

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

LEONARDO MAZO BUENO

**UTILIZAÇÃO DA TECNOLOGIA DE IMPRESSÃO 3D PARA CONFEÇÃO DE
MATERIAL DIDÁTICO PARA A DISCIPLINA DE CONTRUÇÕES EM AÇO**

APUCARANA

2023

LEONARDO MAZO BUENO

**UTILIZAÇÃO DA TECNOLOGIA DE IMPRESSÃO 3D PARA CONFEÇÃO DE
MATERIAL DIDÁTICO PARA A DISCIPLINA DE CONTRUÇÕES EM AÇO**

**USE OF 3D PRINTING TECHNOLOGY TO PRODUCE DIDACTIC MATERIAL FOR
THE STEEL STRUCTURES SUBJECT**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).
Orientado: Prof. Dr. Rodolfo Krul Tessari.

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.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

No dia 16 de junho de 2023, às 16 horas, por videoconferência, realizou-se a Banca de Defesa Pública da Monografia, intitulada: **UTILIZAÇÃO DA TECNOLOGIA DE IMPRESSÃO 3D PARA CONFECCÃO DE MATERIAL DIDÁTICO PARA A DISCIPLINA DE CONTRUÇÕES EM AÇO**, do (a) aluno (a) **Leonardo Mazo Bueno**, sob orientação do (a) professor (a) **Rodolfo Krul Tessari**, como requisito parcial para aprovação no Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Civil. Inicialmente, o (a) aluno (a) fez a apresentação do seu trabalho, em seguida foi arguido (a) pelos membros da Banca Examinadora. Após reunião em sessão reservada, a Banca deliberou e decidiu pela **APROVAÇÃO** do referido trabalho, com nota 93 (noventa e três).

O resultado foi divulgado, formalmente, aos presentes e eu, na qualidade de Presidente da Banca, lavrei a presente ata que será assinada por mim, pelos demais examinadores e pelo (a) aluno (a).

Rodolfo Krul Tessari
Presidente da Banca

Sarah Honorato Lopes da Silva
Examinador (a)

Erica Fernanda Aiko Kimura
Examinador (a)

Leonardo Mazo Bueno
Aluno (a)



Documento assinado eletronicamente por (Document electronically signed by) **RODOLFO KRUL TESSARI, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em (at) 16/06/2023, às 17:52, conforme horário oficial de Brasília (according to official Brasilia-Brazil time), com fundamento no (with legal based on) art. 4º, § 3º, do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por (Document electronically signed by) **ERICA FERNANDA AIKO KIMURA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em (at) 16/06/2023, às 18:18, conforme horário oficial de Brasília (according to official Brasilia-Brazil time), com fundamento no (with legal based on) art. 4º, § 3º, do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por (Document electronically signed by) **Leonardo Mazo Bueno, Usuário Externo**, em (at) 16/06/2023, às 20:21, conforme horário oficial de Brasília (according to official Brasilia-Brazil time), com fundamento no (with legal based on) art. 4º, § 3º, do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site (The authenticity of this document can be checked on the website) https://sei.utfpr.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador (informing the verification code) **3495389** e o código CRC (and the CRC code) **906FF3C7**.

Dedico este trabalho à minha avó Marina, meu avô Joaquim e meu tio Benelli, que viram o início da minha graduação, mas infelizmente não poderão comemorar comigo a conclusão.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha família, meus pais Ricardo e Rosana, meu irmão Rafael e minha avó Lair, pelo apoio que me deram durante todas as etapas da minha graduação e pela compreensão, em específico, na realização deste trabalho, sem eles nada disso teria sido possível.

Aos meus amigos Thiago, Igor, Luiz, André e Daniel que estiveram presentes durante os bons e maus momentos, me ajudando quando precisei e tornando meus dias mais divertidos.

Agradeço ao meu orientador Rodolfo por toda a ajuda e por não ter desistido de mim quando até eu mesmo pensei em desistir.

A professora Andrea, parte fundamental da minha formação até aqui, a maior figura de apoio que encontrei em toda a universidade.

Agradeço a Fang, que me ajudou com apoio, companhia e assuntos os quais eu não dominava o suficiente, também pela paciência e compressão durante toda a escrita deste trabalho.

E a todas as pessoas presentes na minha vida, que apesar de não estarem citadas aqui, sabem o quanto são importantes em todos os meus passos.

RESUMO

Este trabalho consiste no desenvolvimento de um material didático para a disciplina de construções em aço com o auxílio da tecnologia de impressão 3D. Um problema facilmente constatado no ensino superior de engenharias no Brasil é a dificuldade em se transmitir o conhecimento de forma efetiva aos alunos, tanto devido a lacunas na formação dos professores universitários, quanto a déficits na base de conhecimentos e motivação dos discentes. Na tentativa de auxiliar a remediar este problema, surgiu a ideia de desenvolver um material didático para uma disciplina da grade de engenharia civil. Decidiu-se utilizar as vantagens da tecnologia de impressão 3D e as similaridades do comportamento entre os polímeros e o aço para confeccionar protótipos a fim de demonstrar conceitos estudados ao longo da disciplina de Construções em Aço, como modos de falha e características de ligações metálicas. Aplicando teorias educacionais em conjunto com a impressão 3D e cálculos de dimensionamento de estruturas metálicas, foram desenvolvidos os modelos para demonstrar os conceitos de escoamento da seção bruta, ruptura da seção líquida, pressão de contato, cisalhamento em bloco, comprimento de flambagem, flambagem global e local, ligações e apoios rígidos e flexíveis, além de geometrias de soldas. Levando em consideração a facilidade de replicação, custo de produção, ergonomia e *design*, foram confeccionados mecanismos que permitem facilmente aplicar forças axiais durante demonstrações em sala de aula, e desta forma causar a falha de peças teste, dimensionadas previamente nesta pesquisa ou pelos próprios alunos, possibilitando a comparação entre a teoria e a prática e facilitando o entendimento da matéria. Também foram feitos modelos em escala reduzida, permitindo trazer exemplos físicos para a sala de aula que não seriam possíveis de outra forma. Por fim, para cumprir o objetivo de tentar auxiliar a educação superior no país, os arquivos e instruções de montagem de todos os protótipos foram disponibilizados online, permitindo que qualquer professor com acesso a uma impressora 3D replique e utilize o material em suas aulas.

Palavras-chave: ensino-aprendizagem; estruturas metálicas; manufatura aditiva; prototipagem.

ABSTRACT

This study consists of the development of a steel constructions discipline courseware with the aid of 3D printing technology. A conspicuous problem in higher education engineering in Brazil is the difficulty faced when trying to effectively transmit knowledge to students, both due to gaps in the university lecturers' trainings and students' background knowledge and motivation deficits. The application of modern teaching methods and styles has been increasing over the last years, including UTFPR itself, to help remedy this problem, the idea of developing a courseware for a discipline of the civil engineering grade emerged. It was then decided to use the advantages of 3D printing technology and the behavioral similarities between polymers and steel to manufacture prototypes that can demonstrate concepts studied during the Steel Constructions course, such as failure modes and characteristics of metallic connections. Applying educational theories in conjunction with 3D modeling and steel structures sizing calculations, models were developed to demonstrate the concepts of gross section flow, liquid section failure, contact pressure, block shear, buckling length, global buckling and local buckling, rigid and flexible connections and supports, and weld geometry. Considering the ease of replication, production cost, ergonomics and design, mechanisms that allow easily applying axial forces during classroom demonstrations and thus cause the failure of test pieces were crafted, dimensioned previously in this research or by the students themselves, the mechanisms enable the comparison between theory and practice and facilitate the understanding of the subject. Scaled models of large construction artifacts were also crafted, allowing teachers to bring physical samples into the classroom that would not be possible otherwise. In conclusion, it was possible to develop different approaches to demonstrate all the concepts functionally and to fulfill the main objective of the research, of trying to help higher education in the country, the files and assembly instructions for all the prototypes were made available online, allowing any instructor with access to a 3D printer to replicate and use the material in their classes.

Keywords: teaching-learning; metallic structures; additive manufacturing; prototyping.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

3D	Três Dimensões
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ELT	Experiential Learning Theory
FFF	Fused Filament Fabrication
FDM	Fused Deposition Modeling
KLSI	Kolb Learning Style Inventory
KLST	Kolbs's Learning Style Test
MEC	Ministério de Educação e Cultura
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NBR	Normas Brasileiras
NIH	National Institute of Health
PETG	Polyethylene Terephthalate Glycol-modified
PLA	Polylactic Acid
TPU	Thermoplastic Polyurethane
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
VAK	Visual, Aural and Kinesthetic
VARK	Visual, Aural, Read/Write and Kinesthetic

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	Problema	14
1.2	Objetivo	17
1.3	Relevância.....	18
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	19
2.1	Tipos de aprendizagem.....	19
2.2	Estado da arte.....	28
2.3	Impressão 3D.....	30
2.4	Comparação entre polímeros e o aço.....	31
2.5	Fenômenos e modos de falha a serem demonstrados	38
2.5.1	Ligações	38
2.5.2	Modos de falha em ligações parafusadas	39
<u>2.5.2.1</u>	<u>Falha na chapa por pressão de contato (esmagamento e rasgamento)</u>	<u>39</u>
2.5.3	Modos de falha de peças tracionadas	40
<u>2.5.3.1</u>	<u>Escoamento da seção bruta.....</u>	<u>40</u>
<u>2.5.3.2</u>	<u>Ruptura da seção líquida.....</u>	<u>40</u>
<u>2.5.3.3</u>	<u>Rasgamento (cisalhamento em bloco)</u>	<u>41</u>
2.5.4	Ligações soldadas.....	42
2.5.5	Instabilidade de peças comprimidas.....	44
<u>2.5.5.1</u>	<u>Flambagem global</u>	<u>44</u>
<u>2.5.5.2</u>	<u>Flambagem local</u>	<u>46</u>
3	MATERIAIS E MÉTODOS	49
3.1	Materiais	49
3.1.1	Impressora 3D	49
3.1.2	Polímeros	50
3.1.3	Softwares.....	52
<u>3.1.3.1</u>	<u>Modelagem.....</u>	<u>53</u>
<u>3.1.3.2</u>	<u>Fatiadores.....</u>	<u>53</u>
3.2	Métodos.....	53
3.2.1	Concepção dos modelos	53
<u>3.2.1.1</u>	<u>Dimensões, limites e ergonomia.....</u>	<u>53</u>
3.2.2	Modelo de tração.....	55

3.2.3	Modelos de Compressão.....	57
3.2.4	Modelos de ligações e apoios rígidos e flexíveis.....	59
3.2.5	Modelos de ligações soldadas.....	61
4	RESULTADOS.....	63
4.1	Tração.....	63
4.1.1	Falha por escoamento da seção bruta	65
4.1.2	Falha por ruptura da seção líquida	66
4.1.3	Falha por esmagamento.....	67
4.1.4	Falha por rasgamento (cisalhamento em bloco).....	67
4.1.5	Atividades sugeridas com o uso dos modelos.....	68
4.2	Geometria da solda	69
4.3	Ligações e apoios rígidos e flexíveis	71
4.4	Compressão.....	73
4.5	Flambagem local	75
5	CONCLUSÃO	77
	REFERÊNCIAS.....	79
	Apêndice A	84
	Apêndice B	93
	Apêndice C	100

1 INTRODUÇÃO

A natureza humana é possivelmente o maior problema filosófico já encontrado, sendo um tema recorrente durante toda a história. O primeiro registro desta problemática vem do filósofo pré-socrático Heráclito (535 a.C. – 475 a.C.) e sua famosa citação parafraseada por Carneiro (2015) “o mesmo homem nunca se banha no mesmo rio, pois outras são as águas, e outro é o homem”. Outros filósofos também contribuíram com suas próprias definições de natureza humana desde então, como Platão que afirma que o ser humano pode se libertar apenas através do uso da razão, ou Aristóteles ao diferenciar os homens dos outros animais pelo seu uso da linguagem, o que possibilita a criação de técnicas e conhecimentos (CARNEIRO, 2015). A partir de Descartes (1979), o homem torna-se um objeto da investigação científica e é definido unicamente através da razão como é exemplificado pela frase “penso, logo existo”.

Tendo em mente essa importância da razão para a própria definição de ser humano, conseguimos entender o porquê de “a educação ser a arma mais poderosa que você pode usar para mudar o mundo” (informação verbal)¹. Já que todo o conhecimento adquirido pela humanidade somente pode ser mantido e ampliado através do ensino.

Exemplos da relevância da educação na história humana podem ser encontrados ao se analisar como a manutenção e o estímulo do conhecimento está intimamente ligado à prosperidade de nações, como os romanos, persas e mongóis, ao absorver a cultura dos povos conquistados ao invés de extingui-las, as bibliotecas mantidas por Alexandre; e ainda, mais recentemente, o desenvolvimento acelerado do Japão e da Coreia do Sul após a segunda Guerra Mundial.

Detalhado por John Locke em sua obra “Ensaio acerca do entendimento humano” (1690), o conceito de *tábula rasa*, no qual todas as pessoas nascem sem conhecimento algum e todo o processo do conhecer, saber e agir, é aprendido através da experiência, é essencial para toda a corrente filosófica empirista, com seus principais representantes em Hobbes e Locke (LOCKE, 1993).

Posteriormente sintetizado por Immanuel Kant, o empirismo e o racionalismo são vistos como partes da identidade humana, onde um conceito seria complementar ao outro, “Todo conhecimento humano tem origem nos sentidos. Contudo, o homem

¹ Nelson Mandela, durante o discurso de inauguração da rede *Mindset* em 2003.

possui uma razão inata - ou uma razão pura - que interpreta os dados empíricos” (CARNEIRO, 2015).

Considerando a ponderação sobre a obtenção e assimilação do conhecimento expostas acima, em conjunto com a essencialidade da educação para a humanidade, ao longo dos anos foram criadas e aprimoradas diversas teorias e métodos de ensino, como o método tradicional, ao qual estamos habituados nas escolas, e mais recentemente metodologias mais abertas e próximas aos alunos, que integram a experiência e a racionalidade de acordo com a necessidade de cada indivíduo, difundidas por David Kolb e Paulo Freire, por exemplo (KOLB; KOLB, 2013).

Enquanto os filósofos divagavam sobre nós mesmos, buscando formas de nos definir, entender como aprendemos e criar formas mais eficazes de transmitirmos esse conhecimento através das gerações, o conhecimento em si não parou de ser gerado. A criação de novas tecnologias é uma característica fundamental da evolução da sociedade como um todo.

Desde a obtenção do fogo, passamos por grandes mudanças na sociedade devido ao surgimento de novas técnicas que revolucionaram o modo de vida do ser humano globalmente. A criação de instrumentos de caça, o surgimento da agricultura, o domínio dos metais, a invenção da roda, a revolução industrial, a criação da Internet, todos são exemplos de tecnologias que definiram o desenvolvimento humano. Baseando-se no caráter tecnológico de cada período, surgem nomenclaturas para cada etapa da história, a exemplo das Idades da Pedra Lascada, Pedra Polida e dos metais (ferro, cobre e bronze). Se fôssemos dar um nome ao período em que estamos, certamente seria a Era da Informação, onde os conhecimentos tecnológicos, científicos e informacionais dão suporte ao compartilhamento quase instantâneo de todo tipo de informação oriunda de qualquer parte do globo. A cibernética, automação, engenharia genética, computação eletrônica são alguns dos ícones da sociedade tecnológica que vivemos atualmente (SILVEIRA; BAZZO, 2009).

Uma nova tecnologia que cria uma interação interessante entre métodos modernos de produção e metodologias recentes de ensino é a impressão 3D, processo de criação automatizado de objetos tridimensionais a partir de arquivos digitais (AGUIAR, 2016).

Recentemente, a tecnologia de impressão 3D vem ganhando cada vez mais popularidade, frequentemente sendo manchete de noticiais e pauta de matérias jornalísticas. Com uma maior variedade de usos, abrangendo áreas como biomedicina

(NIH, 2023), astronomia (NASA, 2023), arquitetura, engenharia, história, geografia e mais uma infinidade de temas, a crescente comunidade gera dia a dia milhares de novos modelos, projetos, reconstruções, mapeamentos, escaneamentos entre outros (MYMINIFACTORY, 2022; PRINTABLES, 2022; THINGIVERSE, 2022).

Como acontece com qualquer novidade tecnológica, com o passar dos anos e a evolução das tecnologias acontece o barateamento dos custos e, por conseguinte, a popularização devido ao maior acesso da população a estes recursos (BLIKSTEIN, 2013). Exemplos próximos são facilmente encontrados, com impressoras 3D presentes em universidades e o aparecimento de uma variedade de comércios relacionados, tais como a venda de insumos, modelos 3D impressos ou não, produtos personalizados e assistências técnicas.

Inclusive, com a popularização da impressão 3D começou a surgir uma grande quantidade de usos relacionados à educação, tanto com a impressão de modelos para uso em aula (facilmente encontrados nas abas de educação de repositórios de arquivos digitais, gerados por usuários comuns e até de fontes muito confiáveis e renomadas, como universidades e museus), quanto o próprio *design* e criação de peças sendo usado como método de ensino. Exemplos disso são os trabalhos de Kostakis, Niaros e Giotitsas (2014), que analisaram como a impressão 3D pode contribuir com o ensino sob uma ótica construcionista, e de Aguiar (2016), que focou em utilizar a impressão 3D como forma de ensinar um grupo de alunos, auxiliando-os a desenvolverem seus próprios modelos.

Segundo Aguiar (2016), existe uma compatibilidade grande das áreas das ciências exatas com a tecnologia de impressão 3D. Como ele mesmo pondera, talvez pela grande quantidade de abstrações necessárias em disciplinas como matemática e física. Essa conexão entre a popularização da impressão 3D, o aumento de usos na área da educação e a compatibilidade entre a tecnologia e a área das ciências exatas despertou o interesse de integrar estes três fatores à disciplina de Estruturas Metálicas presente em cursos de graduação em Engenharia Civil.

Por ser um assunto específico da Engenharia Civil e devido às similaridades existentes entre o comportamento dos metais e o de polímeros, modelos podem ser criados para demonstrar conceitos que demandam considerável nível de abstração presentes na disciplina de estruturas metálicas. Daí surgiu a ideia do desenvolvimento dos modelos que facilitariam o aprendizado dos conteúdos ministrados na disciplina.

