cargas. Quando aplicadas a um sistema estrutural organizado, como uma treliça, essas cargas geram esforços internos que tentam alterar a geometria das barras, provocando deformações. Quanto à resistência do material, essa deformação gera uma tensão interna e, caso essa tensão supere a capacidade resistente do material, ocorre a falha ou o colapso da estrutura.

2.2 Modelagem estrutural com palitos de picolé

Para suportar as solicitações mecânicas de forma eficiente e econômica, a engenharia recorre frequentemente a sistemas estruturais compostos, sendo as treliças uma das tipologias mais aplicadas na construção de pontes. Segundo Hibbeler (2011), uma treliça é uma estrutura formada pela união de elementos esbeltos conectados em suas extremidades por articulações (chamadas de nós), arranjados de modo a formar triângulos rígidos. Essa configuração geométrica não é aleatória; o triângulo é a única forma poligonal que não altera sua geometria quando submetida a forças em seus vértices, garantindo a estabilidade do conjunto.

Figura 1 – Exemplo de treliça de ponte



Fonte: Hibbeler (2017, p. 240).

O comportamento de uma treliça ilustra a interdependência direta entre as grandezas físicas fundamentais da análise estrutural. A função primária desse sistema é receber as cargas externas aplicadas nos nós e distribuí-las através das barras. Essa redistribuição gera esforços

internos que submetem o material a uma tensão, exigindo que ele resista a forças de tração ou compressão. Simultaneamente, sob a ação dessas forças, os elementos não permanecem rígidos, sofrendo deformações (alongamentos ou encurtamentos) que alteram sutilmente a geometria da estrutura. O projeto bem-sucedido é aquele que equilibra essas variáveis; caso contrário, se a tensão superar a resistência do material ou se a deformação levar à instabilidade geométrica, a estrutura atingirá o seu estado de colapso.

Aprofundando-se no modelo teórico, as treliças, foco principal da CP3, são frequentemente simplificadas para fins de cálculo. Hibbeler (2010) define que, em uma treliça ideal, as cargas são aplicadas apenas nos nós e as conexões são consideradas pinadas (livres de rotação). Essa idealização implica que as barras estão sujeitas puramente a forças axiais: tração ou compressão.

No entanto, para determinar se um palito de picolé irá falhar sob essas forças axiais, não basta conhecer a magnitude da força; é imperativo analisar a tensão, que é definida como a intensidade da força (F) distribuída por unidade de área (A), e sua tipologia depende da orientação da força em relação à superfície de análise. Quando a força atuante é perpendicular à área, é definida a tensão normal média (σ). Para uma força F_z normal à área, tem-se::

$$\sigma = \frac{F_z}{A}$$

E quando a força atuante é tangente à área, de maneira análoga à tensão normal média, teremos tensões de cisalhamento média τ_{zx} e τ_{zy} :

$$\tau_{zx} = \frac{F_x}{A}$$

$$\tau_{zy} = \frac{F_y}{A}$$

O colapso do material ocorre quando essas tensões ultrapassam o limite de resistência da madeira. Antes da ruptura, contudo, a estrutura sofre deformações. No regime elástico, a deformação específica (ϵ) relaciona-se linearmente com a tensão através do Módulo de Elasticidade (E) do material, conforme a Lei de Hooke:

$$\sigma = E \cdot \epsilon$$

$$\delta = \frac{P \cdot L}{A \cdot E}$$

onde δ representa o deslocamento ou alongamento total da barra. Essas equações constituem a base matemática que o *software* proposto neste trabalho utilizará para calcular e renderizar os deslocamentos visuais dos nós da ponte durante a simulação.

A utilização de materiais em escala reduzida para a representação de estruturas reais é uma prática consolidada no ensino de engenharia. A modelagem com palitos de picolé constitui um exercício complexo de compatibilização entre o modelo idealizado (cálculo teórico) e o modelo físico (comportamento real), sujeito às imperfeições dos materiais e da manufatura. Os palitos de picolé são, essencialmente, elementos de madeira de pequenas dimensões. Esse material apresenta anisotropia, ou seja, suas propriedades mecânicas variam dependendo da direção da carga em relação às fibras do material (Hibbeler, 2010).

Na teoria estrutural de treliças ideais, os nós são considerados pontos adimensionais e rotulados. Na prática da modelagem com palitos, os nós são regiões físicas de sobreposição de madeira unidas por colas do tipo epóxi. A eficiência da transmissão de carga entre os membros da ponte depende em grande parte da resistência ao cisalhamento da linha de cola. Essas competições de protótipos servem como laboratórios de ensaio destrutivo. Diferente de obras civis reais, onde o coeficiente de segurança garante que a estrutura dificilmente chegue ao colapso, na CP3 o objetivo é justamente prever e maximizar a carga de ruptura. Autores como Rodrigues-Silva e Junior (2022) destacam que o sucesso na competição não advém apenas da robustez, mas da otimização topológica: retirar material de onde ele não é necessário e reforçar os elementos críticos, uma competência que o uso de *softwares* simuladores visa aprimorar.

Contudo, para que a ferramenta computacional consiga prever com precisão essa distribuição de esforços e viabilizar a otimização de topologias complexas, as equações analíticas clássicas de equilíbrio mostram-se insuficientes. Faz-se necessária uma formulação matemática padronizada, capaz de relacionar simultaneamente a topologia, as propriedades dos materiais e as restrições de contorno em uma estrutura de dados processável por algoritmos.

2.3 O Método da Rigidez

Para que a ferramenta computacional consiga prever a distribuição de esforços e viabilizar a análise de treliças estruturais (frequentemente hiperestáticas), utiliza-se o Método da Rigidez. Segundo Hibbeler (2013), esse método fundamenta-se na determinação dos deslocamentos nodais desconhecidos da estrutura como passo principal. Diferentemente de métodos clássicos focados nas forças que exigem a escolha arbitrária de incógnitas redundantes, o método da rigidez é caracterizado por sua natureza padronizada e puramente matricial, o que o torna ideal para a implementação e resolução algorítmica em simuladores.

O princípio central dessa formulação exige a identificação prévia dos graus de liberdade cinemáticos do sistema. Em uma treliça plana idealizada, assume-se que cada nó possui a capacidade de se transladar em duas direções ortogonais e independentes (eixos X e Y). Por conseguinte, um nó isolado apresenta dois graus de liberdade. Em um panorama global, uma treliça composta por n nós possuirá $2n$ graus de liberdade antes da aplicação das restrições de apoio (Hibbeler, 2013). Como os elementos estruturais de uma ponte construída com palitos de picolé possuem inclinações variadas, faz-se necessário adotar dois sistemas de referências distintos: um sistema de coordenadas local, alinhado ao eixo longitudinal de cada barra para quantificar a rigidez axial (função da área A , do módulo de elasticidade E e do comprimento L), e um sistema de coordenadas global, que serve como referência única para toda a estrutura.

Para compatibilizar matematicamente esses sistemas, o método utiliza matrizes de transformação direcional. Hibbeler (2013) demonstra que, ao aplicar uma operação de transformação na matriz de rigidez local do elemento utilizando os seus cossenos diretores em relação aos eixos globais, obtém-se a matriz de rigidez global do elemento $\mathbf{k}$, que para uma barra de treliça bidimensional resulta em uma estrutura simétrica de dimensão 4×4 , como mostrado na figura 1, o qual λ_x e λ_y representam o cosseno dos ângulos diretores que o eixo da barra forma com os eixos globais de referência.

