



USO DO MOLA STRUCTURAL KIT NO ENSINO DO MÉTODO DOS DESLOCAMENTOS

DOI: 10.37702/2175-957X.COBENGE.2022.3910

Elvidio Gavassoni Neto - gavassoni@ufpr.br
Universidade Federal do Paraná

Resumo: *O método dos deslocamentos é uma das bases da análise computacional e numérica de estruturas. Seu entendimento e aplicação envolve o entendimento de ferramentas matemáticas abstratas e conceitos físicos complexos. Assim muitos estudantes têm dificuldade de entender completamente o método. Ferramentas visuais como o Kit Mola Estrutural podem ser utilizadas para simplificar o processo de ensino e aprendizado desse método. Esse artigo propõe quatro atividades didáticas para compreensão do método dos deslocamentos de alunos de graduação em Engenharia Civil. Os conceitos abordados são: deslocabilidades, inextensibilidades, elementos rígidos, pórticos de edifícios de múltiplos pavimentos, sistemas de contraventamento e lajes. As atividades foram avaliadas pelo aluno e os resultados do feedback e do rendimento acadêmico dos alunos mostram o impacto positivo das mesmas.*

Palavras-chave: Engenharia Civil, Análise Estrutural, Aprendizado baseado em Problemas



USO DO MOLA STRUCTURAL KIT NO ENSINO DO MÉTODO DOS DESLOCAMENTOS

1 INTRODUÇÃO

Os avanços na área de tecnologia e engenharia aumentam a demanda no mercado de trabalho atual por engenheiros civis com uma série de competências técnicas e não técnicas (Akyazi et al. 2020) muitas vezes não exercitadas nos cursos de graduação (Aparicio; Ruiz-teran, 2007). Tal cenário faz com que as escolas de engenharia civil discutam cada vez mais metodologias de ensino e aprendizado eficientes e envolventes (Tiboni, 2018). Um ambiente de ensino que facilita e propicia o desenvolvimento de competências técnicas e sócio-emocionais centra-se fundamentalmente no aluno e não no papel do docente (Felder; Brent, 2004).

No caso da análise estrutural, área da engenharia civil que se ocupa do estudo, do dimensionamento e do projeto de elementos estruturais de edificações civis existem características desafiantes para o processo de ensino e aprendizado. Entre os principais desafios, citam-se: Ausência de ferramentas que apliquem na prática os conceitos teóricos (Aparicio; Ruiz-teran, 2007); pouco espaço para o desenvolvimento de tarefas que demandem a criatividade dos alunos (Teng et al., 2004); dificuldade de visualização de conceitos matemáticos abstratos (Melo; Neto, 2012); falta de abordagens de ensino que promovam o engajamento e o envolvimento dos discentes (Celorrio-Barragué et al., 2019) entre outras.

O kit estrutural mola é um modelo físico iterativo criado pelo arquiteto Márcio Sequeira de Oliveira, que simula de forma qualitativa o comportamento de elementos estruturais (Oliveira et al., 2017). O modelo é composto por um conjunto de peças moduladas elásticas e deformáveis que se conectam por ligações magnéticas. Atualmente existem três kits diferentes lançados no mercado que permitem a visualização de deslocamentos e deformações em sistemas estruturais reticulados e de cabos. Desde o seu lançamento os kits molas têm sido utilizados como ferramenta de ensino de engenharia estrutural incluindo competições (Rauber et al., 2019; Meiguel et al., 2021), no ensino de conceitos básicos de equilíbrio e esforços internos em elementos estruturais (Damaceno et al., 2019) e também no ensino de estruturas hiperestáticas (Tiboni, 2018). A análise estrutural utilizando o kit mola também foi objeto de pesquisa utilizando-se de aplicativo e sensores (Melo; Neto, 2012).

O uso do kit mola no ensino da análise estrutural traz uma série de vantagens no processo de aprendizado tais como a facilitação do entendimento do comportamento estrutural (Melo; Neto, 2012); desenvolvimento de competências de trabalho em equipe (Rauber et al., 2019); engajamento e envolvimento dos discentes (Meiguel et al., 2021) e visualização de conceitos abstratos (Damaceno et al., 2019).

Dentre os vários conceitos da análise estrutural, o método dos deslocamentos é um dos métodos básicos utilizados para solução dos esforços e deslocamentos de uma ampla gama de sistemas estruturais, sendo utilizados por vários softwares de análise estrutural (Martha, 2020). As incógnitas do método são um conjunto de deslocamentos e rotações desconhecidas nos nós da estrutura analisada. O completo entendimento do método demanda do estudante uma série de conhecimentos prévios de matemática e física. O método baseia-se em conjunto de conceitos físicos importantes, tais como conservação de energia, princípio de trabalhos virtuais, equações de equilíbrio estático, compatibilidade cinemática e leis constitutivas. Além desses conceitos físicos importantes,



o método emprega ferramentas matemáticas complexas da álgebra linear e do cálculo diferencial. Além disso, a compreensão do método dos deslocamentos demanda dos discentes a visualização do comportamento cinemático (rotações e deslocamentos) frente à imposição de forças e deslocamentos na estrutura. Todas essas características contribuem para que muitos estudantes tenham dificuldade na compreensão do método dos deslocamentos.