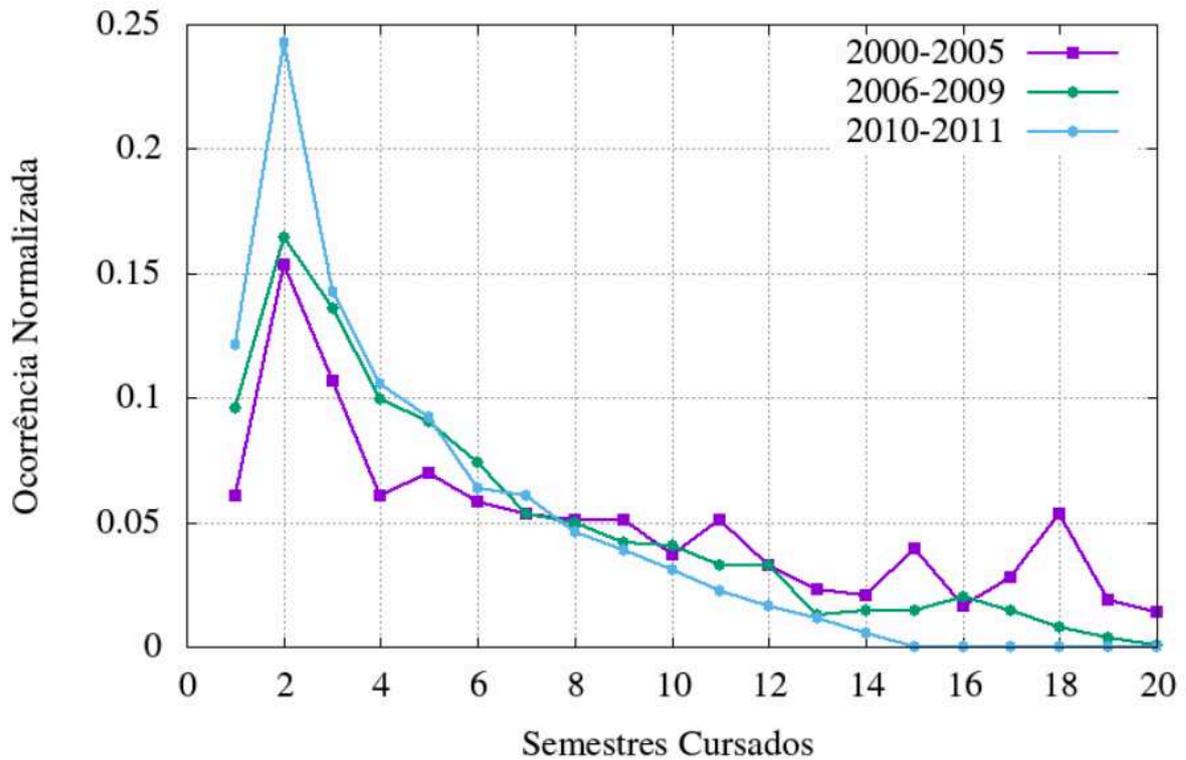
Após o surgimento da ideia, foram vislumbradas maneiras em que a pesquisa ajudasse, ainda que pouco, a melhorar a situação do ensino acadêmico nas universidades brasileiras, possivelmente reduzindo taxas de abandono e criando maior interesse dos alunos nas aulas. Assim, o presente trabalho tem a ambição de criar um material facilmente reproduzível sem a necessidade de habilidades manuais complexas, disponível a qualquer pessoa interessada que tenha acesso a uma impressora 3D, cuja utilização seja intuitiva a professores e alunos e complemente o ensino teórico sobre o dimensionamento de estruturas de aço.

1.1 Problema

Desde o início do aprendizado humano, instrutores e professores vêm desenvolvendo e aplicando continuamente técnicas de ensino a fim de melhorar a experiência e resultados de seus alunos. Entretanto, especialmente para disciplinas acadêmicas mais avançadas dos cursos de ciências exatas, o número de reprovações e abandonos continua extremamente elevado comparado à média nacional, fato que pode ser influenciado, por exemplo, por uma escolha ineficiente da forma de ensinar adotada nestas áreas. Isso pode ser verificado pelas taxas de evasão e reprovação disponibilizadas pela UTFPR em seu relatório de auditoria interna publicado em 2019, que aborda o tema evasão em específico, onde é indicado um índice de evasão global de 38% (19.879 de 52.365 matrículas) entre 2012 e 2017, muito superior à média esperada (UTFPR, 2019).

Além disso, a grande disparidade do nível de conhecimento entre os alunos que ingressam na universidade gera obstáculos ao aprendizado e favorece o abandono de disciplinas, exemplificado no Gráfico 1, que apresenta um pico de desistência logo no início do curso.

Gráfico 1 – Distribuição de semestre dos alunos desistentes entre 2000 e 2011



Fonte: UTFPR (2017)

Os principais fatores geradores desta disparidade são indicados por FRĂSINEANU (2012) como sendo:

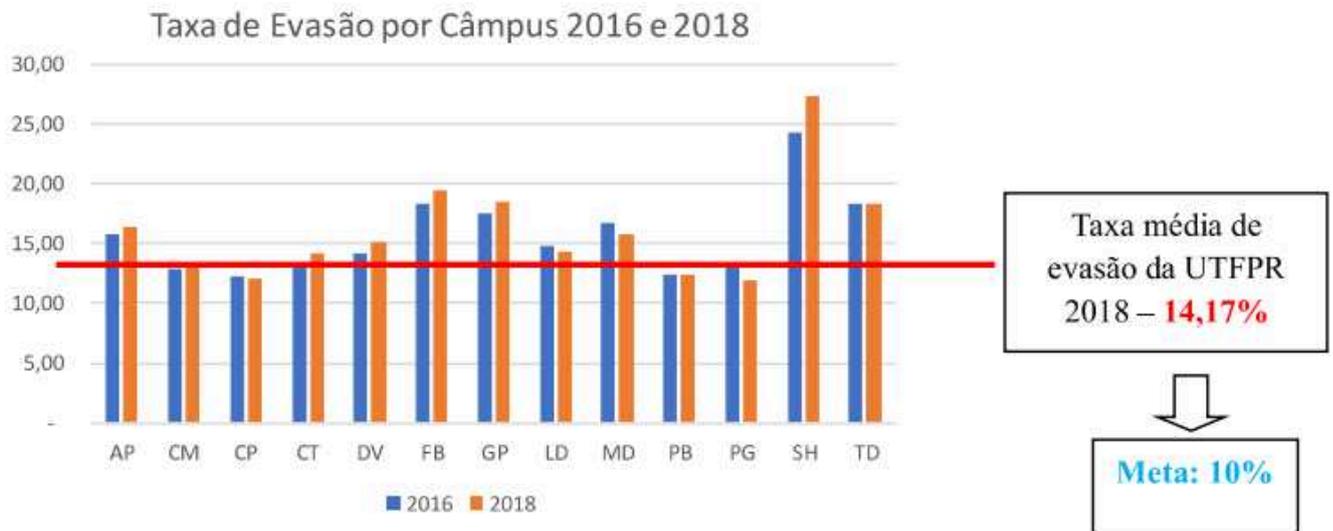
[...] a falta de habilidades necessárias, prática, conhecimento básico, técnicas de aprendizagem, falta de motivação, responsabilidade, foco e dedicação, interesses mal definidos, pouca orientação profissional, más experiências de ensino, baixa frequência em aulas, condições materiais inadequadas, falta de competências organizacionais e planejamento das atividades de aprendizado, erros de autoavaliação, reações de distanciamento e recusa ao aprendizado (FRĂSINEANU, 2012 *apud* FRĂSINEANU, 2019).

As diferentes dificuldades de aprendizado apresentadas pelos alunos em conjunto com as técnicas de ensino específicas aplicadas pelos professores são o que determinam o sucesso ou falha do processo letivo. Como tais dificuldades de aprendizado são de difícil controle por parte dos orientadores, as técnicas de ensino são o meio mais fácil e eficaz de entender as preferências dos alunos e estreitar as

relações aprendiz-mestre, sinalizando a importância do desenvolvimento e utilização de métodos mais modernos e eficazes (PRITHISHKUMAR; MICHAEL, 2014).

Como pode ser visto na Gráfico 2, na análise de evasão pelo sistema acadêmico, a taxa de evasões média da UTFPR apresenta resultados acima da meta de 10% durante os anos de 2016 a 2018.

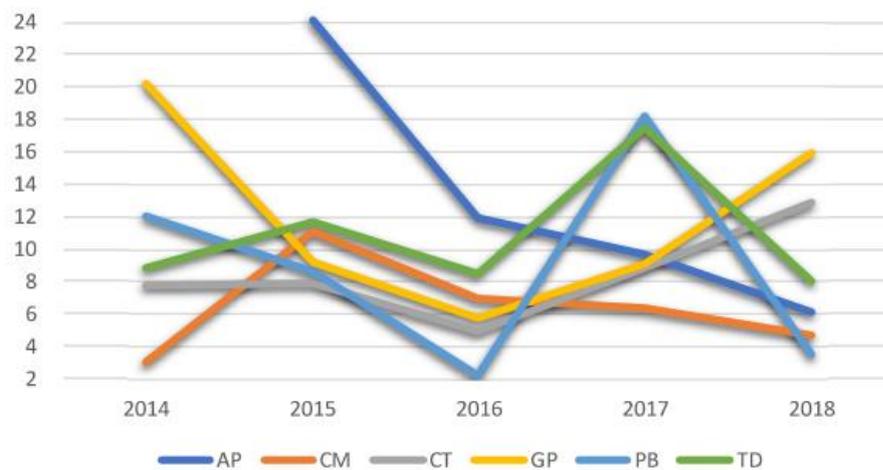
Gráfico 2 – Taxa de Evasão por Câmpus entre 2016 e 2018



Fonte: UTFPR (2019)

Além disso, especificamente para os cursos de Engenharia Civil, a evolução da evasão pode ser vista na Gráfico 3.

Gráfico 3 – Taxa de Evasão de Engenharia Civil entre 2014 e 2018 por campi



Fonte: UTFPR (2019)

Notoriamente conhecidos por seu alto nível de complexidade, nos cursos de engenharia civil a grande quantidade de reprovações em suas disciplinas se dá tanto pela dificuldade de aprendizado dos alunos quanto pela dificuldade em transmitir o conhecimento de forma didática pelos professores. Por isso muitas pesquisas são desenvolvidas com o objetivo de motivar os estudantes e, por conseguinte, evitar a evasão (KIECKOW; FREITAS; LIESENFELD, 2018).

Além da dificuldade inerente ao ensino superior, falta de base e motivação dos alunos, parte do problema também pode ser creditada à falta de formação pedagógica dos professores universitários. Como Pereira (2018) evidência em seu trabalho, enquanto são exigidas formações pedagógicas e cursos com modalidade de licenciatura dos professores da educação básica, para os professores do ensino superior essas formações não são obrigatórias, acarretando a possível contratação de professores desqualificados, ainda que durante o processo seletivo haja um “filtro” para casos extremos.

Esta pesquisa tenta remediar os problemas supracitados criando um material didático que: (i) melhore a qualidade das aulas para os alunos, buscando reduzir a desmotivação e facilitar o entendimento; e (ii) que facilite a aplicação de métodos didáticos diferentes para os professores, criando maior interesse na área da licenciatura, a qual pode ser uma carência durante sua formação. Desta forma, a pesquisa busca ser útil a docentes e discentes, e assim reduzir as taxas de evasão e reprovação na Engenharia Civil.

1.2 Objetivo

Este trabalho tem como principal objetivo a confecção de um material didático moderno, de fácil utilização e fácil reprodução, para o ensino da disciplina de “Construções em Aço”, por meio da utilização da tecnologia de impressão 3D por manufatura aditiva.

A fim de alcançar este objetivo geral, objetivos específicos foram traçados:

- Definir os fenômenos que se pretende estudar por meio de modelos 3D;
- Realizar a modelagem e impressão dos protótipos de ensino;
- Sugerir modos de utilização dos modelos no ensino da disciplina de “Construções em Aço”;
- Disponibilizar os arquivos para impressão em conjunto com instruções de montagem, tornando o material acessível a possíveis interessados.

1.3 Relevância

A relevância desta pesquisa para o ambiente acadêmico é amplificada pelo fato dos cursos de graduação estarem passando por uma reforma curricular devido a novas diretrizes impostas pelo MEC. Inclusive, o curso de Engenharia Civil do campus Apucarana da UTFPR recebeu uma atualização de seu projeto pedagógico de curso recentemente em 2018. O novo Projeto Pedagógico de Curso Superior de Engenharia Civil (UTFPR, 2018) se alinha diretamente com este trabalho, reafirmando diversos problemas citados nesta pesquisa (como, por exemplo, a lacuna na formação dos professores de magistério superior) e também compartilhando dos mesmos objetivos, como os citados no projeto pedagógico: o comprometimento com o aprimoramento do ensino com o desenvolvimento de novos métodos e metodologias; a necessidade de repensar os processos que abarcam o fazer docente; possibilitar a autoformação, heteroformação e interformação dos discentes; se adequar às novas exigências educativas, tecnológicas e culturais; melhorar a formação pedagógica inicial e continuada dos docentes; melhoria do processo ensino-aprendizagem; aprofundamento de temáticas relacionadas a metodologias de ensino.

Ponderando sobre os objetivos compartilhados entre o novo rumo da educação na UTFPR e a presente pesquisa, pode-se realçar o fato de que a pesquisa busca concretizar os objetivos do projeto pedagógico por meio da integração de novas tecnologias e metodologias ao ambiente de sala de aula.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Durante o referencial teórico serão discutidos conceitos necessários para o entendimento do trabalho. Entender como funcionam os diferentes tipos de aprendizagem permite identificar como os protótipos funcionam no contexto da educação e como podem ser utilizados durante a aula. Contextualizar o estado da arte ajuda o leitor a ter uma ideia de como está a situação atual de tópicos relacionados à pesquisa. Entender o que é a impressão 3D, como os materiais podem ser comparados e quais são os diferentes modos de falha em estruturas metálicas permite ao leitor compreender como foram desenvolvidos os protótipos e seu propósito.

2.1 Tipos de aprendizagem

“Toda criança possui talentos e habilidades específicas”. Essa famosa frase, creditada a Aristóteles (334 AC), é muito conhecida pelos acadêmicos da área de educação e demonstra que o conceito de preferências e estilos individuais de aprendizagem não é uma novidade e vem sendo estudado desde os tempos antigos. Ao longo dos anos, vários modelos foram utilizados para descrever os estilos de alunos (SHIER, 2020), principalmente nas últimas quatro décadas, como demonstrado por Cassidy (2004) e reforçado por Coffield, *et al.* (2004), ao indicar que mais de 70 novas teorias foram desenvolvidas durante este período.

Reconhecidamente, a primeira pessoa a descobrir, teorizar e implementar os tipos de aprendizado foi David Kolb, um psicólogo, teórico e professor americano (THEODORE, 2022). O questionário de Kolb (KLST) foi desenvolvido em 1984 com dois propósitos diferentes. Primeiramente, para disponibilizar uma ferramenta que aumentasse o entendimento sobre o processo de aprendizagem e particularidade de cada indivíduo, estudando a abordagem adotada por estudantes. Isso possibilita ao próprio estudante identificar quais são seus métodos de compreensão e melhorar sua eficiência enquanto escolhe as abordagens que melhores se adequam ao seu estilo e a situações específicas. Além disso, o modelo desenvolvido por Kolb é também benéfico aos educadores, ajudando-os a elaborar e aplicar novas técnicas de ensino, criando ambientes que favoreçam a forma de aprendizado de seus pupilos. Em segundo lugar, o KLST serve para implementar a teoria experimental de ensino (ELT) e explorar as características dos estilos individuais de estudo (KOLB; KOLB, 2013).

Elucidada por Kolb, a teoria experimental de ensino foi descoberta e estudada durante o século XX pelos proeminentes acadêmicos John Dewey, William James, Jean Piaget, Kurt Lewin, Lev Vygotsky, Carl Rogers, Paulo Freire, Cael Jung e Mary Parker Follett. Todos esses famosos estudiosos concordam com a ideia de que experiência é a chave para desenvolver o conhecimento humano e enfatizaram isso em seus estudos. A ELT foi formada de acordo com as seguintes ideias dos estudiosos (KOLB; KOLB, 2013):

- Todo aprendizado é mais bem concebido como um processo ao invés de apenas resultados;
- Todo aprendizado é um reaprendizado;
- Estudar requer a resolução dos conflitos entre as formas dialeticamente opostas de adaptação ao mundo;
- O aprendizado é um processo holístico de adaptação ao mundo;
- O conhecimento resulta das transações sinérgicas entre o indivíduo e o ambiente;
- Aprender é o processo de criar conhecimento.

O processo de aprendizado pode ser exemplificado por um círculo gerido pela conjunção entre os princípios duais Ação/Reflexão e Experiência/Abstração, como apresentado na Figura 1 (KOLB; KOLB, 2013).

Figura 1 – O ciclo do aprendizado ativo



Fonte: KOLB; KOLB (2013, traduzido pelo autor)

Anteriormente ao Inventário de Estilos de Aprendizagem de Kolb, o modelo utilizado era a Teoria de Aprendizado Experiencial (ELT), criada para organizar os tipos individuais de estudo. Desta maneira, faz-se necessário entender as diferentes abordagens caracterizadas pela ELT antes de seguir para o inventário de Kolb, já que este se origina do anterior.

Como demonstrado na Figura 1, a teoria de aprendizado experiencial é dividida em quatro categorias, sendo estas:

- **Experiência Concreta (CE):** é um método caracterizado pela habilidade de encontrar sentido nas coisas ao se envolver profundamente em experiências;
- **Observação Reflexiva (RO):** também conhecida como reflexão, esse estilo se baseia em conectar a experiência e a idealização através da reflexão contínua;
- **Conceitualização Abstrata (AC):** definida pela palavra-chave pensar, consiste em se aprender com o uso do raciocínio lógico.
- **Experimentação Ativa (AE):** pautada no agir, é a aplicação de ações objetivas, integrando pessoas e tarefas.

