

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**FABIANA DIAS DE MAGALHÃES**

**DESENVOLVIMENTO DE PROTÓTIPOS DIDÁTICOS PARA O ENSINO DA  
DISCIPLINA DE CONSTRUÇÕES EM AÇO**

**APUCARANA**

**2023**

**FABIANA DIAS DE MAGALHÃES**

**DESENVOLVIMENTO DE PROTÓTIPOS DIDÁTICOS PARA O ENSINO DA  
DISCIPLINA DE CONSTRUÇÕES EM AÇO**

**Development of didactic prototypes for teaching the  
subject of steel constructions**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação  
apresentado como requisito para obtenção do título de  
Bacharel em Engenharia Civil pela Universidade  
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).  
Orientador: Prof. Dr. Rodolfo Krul Tessari  
Coorientador: Prof. Dr. Thales Eugenio Portes de  
Almeida

**APUCARANA**

**2023**



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

**FABIANA DIAS DE MAGALHÃES**

**DESENVOLVIMENTO DE PROTÓTIPOS DIDÁTICOS PARA O ENSINO DA  
DISCIPLINA DE CONSTRUÇÕES EM AÇO**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação  
apresentado como requisito para obtenção do título de  
Bacharel em Engenharia Civil pela Universidade  
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).  
Orientador: Prof. Dr. Rodolfo Krul Tessari  
Coorientador: Prof. Dr. Thales Eugenio Portes de  
Almeida

Data de aprovação: 14/junho/2023

---

Rodolfo Krul Tessari  
Doutor  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Thales Eugenio Portes de Almeida  
Doutor  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Sarah Honorato Lopes da Silva  
Doutora  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Mauro Edson Alberti  
Mestre  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

**APUCARANA**

**2023**

Dedico este trabalho ao meu pai Raimundo Nonato  
(in memoriam), o maior incentivador do meu sonho,  
com todo meu amor e gratidão.

## AGRADECIMENTOS

A família é o primeiro núcleo social que possuímos. Ela nos orienta e apoia durante a vida, e à minha família sou grata por tudo o que conquistei até aqui. Agradeço, primeiramente, aos meus pais, a base para a concretização desse sonho. Ao meu pai, Raimundo (*in memoriam*), agradeço por todo o amor dedicado a mim e ao apoio incondicional na conquista dos meus objetivos. Mesmo em sua partida precoce, foi o pilar que me sustentou durante o restante da graduação e na realização desse trabalho. Para você, pai, eu sempre fui capaz de conquistar o mundo. Muito obrigada por me ajudar a tornar tudo isso possível. À minha mãe, Maria de Fatima, sou grata por todo o amor, apoio e confiança. Foi quem me manteve erguida na fase mais difícil da minha vida, quem me disse que seria capaz de enfrentar tudo e terminar o que comecei. Ao meu irmão, Victor, por quem tenho enorme admiração por seguir firme nessa mesma jornada, agradeço por todo auxílio, amor e paciência. E à minha madrinha, Sinalva, agradeço por todo incentivo e apoio.

Minha gratidão ao meu orientador e amigo, Rodolfo Tessari, que sempre me orientou com primor, não somente nesse trabalho, como nas monitorias que ministrei e nas demais disciplinas do curso. Professor, serei eternamente grata por todo o suporte acadêmico e emocional que conferiu a mim para que eu finalizasse o curso com excelência, mesmo diante da perda do meu pai. Você se tornou não apenas minha referência profissional, mas humana.

Ao meu amigo Marcos e sua mãe, Dona Nelzir, sou grata por todo o incentivo e apoio durante a graduação. A minha eterna gratidão à minha amiga Maria Fernanda e sua família, que me deram o amparo necessário para finalizar o curso. Maria, sou grata por toda a jornada que percorremos juntas, repleta de muitos aprendizados e momentos felizes.

À Universidade Tecnológica Federal do Paraná, sou grata por me proporcionar o ensino de qualidade que sempre sonhei. A excelência e o profissionalismo são ensinamentos que carregarei comigo.

Agradeço ao Professor Dr. Thales Almeida, juntamente aos técnicos de laboratório do FabLab Livre SP, Marcix e Jhonny, por todo o auxílio no desenvolvimento desse trabalho. À Jessica Rocha, minha supervisora de estágio, sou grata por todo o apoio e confiança.

Por fim, agradeço à Deus por me iluminar e guiar nesta trajetória.

Ensinar não é transferir conhecimento, mas criar as possibilidades para a sua própria produção ou a sua construção.  
(FREIRE, 1996)

## RESUMO

O ensino da engenharia estrutural tradicionalmente se pauta em aulas estritamente teóricas e em rotinas de cálculo. Esse tipo de prática resulta na formação de muitos profissionais altamente competentes em modelagem matemática, mas completamente inexperientes na aplicação real. A aprendizagem através da experimentação é essencial no processo pedagógico, sendo essa premissa teorizada por muitos filósofos e estudiosos de educação. A experimentação dentro do ensino da engenharia pode ser feita através do uso de modelos físicos em escala real ou reduzida. Os modelos físicos permitem uma análise qualitativa dos fenômenos estudados, de modo que possibilita fazer uma ponte entre esses fenômenos e os modelos teóricos e matemáticos. O dimensionamento de estruturas metálicas é de ordem complexa e muitas vezes abstrata. Nesse sentido, o presente trabalho objetivou a criação de protótipos didáticos para demonstração dos mecanismos de falha aos quais as estruturas em aço estão sujeitas e são verificadas pela NBR 8800 (ABNT, 2008). Assim, foram desenvolvidos modelos físicos qualitativos para demonstração dos modos de ruptura que ocorrem em ligações parafusadas sujeitas a esforços de tração e em vigas sob flexão. A respeito das ligações parafusadas, foram desenvolvidos protótipos para demonstração da ruptura por corte dos conectores, ruptura por ovalização do furo, colapso devido à ruptura da seção líquida efetiva e cisalhamento de bloco. No caso da viga sob flexão, os modos de ruptura demonstrados são: colapso por perda da estabilidade global e local. Os protótipos foram confeccionados utilizando polímeros e MDF, através da impressão 3D, corte a laser e uso de moldes. Os modelos foram testados e avaliados quanto a efetividade na demonstração dos fenômenos elencados, tendo uma performance satisfatória. Seu uso tem grande potencial para contribuir para o ensino-aprendizagem dos fenômenos representados por cada um dos protótipos, interligando a manifestação física dos modos de falha observáveis aos modelos teóricos presentes na NBR 8800.

Palavras-chave: ensino-aprendizagem; estruturas metálicas; impressão 3D; modelos em escala reduzida.

## **ABSTRACT**

Structural engineering teaching is traditionally based on strictly theoretical classes and calculation routines. This type of practice results in highly competent professionals in mathematical modeling, but completely inexperienced in real applications. Learning through experimentation is essential in the pedagogical process. This premise is theorized by many philosophers and education experts. Experimentation in engineering can be done using full or reduced-scale physical models. Physical models allow a qualitative analysis of the studied phenomena so that it is possible to link these phenomena to the theoretical and mathematical models. The design of steel structures is complex and often abstract. For that matter, the present work aimed to create didactic prototypes for the demonstration of the failure mechanisms to which steel structures are subjected to and verified by the NBR 8800 (ABNT, 2008). Thus, qualitative physical models were developed to demonstrate the failure modes that occur in tensile bolted connections and in beams under bending. Regarding bolted connections, prototypes were developed to demonstrate rupture by shear of the connectors, rupture by hole ovalization, collapse due to rupture of the effective net section, and block shear. In the case of the beam under bending, the failure modes demonstrated are the collapse due to loss of global and local stability. The prototypes were made using polymers and MDF, through 3D printing, laser cutting, and the use of molds. The models were tested and evaluated for their effectiveness in demonstrating the listed phenomena, with satisfactory performance. Their use has great potential to contribute to the teaching-learning of the phenomena represented by each of the prototypes, connecting the physical manifestation of the observable failure modes to the theoretical models present in NBR 8800.

**Keywords:** teaching-learning; steel structures; 3D printing; reduced-scale models.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 - Ciclo de aprendizagem experiencial.....	24
Figura 2.2 – Analogia das seções transversais de uma viga com os passos de uma mola.....	30
Figura 2.3 - Deslocamento lateral de um pilar devido a um carregamento aplicado e modelo teórico de análise do fenômeno.....	31
Figura 2.4 – Primeiros croquis propostos por Lobosco e Câmara.....	32
Figura 2.5 - Primeiro conjunto de peças em MDF propostos por Lobosco. ....	33
Figura 2.6 - Primeiras montagens com o conjunto de peças em MDF. ....	33
Figura 2.7 - Conjunto final de peças, composto por apenas três elementos distintos. ....	34
Figura 2.8 - Esquema de montagem do protótipo final.....	34
Figura 2.9 - Montagem do protótipo final demonstrando a construção de pilares vigas e lajes. ....	34
Figura 2.10 - Representação e modelo físico do cisalhamento em ligação soldada.....	35
Figura 2.11 – Representação e modelo físico do cisalhamento em ligação parafusada. ....	35
Figura 2.12 - Comportamento de uma peça com furo sob tensões normais no regime elástico e de escoamento. ....	37
Figura 2.13 – Colapso por cisalhamento de bloco. ....	38
Figura 2.14 - Flambagem global por flexão e flambagem local.....	39
Figura 2.15 - Coeficientes de flambagem por flexão de elementos isolados.....	41
Figura 2.16 – Flambagem local e flambagem lateral em vigas.....	42
Figura 2.17 – Flambagem lateral com torção de viga biapoiada.....	42
Figura 2.18 – Flambagem local da mesa comprimida em viga I fletida no plano da alma.....	43
Figura 2.19 – Flambagem local da alma devido ao momento fletor. ....	43
Figura 2.20 – Ligação do tipo apoio. ....	45
Figura 2.21 – Ligação por atrito. ....	45
Figura 2.22 – Classificação da ligação quanto ao esforço solicitante dos conectores.....	46
Figura 2.23 – Ligação com conectores. ....	46
Figura 2.24 – Modos de ruptura de uma ligação com conectores.....	47
Figura 3.1 - Fluxograma do desenvolvimento da pesquisa.....	48
Figura 3.2 - Fluxograma do processo de impressão 3D. ....	50
Figura 3.3 - Fluxograma do processo de fabricação por moldes. ....	52
Figura 4.1 - Modelagem 3D do parafuso seccionado.....	54
Figura 4.2 - Croqui inicial protótipo da chapa plana.....	55
Figura 4.3 - Dimensões iniciais em milímetros do protótipo das chapas planas.....	57
Figura 4.4 - Modelagem 3D do protótipo das chapas planas.....	57
Figura 4.5 - Fatiamento dos parafusos para impressão.....	58
Figura 4.6 - Adaptação das peças para conexão com imã de disco 10x4 mm...59	59
Figura 4.7 - Adaptação das peças para modelo com aba e calha deslizante.....59	59
Figura 4.8 - Peças de travamento dos componentes do protótipo.....	60

Figura 4.9 - Componentes do modelo final do protótipo das chapas planas.....	61
Figura 4.10 - Representação da ruptura do fuste dos conectores.....	62
Figura 4.11 - Aplicação do protótipo para a representação da ruptura por ovalização do furo .....	63
Figura 4.12 - Chapa de aço com deformação excessiva do furo (esmagamento).....	64
Figura 4.13 - Aplicação do protótipo para a representação da ruptura por ovalização do furo .....	65
Figura 4.14 - Colapso da chapa por rasgamento.....	66
Figura 4.15 - Aplicação do protótipo para representação da ruptura por rasgamento da chapa.....	67
Figura 4.16 – Colapso da chapa por ruptura da seção líquida.....	68
Figura 4.17 – Aplicação do protótipo para a representação do colapso ocasionado pela ruptura da seção líquida.....	69
Figura 4.18 – Ruptura da chapa por cisalhamento de bloco.....	70
Figura 4.19 – Aplicação do protótipo para a representação da ruptura por cisalhamento de bloco.....	71
Figura 4.20 – Dimensões iniciais do protótipo de ligação de cantoneiras.....	73
Figura 4.21 – Modelagem 3D inicial do protótipo de ligação por cantoneiras...	74
Figura 4.22 – Croqui com adaptação do protótipo de ligação de cantoneiras para utilização de EVA.....	75
Figura 4.23 – Dimensões em milímetros da chapa de ligação do protótipo.....	76
Figura 4.24 – Esquema de união das cantoneiras à chapa de ligação.....	76
Figura 4.25 – Modelagem 3D do protótipo para representação da ruptura da seção líquida .....	77
Figura 4.26 – Componentes do modelo final do protótipo de ligação por cantoneiras .....	78
Figura 4.27 – Aplicação do protótipo de ligação por cantoneiras na representação do nó superior de uma treliça.....	79
Figura 4.28 – Aplicação do protótipo de ligação por cantoneiras na representação da ruptura por cisalhamento de bloco para furos alinhados.....	80
Figura 4.29 – Aplicação do protótipo de ligação por cantoneiras na representação da ruptura por tração da seção líquida.....	81
Figura 4.30 – Dimensões em milímetros da viga de silicone a ser confeccionada.....	83
Figura 4.31 – Modelagem do molde para confecção da viga de silicone.....	84
Figura 4.32 – Modelagem dos: (a) enrijecedores; (b) contensão lateral; (c) apoios da viga de silicone.....	85
Figura 4.33 – Execução do corte das peças na máquina de corte a laser.....	85
Figura 4.34 – Molde da viga de silicone montado.....	86
Figura 4.35 – Pesagem dos materiais para confecção da viga de silicone.....	87
Figura 4.36 – Moldagem da viga de silicone.....	87
Figura 4.37 – Viga de silicone após desforma.....	88
Figura 4.38 – Dimensões em milímetros da nova viga a ser confeccionada.....	89
Figura 4.39 – Componentes do modelo final do protótipo de viga de silicone...	90

<b>Figura 4.40 – Colapso da viga por perda de estabilidade global: Flambagem lateral com torção.....</b>	<b>91</b>
<b>Figura 4.41 – Aplicação do protótipo da viga de silicone na representação da flambagem lateral com torção.....</b>	<b>92</b>
<b>Figura 4.42 – Colapso da viga por perda de estabilidade local: Flambagem local da mesa.....</b>	<b>93</b>
<b>Figura 4.43 – Aplicação do protótipo da viga de silicone na representação da flambagem local da mesa.....</b>	<b>94</b>

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A_t$	Área tracionada
$A_v$	Área cisalhada
$F_{t,Rd}$	Força de tração resistente de cálculo do parafuso
$F_{v,Rd}$	Força de corte resistente de cálculo do parafuso
$K$	Coefficiente de flambagem
$M_{Rd}$	Momento fletor resistente de cálculo
$M_{Sd}$	Momento fletor solicitante de cálculo
$N_{c,Sd}$	Força axial de compressão solicitante de cálculo
$N_{c,Rd}$	Força axial de compressão resistente de cálculo
$N_{t,Sd}$	Força axial de tração solicitante de cálculo
$N_{t,Rd}$	Força axial de tração resistente de cálculo
$V_{Rd}$	Força cortante resistente de cálculo
$V_{Sd}$	Força cortante solicitante de cálculo
$\sigma_N$	Tensão normal
$\sigma_r$	Tensão residual

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>15</b>
1.1 Objetivo Geral	17
1.2 Objetivos Específicos	17
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO</b>	<b>18</b>
<b>2.1 Métodos de Ensino e Aprendizagem na Engenharia</b>	<b>18</b>
2.1.1 A Teoria da Aprendizagem Experiencial	22
2.1.2 Modelos matemáticos abstratos e o ensino da engenharia estrutural	25
2.1.3 Modelos qualitativos e o ensino da engenharia estrutural	27
<b>2.2 Modelos estruturais qualitativos existentes</b>	<b>28</b>
2.2.1 Maquete estrutural (KIT MOLA)	29
2.2.2 Modelo qualitativo didático de Lobosco <i>et al.</i> (2019)	31
2.2.3 Modelos qualitativos didáticos Milagres <i>et al.</i> (2021)	35
<b>2.3 Projeto de estruturas metálicas segundo a NBR 8800</b>	<b>36</b>
2.3.1 Peças tracionadas	36
2.3.2 Peças comprimidas	39
<u>2.3.2.1 Flambagem por flexão</u>	40
<u>2.3.2.1.1 Comprimento de flambagem</u>	40
2.3.3 Peças fletidas	41
2.3.4 Ligações	44
2.3.4.1 Ligações parafusadas	44
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>48</b>
<b>3.1 Impressão 3D</b>	<b>49</b>
<b>3.2 Moldes para fabricação em silicone</b>	<b>51</b>
<b>4 PROTÓTIPOS</b>	<b>53</b>
<b>4.1 Protótipo de ligação entre chapas planas</b>	<b>53</b>
4.1.1 Confeção	53
<u>4.1.1.1 Modelagem e impressão</u>	55
<u>4.1.1.2 Aperfeiçoamento do modelo</u>	58
4.1.2 Modelo final e modos de falha demonstráveis	60
<u>4.1.2.1 Ruptura por corte do fuste do conector</u>	61
<u>4.1.2.2 Ruptura por ovalização do furo</u>	64
<u>4.1.2.3 Ruptura por rasgamento da chapa entre o furo e a borda</u>	65
<u>4.1.2.4 Ruptura por tração da chapa na seção líquida</u>	67

<u>4.1.2.5 Cisalhamento de bloco</u>	70
<b>4.2 Protótipo de ligação de cantoneiras</b>	<b>72</b>
4.2.1 Confeção	72
<u>4.2.1.1 Modelagem e impressão</u>	72
4.2.2 Modelo final e modos de falha demonstráveis	77
<u>4.2.2.1 Nó superior de ligação de uma treliça</u>	79
<u>4.2.2.2 Cisalhamento de bloco de furos alinhados</u>	80
<u>4.2.2.3 Ruptura por tração da chapa na seção líquida</u>	81
<b>4.3 Protótipo de viga</b>	<b>82</b>
4.3.1 Confeção	82
<u>4.3.1.1 Modelagem e fabricação</u>	83
<u>4.3.1.2 Adaptações do modelo</u>	88
4.3.2 Modelo final e modos de falha demonstráveis	89
<u>4.3.2.1 Flambagem lateral com torção (FLT)</u>	90
<u>4.3.2.2 Flambagem local da mesa (FLM)</u>	92
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>95</b>
<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>97</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O princípio básico de um projeto estrutural é determinar a resistência, rigidez e estabilidade de um arranjo estrutural, de forma que ele seja suficiente para suportar os carregamentos aos quais está sujeito, de uma maneira econômica e coerente. Entretanto, para atender a essas exigências, é necessário que o projetista tenha noção de como suas escolhas afetam o conjunto estrutural (WHITEHEAD, 2019).

A busca por soluções estruturais mais eficientes e econômicas faz com que os projetistas procurem análises estruturais mais refinadas, sendo o cálculo computacional a principal ferramenta para esse fim atualmente. À vista disso, existem inúmeras soluções estruturais e construtivas que podem ser adotadas, cabendo ao engenheiro estrutural adequá-las às intenções do projeto arquitetônico, tendo como a maior premissa a garantia de viabilidade da estrutura (OLIVEIRA, 2008a).

A concepção estrutural é o passo inicial antes da simulação numérica, sendo uma das etapas de maior complexidade, devido a necessidade de o projetista ter habilidades intuitivas e criativas de experiência prévia. Essas habilidades e experiências são obtidas através de um estudo aprofundado e da prática profissional. No entanto, por vezes, no ensino da engenharia civil, há negligência dos conteúdos de concepção nas disciplinas estruturais, na qual se esquece dessa fase ou a aborda de maneira superficial, focando nos modelos e análises matemáticas (NÓBREGA; NÓBREGA, 2020).

A engenharia é uma profissão de base científica, mas até o início do século XX, o conhecimento empírico precedia o científico. A análise matemática surgiu na metade do século, quando o engenheiro profissional deu lugar ao engenheiro científico. Essa mudança resultou na formação de muitos profissionais muito competentes no âmbito de modelagem matemática, mas completamente inexperientes na aplicação real. Por volta dos anos 80, houve a percepção do que isso implicava na formação profissional e como havia a necessidade de experiência e experimentação dentro da engenharia, tanto no campo profissional como no acadêmico (BLIKSTEIN, 2014).

A experiência e experimentação tem papel fundamental na aprendizagem, desde o ensino básico até a engenharia. Essa premissa foi teorizada por muitos filósofos e estudiosos da área de educação, como John Dewey, Kurt Lewin, Jean Piaget, Paulo Freire e David Kolb. Em seus trabalhos, todos argumentam como a

experimentação tem papel efetivo na aprendizagem. Pinheiro (2000, p.1) cita Confúcio<sup>1</sup> a respeito desse princípio: “Eu escutei e me esqueci; Eu vi e eu me lembrei; Eu fiz e aí eu entendi!”. Nesse sentido, nota-se como a experiência através de experimentações diretas e intuitivas, para além das simulações numéricas, é de suma importância na formação do engenheiro.

Essa experimentação pode ser feita através de modelos físicos em escala real ou reduzida, permitindo a construção de referências de comportamentos e soluções, tanto na prática real da engenharia quanto no meio acadêmico, através de modelos didáticos. Esses modelos são ferramentas importantes para a aprendizagem, pois desenvolvem no aluno a percepção do comportamento estrutural, o que facilita a analogia entre os fenômenos mecânicos experimentados no modelo e o desenvolvimento da concepção estrutural por meio de modelos numérico-computacionais (LOBOSCO; CÂMARA, 2018). Em contrapartida, tais modelos não são amplamente usados no ensino tradicional da engenharia estrutural, que no geral ainda se pauta em aulas estritamente teóricas e em rotinas de cálculo.

Partindo desses princípios, durante o desenvolvimento da disciplina de Construções Metálicas do curso de Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Campus Apucarana, notou-se como a falta de modelos didáticos qualitativos implicava de maneira negativa no processo de aprendizagem da disciplina. Visto que os mecanismos de falha aos quais as estruturas metálicas estão sujeitas não são de fácil percepção para todos os alunos, como exigir que dimensionem uma estrutura inteira sem que entendam os fenômenos físicos que se sucedem em sua falha e se deseja impedir?

No mercado não existem modelos qualitativos especificamente voltados para a representação dos mecanismos de ruptura das estruturas metálicas. Além disso, há poucos trabalhos científicos que abordam a temática. Dessa maneira, no decorrer desse trabalho almeja-se desenvolver uma metodologia para a confecção de protótipos didáticos qualitativos que representem os mecanismos de colapso de estruturas em aço elencados pela ABNT NBR 8800 (ABNT, 2008). O intuito é que os protótipos sejam duráveis ou de fácil replicação, para uso na disciplina mencionada, como também em outros campi da UTFPR ou em outras instituições de ensino.

---

<sup>1</sup> Confúcio (Kung-Fu-Tze) pensador chinês (551 a 479 AC).



## 1.1 Objetivo Geral

O presente trabalho objetiva desenvolver protótipos didáticos de baixo custo que auxiliem no ensino da disciplina de construções metálicas. O foco é criação de peças que exemplifiquem as situações de falha verificadas no projeto de estruturas em aço, com base na ABNT NBR 8800 (ABNT, 2008).

## 1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- a) Analisar os métodos tradicionais de ensino da engenharia e propor uma nova abordagem pedagógica;
- b) Explicar as principais situações de falha verificadas pela ABNT NBR 8800 no dimensionamento de conexões parafusadas e vigas sob flexão;
- c) Idealizar protótipos para a exemplificação dos modos de falha elencados;
- d) Criar um método de confecção de protótipos duráveis e de fácil replicação;
- e) Avaliar o funcionamento e a eficiência dos protótipos construídos.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo são abordados os conceitos referentes aos métodos tradicionais de ensino da engenharia e sobre novas abordagens pedagógicas. Em seguida, são apresentados modelos de protótipos disponíveis no mercado e já desenvolvidos no meio acadêmico. Por fim, são apresentadas as situações de falha verificadas no dimensionamento de estruturas em aço pela norma ABNT NBR 8800 – *Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios* (ABNT, 2008), especificamente em ligações parafusadas tracionadas e em vigas sujeitas a esforços de flexão.

### 2.1 Métodos de Ensino e Aprendizagem na Engenharia

A engenharia, como uma profissão de base científica, exige uma aptidão para lidar com conceitos abstratos na utilização de tecnologia avançada a fim de resolver problemas do mundo real. A profissão em si não se limita ao domínio das ciências básicas, mas se caracteriza nas ações tomadas para resolver problemas de ordem prática. A partir desses problemas se desenvolvem estruturas físicas, produtos e processos técnicos (KOLB, 2015).

David A. Kolb é um teórico educacional americano, responsável pela Teoria da Aprendizagem Experiencial. Na segunda edição do seu livro, explica como a experimentação é essencial para o processo de aprendizagem, especialmente dentro de cursos superiores com ênfase tecnológica. A experimentação ativa, segundo Kolb (2015), é essencial para um trabalho eficaz nas profissões de base científica como a engenharia, pois essa experimentação permite o desenvolvimento de competências adaptativas.

No entanto, de acordo com Felder e Prince (2006), o ensino da engenharia é tradicionalmente dedutivo:

O instrutor introduz um tópico ensinando princípios gerais, depois usa os princípios para derivar modelos matemáticos, mostra aplicações ilustrativas dos modelos, dá aos alunos prática em derivações e aplicações semelhantes em trabalhos de casa e, finalmente, testa sua capacidade de fazer os mesmos tipos de coisas em exames. (FELDER; PRINCE, 2006, p.123).

Felder e Prince (2006) salientam que no ensino da engenharia e das ciências pouca ou nenhuma atenção é dada a questões do porquê as coisas são feitas de tal maneira e quais fenômenos do mundo real esses modelos matemáticos explicam. Os alunos, em geral, são motivados a aprender, isso quando o são, por sugestões de que o conteúdo será importante mais tarde durante o curso ou em sua vida profissional.

Os métodos tradicionais de ensino, seja na engenharia ou nos cursos de ensino básico, seguem a concepção de “*educação bancária*”, explanada pelo educador e filósofo Paulo Freire. A educação é dita bancária quando se torna um ato de depositar, em que os alunos são os depositários e o professor o depositante. Isso significa que o professor apresenta um conteúdo e os alunos o recebem passivamente, fixando, memorizando e repetindo sem a menor criticidade sobre o significado do que foi transmitido (FREIRE, 1987).

De acordo com Albanese e Mitchell (1993), é um princípio da psicologia educacional que as pessoas são estimuladas a aprender coisas que veem a real necessidade de saber. O método de ensino indutivo, segundo Felder e Prince (2006), é eficaz nesse sentido. Esse método parte da interpretação de observações ou dados experimentais, análise de estudos de caso e resolução de problemas reais de ordem complexa. A partir da análise de dados ou da tentativa da resolução do problema, os alunos geram uma necessidade de fatos, regras, procedimentos e princípios. Dada a necessidade de informações de cunho teórico é que eles são apresentados aos alunos, ou então eles são conduzidos a descobri-los por si mesmos.

Os métodos indutivos são centrados no aluno, ou seja, eles impõem mais responsabilidade aos alunos no seu processo de aprendizagem. Os métodos são baseados em aprendizagem ativa e colaborativa, ou seja, colocam os alunos como atores principais do seu conhecimento, através de discussão e resolução de problemas, geralmente trabalhando em grupo. Esses métodos podem ser caracterizados como *construtivistas*, visto que são baseados na ideia de que os alunos constroem suas próprias versões da realidade, não sendo meramente ouvintes passivos que absorvem as versões apresentadas por seus professores (FELDER; PRINCE, 2006).

Felder e Prince (2006) questionam se a aprendizagem indutiva é realmente indutiva. Eles concluem que, na prática, o processo de ensino e de aprendizagem, assim como o método científico, não pode ser exclusivamente indutivo ou dedutivo. Na realidade, caminha em ambas as direções. O aluno, a partir de observações, infere

regras e teorias (indução) e depois testa essas teorias para deduzir consequências e aplicações (dedução). Assim, os autores defendem que a indução deve preceder a dedução, ao passo que um ensino de qualidade auxilia os alunos a utilizar as duas coisas.

Os métodos de aprendizagem indutivos devem ser adequados aos objetivos do educador, com base na experiência prévia dele e de seus alunos com métodos de ensino centrados no aluno, da confiança do instrutor em seu conhecimento do conteúdo e habilidade de ensino. Ou seja, não existe o melhor método a ser aplicado, cabendo ao professor decidir o que é mais eficaz no desenvolvimento das competências de seus alunos (FELDER; PRINCE, 2006).

O ensino e aprendizagem indutiva se fundamentam, segundo Felder e Prince (2006) em quatro conceitos: no construtivismo, na pesquisa de cognição, no desenvolvimento intelectual e nos ciclos de aprendizagem.

Feitosa (2016) define que o construtivismo é uma concepção de conhecimento, um conjunto de princípios, não meramente um método. A autora cita Piaget ao dizer que todo o conhecimento consiste em formular novos problemas, à medida que os precedentes foram resolvidos, sendo o conhecimento uma atividade que se constrói incessantemente, através de permutas entre o organismo e o meio. A aprendizagem no construtivismo se dá pela curiosidade epistemológica e o papel do educador é de guiar o aluno no processo investigativo, tornando o educando sujeito ativo no processo de aquisição do conhecimento. “O construtivismo reconhece como sujeito ativo aquele que compara, exclui, ordena, categoriza, reformula, comprova, formula hipóteses e reorganiza o conhecimento em ação efetiva, ou interiorizada.” (FEITOSA, 2016, p. 3).

Bransford *et al.* (2000), no livro “*How People Learn: Brain, Mind, Experience*” (em tradução literal “Como as pessoas aprendem: Cérebro, Mente, Experiência”), entregam uma extensa pesquisa de questões neurológicas e psicológicas que embasam os métodos indutivos de aprendizagem. Os autores chegaram à conclusão de que a instrução é influenciada pelo conhecimento prévio, podendo eliminar ou gerar equívocos ao longo do processo de aprendizagem.

Felder e Prince (2006) evidenciam que os métodos tradicionais de ensino em engenharia e ciência geralmente não consideram a premissa de que o conhecimento prévio tem papel fundamental nos processos de aprendizagem, apresentando teorias, fórmulas e cálculos sem considerar a base e experiência dos alunos com o assunto.

Os métodos indutivos, no entanto, apresentam novas informações em um contexto que os alunos possam se identificar e relacionar, aumentando a chance de que essas informações sejam vinculadas a estruturas cognitivas existentes. Bell (1982, *apud* BRANSFORD *et al.*, 2000) fala sobre a importância do “ensino diagnóstico”, em que o educador tenta descobrir o que os alunos pensam em relação ao assunto em questão, discute os equívocos existentes de uma maneira sensível, guiando para um reajuste de ideias.

O desenvolvimento intelectual está atrelado à profundidade em que o aluno está inclinado a abordar o aprendizado. Os cursos de engenharia e ciências objetivam formar profissionais especialistas em suas áreas. Porém, para alcançar esse objetivo, é necessário que a universidade instigue o aluno a adotar uma abordagem profunda dos assuntos que são importantes para o seu desenvolvimento profissional e pessoal. A abordagem profunda por parte do aluno deve ser motivada por problemas autênticos, que demonstrem a importância do desenvolvimento do assunto para situações reais. Quando isso é feito, a memorização mecânica e a substituição algorítmica simples tornam-se estratégias inadequadas e ineficazes. Assim, o aluno consegue perceber a necessidade e importância do empenho no processo de aprendizagem (FELDER; PRINCE, 2006).

Os ciclos de aprendizagem são aplicados em muitos modelos de ensino. Nesses ciclos, os alunos trabalham com uma sequência de atividades que envolvem pensamento complementar e resolução de problemas. De maneira geral, as atividades são esboçadas para apelar a diferentes preferências de estilo de aprendizagem (concreto e abstrato, ativo e reflexivo etc.) (FELDER, 1996).

O mais conhecido desses ciclos está associado ao modelo de aprendizagem experiencial de David A. Kolb. O ensino com base no ciclo de Kolb envolve quatro fases: (1) propor um problema, relacionando-o aos interesses dos alunos, a fim de motivá-los; (2) oportunizar um processo reflexivo a respeito de fatos, observações, princípios, teorias e os métodos de resolução de problemas apresentados; (3) oferecer uma prática guiada para a resolução dos problemas, como aplicar os métodos aprendidos; e (4) incentivar a exploração das possibilidades a partir do que foi aprendido (FELDER; PRINCE, 2006).

### 2.1.1 A Teoria da Aprendizagem Experiencial

A Teoria de Aprendizagem Experiencial (TAE), enunciada por David A. Kolb em 1984, tem origem intelectual nos trabalhos de Lewin, Dewey e Piaget sobre modelos de aprendizagem. A TAE foi desenvolvida a partir de uma abordagem global e integradora do processo de aprendizagem, combinando experiência, percepção, cognição e comportamento (KOLB, 2015).

O modelo de Lewin se baseia em técnicas de pesquisa-ação e no método laboratorial. O aprendizado é facilitado pela experiência momentânea, seguida pela coleta de dados e observações sobre essa experiência. Lewin elucida a importância do *feedback* para mapear os desvios no alcance das metas desejadas e no processo de aprendizagem. O modelo de Dewey é semelhante ao modelo de Lewin, somente se distanciam no fato de que, para Dewey, o propósito das ações são para além do *feedback*; elas descrevem como o aprendizado transforma os impulsos, sentimentos e desejos de experiência concreta em ação intencional de ordem superior (KOLB, 2015).

O modelo de aprendizagem proposto por Piaget, segundo Kolb (2015), é um ciclo de interação entre o indivíduo e o ambiente, o que se aproxima dos pensamentos de Dewey e Lewin:

O processo de aprendizagem pelo qual esse desenvolvimento ocorre é um ciclo de interação entre o indivíduo e o ambiente que se assemelha aos modelos de aprendizagem de Dewey e Lewin. Nos termos de Piaget, a chave da aprendizagem está na interação mútua do processo de acomodação de conceitos ou esquemas à experiência no mundo e no processo de assimilação de eventos e experiências do mundo em conceitos e esquemas existentes.[...] O processo de crescimento cognitivo do concreto para o abstrato e do ativo para o reflexivo baseia-se nessa transação contínua entre assimilação e acomodação, ocorrendo em estágios sucessivos, cada um dos quais incorporando o que aconteceu antes em um novo e mais alto nível de funcionamento cognitivo. (KOLB, 2015, p. 34).