Este trabalho, portanto, tem por objetivo propor o uso do kit mola como atividade integrante no processo de aprendizado do método dos deslocamentos no contexto de uma disciplina obrigatória de graduação do curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Paraná, UFPR. A seguir a ementa da disciplina, os conceitos do método dos deslocamentos e as características do kit mola são apresentados. Em seguida as quatro atividades aplicadas são apresentadas e por fim os resultados de rendimento acadêmico e feedback dos alunos são apresentados, contribuindo para avaliação positiva do uso da ferramenta no ensino dos conceitos propostos.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção são descritas a disciplina de Mecânica das Estruturas II, a teoria do método dos deslocamentos, o funcionamento e componentes do kit mola utilizado e os procedimentos de avaliação e feedback do processo de ensino e aprendizado.

2.1 Disciplina de Mecânica das Estruturas II

É uma disciplina obrigatória de 60 h (sendo 4 h por semana em dois encontros), cursada no sexto período letivo pelos acadêmicos do curso de Engenharia Civil com disponibilidade de 45 vagas. A ementa da disciplina compreende o estudo do comportamento estático de elementos estruturais hiperestáticos tais como vigas, arcos, pórticos, treliças e grelhas. Os conteúdos abrangem 4 unidades básicas: Métodos de Energia, Método das Forças, Métodos dos Deslocamentos e Método da Rigidez Direta.

Desde 2015 a disciplina foi reorientada, seguindo a abordagens de metodologias ativas de aprendizado tais como aprendizagem baseada em problemas ou PBL (Problem Based Learning), discussões (talking chips) e focadas em escrita (team anthologies) (Tiboni, 2018). Em formato presencial, no período de 2015 a 2019, a avaliação de desempenho constava de provas, trabalhos em grupo ou individuais e testes. Durante o Ensino remoto emergencial (2020-2021) as mesmas categorias de metodologias ativas foram mantidas e organizadas em quatro trabalhos individuais que foram utilizados para verificação do rendimento e da frequência Gavassoni (2021). Com a retomada do ensino presencial em 2022 a disciplina retomou ao formato anterior.

2.2 Método dos Deslocamentos

O método dos deslocamentos é um dos métodos mais importantes na análise estrutural (Soriano; Lima, 2006). O método tem ampla aplicação, uma vez que se presta tanto à análise estática de estruturas isostáticas quanto hiperestáticas. Dentre os métodos matriciais de análise estática é o mais direcionado a uma implementação computacional (Martha, 2020). Reorientado para a implementação computacional o método da rigidez é a base do chamado método da rigidez direta (Felippa, 2004), utilizado por muitos programas e aplicativos de análise estática estrutural. O método é também conhecido como método da rigidez (Gere; Weaver, 1981) ou método das deformações (Sussekund, 1978). O método consiste na aplicação do princípio da superposição dos efeitos de uma série de sistemas estruturais cinematicamente determinados que atendam às condições





de compatibilidade do sistema estrutural original por meio da restrição dos deslocamentos nodais. Os casos básicos que depois são superpostos são chamados estruturas restringidas (Gere; Weaver, 1981), sistemas principais (Soriano; Lima, 2006) ou sistemas hipergeométricos (Martha, 2020). Os coeficientes de rigidez e as reações de apoio das barras isoladas quando solicitadas por carregamento, variação de temperatura e recalque são obtidos por meio de soluções tabeladas resultantes do método das forças. Por fim, o equilíbrio é garantido por meio da superposição desses casos básicos cujos deslocamentos nodais são as incógnitas determinadas na resolução de uma equação matricial.

A ordem da equação matricial do método aplicado a uma estrutura é o grau de indeterminação cinemática dessa mesma estrutura. Portanto, a identificação dos deslocamentos nodais indeterminados é um passo essencial na aplicação do método. Tão essencial que esses deslocamentos nodais desconhecidos recebem nomenclatura própria: deslocabilidades (SUSSEKIND, 1978; MARTHA, 2020). As deslocabilidades se dividem em internas, que são as rotações nodais desconhecidas e externas que por sua vez são as translações nodais indeterminadas nos sistemas estruturais (Soriano; Lima; 2006).

2.3 Kit Mola Estrutural

O Kit mola é um modelo físico iterativo que simula de forma qualitativa o comportamento estrutural estático de estruturas reticuladas planas e espaciais (Oliveira et al., 2017). O modelo, atualmente disponível em três kits diferentes, é composto por uma série de peças modulares que se conectam por meio de magnetismo, permitindo certa versatilidade na modelagem de sistemas estruturais. A UFPR possui unidades dos três kits, sendo que para as atividades apresentadas neste trabalho foram utilizados apenas o Kit Mola 2. O kit mola é composto pelas peças e respectivas quantidades apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Peças e componentes do Kit Mola 2.

Peça	Sigla	Quantidade
Chapa de Base	G	1
Ligações de Base	GC	6
Esferas	C	18
Ligações Rígidas	RC90	12
Ligações Contínuas	CC	24
Molas Longas	B	30
Molas Curtas		18
Diagonais Longas	D	24
Diagonais Curtas		9
Placas	P	3

Fonte: Oliveira et al. (2017).