O KLSI deriva das quatro categorias mencionadas, onde as categorias não dialeticamente opostas são combinadas em pares, como demonstrado pelos quatro extremos da Figura 2. Além destes quatro pares, a figura também mostra estilos intermediários e o centro como um balanço de estilos (KOLB;KOLB, 2013).



Fonte: KOLB; KOLB (2013, traduzido pelo autor)

As definições dos quatro principais estilos de aprendizado do inventário de Kolb brevemente explicam que diferentes pessoas naturalmente optam por diferentes estilos de aprendizagem. Chapman (2013) afirma que conhecer o próprio estilo nos permite aprender utilizando métodos mais otimizados de ensino. Chapman também descreve em seu trabalho as características desses quatro principais estilos (2013):

1. **Divergente ou Imaginativo (EC+OR):** Pessoas com esse estilo de aprendizado tendem a ter diferentes pontos de vista sobre seu entorno, preferindo observar e reunir informações antes de agir. Trabalham bem com outras pessoas na geração de ideias, como em *brainstorms* e trabalhos em grupo, onde recebem um *feedback*, já que preferem usar a imaginação ao raciocínio lógico.

2. **Assimilativo ou Analítico (CA+OR):** Este estilo foca em conceitos abstratos e ideias, com uma abordagem lógica onde explicações longas e claras são mais eficazes que tentativas práticas. Pessoas que preferem este estilo geralmente se adequam a carreiras científicas e na área de informação, além de se adaptarem bem ao método tradicional de ensino com aulas, leituras e modelos analíticos, onde conseguem tomar o tempo necessário para ponderar sobre cada tópico apresentado.
3. **Convergente ou Decisivo (CA+EA):** Este tipo de aprendizagem consiste em aplicar experiências prévias na resolução de problemas. Se destacam ao encontrar aplicações práticas para ideias e teorias, mas enfrentam problemas com experiências interpessoais e interações em grupos de pessoas. Indivíduos que se enquadram nesse estilo gostam de experimentar, tentar novas ideias, simular situações e trabalhar em aplicações práticas. Esse tipo de aptidão os torna muito compatíveis com a área de desenvolvimento de novas tecnologias e pesquisas. Métodos eficientes de aprendizado são atividades técnicas e solução de problemas.
4. **Acomodativo ou Iniciativo (EC+EA):** Descrito como o estilo ativo, estes aprendizes usam a intuição e a análise feita por outras pessoas ao invés da própria lógica e análise. Trabalham bem em equipe e se interessam mais por novos desafios, executar planos e atividades práticas, e por isso se esforçam em tentar diferentes maneiras de alcançar seus objetivos.

É importante ressaltar que os modelos de aprendizagem descritos servem apenas para delinear formas comuns de aprendizado e não um conjunto de regras no qual as pessoas precisam necessariamente se enquadrar. Alunos podem, portanto, transitar entre diferentes categorias, mas possuir um estilo preferido bem definido geralmente resulta em um aprendizado mais efetivo.

Estudar o comportamento humano e aplicar a ELT auxilia os bons instrutores a criarem seus planos de aula, disponibilizando atividades e materiais diversificados a fim de atender toda a gama de estilos únicos de aprendizado de seus alunos. Entretanto, os estudantes não têm necessariamente conhecimento do método mais eficaz para si próprios. Por conta disso, foram criados questionários e o modelo VARK

que facilita a identificação das preferências e, com isso, a preparação de melhores aulas (CHAPMAN, 2013).

De acordo com Cherry (2019), psicóloga especialista em reabilitação psicossocial, o modelo VAK foi introduzido em 1987 por Neil D. Flemmig, professor da Universidade de Lincoln, na Nova Zelândia, sendo modificado para sua forma mais difusa apenas em 2006 (OTHMAN; AMIRUDDIN, 2010). O modelo VARK foi criado para ajudar os alunos a descobrirem suas preferências individuais, classificando-os quanto a forma que recebem a informação e não como a interpretam, diferentemente do KLST. As diferentes categorias de classificação do modelo VARK são: aprendizado visual (figuras, filmes, diagramas); aprendizado auditivo (músicas, discussões, aulas); aprendizado por leitura e escrita (fazer listas, leitura de textos, tomar notas); aprendizado cinestésico (movimentos, experimentos, atividades práticas).

Com base na explicação de Flemming e Mills (1992), a descrição dos quatro tipos de aprendizado e uma forma multimodal foram resumidos a seguir:

- **Aprendizado Visual (V):** Esta forma de aprendizado é frequentemente mal-entendida, confundida com a preferência por imagens, apresentações de slides e vídeos, mas na realidade consiste em possuir uma preferência pelo uso de simbolismos, diferentes formas, fontes e cores para enfatizar tópicos relevantes. Por exemplo, com o uso de diagramas ou ao utilizar símbolos impactantes ao relacionar assuntos no quadro. Esse tipo de interação é mais importante que apenas mostrar e explicar imagens em uma apresentação de slides para esses alunos. Sabendo disso, basicamente, as estratégias mais eficazes são fazer desenhos, planos e compilar textos com gráficos, quadros e diagramas, utilizar diferentes layouts, espaços, *designs*, cores, formas e decorações, além é claro de se utilizar de gestos e uma linguagem pitoresca durante as explicações. Infelizmente, é impossível evitar que os alunos encarem outros métodos de ensino durante o processo de aprendizado, já que a forma tradicional de aula comumente usa aulas apenas faladas, difíceis dos alunos visuais acompanharem. Para remediar este problema, uma boa sugestão é tomar notas, substituindo palavras-chave por desenhos e símbolos e alterar elementos gráficos por organizações espaciais mais coerentes ao copiá-las.

- **Aprendizado Auditivo (A):** Informações faladas e ouvidas são a base desta categoria. Seu tipo de aluno usa declarações e perguntas para aprender e, portanto, preferem aulas, discussões em grupo, falar em voz alta, reuniões e até por conversa de texto, quando usadas abreviações, gírias, termos coloquiais e linguagem informal, aproximando o texto da linguagem falada, o que se adequa a esse tipo de aprendizagem. Comumente as pessoas com essa preferência repetem o que lhes foi dito ou perguntado em voz alta. A estratégia mais eficaz sugerida para quando em um ambiente que não é o ideal é discutir com os alunos e professores, praticar explicações orais e ficar em locais quietos para lembrar suas ideias.
- **Aprendizado por Leitura (R):** A absorção e transmissão de conhecimento em forma textual são enfatizados nesta categoria. Os professores e estudantes estão familiarizados com esta forma de ensino, pois é muito comum no ambiente universitário e escolas. Pessoas com essa preferência geralmente possuem amplas habilidades de leitura e escrita, gostam de apresentações em forma de slides, textos na internet, listas, dicionários, matérias entregues em aula e palavras, tanto em papel quanto em telas. Não costumam usar métodos auditivos ou símbolos em suas apresentações, comumente recorrendo a listagens enumeradas, palavras interessantes e significativas, encontrar e corrigir erros de vocabulário e organizar palavras por hierarquia para aprender. Métodos de estudo sugeridos são reforçar leituras, revisar notas, trocar palavras por sinônimos e usar meios digitais para reorganizar textos.
- **Aprendizado Cinestésico (K):** Está relacionado ao uso de experiências e práticas (simuladas ou reais). Realidade e natureza concreta são palavras-chave para as pessoas com essa preferência. Esses conceitos reais e concretos podem, inclusive, ser mostrados a partir de imagens e telas. Tais alunos tendem a valorizar suas próprias experiências ao invés das de outros indivíduos. As melhores estratégias aplicáveis são a utilização de todos os sentidos, abordagens práticas, leitura de estudos de caso, aulas práticas e laboratoriais. Apenas tomar nota não é tão eficiente nesse caso e, por isso, deve-se tentar enriquecer as anotações com imagens reais e atividades, bem como complementar os estudos

retornando ao laboratório, relembando as experiências e discutindo com outras pessoas que compartilhem a mesma preferência.

- **Aprendizagem Multimodal:** Além das quatro categorias descritas acima, estudantes comumente possuem um conjunto de preferências ao invés de apenas uma. Levando em consideração essa possibilidade, independentemente do número de categorias combinadas, a teoria VARK divide em dois grupos as pessoas com este tipo de preferência múltipla.
 - VARK tipo 1: Estudantes flexíveis. Aplicam a estratégia mais adequada dentro da sua gama de preferências para cada situação, ou ainda, possuem métodos preferidos diferentes para diferentes tipos de atividades.
 - VARK tipo 2: Estudantes rígidos às suas múltiplas preferências. São mais inseguros quando recebem informações de maneiras que não são as suas preferidas. Comumente são vistos como lentos para absorver e transmitir conhecimento, mas com isso conseguem um entendimento mais amplo e aprofundado.

Com esses perfis de aprendizado em mente, professores devem procurar por diferentes e mais eficientes maneiras de atender a todos os seus alunos e, assim, ajudá-los a alcançar uma forma eficaz de aprendizado.

Porém, atualmente, há uma concordância geral de que o contexto cultural/educacional e as experiências são fatores importantes para o aprendizado e introduzem novas facetas na escolha entre os diferentes estilos.

O termo “estilo de aprendizado” dá a entender que cada aluno aprende de forma diferente. Tecnicamente, o estilo de aprendizado de um indivíduo refere-se à forma com que o qual absorve, processa, compreende e retém o conhecimento da forma mais eficiente. Por exemplo, quando aprendendo a construir um relógio, alguns estudantes entendem o processo com instruções verbais, enquanto outros precisam fisicamente manipular o relógio. (EL AISSAOUI, *et al.*, 2019).

Em outras palavras, estilos de aprendizagem se referem à preferência de cada indivíduo (DENG; BENCKENDORFF; GAO, 2022).

Como consequência, o ELT é uma ferramenta essencial para os educadores interessados em proporcionar a melhor experiência de ensino para seus alunos, criarem um ambiente de estudos com métodos e materiais adequados para assistir todos os tipos de alunos e garantir o melhor resultado possível ao guiar os estudantes para a direção correta.

Já para os alunos, o mais importante é o autoconhecimento. Saber como adquirem novas informações e como lidam com diferentes métodos de ensino facilita muito a experiência de aprendizagem. ou seja. Entender o modelo VARK é muito útil para adquirir este autoconhecimento e refletir sobre si mesmo pode acelerar as conquistas e objetivos atingidos ao se estudar.

Essa pesquisa também se adequa com a aplicação de metodologias ativas de ensino, como a aprendizagem baseada em problemas, aprendizagem baseada em projetos, aprendizagem baseada em times e *design thinking*, pois, como discutido posteriormente neste trabalho, podem ser desenvolvidas atividades que aplicam vários desses conceitos. Resumidamente, de acordo com a Secretaria da Educação do Estado do Paraná (Paraná, 2019), essas diferentes metodologias consistem em:

- Aprendizagem Baseada em Problemas: uma situação problema é apresentada aos alunos, que devem resolvê-la aplicando o que aprenderam e assim construir novos conhecimentos;
- Aprendizagem Baseada em Projetos: os alunos devem criar um produto pedagógico aplicando etapas metodológicas na realização de um projeto;
- Aprendizagem Baseada em Times: consiste na formação de grupos de alunos para trabalharem em conjunto, não apenas transmitindo o conhecimento entre si, mas também possibilitando o desenvolvimento de habilidades de trabalho em equipe;
- Design Thinking: uma estratégia de ensino e aprendizagem que permite os alunos desenvolverem e prototiparem soluções para um problema identificado.

2.2 Estado da arte

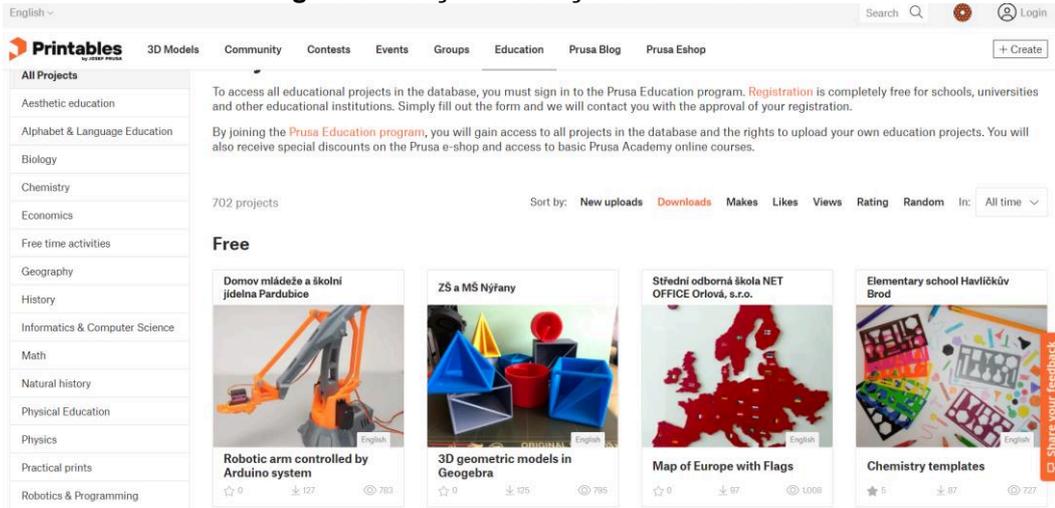
Como discutido anteriormente sobre os tipos de aprendizado, a aplicação de modelos tridimensionais auxilia a abranger uma maior variedade de métodos de ensino. Nesse sentido, exemplos de modelos práticos para a demonstração de conceitos abstratos da engenharia são bem comuns.

Especificamente na área da Mecânica podem ser encontrados trabalhos como o de Souza e Souza (2017), que demonstra conceitos básicos de isostática; Carbonari, *et al.* (2016), que executa um modelo de viga hiperestática; Rocha, *et al.* (2017), que realiza a análise do comportamento de protótipos próprios e o modelo “*Beam and Ball*” de Oliveira (2008); e ainda o trabalho de Silva (2019), que construiu uma prensa artesanal para a comparação entre dados analíticos e experimentais de flambagem. Este último trabalho inspirou a modelagem de um dos protótipos criados nesta pesquisa, particularmente a produção de um suporte que age como prensa e permite a determinação da força aplicada à coluna, criando dados comparáveis.

Também são comuns as compilações de modelos, como as de Oliveira, Medeiros e Medeiros (2019), que se destaca por uma melhor análise, por meio de questionários e gráficos, das dificuldades dos alunos e dos benefícios trazidos pelos modelos; as de Evangelista, *et al.* (2019), que também analisa o modelo “*Beam and Ball*” de Oliveira (2008), mas propõe tipos adicionais de apoio em seus protótipos; e Cunto Filho, *et al.* (2019), que usando modelos simples, consegue atingir os objetivos de demonstrar os conceitos.

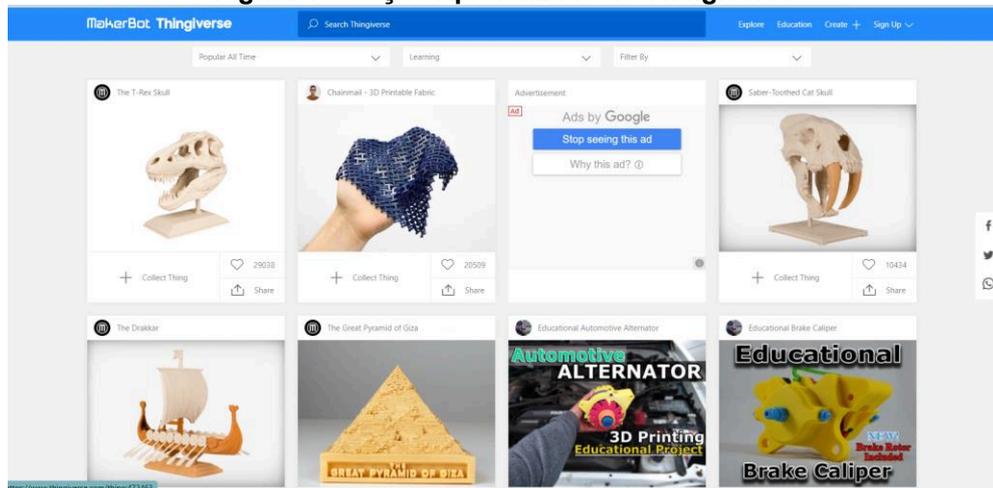
Partindo para temas mais próximos do abordado neste trabalho, essencialmente o uso da tecnologia de impressão 3D no ensino, é muito fácil encontrar exemplos destes usos em meios informais. Nos repositórios de arquivos digitais existem seções focadas exclusivamente na área de aprendizado. As Figuras 3, 4 e 5 a seguir apresentam capturas de tela dos principais repositórios.

Figura 3 – Seção Educação do Printables



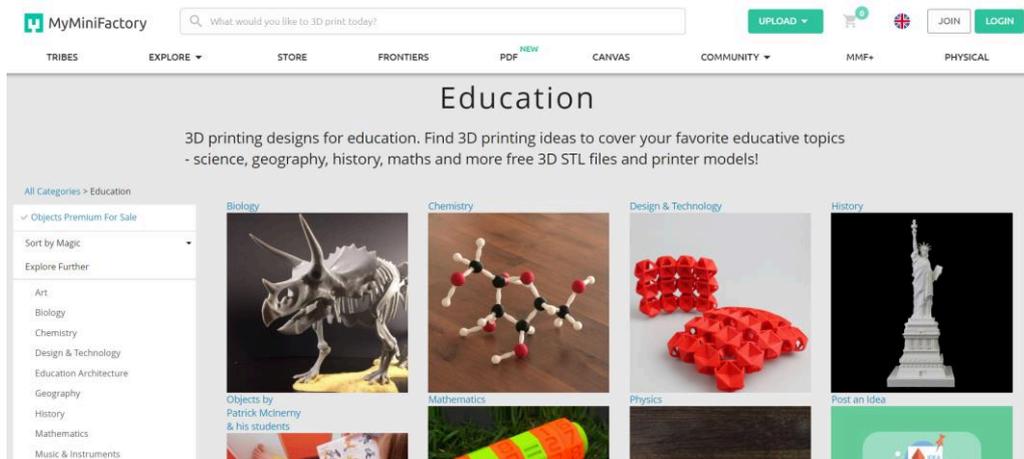
Fonte: PRINTABLES (2022)

Figura 4 – Seção Aprendizado do Thingiverse



Fonte: THINGIVERSE (2022)

Figura 5 – Seção Educação do MyMiniFactory



Fonte: MYMINIFACTORY (2022)

Apesar de mais difícil, não é impossível encontrar trabalhos acadêmicos aplicando a impressão 3D na educação. Os trabalhos de Santos e Andrade (2020), que analisa como a tecnologia vem sendo usada para fins educacionais no Brasil, e de Onisaki (2019), que imprimiu e testou vários modelos dos repositórios digitais populares, são leituras enriquecedoras sobre o tema.