Figura 2 – Matriz de Rigidez Local

$$\mathbf{k} = \frac{AE}{L} \begin{bmatrix} N_x & N_y & F_x & F_y \\ \lambda_x^2 & \lambda_x \lambda_y & -\lambda_x^2 & -\lambda_x \lambda_y \\ \lambda_x \lambda_y & \lambda_y^2 & -\lambda_x \lambda_y & -\lambda_y^2 \\ -\lambda_x^2 & -\lambda_x \lambda_y & \lambda_x^2 & \lambda_x \lambda_y \\ -\lambda_x \lambda_y & -\lambda_y^2 & \lambda_x \lambda_y & \lambda_y^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ F_x \\ F_y \end{bmatrix}$$

Fonte: Hibbeler (2013, p. 407).

Todavia, do ponto de vista algorítmico e computacional, o cálculo direto de funções trigonométricas é custoso e suscetível a imprecisões de ponto flutuante. Por esse motivo, o método da rigidez obtém esses multiplicadores de maneira geométrica e exata, utilizando

apenas as variações das coordenadas cartesianas entre o nó inicial (N) e o nó final (F) de cada palito:

$$\lambda_x = \frac{x_F - x_N}{L}$$

$$\lambda_y = \frac{y_F - y_N}{L}$$

O termo λ_x quantifica a parcela de rigidez da barra que resiste a deslocamentos na direção horizontal, enquanto λ_y quantifica a parcela correspondente à direção vertical. As combinações desses termos (λ_x^2 , λ_y^2 , $\lambda_x \cdot \lambda_y$) alocam corretamente as parcelas de rigidez para os quatro graus de liberdade da barra.

A essência do Método da Rigidez Direta reside na etapa seguinte: a montagem da Matriz de Rigidez Global da estrutura, denotada por $\mathbf{K}$. Esse procedimento emprega o princípio da superposição, no qual os coeficientes individuais das matrizes de cada barra que convergem para um mesmo grau de liberdade (um mesmo nó) são somados algebricamente (Hibbeler, 2013). Essa agregação culmina no sistema de equações lineares que rege todo o equilíbrio elástico da ponte, sintetizado por:

$$\mathbf{Q} = \mathbf{K}\mathbf{D}$$

Contudo, para resolver o sistema e encontrar os deslocamentos desconhecidos, a matriz $\mathbf{K}$ precisa ser matematicamente invertível. Antes de vincular a treliça aos seus apoios, a matriz apresenta determinante nulo, pois a estrutura está instável e livre para sofrer movimentos de corpo rígido. Hibbeler (2013) elucida que a solução passa pela imposição das condições de contorno. Na prática computacional, isso se traduz em informar à matriz quais nós estão ancorados (fixos ou móveis), forçando um valor de deslocamento igual a zero ($\mathbf{D} = 0$) naquelas coordenadas. Ao aplicar essas restrições, a matriz perde sua singularidade e o algoritmo pode resolvê-la. Uma vez desvendado o vetor de deslocamentos globais $\mathbf{D}$, o *software* aplica a Lei de Hooke de forma retrospectiva em cada barra isolada para extrair os esforços finais de tração ou compressão e, por extensão teórica, prever os pontos críticos da estrutura.

2.4 Ferramentas computacionais para modelagem e análise estrutural

A inserção de tecnologias digitais no ensino de engenharia transformou a maneira como projetos são concebidos. No contexto de competições estudantis como a CP3, o uso de *softwares* divide-se predominantemente em duas categorias: ferramentas de Desenho Assistido por Computador (CAD, do inglês *Computer-Aided Design*), focadas na geometria e

estética, e ferramentas de Engenharia Assistida por Computador (CAE, do inglês *Computer-Aided Engineering*), focadas na análise física e estrutural.

Para a representação gráfica dos projetos, *softwares* como AutoCAD e SketchUp são as escolhas predominantes. O AutoCAD é um *software* da Autodesk, utilizado como padrão da indústria para desenho técnico 2D e 3D, já o SketchUp é um *software* de modelagem 3D da empresa Trimble. Segundo Silva, Cláwsio e Júnior (2024), essas ferramentas são essenciais para a elaboração das plantas baixas e para a visualização tridimensional dos protótipos, permitindo que os alunos planejem os cortes e a montagem dos palitos.

Para a previsão do comportamento físico, a referência acadêmica nacional é o Ftool (Two-dimensional Frame Analysis Tool). Desenvolvido pelo professor Luiz Martha na PUC-Rio, o Ftool é amplamente utilizado em cursos de Estática e Resistência dos Materiais devido à sua interface didática para a análise de pórticos e treliças planos. Apesar de sua excelência, o Ftool apresenta limitações específicas para o contexto da CP3, como limitação dimensional e abstração visual.

Existem *softwares* profissionais de análise por Elementos Finitos (FEM), como ANSYS ou SAP2000, que resolveriam as questões 3D com extrema precisão. No entanto, a complexidade operacional dessas ferramentas, que exigem configurações avançadas de malha, condições de contorno e propriedades de materiais, as torna inviáveis para o uso rápido e didático proposto em uma competição de graduação, além do fator impeditivo do custo de licenciamento.

3 METODOLOGIA

Este capítulo descreve os procedimentos adotados para a concepção, desenvolvimento e validação da ferramenta computacional proposta. Detalham-se aqui a classificação da pesquisa, as tecnologias e bibliotecas gráficas empregadas, bem como o modelo matemático e a arquitetura de *software* que sustentam a simulação.

Quanto à sua natureza, este trabalho classifica-se como uma pesquisa aplicada, pois objetiva gerar conhecimentos para aplicação prática, dirigidos à solução de problemas específicos: a carência de ferramentas didáticas gratuitas para a análise de estruturas em competições acadêmicas, mas do ponto de vista dos procedimentos técnicos, a pesquisa enquadra-se como experimental e de desenvolvimento tecnológico, por envolver a construção de um *software* simulador e a realização de testes contínuos para validar e aperfeiçoar seus algoritmos, cálculos e interface.

Adicionalmente, no que tange à etapa de validação prática, o trabalho engloba uma pesquisa de levantamento com abordagem quali-quantitativa. Para avaliar a usabilidade, a aplicabilidade didática e a aceitação da ferramenta, elaborou-se e aplicou-se um formulário estruturado direcionado aos discentes. Esse instrumento de coleta de dados permitiu confrontar o desempenho técnico do simulador com a percepção e a experiência real dos usuários finais, fornecendo o embasamento necessário para atestar a viabilidade do *software* como recurso educacional complementar.

3.1 Tecnologias utilizadas

A escolha do ecossistema tecnológico priorizou a portabilidade, a acessibilidade através do navegador e a gratuidade (licenças *open-source*), eliminando a necessidade de instalação de dependências ou compilação por parte do usuário final, alinhando-se à proposta de acessibilidade do projeto.

3.1.1 JavaScript

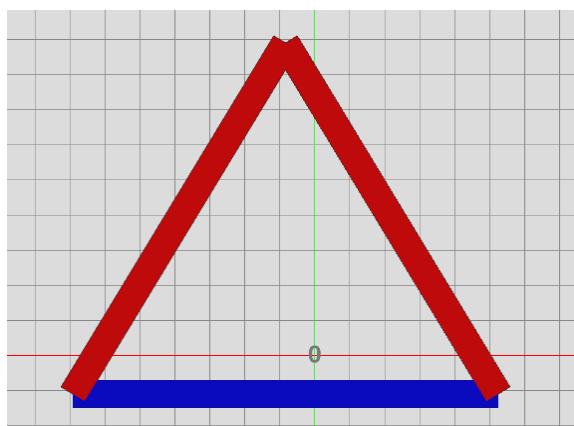
O núcleo lógico da aplicação foi desenvolvido utilizando a linguagem de programação JavaScript, no padrão ECMAScript 2020. A escolha justifica-se pelo fato de o JavaScript ser

uma das linguagens nativas da web, permitindo a execução de algoritmos complexos diretamente no lado do cliente.