A chapa de base representa o solo, enquanto as ligações de base representam os vínculos, ou fundações das estruturas e são correspondentes aos vínculos externos nos modelos estruturais. Os vínculos internos são representados pelas esferas (ligações rotuladas), pelas ligações rígidas representando engastes internos e as ligações contínuas que representam a unicidade de dois elementos. Os elementos lineares de molas e diagonais representam as barras, cabos e contraventamento. Por fim as placas





são utilizadas na modelagem física de lajes de piso ou de elementos estruturais de vedação lateral como painéis e alvenaria estrutural.

2.4 Avaliação e Feedback

A avaliação da unidade de conteúdo referente ao método dos deslocamentos foi feita pela aplicação de dois trabalhos e uma prova. Ambos os trabalhos foram baseado na metodologia de resolução de problemas e envolveram estruturas existentes em edificações reais (TIBONI, 2018; GAVASSONI, 2021). Sendo um trabalho individual e outro realizado em grupo, visando o desenvolvimento de habilidades de trabalho em equipe. O coeficiente de rendimento individual referente à unidade do método das forças foi obtido por uma média ponderada entre a nota da prova (com peso de 35%) e a média dos trabalhos (com peso de 32,5% cada um).

O feedback dos alunos foi feito ao final das atividades didáticas por meio de formulário eletrônico no aplicativo google forms. Os formulários constavam de 7 perguntas objetivas com escala de 1 (inadequada) a 10 (adequado). As perguntas se referiam à avaliação do autoconhecimento dos conceitos da análise estrutural e método dos deslocamentos, da eficácia didática das ferramentas e atividades utilizando o kit mola, da aplicabilidade dos conceitos à prática profissional de engenharia e da efetividade do processo de ensino e aprendizado. Também foi incluso o espaço para críticas e sugestões sobre as atividades didáticas.

3 ATIVIDADES

As quatro atividades foram apresentadas em duas ocasiões: já na primeira aula do curso destinada ao conteúdo do método dos deslocamentos referente ao conceito de deslocabilidades e inextensibilidade e na terceira aula destinada ao conteúdo tratando de pórticos planos e dos coeficientes de rigidez. Os alunos organizaram-se em duplas (sendo possível que grupos de três ou quatro adequadamente consigam desempenhar e avaliar as atividades propostas). Cada dupla recebeu um kit mola e o professor utilizando um protocolo impresso com as atividades e questões entregue para cada aluno e auxílio do quadro negro propôs, conduziu e mediou a discussão das atividades descritas a seguir. As quatro atividades utilizam kits mola 2, sendo que também os kit molas 1 podem ser usados para as atividades 1 e 2.

3.1 Atividade 1: Deslocabilidades

Face ao preponderante papel da identificação das deslocabilidades na aplicação do método dos deslocamentos a atividade 1 tem por objetivo identificar e visualizar com o auxílio do kit mola as diferenças entre deslocabilidades internas e externas.

Primeiramente os alunos modelam, utilizando 4 molas e 4 esferas, o quadro plano apoiado diretamente no tampo da mesa pessoal da sala de aula como mostra a Figura 1 (a). A atividade pode ser aplicada em duplas ou trios, a depender do número de kits disponíveis e alunos por turma. Para facilitar a orientação da análise, um par de eixos cartesianos é inserido como mostrado na Figura 1 (a). Em seguida enquanto um aluno fixa os dois nós inferiores (C e D) com ajuda das mãos outro aplica com auxílio do dedo indicador ou uma caneta, Figura 1 (b), aplica uma carga concentrada intermediária na direção horizontal (x) em uma das barras verticais (AC ou BD). Simulando assim o efeito na estrutura de cargas devido ao vento ou sísmicas. O mesmo é em seguida repetido para uma carga concentrada aplicada vertical (y) em um ponto intermediário na barra horizontal (AB) simulando o efeito de cargas horizontais. Com as ligações rígidas os nós A e B podem ter seu comportamento similar ao engastamento interno como mostra a





imagem da Figura 1 (b), sendo possível que a abodargem seja aplicada para diferentes configurações entre nós rotulados (sem RC90) e nós rígidos (com RC90), ou também para o caso de barras de contraventamento como mostra a Figura 1 (c) utilizando 1 diagonal longa do kit mola.

Para cada um dos casos de solicitação e configuração de ligação dos nós os discentes têm sua atenção orientada para o comportamento cinemático dos nós não restringidos (A e B). Como exemplo, mostra-se a configuração deformada para o caso de ligação rígida e aplicação de carga horizontal na barra BD da Figura 1 (b). Pode-se observar que ambos os nós A e B sofrem deslocamentos de translação, Δ_x na Figura 1 (b) para o caso da translação horizontal do nó B. Trata-se de um deslocamento de translação nodal indeterminado constituindo um exemplo de **deslocabilidade externa**. Além das translações, ambos os nós não restringidos sofrem rotações no plano xy ao redor do eixo z (perpendicular ao plano das imagens da Figura 1), indicado por γ no caso do nó A na configuração da Figura 1 (b). O deslocamento rotacional γ corresponde a uma **deslocabilidade interna**.