Kolb (2015), ao enunciar a TAE, considerou os pontos de aproximação entre os modelos propostos por Lewin, Dewey e Piaget, destacando a importância da experiência no desenvolvimento da aprendizagem e do conhecimento. A TAE se fundamenta em seis proposições a respeito da aprendizagem:

1. A aprendizagem é mais bem concebida como um processo, não em termos de resultados. Kolb argumenta que a TAE, diferente da educação tradicional e

das teorias comportamentais de aprendizagem, não tem a tendência de limitar o processo educativo e de aprendizado a conhecimentos acumulados. Para a teoria de aprendizagem experiencial, as ideias não são elementos fixos e imutáveis de pensamento, mas são formuladas e reformuladas através da experiência (KOLB, 2015). O autor faz a síntese dessa ideia baseado em Freire (1987, p. 33), ao dizer “só existe saber na invenção, na reinvenção, na busca inquieta, impaciente, permanente, que os homens fazem no mundo, com o mundo e com os outros”;

2. A aprendizagem é um processo contínuo fundamentado na experiência. Kolb (2015) diz que esse fato implica que todo aprendizado é um processo de reaprender, ou seja, o aluno não é uma tela em branco, suas experiências prévias interferem no aprendizado. Se o processo de educação iniciar da análise dessas experiências prévias, será mais fácil integrar novas ideias e refinar as já existentes, o que mostra a continuidade do processo;

3. O processo de aprendizagem requer a resolução de conflitos entre modos dialeticamente opostos de adaptação ao mundo. Kolb (2015) diz que os modelos de Lewin, Dewey e Piaget sugerem que a aprendizagem é um processo de tensão e conflito. Novos conhecimentos e habilidades são conquistados através dos quatro modos de aprendizagem experiencial: experiência concreta, observação reflexiva, conceituação abstrata e experimentação ativa.

4. A aprendizagem é um processo holístico de adaptação do mundo. A aprendizagem não se limita à cognição ou percepção, ela envolve funções integradas de todo o organismo humano – pensamento, sentimento, percepção e comportamento (KOLB, 2015);

5. A aprendizagem envolve transações entre a pessoa e o ambiente. Kolb (2015) explicita que essa proposição parece óbvia, mas as implicações disso geralmente são ignoradas na prática da educação. A aprendizagem é tratada como um processo pessoal interno, que necessita apenas de um ambiente limitado com livros, professor e sala de aula. Os sistemas educacionais

algumas vezes ativamente rejeitam o ambiente mais amplo do “mundo real” na prática da educação;

6. A aprendizagem é o processo de criação do conhecimento. O conhecimento é o resultado da transação entre o conhecimento social e o conhecimento pessoal. Dewey observou que o conhecimento social, é a acumulação objetiva e civilizada da experiência cultural humana anterior, enquanto o conhecimento pessoal é a acumulação das experiências subjetivas de vida do indivíduo (KOLB, 2015).

Kolb (2015) define, por fim, que a aprendizagem é o processo pelo qual o conhecimento é criado através da transformação da experiência. A Teoria da Aprendizagem Experiencial é uma visão dinâmica da aprendizagem, que se baseia no ciclo de aprendizagem, a fim de resolver a dupla dialética ação/reflexão e experiência/abstração. O ciclo de aprendizagem descrito por Kolb está ilustrado na Figura 2.1, que mostra as quatro fases do aprendizado: Experiência Concreta (CE): envolvimento livre de preconceitos, aberto as novas experiências; Observação Reflexiva (RO): observação e reflexão de diversas perspectivas sobre o processo experimental; Conceituação Abstrata (AC): criação de uma teoria lógica que integre os conceitos observados; Experimentação Ativa (AE): aplicação das teorias na tomada de decisões e resolução dos problemas.

**Figura 2.1 - Ciclo de aprendizagem experiencial**



Fonte: ALVES e TOMETICH (2018, p. 65).



### 2.1.2 Modelos matemáticos abstratos e o ensino da engenharia estrutural

Uma etapa fundamental no projeto de uma edificação é a concepção estrutural. Nesse momento, são escolhidos os elementos estruturais para compor o edifício e a partir daí se faz a análise estrutural. A análise estrutural nada mais é do que a previsão do comportamento de uma estrutura com base em cálculos. Na etapa de cálculo, são aplicadas teorias físicas e matemáticas que dão base à ciência que é a engenharia estrutural (OLIVEIRA, 2008a).

O procedimento inicial é a criação de um modelo analítico baseado na concepção estrutural. Esse modelo representa matematicamente a estrutura a ser analisada e envolve as hipóteses e teorias previstas a respeito do comportamento estrutural. As hipóteses têm base nas leis físicas de equilíbrio entre forças e tensões, compatibilidade de deslocamentos e deformações e nas leis constitutivas dos materiais da estrutura (OLIVEIRA, 2008a).

“A criação do modelo estrutural de uma estrutura real é uma das tarefas mais importantes da análise estrutural. Essa tarefa pode ser bastante complexa, dependendo do tipo de estrutura e da sua importância.” (OLIVEIRA, 2008a, p. 33). A partir disso, Nóbrega e Nóbrega (2020) evidenciam a problemática de uma concepção estrutural deficiente, pois isso interfere nas etapas seguintes. Um arranjo estrutural inadequado interfere diretamente no modelo analítico, o que prejudica a viabilidade da edificação, isso desde os arranjos mais complexos até os mais simples. Eles destacam que, historicamente, grande parte dos acidentes estruturais tem origem em equívocos nas etapas de concepção.

Nóbrega e Nóbrega (2020) caracterizam a concepção estrutural como a fase mais importante e de mais difícil operação, a qual necessita de habilidades intuitivas e criativas, de experiência prévia. No entanto, essas habilidades e experiências são adquiridas através de muito estudo e prática do profissional da engenharia estrutural. Os autores destacam que, em geral, as disciplinas de estruturas dos cursos de engenharia civil negligenciam o ensino de concepção, esquecendo dessa fase ou abordando de forma superficial e focando nas rotinas de cálculo.

Oliveira (2008b) salienta que, usualmente, as disciplinas de estruturas são ministradas por via analítica, não considerando a estrutura como um fenômeno, as noções qualitativas e o desenvolvimento da intuição são negligenciados. Para Calatrava (2003), a engenharia normalmente se resume a modelos matemáticos

abstratos, o que é prejudicial para a compreensão das dimensões sociais, ambientais e estéticas por parte do engenheiro. O ensino da engenharia estrutural por meio da matemática é essencial, mas não suficiente. É necessário ter consciência de que os números são verificadores e não formadores (OLIVEIRA, 2008b).

O Engenheiro e Professor Aluizio Fontana Margarido diz que há pouco mais de um século, antes do advento do cálculo estrutural moderno, as estruturas eram concebidas de forma empírica (RABELLO, 2000). Os construtores do passado adquiriam experiência sobre os fenômenos estruturais de forma qualitativa. No momento atual, isso não é mais necessário, mas há ainda a necessidade de entender as estruturas de forma qualitativa, desenvolver intuição. O aluno de engenharia deve estar capacitado quanto à forma, à função e à tecnologia da construção. Deve desenvolver a percepção estrutural e o conhecimento teórico do cálculo.

Margarido (RABELLO, 2000, prefácio) fala sobre como o homem convive qualitativamente e com grande intimidade com alguns fenômenos dinâmicos: “O homem é capaz de lançar uma pedra num determinado ponto com grande precisão, avaliando o peso da pedra, o ângulo de lançamento e a quantidade de tempo que ele deve aplicar à força para dar o impulso necessário à pedra.” No entanto, quando está diante de problemas estruturais, encontra grande dificuldade em enxergar o fenômeno físico pelo aspecto qualitativo, que em geral é a primeira percepção do problema:

Por que essa dificuldade?

A razão é simples: as grandezas físicas colocadas em jogo são pequenas para nossa percepção orgânica. Assim, nós não temos a experiência, que tão bem nos orienta ao jogarmos uma pedra e nos falta totalmente quando queremos imaginar uma estrutura deformada ou rapidamente intuir dimensões que uma viga deve ter para resistir às cargas que o homem também nunca conseguiu avaliar com suas próprias forças. (RABELLO, 2000, prefácio).

Polillo (1968, *apud* OLIVEIRA, 2008b) diz que a concepção estrutural é uma produção que advém de um conjunto complexo de conhecimentos técnico-científicos e artísticos, os quais são aperfeiçoados pela experiência, mas que a semente deve ser muito bem plantada nas universidades. Os modelos qualitativos são ferramentas que permitem, ao profissional ou ao estudante de engenharia, desenvolver a percepção e intuição a respeito dos sistemas estruturais, através da vivência dos ensaios. O profissional, ao aprimorar essa capacidade de percepção, estará mais apto a idealizar uma estrutura (OLIVEIRA, 2008b).

### 2.1.3 Modelos qualitativos e o ensino da engenharia estrutural

Hossdorf (1974, *apud* OLIVEIRA, 2008b) diz que há três formas de se compreender verdadeiramente um fenômeno físico: através da observação direta, teoricamente ou experimentalmente. Assim sendo, a realidade pode ser simulada por meio de teoria pura (modelo teórico) e através de experimentos (modelo físico).

A ideia de utilizar modelos físicos para a compreensão dos fenômenos da natureza é muito antiga. No processo de projeto arquitetônico e estrutural é muito comum o uso desses modelos para avaliar o comportamento de estruturas (MORAES; NUNES, 2017). De acordo com Otto (1990, *apud* MORAES e NUNES, 2017), Filippo Brunelleschi, no ano de 1418, fez um modelo em escala reduzida do domo da Catedral Santa Maria del Fiori para demonstrar que era possível construir o empreendimento em alvenaria sem o auxílio de andaimes. Antoni Gaudí foi o primeiro a recorrer a modelos físicos tridimensionais de cabos suspensos para avaliar experimentalmente a concepção de uma estrutura. Um modelo idealizado com sacos com chumbo presos com cordas fixas ao teto foi utilizado para determinar os caminhos das forças de compressão que atuam na Cripta da Capela Colónia Guell.

Durante o desenvolvimento da engenharia, experimentos com modelos em escala reduzida sempre exerceram papel importante no dimensionamento estrutural, com aplicações no meio acadêmico, de projetos e industrial. Comumente, esses modelos têm como característica a análise visual dos fenômenos, não sendo possível extrair informações exatas, restringindo a uma análise qualitativa do comportamento estrutural. A vantagem desses modelos estritamente qualitativos é a fácil adaptação a mudanças a respeito das condições da estrutura estudada. (OLIVEIRA, 2008b).

Os modelos qualitativos normalmente apresentam semelhança geométrica direta com a estrutura real (protótipo). Contudo, esses modelos são geralmente constituídos por materiais homogêneos e elásticos, que muitas vezes não se assemelham aos materiais do protótipo. A variabilidade de materiais empregados na confecção de modelos qualitativos é extensa, sendo normalmente aplicados materiais com baixo módulo de elasticidade que acentuem as deformações e deslocamentos, possibilitando a fácil visualização dos fenômenos estruturais (OLIVEIRA, 2008b).

Hilson (1972, *apud* BRITO *et al.*, 2017) salienta a importância da visualização desses fenômenos estruturais por parte dos profissionais da engenharia envolvidos em projeto estrutural. É necessário que eles desenvolvam a habilidade de visualizar e

compreender os comportamentos das estruturas nas mais variadas hipóteses de aplicação de carregamentos. Para que isso seja possível, é importante que o aluno, ainda no curso da graduação, desenvolva essas habilidades intuitivas para a melhor compreensão dos arranjos estruturais e seus comportamentos (BRITO *et al.*, 2017).

Brito *et al.* (2017) ressalta que há mais de 70 anos, os modelos qualitativos são aplicados como ferramenta didática para auxílio na aprendizagem da engenharia de estruturas. Segundo Harris *et al.* (1999, *apud* OLIVEIRA, 2008b), Rathbun foi um dos primeiros a recorrer a modelos qualitativos para práticas didáticas. Em 1934, ele utilizou blocos de madeira presos por arames para demonstrar o comportamento de um arco.

Santos (1983, *apud* BALLAROTTI, 2016) afirma a importância da aplicação de modelos qualitativos no ensino da engenharia estrutural. Ele assegura que o uso adequado de modelos ilustrativos torna mais fácil o entendimento teórico dos fenômenos estruturais, pois ao apresentar uma representação física dos conceitos ensinados, possibilita que os professores introduzam conceitos de uma maneira mais rápida e eficaz. Seu estudo conceitua que modelos qualitativos físicos podem ser úteis, baratos e ainda fáceis de serem construídos.

## **2.2 Modelos estruturais qualitativos existentes**

A aplicação de modelos qualitativos foi e tem sido um instrumento de suma importância na avaliação de sistemas estruturais da engenharia civil (BRITO *et al.*, 2015). Esses modelos podem ter fins puramente didáticos, comerciais ou de pesquisa. Os modelos didáticos, no geral, são desenvolvidos dentro das universidades para aplicação em uma disciplina específica e não possuem divulgação (OLIVEIRA, 2008b).

Tendo isso em vista, Oliveira (2008b), em sua dissertação de mestrado pela Universidade Federal de Ouro Preto, desenvolveu um modelo estrutural qualitativo para a pré-avaliação do comportamento de estruturas metálicas intitulado como “Maquete Estrutural” e comercializado como “Mola- Kit Estrutural”. Atualmente, é uma das principais ferramentas para o ensino qualitativo das disciplinas estruturais.

Lobosco *et al.* (2019), durante o XXIII congresso da Associação de Escolas e Faculdades Públicas de Arquitetura da América do Sul (ARQUISUR), apresentaram

um modelo qualitativo para a compreensão do comportamento mecânico das estruturas, desenvolvido na Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG).

A associação Brasileira de Educação em Engenharia (ABENGE) desenvolve congressos para a apresentação de trabalhos que promovam melhorias no ensino da engenharia. No que diz respeito à engenharia estrutural, há diversos trabalhos voltados ao desenvolvimento de modelos qualitativos para o ensino de estruturas. Milagres *et al.* (2021) apresentaram modelos estruturais para o aperfeiçoamento da didática na disciplina de resistência dos materiais desenvolvidos na Universidade Federal de Viçosa (UFV).

### 2.2.1 Maquete estrutural (KIT MOLA)

A maquete estrutural desenvolvida por Oliveira (2008b) tem como público-alvo os alunos de engenharia, arquitetura e os profissionais da área e objetiva a representação qualitativa dos sistemas estruturais em geral, facilitando o entendimento e análise das estruturas através dos conhecimentos teóricos de cálculo.

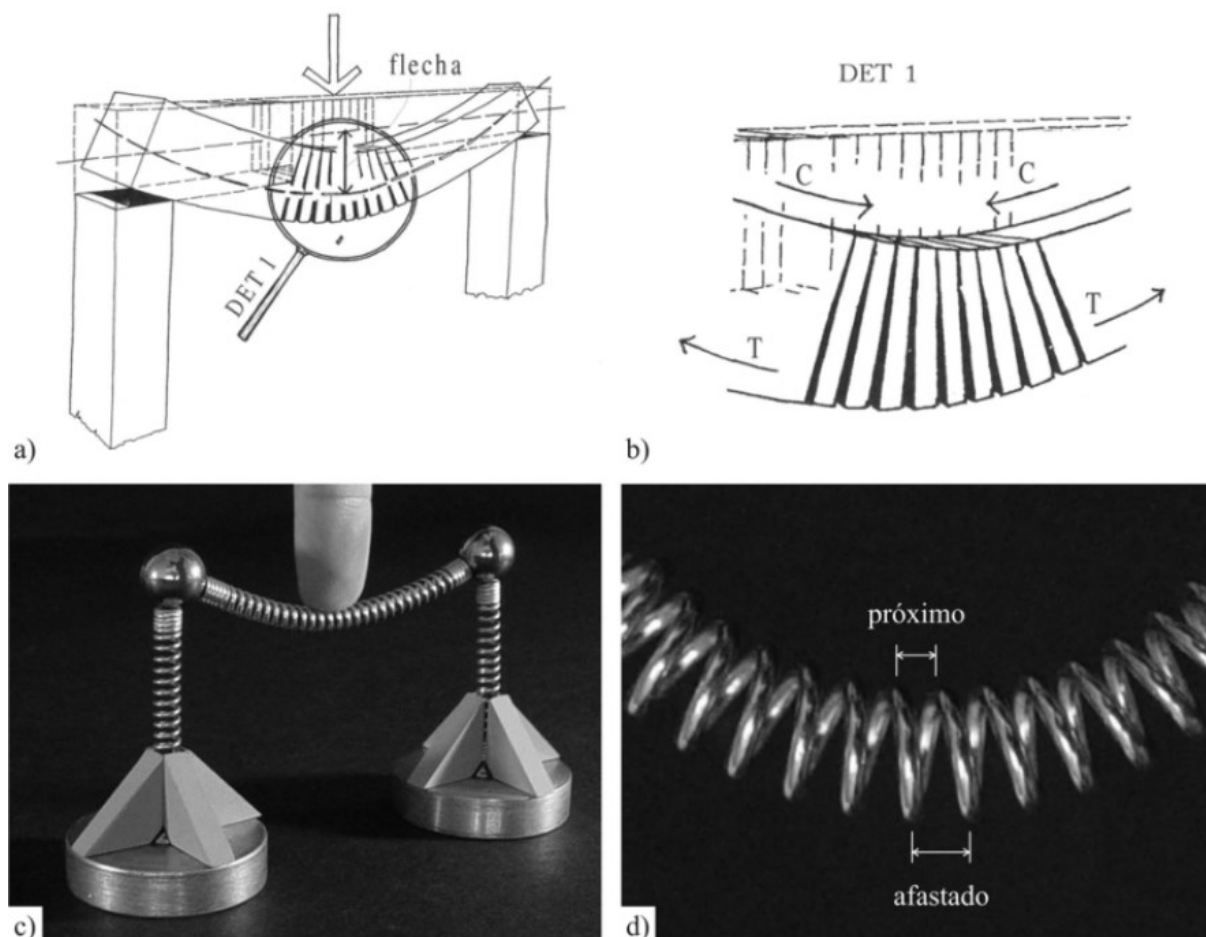
O modelo é constituído por um sistema modulado com peças de dimensões padronizadas que, quando associadas, formam um arranjo estrutural:

*A Maquete Estrutural* é composta por um conjunto de peças moduladas com dimensões padronizadas que permitem a montagem e simulação de diversos sistemas estruturais, desde os mais simples como pilares, vigas, contraventamentos, arcos, pórticos, tirantes e treliças passando pela associação entre os sistemas e chegando até os mais complexos como prédios de múltiplos andares, estruturas espaciais, torres, pontes etc. Para todos estes sistemas, o modelo permite a análise de diferentes conceitos como estabilidade estrutural, visualização dos deslocamentos e deformadas, comportamento quanto ao tipo de carregamento e condições de contorno, a influência da forma e o processo de montagem. Tudo isso aliado à praticidade de montagem, manuseio e armazenamento. (OLIVEIRA, 2008b, p. 43).

A ideia de Oliveira (2008b) era que a *Maquete Estrutural* possibilitasse a análise intuitiva dos sistemas estruturais e seus comportamentos frente à aplicação de carregamentos. O processo de desenvolvimento desse modelo passou por muitas modificações até o arranjo que possui hoje. Inicialmente, as peças que compunham o modelo eram feitas por barras de madeira e cabos metálicos conectados por imãs, mas esse sistema não permitia a visualização das deformações isoladas dos elementos estruturais, somente o comportamento da estrutura como um todo. Depois de algumas modificações, ele chegou à conclusão de que a melhor maneira de representar os elementos que compõem o sistema estrutural e suas respectivas

deformações era através do uso de molas. A Figura 2.2 ilustra a analogia feita por ele entre a flexão de uma viga e a flexão de uma mola.

**Figura 2.2 – Analogia das seções transversais de uma viga com os passos de uma mola: a) Viga submetida à flexão; b) Seções transversais da viga; c) Mola submetida à flexão; d) Passos da mola.**



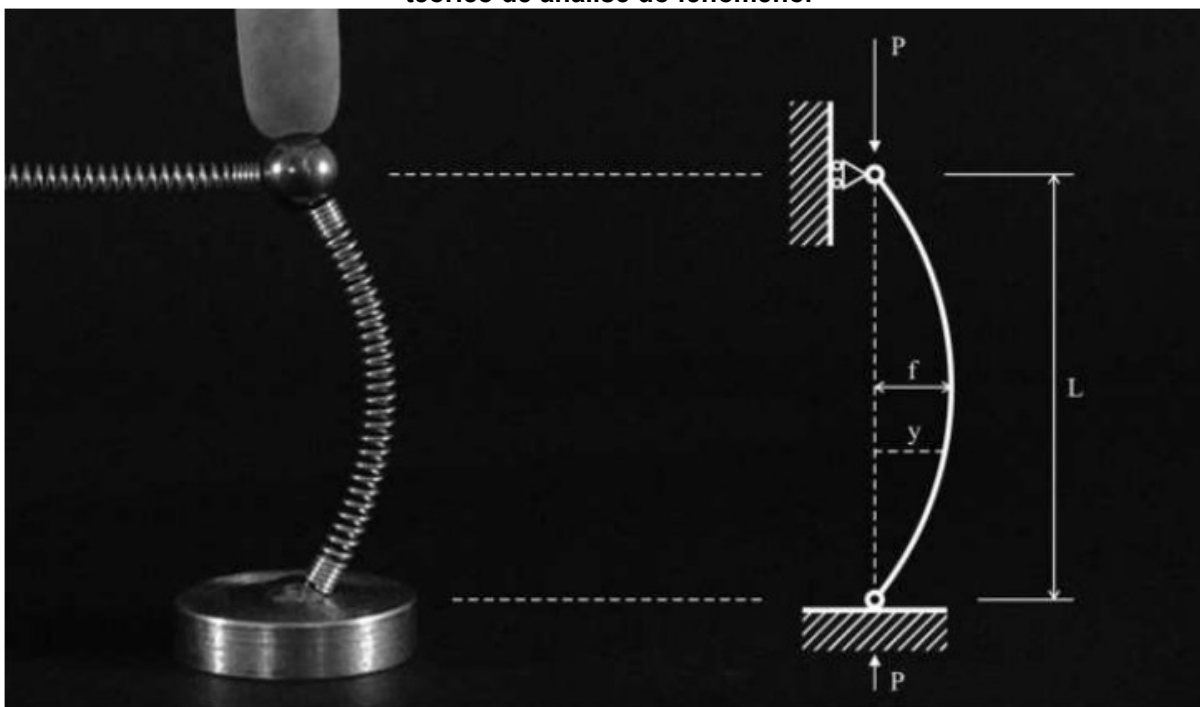
Fonte: OLIVEIRA (2008b, p. 54).

A partir disso, Oliveira (2008b) projetou as demais peças que compõem o modelo e constituem uma estrutura real comum, como pilares, vigas, lajes, paredes, contraventamentos, ligações, cabos, arcos, fundações, dentre outros elementos. Ele escolheu as molas adequadas ao comportamento de cada elemento, além de outros materiais, como placas de MDF, que constituem a laje e os enrijecedores das ligações, ímãs esféricos, que formam as ligações, e cabos metálicos, que constituem os tirantes.

O intuito de Oliveira (2008b) é que a *Maquete Estrutural* seja utilizada como uma primeira etapa do estudo das estruturas, na qual deve ser feita uma experimentação e uma análise qualitativa dos fenômenos estruturais, para que, somente após isso, sejam aprofundados e aplicados os conhecimentos teóricos de

cálculo. A Figura 2.3 ilustra deslocamento lateral de um pilar devido ao carregamento aplicado e o modelo teórico para a quantificação dos fenômenos envolvidos.

**Figura 2.3 - Deslocamento lateral de um pilar devido a um carregamento aplicado e modelo teórico de análise do fenômeno.**



Fonte: OLIVEIRA (2008b, p. 49).

Além disso, para Oliveira (2008b), o manuseio da *Maquete Estrutural* é muito importante para a compreensão dos fenômenos estruturais. No processo de montagem até a aplicação dos carregamentos, o usuário pode sentir a resistência e o comportamento do sistema estrutural analisado. Ele ressalta a importância da análise tátil na percepção dos fenômenos manifestados na estrutura, pois eles fogem à percepção natural humana. Dessa forma, ele conclui que o modelo deve ser manuseado individualmente ou em grupos pequenos para que a percepção dos fenômenos seja efetiva.

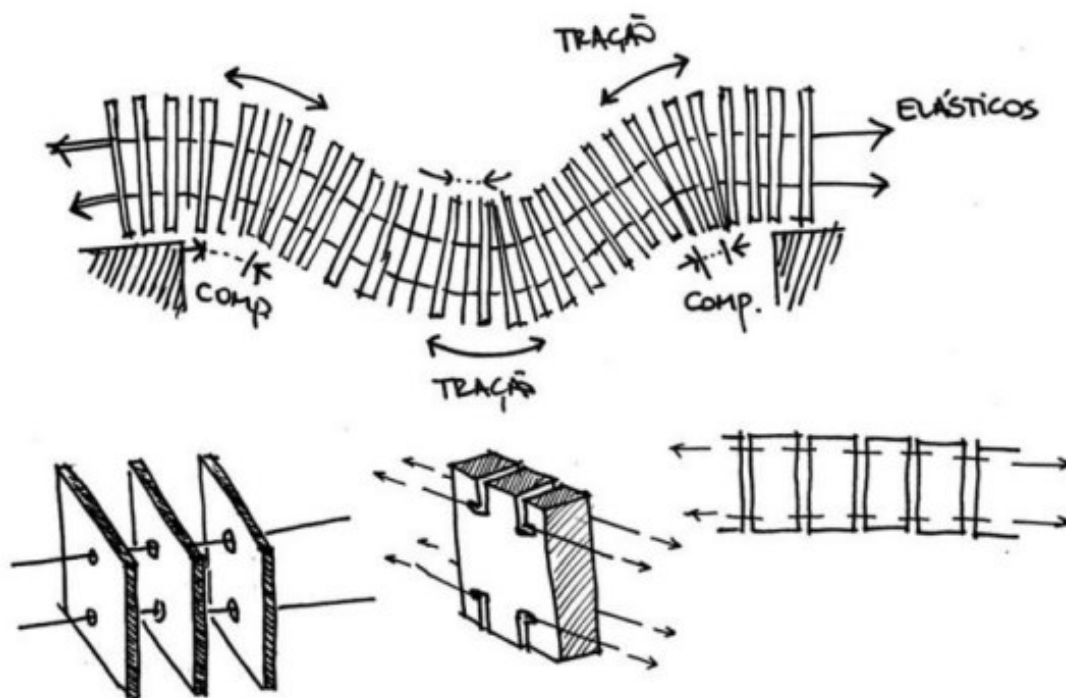
### 2.2.2 Modelo qualitativo didático de Lobosco *et al.* (2019)

Lobosco *et al.* (2019) desenvolveram um modelo qualitativo que representa o comportamento global das estruturas e as deformações de seus elementos. O público-alvo para o qual foi desenvolvido o modelo são os alunos de engenharia e arquitetura. Dessa maneira, a principal diretriz que norteou o projeto foi a produção de um conjunto

de baixo custo que promovesse uma compreensão intuitiva de vários arranjos estruturais. Para isso, o modelo precisava ser flexível para permitir uma gama de possibilidades de montagem.

O modelo idealizado pelos autores foi concebido com base na análise da flexão de vigas. A ideia inicial deles era que os esforços de tração e compressão sofridos pela viga devidos à flexão fossem representados pela associação de elásticos e placas rígidas, formando uma estrutura com grande semelhança às vigas de concreto armado. A Figura 2.4 ilustra o croqui inicial do modelo proposto pelos autores.

Figura 2.4 – Primeiros croquis propostos por Lobosco e Câmara.

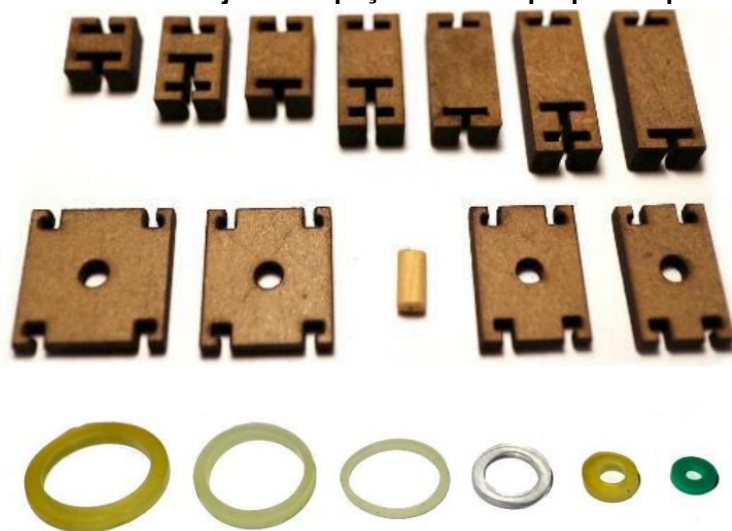


Fonte: LOBOSCO e CÂMARA (2018, p. 172).

Com base nesse croqui, Lobosco e Câmara (2018) inicialmente desenvolveram um conjunto de peças em EVA (Etileno Acetato de Vinila) unidas por elásticos. Durante o processo de desenvolvimento, os autores perceberam que o material sofria deformações que impossibilitavam sua reutilização, além da dificuldade de montagem. Assim, procuraram materiais alternativos para a conformação das peças de forma eficaz e escolheram peças em MDF com encaixes cortados a laser, unidos por elásticos ortodônticos. A Figura 2.5 ilustra o primeiro conjunto de peças em MDF confeccionada e a Figura 2.6 as primeiras montagens dos conjuntos.

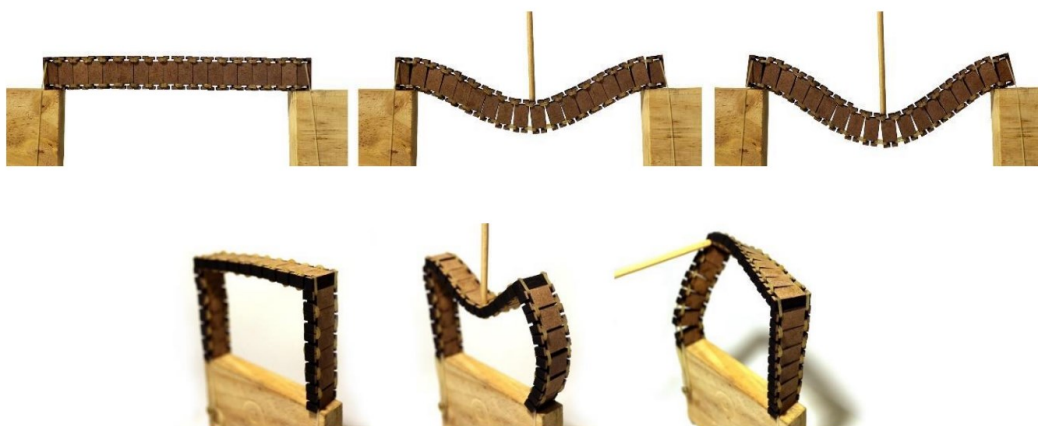


Figura 2.5 - Primeiro conjunto de peças em MDF propostos por Lobosco.



Fonte: LOBOSCO (2017, p. 7).

Figura 2.6 - Primeiras montagens com o conjunto de peças em MDF.



Fonte: LOBOSCO *et al.* (2019, p. 6).

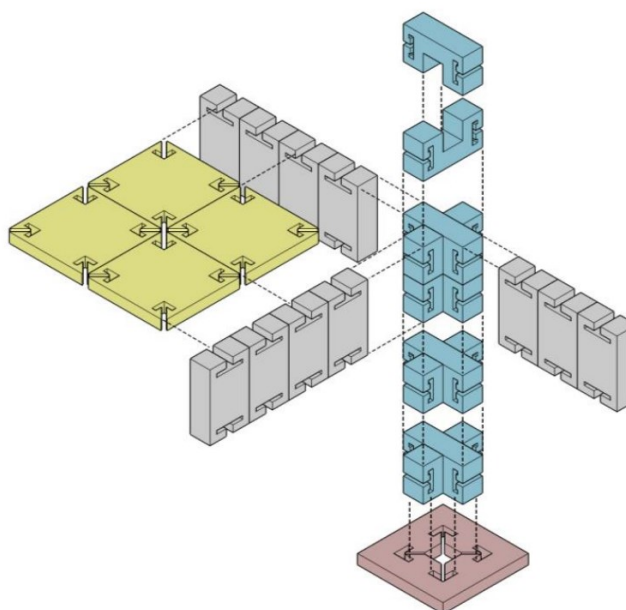
Lobosco *et al.* (2019) reestruturaram o modelo por quatro vezes até alcançar uma proposição final. Eles buscavam uma composição enxuta que representasse as estruturas e suas deformações e que fosse de fácil montagem pelos usuários. Dessa maneira, o conjunto final ficou composto por três elementos distintos, com encaixes macho-e-fêmea que garantem estabilidade ao modelo, além do uso dos elásticos. As Figuras 2.7, 2.8 e 2.9 ilustram o conjunto final de peças utilizado, o esquema de montagem e a montagem final do modelo, respectivamente.

Figura 2.7 - Conjunto final de peças, composto por apenas três elementos distintos.



Fonte: LOBOSCO *et al.* (2019, p. 11).

Figura 2.8 - Esquema de montagem do protótipo final.



Fonte: LOBOSCO *et al.* (2019, p. 11).

Figura 2.9 - Montagem do protótipo final demonstrando a construção de pilares vigas e lajes.



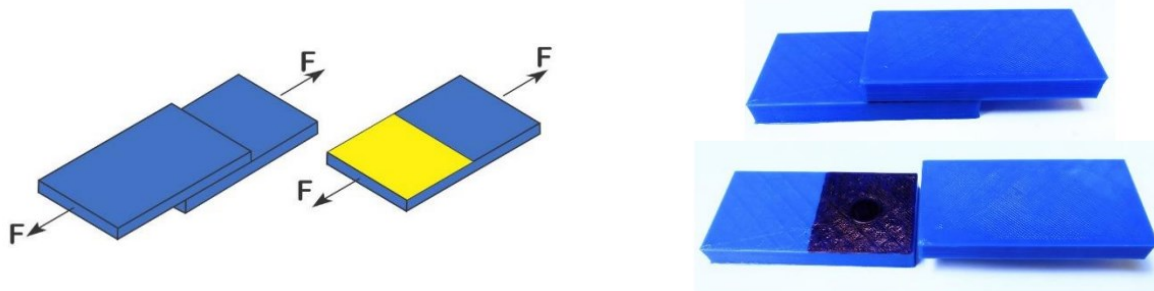
Fonte: LOBOSCO *et al.* (2019, p. 12).