Diferindo destes dois trabalhos, as pesquisas de Colpes (2014) e Silva, Florindo, Machado e Silva(2017) focam na característica tridimensional das peças para trazer ao ensino a acessibilidade tátil que os deficientes visuais necessitam. Demonstram um tipo de contribuição da tecnologia de extrema importância para inclusão social.

Por fim, a dissertação de Aguiar (2019) é uma abrangente pesquisa que aborda muitos aspectos tanto da tecnologia da impressão 3D quanto da área da educação e da interação entre as duas. Como se espera de um trabalho de mestrado, uma análise exaustiva e completa foi desenvolvida, focando em como a construção de modelos didáticos do zero pode ser benéfica ao aprendizado. Mas ressalta que existem obstáculos que precisam ser transpostos a fim de alcançar estes benefícios, como a necessidade dos professores terem amplo conhecimento da tecnologia de impressão 3D, experiência no uso da impressora e algum conhecimento na área de *design 3D*. Além disso, Aguiar afirma ser necessária uma afinidade e interesse dos alunos pela área, pois, como o próprio autor afirma, “a não ser que o interessado em usar essa tecnologia já tenha alguma experiência ou muita afinidade com ela, além de disponibilidade de tempo para explorá-la e, assim, aprender quais são seus percalços, é provável que essa pessoa não consiga utilizá-la” (AGUIAR, 2019, p. 23). Isto porque a experiência de aprendizado de utilização da impressão 3D é exaustiva e frustrante em razão da forma que ela acontece, por tentativa e erro. Segundo Aguiar, necessita-se de um volume monumental de erros que, combinado aos longos tempos de impressão, agravam o sentimento de frustração. O autor tenta remediar estes problemas desenvolvendo um processo que pode ser usado como um guia, facilitando a implementação de seu trabalho.

2.3 Impressão 3D

Diferente do método de usinagem, a manufatura aditiva, atualmente conhecida como impressão 3D, funciona adicionando camadas de material para construir objetos. Isso pode acontecer por diferentes processos, como a solidificação

de fotopolímeros, estereolitografia ou a manufatura por deposição de material fundido (FDM, também chamado de FFF – fabricação por filamento fundido) (AGUIAR, 2019). Este último método mencionado acabou se tornando mais popular e foi o selecionado para confeccionar os modelos didáticos desta pesquisa.

Devido à complexidade do processo de impressão 3D, formulou-se um breve manual para auxiliar futuros iniciantes na área, o qual consta no Apêndice A.

2.4 Comparação entre polímeros e o aço

Como já citado anteriormente, a possibilidade de usar a tecnologia de impressão 3D na demonstração de conceitos da disciplina de Construções em Aço foi vislumbrada devido a similaridades comportamentais entre o aço e os polímeros passíveis de serem utilizados. Entretanto, não é suficiente apenas citar tais similaridades, mas sim prová-las, comparando os diferentes materiais. Para isso, foram realizados ensaios de tração utilizando os equipamentos do Laboratório de Estruturas do campus Apucarana da UTFPR (Fotografia 1) e respeitando as diretrizes descritas na norma internacional ASTM D638, que define o método padrão para teste das propriedades à tração de plásticos rígidos e semi-rígidos (ASTM, 2014).

Fotografia 1 – Equipamento utilizado para ensaio de tração



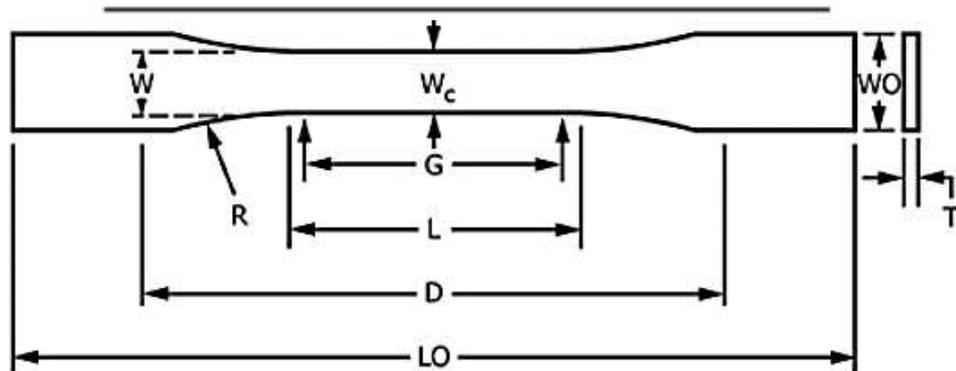
Fonte: Autoria própria (2021)

Para a realização dos ensaios de tração foram impressas 5 amostras para cada material testado, seguindo as dimensões do corpo de prova tipo I da norma

ASTM D638 (ASTM, 2014) (Figura 6). Nas Fotografias 2, 3 e 4 podem ser visualizados os corpos de prova durante e após o ensaio. É interessante observar as diferenças entre o rompimento do PLA (lilás) e do PETG (preto), assim como a grande capacidade de alongamento do TPU.

Figura 6 – Dimensões do corpo de prova Tipo I

Dimensões (ver desenho)	mm (pol.)
	Tipo I
W — Largura da seção estreita	13 (0.50)
L — Comprimento da seção estreita	57 (2.25)
W_0 —Largura geral, min	19 (0.75)
W_0 —Largura geral, min	...
L_0 — Comprimento total, min	165 (6.5)
G — Comprimento do centro	50 (2.00)
G — Comprimento do centro	...
D — Distância entre garras	115 (4.5)
R —Raio da transição	76 (3.00)
T —Espessura	3.2 (0.13)



Fonte: ASTM D638 (2014, traduzido e adaptado pelo autor)

Fotografia 2 – Ensaio de tração em corpos de prova de PLA



(a) Durante o ensaio



(b) Pós rompimento



(c) Amostras rompidas

Fonte: Autoria própria (2021)

Fotografia 3 – Ensaio de tração em corpos de prova de PETG



(a) Pós rompimento



(b) Amostras rompidas

Fonte: Autoria própria (2021)

Fotografia 4 – Ensaio de tração em corpos de prova de TPU



(a) Durante o ensaio

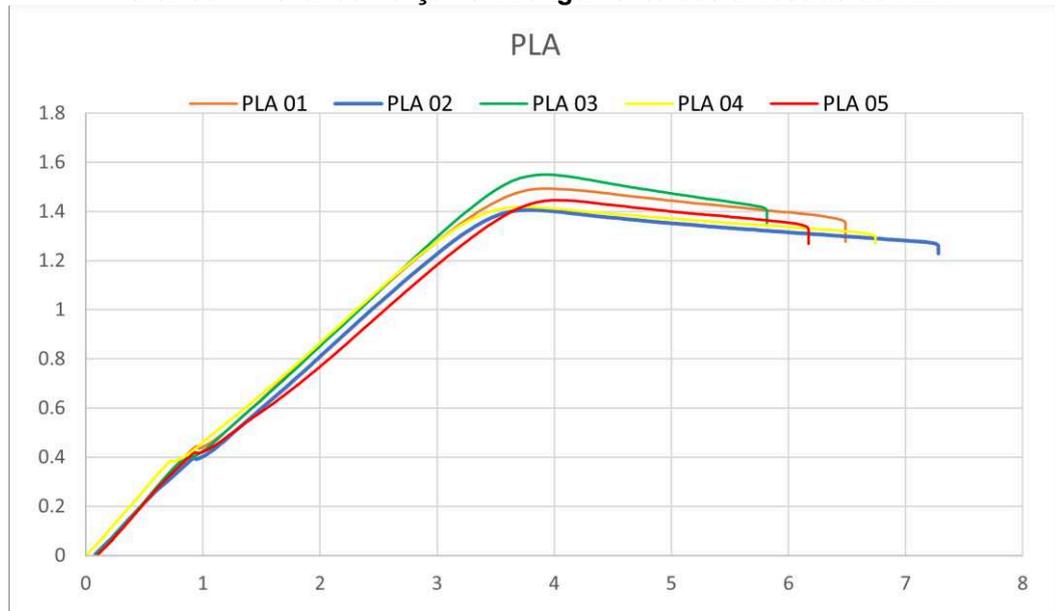


(b) Comparação entre corpo de prova pós e pré ensaio

Fonte: Autoria própria (2021)

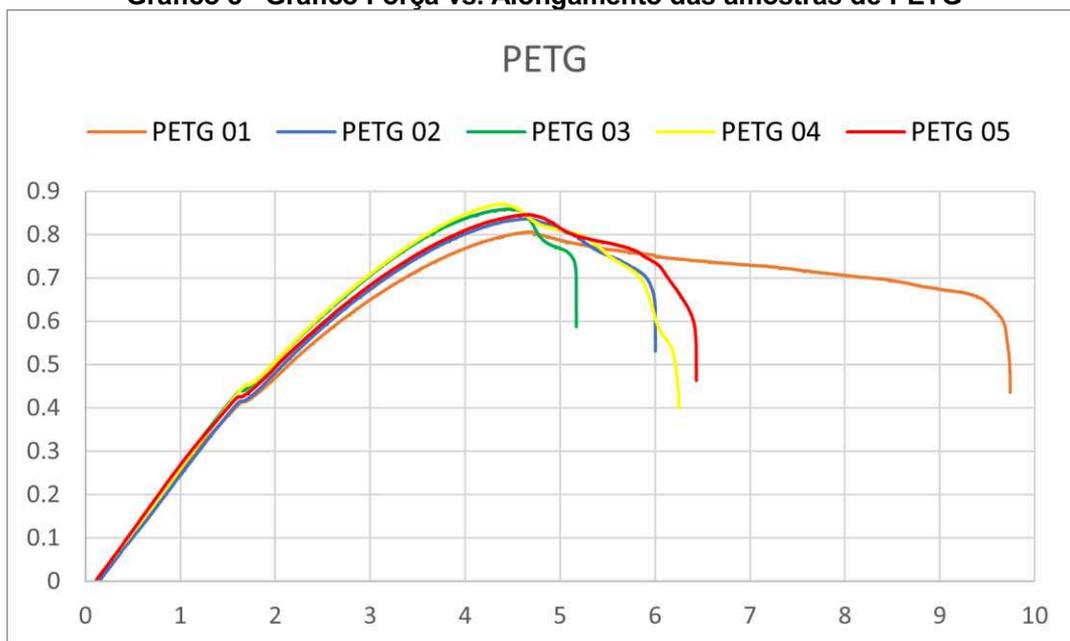
Os resultados registrados pelo equipamento de ensaio estão apresentados nos Gráficos 4, 5 e 6 sob a forma de gráficos Força vs. Alongamento. Nos gráficos, o eixo x apresenta a deformação real (em mm), enquanto o eixo y apresenta os valores de força real aplicada (em kN), sem a divisão pela área da seção inicial, que equivale a 41.6 mm² (13mm x 3,2mm) para os corpos de prova ensaiados.

Gráfico 4 – Gráfico Força vs. Alongamento das amostras de PLA



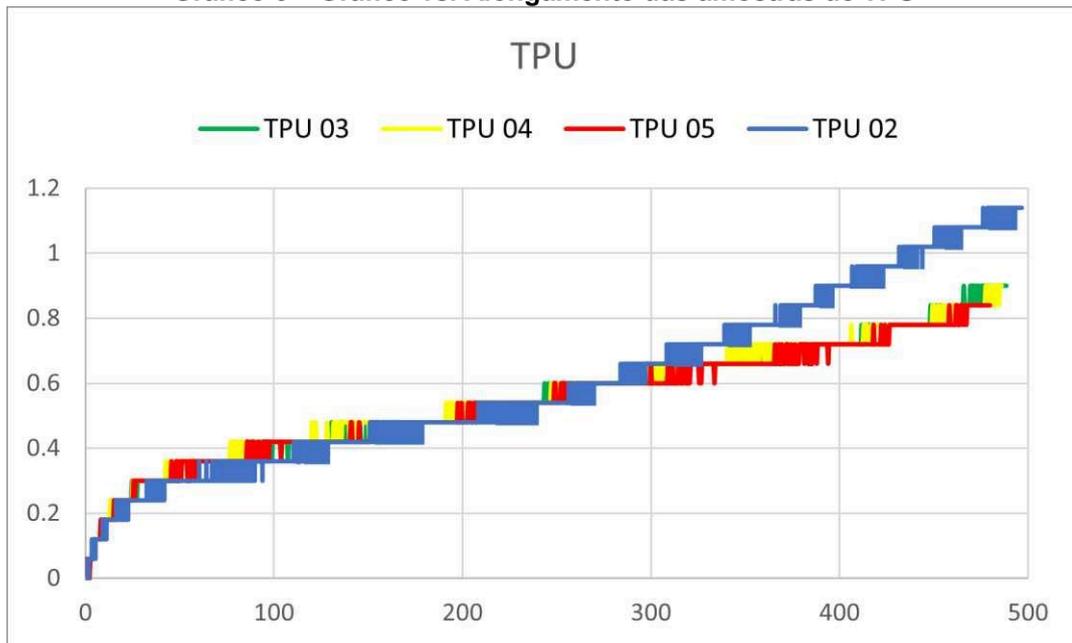
Fonte: Autoria própria (2023)

Gráfico 5 – Gráfico Força vs. Alongamento das amostras de PETG



Fonte: Autoria própria (2023)

Gráfico 6 – Gráfico vs. Alongamento das amostras de TPU



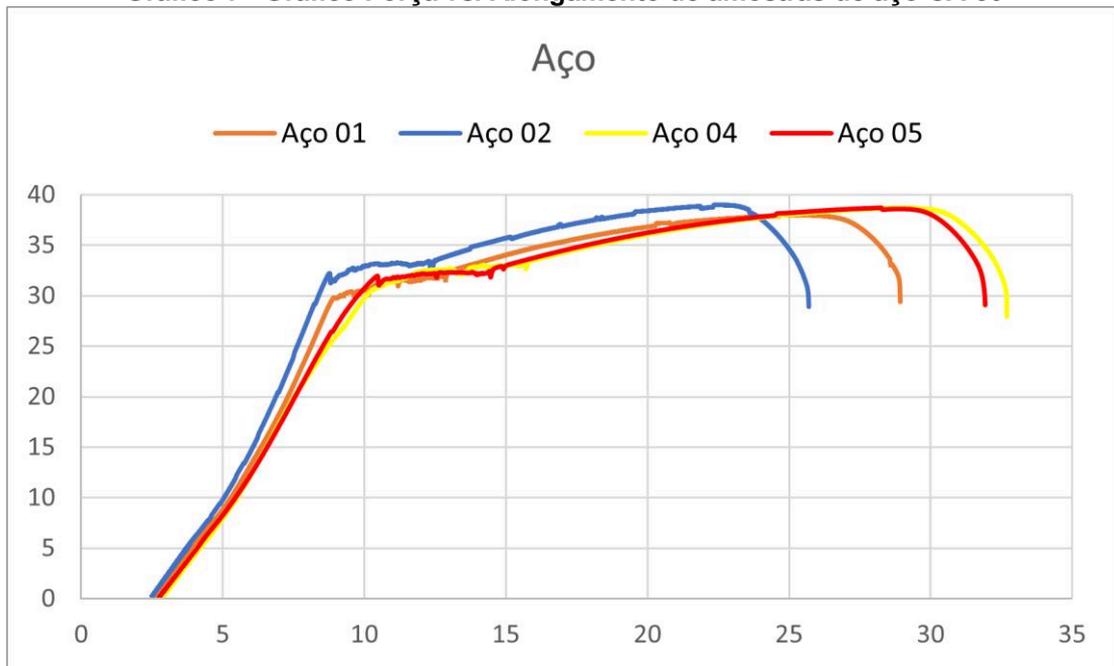
Fonte: Autoria própria (2023)

Uma análise visual rápida permite identificar resultados coerentes, tal que os valores das tensões de escoamento e de ruptura de todas as amostras foram razoavelmente próximos. No caso das amostras de PETG, a primeira amostra apresentou uma maior deformação antes da ruptura do que as demais, possivelmente por alguma diferença construtiva ocorrida durante o processo de impressão. Ainda assim, a força máxima suportada pela amostra foi próxima à das demais.

Já para o TPU, a análise não foi tão simples. As amostras se alongaram acima do limite suportado pela máquina de teste e, portanto, não foi possível rompê-las. Além disso, a calibração do equipamento durante os ensaios não permitiu a captura de um número grande de pontos, fazendo com que as curvas apresentassem um aspecto discretizado, na forma de “degraus”. Contudo, os resultados ainda são apresentáveis, pois é possível verificar uma tendência no comportamento do material, a qual é similar aos outros polímeros ensaiados.