Os modelos obtidos com o kit mola são também importantes para identificação do número diferente de deslocabilidades externas dos nós A e B quando rotulados, caso da Figura 1 (a) ou rígidos como mostra a Figura 1 (b). Uma vez que cada uma das barras concorrentes ao nós A e B pode rotacionar independentemente no caso rotulado existem duas deslocabilidade internas em cada um desses nós. No caso rígido, o valor γ é o mesmo para cada barra, veja Figura 1 (b), o número de deslocabilidades internas reduz para um por nó não restringido.

Cada configuração de ligação para os nós A e B bem como do tipo de solicitação por carga é utilizada como exercício para o desenvolvimento da modelagem estrutural por parte dos discentes. Assim cada configuração é acompanhada por um desenho esquemático do modelo analisado, como mostra a Figura 1 (d). Além do exercício da modelagem estrutural, a atividade pode ser utilizada para a aprendizagem do uso de programas ou aplicativos de análise estrutural com a observação da configuração deformada computacionalmente obtida como mostra a Figura 1 (d) para a configuração do kit mola mostrada na Figura 1 (b) e obtida utilizando-se o programa FTOOL (Martha, 2021).

3.2 Atividade 2: Inextensibilidade

Um conceito de difícil entendimento para muitos discentes, principalmente os de compreensão mais visual, trata-se da hipótese de inextensibilidade das barras. Como a rigidez axial para muitos elementos estruturais usuais é alta a deformação axial dessas barras pode ser desprezada. Nesse caso o comprimento dessas barras pode ser considerado inalterado e tais elementos são ditos inextensíveis. O conceito de inextensibilidade reduz o número de deslocabilidades externas, sendo importante para aplicação correta do método dos deslocamentos no caso de sistemas reticulados com barras axialmente rígidas.

A atividade 2, cujo objetivo é o entendimento da hipótese da inextensibilidade das barras e suas consequências na aplicação do método dos deslocamentos utiliza dos mesmos modelos da atividade 1. Com turmas menores as atividades 1 e 2 podem ser aplicadas em uma única aula (2 h de duração), adequadamente intercaladas por espaços de discussão e resolução de problemas de fixação dos conceitos expostos.

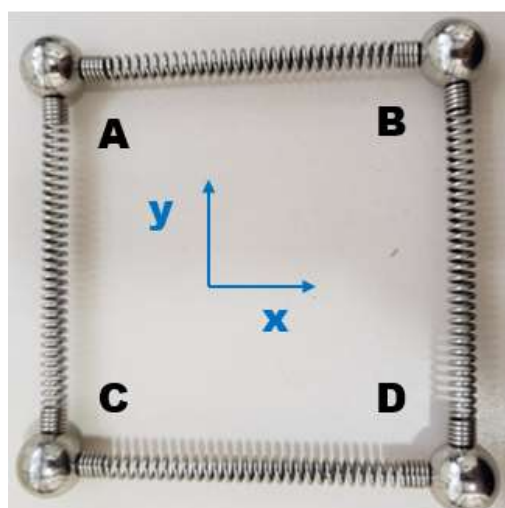
As barras do kit mola podem ser modeladas como inextensíveis. Tal hipótese é verificada na prática uma vez que a magnitude das forças necessárias para alterar o comprimento das molas é maior que as forças magnéticas de conexão das barras e



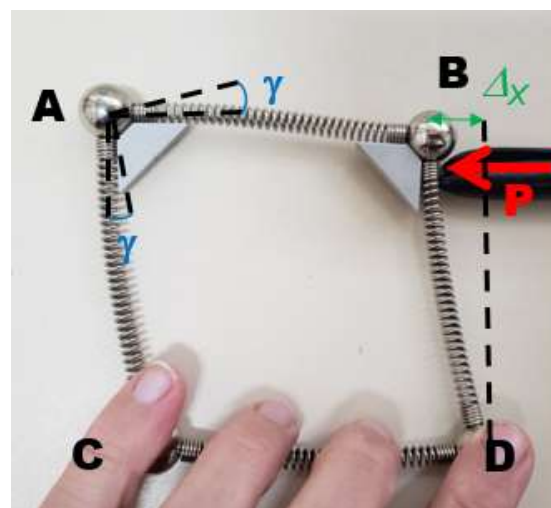


esferas. Sendo assim, após a explicação do conceito de inextensibilidade e de sua aplicabilidade prática os alunos repetem os mesmos modelos da atividade 1 tendo agora sua atenção direcionada para as consequências da inextensibilidade no número de deslocabilidades.