### 2.2.3 Modelos qualitativos didáticos Milagres *et al.* (2021)

Milagres *et al.* (2021) desenvolveram modelos didáticos para a demonstração de planos e seções críticas em ligações soldadas e parafusadas. O público-alvo eram os alunos da disciplina de Resistência dos Materiais da Universidade Federal de Viçosa.

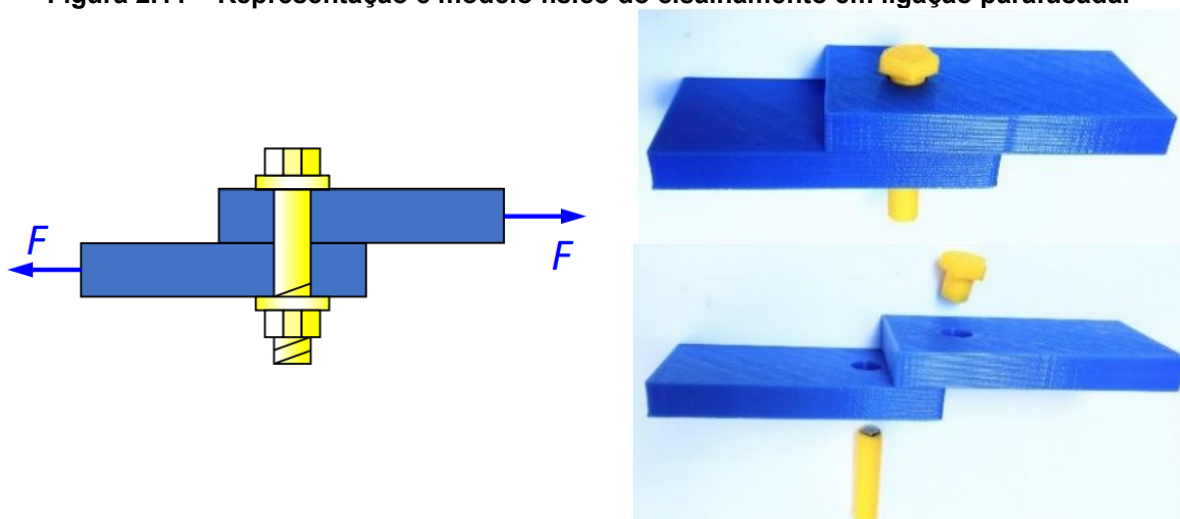
Os materiais para o desenvolvimento dos protótipos foram peças plásticas confeccionadas por impressão 3D e imãs. As Figuras 2.10 e 2.11 ilustram o cisalhamento simples em seção soldada e parafusada respectivamente, que são alguns dos modelos desenvolvidos por Milagres *et al.* (2021).

**Figura 2.10 - Representação e modelo físico do cisalhamento em ligação soldada.**



Fonte: MILAGRES *et al.* (2021, p. 8).

**Figura 2.11 – Representação e modelo físico do cisalhamento em ligação parafusada.**



Fonte: MILAGRES *et al.* (2021, p. 8).

## 2.3 Projeto de estruturas metálicas segundo a NBR 8800

Um projeto estrutural tem por objetivo a garantia de segurança do empreendimento, evitando-se o colapso da estrutura. Ademais, visa impedir deslocamentos excessivos, vibrações e danos localizados (PFEIL; PFEIL, 2013). O projeto de estruturas metálicas tem por base a norma NBR 8800 (ABNT, 2008), cujo método de dimensionamento é o dos estados limites. O método exige que nenhum estado limite admissível seja excedido pela estrutura.

Os estados limites podem ser divididos em últimos e de serviço. Os primeiros dizem respeito ao colapso da estrutura pela ocorrência de cargas excessivas, que resultam em perda de equilíbrio como corpo rígido, plastificação total de um elemento estrutural ou de uma seção, flambagem ou ruptura por fadiga. Já os estados limites de serviço estão associados às deformações e vibrações excessivas que a estrutura pode sofrer sob as cargas de serviço (PFEIL; PFEIL, 2013).

Para a análise estrutural, todas as ações que possam solicitar a estrutura ao longo de sua vida útil devem ser apreciadas, levando em consideração os estados limites últimos e de serviço. As ações são classificadas pela NBR 8681 (ABNT, 2003) em permanentes, variáveis e excepcionais.

A análise estrutural objetiva determinar os efeitos dessas ações na estrutura, visando a verificação dos estados limites últimos e de serviço. Essa análise deve ser feita com um modelo realista, que represente a resposta da estrutura e dos materiais estruturais às deformações causadas pelos esforços solicitantes, sendo necessário considerar as interações da estrutura com o solo e o comportamento das ligações que compõem o modelo (ABNT, 2008). Tendo isso em vista, a NBR 8800:2008 recomenda uma análise estrutural com base nas verificações das peças submetidas a esforços de tração, compressão, flexão simples e composta, além da estabilidade de ligações.

### 2.3.1 Peças tracionadas

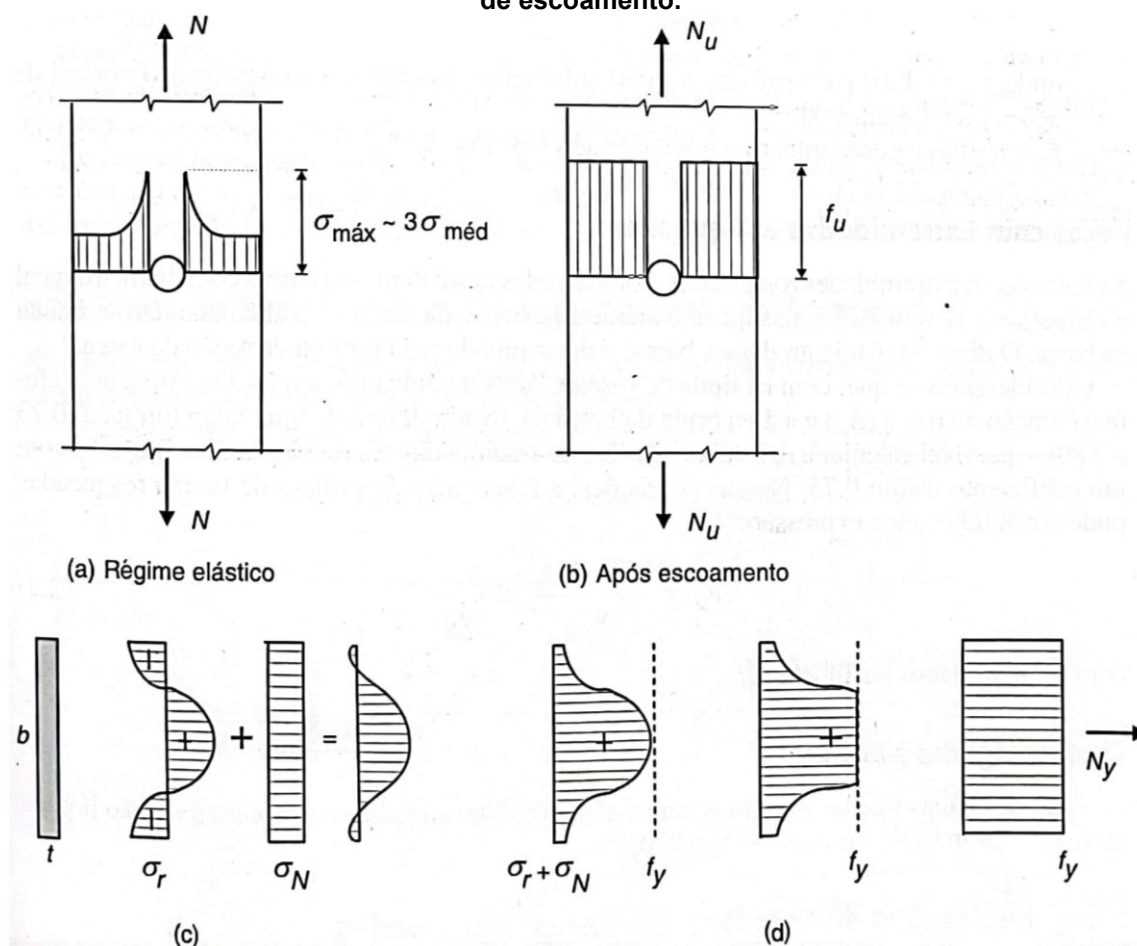
No dimensionamento de peças submetidas a esforços de tração, somente dois estados limites últimos são aplicados, pois as solicitações de tração são entendidas como estabilizantes. Os estados limites últimos nesses elementos podem

ser caracterizados pelo escoamento da seção transversal bruta do perfil ou pela ruptura da seção transversal efetiva (JAVARONI, 2015).

No regime elástico, as tensões em peças tracionadas com furos não são uniformes, sendo mais elevadas nas proximidades dos furos. Após o escoamento, devido à ductilidade do aço, as tensões atuam uniformemente em toda a seção da peça (PFEIL; PFEIL, 2013).

As Figura 2.12a e 2.12b ilustram as tensões normais,  $\sigma_N$ , de tração axial em uma peça tracionada com furo. As Figuras 2.12c e 2.12d ilustram as tensões normais adicionadas das tensões residuais,  $\sigma_r$ .

Figura 2.12 - Comportamento de uma peça com furo sob tensões normais no regime elástico e de escoamento.

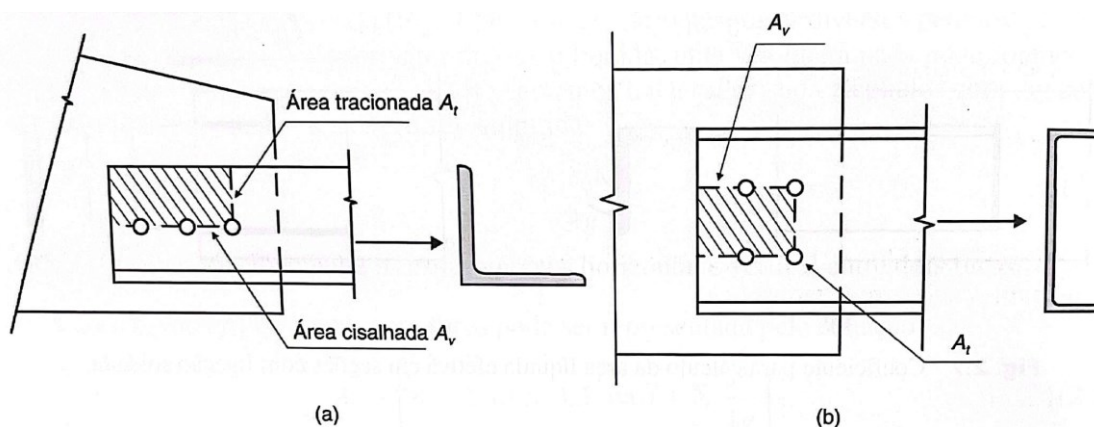


Fonte: PFEIL e PFEIL (2013, p. 49).

Não se caracteriza como estado limite último o escoamento da seção com furos devido à pequena extensão da região de ligação. Todavia, para uma barra sujeita à redução na área de sua seção transversal, a plastificação inicia-se na seção enfraquecida (seção com furos).

Em perfis de pequena espessura com ligações com grupo de conectores, é possível que ocorra a ruptura da seção em função do que se denomina cisalhamento de bloco (JAVARONI, 2015; PFEIL; PFEIL, 2013). O cisalhamento de bloco (Figura 2.13) se manifesta pela ruptura de parte da seção líquida efetiva e pelo rasgamento do perfil ao longo de uma linha de conectores. Nesse tipo de colapso, há a ruptura do segmento do perfil que recebe a ligação, ocorrendo cisalhamento nos planos paralelos à força (áreas  $A_v$ ) e tração no plano perpendicular à força (área  $A_t$ ) (PFEIL; PFEIL, 2013).

**Figura 2.13 – Colapso por cisalhamento de bloco: (a) perfil cantoneira; (b) perfil U.**



Fonte: PFEIL e PFEIL (2013, p. 54).

O dimensionamento de barras tracionadas, segundo a NBR 8800 (ABNT, 2008), deve atender a condição de segurança  $N_{t,Sd} \leq N_{t,Rd}$ , em que a força axial de tração solicitante deve ser inferior à força axial de tração resistente.

A força de tração resistente de cálculo, corresponde ao menor valor obtido considerando os dois critérios de segurança estabelecidos pela norma: ruptura da seção com furos (seção líquida efetiva) e escoamento da seção bruta. No caso de peças solicitadas à tração que tenha ligações feitas por conectores, é necessário a verificação do possível colapso por rasgamento (cisalhamento de bloco) (ABNT, 2008).

A NBR 8800 (ABNT, 2008) limita o índice de esbeltez em peças tracionadas ao valor máximo de 300. O limite de esbeltez em peças tracionadas não é um fator de muita importância para o dimensionamento, visto que os esforços de tração tendem a retificar as barras, reduzindo excentricidades construtivas iniciais. Porém, a norma

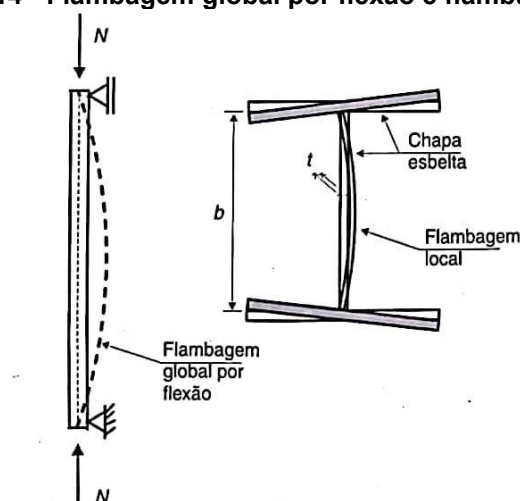
impõe essa limitação com o intuito de reduzir efeitos vibratórios provocados por impactos, ventos etc. (PFEIL; PFEIL, 2013).

### 2.3.2 Peças comprimidas

Os estados limites últimos de elementos de aço comprimidos podem ser por escoamento do material ou, o que é mais frequente, pela perda de estabilidade global ou local da peça. A instabilidade global está relacionada ao comportamento da barra e depende das condições de vinculação do elemento, além das características geométricas da seção transversal do perfil. A instabilidade local ocorre nas chapas que compõem o perfil, devido à esbelteza desses elementos (JAVARONI, 2015).

Diferentemente do esforço de tração, que tende a retificar os elementos diminuindo os efeitos de curvaturas existentes, na compressão há a intensificação dessas curvaturas. Os deslocamentos laterais produzidos desencadeiam o processo denominado *flambagem por flexão*, que no geral diminui a capacidade de carga da peça quando comparada ao mesmo elemento tracionado. Os deslocamentos transversais às chapas que compõem o perfil, que surgem na forma de ondulações, manifestam a ocorrência de *flambagem local* (PFEIL; PFEIL, 2013). A Figura 2.14 ilustra os fenômenos de flambagem global e local de uma barra comprimida.

Figura 2.14 - Flambagem global por flexão e flambagem local.



Fonte: PFEIL e PFEIL (2013, p. 119).

Hibbeler (2004) define flambagem como sendo uma deflexão lateral que provoca a falha súbita e dramática de uma estrutura esbelta sujeita a uma força axial

de compressão. A carga axial máxima que um elemento comprimido pode estar sujeito sem que ocorra a flambagem é denominada carga crítica. Qualquer carga adicional provoca a instabilidade do elemento. Dessa maneira, as peças comprimidas de uma estrutura devem ser projetadas de maneira que suportem com segurança as cargas pretendidas sem que ocorra o fenômeno da flambagem.

### 2.3.2.1 Flambagem por flexão

Leonhard Euler (1707- 1783), matemático suíço, foi pioneiro no estudo da estabilidade de colunas comprimidas. Como resultado ele obteve a expressão denominada “Carga crítica de Euler” para uma coluna idealmente perfeita. A equação da carga crítica está relacionada ao comprimento da barra sujeita à flambagem, ao momento de inércia da seção transversal e ao módulo de elasticidade do material. Essa expressão é válida somente para uma coluna isenta de imperfeições geométricas e tensões residuais, constituída por um material de comportamento elástico linear e com a aplicação de uma carga centrada (PFEIL; PFEIL, 2013).

As colunas reais, no entanto, têm imperfeições geométricas oriundas dos processos de fabricação, não sendo completamente retilíneas. Além disso, na prática não é possível assegurar a perfeita centralização dos carregamentos, o que provoca excentricidade das forças aplicadas. No caso de elementos de aço, além das imperfeições geométricas, há tensões provenientes dos processos de fabricação, denominadas tensões residuais, que se somam às tensões devidas ao carregamento, levando ao início da plastificação do material (PFEIL; PFEIL, 2013).

#### *2.3.2.1.1 Comprimento de flambagem*

“A carga crítica que causa flambagem depende das dimensões da seção da barra, do tipo de vinculação e do seu comprimento livre. Assim, vinculações mais trabalhosas, seções mais robustas ou menores comprimentos aumentam o valor da carga crítica.” (DIAS, 1997, p. 27). O comprimento de flambagem é a distância livre entre os pontos de momento nulo, deformada lateralmente. No caso de uma barra birrotulada, o comprimento de flambagem equivale ao próprio comprimento da barra.



Para qualquer barra, a carga crítica de flambagem em regime elástico é dada pela fórmula de Euler.

A Figura 2.15 ilustra os coeficientes de flambagem por flexão,  $K$ , para elementos isolados, indicados pela NBR 8800 (ABNT, 2008).

**Figura 2.15 - Coeficientes de flambagem por flexão de elementos isolados.**

A linha tracejada indica a linha elástica de flambagem	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)
Valores teóricos de $K_x$ ou $K_y$	0,5	0,7	1,0	1,0	2,0	2,0
Valores recomendados	0,65	0,80	1,2	1,0	2,1	2,0
Código para condição de apoio	Rotação e translação impedidas Rotação livre, translação impedida Rotação impedida, translação livre Rotação e translação livres					

Fonte: NBR 8800 (ABNT, 2008, p. 125).

O dimensionamento de barras comprimidas, segundo a NBR 8800:2008, deve atender a condição de segurança  $N_{c,Sd} \leq N_{c,Rd}$ , em que a força axial de compressão solicitante de cálculo deve ser inferior a força axial de compressão resistente de cálculo. Os procedimentos de cálculo da força axial resistente de cálculo estão previstos no item 5.3 da NBR 8800 (ABNT, 2008).

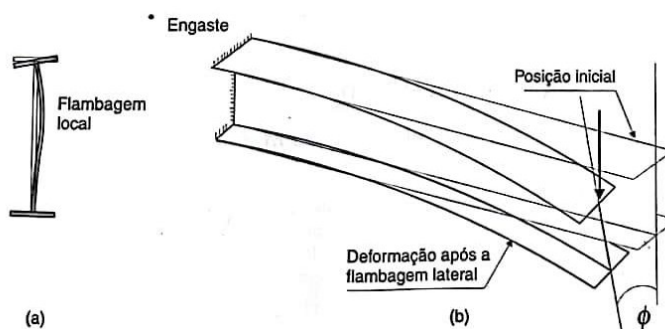
### 2.3.3 Peças fletidas

As peças fletidas qualificam-se como elementos que recebem forças perpendiculares ao seu eixo, gerando esforços de flexão simples: momento fletor e força cortante. Outrossim, é possível que as peças fletidas estejam sujeitas a esforços de compressão (flexocompressão) ou de momento fletor nos dois eixos de flexão (flexão oblíqua) (JAVARONI, 2015).

A ruína de barras sujeitas à flexão pode ser ocasionada pela flambagem local e pela flambagem lateral. Define-se como flambagem local (Figura 2.16a), a perda de estabilidade de chapas comprimidas que compõem a seção transversal do perfil, reduzindo a resistência da seção. Por sua vez, a flambagem lateral (Figura 2.16b)

consiste na perda de equilíbrio no plano principal de flexão, com o surgimento de deslocamentos laterais e rotações de torção. O surgimento desse deslocamento lateral surge devido à inexistência de contenções laterais que assegurem a estabilidade da peça (PFEIL; PFEIL, 2013).

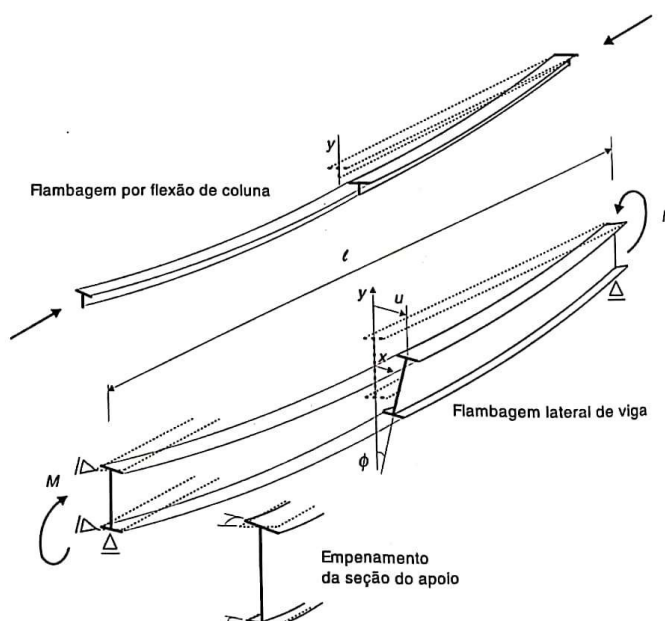
**Figura 2.16 – Flambagem local e flambagem lateral em vigas.**



Fonte: PFEIL e PFEIL (2013, p. 153).

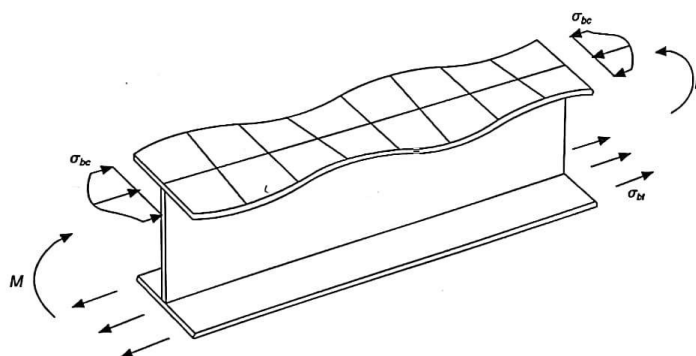
Os estados limites últimos de barras sujeitas à flexão simples são a instabilidade global por flambagem lateral com torção (FLT), instabilidade local por flambagem da mesa (FLM), ou instabilidade local por flambagem da alma (FLA). Outra possível falha da peça está relacionada à plastificação ou escoamento da seção transversal (JAVARONI, 2015). As falhas por FLT, FLM e FLA são ilustradas nas Figuras 2.17, 2.18 e 2.19, respectivamente.

**Figura 2.1 – Flambagem lateral com torção de viga biapoiada.**



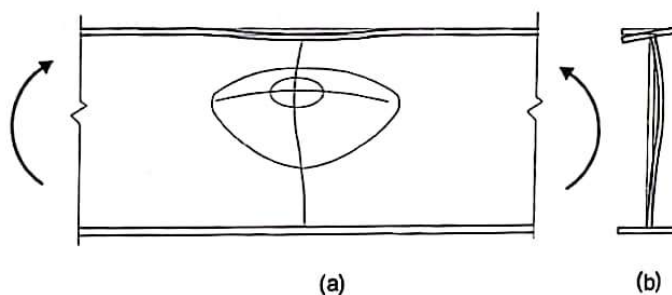
Fonte: PFEIL e PFEIL (2013, p. 166).

Figura 2.18 – Flambagem local da mesa comprimida em viga I fletida no plano da alma.



Fonte: PFEIL e PFEIL (2013, p. 164).

Figura 2.19 – Flambagem local da alma devido ao momento fletor: a) esquema da viga, com o momento solicitante  $M$ ; (b) seção transversal mostrando a alma após a flambagem.



Fonte: PFEIL e PFEIL (2013, p. 165).

A NBR 8800 (ABNT, 2008) estabelece duas condições de segurança para as barras submetidas à flexão simples. A primeira delas diz respeito ao momento fletor solicitante de cálculo  $M_{Sd}$ , que deve ser inferior ao momento resistente de cálculo  $M_{Rd}$ . A segunda condição se refere à força cortante solicitante de cálculo  $V_{Sd}$ , que deve ser menor que a força cortante resistente de cálculo.

O valor de  $M_{Rd}$  é obtido por meio dos procedimentos apresentados nos anexos G e H da NBR 8800 (ABNT, 2008), aplicáveis para barras de alma não esbelta e esbelta, respectivamente. A norma trata dos procedimentos de cálculo de  $V_{Rd}$  no item 5.4.3. Para as verificações de FLT, FLM e FLA, é necessário calcular a esbelteza da viga ou de sua seção e compará-la com parâmetros de esbelteza relacionados à plastificação e ao início do escoamento do material. A partir dessa comparação, é possível classificar o elemento como curto, intermediário ou esbelto, no caso de FLT; ou sua seção como compacta, semi-compacta ou esbelta, no caso de FLM e FLA. Com base nesses parâmetros é possível obter os valores do momento fletor e força cortante resistentes de cálculo.

### 2.3.4 Ligações

Os elementos de estruturas metálicas são fabricados em dimensões padronizadas. Desse modo, na execução do projeto estrutural, há necessidade de cortes e conexões das peças. O projeto das conexões tem influência significativa no custo da estrutura. O modelo de conexão escolhido deve considerar o comportamento da ligação (rígida ou flexível, por contato ou por atrito etc.), limitações construtivas, facilidade de fabricação e montagem. Atualmente, as conexões são feitas através de soldagem ou aparafusamento (DIAS, 1997).

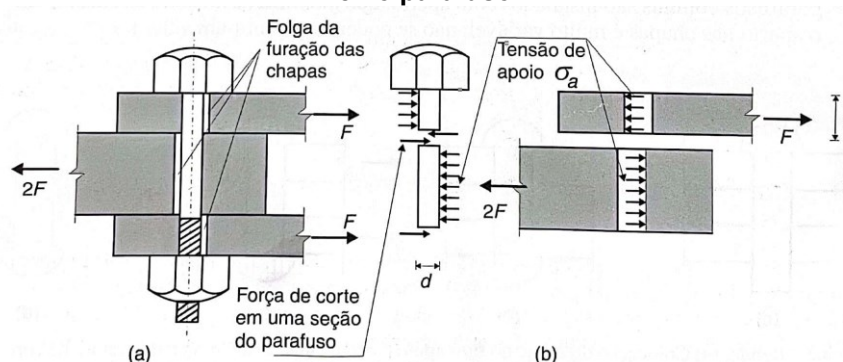
#### 2.3.4.1 Ligações parafusadas

As ligações parafusadas podem ser feitas através de parafusos estruturais comuns ou de alta resistência. Os parafusos comuns são fabricados seguindo a especificação ASTM A307, sendo forjados com aço carbono de baixo teor. Esses parafusos são instalados com aperto, que provoca atrito entre as chapas. Contudo, esse aperto é variável o que impossibilita a adoção de um valor mínimo para ser aplicado nos cálculos. Destarte, os parafusos comuns são calculados através das tensões de apoio e de corte (PFEIL; PFEIL, 2013).

Os parafusos de alta resistência são fabricados com aços termicamente tratados. Esses parafusos podem ser instalados com controle de torque, que podem ser considerados no cálculo da resistência da ligação. Quando não é tolerado nenhum tipo de deslizamento nas ligações, deve ser empregado esse tipo parafuso, configurando uma ligação por atrito. Quando o deslizamento não é crítico ao projeto, o dimensionamento desses parafusos é realizado considerando tensões nominais de apoio e corte, como acontece nos parafusos comuns (PFEIL; PFEIL, 2013).

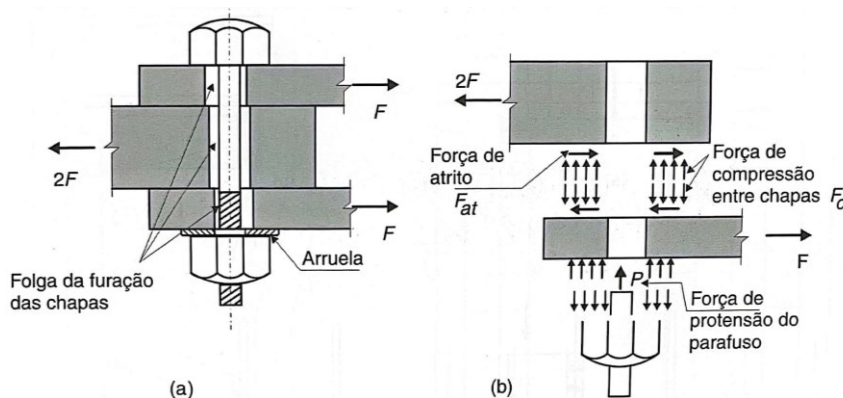
A ligação do tipo apoio (Figura 2.20) é aquela em que, por consequência do esforço aplicado e da folga entre os furos da peça e cada parafuso, os elementos unidos movem-se até que se encostem, transferindo as tensões por contato direto. Já a ligação do tipo atrito não admite o deslizamento das chapas, sendo a transmissão do esforço feita pelas forças de atrito mobilizadas pela protensão do parafuso nos planos de contato entre as chapas, conforme mostra a Figura 2.21 (DIAS, 1997).

Figura 2.20 – Ligação do tipo apoio: a) Esquema da ligação; (b) diagrama de forças nas chapas e no parafuso.



Fonte: PFEIL e PFEIL (2013, p. 64).

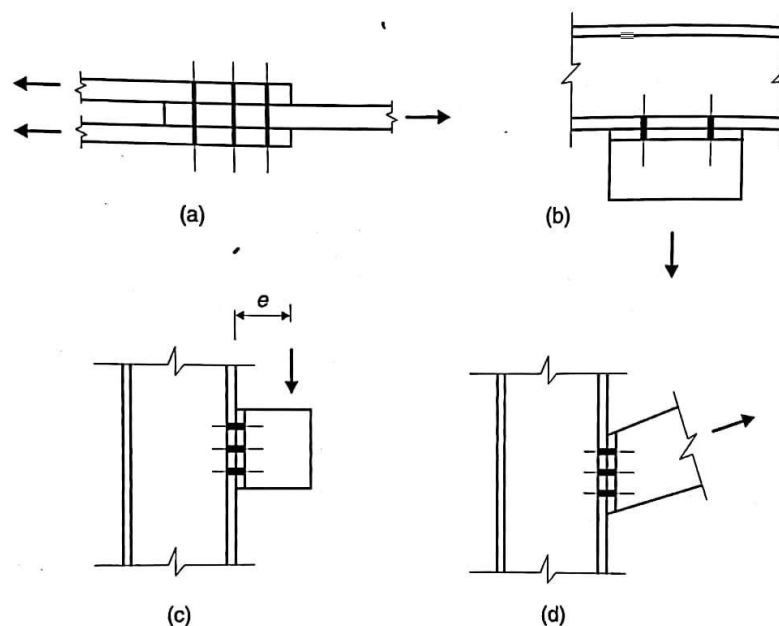
Figura 2.21 – Ligação por atrito: a) Esquema da ligação; (b) diagrama de forças nas peças.



Fonte: PFEIL e PFEIL (2013, p. 65).

As ligações parafusadas são classificadas não somente pela sua rigidez à rotação, mas também pelo esforço solicitante dos conectores. Os esforços podem ser de corte ou de tração. Nas peças tracionadas que funcionam por apoio das chapas no fuste do parafuso, há pressões de contato que geram esforços de flexão no conector, mas, devido ao tamanho reduzido dele, o esforço cortante é determinante na resistência, caracterizando uma ligação por corte (Figura 2.22a). A Figura 2.22b ilustra a ligação por tração axial. Nesse caso, o esforço solicitante de tração está aplicado no sentido longitudinal ao eixo do parafuso, tracionando-o. Há a possibilidade ainda de uma ligação por corte e tração em simultâneo, como pode ser observado nas Figuras 2.22c e 2.22d. No primeiro caso, a carga provoca o cisalhamento dos conectores, enquanto a excentricidade da carga provoca um momento fletor que os traciona. No segundo caso, todos os parafusos estão sujeitos a esforços de tração e corte devido à componente horizontal e vertical da força, respectivamente (PFEIL; PFEIL, 2013).

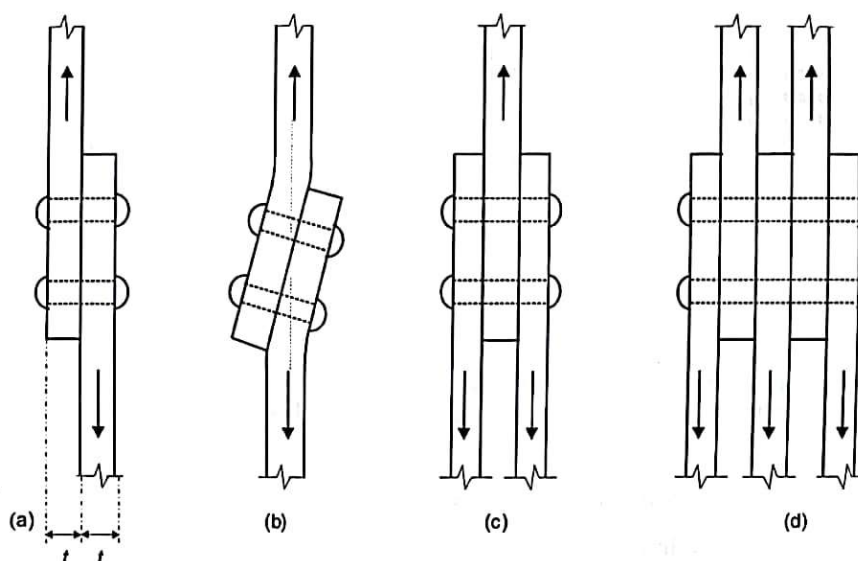
**Figura 2.22 – Classificação da ligação quanto ao esforço solicitante dos conectores: a) Ligação por corte; (b) ligação por tração; (c), (d) ligações por corte e tração dos conectores.**



Fonte: PFEIL e PFEIL (2013, p. 66).