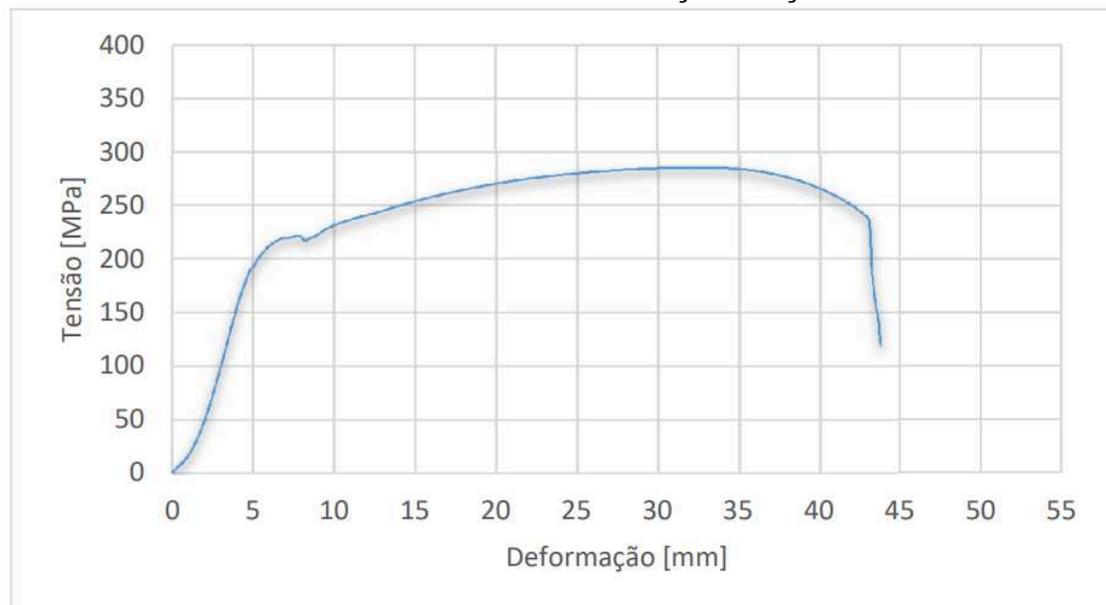
Para fins de comparação, foram realizados testes de tração em barras de aço CA-50, utilizadas como armadura em concreto armado. Os resultados dos ensaios são exibidos no Gráfico 7. Apresenta-se também o gráfico Tensão vs. Deformação típico de corpos de prova de aço estrutural ASTM A36 (Gráfico 8).

Gráfico 7– Gráfico Força vs. Alongamento de amostras de aço CA-50



Fonte: Autoria própria (2023)

Gráfico 8 – Gráfico Tensão vs. Deformação do aço ASTM A36



Fonte: CARMO (2018)

Observando-se os gráficos, é possível notar que o PLA e o PETG, assim como o aço, apresentam um comportamento elástico-linear até atingirem o escoamento e, em seguida, demonstram um comportamento plástico. Como diferença, pode-se notar que os polímeros não possuem um patamar de escoamento tão proeminente quanto o dos aços, exibindo um comportamento linear mesmo após entrar no regime plástico.

Outra comparação relevante é o parâmetro adimensional $\sqrt{\frac{E}{f_y}}$, que pode ser calculado com os dados obtidos nos gráficos. O módulo de elasticidade (E) pode ser calculado de acordo com o item 11.4 da norma ASTM D638 (ASTM, 2014), estendendo-se a parte linear inicial da curva Tensão vs. Deformação (de acordo com o anexo A1) e dividindo-se a diferença de tensão correspondente a qualquer segmento desta linha reta pela diferença de deformação. O módulo de elasticidade deve ser computado usando a área da seção transversal original do corpo de prova em seu centro (41,6mm²) e deve ser expresso em Pascal. A tensão de escoamento (fy), por sua vez, pode ser extraída diretamente do gráfico ao verificar o valor que precede a entrada em regime plástico do material, visualizando no gráfico o patamar de escoamento. Esses dados estão demonstrados na Tabela 1.

Tabela 1 – Dados obtidos a partir dos gráficos Força vs. Deformação

Material	Fy (kN)	Fu (kN)	fy (MPa)	fu (MPa)	ΔF (kN)	Δσ (Mpa)	Δdef. (mm/mm)	E (MPa)
PLA 01	0.445	1.493	10.70	35.89	0.23	5.53	0.0036	1522.92
PLA 02	0.3925	1.4065	9.44	33.81	0.28	6.79	0.0052	1304.19
PLA 03	0.3955	1.5505	9.51	37.27	0.26	6.33	0.0042	1520.09
PLA 04	0.3835	1.419	9.22	34.11	0.16	3.94	0.0026	1512.73
PLA 05	0.415	1.446	9.98	34.76	0.23	5.58	0.0038	1479.12
Média	0.4063	1.463	9.77	35.17	0.23	5.63	0.0039	1467.81
PETG 01	0.414	0.8065	9.95	19.39	0.24	5.83	0.0076	763.17
PETG 02	0.4165	0.837	10.01	20.12	0.30	7.13	0.0092	778.40
PETG 03	0.4215	0.859	10.13	20.65	0.26	6.14	0.0076	806.01
PETG 04	0.4505	0.8705	10.83	20.93	0.13	3.17	0.0040	795.52
PETG 05	0.415	0.847	9.98	20.36	0.15	3.50	0.0046	757.63
Média	0.4235	0.844	10.18	20.29	0.21	5.15	0.0066	780.15

Fonte: Autoria própria (2023)

Utilizando o valor médio dos parâmetros, a relação $\sqrt{\frac{E}{f_y}}$ para o PLA equivale a 12,25 e para o PETG é igual a 8,75. Já para o aço, usando os valores comumente adotados de 200 GPa para o módulo de elasticidade e 250 MPa para a tensão de escoamento, o parâmetro $\sqrt{\frac{E}{f_y}}$ resulta em torno de 28.28. Essa diferença entre valores deve ser levada em conta ao se calcular a esbelteza limite das peças dimensionadas.

2.5 Fenômenos e modos de falha a serem demonstrados

Os modos de falha apresentados a seguir foram agrupados com o intuito de serem exemplificados mediante o rompimento de peças de pequenas dimensões. O objetivo deste agrupamento é que as peças sejam compatíveis com um mecanismo que realize o esforço necessário para rompê-las, sem que seja necessário o uso de um equipamento diferente para a demonstração de cada modo de falha.

As peças são dimensionadas de forma a falharem segundo um mecanismo específico. O dimensionamento é baseado em adaptações dos equacionamentos presentes na ABNT NBR 8800 – *Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios* (ABNT, 2008), a fim de adequá-los a polímeros para aplicações didáticas. Além disso, foram desconsiderados os coeficientes de majoração de esforços e minoração das resistências previstos em norma, pois neste caso a falha é o resultado desejado.

2.5.1 Ligações

As ligações podem ser entendidas como uma forma de arranjo apto a unir dois ou mais elementos estruturais segundo um determinado grau de rigidez. Dentro do universo de classificações, elas podem diferir entre rígidas, flexíveis ou semirrígidas, a depender da rotação que são capazes de exibir.

De forma prática, as ligações rígidas devem limitar o giro relativo entre as peças conectadas a um valor máximo de 10% da sua capacidade de rotação; as ligações flexíveis precisam atingir pelo menos 80% da sua rotação prevista; ao passo que as ligações semirrígidas devem apresentar entre 20 e 90% da rotação de uma ligação perfeitamente flexível. Esses limites de rotação dependem tanto do número de parafusos utilizados quanto do comprimento das soldas, podendo também oscilar conforme a combinação dos dois ou ainda o uso ou não de travamentos por chapas ou cantoneiras (TESSARI, 2018).

Conforme a NBR 8800 (ABNT, 2008), uma ligação do tipo articulada (flexível) ou rígida é definida como:

Na análise estrutural elástica, uma ligação viga-pilar pode ser considerada rotulada se $S_i \leq 0,5 E I_v/L_v$ e pode ser considerada rígida se $S_i \geq 25 E I_v/L_v$ (ver 6.1.2.2), onde S_i é a rigidez da ligação, correspondente a 2/3 do momento resistente de cálculo da ligação, simplificada denominada rigidez

inicial, e I_v e I_v são o momento de inércia da seção transversal no plano da estrutura e o comprimento da viga conectada à ligação, respectivamente (ABNT, 2008, p. 63).

Essas classificações, por exigirem um grande nível de abstração dos alunos, são relevantes para serem demonstradas por modelos em escala e podem ser facilmente reproduzidas pelo processo de impressão 3D.

2.5.2 Modos de falha em ligações parafusadas

Para ligações parafusadas, pretende-se demonstrar os mecanismos de falha passíveis de ocorrer nas chapas de ligação.

2.5.2.1 Falha na chapa por pressão de contato (esmagamento e rasgamento)

Dentre os modos de falha de chapas de ligação, serão estudados aqueles provocados pela pressão de contato que se desenvolve em função do contato do corpo do parafuso com a borda dos furos executados na chapa. Na Equação (3), a resistência à pressão de contato é obtida pelo menor valor calculado entre a parcela da esquerda ou da direita.

$$F = 1,5 l_f . t . f_u \leq 3,0 d_b . t . f_u \quad (3)$$

Onde:

F é a força aplicada na peça;

l_f é a distância livre entre a borda do furo e a borda mais próxima na direção da força;

d_b é o diâmetro do parafuso;

t é a espessura da peça;

f_u é a resistência de ruptura do polímero (quando impresso na orientação correta para evitar o rompimento nas camadas).

Este equacionamento será usado para garantir que, em um protótipo de chapa com dois furos, seja possível verificar o esmagamento em um deles e o rasgamento no outro.

2.5.3 Modos de falha de peças tracionadas

As falhas em peças estruturais decorrentes de esforços de tração podem ocorrer tanto na região da ligação quanto ao longo do elemento. A seguir, são descritos os modos que se almeja demonstrar.

2.5.3.1 Escoamento da seção bruta

$$F = A_g \cdot f_y \quad (5)$$

Onde:

F é a força máxima resistida pela peça longe da região da ligação;

A_g é a área bruta da seção transversal da peça tracionada;

f_y é a tensão de escoamento do material da peça tracionada.

2.5.3.2 Ruptura da seção líquida

$$F = A_e \cdot f_u \quad (6)$$

Onde:

F é a força máxima resistida pela peça na região de ligação;

f_u é a tensão de ruptura do material base;

A_e é a área líquida efetiva da seção transversal na ligação, dada por:

$$A_e = A_n \cdot C_t \quad (7)$$

onde C_t é o coeficiente de redução da área líquida e A_n corresponde à área líquida da seção transversal na ligação. No caso de ligações soldadas, A_e = A_n. Em ligações parafusadas, deve-se descontar a área dos furos realizados na chapa, ou seja:

$$A_n = A_g - n_f \cdot d_f \cdot t + \left[\sum \left(\frac{s^2}{4g} \right) \right] \quad (8)$$

Onde:

A_g é a área bruta da seção transversal;

Nf é o número de furos alinhados interceptados pela seção de corte na região da ligação;

df é o diâmetro do furo;

t é a espessura da chapa;

s é a distância entre dois furos desalinhados, medida na direção do esforço aplicado à peça;

g é a distância entre dois furos desalinhados, medida ortogonalmente à direção do esforço.

Na Equação (8), o coeficiente de redução C_t considera a concentração de tensões no material em função da geometria da ligação e dos elementos conectados.

2.5.3.3 Rasgamento (cisalhamento em bloco)

Como descrito pela ABNT NBR 8800:2008, o estado-limite quanto ao rasgamento deve ser verificado em casos similares àqueles representados na Figura 7 (a). A resistência a esse tipo de colapso deve ser calculada pela soma da resistência ao cisalhamento de uma ou mais linhas de falha com a resistência à tração em um segmento perpendicular, formando um “bloco”, como exemplificado nas hachuras da Figura 7 (a). A resistência de elementos tracionados a este modo de falha é dada por meio da expressão:

$$F = (0,6 \cdot f_u \cdot A_{nv} + C_{ts} \cdot f_u \cdot A_{nt}) \leq (0,6 \cdot f_y \cdot A_{gv} + C_{ts} \cdot f_u \cdot A_{nt}) \quad (9)$$

Onde:

Agv é a área bruta sujeita a cisalhamento;

Anv é a área líquida sujeita a cisalhamento;

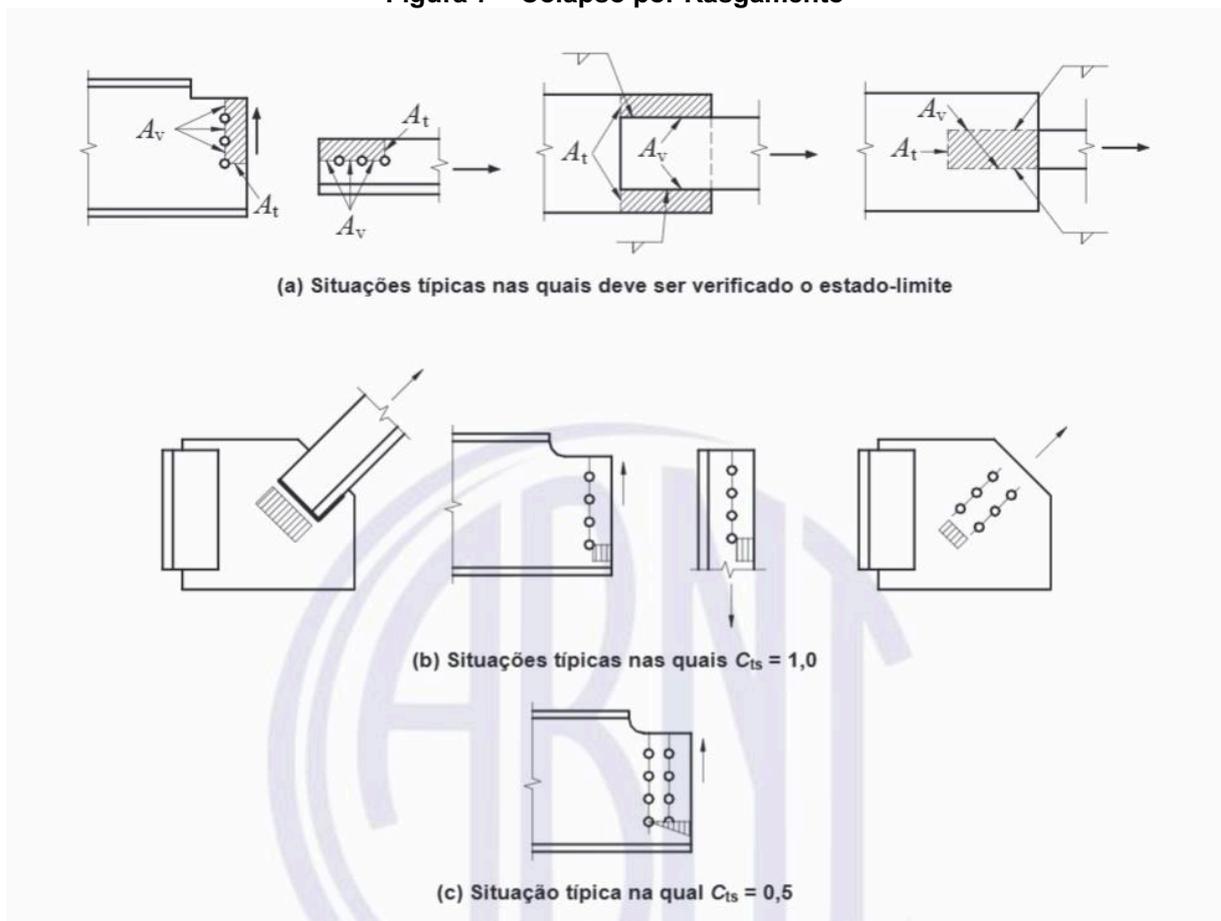
Ant é a área líquida sujeita a tração;

fu é a tensão de ruptura do material;

fy é a tensão de escoamento do material;

Cts é igual a 1,0 quando a tensão de tração na área líquida for uniforme, e igual a 0,5 quando for não-uniforme (conforme ilustrado na Figura 7 (b) e (c)).

Figura 7 – Colapso por Rasgamento



Fonte: ABNT Figura 18 NBR 8800. Pg. 88 (2008)

2.5.4 Ligações soldadas

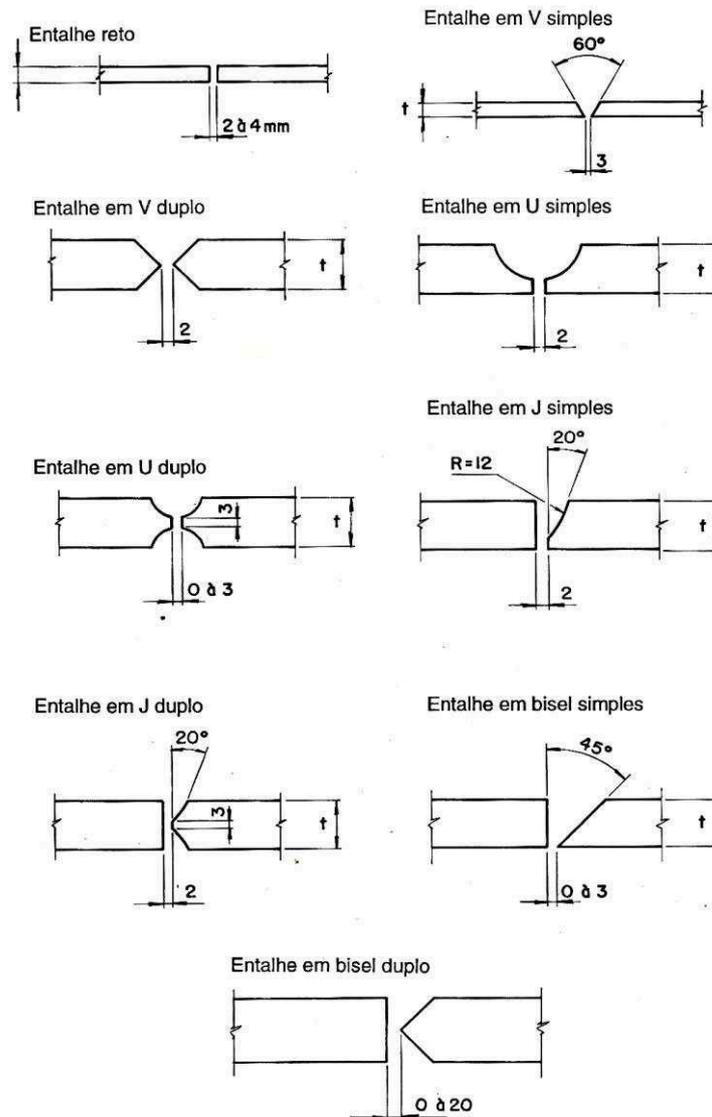
Também serão demonstradas ligações soldadas, porém o foco para esse tipo de ligação será mais sua geometria e diferenciar os diferentes tipos e condições em que as soldas podem ser realizadas.