3.1.2 Three.js

Para a renderização gráfica tridimensional, utilizou-se a biblioteca Three.js, uma camada de abstração de alto nível sobre a API (do inglês *Application Programming Interface*) gráfica WebGL (*Web Graphics Library*). O WebGL permite que aplicações web utilizem diretamente a Unidade de Processamento Gráfico (GPU, do inglês *Graphics Processing Unit*) do dispositivo por meio do navegador, dispensando a instalação de plugins ou componentes adicionais. No entanto, a programação em WebGL puro exige o gerenciamento manual de *shaders*, matrizes de projeção e *buffers* de vértices, conceitos fundamentais da computação gráfica, o que tornaria o desenvolvimento da aplicação excessivamente verboso e complexo. A adoção do Three.js resolve essa barreira técnica ao gerenciar internamente o Grafo de Cena (*Scene Graph*), o laço de renderização (*render loop*) e as transformações matriciais de projeção e visualização. No simulador desenvolvido, cada elemento estrutural (palito) é instanciado como uma entidade gráfica composta por uma geometria paralelepípeda e um material que responde dinamicamente a estímulos visuais, como o mapeamento de cores para representar tensões internas, como mostrado na Figura 1.

Figura 3 – Exemplo de treliça simples na simulação, com palitos em vermelho indicando força interna de compressão, e em azul indicando força interna de tração

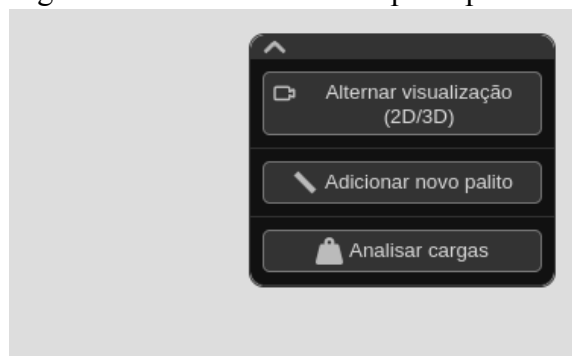


Fonte: Autoria própria (2026).

3.1.3 HTML5 e CSS3

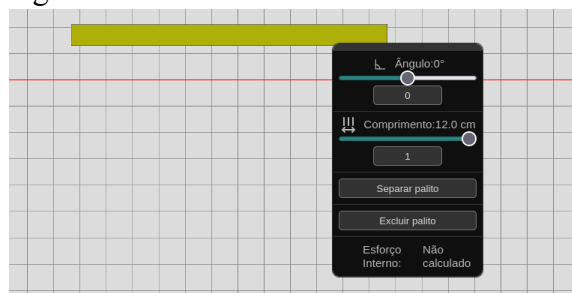
Em substituição aos *frameworks* de interface gráfica, a arquitetura visual e os menus de controle do simulador foram desenvolvidos utilizando HTML5 e CSS3 puros, no qual os elementos de controle (Figuras 2 e 3) comunicam-se com as classes lógicas do motor físico via eventos JavaScript (*Event Listeners*). Essa abordagem garante uma interface extremamente leve e responsiva, integrada nativamente à árvore do DOM (*Document Object Model*) do navegador.

Figura 4 – Interface do menu principal da simulação



Fonte: Autoria própria (2026).

Figura 5 – Interface do menu de contexto dos elementos da simulação



Fonte: Autoria própria (2026).

3.2 Análise estrutural do simulador

A análise estrutural de treliças adotada baseia-se no Método da Rigidez, um procedimento matricial onde o comportamento global da estrutura é governado por um sistema de equações lineares algebricamente definido por:

$$Q = KD$$

Onde $\mathbf{K}$ representa a Matriz de Rigidez Global da estrutura, $\mathbf{D}$ o vetor de deslocamentos nodais desconhecidos e $\mathbf{Q}$ o vetor de forças externas aplicadas (incluindo o próprio peso calculado).

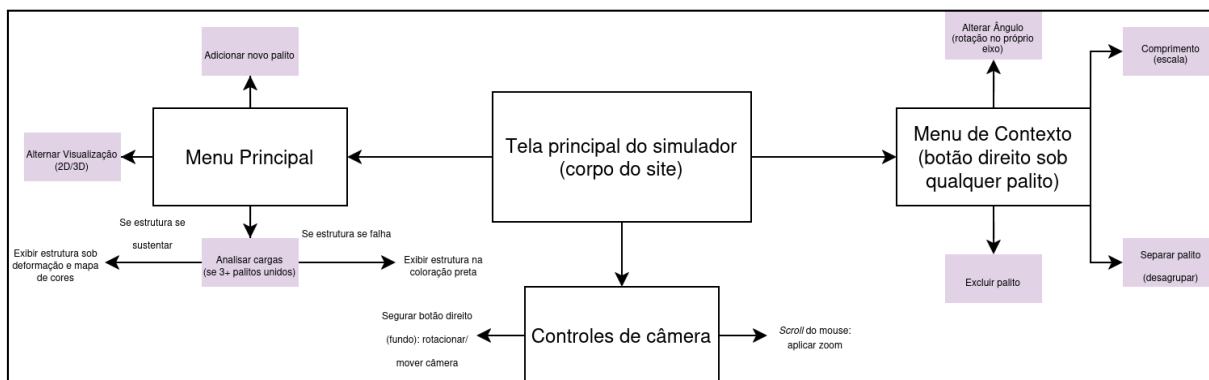
Para traduzir esse modelo matemático para um algoritmo computacional eficiente, o projeto adota a biblioteca *ml-matrix*, especializada em álgebra linear de alta performance para JavaScript. A tradução do método físico para o ambiente computacional ocorre em três estágios fundamentais dentro da classe *PhysicsEngine*, desenvolvida especificamente para este simulador:

1. **Montagem da Matriz Global ($\mathbf{K}$):** A aplicação percorre cada elemento (palito) do agrupamento, calcula sua matriz de rigidez local com base no módulo de elasticidade e área (EA) e no comprimento atual (L), e mapeia esses coeficientes para as posições correspondentes na matriz global K de dimensão $2N \times 2N$, onde N é o número total de nós.
2. **Aplicação das Condições de Contorno:** Os apoios (nós de primeiro e segundo gênero) restringem os graus de liberdade da estrutura. Computacionalmente, essa restrição é imposta por uma função utilitária (*_restrainDOF*) que zera a linha correspondente ao movimento impedido no vetor $\mathbf{Q}$ e na matriz K , inserindo o valor 1.0 na diagonal principal da matriz. Esse artifício força o sistema linear a reconhecer que o deslocamento naquele ponto é nulo, sem a necessidade de reduzir ou rotacionar a matriz rigidamente, preservando os índices dos nós.
3. **Resolução Numérica Otimizada:** Em vez de utilizar uma eliminação de Gauss convencional, o sistema delega o cálculo à função *solve* da *ml-matrix*. A biblioteca utiliza o método de Decomposição LU, fatorando a matriz K em uma matriz triangular inferior (L) e outra superior (U). Esse processo isola o vetor de deslocamentos $\mathbf{D}$ de forma altamente otimizada.