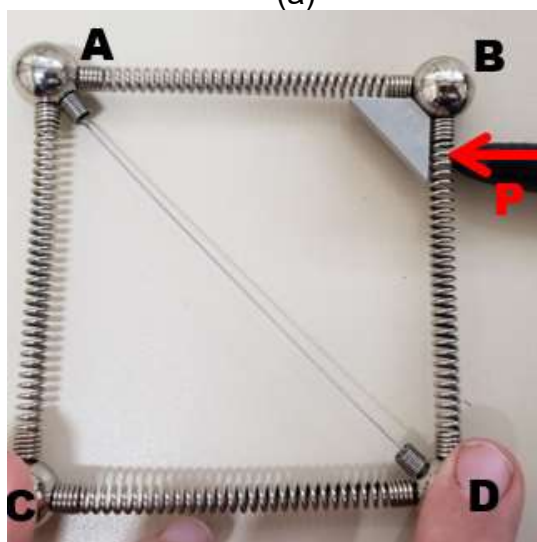
Figura 1 – Modelos utilizados nas atividades 1 e 2: a) Quadro articulado; (b) Quadro com nós rígidos solicitado por carga horizontal; (c) Quadro contraventado; (d) Modelo estrutural e deformação obtido computacionalmente com o FTOOL.



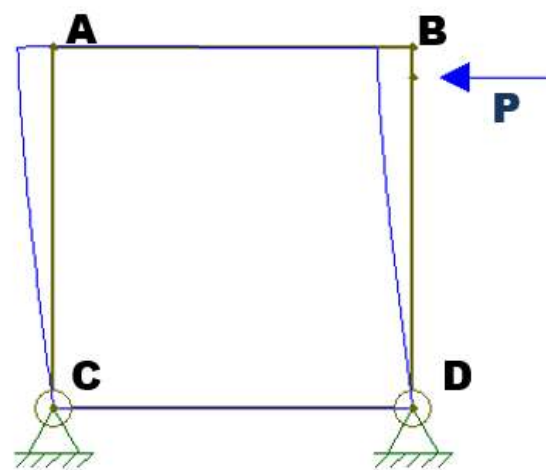
(a)



(b)



(c)



(d)

O primeira observação é que o número de deslocabilidades internas permanece inalterado frente a hipótese da inextensibilidade como se observa da Figura 1 (b), uma vez que a rotação γ independe da alteração do comprimento das barras do modelo.

As próximas observações se direcionam ao efeito da inextensibilidade das barras no número de deslocabilidades externas. No caso de hipóteses de barras extensíveis, ambos os modelos das Figuras 1 (a) e (b) teriam duas deslocabilidades externas (as translações vertical e horizontal) por nó não restringido, resultando em 4 deslocabilidades





esferas. Se todas as barras forem consideradas inextensíveis o número de deslocabilidades externas total para ambos os modelos reduz para 1 – o deslocamento horizontal Δ_x para a barra horizontal AB como mostram as Figuras 1 (b) e (d).

Com a adição do elemento de contraventamento na diagonal AD no caso do modelo mostrado na Figura 1 (c) a hipótese da inextensibilidade reduz para zero, uma vez que os nós A e B passam a estarem conectados por barras inextensíveis não paralelas a dois outros nós fixos (apoios C e D) (Sussekind, 1978).

O modelo da Figura 1 (c) representa portanto um exemplo de estrutura **externamente indeslocável**. Tal conceito é muito importante na configuração, dimensionamento e cálculo de estruturas reticuladas contraventadas de aço e madeira, bem como nas disposições de contraventamento (Pfeil; Pfeil, 2017).

3.3 Atividade 3: Pórticos

A atividade 3 procura proporcionar aos discentes a oportunidade de aplicar os conceitos previamente abordados no uso do método dos deslocamentos para análise de pórticos planos.

A atividade utiliza como base um modelo reticulado tridimensional correspondente a um edifício de dois pavimentos como mostram as Figura 2 (a) e (b). O modelo utiliza uma placa de base, quatro ligações de base, 8 esferas, 16 molas longas, até 9 diagonais longas, até 4 ligações contínuas, até 12 ligações rígidas e até 2 placas. Sendo assim, é necessário um kit mola 2 para cada grupo de alunos.

Cada quadro reticulado de fachada é modelado como pórtico plano isolado, Figura 2 (c). Duas configurações básicas para os quadros são abordadas: Nós rígidos e Nós rotulados com barras de contraventamento. Essas duas configurações são alternadas nos dois pavimentos possibilitando um total de 4 variações. Para cada variação de configuração os números de deslocabilidades externos e internos são determinados. A redução das deslocabilidades externas quer seja pela hipótese da inextensibilidade das barras quer seja pela existência de contraventamentos é visualmente identificada e comparada com o número correspondente ao modelo com barras extensíveis.

A existência de placas no kit mola possibilita a visualização do efeito de lajes e ou vedações laterais rígidas no número de deslocabilidades internas de estruturas reticuladas de edifícios de múltiplos pavimentos. Uma vez que as rigidezes axial e flexural desses elementos superficiais é elevada, tanto as suas variações de comprimento como a sua flexão podem ser desprezada. Isso faz com que os nós solidários a tais elementos superficiais tenham rotação desprezível, reduzindo portanto o número de deslocabilidades internas. Nos modelos computacionais planos os efeitos da existência de elementos superficiais rígidos é modelado como barras rígidas exemplificado na viga horizontal do segundo pavimento mostrado na Figura 2 (c).