De acordo com Bellei (1994), as soldas podem ser classificadas quanto à sua posição em planas, horizontais, verticais e sobre cabeça; e quanto ao seu tipo, sendo filete, entalhe ou chanfro, ranhura e tampão. O tipo mais utilizado é a solda de filete, pois é mais econômica e demanda pouca preparação do material, enquanto a solda de entalhe (parcial ou total) é usada para cargas de maior intensidade. Soldas de ranhura ou tampão são usadas em casos especiais, quando os outros tipos não são práticos de serem aplicados.

A Figura 8 ilustra os principais tipos de entalhe para soldagem de peças e a Figura 9 apresenta a geometria de soldas de entalhe e filete, com sua respectiva nomenclatura utilizada. Como estes conceitos são referentes a parâmetros geométricos, é de mais fácil entendimento visualizar os diferentes tipos de solda em

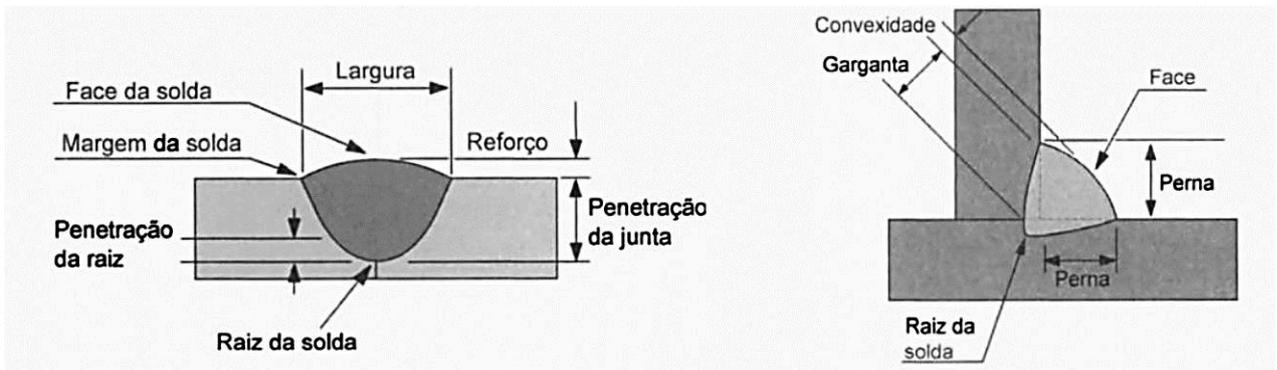
imagens do que em explicações textuais. E, como ressaltado no presente trabalho, torna-se ainda mais fácil o entendimento com o uso de modelos em escala que exemplifiquem esses tipos mencionados.

Figura 8 – Tipos de entalhes para solda de penetração parcial ou total



Fonte: BELLEI (1994)

Figura 9 – Geometria de soldas de entalhe e filete



Fonte: MARQUES, *et al.* (2009)

2.5.5 Instabilidade de peças comprimidas

O fenômeno a ser representado consiste nos modos de falhas ocasionados por esforços de compressão.

2.5.5.1 Flambagem global

Para calcular a força axial resistente de cálculo à flambagem global, utiliza-se a seguinte equação:

$$N_{CR} = \chi \cdot Q \cdot A_g \cdot f_y \quad (10)$$

Onde:

N_{CR} é a força axial resistente de compressão;

Q é o fator de redução total associado à flambagem local;

χ é o fator de redução associado à flambagem global;

f_y é a tensão de escoamento do material;

A_g é a área bruta da seção transversal.

O fator de redução χ pode ser calculado como $\chi = 0,658^{\lambda_0^2}$ para $\lambda_0 \leq 1,5$; ou como $\chi = \frac{0,877}{\lambda_0^2}$ para $\lambda_0 > 1,5$; onde λ_0 é o índice de esbeltez reduzido, calculado por:

$$N = \sqrt{\frac{Q \cdot A_g \cdot f_y}{N_e}} \quad (11)$$

Onde:

N_e é a força axial de flambagem elástica;

A força axial de flambagem é calculada para cada eixo (x, y e z) do elemento sujeito à compressão. Por ser o modo de falha mais simples de ser demonstrado com modelos didáticos, será equacionada apenas a força axial de flambagem elástica para barras com dupla simetria ou simetria em relação a um ponto. Nestes casos, a força elástica de flambagem ao redor dos eixos x e y é dada por:

$$N = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{(K \cdot L)^2} \quad (12)$$

Onde:

N é a força axial de flambagem;

E é o módulo de elasticidade do material;

I é o momento de inércia da seção transversal (relacionado a um eixo);

K é o coeficiente de flambagem (relacionado a um eixo);

L é o comprimento destravado do elemento.

- **Coeficiente de flambagem:**

A NBR 8800 (ABNT, 2008) define valores distintos de coeficiente de flambagem a depender da condição de vinculação das peças comprimidas. Os valores recomendados por norma encontram-se em sua Tabela E.1, a qual é parcialmente reproduzida na Figura 10. As imagens apresentadas são consideravelmente intuitivas, de modo que seguir sua organização facilita a integração entre o conceito e o modelo físico.

Figura 10 – Coeficientes de flambagem por flexão de elementos isolados

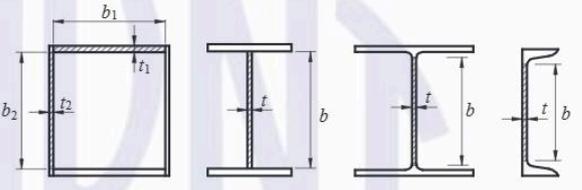
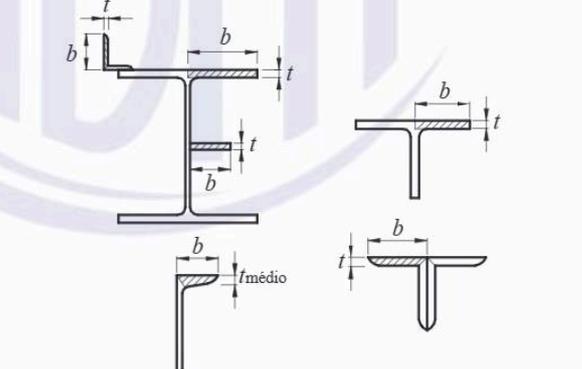
	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)
A linha tracejada indica a linha elástica de flambagem						
Valores teóricos de K_x ou K_y	0,5	0,7	1,0	1,0	2,0	2,0
Valores recomendados	0,65	0,80	1,2	1,0	2,1	2,0
Código para condição de apoio	<ul style="list-style-type: none"> Rotação e translação impedidas Rotação livre, translação impedida Rotação impedida, translação livre Rotação e translação livres 					

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

2.5.5.2 Flambagem local

Para verificar a ocorrência de flambagem local, deve-se calcular a relação (b/t) de cada elemento que compõe um perfil e então compará-la com o valor $(b/t)_{lim}$ presente na Tabela F.1 da NBR 8800 (ABNT, 2008), adaptada na Figura 11. Dependendo da relação obtida entre esses dois valores e da classificação do elemento – AA (duas bordas longitudinais vinculadas) ou AL (apenas uma borda vinculada) –, pode-se calcular o fator Q, que consiste em um fator de redução na resistência da peça em virtude da susceptibilidade à flambagem local.

Figura 11 – Grupos 2 e 4 da Tabela F.1 da ABNT NBR 8800:2008

2	<ul style="list-style-type: none"> — Almas de seções I, H ou U — Mesas ou almas de seção-caixão — Todos os demais elementos que não integram o Grupo 1 		$1,49 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$
4	<ul style="list-style-type: none"> — Mesas de seções I, H, T ou U laminadas — Abas de cantoneiras ligadas continuamente ou projetadas de seções I, H, T ou U laminadas ou soldadas — Chapas projetadas de seções I, H, T ou U laminadas ou soldadas 		$0,56 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$

Fonte: Adaptado de NBR 8800 (ABNT, 2008)

Os grupos 2 (AA) e 4 (AL) representam a alma e mesa de seções I laminadas, as quais foram escolhidas para se exemplificar esse modo de falha, pois são comumente usadas em estruturas metálicas. A última coluna representa a esbelteza limite, $(b/t)_{lim}$, utilizada para o cálculo do fator de redução Q. Neste ponto pode-se observar a importância da comparação entre o fator $\sqrt{\frac{E}{f_y}}$ dos polímeros e do aço realizada na Seção 2.4. Decidiu-se utilizar os valores calculados durante os ensaios para o dimensionamento dos protótipos a fim de demonstrar a flambagem local da mesa e da alma.

Uma vez calculada a esbelteza de cada elemento (ou parte) que compõe um perfil de aço, o fator Q pode ser calculado como:

$$Q = Q_s \cdot Q_a \quad (13)$$

Onde:

Q é o fator de redução total associado à flambagem local;

Q_s é o fator de redução relacionado a elementos AL;

Q_a é o fator de redução relacionado a elementos AA.

Para elementos AL do grupo 4 da tabela F.1, tem-se:

$$Q_s = 1,415 - 0,74 \cdot \frac{b}{t} \cdot \sqrt{\frac{f_y}{E}} \quad \text{para } 0,56 \sqrt{\frac{E}{f_y}} < \frac{b}{t} \leq 1,03 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (14)$$

$$Q_s = \frac{0,69 \cdot E}{f_y \cdot \left(\frac{b}{t}\right)^2} - 0,74 \cdot \frac{b}{t} \cdot \sqrt{\frac{f_y}{E}} \quad \text{para } \frac{b}{t} > 1,03 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (15)$$

Onde:

E é o módulo de elasticidade do material;

f_y é a tensão de escoamento do material;

b, t são as dimensões indicadas na Figura 11.

Para elementos comprimidos AA do grupo 2 da tabela F.1, tem-se:

$$Q_a = \frac{A_{ef}}{A_g} \quad (16)$$

Onde:

A_{ef} é a área efetiva da seção transversal;

A_g é a área bruta da seção transversal;

A_{ef} é calculado como $A_{ef} = A_g - \sum(b - b_{ef})t$, com b e t sendo a largura e espessura de um elemento comprimido AA e **b_{ef}** é a largura efetiva, calculada de forma conservadora como:

$$b_{ef} = 1,92 \cdot t \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} \left[1 - \frac{0,34}{b/t} \sqrt{\frac{E}{f_y}} \right] \leq b \quad (17)$$

Para a demonstração desses fenômenos, deve ser escolhida uma geometria para a alma e para a mesa que resulte em um valor de Q inferior a 1, afetando assim a resistência global da peça. Em tese, a falha local se manifestará primeiramente no elemento que apresentar menor valor (AA ou AL), porém é possível demonstrar a falha nas outras partes do perfil aplicando travamentos. Com isso, é possível variar a carga crítica de falha da mesa e da alma.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Os recursos utilizados para o desenvolvimento do trabalho foram escolhidos com base em sua disponibilidade e facilidade de utilização. Antes de iniciar o processo de idealização e modelagem dos protótipos é necessário conhecer os materiais disponíveis, de forma a definir parâmetros de impressão e dimensões máximas e mínimas que serão utilizadas.

3.1 Materiais

3.1.1 Impressora 3D

Para a confecção dos protótipos será utilizada uma impressora 3D *ANYCUBIC Mega S* (Imagem 1), cujas especificações estão apresentadas no Quadro 01.

Imagem 1 – Impressora *Anycubic Mega S*



Fonte: *ANYCUBIC* (2022)

Quadro 1 – Especificações Técnicas *Anycubic Mega S*

Especificações Técnicas	
<ul style="list-style-type: none"> · Tecnologia de impressão: FDM (Fused Deposition Modeling) · Grande volume de construção: 210 x 210 x 205 mm · Precisão de Posicionamento: X/Y 0,0125mm Z 0,002mm · Materiais de impressão suportados: TPU, PLA, ABS, HIPS, Madeira · Estrutura metálica sólida totalmente rígida e estabilidade superior · Impressão precisa e de alta qualidade com resolução de camada de até 50 microns 	<ul style="list-style-type: none"> · Ultrabase para excelente adesão e fácil remoção de peças · Retorno automático de impressão em caso de queda de energia · Extrusão Titan de alta qualidade para imprimir filamentos flexíveis · Suporte de Carretel Suspenso (Filamento) · Formatos de entrada: .STL, .OBJ, .DAE, .AMF · Temperatura ambiente de operação: 8°C - 40°C · Conectividade por Cartão SD e porta USB (somente usuários experientes) · Peso do pacote: 16,5 kg

Fonte: *ANYCUBIC*. (2022, tradução do autor)

A partir das informações obtidas no site do fabricante, sabe-se que as dimensões máximas de impressão são de aproximadamente 200mm por peça. De forma a otimizar os trabalhos de impressão, as peças modeladas devem ser menores que este valor ou então devem ser divididas em partes.

Os limites de precisão também são descritos pelo fabricante: para o equipamento em questão, a precisão posicional é de 0,0125 mm para os eixos X e Y; e de 0,002 mm para o eixo Z. A resolução de camada de até 50 microns define um parâmetro mínimo de configuração de espessura de camada em uma etapa posterior do processo, durante a utilização do *software* fatiador.

A escolha do modelo da impressora é fundamental para saber quais as opções de material com que ela trabalha. Em virtude do conhecimento das diferentes opções, abre-se um maior leque de características que podem ser exploradas ao se demonstrar os modos de falha, como diferentes propriedades físicas, cores e texturas.

3.1.2 Polímeros

Sabendo-se o tipo de material suportado por cada impressora, que, no caso desta pesquisa, são os indicados no Quadro 1, deve-se verificar a espessura do filamento e bocal utilizado, para garantir a compatibilidade dimensional. Estas dimensões são limitadas pelo diâmetro da rosca do bocal, espessura do tubo de teflon, tamanho do extrusor etc. Também do Quadro 1, verifica-se que a impressora usada é compatível com a espessura padrão comumente utilizada para filamentos, de 1,75mm, e vem equipada com um bocal de 0,4mm, que pode ser trocado, caso seja necessário, por outro com diferente diâmetro de abertura desde que seja de um modelo compatível com o *hotend* E3D V5 com rosca M6.

De acordo com o custo e disponibilidade, foram adquiridos os filamentos Flex (TPU), PETG XT e PLA *EasyFill* da marca *3DFila*, cujas características foram retiradas do site da fabricante. Além destes, também foram comprados os filamentos Flex (TPU) e PLA da marca *3DLab*. As informações disponibilizadas pelos fabricantes foram compiladas na Tabela 2.

Tabela 2 – Características dos materiais adquiridos

Características fornecidas pelos fabricantes dos materiais						
Ensaio - ASTM D792, ASTM D3418, ASTM D882, ASTM D790, ASTM D412						
Material/Fabricante	PLA Basic 3DFila	PLA Easyfill 3DFila	PETG 3DFila	Flexível 3DFila	PLA 3DLAB	Flex 3DLAB
Densidade (g/cm ³)	1.24	1.25	1.27	1.25	1.24	1.23
Temperatura de Fusão (°C)	190	185	240	230	165-180	220-250
Resistência à Flexão/Tração (Mpa)	130	115	73	-	50 (Tração)	37 (Tração)
Módulo de Elasticidade (Mpa)	4350	3830	2100	110	2315	120
Ensaio de Tração - ASTM D638 - Corpo de Prova Impresso 3D						
Alongamento (%)	3.7	5.45	7.74	-	3.69	-
Módulo de Elasticidade (Mpa)	1848.5	1697.8	1102.7	110	1896	120
Tensão de Escoamento (Mpa)	24.8	22.6	18.9	-	24.8	-
Tensão de Ruptura (Mpa)	46	42	33.8	-	46	-
Ensaio de Dureza - ASTM 2240 - Corpo de Prova Impresso 3D						
Dureza Shore (Shore D)	85	80	105	55	85	58

Fonte: 3D FILA (2022), 3D LAB (2018)

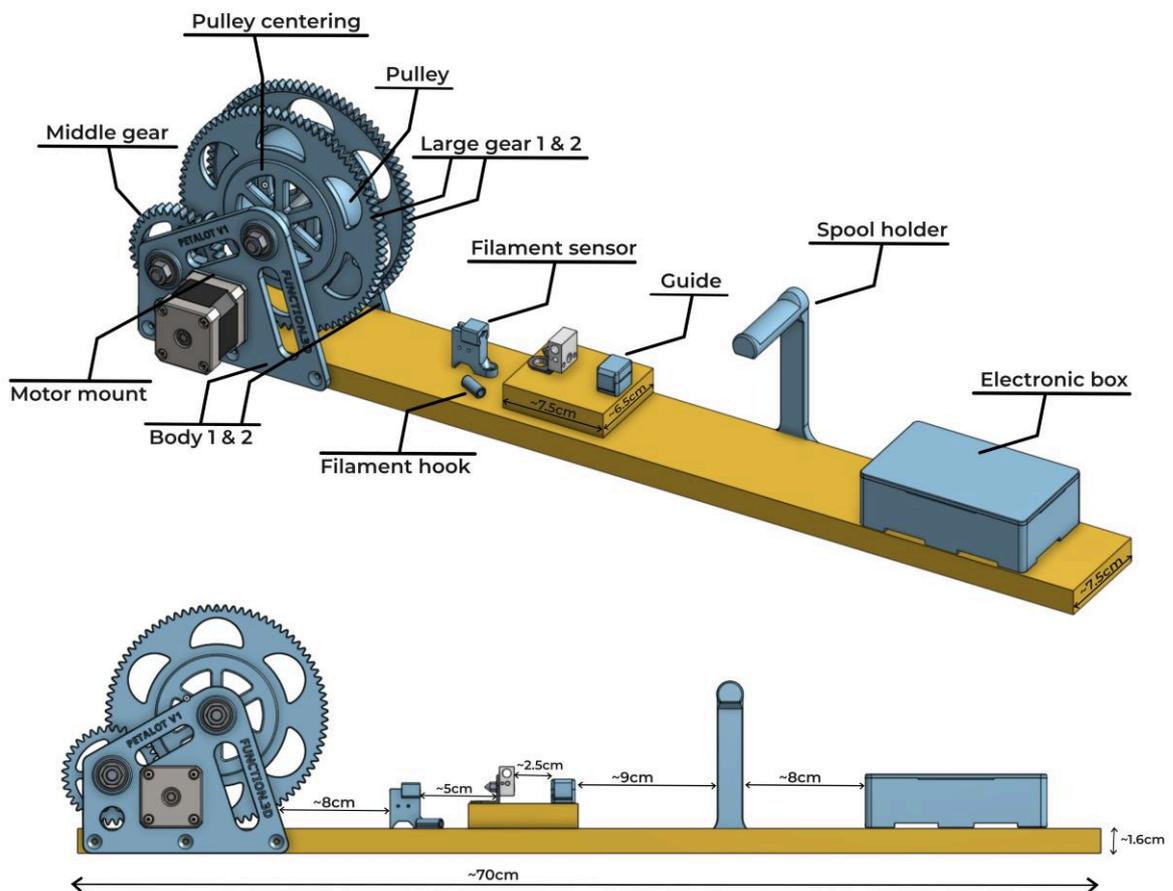
A comparação realizada entre os polímeros adquiridos e o comportamento do aço feita na seção 2.4 também foi impactante na escolha de quais materiais seriam utilizados para cada modelo produzido. Os valores obtidos pelos ensaios próprios apresentam diferenças entre a tabela do fabricante, possivelmente por uma produção mais rápida dos corpos de prova a serem testados, o que pode ter gerado um corpo de prova menos resistente. Todavia, os valores se mantiveram coerentes entre si.