A integração com a *ml-matrix* permite que, uma vez obtido o vetor de deslocamentos ($\mathbf{D}$), o *software* calcule retrospectivamente a deformação de cada barra e, consequentemente, o esforço interno de tração ou compressão atuante. Caso o usuário desenhe uma estrutura hipostática (instável), a biblioteca detecta imediatamente a singularidade da matriz e interrompe o cálculo de forma segura, garantindo a robustez do simulador pedagógico.

Para ilustrar como as tecnologias e a modelagem matemática discutidas anteriormente se traduzem na experiência prática do discente, a Figura 4 apresenta o diagrama de usabilidade básica da aplicação.

Figura 6 – Diagrama básico de uso e interação do simulador



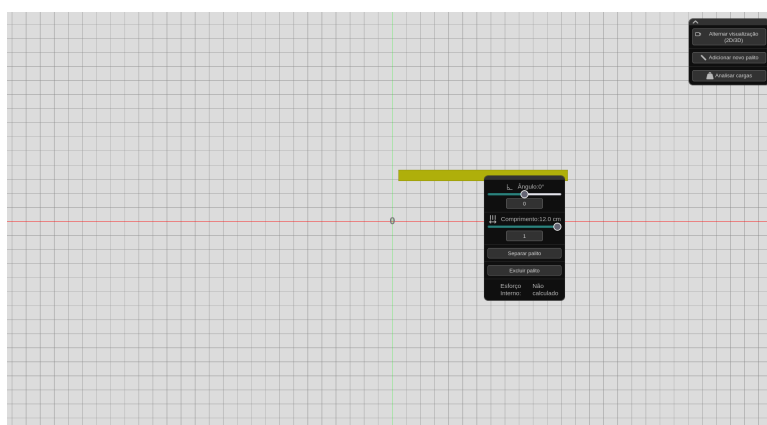
Fonte: Autoria própria (2026).

A estrutura organiza-se em três ramificações operacionais distintas a partir da tela principal da aplicação. A primeira gerencia os controles básicos de câmera no espaço tridimensional (rotação e *zoom* por comandos de mouse), garantindo a flexibilidade na visualização espacial da ponte. A segunda ramificação concentra os parâmetros globais dispostos no menu principal, abrangendo a alternância de projeção (2D/3D), a inserção de novos palitos e o gatilho para a análise de cargas; este último executa uma condicional lógica baseada no Método da Rigidez que determina se a treliça possui os requisitos mínimos de estabilidade para exibir o mapa de deformação ou se deve interromper o cálculo, sinalizando a falha estrutural ao tornar todos os elementos pretos. Por fim, a terceira ramificação delimita o menu de contexto individual do palito, acessível por meio de clique secundário diretamente sobre o elemento estrutural, permitindo a edição local de parâmetros geométricos como ângulo axial, comprimento escalar, além das rotinas de separação grupal e exclusão física da barra.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O desenvolvimento do protótipo funcional do simulador estrutural foi concluído com êxito, resultando em uma aplicação web interativa que integra com sucesso o motor de cálculo matricial baseado no Método da Rigidez à renderização gráfica tridimensional. O *software* foi estruturado para operar diretamente no navegador, sem a necessidade de instalações complexas, oferecendo um ambiente de modelagem fluido, responsivo e adaptado às regras geométricas da competição. A interface geral do sistema desenvolvido, que destaca as ferramentas de manipulação e o canvas de visualização 3D, é apresentada na Figura 7.

Figura 7 – Interface geral do simulador



Fonte: Autoria própria (2026).

Concluído o protótipo funcional do simulador estrutural, foi conduzida uma atividade de validação de caráter prático. O objetivo principal dessa etapa foi avaliar a usabilidade da interface gráfica e a robustez do motor físico do simulador perante usuários com diferentes níveis de familiaridade com conceitos de engenharia estrutural e computação. A atividade contou com uma pequena amostra de 10 alunos de graduação pertencentes a quatro cursos distintos: Ciência e Tecnologia, Tecnologia da Informação, Arquitetura e Urbanismo, e Engenharia da Computação. Essa diversidade de perfis permitiu colher percepções tanto de estudantes ambientados com a lógica de desenvolvimento de *software* e computação gráfica quanto daqueles focados na concepção espacial, estética e nos princípios fundamentais de resistência dos materiais e mecânica das estruturas.

O procedimento prático consistiu em duas etapas sequenciais. Na primeira fase, os voluntários foram instruídos a interagir livremente com o sistema, executando uma tarefa padronizada: a modelagem e a simulação de uma estrutura de treliça simples no ambiente

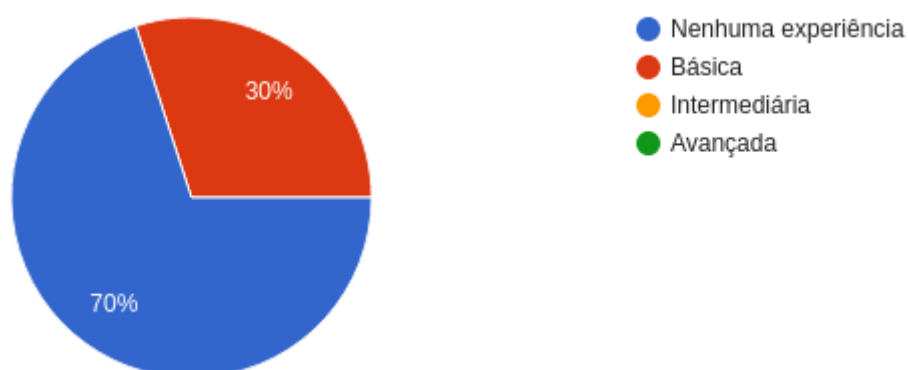
tridimensional do *software*. Essa etapa permitiu que os alunos experimentassem os recursos de inserção de nós, conexão de palitos, aplicação de cargas nodais, definição de restrições de apoio e a visualização dinâmica do mapeamento de cores referente às tensões internas geradas. Imediatamente após a conclusão da atividade de modelagem, os participantes responderam a um questionário estruturado de avaliação. O formulário foi elaborado para quantificar e qualificar a experiência do usuário sob diferentes prismas, abordando aspectos como a intuitividade dos comandos, a clareza da renderização gráfica e o potencial pedagógico da simulação visual.

A coleta de dados foi composta pelas seguintes indagações e critérios de análise, divididas em 6 categorias:

1. Perfil do Usuário

- Qual é seu nível de experiência com simuladores estruturais?

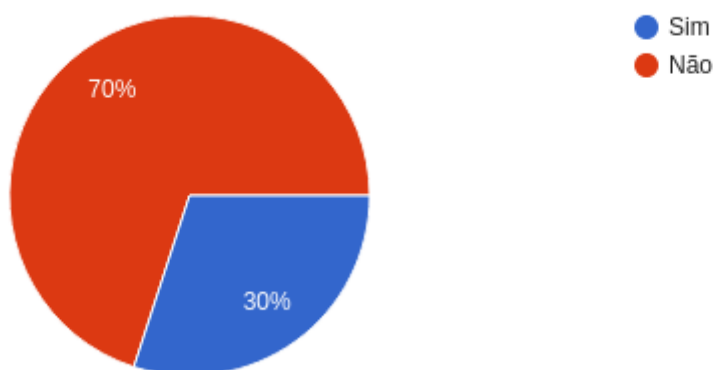
Gráfico 1 – Nível de experiência com simuladores estruturais dos participantes da pesquisa



Fonte: Autoria própria (2026).