As ligações sujeitas a tensões de cisalhamento podem ser classificadas também quanto ao número de planos de corte dos seus conectores. Essa classificação decorre do número de chapas unidas por esses conectores. As ligações podem ser por corte simples, duplo ou múltiplas, conforme ilustra a Figura 2.23. Nas ligações por corte simples, a transmissão da carga produz uma excentricidade que causa tração nos conectores, enquanto as ligações por corte duplo ou múltiplo evitam esse inconveniente (PFEIL; PFEIL, 2013).

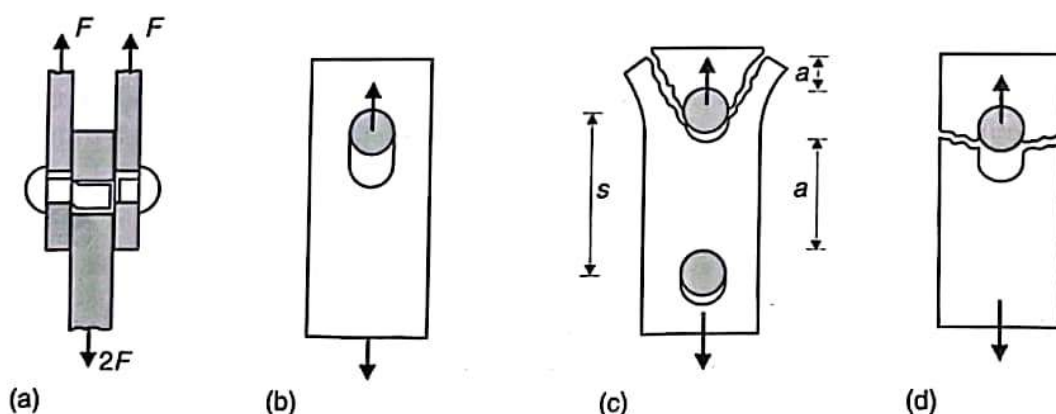
**Figura 2.23 – Ligação com conectores: (a), (b) Corte simples; (c) corte duplo; (d) corte múltiplo.**



Fonte: PFEIL e PFEIL (2013, p. 67).

Os estados limites das ligações por conectores verificados pela NBR 8800 (ABNT, 2008) são: colapso do conector; colapso por rasgamento da chapa ou ovalização do furo; e colapso por tração da chapa, como ilustra a Figura 2.24. O item 6 da norma estabelece todas as diretrizes de cálculo das ligações em estruturas metálicas. O item 6.3 trata especificamente das ligações parafusadas.

**Figura 2.24 – Modos de ruptura de uma ligação com conectores: (a) Ruptura por corte do fuste do conector; (b) ruptura por ovalização do furo; (c) ruptura por rasgamento da chapa entre o furo e a borda; (d) ruptura por tração da chapa na seção transversal líquida.**



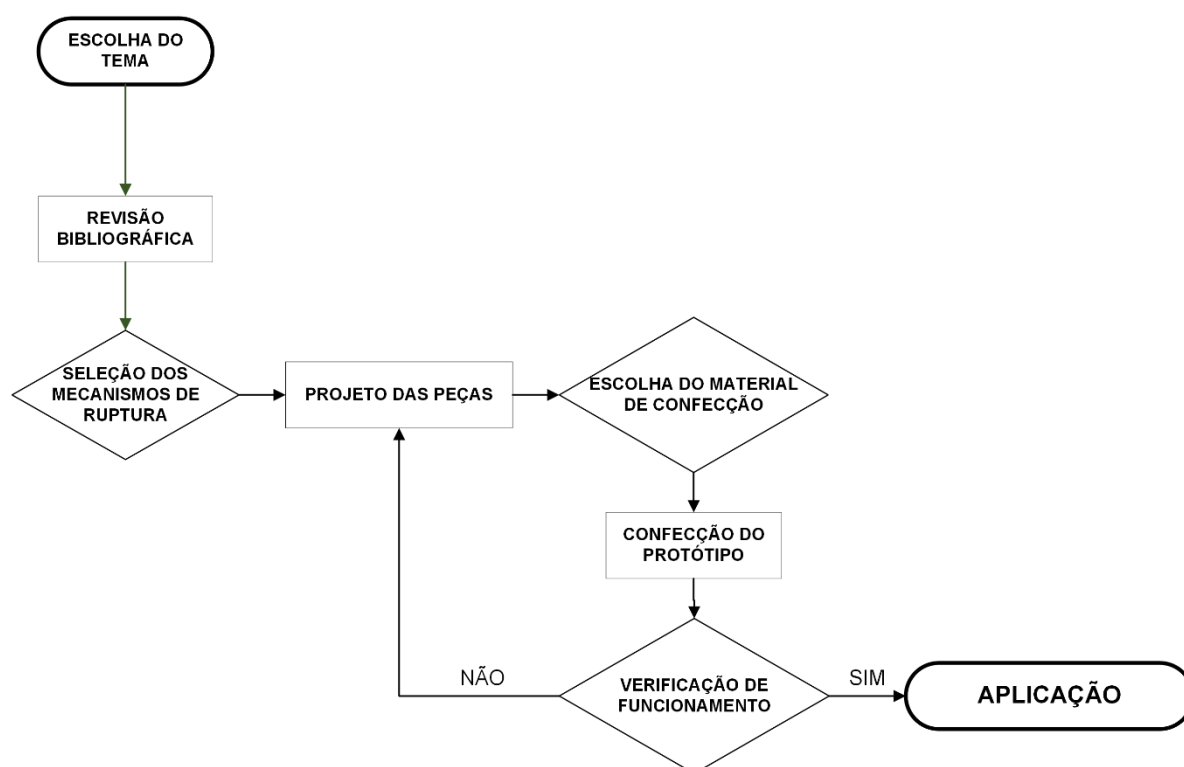
Fonte: PFEIL e PFEIL (2013, p. 69).

A condição de segurança admitida pela NBR 8800 (ABNT, 2008) é que a solicitação de cálculo,  $N_{sd}$ , seja inferior à força resistente de cálculo,  $N_{Rd}$ . A força resistente de cálculo é igual ao menor valor de resistência dos estados limites admitidos para cada caso. As falhas das chapas por tração são verificadas conforme o item 2.3.1 deste trabalho.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, serão apresentados os materiais e os métodos que foram utilizados para a confecção dos protótipos didáticos. O fluxograma da Figura 3.1 ilustra as principais etapas que foram percorridas para o desenvolvimento do presente trabalho.

Figura 3.1 - Fluxograma do desenvolvimento da pesquisa.



Fonte: Autoria própria (2023).

O público-alvo do desenvolvimento dos protótipos são os alunos da disciplina de Construções Metálicas do curso de Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal (UTFPR) do Campus de Apucarana. O projeto nasceu da necessidade de visualização dos mecanismos de ruptura de elementos estruturais em aço, algo que, em geral, é um problema para a maioria dos alunos da disciplina.

A ideia foi desenvolver modelos qualitativos duráveis ou de fácil replicação, que permitam uma análise tátil e visual dos mecanismos de colapso aos quais as estruturas metálicas estão sujeitas. Dessa maneira, analisou-se os modos de falha verificados pela NBR 8800 (ABNT, 2008) e criou-se modelos que ilustram os colapsos das ligações parafusadas, a ruptura das chapas que compõem as ligações e as falhas



por flambagem global e local de perfis sob flexão, cujos modos de ruptura estão descritos nos itens 2.3.1 a 2.3.4 desse trabalho.

O intuito dos protótipos é a demonstração das deformações e mecanismos de ruptura. Para isso, foram selecionados materiais poliméricos para confecção dos modelos. A versatilidade do material permite explorar uma gama de possibilidades no processo criativo, pois existem polímeros dos mais flexíveis até os de elevada rigidez. Assim, dois métodos de confecção foram considerados: a impressão 3D e o uso de molde para fabricação em silicone.

No processo de impressão 3D, é fundamental o uso de *softwares* para o desenvolvimento e impressão do modelo. Assim, foram selecionados programas gratuitos ou com versão estudantil, para que o método de confecção fosse acessível. Os moldes para confecção de peças em silicone podem ser feitos de plástico ou MDF. Devido à alta precisão dimensional, os moldes foram confeccionados em MDF. Para isso, foi necessária a utilização de *softwares* de modelagem e máquinas de corte a laser. A utilização do MDF não se limitou à fabricação de moldes, sendo que peças complementares a serem adicionadas aos protótipos foram confeccionadas com esse material.

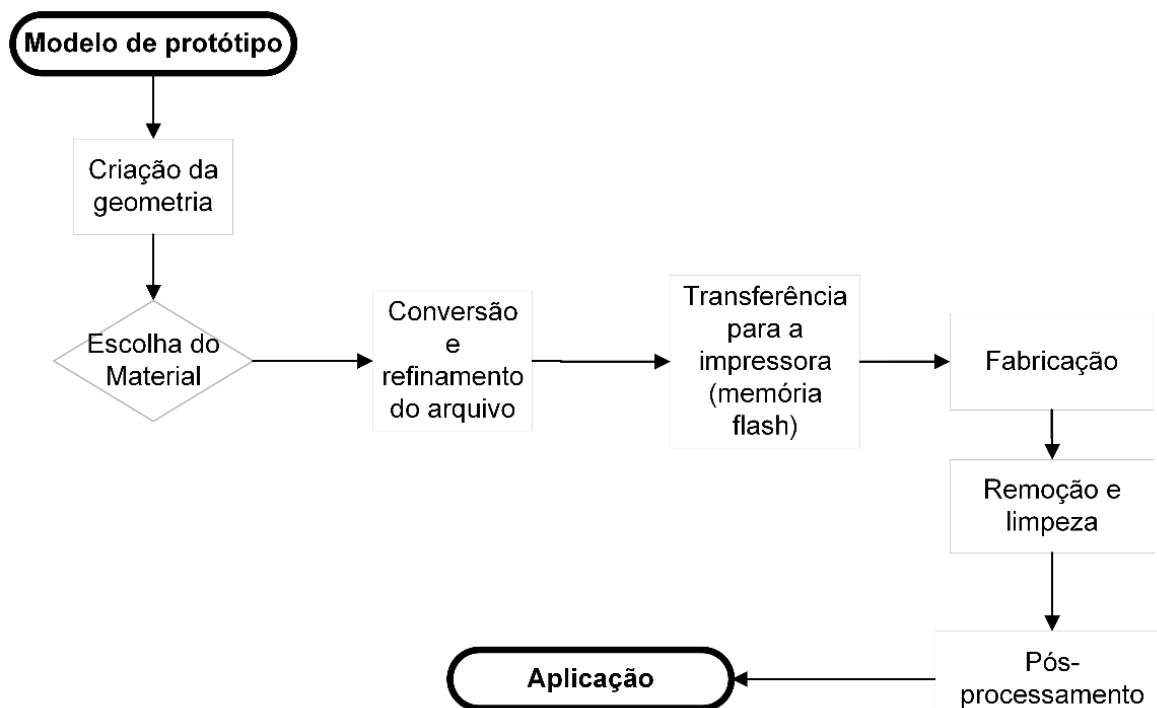
Finalizados os processos de fabricação, se iniciou a avaliação qualitativa dos protótipos. Essa avaliação consistiu na testagem dos modelos e visou analisar a efetividade de representação dos mecanismos de falhas, isto é, se as peças atingiram os objetivos para os quais foram confeccionadas. Nos casos em que não funcionaram corretamente, buscou-se soluções para as falhas apresentadas.

### **3.1 Impressão 3D**

A impressão 3D é um processo de manufatura aditiva, no qual é possível construir um objeto tridimensional através da adição de camadas sucessivas. A tecnologia empregada em grande parte das impressoras 3D é a de deposição de material fundido, denominada *Fused Deposition Modeling* (FDM) (AGUIAR, 2016). No sistema FDM, há uma gama de materiais que podem ser utilizados, mas no geral são utilizados os termoplásticos disponíveis em rolos de fios, que são expostos a altas temperaturas, sendo fundidos e depositados em camadas por um bico extrusor (MONTEIRO, 2015).

O processo de impressão segue uma série de passos até a obtenção do produto, que, de acordo com Gibson *et al.* (2010, *apud* MARTINS, 2017), está dividido em oito passos principais, como pode ser observado no fluxograma da Figura 3.2.

Figura 3.2 - Fluxograma do processo de impressão 3D.



Fonte: Adaptado de Gibson *et al.* (2010, *apud* MARTINS, 2017).

A criação da geometria é feita através do uso *softwares* de modelagem assistida por computador (CAD). Neste trabalho utilizou-se o Archicad, da Graphisoft, em sua versão estudantil. Após a modelagem do objeto, converteu-se o arquivo para o formato de leitura da máquina. O formato aplicável para grande parte das impressoras 3D é o STL (*Stereolithography*).

Na conversão de CAD para STL podem surgir erros na geometria, sendo primordial passar o arquivo por um *software* de conversão antes de imprimir. Nele, ocorre o fatiamento do objeto, definição das espessuras de camadas, nível de preenchimento do objeto, adequação de escala e orientação da geometria. O *software* utilizado para esse fim foi o Repetier Host, que também é de uso livre. Após essa conversão, o arquivo pode ser transferido para a máquina através de uma unidade de memória *flash* (SD card ou *pen drive*).

Antes do processo de impressão, é necessário configurar a máquina, definir a temperatura de impressão de acordo com o material, temperatura da mesa, velocidade de impressão, caminho do arquivo, inserir o filamento no bico extrusor, dentre outros processos. A impressão só deve ser iniciada com todos esses passos feitos, pois não é possível fazer alterações durante a impressão.

O material definido para a impressão dos modelos foi o filamento de PLA (ácido poliático), pois é um termoplástico de origem vegetal com baixa temperatura de fusão quando comparado a outros materiais e que não emite fumaças tóxicas. A temperatura do bico extrusor para a fusão desse material varia entre 180 e 230 °C. No geral, ele não necessita de uma plataforma aquecida para deposição do material, mas é interessante manter a temperatura de mesa em aproximadamente 60 °C. A velocidade de impressão no PLA fica em torno de 60 mm/s, sendo possível atingir maiores velocidades a depender do objeto que está sendo confeccionado e das configurações pré-definidas.

Definidos o material e todos os parâmetros necessários, inicia-se o processo de impressão. O tipo de impressora utilizada depende do material de confecção do modelo. No caso do PLA, as máquinas podem ser de câmara aberta, pois é um material que não é muito sensível a instabilidade de temperatura. Assim, as impressoras utilizadas para a impressão dos protótipos foram a Creality CR-10, disponível no Campus Apucarana da UTFPR no departamento de Engenharia Elétrica, e a Sethi3D, do Fablab livre SP, que é uma rede de laboratórios públicos de fabricação digital da cidade de São Paulo.

### **3.2 Moldes para fabricação em silicone**

O processo de confecção por moldes é mais simples que a impressão 3D, mas depende de um planejamento adequado. Os protótipos fabricados em silicone necessitam de moldes de MDF ou plástico. A utilização de moldes em MDF foi escolhida devido à baixa complexidade de produção e alta precisão dimensional.

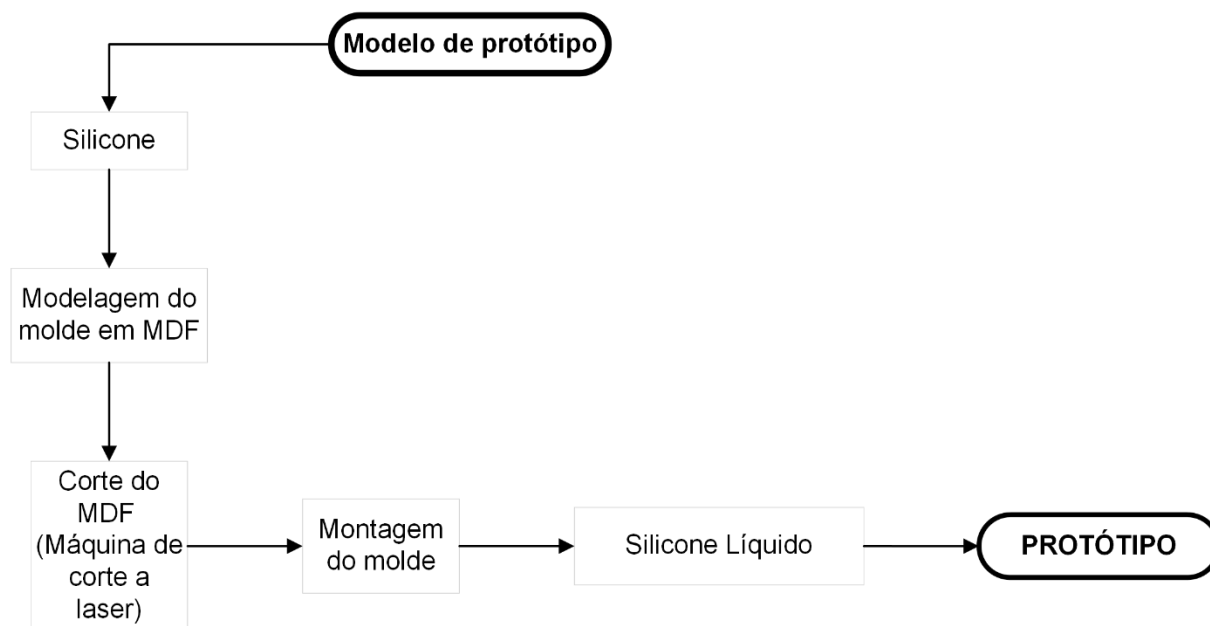
Os moldes de MDF foram modelados em um *software* de modelagem bidimensional, o Autocad. Os componentes do molde foram cortados através do uso de máquina de corte a laser disponível na unidade Vila Itororó do Fablab livre SP, a Sun Special de modelo SSC – 1080. Para o corte foi necessário converter o arquivo em DXF, formato aceito pela máquina. Através do *software* RD Works foram definidas

a origem do corte, as potências e velocidade de corte de acordo com a espessura da placa de MDF. Após a modelagem e corte, montou-se os moldes e iniciou-se o processo de fabricação em silicone.

A borracha de silicone é um elastômero bi-componente, que após a interação com o seu catalisador produz um material elástico e resistente. O tempo de cura depende das características do ambiente, mas em geral é de 24 horas. A proporção de material e catalisador deve seguir estritamente o recomendado pelo fabricante, em uma proporção de massa. Dessa forma, para a fabricação do protótipo utilizou-se uma balança de precisão para dosagem do silicone e do catalisador e se respeitou o tempo indicado de cura para desforma da peça.

O processo de fabricação utilizando moldes e silicone segue o fluxograma ilustrado pela Figura 3.3.

**Figura 3.3 - Fluxograma do processo de fabricação por moldes.**



**Fonte: Autoria própria (2023).**

## 4 PROTÓTIPOS

Neste capítulo são apresentados os protótipos didáticos confeccionados; o processo de modelagem e fabricação; e os respectivos modos de falha demonstrados.

### 4.1 Protótipo de ligação entre chapas planas

O protótipo de ligação entre chapas planas visa demonstrar os modos de ruptura que podem ocorrer em ligações parafusadas entre perfis de aço tracionados, os quais encontram-se explicitados na seção 2.3.4.1 desse trabalho. Em uniões desse tipo, os modos de falha possíveis de ocorrer são: (i) ruptura por corte do fuste do conector; (ii) falha por ovalização do furo ou rasgamento da chapa entre o furo e a borda; (iii) ruptura da chapa na seção transversal líquida (região dos furos); e (iv) falha por cisalhamento de bloco.

Tendo isso em vista, buscou-se criar um modelo físico que exemplifique todos os modos de falha descritos. A ideia foi desenvolver uma peça versátil, que, mediante pequenas mudanças em sua configuração (com o encaixe de elementos avulsos), atingisse o objetivo proposto.

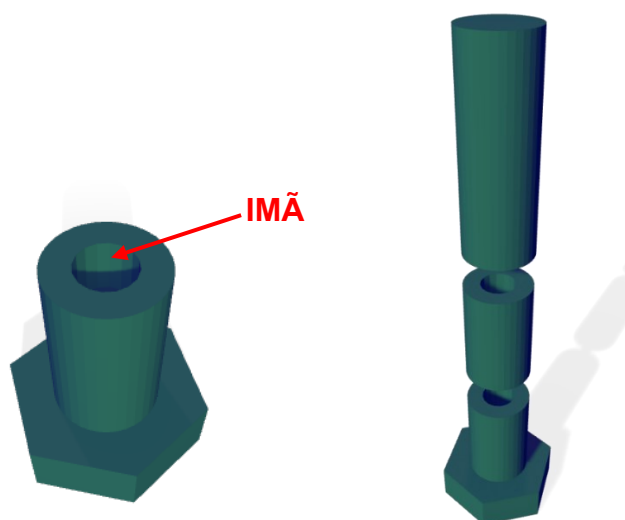
#### 4.1.1 Confeção

O ponto inicial da confecção do protótipo consubstanciou-se na escolha do material e o método que seriam utilizados. Havia a necessidade da utilização de um material rígido e um modo de fabrico preciso. A rigidez da peça se fez indispensável pelos modos de ruptura representados serem majoritariamente por cisalhamento, em que há o corte abrupto da chapa na região de falha. Já a precisão, pela necessidade de encaixar peças complementares. O material escolhido foi o polímero PLA e o método de impressão 3D, pois ambos atendem às demandas observadas.

Definidos material e método, partiu-se para a idealização do protótipo. O primeiro modo de falha considerado foi a ruptura por corte do fuste dos conectores. A idealização iniciou-se pela definição dos tipos de corte de fuste que seriam abordados: corte simples e corte duplo.

Para a representação desses modos de falha, previu-se modelar três chapas planas e parafusos previamente seccionados em três partes, para que na aplicação dos esforços sobre o modelo houvesse a representação do cisalhamento. O parafuso necessitava ser seccionado ao mesmo tempo em que deveria ser uma peça íntegra. Para isso, foi entendido que as partes deveriam se conectar e desconectar com facilidade. Assim, notou-se que o uso de ímãs entre as partes dos fustes dos parafusos proporcionaria o resultado desejado. A Figura 4.1 ilustra a modelagem 3D do parafuso seccionado.

**Figura 4.1 – Modelagem 3D do parafuso seccionado.**



**Fonte: Autoria própria (2023).**

A ideia de um protótipo versátil, que englobasse o maior número de modos de falha, fez com que o modelo passasse por uma série de ajustes. Afinal, a criação da chapa plana precisava representar a ovalização e rasgamento dos furos, a ruptura da seção líquida e o cisalhamento de bloco.

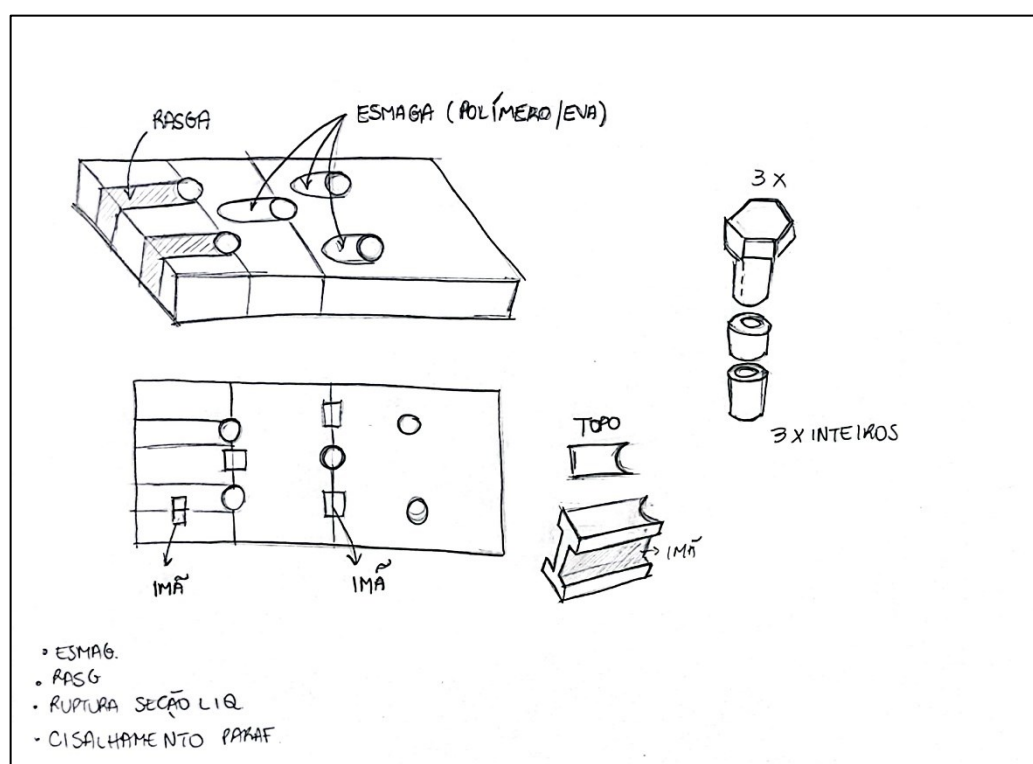
No caso da ovalização e rasgamento dos furos, a ideia foi criar uma chapa com furos alongados e com partes seccionadas entre os furos e a borda da chapa, para que na aplicação dos esforços houvesse o esmagamento e o rasgamento com o destacamento das partes que compõem o modelo. Além disso, no caso do esmagamento, previu-se a associação de um material deformável ao modelo para que a demonstração do modo de falha fosse efetiva.

Na representação da ruptura da seção líquida, optou-se pela representação do caso em que há um único furo e dois furos alinhados na seção solicitada. Em vista

disso, idealizou-se a criação de uma chapa plana com cinco furos desalinhados, para que fosse possível exemplificar dois casos de ruptura da seção líquida, como também o cisalhamento de bloco. O protótipo, portanto, seria composto por três placas, sendo duas inteiras e uma seccionada de acordo com os planos de ruptura desejados.

Assim como no caso do parafuso, a chapa precisa ser ora seccionada, ora íntegra, então as partes também necessitavam ser conectadas por ímãs. A Figura 4.2 ilustra o croqui do modelo, elaborado conforme as ponderações mencionadas.

**Figura 4.2 – Croqui inicial protótipo da chapa plana.**



**Fonte: Autoria própria (2023).**

#### 4.1.1.1 Modelagem e impressão

A modelagem se iniciou pela definição das dimensões. O modelo precisava ser de fácil manuseio ao mesmo tempo que cumprisse os critérios observados. Além disso buscava-se criar um objeto que simulasse a realidade de maneira efetiva. Dessa forma, dimensionou-se a chapa e seus respectivos furos seguindo os critérios de projeto da NBR 8800 (ABNT, 2008) e atentando-se às limitações da impressão 3D.

O primeiro passo foi a definição do diâmetro do parafuso que seria utilizado para a criação do protótipo. As prescrições da NBR 8800:2008 a respeito de

conectores referem-se ao tipo de aço e diâmetro nominal. Com relação ao último, o menor diâmetro permitido pela norma para parafusos estruturais é o de  $\frac{1}{2}$  polegada (12,7 mm). Assim, determinou-se que o parafuso modelado teria essa dimensão.

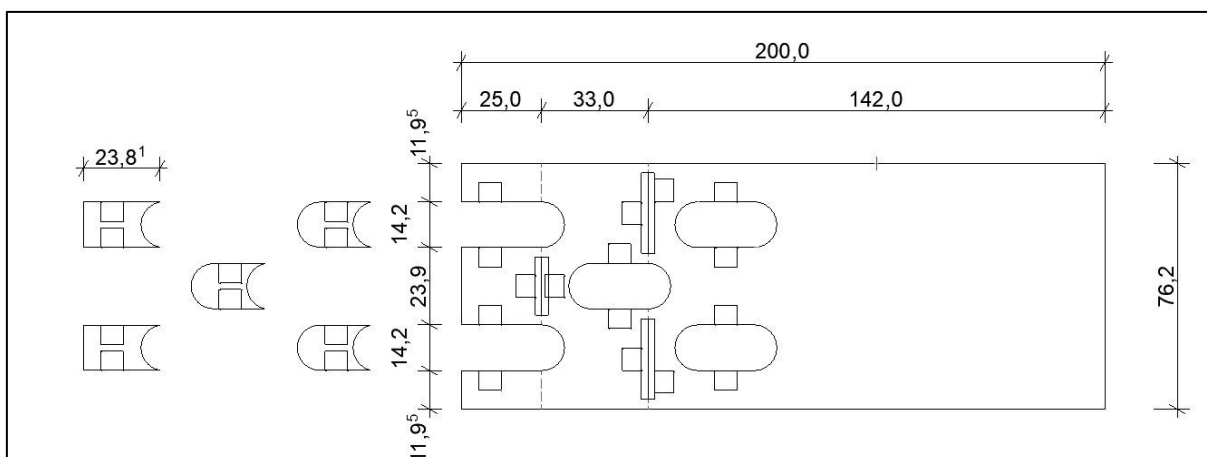
A partir disso, foram determinadas as dimensões da chapa seguindo os critérios de espaçamento e dimensão dos furos. Na tabela 12 do item 6.3.6 a NBR 8800 (ABNT, 2008) se estabelece que o diâmetro de um furo padrão seja o diâmetro do parafuso acrescido de 1,5 mm. Assim, o diâmetro do furo da chapa do protótipo foi estabelecido em 14,2 mm. No item 6.3.9 da norma é definido o espaçamento mínimo entre os centros de dois furos consecutivos, que deve ser igual ou superior a 2,7 vezes a bitola do parafuso. Definiu-se que o espaçamento obedeceria a ordem de 3 vezes o diâmetro do conector, sendo 38,1 mm.

Além desses critérios, a norma estabelece no item 6.3.11 a distância mínima do centro de um furo à borda com base no diâmetro do parafuso utilizado e na condição de fabricação do perfil. Para a criação do modelo considerou-se tratar de um perfil com borda laminada, resultando em uma distância mínima de 19 mm para o parafuso de  $\frac{1}{2}$  polegada.

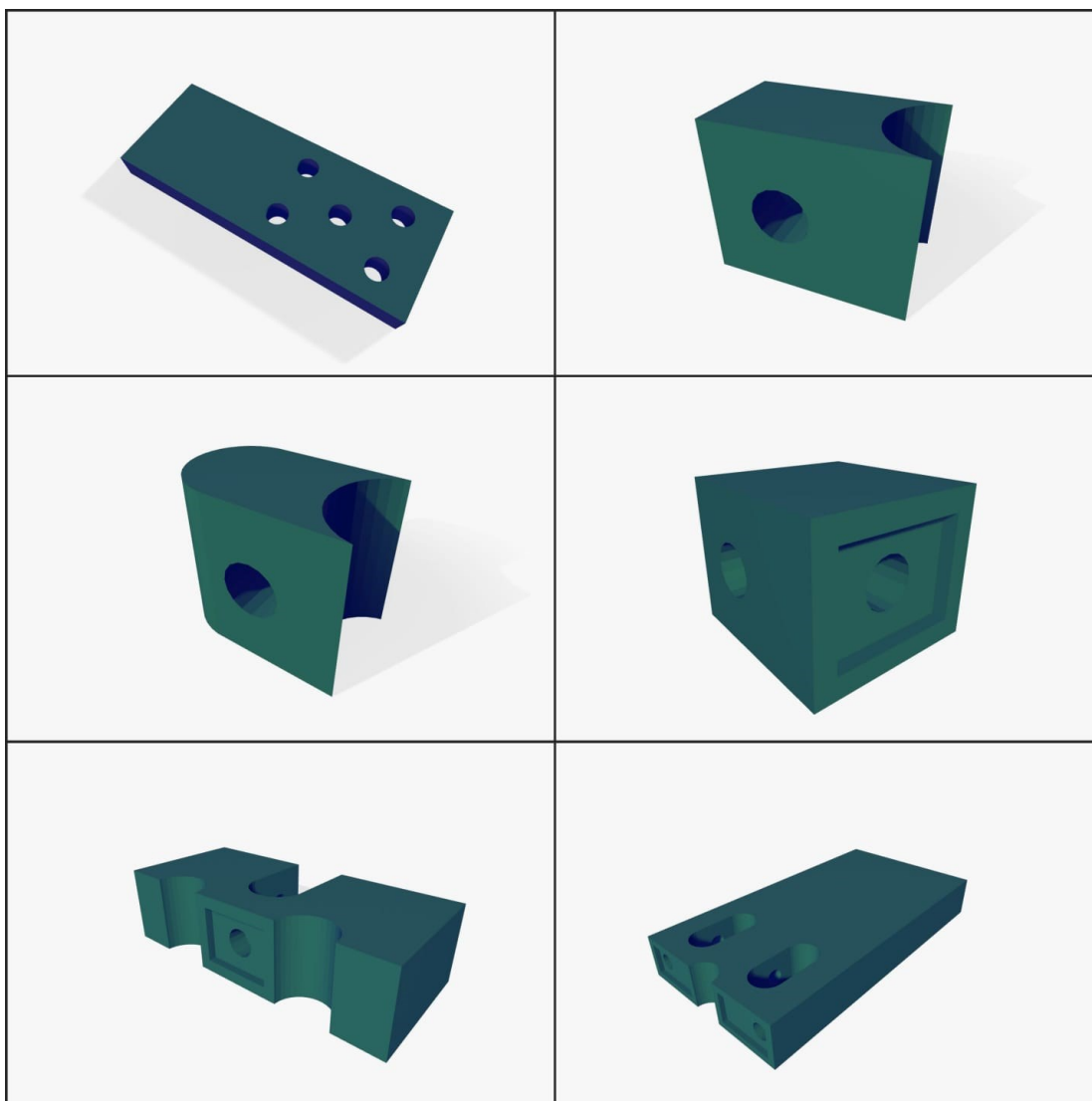
O comprimento e espessura das chapas também necessitavam ser definidos. Nesses casos, os fatores a serem considerados foram as limitações das impressoras a serem utilizadas e as conexões das partes seccionadas. A impressora do campus Apucarana da UTFPR permite impressões de até 300 mm, enquanto a impressora do Fablab Livre SP suporta peças de até 200 mm. Assim, limitou-se o comprimento das chapas em 200 mm.