Outro fator importante a ser destacado é a sustentabilidade dos plásticos utilizados, considerando a crescente preocupação com o meio-ambiente. O PLA é um material produzido a partir de matéria prima vegetal, como o milho, cana de açúcar ou café, e por isso é biodegradável e renovável, diferentemente de derivados do petróleo. Sua maior desvantagem é a dificuldade de fabricação, necessitando ser importado de países como Estados Unidos, Japão e Tailândia, o que por sua vez pode acabar causando escassez no mercado (3D Fila, 2022). Segundo Zee e Molenveld (2020), produtos feitos de ácido polilático (PLA) submetidos a um ciclo de compostagem de 11 dias já não podiam ser recuperados, desintegrando mais rápido do que cascas de laranja e papel, por exemplo.

Já o PETG, resultante da adição de glicol ao PET, apesar de não ser biodegradável, é reciclável como o próprio PET e pode ser “quebrado” de volta a seus componentes originais, reduzindo significativamente o impacto ambiental de sua produção. Além disso, aproveitando-se da própria cultura de faça você mesmo, inerente à tecnologia de impressão 3D, muitos projetos de reciclagem de PET

surgiram nos últimos anos, permitindo transformar garrafas PET usadas em filamento que pode ser usado na impressora 3D. Como exemplo, cita-se o projeto *Petalot*, disponibilizado gratuitamente no site *GitHub* pelo usuário *function3d*, com os arquivos e instruções de montagem. O Esquema 1 exemplifica como fica a aparência desse projeto quando concluído.

Esquema 1 – Esquema do projeto Petalot



Fonte: *FUNCTION3D* (2017)

Esses projetos de reciclagem tornam a impressão 3D um processo muito mais sustentável, favorecendo a escolha pelo uso desses materiais na produção de peças como as desta pesquisa.

3.1.3 Softwares

Durante o processo de impressão são necessários softwares de modelagem e fatiadores. Devido à falta de experiência do autor no início deste projeto, foram testadas algumas alternativas antes da opção final.

3.1.3.1 Modelagem

Foram testados os *softwares 3DBuilder*, disponível na biblioteca de aplicativos da *Microsoft*; *Blender*, *software* gratuito usado no *design* de jogos e peças artísticas; *Fusion 3D*, disponibilizado em versão para navegador pela *Autodesk*; *ArchiCAD*, *software BIM* de arquitetura; *Inventor*, também da *Autodesk*, mais focado ao *design* de peças mecânicas; e *Netfabb*, *software* específico da *Autodesk* para manufatura aditiva que integra opções de modelagem e fatiador em mesmo programa. Devido à maior experiência em sua utilização, facilidade de controle dimensional e uma grande variedade de opções de modelagem em 3D, o *software* escolhido após os testes foi o *AutoCAD*, versão educacional.

3.1.3.2 Fatiadores

A escolha dos fatiadores foi mais simples em comparação aos programas de modelagem. As opções testadas foram o *PrusaSlicer*, desenvolvido pela *Prusa* (marca de impressoras e produtos 3D); e o *Cura*, desenvolvido pela *Ultimaker* (também uma marca de impressoras e produtos 3D). A opção pelo *Cura* foi justificada pela preferência do usuário, com uma interface mais intuitiva para iniciantes na área, além de apresentar resultados melhores em impressões teste.

3.2 Métodos

3.2.1 Concepção dos modelos

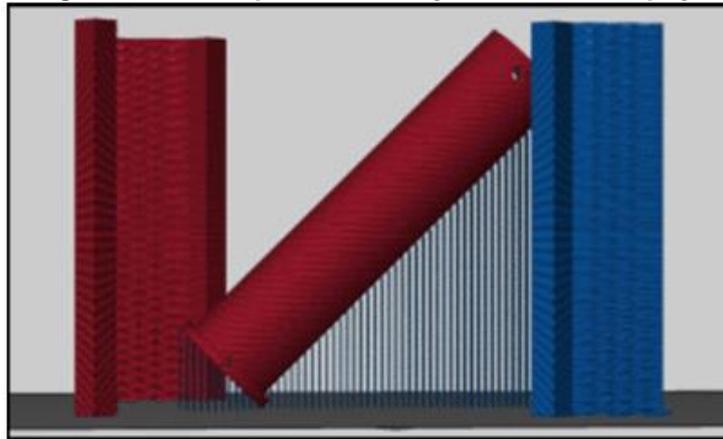
Como o objetivo da produção dos modelos é o de serem utilizados para ministrar aulas da disciplina de Construções em Aço e, por sua vez, o intuito das aulas é o de preparar os alunos para atuarem no mercado de trabalho, os modos de falha previstos, equacionamentos necessários e considerações adotadas estão todos de acordo com a norma NBR 8800 (ABNT, 2008).

3.2.1.1 Dimensões, limites e ergonomia

Para a idealização dos modelos, deve-se levar em conta os limites da impressora 3D. Seguindo recomendações de meios informais de referência, como vídeos, tutoriais e fóruns consultados durante a pesquisa, devem ser evitados ângulos muito agudos e partes que necessitem suporte para serem impressas, a fim de evitar superfícies irregulares e gastos extras de material (Figura 12). A otimização da

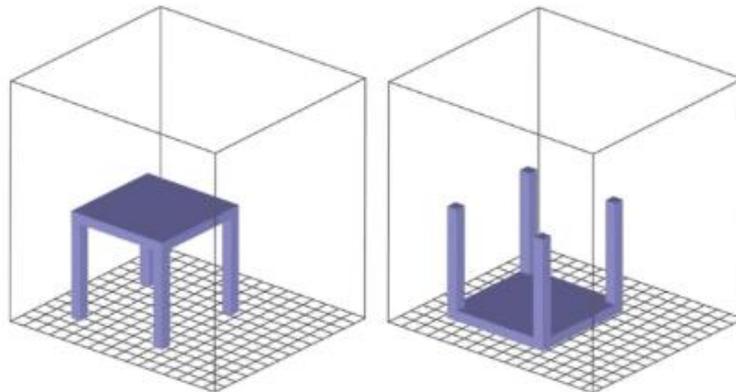
orientação da peça na mesa da impressora, como exemplificado pela Figura 13, permite eliminar o uso de suportes apenas mudando a orientação da peça.

Figura 12 – Exemplo de orientação não ideal de peça



Fonte: 3D LAB (2018)

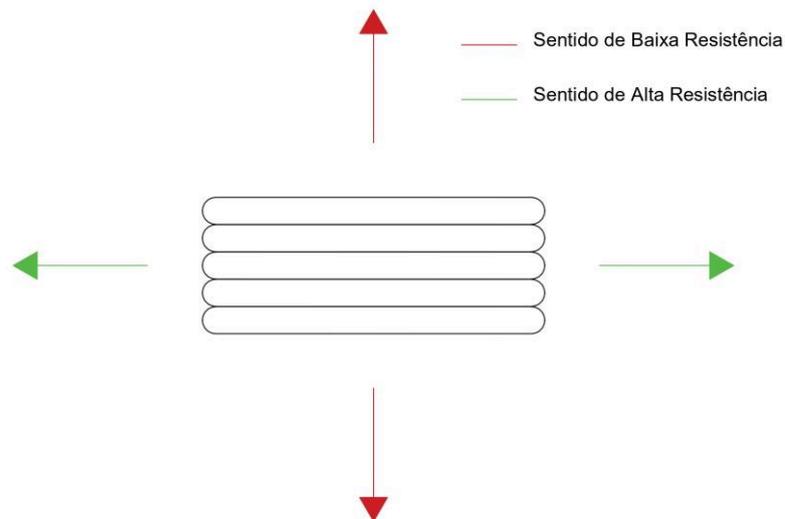
Figura 13 – Exemplo de orientação de peças na mesa de impressão



Fonte: 3D LAB (2018)

Durante a elaboração dos protótipos também é importante considerar a orientação das camadas em relação aos esforços solicitantes de cada peça (Figura 14), sendo preferível evitar esforços de tração perpendiculares ao sentido das camadas. Isso evita que erros de adesão entre camadas sejam evidenciados e garante que a peça resista aos esforços necessários.

Figura 14 – Resistência em relação ao sentido das camadas



Fonte: Adaptado de 3D LAB (2018)

Outro fator a ser considerado é o *design*, levando em consideração opções estéticas (ângulos, texturas e cores) e as proporções necessárias com o propósito de assegurar o conforto do usuário. Foi utilizado o guia de ergonomia de Dreyfuss e Tilley (1993) para garantir que as dimensões adotadas então dentro do intervalo adequado para utilização humana.

As orientações e dimensões descritas nesta seção foram consideradas e aprimoradas durante toda a concepção dos protótipos, tanto prevenindo possíveis erros quanto corrigindo erros cometidos.

3.2.2 Modelo de tração

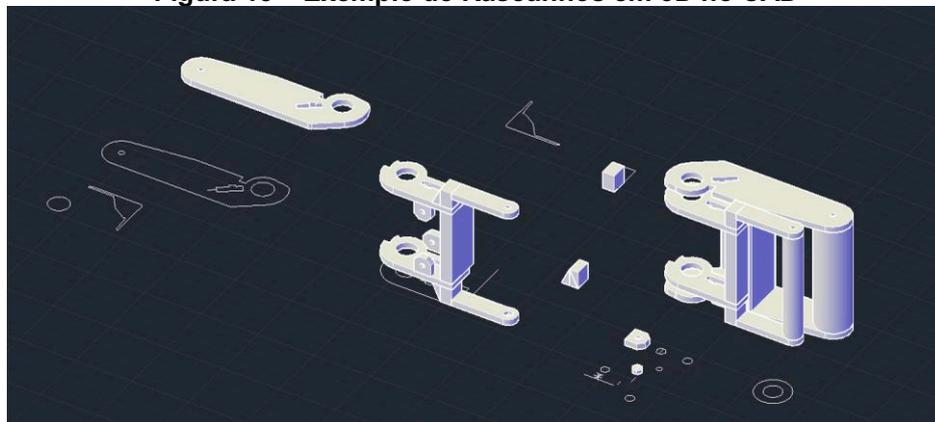
A ideia inicial para demonstrar os modos de falha decorrentes de esforços normais de tração é dimensionar peças de pequenas dimensões que possam ser rompidas. Para isso, é desejável a confecção de um mecanismo que possibilite realizar estes rompimentos em sala de aula sem grandes esforços e gastos de materiais, além de manter um baixo grau de complexidade em sua produção.

Ponderando sobre as opções de mecanismos que apliquem esforços de tração em peças e não sejam muito complexos, decidiu-se adaptar uma catraca manual com cinta, comumente usada para amarração de carga. Para entender o funcionamento do mecanismo, primeiramente foi impresso um modelo disponibilizado no repositório *Thingiverse* pelo usuário Guaffo (Imagem 2).

Imagem 2 – Catraca de Fita disponibilizado

Fonte: Thingiverse (2022)

Após conferir o funcionamento, viabilidade da impressão e possíveis problemas, decidiu-se modelar um protótipo próprio desde o início ao invés de adaptar o modelo de Guaffo, mantendo-o apenas como inspiração. Na Figura 15 são exibidos rascunhos da modelagem. Foram rascunhados muitos modelos conforme eram encontrados problemas, erros e preferências de *design*.

Figura 15 – Exemplo de Rascunhos em 3D no CAD

Fonte: Autoria própria (2022)

Porém, após testes com o modelo impresso, considerando a quantidade de material e as dimensões necessárias para garantir uma resistência adequada do mecanismo, optou-se por utilizar uma catraca metálica vendida comercialmente, pois resulta em um *design* mais compacto e de valor semelhante ao da impressão de uma catraca própria, além de manter a facilidade de acesso ao material, que pode ser encontrado no país todo. Foi então adquirido um *kit* catraca pequeno da marca *Itacorda*, do qual substituiu-se a fita original de *nylon* por outra de algodão. A substituição foi necessária em virtude de a fita de *nylon* original não poder ser furada

com ilhoses para criar o encaixe da “fivela” onde a peça a ser rompida será fixada durante os testes em aula. Além disso, foi invertido o sentido de giro das engrenagens da catraca, para que a força seja aplicada ao fechá-la e não ao abri-la. Dessa forma, o apoio do mecanismo em uma mesa torna-se simples, facilitando sua utilização em sala de aula.

Então, foi modelada uma peça de fixação onde a catraca e a peça a ser rompida foram parafusadas, mantendo tudo o mais nivelado o possível, evitando excentricidades na aplicação dos esforços. Como a peça está sujeita à flexão devido à força da catraca ser aplicada 30mm acima do nível da base, algumas considerações precisaram ser feitas durante a modelagem, como o reforço da base ao aumentar a sua altura e um sulco central em forma de arco visando a economia de material e a facilidade de impressão.

Os parafusos usados são todos do tipo Allen, pois podem ser colocados e removidos com uma chave que pode ser guardada junto da peça. Para facilitar o uso dos modelos, foi adicionado um compartimento para armazenamento dos parafusos e das respectivas chaves.

Ainda que de menor intensidade, é necessária a aplicação uma força para a abertura a catraca, o que, por sua vez, faz necessário o usuário segurar a peça de forma a evitar sua suspensão. Para contornar isso, foram adicionadas ventosas na base da peça que a manterão fixa à mesa durante a demonstração em sala de aula.

Com a catraca e a base prontas, o próximo passo no desenvolvimento da demonstração foi calcular as ligações de forma a romperem da maneira desejada, usando as fórmulas descritas no referencial teórico e as propriedades dos materiais obtidas em laboratório. Com o auxílio do *software MathCad*, foram dimensionadas as peças a serem rompidas.

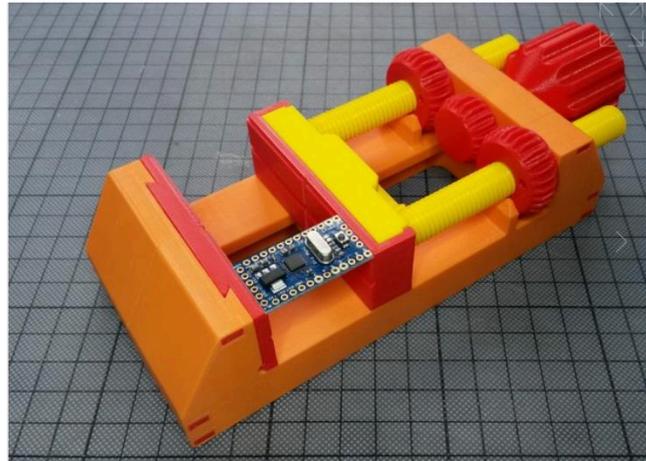
As dimensões e materiais escolhidos para cada modo de falha serão discutidos no capítulo Resultados.

3.2.3 Modelos de Compressão

Análogo ao que foi feito para os modelos de tração, a ideia inicial foi dimensionar peças de pequenas dimensões que sofram deformação devido à compressão. Para isso, foi considerada uma forma de aplicar compressão utilizando peças modulares, possibilitando alterações na forma de vínculo e travamento de colunas.

Adaptou-se um encaixe a um modelo de morsa encontrado no *Thingiverse*, disponibilizado pelo usuário TheGoofy, que além do modelo também sugere configurações de impressão e um vídeo explicativo sobre o *design* de peças mecânicas para impressão 3D (Imagem 3).

Imagem 3 – Morsa Mecânica

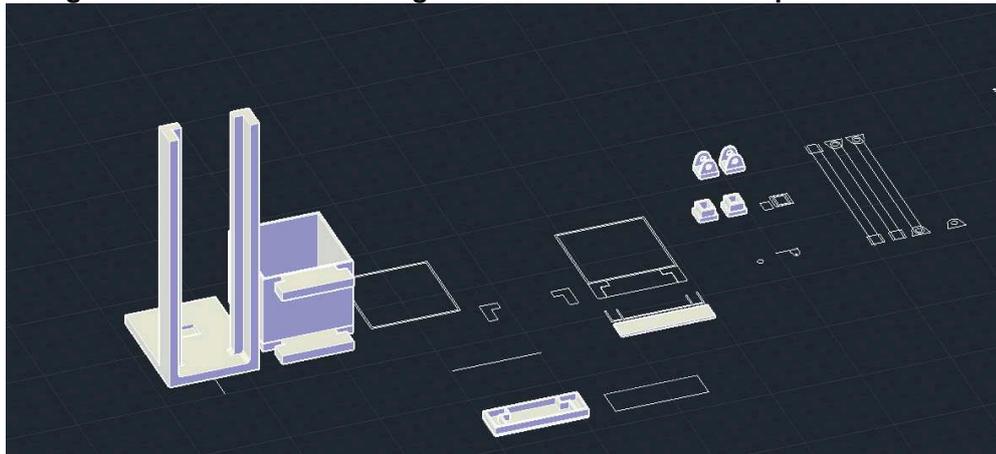


Fonte: THINGIVERSE (2022)

A partir deste modelo, foram adaptadas novas placas com encaixes que permitam emular as condições de apoio das colunas da Tabela E.1 da NBR 8800 (ABNT, 2008).