- **Você já participou de competições de pontes de palito de picolé?**

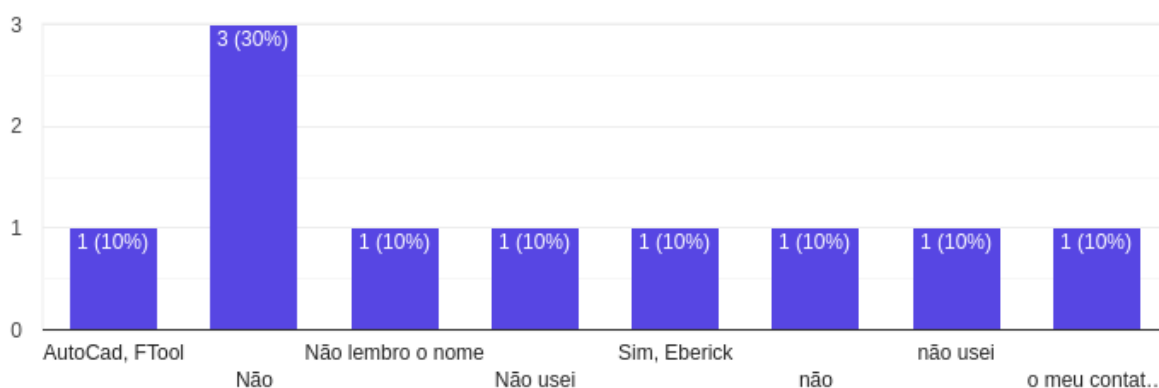
Gráfico 2 – Percentual de participação dos participantes da pesquisa em competições de palito de picolé



Fonte: Autoria própria (2026).

- **Você já utilizou algum *software* de simulação estrutural anteriormente? Se sim, qual?**

Gráfico 3 – *Softwares* de simulação estrutural utilizados pelos participantes da pesquisa



Fonte: Autoria própria (2026).

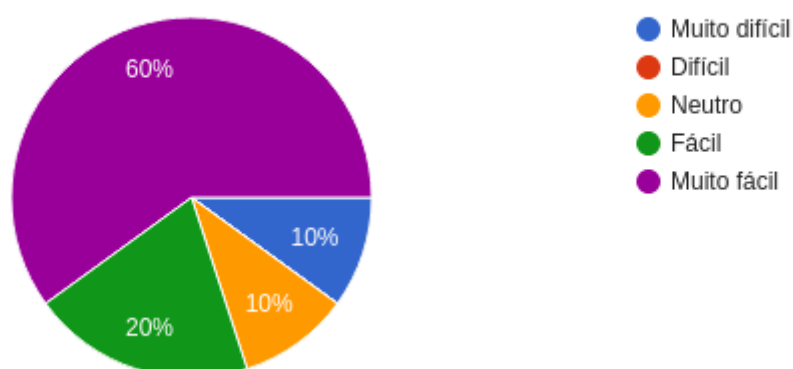
A leitura conjunta dos Gráficos 1, 2 e 3 revela uma simetria perfeita no perfil amostral: os 70% dos usuários que se declararam leigos em *softwares* de simulação correspondem exatamente à parcela que nunca participou da competição de pontes. Simultaneamente, a minoria com experiência prévia (30%) relatou uso de programas de mercado (como AutoCAD, FTool e Eberick). Essa configuração corrobora a validade do teste,

pois permitiu avaliar a intuitividade do sistema sob a ótica primária do aluno ingressante, o principal público-alvo da ferramenta didática desenvolvida.

2. Facilidade de Aprendizado

- Foi fácil entender como adicionar um palito de picolé no simulador?

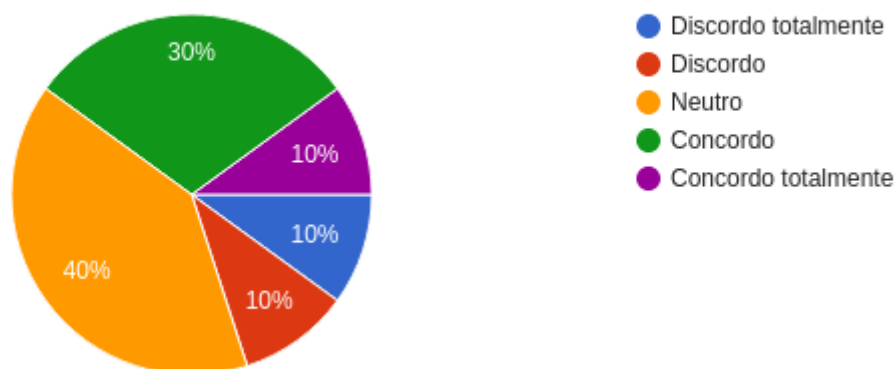
Gráfico 4 – Facilidade de entendimento dos participantes da pesquisa quanto à inserção de palitos no simulador



Fonte: Autoria própria (2026).

- A forma de alterar a orientação dos palitos foi intuitiva?

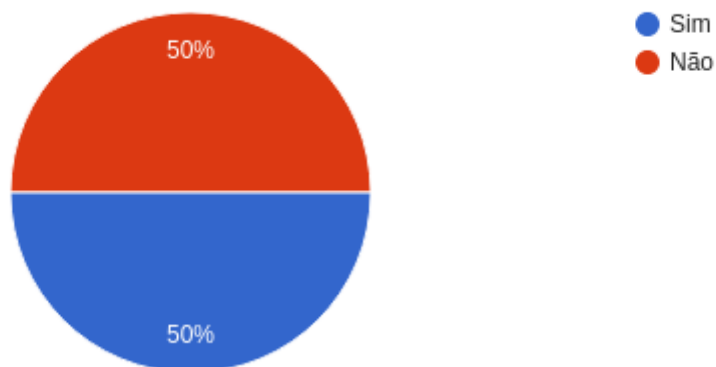
Gráfico 5 – Facilidade de entendimento dos participantes da pesquisa quanto à rotação de palitos no simulador



Fonte: Autoria própria (2026).

- **Você precisou de ajuda externa (tutorial, outra pessoa) para usar o simulador?**

Gráfico 6 – Percentual de participantes da pesquisa que recorreram ao tutorial ou ajuda externa para utilizar o simulador



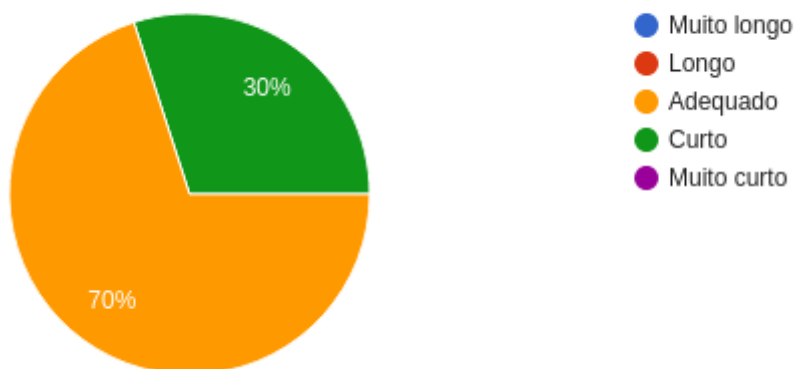
Fonte: Autoria própria (2026).

Os dados desta categoria evidenciam resultados polarizados. Enquanto a inserção básica de elementos no ambiente virtual obteve alta taxa de facilidade (Gráfico 4), as operações de manipulação espacial refinada, notadamente a alteração de orientação nos eixos tridimensionais (Gráfico 5), demonstraram ser o principal gargalo da interface. Essa curva de aprendizado inicial em relação aos controles 3D justifica o fato de que metade da amostra (50%) precisou recorrer a auxílio externo ou tutoriais durante a atividade (Gráfico 6).