A configuração deformada dos pórticos é também objeto dessa atividade sendo modeladas cargas horizontais e verticais. Observa-se como a existência de contraventamento e de placas rígidas diminui as deslocabilidades e reduz os deslocamentos laterais dos edifícios como mostram as Figuras 2 (b) e (c). A atividade também é utilizada para o estudo da disposição de elementos de contraventamento de forma a tornar os pórticos dos edifícios externamente indeslocáveis.

3.4 Atividade 4: Coeficientes de rigidez

O passo seguinte a indentificação das deslocabilidades e a obtenção do sistema hipergeométrico é a análise desse mesmo sistema solicitado por deslocamentos unitários virtuais na direção das restrições inseridas. Parte da equação matricial de equilíbrio é obtida com as forças internas nas barras do sistema geométrico quando o mesmo é





solicitado pelos deslocamentos unitários virtuais. Essas forças internas são os coeficientes de rigidez locais das barras e são tabelados em formulários comumente encontrados nos livros textos de análise estrutural como mostram as Figuras 3 (a) e (b) (Martha, 2020).

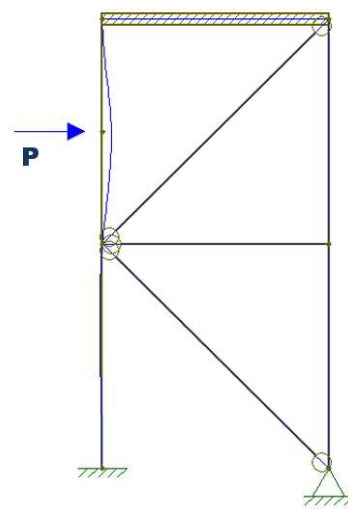
Figura 2 – Modelos utilizados nas atividades 3 e 4: a) Pórtico plano externamente deslocável; (b) Pórtico plano externamente indeslocável; (c) Modelo computacional obtido no Ftool.



(a)



(b)



(c)

Para cada um dos casos básicos correspondentes as diferentes deslocabilidades travadas o discente precisa esboçar a configuração deformada do modelo estrutural. Muitas vezes tal esboço é uma tarefa de difícil visualização para os alunos. A atividade 4 utiliza os mesmos modelos da atividade 3 para visualização dessas configurações deformadas.

A atividade compreende na imposição de translações e rotações como mostram as Figuras 3 (a) e (b) respectivamente. A atenção do discente é orientada para visualização das deformadas em cada caso básico. A fixação do aprendizado é realizada por meio do esboço no material individual de cada aluno da configuração deformada observada. Em seguida o discente é orientado a buscar no formulário os coeficientes de rigidez correspondentes ao que foi visualizado no kit mola e esboçado no papel. Assim a barra vertical BD na Figura 1 (a) sofre um deslocamento d'_2 perpendicular ao seu eixo o que corresponde aos coeficientes de rigidez da Figura 3 (c).

Particular atenção é dada à existência e à posição (nó da esquerda ou da direita) de articulações nas barras e consequentemente às distintas configurações deformadas desses elementos e respectivos coeficientes de rigidez local como mostra o formulário da Figura 3 (d) para a barra horizontal AB que corresponde a uma barra com articulação à direita como mostra a Figura 3 (b). As atividades 3 e 4 podem ser aplicadas em conjunto em uma única aula de 2 h dependendo do número de alunos.

4 RESULTADOS

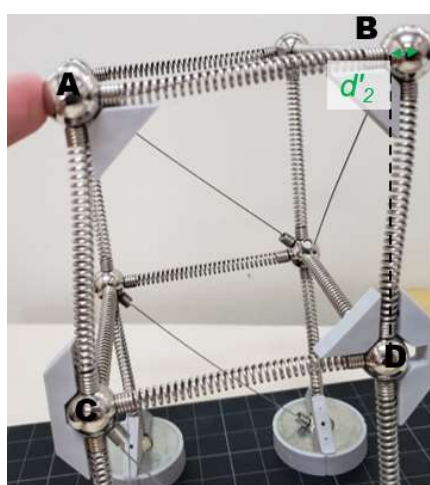
As atividades foram aplicadas durante os meses de março e abril de 2022, antecedendo as datas de entrega das avaliações escolares embasadas nos conceitos do



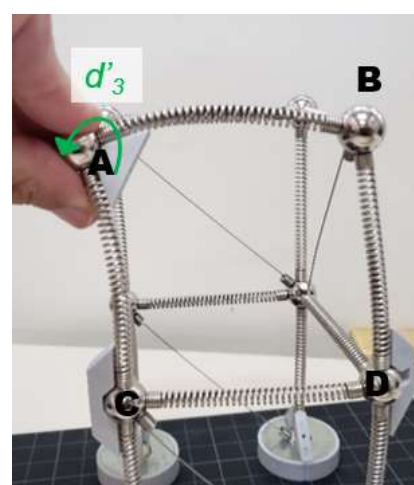


método dos deslocamentos. Os objetivos dos trabalhos e a discussão dos objetivos era conhecida no começo das discussões e das atividades referentes à unidade didática referente ao método dos deslocamentos. Também a prova foi posterior às atividades descritas neste trabalho. Os resultados das três avaliações é mostrado na Tabela 2. O rendimento médio da turma nas avaliações envolvendo o método dos deslocamentos mostra um resultado satisfatório com média de 7,9 pontos.