Como as conexões entre as partes da chapa iriam ser feitas com imãs, o fator limitante era a altura ou diâmetro deles. Os imãs inicialmente escolhidos para serem utilizados foram cilindros de 6x6 mm com força N35. Esses imãs, por serem pequenos, fariam conexões mais frágeis, principalmente nas regiões de grande extensão da chapa. Então, previu-se a associação dos imãs a pequenas chapas metálicas para que o magnetismo da conexão fosse ampliado. A espessura da chapa também seria limitada ao tamanho das placas metálicas, mas não poderia ser de grande espessura a ponto de dificultar o manuseio do protótipo. Dessa maneira, definiu-se que as chapas teriam 20 mm de espessura. As Figuras 4.3 e 4.4 ilustram as dimensões adotadas para o protótipo e as peças modeladas em 3D.



**Figura 4.3 – Dimensões iniciais em milímetros do protótipo das chapas planas.**

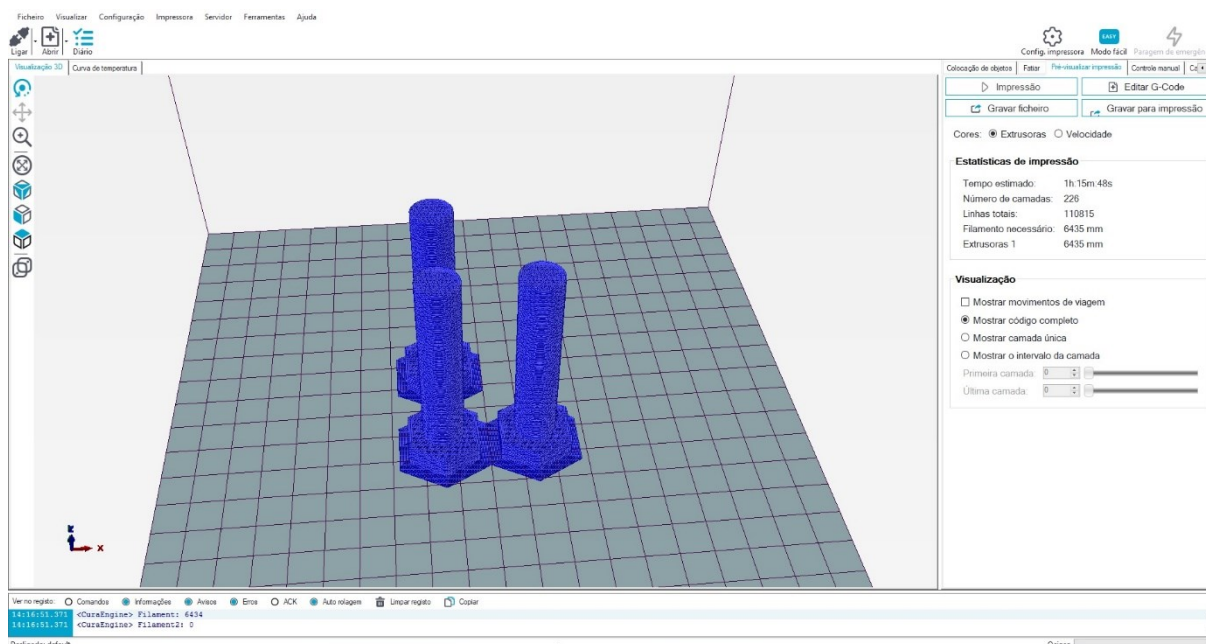
Fonte: Autoria própria (2023).

**Figura 4.4 – Modelagem 3D do protótipo das chapas planas.**

Fonte: Autoria própria (2023).

Após o processo de modelagem do protótipo e conversão dos arquivos para o formato STL, iniciou-se o processo de impressão. O tempo de impressão está associado às dimensões, à qualidade, ao preenchimento de cada peça e a velocidade da impressora utilizada. A Figura 4.5 ilustra o fatiamento do arquivo para a impressão de 3 parafusos. Nessa figura é possível observar a previsão de tempo e de material a serem gastos para a impressão.

**Figura 4.5 – Fatiamento dos parafusos para impressão.**

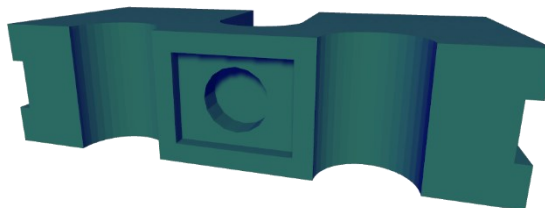


**Fonte: Autoria própria (2023)**

#### 4.1.1.2 Aperfeiçoamento do modelo

O protótipo das chapas planas passou por algumas readequações durante o processo de pesquisa. O modelo inicial possuía algumas falhas que necessitavam ser corrigidas. A primeira falha estava nas conexões, de modo que nas regiões de demonstração da ruptura da seção líquida, os imãs escolhidos não possuíam força suficiente para suportar o peso das chapas. A solução foi trocar os imãs nessas regiões para o modelo de disco de 10x4 mm com força N 42. A Figura 4.6 ilustra a peça adaptada para o novo tipo de imã.

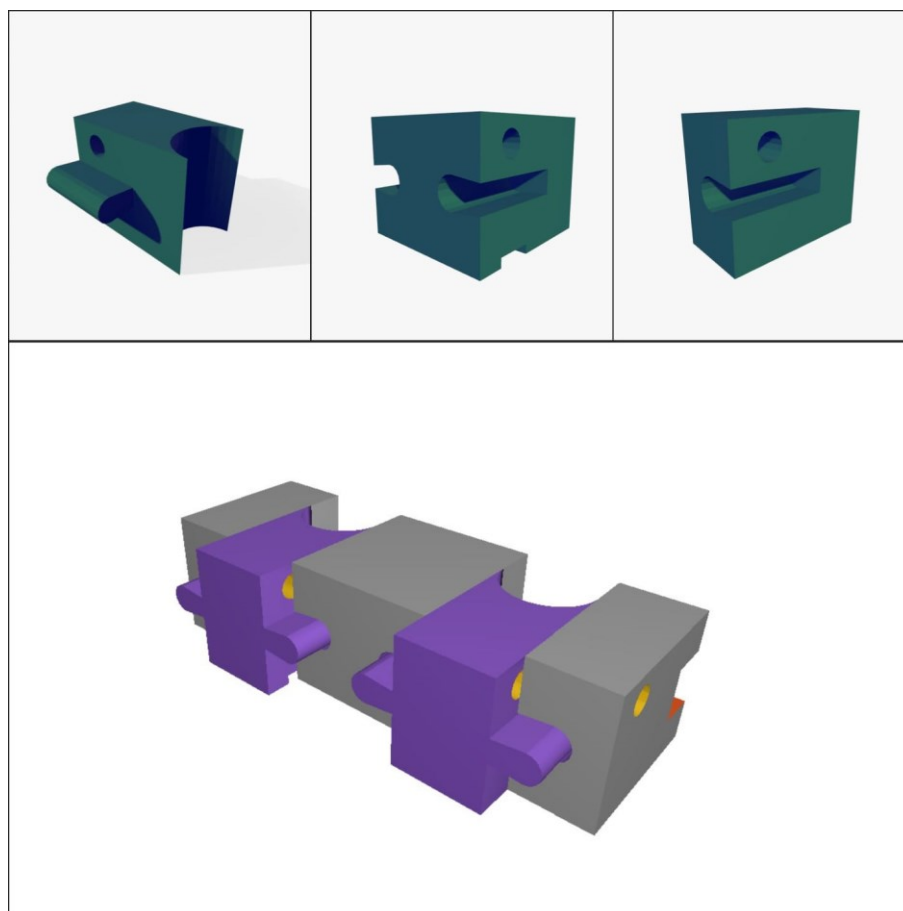
**Figura 4.6 – Adaptação das peças para conexão com ímã de disco 10x4 mm.**



**Fonte: Autoria própria (2023).**

Outros pontos de fragilidade estavam nas peças que iriam se destacar devido ao rasgamento do furo até a borda da chapa. A conexão com ímãs fragilizava a região de forma que a ligação não se sustentava, além de ter interferência magnética entre os ímãs que estavam muito próximos entre si. Esses pontos não permitiam que o modo de ruptura fosse exemplificado de maneira efetiva. A solução foi alterar as peças para um modelo com aba e calha deslizante, como ilustra a Figura 4.7.

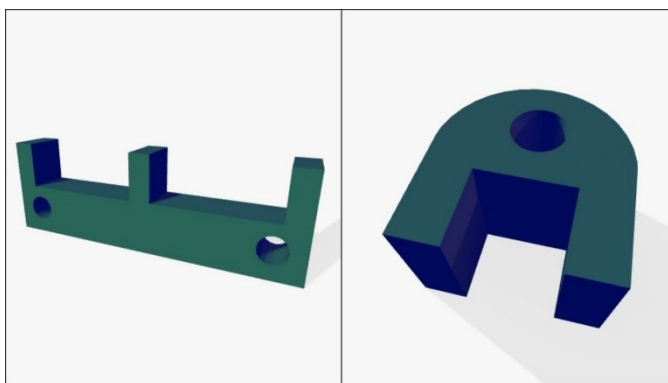
**Figura 4.7 – Adaptação das peças para modelo com aba e calha deslizante.**



**Fonte: Autoria própria (2023).**

As alterações feitas solucionaram os problemas pontuais acerca do protótipo, mas ainda se notavam falhas que não permitiam demonstrar todos os modos de ruptura previstos de forma isolada. Com base nisso, foram criadas peças de travamento a serem acopladas à chapa para garantir o não desprendimento de determinados componentes. A Figura 4.8 ilustra as peças de travamento desenvolvidas.

**Figura 4.8 – Peças de travamento dos componentes do protótipo.**



**Fonte: Autoria própria (2023).**

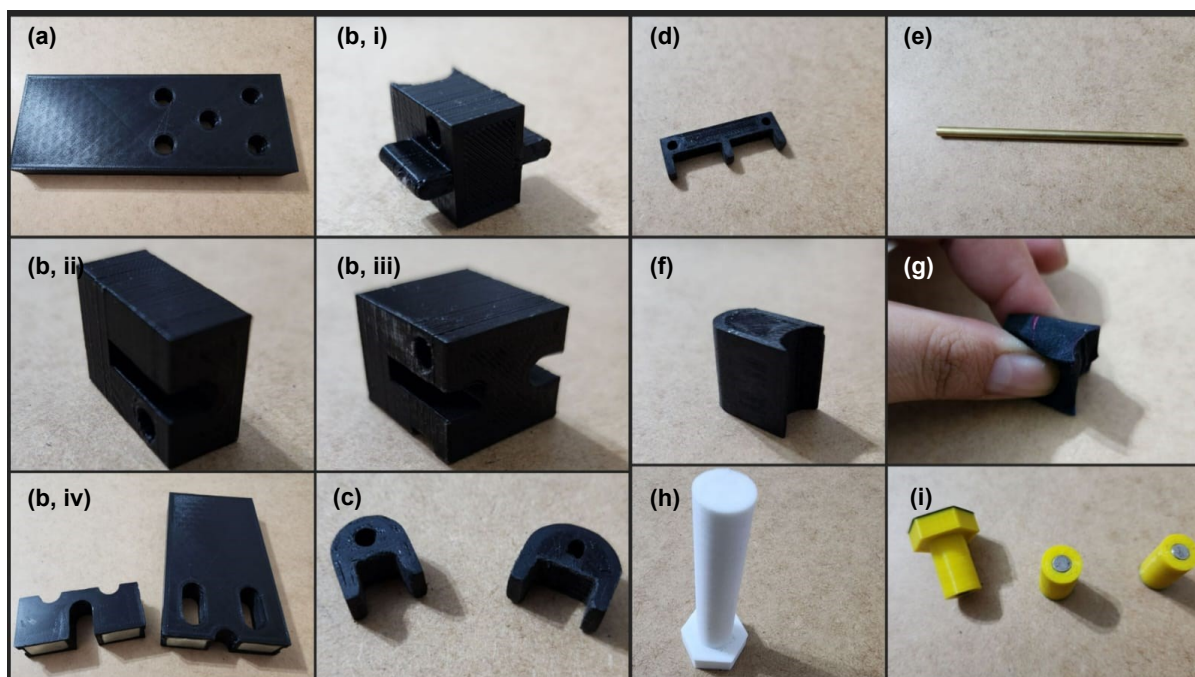
#### 4.1.2 Modelo final e modos de falha demonstráveis

O modelo final do protótipo das chapas planas é composto por 30 peças, sendo:

- a) 2 chapas inteiras com 5 furos;
- b) 1 chapa fracionada, formada por:
  - i. 2 peças com abas deslizantes;
  - ii. 2 peças laterais com calhas deslizantes;
  - iii. 1 peça central com calha deslizante;
  - iv. 2 peças conectadas por imãs.
- c) 4 conectores de travamento lateral;
- d) 1 conector de travamento superior;
- e) 1 pino metálico de travamento;
- f) 3 complementos de furo rígidos;
- g) 3 complementos de furo deformáveis;
- h) 3 parafusos inteiros;
- i) 2 parafusos seccionados, seccionados em três partes.

A Figura 4.9 ilustra o conjunto das peças que compõe o protótipo das chapas planas.

Figura 4.9 – Componentes do modelo final do protótipo das chapas planas.



Fonte: Autoria própria (2023).

#### 4.1.2.1 Ruptura por corte do fuste do conector

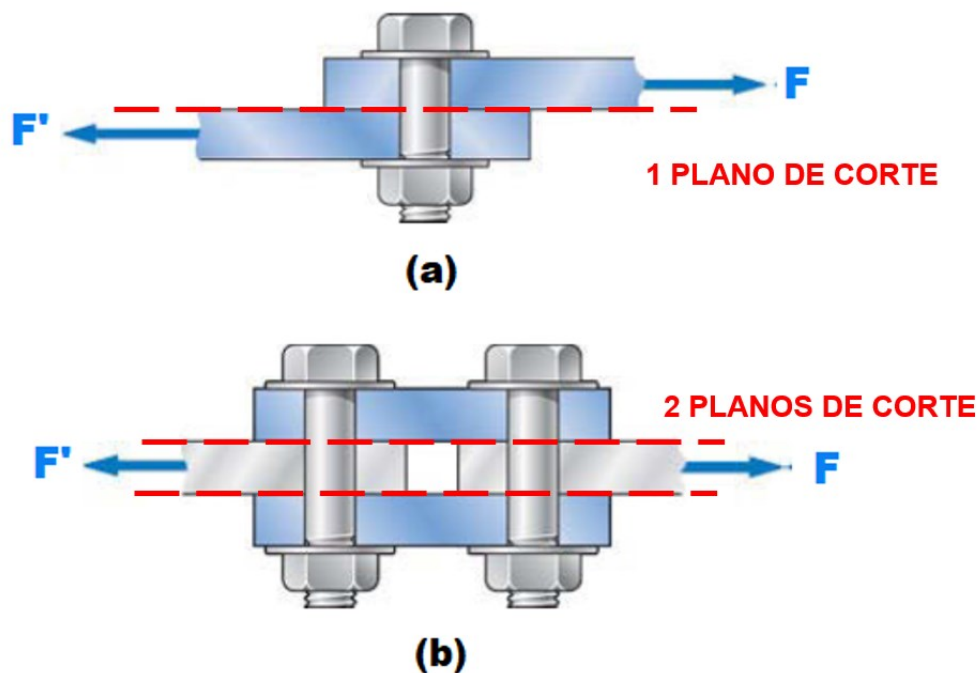
A NBR 8800 (ABNT, 2008) prevê a ocorrência da falha de ligações parafusadas devido ao corte do fuste dos conectores. Esse tipo de ruptura ocorre devido à baixa resistência do conector aos esforços solicitantes de cisalhamento.

A tração das chapas em sentidos opostos tende a provocar o deslizamento relativo entre seções adjacentes do corpo do parafuso. Caso as forças de tração aplicadas pelas chapas sejam maiores que a capacidade resistente dos conectores, haverá o colapso da ligação pela ruptura do conector.

Os planos de corte aos quais uma ligação parafusada está sujeita dependem da quantidade de chapas associadas. Quando há a associação de duas chapas, o parafuso está sujeito a corte simples, ou seja, haverá somente um plano de corte no encontro das duas chapas. No caso da associação de três chapas, haverá dois planos de corte, configurando o corte duplo. A Figura 4.10 ilustra os modos de falha que

podem ser reproduzidos pelo protótipo referentes aos casos de corte simples e corte duplo.

Figura 4.10 – Representação da ruptura do fuste dos conectores: (a) um plano de corte; (b) dois planos de corte.

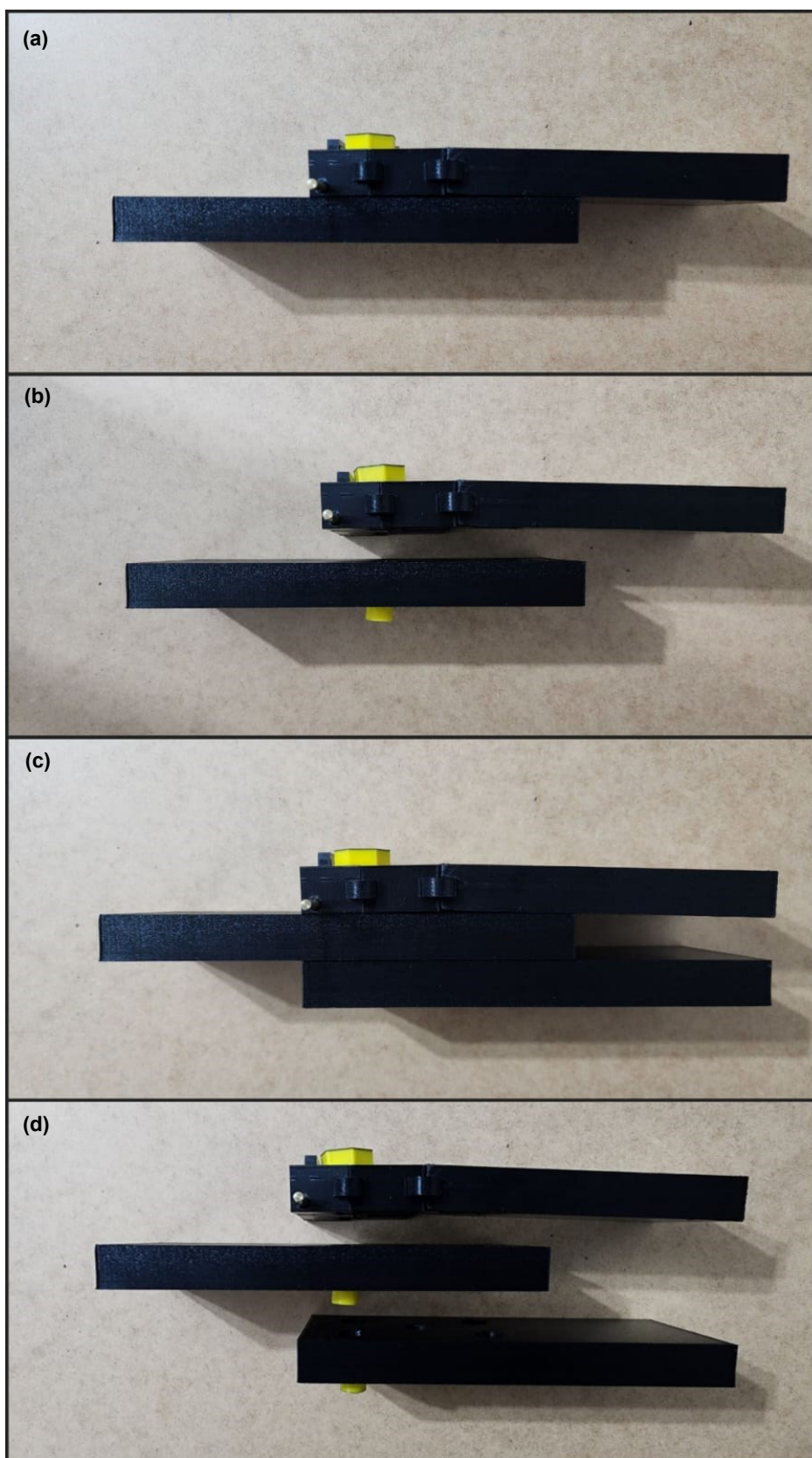


Fonte: Adaptado de Beer (2015, p. 9 e p.10).

O protótipo simula de forma realista o fenômeno descrito. Ao associar as chapas e os parafusos seccionados, o usuário deve aplicar forças de tração nas chapas. Os esforços internos desenvolvidos na ligação farão com que as partes dos parafusos unidos por meio de imãs deslizem entre si, ocorrendo a ruptura do fuste dos conectores por cisalhamento.

A simulação descrita permite que o usuário do modelo tenha uma resposta tátil-visual ao esforço provocado. Ao tracionar a chapa, ele sente as chapas deslizarem e pressionarem os parafusos até seu “rompimento”, quando ocorre um alívio abrupto da força aplicada e as partes do fuste dos parafusos cisalham e se desprendem conforme pode ser observado na Figura 4.11.

**Figura 4.11 – Aplicação do protótipo na representação da ruptura do fuste dos conectores: (a) situação inicial duas chapas; (b) ruptura em um plano de corte; (c) situação inicial três chapas; (d) ruptura em dois planos de corte.**



Fonte: Autoria própria (2023).

#### 4.1.2.2 Ruptura por ovalização do furo

A ruptura por ovalização do furo é outro estado limite previsto pela NBR 8800 (ABNT, 2008), em que a resistência das chapas aos esforços na região dos furos é menor do que a dos conectores. Nessa situação, as chapas que compõem a ligação são tracionadas em direções opostas, provocando a compressão do corpo do conector contra a borda do furo. A pressão de contato entre o fuste do conector e a chapa provoca o esmagamento da borda do furo e sua subsequente ovalização.

A falha decorre da plastificação localizada do aço, que se manifesta por meio da grande deformação do material (ovalização). A Figura 4.12 ilustra a ocorrência do esmagamento do furo.

**Figura 4.12 – Chapa de aço com deformação excessiva do furo (esmagamento).**

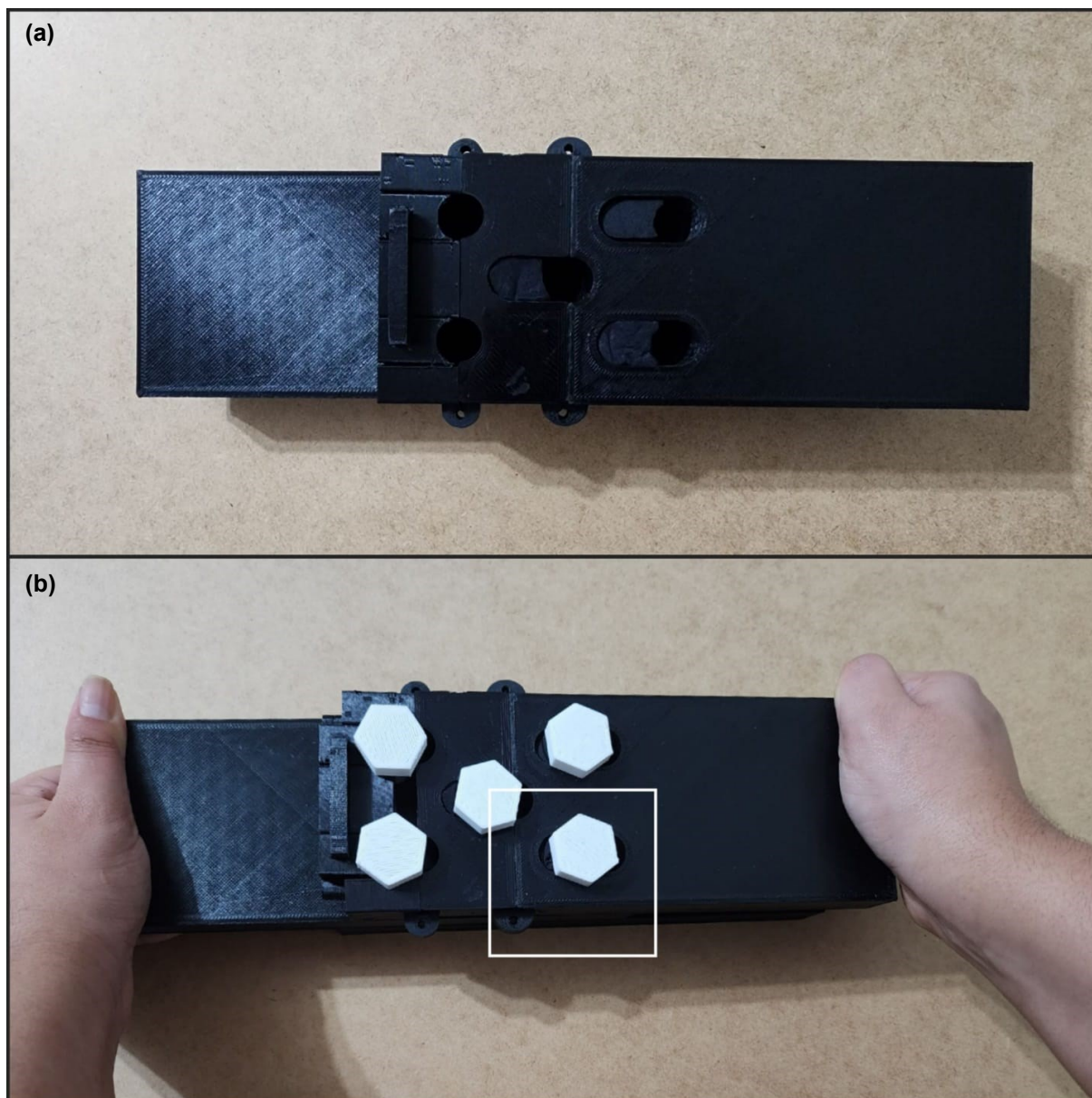


Fonte: RIBEIRO NETO (2016, p. 36)

Para a demonstração desse modo de falha, idealizou-se furos alongados para o protótipo onde pudesse ser encaixado um material deformável (espuma de poliuretano hidrofílico) capaz de simular a plastificação do aço. No manuseio do modelo, o usuário deve fazer uso da chapa com a espuma acoplada e de parafusos inteiros. Ao aplicar um esforço de tração nas chapas, o fuste do parafuso será pressionado contra a borda do furo e ocorrerá o esmagamento da espuma. O usuário terá assim uma resposta tátil-visual do fenômeno ocorrido. A Figura 4.13 ilustra o funcionamento do protótipo para a situação simulada.



**Figura 4.13 – Aplicação do protótipo para a representação da ruptura por ovalização do furo: (a) situação anterior à aplicação da tração; (b) protótipo após aplicação do esforço.**



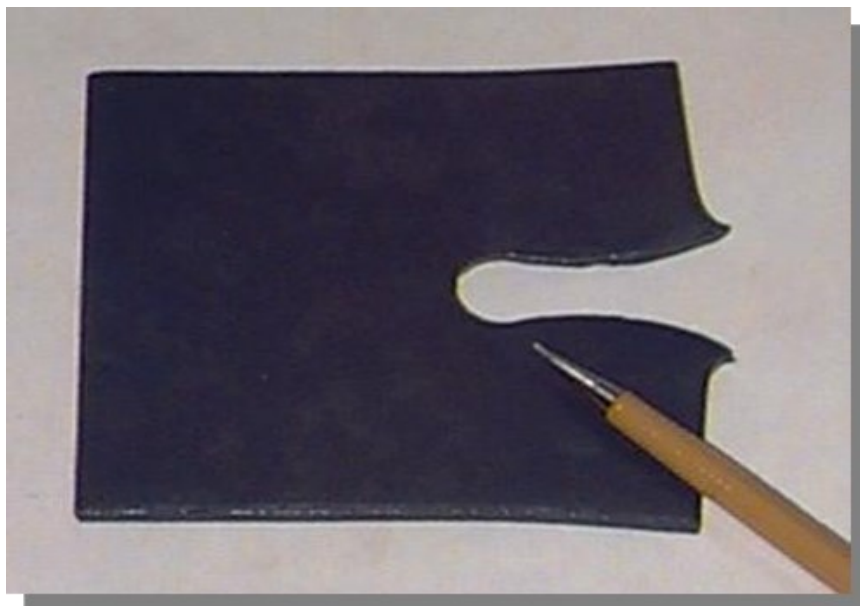
Fonte: Autoria própria (2023).

#### 4.1.2.3 Ruptura por rasgamento da chapa entre o furo e a borda

Assim como na falha por ovalização do furo, a ruptura por rasgamento da chapa ocorre devido à fragilidade na região do furo, em que a resistência da chapa é menor que a do conector. Ao tracionar chapas conectadas por parafusos, novamente haverá a pressão de contato entre o fuste dos conectores e a borda do furo. O processo de plastificação ocorre da mesma maneira que no caso da ovalização, provocando o deslocamento do conector na chapa. No entanto, pelo fato de o furo

estar próximo à borda, o deslocamento do conector acarreta a ruptura da região através do rasgamento da chapa. A Figura 4.14 expõe a situação descrita.

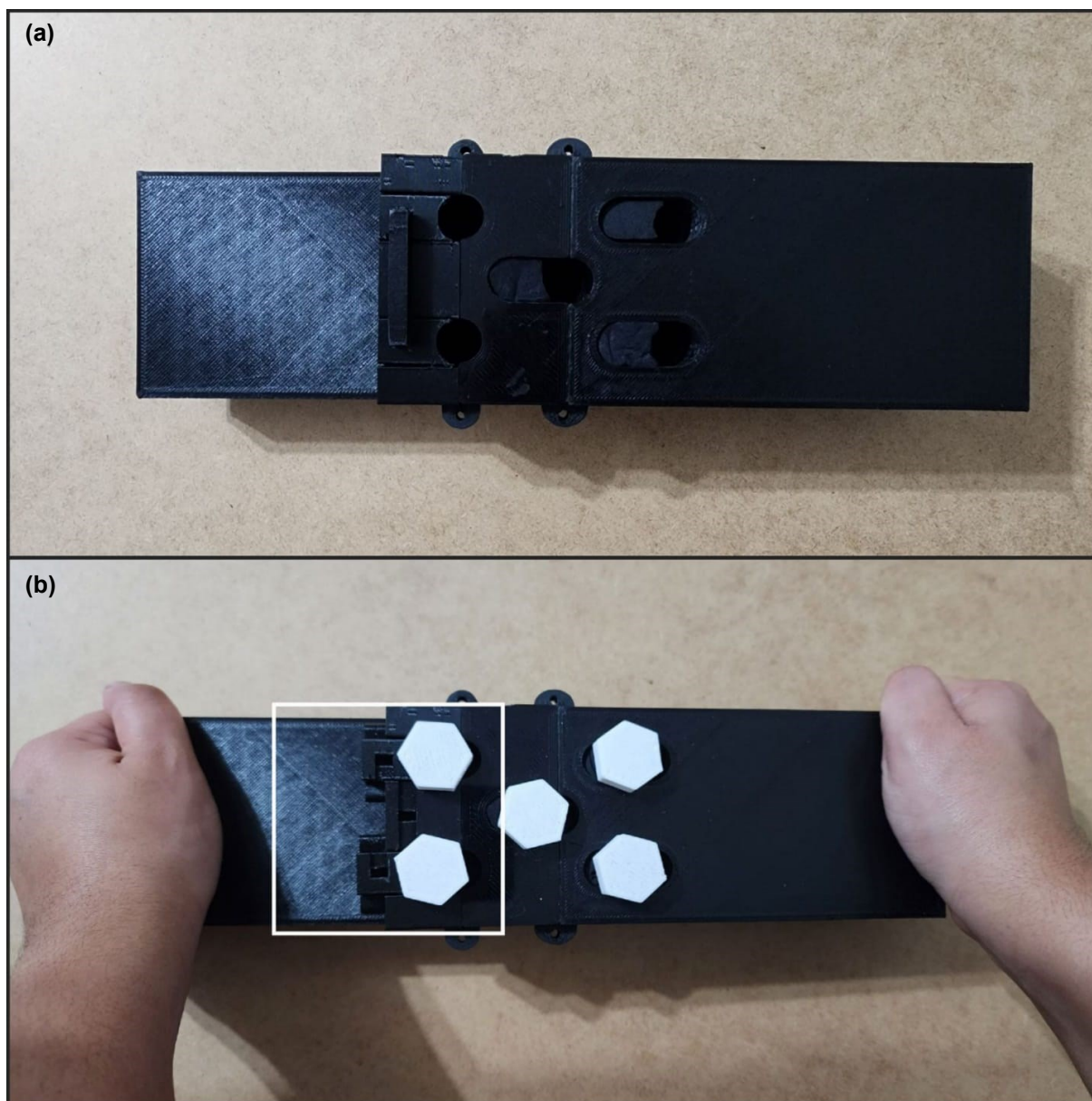
**Figura 4.14 – Colapso da chapa por rasgamento.**



**Fonte: RIBEIRO NETO (2016, p. 36)**

Dessa maneira, o protótipo foi construído de forma que, ao conectar as chapas aos parafusos inteiros e aplicar esforços de tração nas chapas, a pressão de contato entre os parafusos e a chapa provocará o destacamento das peças deslizantes. A Figura 4.15 ilustra a simulação mencionada.

**Figura 4.15 – Aplicação do protótipo para a representação da ruptura por rasgamento da chapa: (a) situação anterior à aplicação da tração; (b) protótipo após aplicação do esforço.**



**Fonte: Autoria própria (2023).**

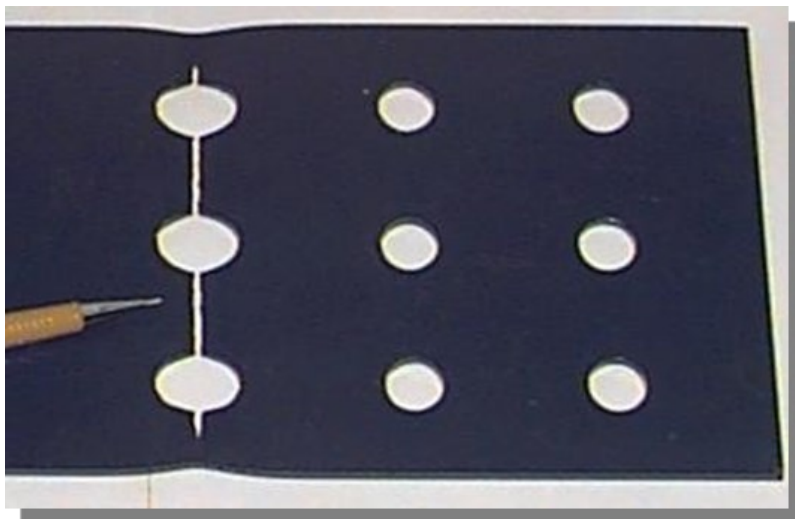
À semelhança dos casos anteriores, o protótipo permitirá ao usuário uma resposta sensorial ao esforço de tração provocado.