3. Eficiência de Uso

- O tempo necessário para montar uma ponte simples foi:

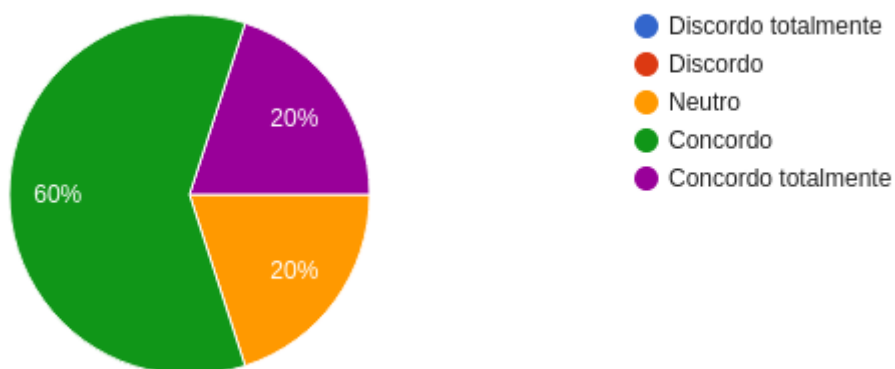
Gráfico 7 – Tempo necessário para a montagem de uma ponte simples dos participantes da pesquisa



Fonte: Autoria própria (2026).

- O processo de anexar dois ou mais palitos foi rápido e eficiente?

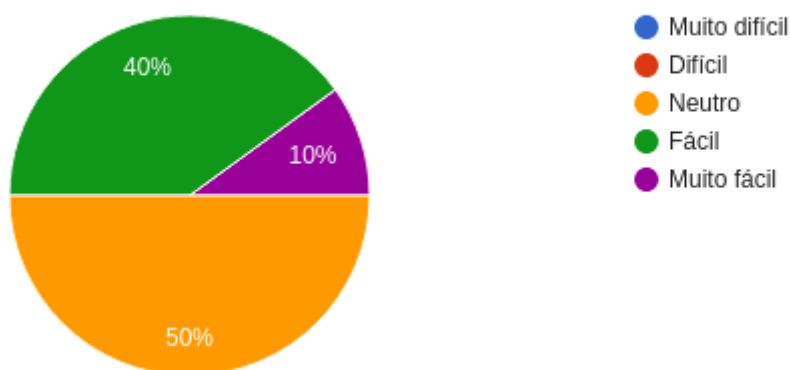
Gráfico 8 – Satisfação dos participantes da pesquisa quanto à anexação de dois ou mais palitos na simulação



Fonte: Autoria própria (2026).

- Foi fácil corrigir erros (ex: palito mal posicionado ou orientação incorreta)?

Gráfico 9 – Satisfação dos participantes da pesquisa quanto à correção de posição ou rotação dos palitos na simulação



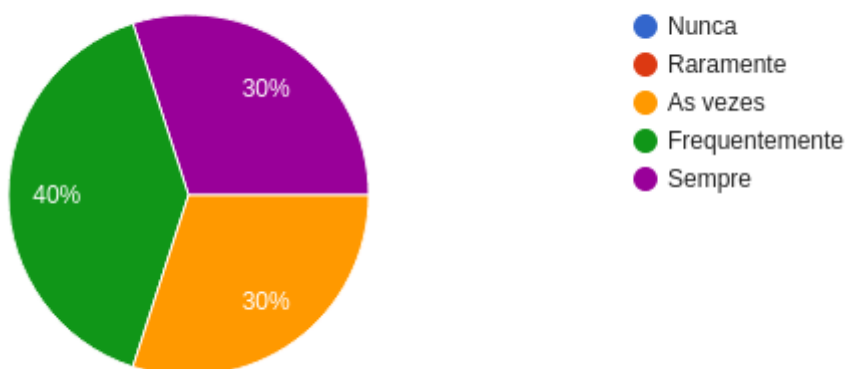
Fonte: Autoria própria (2026).

Apesar da resistência inicial com os comandos de rotação, a eficiência global do simulador não foi comprometida. A eficácia do sistema é comprovada pelo fato de 100% da amostra considerar o tempo total de montagem "Adequado" ou "Curto" (Gráfico 7), somado à alta percepção de agilidade no processo de anexação de barras (Gráfico 8). Contudo, o Gráfico 9 expõe que a correção de erros de posicionamento ainda divide opiniões, apontando uma oportunidade de aprimoramento na ergonomia das ferramentas de edição do *software*.

4. Clareza e *Feedback* do Sistema

- O simulador fornece *feedback* visual claro ao adicionar ou anexar palitos?

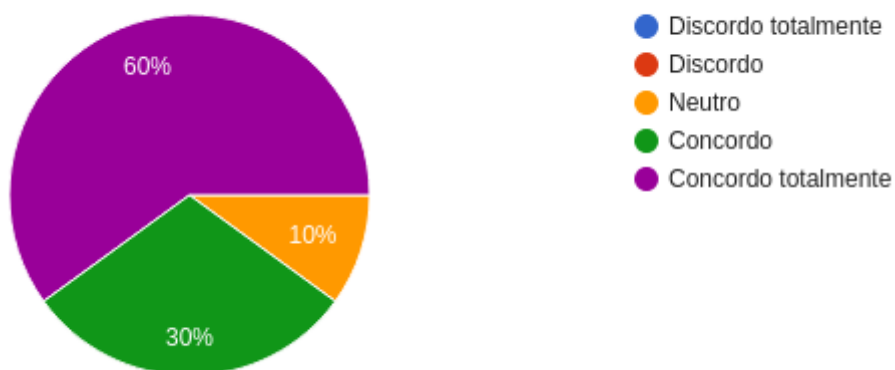
Gráfico 10 – Satisfação dos participantes da pesquisa quanto ao *feedback* visual ao inserir palitos na simulação



Fonte: Autoria própria (2026).

- A orientação dos palitos fica visualmente clara após a modificação?

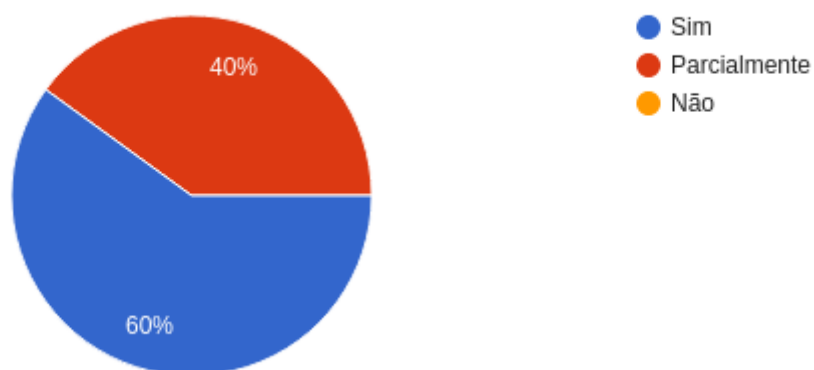
Gráfico 11 – Satisfação dos participantes da pesquisa quanto à clareza visual dos palitos após rotacioná-los



Fonte: Autoria própria (2026).

- O sistema deixa claro quando dois palitos estão corretamente anexados?