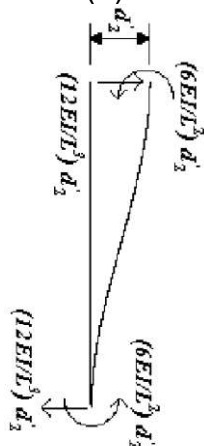
Figura 3 – Modelos utilizados na atividade 4: a) Imposição de translação; (b) Imposição de rotação; (c) Coeficientes de rigidez para barra sem articulações Martha (2020); (d) Coeficientes de rigidez para barra com articulações à direita Martha (2020).



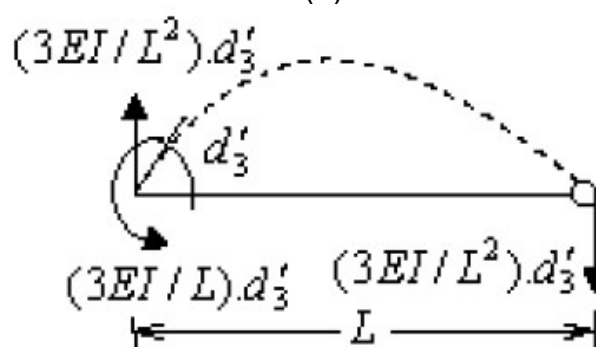
(a)



(b)



(c)



(d)

O resultado do Feedback dos alunos é apresentado na Tabela 3. Observa-se que o resultado da avaliação das atividades utilizadas foi positivo. A visualização da configuração deformada recebeu a mesma nota da determinação dos esforços internos, sendo que este último é um assunto trabalhado em quatro disciplinas anteriores no curso de engenharia civil da UFPR, enquanto o primeiro é inédito até a disciplina de Mecânica das Estruturas II. Acredita-se que tal fato deva-se ao uso do kit mola, uma vez que a habilidade de visualização de deformação é difícil para muitos discentes. A compreensão





do método dos deslocamentos obteve nota 8,0, resultado quase idêntico ao rendimento escolar da turma. Tais resultados indicam que a aplicação do kit mola para modelagem de estruturas de edifícios de múltiplos pavimentos e de configurações de contraventamento auxiliam aos alunos na compreensão desses conceitos na análise estrutural de construções usuais.

Tabela 2 – Rendimento acadêmico médio da turma.

Avaliação	Peso	Coefficiente de Rendimento da Turma
Trabalho 1 (individual)	32,5%	9,2
Trabalho 2 (grupo)	32,5%	8,0
Prova	35,0%	6,7
Média	-	7,9

Quanto ao auxílio do kit mola na visualização da configuração deformada e das deslocabilidades, conceitos chaves na compreensão do método dos deslocamentos, obtiveram nota 9,0 o que indica a eficiência das atividades utilizando o kit no ensino e aprendizado do método. Por último os discentes atribuem nota 8,0 na importância do kit mola no processo de aprendizagem do método dos deslocamentos o que valida o seu uso no processo de ensino de tal conteúdo.

Tabela 3 – Resultado do feedback dos alunos.

Tópico Avaliado	Nota
Compreensão da determinação dos esforços internos em estruturas reticuladas planas	7,7
Visualização da configuração deformada em estruturas reticuladas planas	7,7
Compreensão do método dos deslocamentos	8,0
Compreensão da aplicação prática do método dos deslocamentos	8,2
Auxílio do kit mola na visualização da configuração deformada das estruturas reticuladas planas	9,0
Auxílio do kit mola na visualização das deslocabilidades das estruturas reticuladas planas	9,0
Importância do kit mola na compreensão do método dos deslocamentos	8,0

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise estrutural envolve conceitos físicos abstratos e ferramentas matemáticas complexas. O método dos deslocamentos é uma das metodologias básicas de análise de elementos estruturais sendo a base de muitos programas e aplicativos de cálculo estrutural. Muitos discentes tem dificuldade de visualização e compreensão dos conceitos do método dos deslocamentos. O kit mola foi utilizado como base para quatro atividades curriculares que buscam auxiliar o processo de ensino e aprendizado do método dos deslocamentos. Com as atividades foi possível abordar conceitos importantes como deslocabilidades externas e internas, extensibilidade e inextensibilidade, grau de





indeterminação cinemática e coeficientes de rigidez. Aplicações práticas como a análise de estruturas de múltiplos pavimentos, sistemas de contraventamento, lajes e painéis rígidos e visualização intuitiva de deslocamentos e configurações deformadas também foram possíveis de serem exemplificadas com as atividades propostas neste trabalho. O rendimento acadêmico dos alunos da disciplina de Mecânica das Estruturas II da UFPR que participaram das atividades aqui propostas mostra uma influência benéfica dessas atividades no processo de aprendizado dos discentes. A autoavaliação e feedback dos discentes também corrobora os efeitos positivos das atividades envolvendo o kit mola no processo de ensino. Futuros desenvolvimentos incluem aplicação a outros elementos estruturais e configurações como treliças.