#### 4.1.2.4 Ruptura por tração da chapa na seção líquida

A ruptura da seção líquida ocorre de forma perpendicular à força de tração aplicada sobre o elemento, sendo o plano de falha alinhado ao centro dos furos dos conectores. Esse fenômeno ocorre em virtude da redução da área da seção

transversal da chapa solicitada, o que impacta sua resistência. A diminuição de área está atrelada e é proporcional à quantidade de furos presentes no plano de ruptura. A Figura 4.16 ilustra o mecanismo de falha descrito.

**Figura 4.16 – Colapso da chapa por ruptura da seção líquida.**

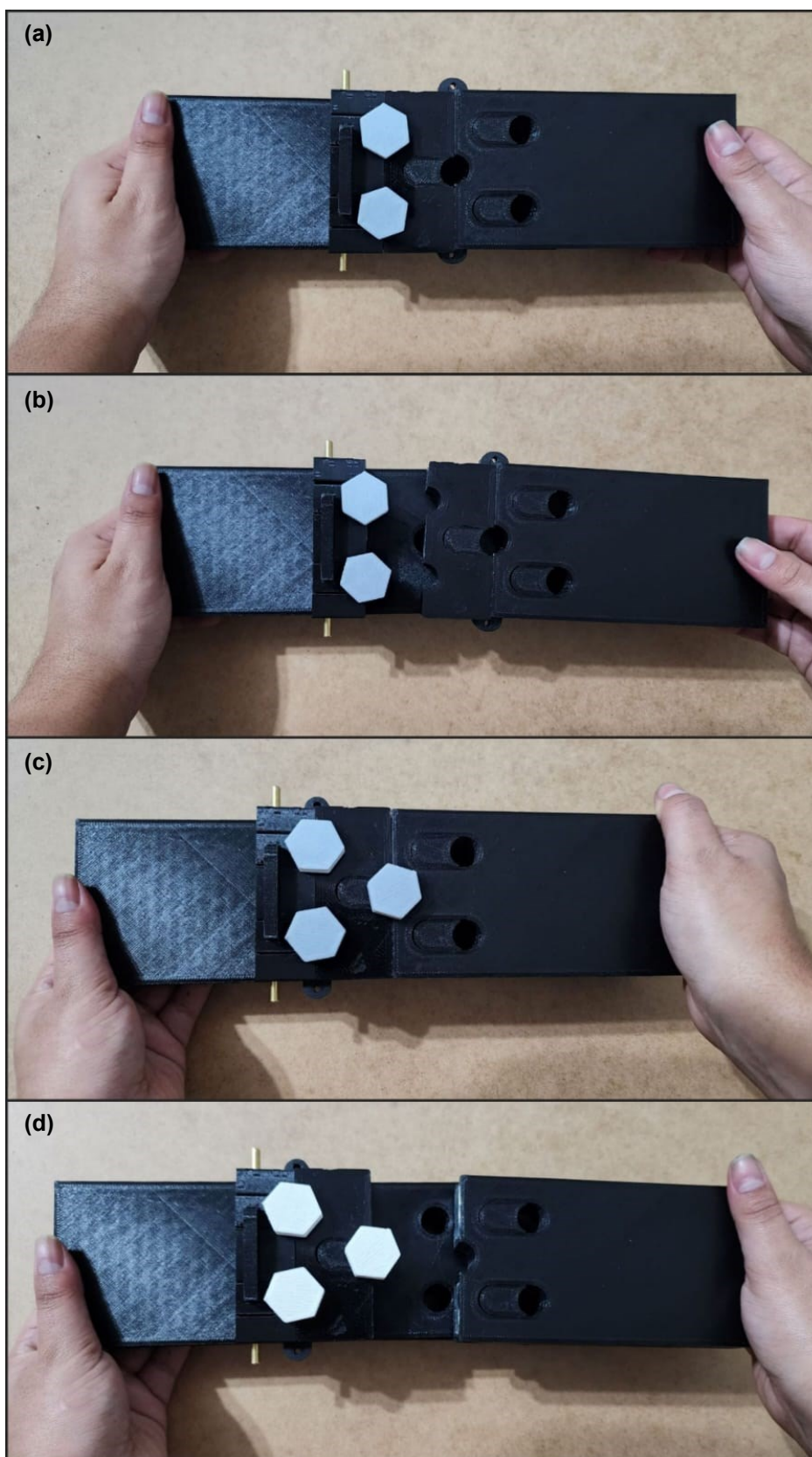


**Fonte: RIBEIRO NETO (2016, p. 36)**

O protótipo foi desenvolvido com duas regiões de fragilidade. O desalinhamento dos furos permite simular duas situações: plano de ruptura cruzando um ou dois furos. O intuito é que o usuário, ao tracionar a chapa, perceba a diferença no grau de solicitação necessária para causar a ruptura do elemento em cada situação, sendo a região com apenas um furo a qual demanda um esforço maior para que haja a ruptura.

A maneira em que o modelo foi construído simula efetivamente a situação descrita. Na região em que há dois furos, há somente um ímã em cada face. Na região que há um único furo, há dois ímãs em cada face. Ao manusear o protótipo, o usuário tem uma resposta tátil visual. Ao tracionar as chapas, ele sente a diferença de esforço necessário para cada caso devido à força magnética que os ímãs proporcionam, além de observar a ocorrência da ruptura. A Figura 4.17 ilustra as simulações descritas.

**Figura 4.17 – Aplicação do protótipo para a representação do colapso ocasionado pela ruptura da seção líquida: (a) situação anterior à aplicação da tração na região de dois furos; (b) protótipo após aplicação do esforço na região de dois furos; (c) situação anterior à aplicação da tração na região de um furo; (d) protótipo após aplicação do esforço na região de um furo.**



Fonte: Autoria própria (2023).

#### 4.1.2.5 Cisalhamento de bloco

A falha por cisalhamento de bloco consiste na ocorrência simultânea de dois modos de falha: a ruptura da parte da seção líquida e o rasgamento da chapa ao longo da linha de conectores. Ambas as situações sucedem o processo de plastificação das regiões fragilizadas da chapa. A Figura 4.18 exemplifica a situação descrita.

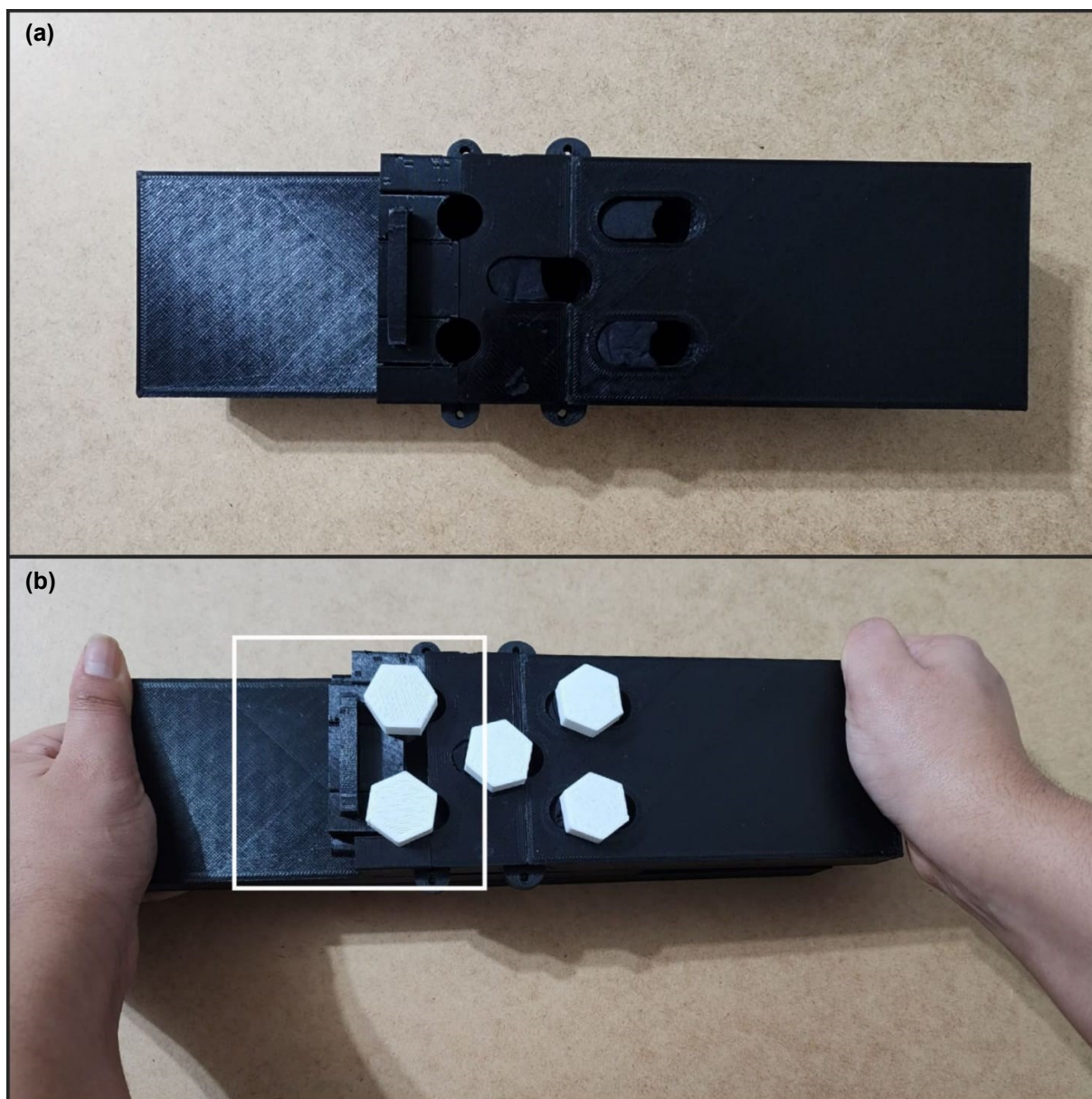
**Figura 4.18 – Ruptura da chapa por cisalhamento de bloco.**



**Fonte: THECONSTUCTOR [s.d]**

As chapas deslizantes do modelo foram criadas para demonstrar o rasgamento da chapa do furo à borda, mas quando associadas por um encaixe permitem que o usuário possa visualizar o cisalhamento de bloco ocorrendo na seção transversal com dois furos. Em virtude de o protótipo ter os furos desalinhados, fica claro que a ocorrência do fenômeno não está vinculada a todos os furos presentes no elemento e sim às regiões menos resistentes. A Figura 4.19 ilustra a demonstração do cisalhamento de bloco mediante o emprego do protótipo.

**Figura 4.19 – Aplicação do protótipo para a representação da ruptura por cisalhamento de bloco: (a) situação anterior à aplicação da tração; (b) protótipo após aplicação do esforço.**



**Fonte: Autoria própria (2023).**

Do mesmo modo que nas situações anteriores, o protótipo das chapas planas permite que o usuário, ao aplicar esforços de tração no modelo, tenha uma experiência sensorial dos fenômenos envolvidos no colapso por cisalhamento de bloco. As chapas deslizantes associadas permitem uma clara visualização do fenômeno e os ímãs contribuem para a percepção tátil do esforço que desencadeia a falha.

## 4.2 Protótipo de ligação de cantoneiras

O protótipo didático de ligação por cantoneiras foi desenvolvido com dois propósitos: a exemplificação desse tipo de ligação em um nó de uma treliça (ligação comumente utilizada no projeto de estruturas metálicas de telhados) e a demonstração das situações de ruptura devido aos esforços de tração (cisalhamento de bloco no caso de furos alinhados e a ruptura da seção líquida). Esses modos de ruptura estão descritos na seção 2.3 desse trabalho.

### 4.2.1 Confeção

A confeção do protótipo seguiu os mesmos critérios de desenvolvimento do modelo das chapas planas, desde a escolha dos materiais e métodos de fabricação, até a definição das dimensões. Os tipos de falha a serem apresentadas são principalmente por cisalhamento, assim como no caso do protótipo das chapas planas.

Assim, a impressão 3D e o material PLA foram escolhidos devido a necessidade de precisão e rigidez das peças. A utilização de imãs nas regiões de ruptura foi previamente considerada.

#### 4.2.1.1 Modelagem e impressão

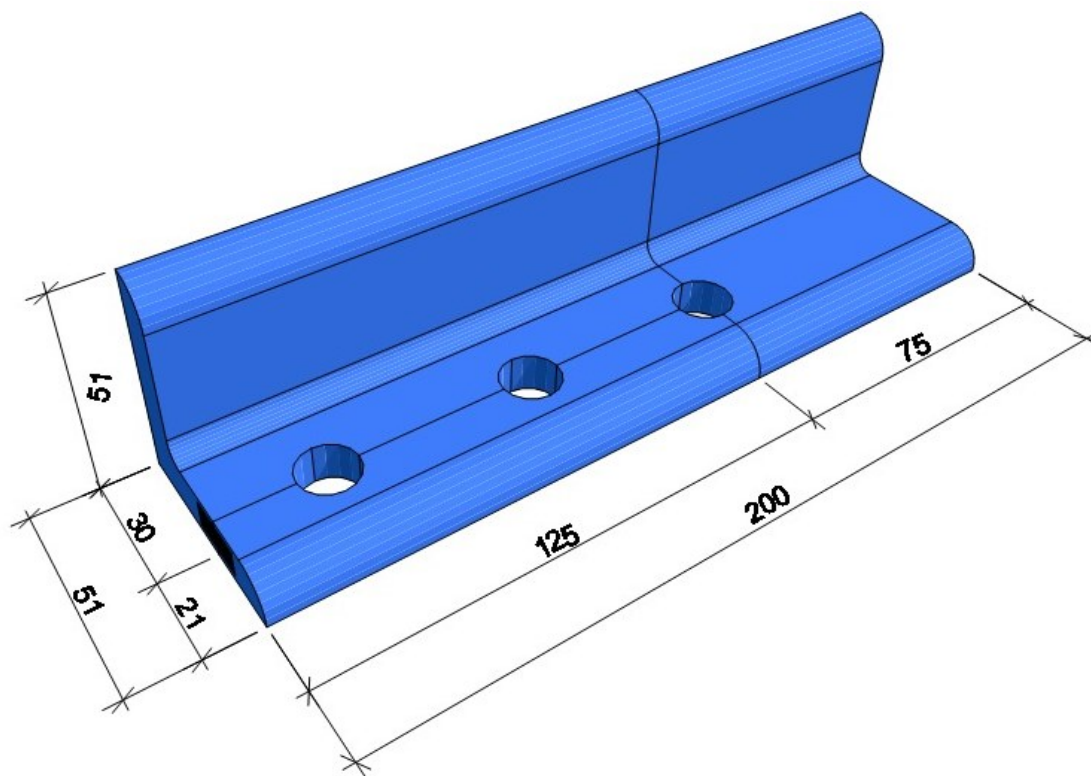
A idealização do modelo teve como critérios a facilidade de manuseio, de confeção e a aproximação com a realidade. A cantoneira escolhida para ser confeccionada foi a de abas iguais e as dimensões foram definidas de acordo com o catálogo geral da GERDAU. O modelo de 2 polegadas com espessura de 9,52 mm foi escolhido, pois além de simular efetivamente a realidade, possui dimensões que atendem as demandas da impressão 3D e permite o encaixe de imãs.

O principal modo de ruptura a ser representado é o cisalhamento de bloco de furos alinhados. Para isso, definiu-se que o modelo seria composto por três furos. A dimensão dos furos respeitou as especificações mínimas da NBR 8800 (ABNT, 2008) para o parafuso de ½ polegada, já os espaçamentos adotados foram ligeiramente superiores ao mínimo previsto na norma. O comprimento da cantoneira foi definido com 150 mm, dimensão que atende ao espaçamento dos furos e às limitações de



impressão dos equipamentos disponíveis. A Figura 4.20 ilustra o modelo com as dimensões adotadas.

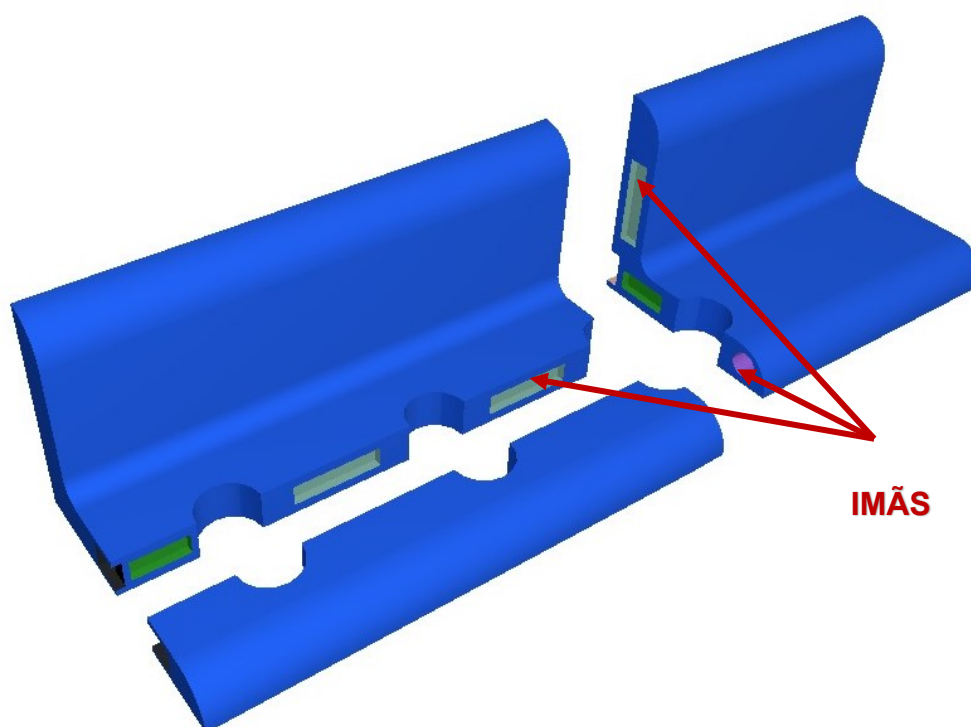
**Figura 4.20 – Dimensões iniciais do protótipo de ligação de cantoneiras.**



**Fonte: Autoria própria (2023).**

O colapso por cisalhamento de bloco ocorre pelo cisalhamento da região central dos furos ao mesmo tempo em que há a ruptura por tração da seção do furo à borda, ocasionando o destacamento da peça. Com base nisso, previu-se criar uma cantoneira seccionada na região do alinhamento dos furos e na área tracionada. As regiões de ruptura são unidas por imãs e, assim como no protótipo das chapas planas, há peças de travamento, permitindo demonstrar os modos de ruptura de forma isolada. Assim, modelou-se o protótipo com base nas ponderações como é possível observar na Figura 4.21.

Figura 4.21 – Modelagem 3D inicial do protótipo de ligação por cantoneiras.

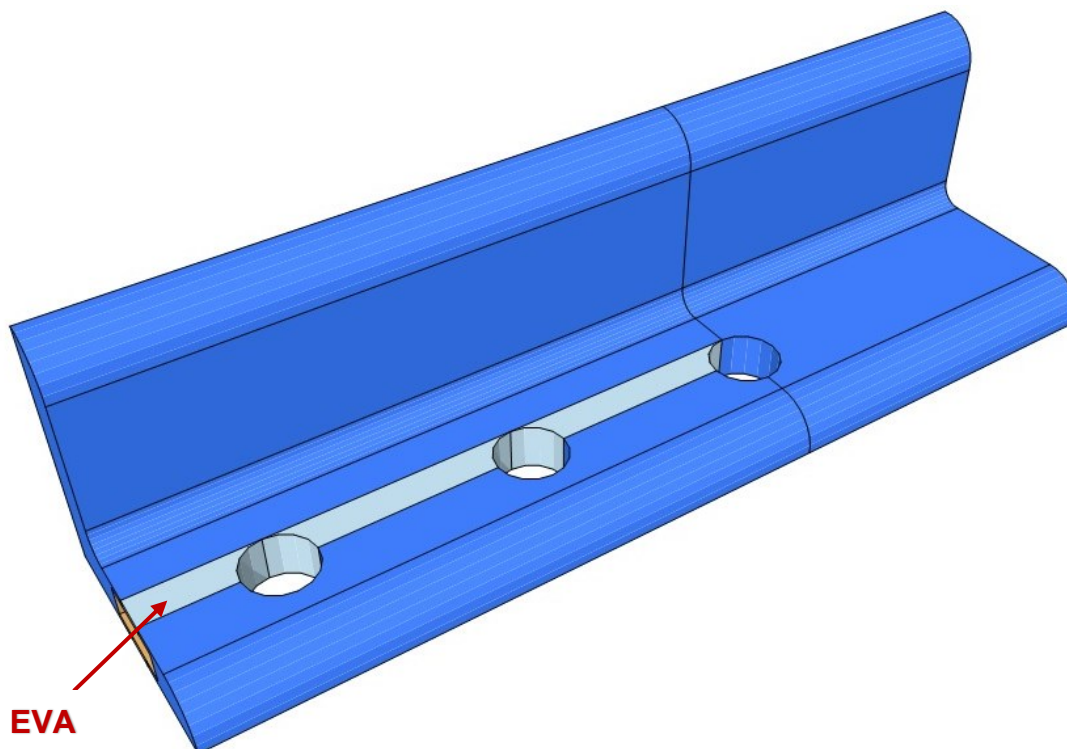


Fonte: Autoria própria (2023).

Durante o processo de modelagem, notou-se uma possível falha no modelo idealizado. A união por imãs da região sujeita ao cisalhamento não permite o destacamento da peça cisalhada, pois os parafusos não conseguem deslizar ao longo da chapa que compõe o perfil, provocando a ruptura. No caso real, a pressão dos conectores nas bordas dos furos causa a plastificação da chapa e, a depender do esforço de tração, ocorre o rasgamento ao longo do alinhamento dos furos.

Dessa maneira, percebeu-se a necessidade da utilização de um material maleável complementar que deformasse quando os conectores pressionassem a borda do furo e permitisse o deslizamento da região cisalhada, demonstrando a plastificação do aço. Nesse contexto, considerou-se a criação de uma peça em EVA que unida às peças da cantoneira permitisse a representação do modo de falha de maneira efetiva. A Figura 4.22 é um croqui do modelo com o EVA acoplado.

**Figura 4.22 – Croqui com adaptação do protótipo de ligação de cantoneiras para utilização de EVA.**

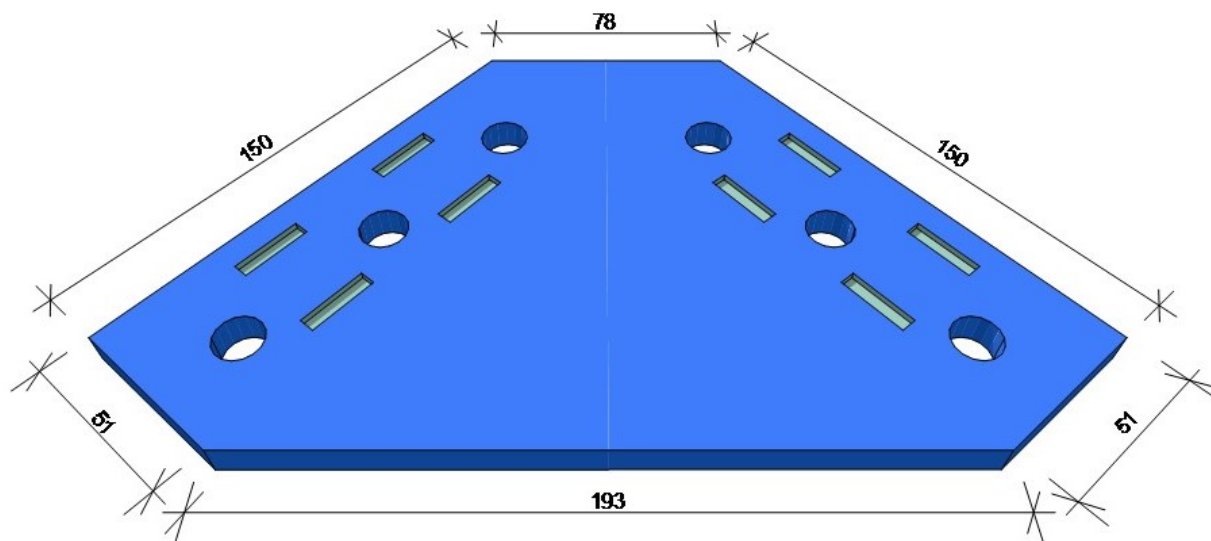


**Fonte: Autoria própria (2023).**

Uma nova falha no modelo foi observada, de modo que não era possível unir a peça que se destacaria devido ao cisalhamento ao restante da cantoneira, pois o uso do EVA não permite a aplicação de ímãs nessa região. A solução encontrada foi unir as peças da cantoneira pela base que estaria em contato com a chapa de ligação. A chapa de ligação seria confeccionada exclusivamente com o intuito de representar um nó de uma treliça metálica, mas devido às necessidades observadas ela passou a apresentar dupla função.

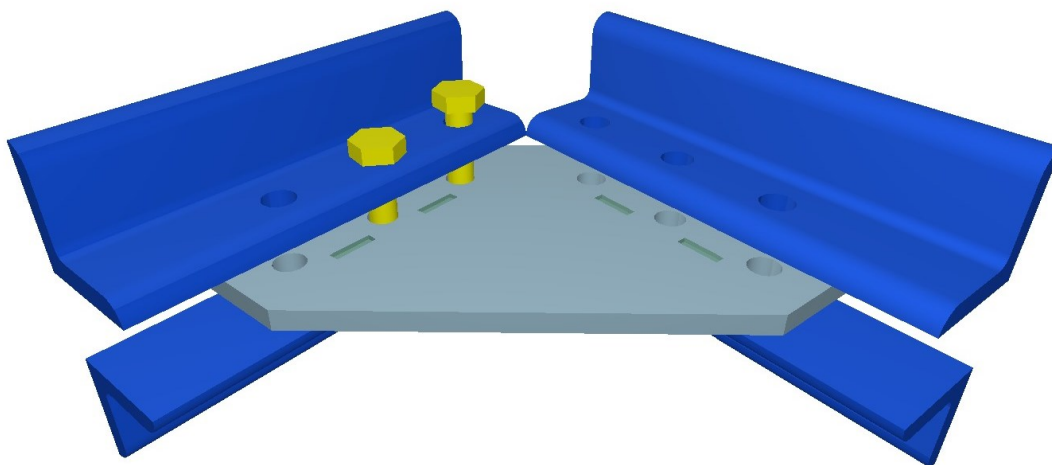
A chapa de ligação foi projetada tendo como critério a união de 4 cantoneiras para formar o nó superior de uma treliça. As dimensões foram definidas respeitando a limitação dos equipamentos de impressão e as angulações comumente utilizadas em telhados. As Figuras 4.23 e 4.24 ilustram a chapa de ligação com as dimensões adotadas e os perfis cantoneira a serem unidos à chapa.

Figura 4.23 – Dimensões em milímetros da chapa de ligação do protótipo.



Fonte: Autoria própria (2023).

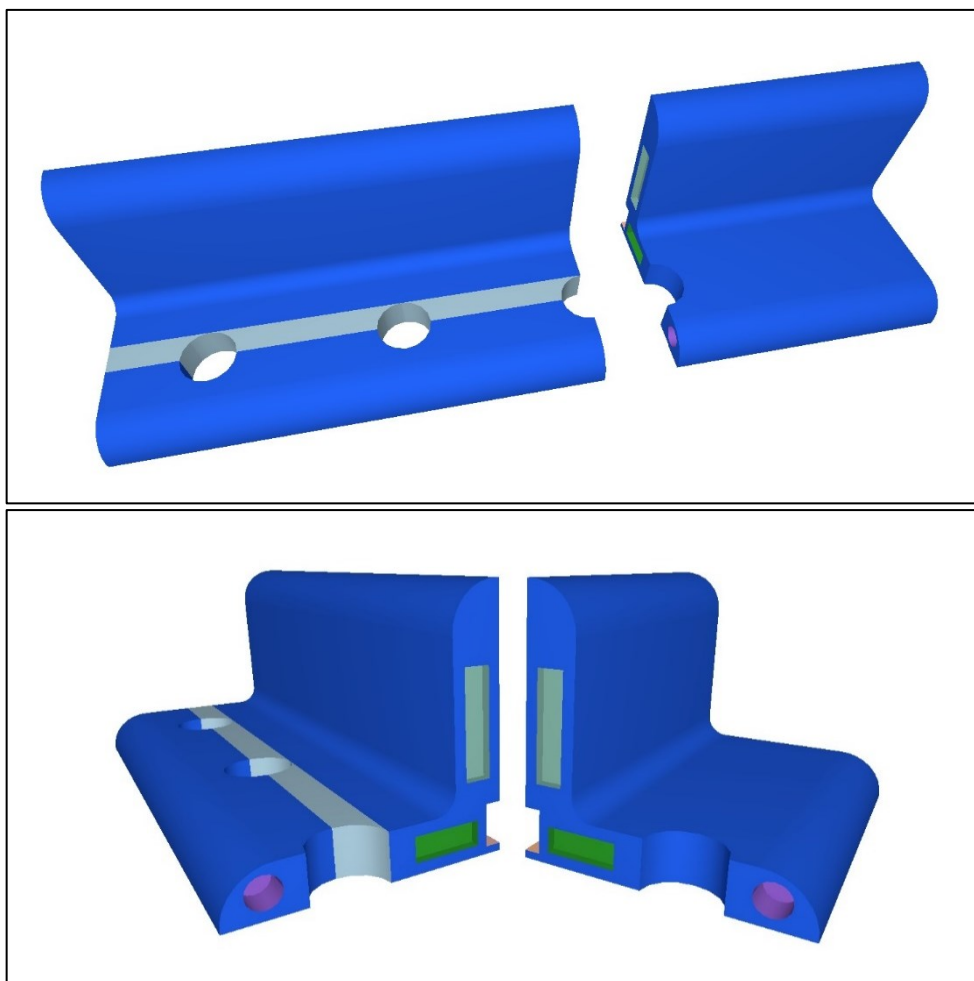
Figura 4.24 – Esquema de união das cantoneiras à chapa de ligação.



Fonte: Autoria própria (2023).

A ruptura da seção líquida é o outro modo de falha a ser representado pelo protótipo. Para isso, definiu-se que a região de ruptura seria o terceiro furo da cantoneira. As regiões seccionadas são unidas por ímãs em cada uma de suas faces. A Figura 4.25 mostra o modelo com o modo de ruptura da seção líquida.

**Figura 4.25 – Modelagem 3D do protótipo para representação da ruptura da seção líquida.**



**Fonte: Autoria própria (2023).**

Os ímãs utilizados no modelo foram definidos de acordo com as dimensões do protótipo. Como as peças da cantoneira têm espessura de 9,52 mm, a altura dos ímãs foi limitada a 5 mm para evitar a fragilidade das bordas no processo de impressão. Em consequência, foram selecionados ímãs de neodímio em formato de bloco de 12x4x2 mm e 20x4x2 mm, além do modelo cilíndrico de 5x6 mm, todos com força N35.

#### 4.2.2 Modelo final e modos de falha demonstráveis

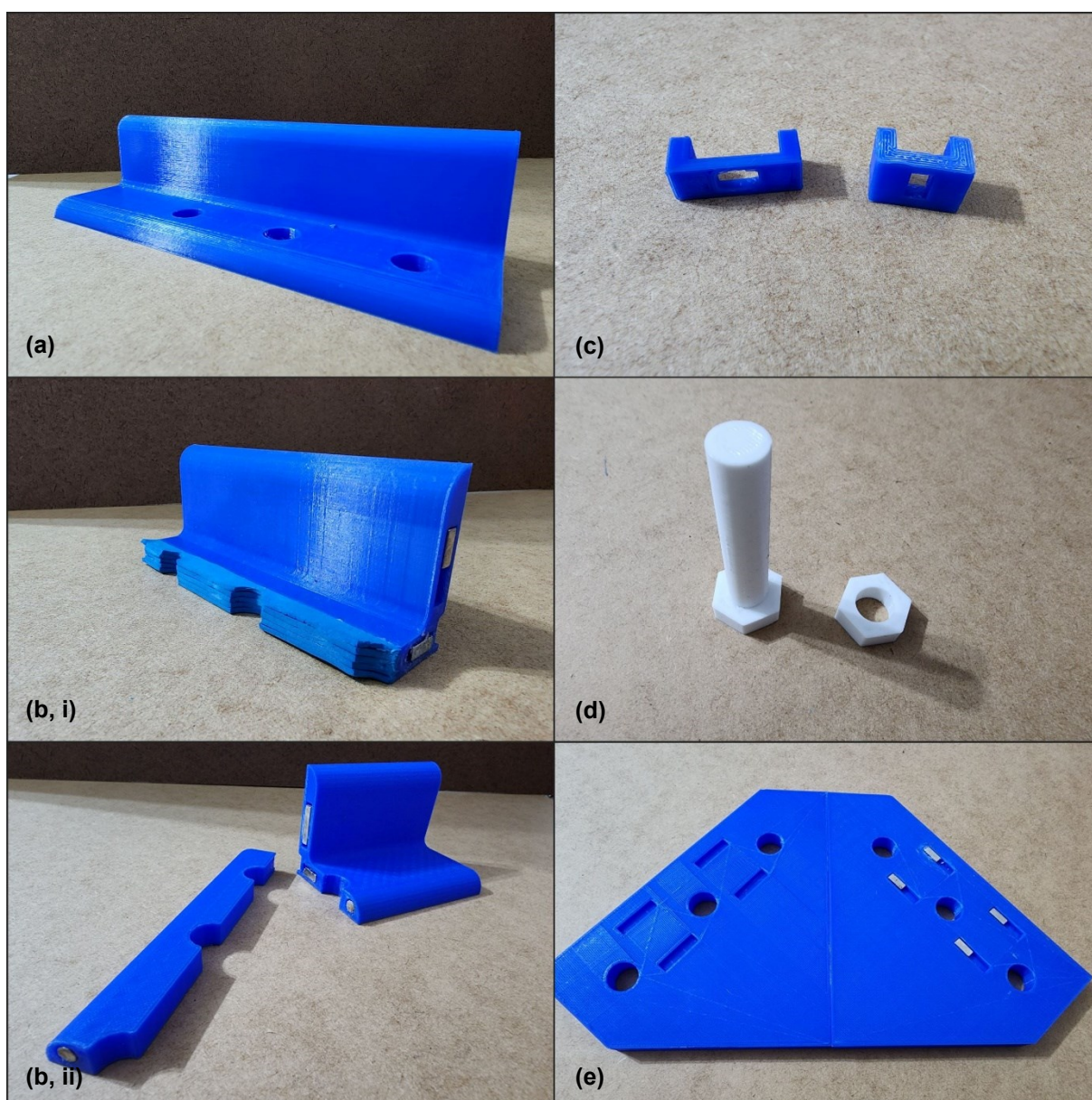
O modelo final do protótipo de ligação por cantoneiras é composto por 22 peças:

- a) 3 cantoneiras inteiras;
- b) 1 cantoneira fracionada, formada por:

- i. 1 peça com EVA acoplado;
- ii. 2 peças com conexões por ímãs;
- c) 2 peças de travamento lateral;
- d) 6 parafusos e 6 porcas;
- e) 1 chapa de ligação para 4 cantoneiras.