Gráfico 12 – Satisfação dos participantes da pesquisa quanto à clareza visual dos palitos após anexação uns com os outros



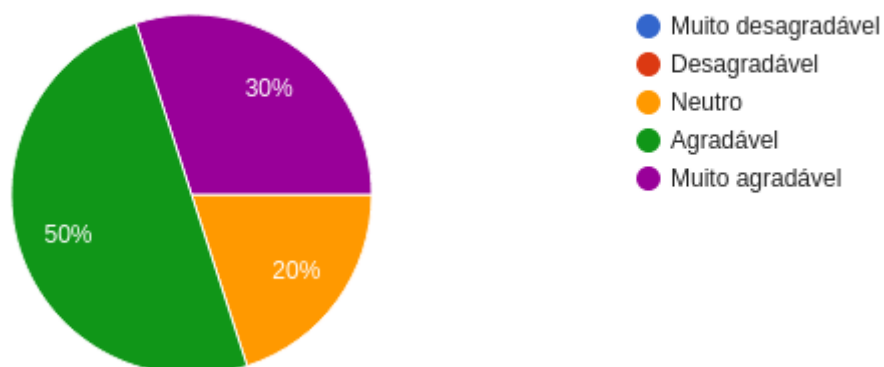
Fonte: Autoria própria (2026).

A renderização gráfica e as respostas do motor *Three.js* mostraram-se altamente assertivas. O *feedback* visual fornecido pelo sistema, seja durante a adição, a rotação ou a anexação das barras, foi percebido de forma clara pela quase totalidade dos discentes (Gráficos 10, 11 e 12). Isso indica que as escolhas de *design*, como o mapeamento de cores e as sinalizações de encaixe, cumprem com sucesso o propósito pedagógico de facilitar a compreensão espacial da treliça.

5. Satisfação do Usuário

- Você considera o simulador agradável de usar?

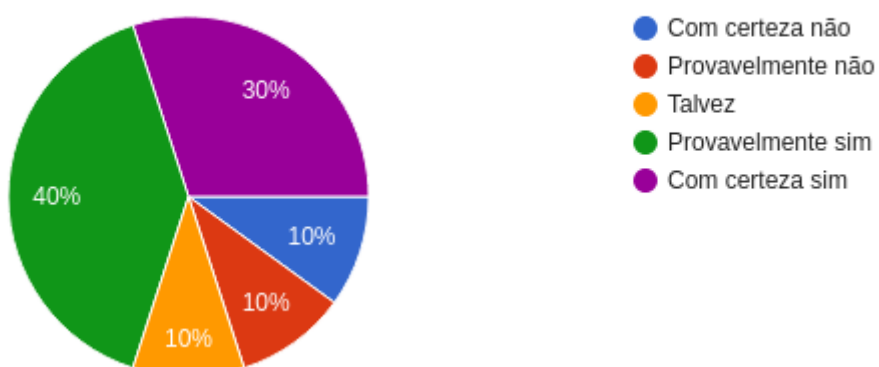
Gráfico 13 – Satisfação dos participantes da pesquisa quanto ao uso em geral do *software*



Fonte: Autoria própria (2026).

- Você utilizaria este simulador para planejar sua ponte antes da construção física?

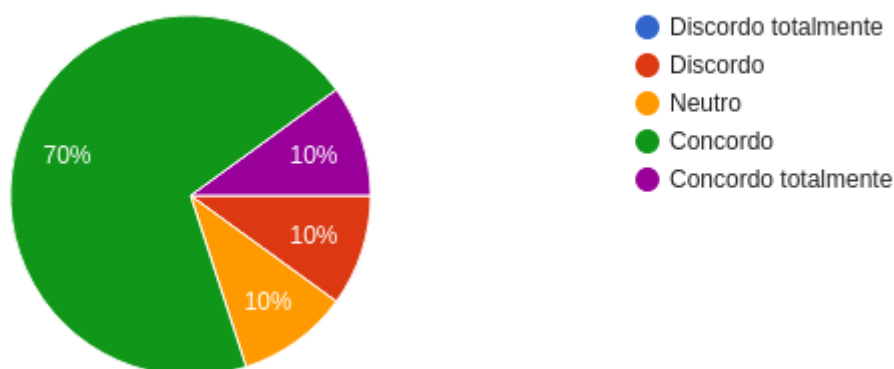
Gráfico 14 – Satisfação dos participantes da pesquisa quanto à confiabilidade do *software* na construção do protótipo físico da ponte



Fonte: Autoria própria (2026).

- **O simulador aumenta sua confiança no projeto da ponte?**

Gráfico 15 – Confiança dos participantes da pesquisa quanto ao uso do *software* para o projeto de pontes



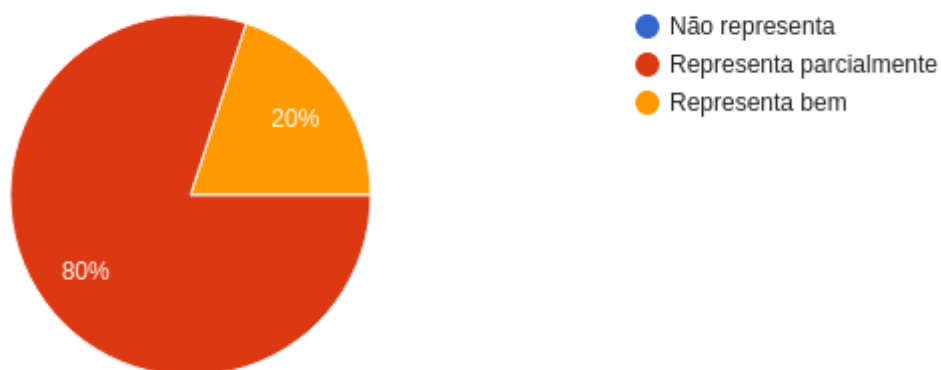
Fonte: Autoria própria (2026).

Do ponto de vista da aceitação tecnológica, o protótipo obteve êxito substancial. A experiência global de uso foi classificada predominantemente como agradável (Gráfico 13). Esse engajamento reflete-se na utilidade prática declarada: a maioria expressiva (70%) afirmou que adotaria a ferramenta para o planejamento virtual de projetos reais (Gráfico 14), o que atesta que o simulador cumpre o objetivo de transmitir segurança e elevar a confiança estrutural do discente (Gráfico 15).

6. Adequação ao Contexto da Competição

- O simulador representa adequadamente as restrições reais da competição?

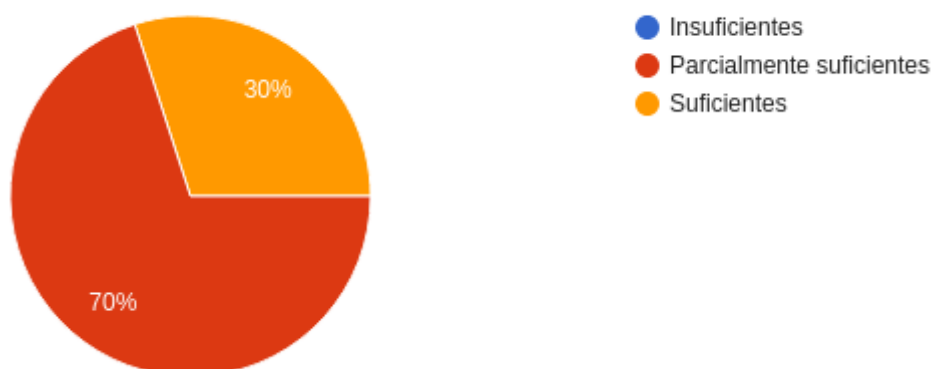
Gráfico 16 – Opinião dos participantes da pesquisa quanto à fidelidade do *software* em relação às restrições da competição



Fonte: Autoria própria (2026).

- As operações disponíveis (adicionar, orientar e anexar palitos) são suficientes para projetar a ponte?

Gráfico 17 – Opinião dos participantes da pesquisa quanto à completude ferramental do *software*



Fonte: Autoria própria (2026).