AGRADECIMENTOS

O autor agradece ao FNDE/MEC pela concessão da bolsa de Tutor do Programa de Educação Tutorial do PET e à infraestrutura concedida pelo CESEC – Centro de Estudos em Engenharia Civil e ao Departamento de Construção Civil da UFPR.

REFERÊNCIAS

AKYAZI, T.; ALVAREZ, I.; ALBERDI, E.; et al. Skills needs of the civil engineering sector in the european union countries: Current situation and future trends. **Applied Sciences (Switzerland)**, v. 10, n. 20, p. 1–24, 2020.

APARICIO, A. C.; RUIZ-TERAN, A. M. Tradition and Innovation in Teaching Structural Design in Civil Engineering. **JOURNAL OF PROFESSIONAL ISSUES IN ENGINEERING EDUCATION AND PRACTICE**, , n. October, p. 340–350, 2007.

CELORRIO-BARRAGUÉ, L.; CALVO-SIMÓN, S.; GASPAR, M.; VIDAL-CORTÉS, M.; MARTÍN-RAMOS, P. 3D printed models-based lab activities to enhance learning-teaching processes in Structural Engineering courses. **ACM International Conference Proceeding Series**, p. 80–86, 2019.

DAMACENO, É. W. DA S.; LUZ, J. G. P. DA; FILHO, V. P. M.; MAZURECHEN, S. R. ESTUDO DO USO KIT MOLA ESTRUTURAL NO ENSINO DE ENGENHARIA CIVIL SUDY. **Pesquisa E Inovação**, v. 1, p. 38–50, 2019.

FELDER, R. M.; BRENT, R. The intellectual development of science and engineering students. Part 1: Models and challenges. **Journal of Engineering Education**, v. 93, n. 4, p. 269–277, 2004.

FELIPPA, C. A. INTRODUCTION to FINITE ELEMENT METHODS. **Direct**, 2004. Boulder: University of Colorado.

GAVASSONI, E. PRESENCIAL: ESTUDO DE CASO EM DUAS DISCIPLINAS DE ANÁLISE. XLIX COBENGE. **Anais...**, 2021.

GERE, J. M.; WEAVER, W. **Análise de Estruturas Reticuladas**. Guanabara Dois, 1981.
MARTHA, L. F. **Análise de Estruturas: Conceitos e Métodos Básicos**. 2º ed. LTC, 2020.

MARTHA, L. F. FTOOL. , 2021. Rio de Janeiro: TECGRAF PUC-RIO.





MEIGUEL, L.; SANTOS, C. S. M. DOS; GAVASSONI, E. O PROGRAMA DE EDUCAÇÃO TUTORIAL E A FORMAÇÃO DE ENGENHEIROS CIVIS PREPARADOS PARA O FUTURO MERCADO DE TRABALHO. XLIX COBENGE. **Anais...**, 2021.

MELO, NATÁLIA DIAS DE; NETO, JANUÁRIO PELLEGRINO. DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA ELETRÔNICO E GRÁFICO PARA O ENSINO DA ENGENHARIA DE ESTRUTURAS COM O USO DO KIT ESTRUTURAL MOLA. , v. 50, n. February, p. 3–10, 2012.

OLIVEIRA, M. S. DE; NETO, H. L.; REBELLO, Y. C. P. Manual Kit Estrutural Mola 2. , 2017.

PFEIL, W.; PFEIL, M. **Estruturas de Madeira**. 6º ed. LTC, 2017.

RAUBER, F. O.; OLIVEIRA, I. L. D.; DUTRA, V. F. P. III Competição Estrutural Mola como ferramenta de integração dos calouros de Engenharia Civil ao curso. XV SALÃO DE ENSINO DA UFRGS. **Anais...**, 2019.

SORIANO, H. L.; LIMA, S. DE S. **Análise de Estruturas: Método das Forças e Método dos Deslocamentos**. 2a edição ed. Editora Ciência Moderna, 2006.

SUSSEKIND, J. C. **Curso de Análise Estrutural 3: Método das Deformações; Processo de Cross**. Porto Alegre, 1978.

TENG, J. G.; SONG, C. Y.; YUAN, X. F. Fostering Creativity in Students in the Teaching of Structural Analysis. **International Journal of Engineering Education**, v. 20, n. 1, p. 96–102, 2004.

TIBONI, G. R. **INOVAÇÕES NO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ (UFPR) SOB A ÓTICA DAS METODOLOGIAS ATIVAS**, 2018. UFPR.

THE USE OF MOLA STRUCTURAL KIT IN THE TEACHING OF THE STIFFNESS METHOD

Abstract: *The stiffness method is a major concept in the structural analysis. The comprehension of the abstract mathematical tools and complex physical concepts behind the method is a hard task for many civil engineering students. Visual models such as the Mola Structural Kit could be an adequate tool to overcome such difficulties. This work describes four activities used to illustrate and teach the stiffness method. The activities involve important concepts such as nodal displacements, rigid plates, axially rigid members, kinematical determination, stiffness coefficients and bracing systems. The evaluation and feedback confirm the positive impact of the used activities to enhance the learning process.*

Keywords: *structural analysis, education, Problem Based Learning*