A Figura 4.26 ilustra o conjunto das peças que compõem o protótipo de ligação por cantoneiras.

**Figura 4.26 – Componentes do modelo final do protótipo de ligação por cantoneiras.**



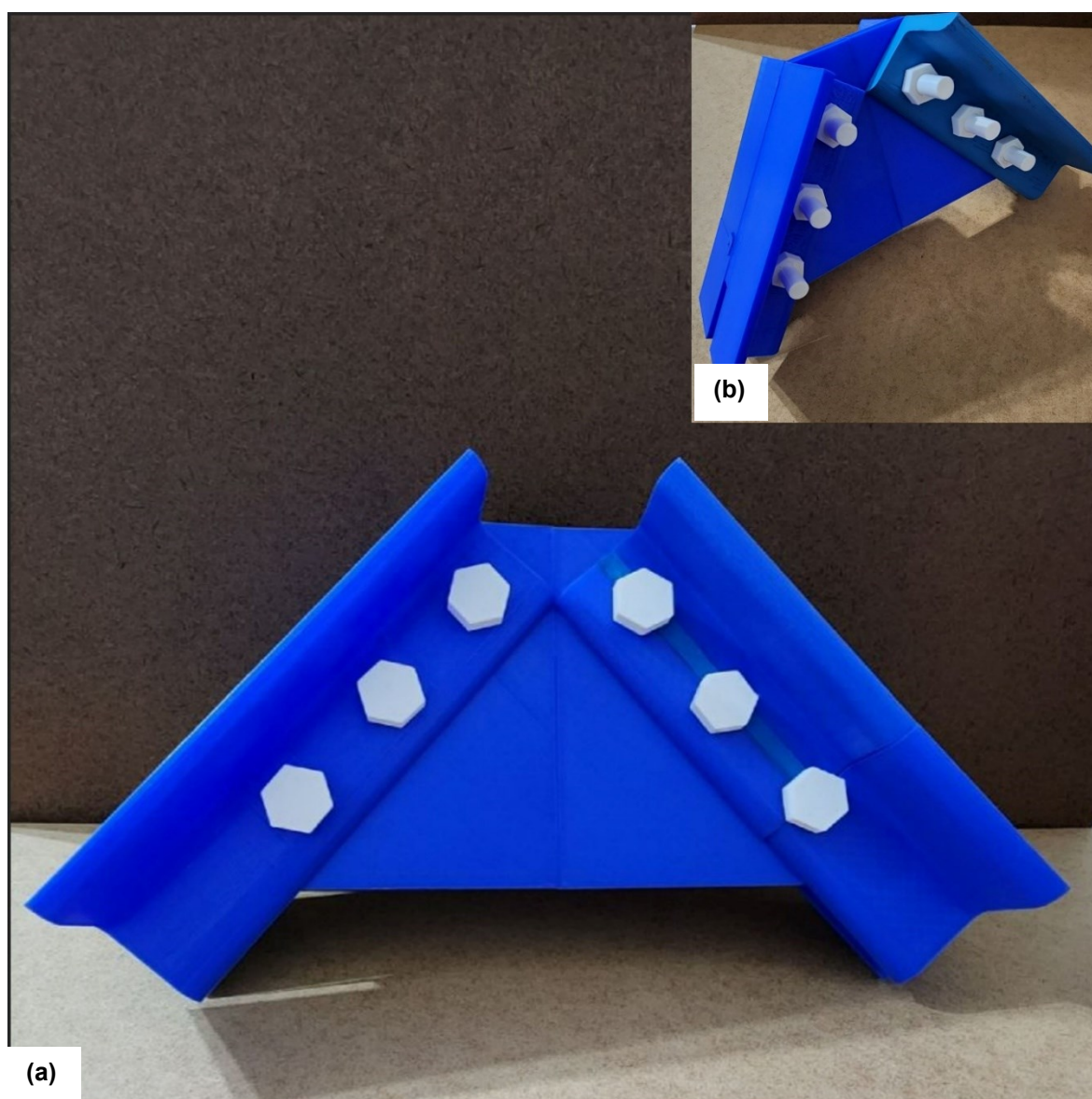
Fonte: Autoria própria (2023).

#### 4.2.2.1 Nó superior de ligação de uma treliça

As cantoneiras metálicas são comumente utilizadas no projeto de telhados com estrutura treliçada. As treliças planas são construídas pela união de barras que formam triângulos. A união dessas barras constitui os nós da treliça.

A união das cantoneiras do protótipo à chapa de ligação permite que o usuário visualize a execução de um nó superior de uma treliça plana, o que pode ser observado na Figura 4.27.

**Figura 4.27 – Aplicação do protótipo de ligação por cantoneiras na representação do nó superior de uma treliça: (a) vista frontal; (b) vista traseira.**



Fonte: Autoria própria (2023).

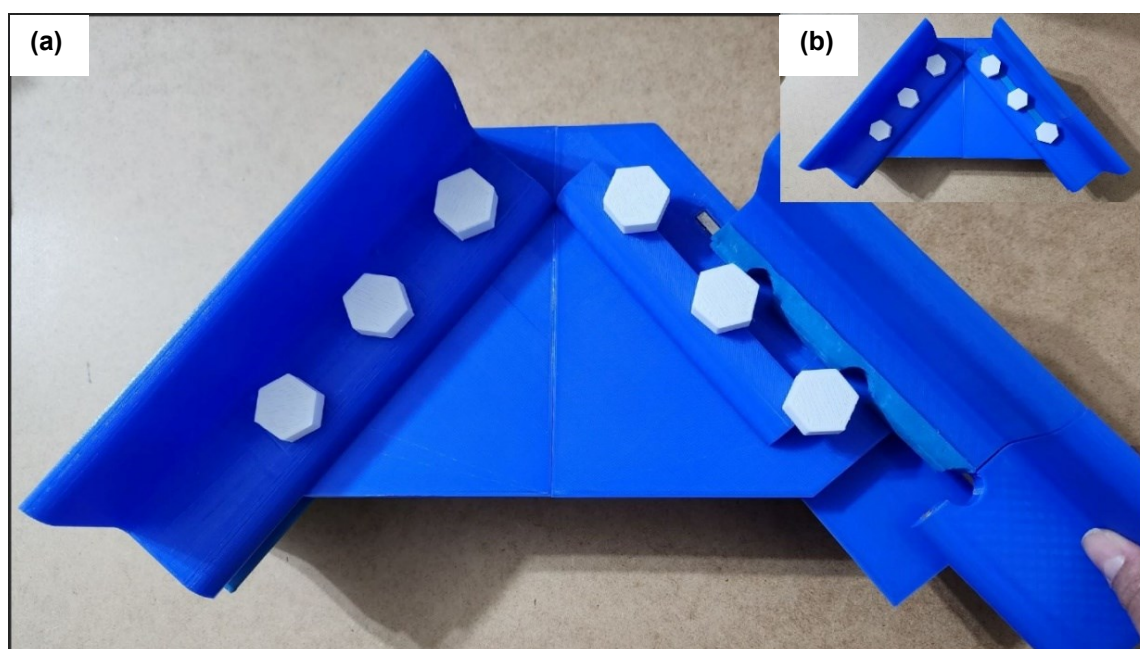
#### 4.2.2.2 Cisalhamento de bloco de furos alinhados

Como visto anteriormente, para o protótipo das chapas planas, o colapso por cisalhamento de bloco ocorre devido à ruptura de parte da seção líquida em simultâneo com o rasgamento da chapa ao longo da linha de conectores. Esse fenômeno decorre do processo de plastificação da chapa solicitada nas regiões fragilizadas.

A disposição dos furos governa a forma com que ocorre esse modo de falha. Desse modo, buscou-se exemplificar o cisalhamento de bloco para furos alinhados, geometria mais usual para perfis cantoneiras. Nesse caso, há o destacamento da borda da chapa ao longo da linha dos furos.

Na utilização do protótipo, o usuário associará a cantoneira fracionada à chapa de ligação junto aos parafusos inteiros. Após isso, aplicará um esforço de tração na cantoneira e a região seccionada deslizará no sentido de aplicação da força. A pressão dos conectores à borda dos furos deformará o EVA, simulando o processo de plastificação do aço e permitindo que ocorra o cisalhamento. A borda da cantoneira ficará presa à chapa de ligação e o restante da cantoneira nas mãos do usuário. A Figura 4.28 exemplifica a situação descrita.

**Figura 4.28 – Aplicação do protótipo de ligação por cantoneiras na representação da ruptura por cisalhamento de bloco para furos alinhados: (a) protótipo após aplicação do esforço de tração; (b) situação anterior à aplicação do esforço.**



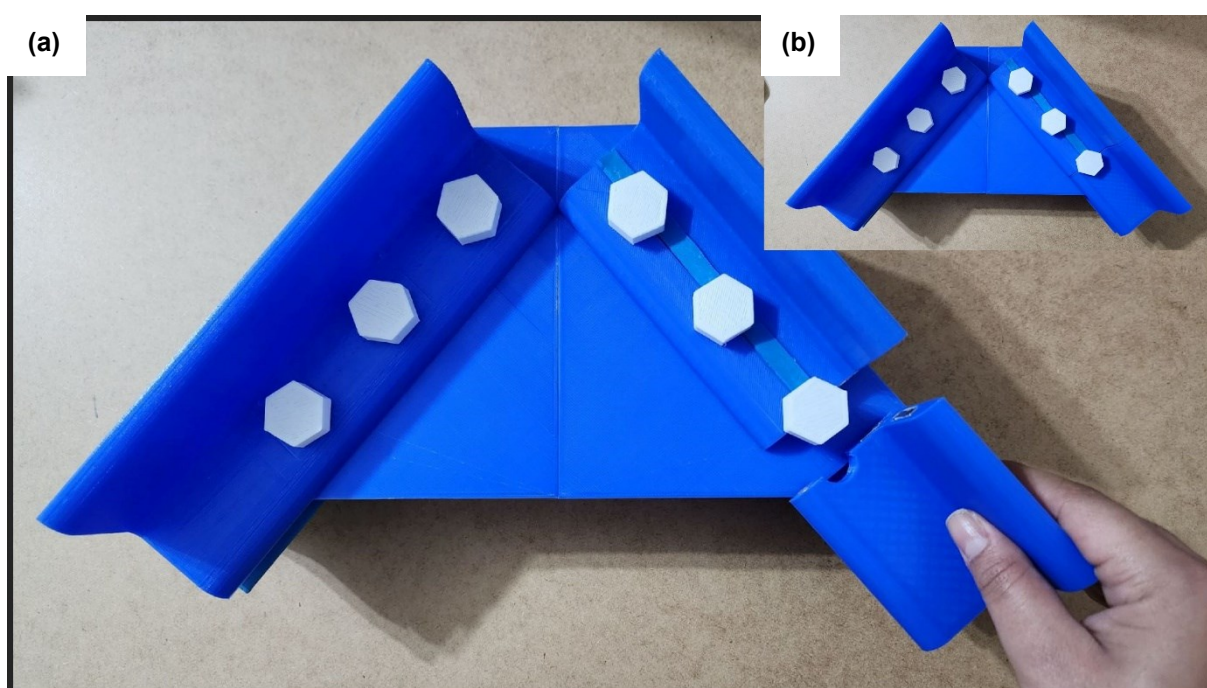
Fonte: Autoria própria (2023).



#### 4.2.2.3 Ruptura por tração da chapa na seção líquida

A ruptura da seção líquida acontece devido à redução da área da seção transversal da chapa solicitada, ocorrendo de forma perpendicular à força de tração aplicada à peça. O fenômeno decorre da fragilidade da região solicitada. A Figura 4.29 ilustra o funcionamento do modelo para o caso da ruptura por tração da seção líquida.

**Figura 4.29 – Aplicação do protótipo de ligação por cantoneiras na representação da ruptura por tração da seção líquida: (a) protótipo após aplicação do esforço de tração; (b) situação anterior à aplicação do esforço.**



Fonte: Autoria própria (2023).

O protótipo de ligação por cantoneiras simula a fragilidade na região do terceiro furo. Ao tracionar a cantoneira, o usuário observará e sentirá a ruptura da região que está conectada por imãs. Para isso, é necessário utilizar a peça de travamento que impede a ruptura por cisalhamento de bloco (visto que é o modo de falha mais suscetível). A ideia é que o usuário perceba a diferença entre a ruptura da seção líquida da cantoneira e das chapas planas e observe qual é o plano de falha em cada caso.

### 4.3 Protótipo de viga

Os perfis metálicos com seção transversal “I” são comumente utilizados nos projetos de construções em aço. Fundamentado nisso, elaborou-se um protótipo didático de uma viga “I” para demonstrar os modos de ruptura causados pelos esforços de flexão, os quais encontram-se descritos na seção 2.3.3 desse trabalho.

A ruína de barras sujeitas à flexão pode ser ocasionada pela instabilidade global ou local de suas chapas. A instabilidade global se dá pela flambagem lateral com torção (FLT). A instabilidade local é subdividida em flambagem da alma (FLA) e flambagem da mesa (FLM).

#### 4.3.1 Confeccção

A confeccção do protótipo iniciou-se pela definição do material a ser utilizado. Diferentemente dos protótipos anteriores, o modelo da viga necessitava ser constituído de um material deformável. A maleabilidade da peça se fez indispensável, pois os modos de falha a serem demonstrados são exclusivamente causados por tensões de compressão, que provocam a perda de estabilidade da peça, resultando em grandes deformações. O material escolhido foi o silicone de dureza shore 10-12, uma borracha elastomérica bi-componente.

A partir da definição do material, foi preciso escolher o método de conformação. Por se tratar de um silicone líquido foi necessário construir um molde que poderia ser feito de um polímero através da impressão 3D ou de MDF. Os moldes em MDF são mais práticos e econômicos para fabricação, sendo o método escolhido.

Definidos o material e o método, iniciou-se a idealização do protótipo. Porém, a abordagem para a criação do modelo diferiu dos demais protótipos até então confeccionados. Nos modelos anteriores, a ideia era proporcionar meios para que a falha ocorresse e fosse visualizada. Para o protótipo da viga, previu-se que, por a peça ser totalmente maleável, haveria a ocorrência das falhas de forma simultânea ao flexionar o protótipo. Assim, foi necessário criar elementos externos (enrijecedores) que impedissem um ou mais modos de falha, para visualizar cada um deles isoladamente.

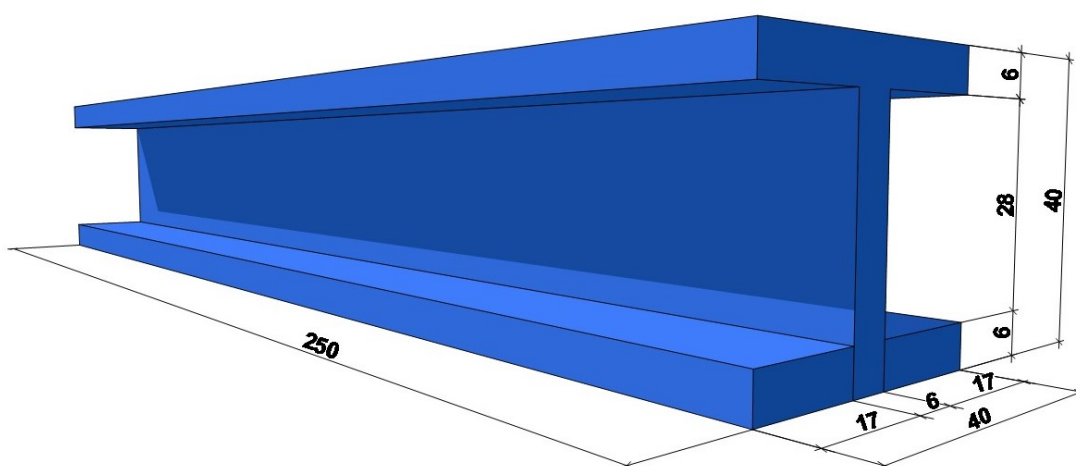
Em vigas reais, enrijecedores são utilizados para impedir a perda de estabilidade da peça pela fragilidade de algum dos seus elementos. A alma de um perfil, por exemplo, quando muito esbelta, está suscetível a perda de estabilidade pela flambagem local. O enrijecedor de alma tem a função de evitar a ocorrência do fenômeno.

Dessa maneira, previu-se a criação de três tipos de enrijecedores, sendo um enrijecedor de alma, um de mesa e um total (mesa e alma ao mesmo tempo). Eles são usados no modelo para impedir FLA e FLM. Além dessas peças, previu-se a confecção de um suporte que proporcionasse a contensão lateral da viga de silicone, para impedir a ocorrência de FLT, além de apoios para posicionar o protótipo. Para a fabricação dessas peças optou-se novamente pela utilização de MDF.

#### 4.3.1.1 Modelagem e fabricação

O passo inicial da criação do protótipo foi a confecção do molde para fabricação da viga em silicone. Para isso, foi imprescindível definir as dimensões da viga. A ideia era criar uma peça de um tamanho que permitisse visualizar os modos de falha ao mesmo tempo que fosse de fácil fabricação. Peças muito pequenas são mais difíceis de confeccionar, principalmente pela dificuldade de montagem do molde. Logo, não seria possível confeccionar uma viga em escala reduzida para simular uma situação real. Assim, definiu-se que a viga teria as dimensões indicadas na Figura 4.30.

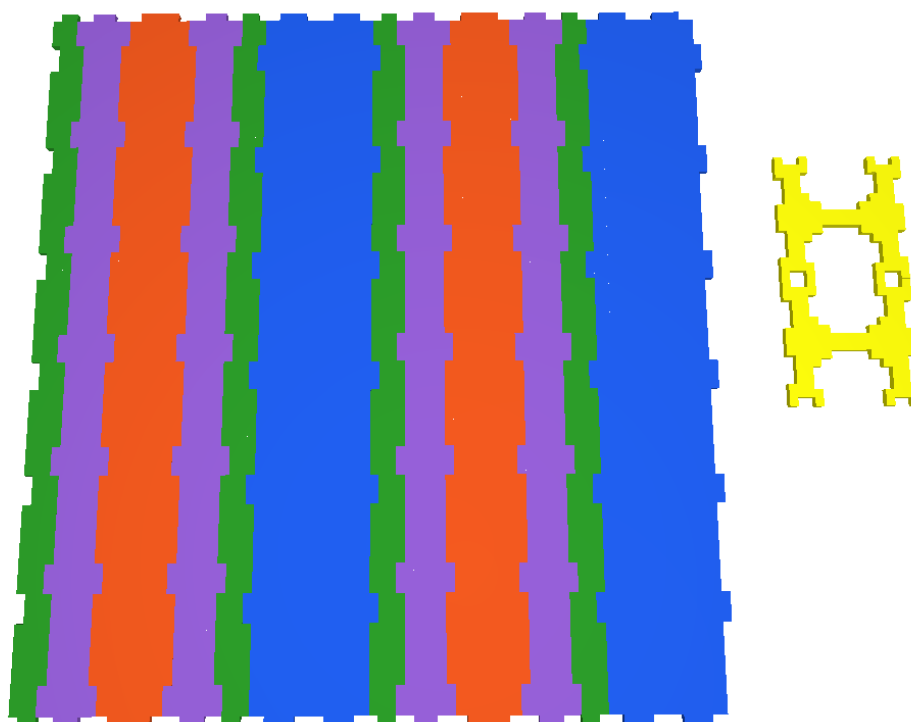
**Figura 4.30 – Dimensões em milímetros da viga de silicone a ser confeccionada.**



Fonte: Autoria própria (2023).

Definida a geometria da viga, iniciou-se a modelagem do molde. O material utilizado seria o MDF, sendo necessário, então, utilizar uma máquina de corte a laser para obter as peças. O equipamento disponível para uso é o do FabLab Livre SP, havendo algumas limitações para o corte. A máquina da unidade Vila Itororó, onde seriam feitos os cortes, tem capacidade de corte de placas de 800x1000 mm com espessura de até 9 mm. No entanto, por um problema no foco do laser, o corte estava limitado a espessuras de 3 mm. Portanto, modelou-se o molde da viga respeitando essa limitação de espessura. O molde foi modelado utilizando o sistema de encaixe dentado representado na Figura 4.31.

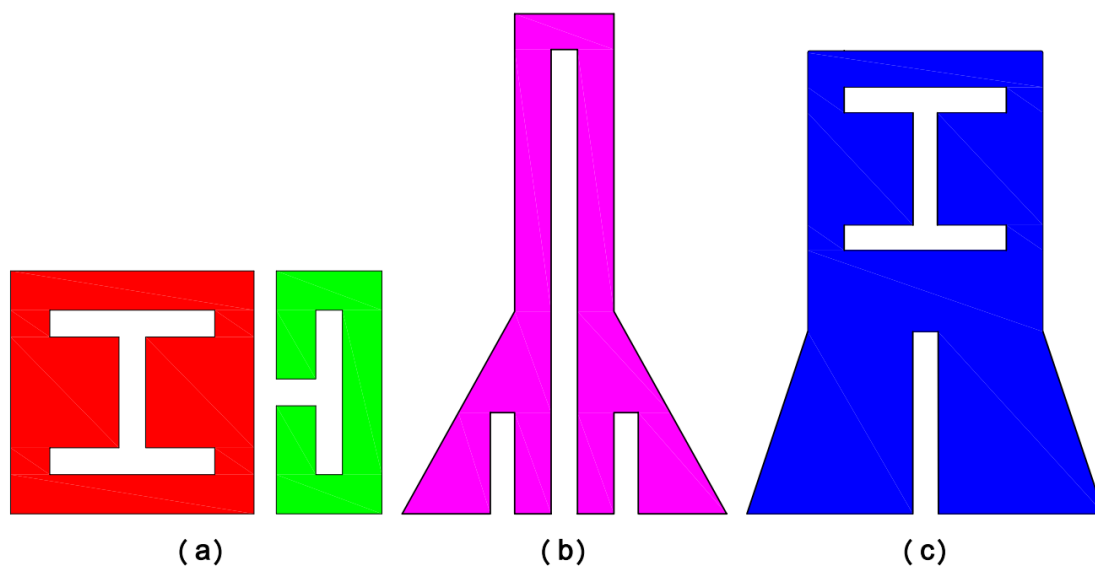
**Figura 4.31 – Modelagem do molde para confecção da viga de silicone.**



Fonte: Autoria própria (2023).

Como as dimensões da viga estavam pré-definidas, foi possível modelar os enrijecedores, contensão lateral e os apoios que seriam utilizados. A ideia inicial era que essas peças fossem cortadas em chapas de 6 mm para serem mais resistentes, mas devido à limitação do maquinário, optou-se por cortar placas de 3 mm e colar as peças para obter a espessura desejada. As peças projetadas estão ilustradas na Figura 4.32.

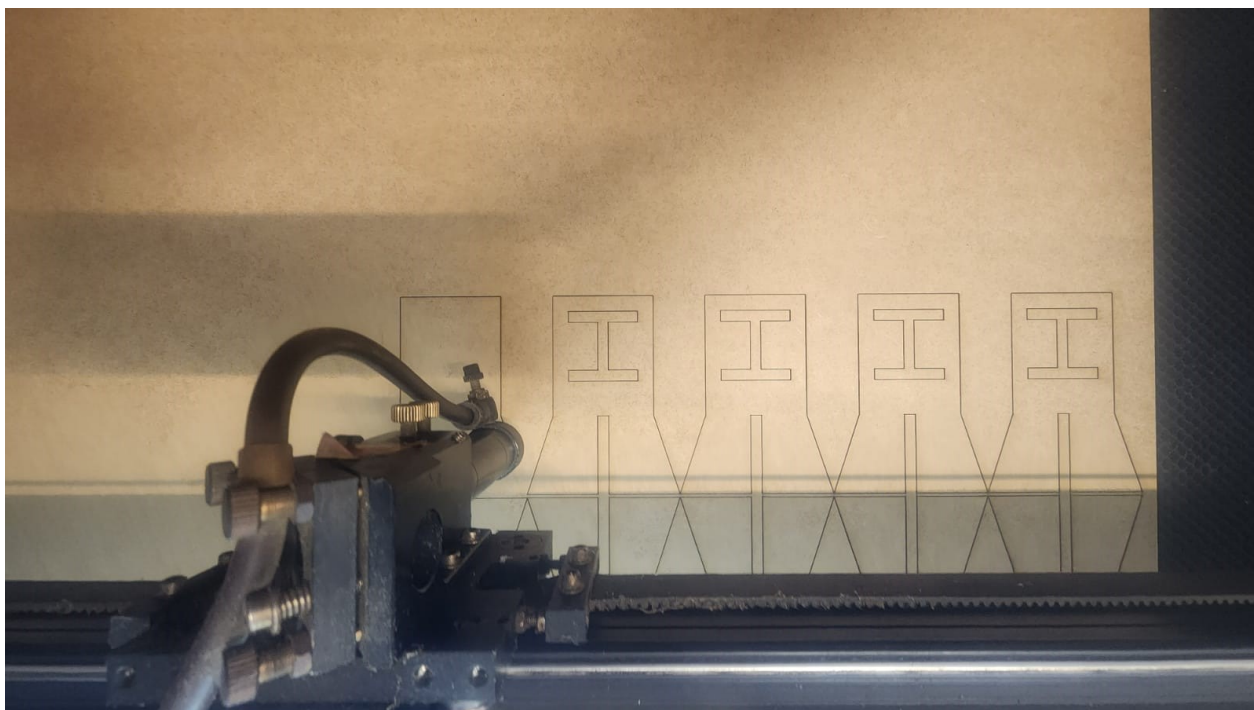
Figura 4.32 – Modelagem dos: (a) enrijecedores; (b) contensão lateral; (c) apoios da viga de silicone.



Fonte: Autoria própria (2023).

Projetadas as peças e em posse do arquivo no formato adequado, iniciou-se o procedimento de corte (Figura 4.33).

Figura 4.33 – Execução do corte das peças na máquina de corte a laser.



Fonte: Autoria própria (2023).

Após o corte de todas as peças, montou-se o molde para a posterior confecção da viga em silicone. O molde montado está ilustrado na Figura 4.34.

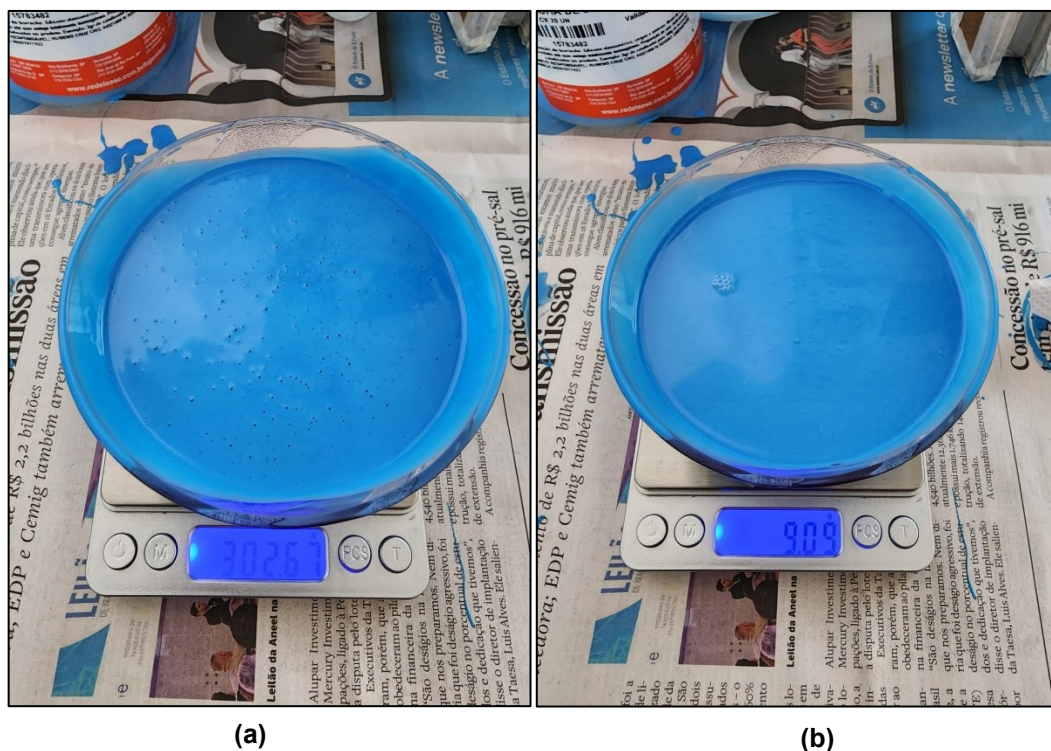
**Figura 4.34 – Molde da viga de silicone montado.**



**Fonte: Autoria própria (2023).**

Em posse do molde foi possível fabricar a viga. O processo teve início pela dosagem do silicone. Para completar o volume da viga ( $162 \text{ cm}^3$ ), estimou-se o consumo de 221,92 g de silicone para fabricação da peça, sem considerar possíveis perdas. No entanto, por se tratar de um processo artesanal, sabe-se que é suscetível a falhas. Logo, dosou-se o silicone com quantidade excedente à calculada. Ao todo foram utilizados 302,67 g de silicone e 9,09 g de catalisador. A Figura 4.35 ilustra as quantidades pesadas dos materiais.

**Figura 4.35 – Pesagem dos materiais para confecção da viga de silicone: (a) pesagem do silicone; (b) pesagem do catalisador.**



Fonte: Autoria própria (2023).

Após a dosagem do material, misturou-se o silicone ao catalisador até obter um líquido homogêneo e, em seguida, despejou-se a mistura no interior do molde, como é possível observar na Figura 4.36.

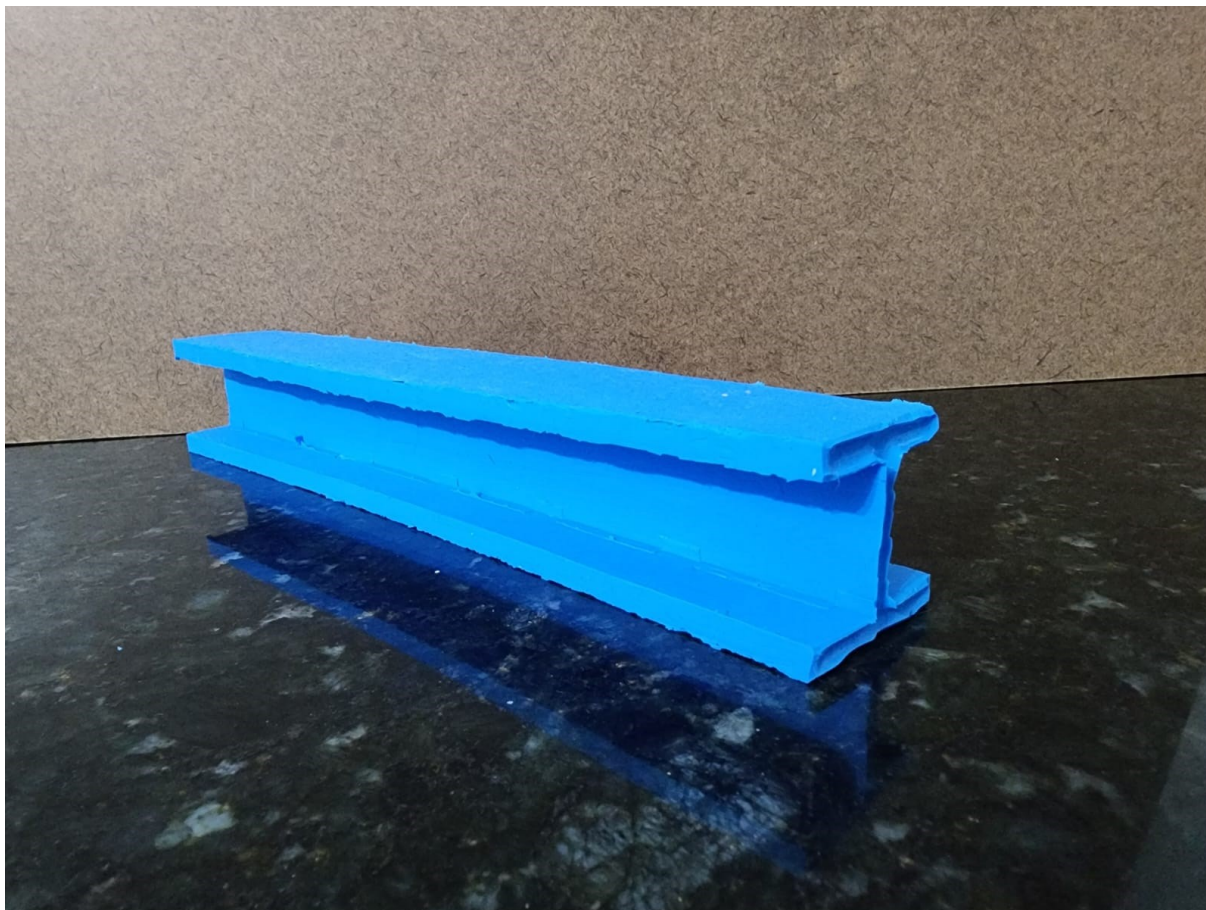
**Figura 4.36 – Moldagem da viga de silicone.**



Fonte: Autoria própria (2023).

O processo de cura completa do silicone tem intervalo de 24h. Assim, esperou-se o tempo recomendado para fazer a desforma da viga. A Figura 4.37 ilustra a viga após a cura e desforma.

**Figura 4.37 – Viga de silicone após desforma.**



**Fonte: Autoria própria (2023).**

Em posse da viga e demais peças do conjunto, iniciou-se o processo de teste do protótipo para analisar se os objetivos foram atendidos.