Resumidamente: os dados de experiência prévia indicam que a amostra foi composta predominantemente por usuários leigos em *softwares* estruturais (70% sem experiência prévia), perfil que se correlaciona de forma idêntica à taxa de alunos que nunca participaram de Competições de Pontes com Palito de Picolé (Gráficos 1 e 2). A parcela minoritária (30%), que relatou possuir experiência básica ou intermediária, apontou o uso prévio de *softwares* consagrados no mercado, como AutoCAD, FTool e Eberick (Gráfico 3). Essa configuração amostral permitiu avaliar a intuitividade do sistema sob a ótica de discentes que não estão habituados aos jargões e interfaces das ferramentas de engenharia convencionais.

A avaliação de usabilidade demonstrou resultados polarizados dependendo da natureza da operação espacial. A inserção básica de elementos no ambiente virtual obteve alta taxa de aceitação, não apresentando dificuldades para a grande maioria dos participantes (Gráfico 4). Da mesma forma, o processo de anexação (conexão entre dois ou mais palitos) foi avaliado como intuitivo e rápido por 80% da amostra (Gráfico 8). Em contrapartida, as operações de manipulação espacial mais refinadas revelaram-se como as principais dificuldades da interface. A alteração da orientação dos palitos e a correção de erros de posicionamento apresentaram resistência por parte dos usuários (Gráficos 5 e 9). Essa dificuldade no gerenciamento dos eixos tridimensionais justifica o fato de 50% dos discentes terem recorrido a tutoriais ou auxílio externo durante a atividade (Gráfico 6). Apesar dessa curva de aprendizado inicial em relação aos controles 3D, a eficiência global não foi comprometida, visto que 100% da amostra considerou o tempo total de montagem da treliça como "Adequado" ou "Curto" (Gráfico 7).

A renderização gráfica e as respostas visuais do motor Three.js mostraram-se eficazes. O mapeamento visual aplicado aos nós de conexão, cujo objetivo era indicar a anexação correta dos elementos, foi percebido claramente pela totalidade dos discentes, seja de forma plena ou parcial (Gráficos 10 e 12). O *feedback* visual fornecido após a rotação das barras também foi positivamente destacado, com 90% dos usuários concordando que a orientação final se tornava evidente após a modificação (Gráfico 11).

Do ponto de vista da aceitação tecnológica, o simulador obteve êxito. A percepção global sobre o uso do *software* foi predominantemente classificada como agradável, com níveis variando do satisfatório ao excelente para a maioria dos avaliadores (Gráfico 13). Esse engajamento refletiu-se na intenção de uso prático: 70% dos voluntários afirmaram que adotariam o simulador para projetar e calcular pontes antes de iniciar a construção física nos moldes da CP3 (Gráfico 14). Por fim, no tocante à fidelidade das regras da competição, identificou-se a principal oportunidade de trabalho futuro. As respostas referentes à completude das ferramentas operacionais e à representação das limitações construtivas do regulamento da CP3 (Gráficos 16 e 17) sugerem que o simulador ainda opera em um modelo

físico genérico. É recomendada a implementação de restrições matemáticas adicionais que repliquem fielmente as dimensões reais dos palitos, nós de cola e critérios de sobreposição específicos do edital vigente.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho alcançou seu objetivo principal ao desenvolver e validar um protótipo de simulador de análise estrutural tridimensional com foco didático, voltado especificamente para a modelagem de protótipos na Competição de Pontes com Palitos de Picolé da UFERSA. Ao utilizar tecnologias nativas da web, como JavaScript, HTML5, CSS3 e a biblioteca gráfica Three.js, a aplicação demonstrou que é possível democratizar o acesso a ferramentas de Engenharia Assistida por Computador, oferecendo uma alternativa *open-source*, gratuita e que dispensa instalações complexas.

A adoção do Método da Rigidez Direta, implementado com o apoio da biblioteca *ml-matrix*, conferiu ao motor físico do *software* o rigor matemático necessário para processar cálculos estruturais. A capacidade do sistema em mapear tensões internas de tração e compressão visualmente no ambiente 3D consolidou a aplicação como um recurso valioso de aprendizagem, aproximando a teoria clássica de Resistência dos Materiais da prática experimental requerida na competição.

A etapa de validação prática, realizada com alunos de diferentes cursos, evidenciou pontos fortes e oportunidades de melhoria na usabilidade da ferramenta. O simulador obteve êxito ao se mostrar eficiente e responsivo em operações fundamentais, como a inserção de elementos e a anexação de nós. Os usuários, em sua maioria sem experiência prévia com *softwares* de simulação (70% da amostra), relataram que o *feedback* visual fornecido pelo sistema contribui significativamente para o entendimento do comportamento da treliça sob cargas. No entanto, a pesquisa também revelou desafios relacionados à curva inicial de aprendizado. O fato de que metade dos participantes precisou recorrer a tutoriais externos demonstra que funcionalidades específicas, notadamente a operação de rotação espacial e correção de posição dos palitos, carecem de maior clareza e intuitividade na interface gráfica. Além disso, identificou-se a necessidade de um alinhamento mais restrito da plataforma às regras e restrições geométricas reais impostas no regulamento da CP3.

Para trabalhos futuros, sugere-se o refinamento contínuo da interface e da experiência do usuário, visando atenuar a curva de aprendizado inicial apontada nos testes. Isso engloba a reformulação das ferramentas de manipulação espacial no ambiente 3D, com especial atenção aos controles de rotação e posicionamento de vértices, e a possível integração de tutoriais interativos nativos na própria tela do simulador. No âmbito pedagógico, almeja-se conduzir uma etapa de validação metodológica mais rigorosa. O objetivo é aplicar a ferramenta computacional como instrumento de apoio didático em uma turma da disciplina de Mecânica

Geral no semestre subsequente. Dessa forma, será viável analisar não apenas os aspectos de usabilidade, mas a real eficácia do *software* na transposição didática, mensurando, por meio de avaliações comparativas, o impacto do simulador na compreensão dos conceitos de estática dos corpos rígidos e no desempenho acadêmico dos discentes.

REFERÊNCIAS

HIBBELER, Russell Charles. **Estática: mecânica para engenharia**. 12. ed. São Paulo: Pearson, 2011.

HIBBELER, Russell Charles. **Análise das estruturas**. 8. ed. São Paulo, SP: Pearson, 2013.

HIBBELER, Russell Charles. **Estática: mecânica para engenharia**. 14. ed. São Paulo, SP: Pearson, 2017.

LÓPEZ , Veronica; RAMOS , Renata Benedetti Mello Nagy. Experiência docente: migração do sistema Computer Aided Design (CAD) para o Building Information Modeling (BIM). In: ENCONTRO NACIONAL SOBRE O ENSINO DE BIM, Porto Alegre, v. 3, n. 00, p. 1, 2021. DOI: 10.46421/enebim.v3i00.309. Disponível em: <https://eventos.antac.org.br/enebim/article/view/309>. Acesso em: 13 jul. 2026.

SILVA, F. Á. da; CLÁWSIO, R. C. D. S.; JÚNIOR, J. F. T. Metodologia para construir pontes com palito de picolé. **Revista de Ensino de Engenharia**, v. 43, n. 1, 2024.

SILVA, J. RODRIGUES; N. JUNIOR, V. Ensino de estruturas treliçadas via competição de protótipo de ponte. **Revista de Ensino de Engenharia**, v. 41, n. 1, 2022.

WARGER, T. **The open-source movement**. The Edutech Report, [S. l.], 2002. Disponível em: https://www.academia.edu/1935486/The_open_source_movement.