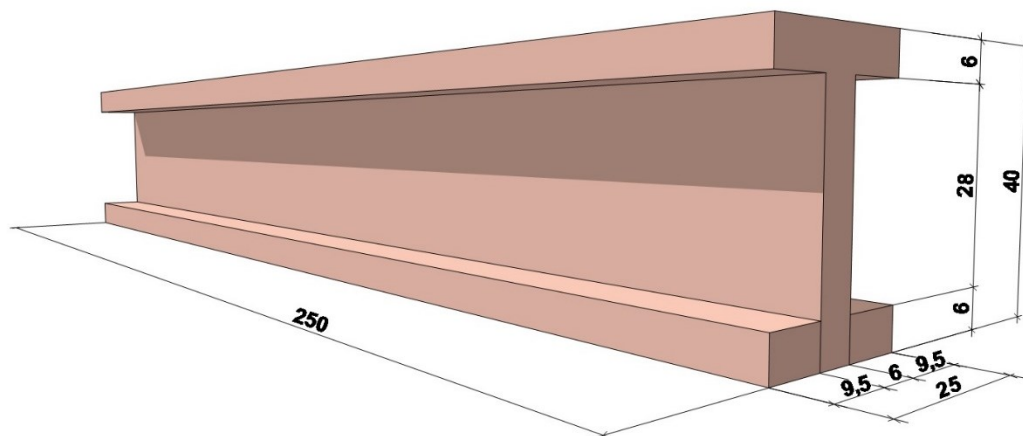
#### 4.3.1.2 Adaptações do modelo

Durante os testes do protótipo de viga, notou-se que a falha por flambagem da alma não estava ocorrendo. As hipóteses levantadas foram que a não ocorrência estava atrelada à baixa rigidez do silicone e que as dimensões da mesa da viga deveriam ser diminuídas.



Assim, criou-se uma outra viga utilizando silicone de dureza shore 13-17 (mais rígido) e com as dimensões ilustradas na Figura 4.38.

**Figura 4.38 – Dimensões em milímetros da nova viga a ser confeccionada.**



**Fonte: Autoria própria (2023).**

A fabricação da viga seguiu o mesmo procedimento de execução da viga inicial. Contudo, ao aplicar os testes, viu-se que as hipóteses admitidas não correspondiam com a realidade, a nova viga também não falhava por flambagem da alma e as outras demonstrações dos modos de falha estavam sendo prejudicadas devido ao aumento da dureza da peça. Assim, descartou-se a nova viga e manteve-se a original, mesmo não ocorrendo FLA.

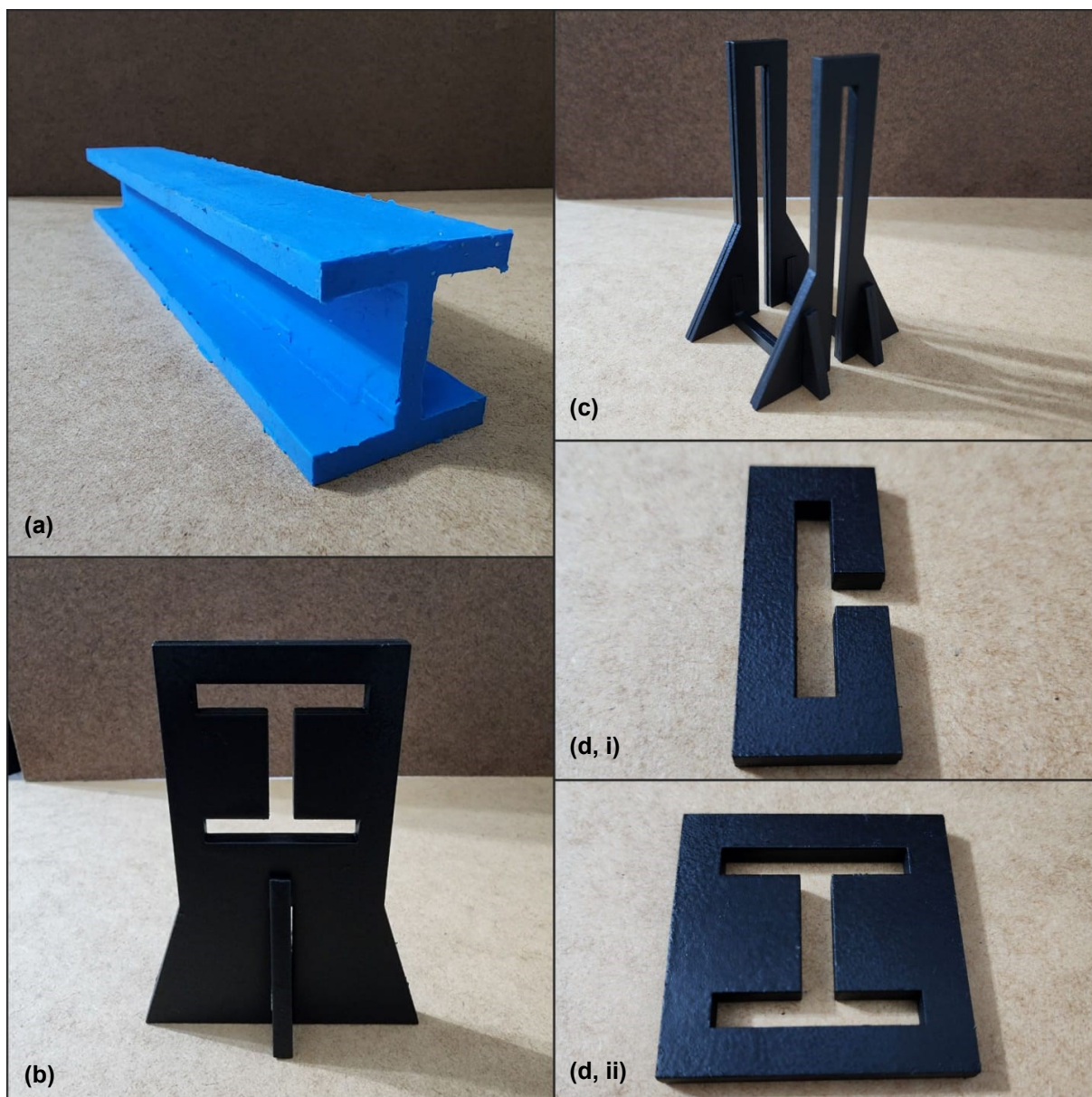
#### 4.3.2 Modelo final e modos de falha demonstráveis

O modelo final do protótipo da viga é composto por 14 peças, sendo:

- a) 1 viga em silicone;
- b) 2 apoios para a viga;
- c) 1 contensão lateral;
- d) 10 enrijecedores:
  - i. 5 enrijecedores de mesa;
  - ii. 5 enrijecedores totais.

A Figura 4.39 ilustra o conjunto das peças que compõem o protótipo da viga de silicone.

Figura 4.39 – Componentes do modelo final do protótipo de viga de silicone.



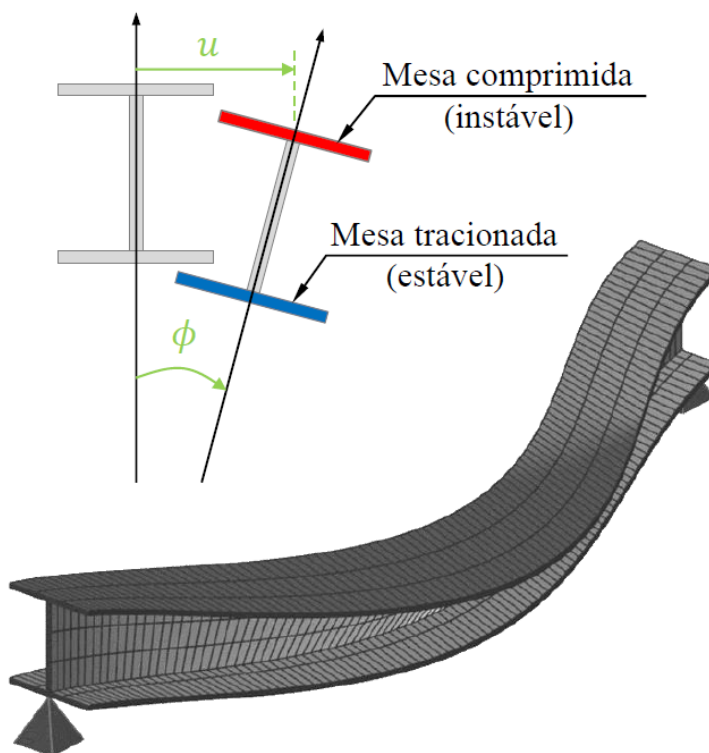
Fonte: Autoria própria (2023).

#### 4.3.2.1 Flambagem lateral com torção (FLT)

A NBR 8800 (ABNT, 2008) prevê o colapso de barras submetidas a esforços de flexão por perda da estabilidade global do elemento (flambagem lateral com torção). Esse fenômeno se caracteriza pela manifestação de deslocamentos laterais e rotações de torção. A ocorrência desse tipo de falha está relacionada à esbelteza da

peça e a ausência de contensões laterais que impeçam seu deslocamento. A Figura 4.40 ilustra a ocorrência do fenômeno descrito.

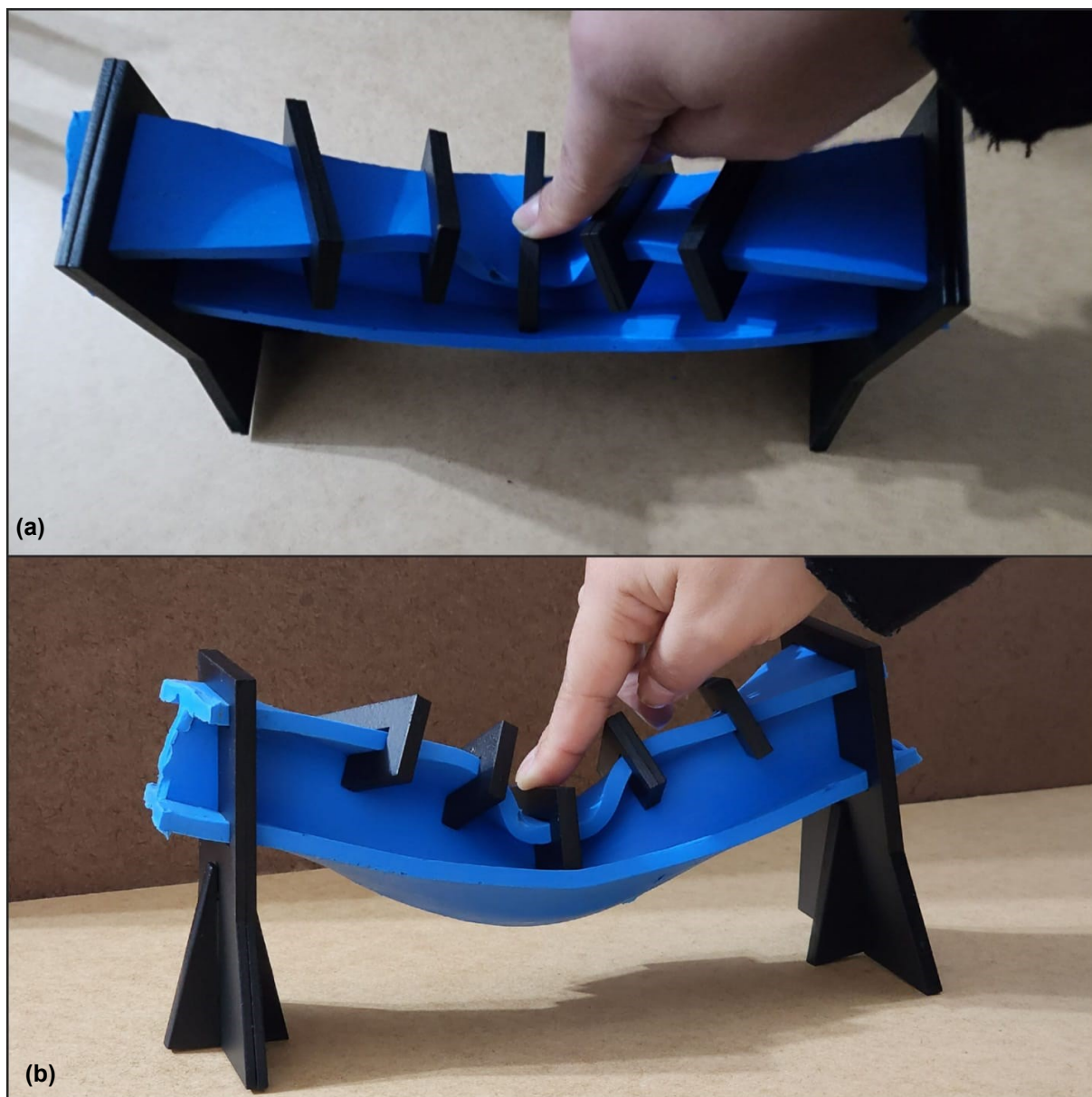
**Figura 4.40 – Colapso da viga por perda de estabilidade global: Flambagem lateral com torção.**



Fonte: Adaptado de Yokomizo (2021).

O protótipo da viga permite simular o fenômeno referido. Para tanto, o usuário deve distribuir os enrijecedores totais ou de mesa ao longo da viga de silicone, após isso deverá encaixá-la nos apoios. Com o protótipo montado, ele aplicará uma força concentrada no centro do vão. Os esforços internos desenvolvidos na viga farão com que ela desloque lateralmente enquanto há a torção do seu eixo principal. A Figura 4.41 mostra a reprodução da situação descrita.

Figura 4.41 – Aplicação do protótipo da viga de silicone na representação da flambagem lateral com torção: (a) vista superior; (b) vista frontal.



Fonte: Autoria própria (2023).

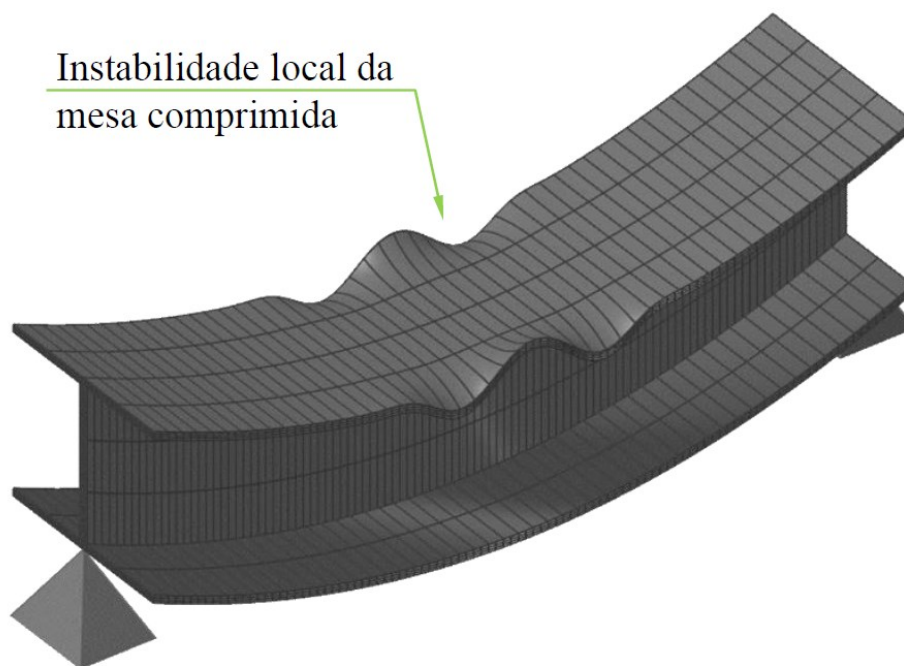
#### 4.3.2.2 Flambagem local da mesa (FLM)

A NBR 8800 (ABNT, 2008) também admite a ocorrência de colapso de barras submetidas à flexão por instabilidade local das chapas que compõe o perfil. A flambagem local ocorre em virtude da perda de estabilidade das chapas comprimidas que compõem a seção transversal do perfil.

O fenômeno da flambagem local da mesa ocorre em razão da esbelteza da chapa que, quando comprimida, perde sua estabilidade. A Figura 4.42 ilustra a

ocorrência do fenômeno descrito, cuja manifestação física corresponde à ondulação da mesa

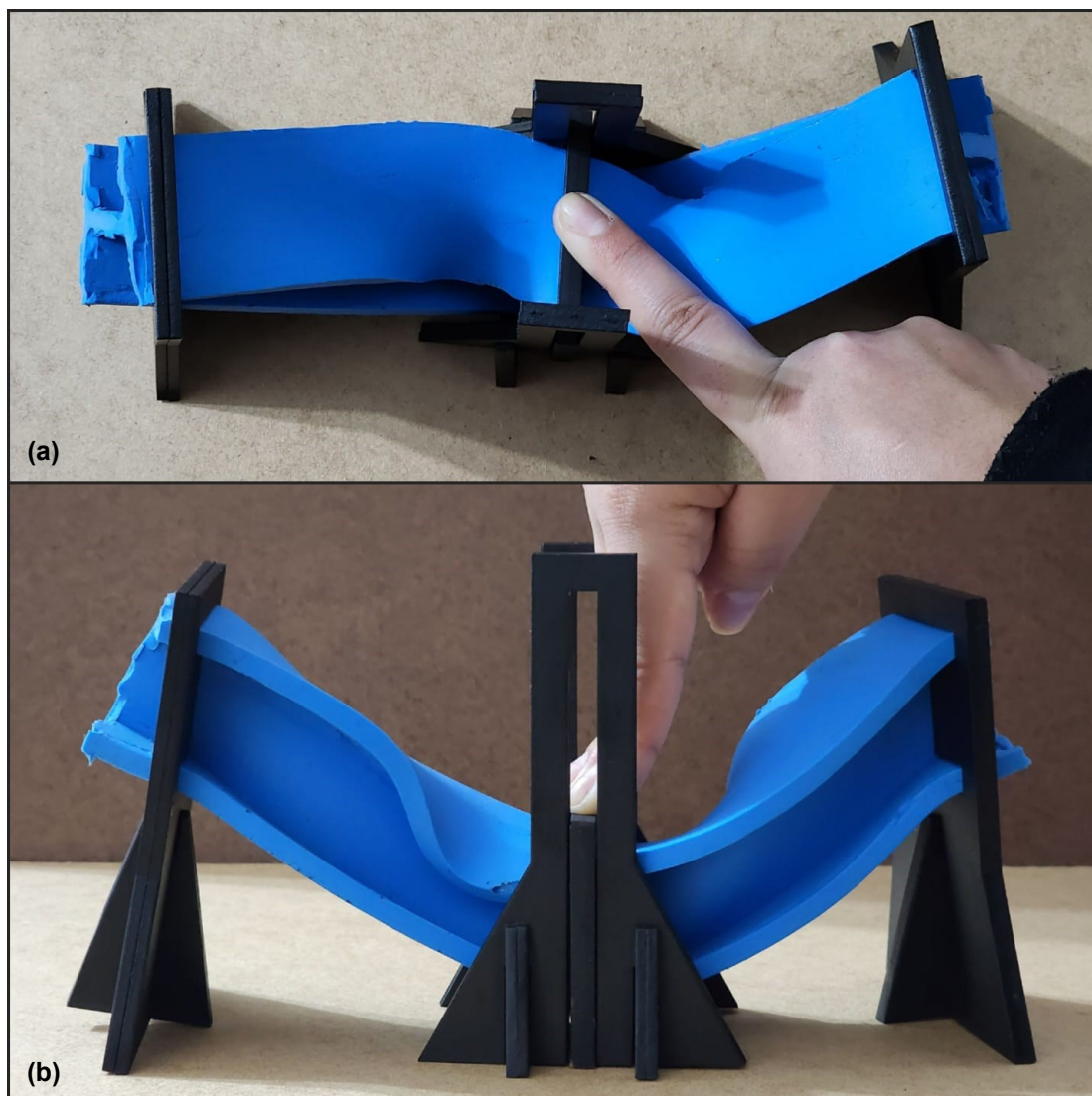
**Figura 4.42 – Colapso da viga por perda de estabilidade local: Flambagem local da mesa.**



**Fonte: Adaptado Yokomizo (2021).**

Para a simulação da ocorrência de FLM mediante o emprego do protótipo, o usuário deverá impedir que ocorra a falha por instabilidade global da peça, utilizando para isso as contensões laterais. Com a viga biapoiada e com o deslocamento lateral impedido, o usuário aplicará uma carga concentrada no centro do vão. Os esforços internos desenvolvidos na viga farão com que a mesa comprimida (superior) sofra flambagem, como pode ser observado na Figura 4.43.

**Figura 4.43 – Aplicação do protótipo da viga de silicone na representação da flambagem local da mesa: (a) vista superior; (b) vista frontal.**



**Fonte: Autoria própria (2023).**

O modelo da viga, assim como no caso do FLT, proporciona uma resposta tátil-visual ao usuário. Ele sente o esforço necessário para a ocorrência da flambagem da mesa, ao mesmo tempo em que pode visualizar o fenômeno.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve como escopo o desenvolvimento de modelos físicos qualitativos para demonstração dos mecanismos de ruptura das estruturas de aço, propondo uma nova abordagem pedagógica para o ensino da disciplina de Construções Metálicas. Para isso, analisou-se as metodologias de ensino que se baseiam na experimentação, aplicadas ao ensino da engenharia; avaliou-se os modos de falha verificados pela NBR 8800 e estudou-se materiais e métodos para a confecção dos protótipos.

Os protótipos desenvolvidos exemplificam os modos de falha ocasionados por esforços de tração em ligações parafusadas e os modos característicos de vigas sob flexão. No caso das ligações parafusadas, os modos de ruptura demonstrados são: ruptura por corte do fuste do conector; falha por ovalização do furo ou rasgamento da chapa entre o furo e a borda; ruptura da chapa na seção transversal líquida; e falha por cisalhamento de bloco. Para o caso da viga sob flexão, é demonstrada a ruína por instabilidade global e local da peça: flambagem lateral com torção (FLT) e flambagem local da mesa (FLM), respectivamente.

O objetivo principal da criação dos protótipos, além das demonstrações desejadas, era o desenvolvimento de modelos duráveis ou de fácil replicação. Esse objetivo foi alcançado, pois os modelos foram confeccionados através de polímeros e MDF (materiais de alta durabilidade), além dos mecanismos de ruptura dos protótipos terem sido projetados de maneira que as peças possam ser montadas novamente e reutilizadas.

Destarte, os objetivos do desenvolvimento dessa pesquisa foram alcançados com êxito, uma vez que os protótipos cumprem o papel para o qual foram construídos. Dentre as falhas que se propôs exemplificar, somente a flambagem local da alma não foi possível demonstrar.

### 5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Almejando o aprimoramento e continuidade da presente pesquisa, propõe-se as seguintes abordagens para o desenvolvimento de novos trabalhos:

- a) Estudar modos de aperfeiçoamento do modelo da viga de silicone para que seja possível a demonstração da flambagem local da alma (FLA);

- b) Confeccionar protótipos para exemplificação da ruptura de conectores sob tração ou tração e corte simultâneos;
- c) Elaborar modelos que demonstrem os mecanismos de ruptura das ligações soldadas;
- d) Criar modelos para demonstração da influência dos tipos de vinculações em perfis sob flexão e compressão;
- e) Utilizar os protótipos durante aulas da disciplina de Construções Metálicas e coletar posteriormente o *feedback* dos alunos;
- f) Fazer uma análise dos custos de produção em série dos protótipos.



## REFERÊNCIAS

- AGUIAR, L. C. D. **Um processo para utilizar a tecnologia de impressão 3d na construção de instrumentos didáticos para o ensino de ciências**. 2016. Dissertação (Mestrado em Educação para a Ciência) – Programa de Pós-Graduação em Educação para a Ciência, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2016. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/137894>. Acesso em: 02 abr. 2022
- ALBANESE, M.A.; MITCHELL, S. Problem-based learning: a review of literature on its outcomes and implementation issues. **Academic Medicine**, v.68, p. 52–81, 1993. Disponível em: [https://journals.lww.com/academicmedicine/Abstract/1993/01000/Problem\\_based\\_Learning\\_\\_A\\_Review\\_of\\_Literature\\_on.20.aspx](https://journals.lww.com/academicmedicine/Abstract/1993/01000/Problem_based_Learning__A_Review_of_Literature_on.20.aspx). Acesso em: 17 maio 2022.
- ALVES, N. B.; TOMETICH, P. Teoria da aprendizagem experiencial e design thinking para a criação de uma feira de sustentabilidade. **Revista Interdisciplinar de Gestão Social**, v. 7, n. 3, p. 59-80, dez. 2018. Disponível em: <https://periodicos.ufba.br/index.php/rigs/article/view/24724>. Acesso em: 18 maio 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8681**: Ações e segurança nas estruturas – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8800**: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.
- BALLAROTTI, Cesar. **Ensino e aprendizagem fenomenográfica**: a apreensão de conceitos básicos de sistemas estruturais no curso de arquitetura e urbanismo da Universidade Estadual de Londrina. 2016. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) – Programa de Pós- Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016. Disponível em: doi:10.11606/T.102.2016.tde-30062016-114512. Acesso em: 18 maio 2022.
- BEER, F. P. **Mecânica dos materiais**. 7 ed. Porto Alegre: AMGH, 2015.
- BLIKSTEIN, P. Digital Fabrication and 'Making' in Education: The Democratization of Invention". In : *FabLab: Of Machines, Makers and Inventors*, edited by Julia Walter-Herrmann and Corinne Büching, Bielefeld: transcript Verlag, 2014, p. (203)-(222). Disponível em : [https://www.researchgate.net/publication/281495128\\_Digital\\_Fabrication\\_and\\_'Making'\\_in\\_Education\\_The\\_The\\_Democratization\\_of\\_Invention](https://www.researchgate.net/publication/281495128_Digital_Fabrication_and_'Making'_in_Education_The_The_Democratization_of_Invention). Acesso em : 09 abr. 2022.

BRANSFORD, J.D.; *et al.* **How people learn: brain, mind, experience and school.** Washington, D.C.: National Academy Press, 2000. E-book. Disponível em: <https://doi.org/10.17226/9853>. Acesso em: 17 abr. 2022.

BRITO, L. D. *et al.* Modelo reduzido qualitativo aplicado no ensino para pré-avaliação do comportamento de arcos triarticulados em sistemas estruturais mlc. *In: CONGRESO LATINOAMERICANO DE ESTRUCTURAS DE MADERA, 2., 2017, Buenos Aires. Anais [...]* Buenos Aires: UNNOBA, 2017. Disponível em: <https://clem-cimad2017.unnoba.edu.ar/papers/T7-08.pdf>. Acesso em: 20 maio 2022.

CALATRAVA, S. Santiago Calatrava conversa com estudantes: Conferências do Massachusetts Institute of Technology (MIT). Tradução de Lya Luft. Barcelona: Gustavo Gili, 2003.

DIAS, L. A. M. **Estruturas de aço:** conceitos, técnicas e linguagem. 1 ed. São Paulo: Zigurate Editora, 1997.

FEITOSA, S. C. S. Método Paulo Freire, interfaces e atualidade. **Acervo Paulo Freire**, 2016. Disponível em: <http://acervo.paulofreire.org:8080/xmlui/handle/7891/4230>. Acesso em: 02 abr. 2022.

FELDER, R. M.; PRINCE, M. J. Inductive teaching and learning methods: definitions, comparisons, and research bases. **Journal of Engineering Education**, v. 95, n. 2, p. 123-138, 2006. Disponível em : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/j.2168-9830.2006.tb00884.x>. Acesso em : 17 maio 2022.

FELDER, R.M. Matters of style. **ASEE Prism**, v. 6, n. 4, p. 18–23, 1996. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/228843235\\_Matters\\_of\\_Style](https://www.researchgate.net/publication/228843235_Matters_of_Style). Acesso em: 18 maio 2022.

FREIRE, P. **Pedagogia da autonomia.** 25 ed. São Paulo: Paz e Terra, 1996.

FREIRE, P. **Pedagogia do oprimido.** 17 ed. Rio de Janeiro: Paz e Terra, 1987.

HIBBELER, R. C. **Resistência dos materiais.** Tradução de Joaquim Pinheiro Nunes. 5 ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2004.

HOW DOES A STEEL STRUCTURE FAIL?. **The Constructor**, [s.d.]. Disponível em: <https://theconstructor.org/structural-engg/how-does-steel-structure-fail-pdf/43307/>. Acesso em: 14 maio 2023.

JAVARONI, C. E. **Estruturas de aço**: dimensionamento de perfis formados a frio. 1 ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015.

KOLB, D. A. **Experiential learning**: experience as the source of learning and development. 2 ed. New Jersey: Pearson Education, 2015. E-book.

LOBOSCO, T. *et al.* Modelos qualitativos didáticos e a compreensão intuitiva no ensino de estruturas. *In*: ARQUISUR, XXXVIII, 2019, Belo Horizonte. **Anais[...]** Belo Horizonte: UFMG, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/43354>. Acesso em: 19 maio 2022.

LOBOSCO, T. Modelos Didáticos para exploração e compreensão estrutural. *In*: ENEEEA, III, 2017, Ouro Preto. **Anais[...]** Ouro Preto: UFOP, 2017. Disponível em: <http://hdl.handle.net/1843/43288>. Acesso em: 19 maio 2022.

LOBOSCO, T.; CÂMARA, D. Desenvolvimento de modelos qualitativos para o ensino de estruturas. **PARC** - Pesquisa em Arquitetura e Construção, Campinas, SP, v. 9, n. 3, p. 167-178, 2018. Disponível em: <https://periodicos.sbu.unicamp.br/ojs/index.php/parc/article/view/8650263>. Acesso em: 20 maio 2022.

MARTINS, V. H. C. **Impressão 3D**: uma abordagem de produção mais limpa?. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Universidade do Minho, Guimarães, 2017. Disponível em: <https://hdl.handle.net/1822/46577>. Acesso em: 30 maio de 2022.

MILAGRES, G. F. B. *et al.* Elaboração de modelos estruturais para aperfeiçoamento da didática em resistência dos materiais. *In*: COBENGE, XLIX, 2021, online. **Anais[...]** Online: UFMG, 2021. DOI: 10.37702/COBENGE.2021.3479. Disponível em: [http://abenge.org.br/sis\\_artigo\\_doi.php?e=COBENGE&a=21&c=3479](http://abenge.org.br/sis_artigo_doi.php?e=COBENGE&a=21&c=3479). Acesso em: 27 maio 2022.

MONTEIRO, M. T. F. **A impressão 3D no meio produtivo e o design**: um estudo na fabricação de joias. 2015. Dissertação (Mestrado em Design) – Programa de Pós-Graduação em Design, Universidade Estadual de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015. Disponível em: <https://mestrados.uemg.br/ppgd-producao/dissertacoes-ppgd/category/83-2015>. Acesso em: 30 maio 2022.

MORAES, C. A.; NUNES, E. F. Modelos físicos qualitativos como processo de ensino de estruturas nos cursos de arquitetura. *In*: ENCONTRO NACIONAL DE ENSINO DE ESTRUTURAS EM ESCOLAS DE ARQUITETURA, 3., 2017, Ouro Preto. **Anais [...]** Ouro Preto: UFOP, 2017. p. 776-795. Disponível em: [https://www.academia.edu/es/49028409/MODELOS\\_F%C3%8DSICOS\\_QUALITATIVOS\\_COMO\\_PROCESSO\\_DE\\_ENSINO\\_DE ESTRUTURAS NOS CURSOS DE ARQUITETURA](https://www.academia.edu/es/49028409/MODELOS_F%C3%8DSICOS_QUALITATIVOS_COMO_PROCESSO_DE_ENSINO_DE ESTRUTURAS NOS CURSOS DE ARQUITETURA). Acesso em: 08 maio 2022.

NÓBREGA, P. G. B.; NÓBREGA, S. H. S. Engenheiro civil x arquiteto: conflito no aprendizado das estruturas. **Revista de Ensino da Engenharia**, v. 39, p. 183-191, 2020. Disponível em: <http://revista.educacao.ws/revista/index.php/abenge/article/view/1623>. Acesso em: 31 maio 2022.

O'CONNELL, J. ABS vs PLA: comparando filamentos de impressão 3D. **ALL3DP**, 2021. Disponível em: <https://all3dp.com/pt/2/pla-vs-abs-filamento-impressao-3d/>. Acesso em: 28 maio 2022.

OLIVEIRA, C. R. Considerações sobre modelos estruturais. **Ciência ET Praxis**, Passos, v.1, n. 1, p. 33-38, jan. 2008a. Disponível em: <https://revista.uemg.br/index.php/praxys/article/view/2068>. Acesso em: 18 maio 2022.

OLIVEIRA, M. S. **Modelo estrutural qualitativo para pré-avaliação do comportamento de estruturas metálicas**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2008b. Disponível em: <http://www.repositorio.ufop.br/jspui/handle/123456789/2467>. Acesso em: 13 mar. 2022.

PFEIL, W.; PFEIL, M. **Estruturas de aço**: dimensionamento prático de acordo com a NBR 8800:2008. 8 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

PINHEIRO, P. C. C. Desenvolvimento de protótipos: instrumento de motivação e ligação das disciplinas do curso de engenharia. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENSINO DE ENGENHARIA), 28., 2000, Ouro Preto. **Anais[...]** Ouro Preto: 2000. Disponível em: <http://www.abenge.org.br/cobenge/legado/interna.php?ss=19&ctd=69>. Acesso em: 09 abr. 2022

RABELLO, Y. C. P. **A concepção estrutural e a arquitetura**. São Paulo: Ziguarte, 2000.

RIBEIRO NETO, J. G. Estruturas Metálicas 9- Ligações – parte 1. Jun. 2016. Apresentação do Power Point. Disponível em: <https://docplayer.com.br/50938588-Estruturas-metalicas-9-ligacoes-parte-1.html>. Acesso em: 14 maio 2023.

WHITEHEAD, R. **Structures by Design**: Thinking, Making, Breaking. New York: Routledge, 2019. E- book.

YOKOMIZO, M. H. **Desenvolvimento de software para dimensionamento da estrutura de um galpão e de elementos isolados em aço**. 2020. 95 f. Trabalho de

Conclusão de Curso em Engenharia Civil – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Apucarana, 2021. Disponível em:  
<http://paginapessoal.utfpr.edu.br/rtessari/tccs>. Acesso em: 16 maio 2023.