Posteriormente, decidiu-se que seria interessante poder quantificar a força suportada pelos diferentes tipos de apoio, o que não é possível no modelo da morsa, pois ele funciona aplicando um deslocamento igual para todos os apoios. Logo, tendo como inspiração a prensa manual de Silva (2019), foi desenvolvido um modelo de prensa com um recipiente que possibilita a colocação de pesos, também com encaixes modulares para variar os tipos de apoio (Figura 16). Colunas de material flexível podem ser posicionadas na prensa e assim demonstrar como as diferenças de vínculo interferem na capacidade de carga de uma coluna real.

Figura 16 – Rascunhos da segunda versão do modelo de prensa no CAD



Fonte: Autoria própria (2022)

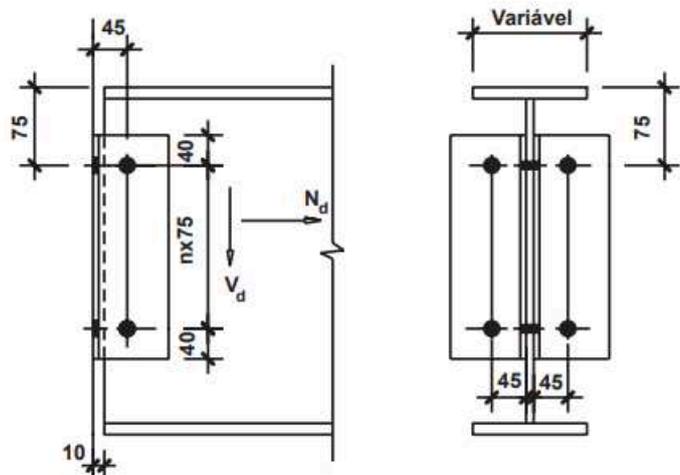
3.2.4 Modelos de ligações e apoios rígidos e flexíveis

Para exemplificar ligações rígidas e flexíveis, cujo problema de entendimento se dá devido às dimensões reais das ligações serem inviáveis de serem levadas para a sala de aula, podem ser usados modelos em escala reduzida, com dimensões mais fáceis de manusear e muito mais leves que as ligações em aço.

De maneira a criar uma reprodução fiel de uma ligação metálica, foram replicadas ligações sugeridas pelo Guia Prático para Estruturas com Perfis Laminados da Gerdau (2018), respeitando as dimensões de perfis comerciais. Foram selecionadas as opções mais simples que exemplificassem cada tipo de ligação (Figura 17 e Figura 18). Inicialmente, a ideia era demonstrar apenas ligações entre dois elementos metálicos, porém, ao encontrar exemplos de ligação de colunas metálicas à blocos de concreto e vislumbrar a possibilidade de replicá-los, decidiu-se modelar também exemplos flexíveis e rígidos destas ligações (Figura 19).

Figura 17 – Dimensões escolhidas para a ligação flexível

<u>PERFIS:</u>	W 310 x 21,0
	W 310 x 23,8
	W 310 x 28,3
	W 310 x 32,7
	W 310 x 38,7
	W 310 x 44,5
	W 310 x 52,0
	W 310 x 60,0
	W 310 x 67,0
	W 310 x 74,0
<u>CANTONEIRA:</u>	L 76 x 76 x 6,4 x 155
<u>PARAFUSOS:</u>	2 \varnothing 3/4" A325N
	4 \varnothing 3/4" A325N

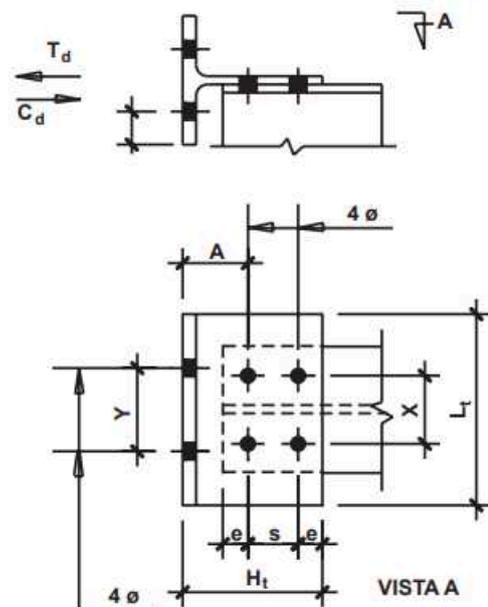


Fonte: GERDAU (2018, grifo nosso)

Figura 18 – Dimensões escolhidas para a ligação rígida

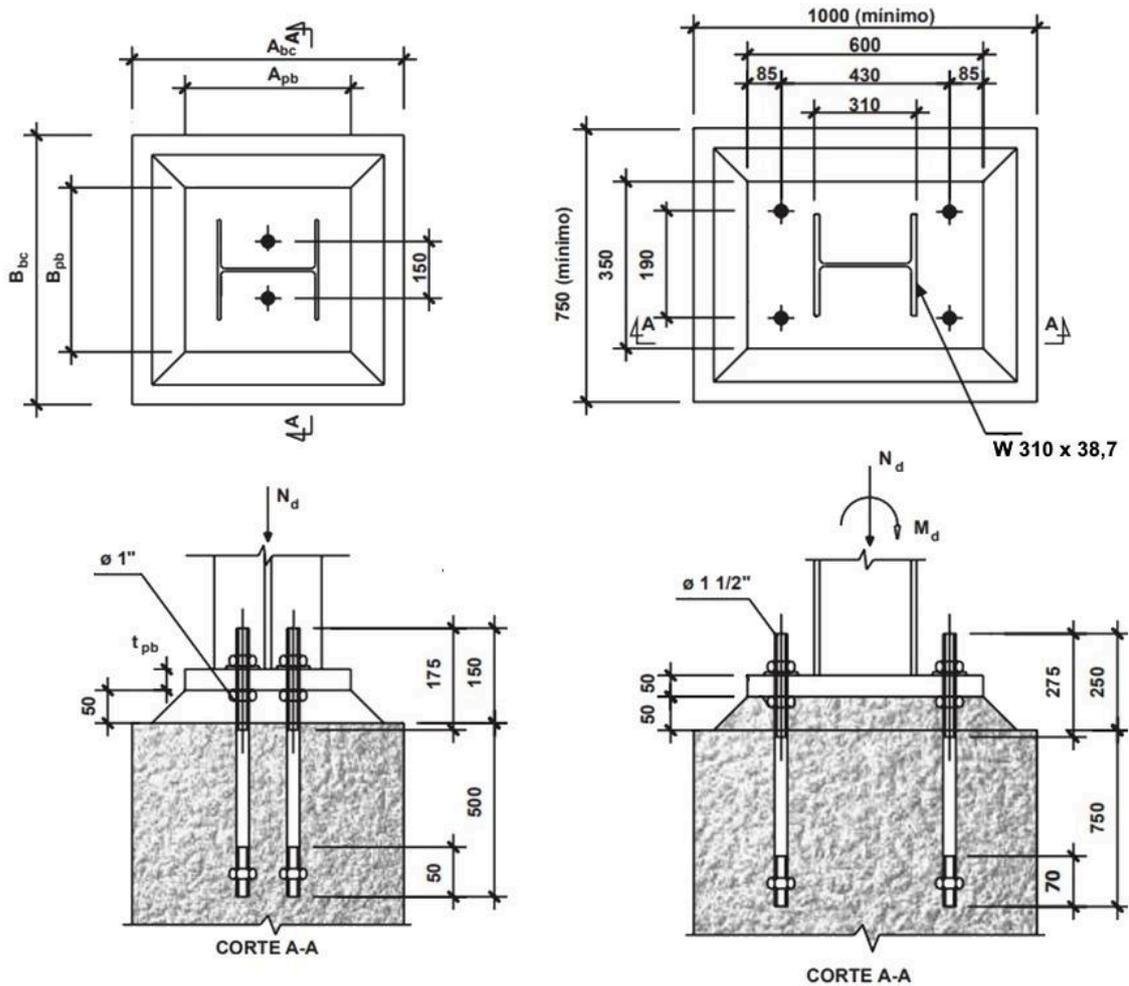
<u>PERFIL T</u>	W 310 x 38,7
<u>OBTIDO DE:</u>	W 310 x 44,5
	W 310 x 52,0

PARAFUSOS: A325N



Fonte: GERDAU (2018, grifo nosso)

Figura 19 – Dimensões escolhidas para bases rotuladas (esquerda) e engastadas (direita).



Fonte: Adaptado de GERDAU (2018)

3.2.5 Modelos de ligações soldadas

Foi decidido demonstrar a geometria das ligações soldadas e as diferenças entre soldas de filete e entalhe com penetração total e parcial, reproduzindo as Figuras 8 e 9. A solda foi representada com o auxílio de uma Caneta 3D (apresentada na Fotografia 4) compatível com os filamentos de 1,75mm de diâmetro. O equipamento funciona de modo similar a uma pistola de cola quente, aquecendo o material até seu ponto de fusão que então é expelido pela ponta. O usuário manualmente controla o local e a velocidade de deposição do filamento, imitando a execução de uma solda.

Fotografia 4 – Caneta 3D com filamento de PLA.



Fonte: Autoria própria (2023)

4 RESULTADOS

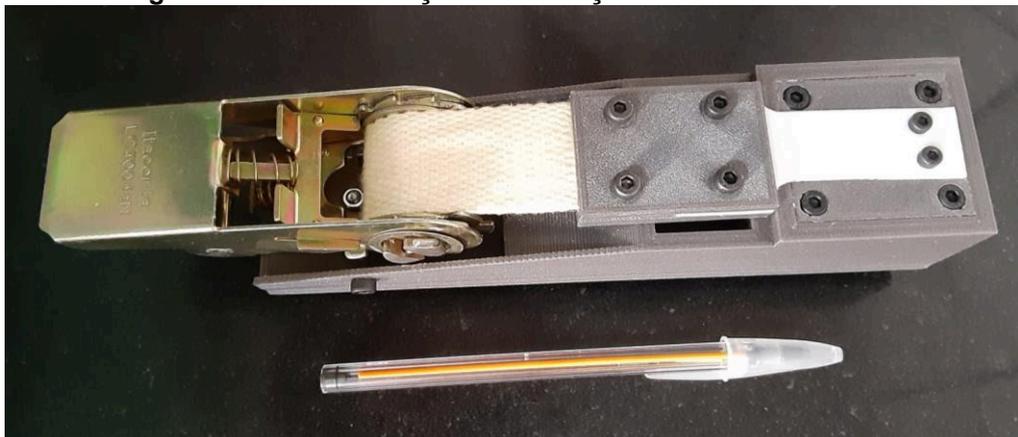
Durante os testes realizados com os modelos desenvolvidos nesta pesquisa foram obtidos resultados satisfatórios, possibilitando sua utilização em sala de aula para simular o comportamento do aço quando submetido a diferentes modos de falha.

4.1 Tração

Na Fotografia 5 pode ser visualizada a versão final da catraca já montada para a demonstração da falha da peça impressa em branco. O suporte foi impresso em PLA, pois este material possui maiores valores tanto para a tensão de escoamento quanto para a tensão de ruptura em comparação com o PETG e o TPU. Para a montagem do equipamento são necessários:

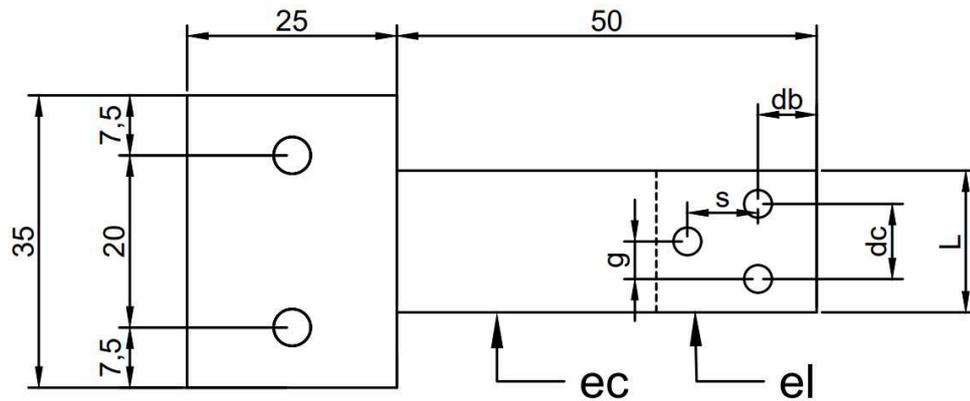
- Parafusos m4:
 - 5x 10mm;
 - 2x 15mm;
 - 4x 35mm;
 - 11x porcas.
- Parafusos m3 (para fixar as peças com dimensões sugeridas na Figura 20):
 - 4x 10mm;
 - 4 porcas.
- Faixa de algodão e 2 ilhoses para evitar que os furos desfiem.

Fotografia 5 – Gráfico Força X Deformação das 5 amostras de PLA



Fonte: Autoria própria (2023)

Figura 20 – Dimensões da peça para o teste em mm



Fonte: Autoria própria (2023)

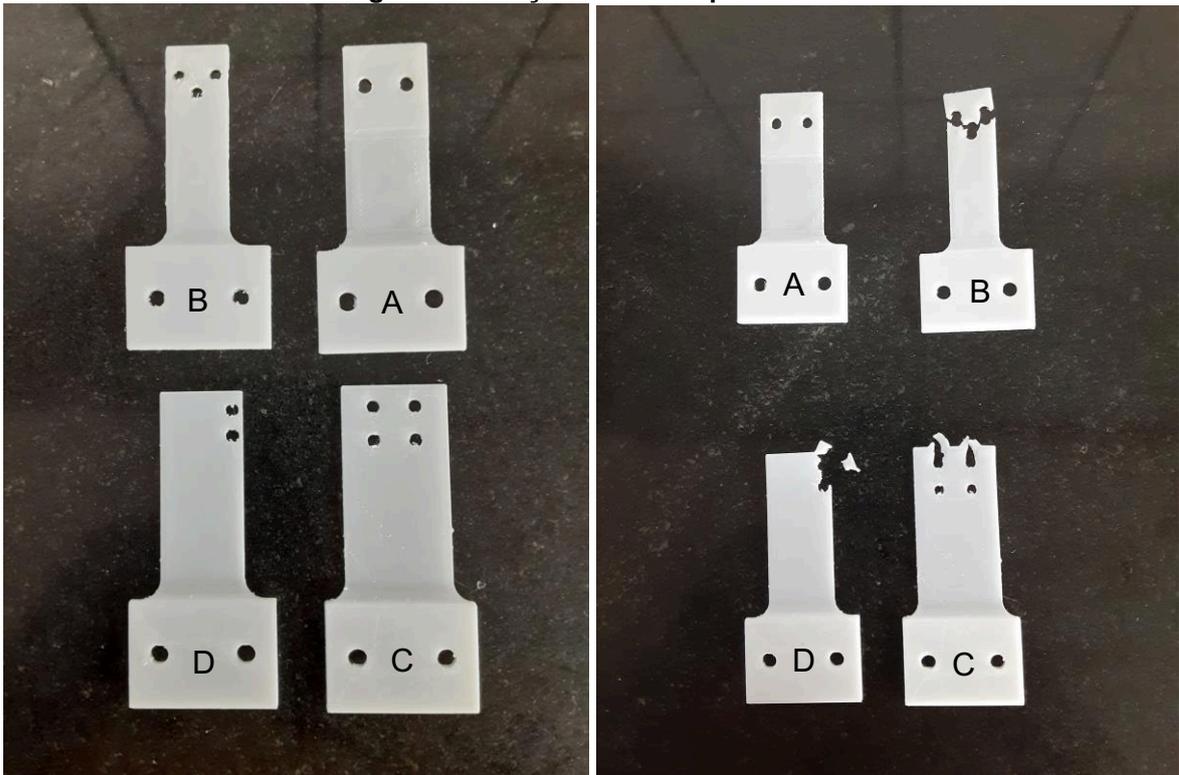
Onde:

- db** é a distância do centro do furo à borda no sentido da força;
- dc** é a distância entre centros de furos;
- L** é a largura da seção;
- ec** é a espessura da seção bruta central;
- el** é a espessura da seção na ligação;
- g** é a distância entre centros de furos no sentido perpendicular a força;
- s** é a distância entre centros de furos no sentido da força.

Em razão da largura da fita de algodão (30mm), o padrão de encaixe da peça a ser rompida deve seguir as dimensões de:

- Espessura: 2mm;
- Largura: 35mm;
- Comprimento: 25mm;
- Furos para parafusos: 4mm;
- Distância entre centros de furos: 20mm;
- Distância do centro do furo à borda: 7.5mm;
- Distância do centro do furo à borda no sentido da força: 12.5mm.

Fotografia 6 – Peças antes e depois do teste



Fonte: Autoria própria (2023)

No exemplo de peças da Fotografia 6 pode ser verificado à direita que as falhas para as quais cada peça foi dimensionada ocorreram sendo: escoamento da seção bruta (A), ruptura da seção líquida (B), esmagamento por pressão de contato (C) e rasgamento por cisalhamento em bloco (D). O escoamento não é facilmente visualizado pois não ocorre o rompimento da peça, porém os outros modos de falha são bem claros, como o caminho de rasgamento em B, a parte sujeita a cisalhamento destacada da peça em D (devido às pequenas dimensões, a parte cisalhada acabou quebrando na direção do primeiro furo, porém ainda é possível visualizar a área que se separou da peça) e o rasgamento das paredes dos furos em C. Na peça C também é possível ver a segunda configuração de furos, com 4 parafusos, utilizada para variar a falha entre pressão de contato e ruptura da seção líquida, discutida mais adiante no trabalho.

4.1.1 Falha por escoamento da seção bruta

Para demonstrar o modo de falha por escoamento da seção bruta foram calculadas (Apêndice B.1) as seguintes dimensões:

- Espessura da seção bruta central (e_c): 0.6mm;
- Espessura da seção na ligação (e_l): 1mm;

- Largura da seção (L): 20mm;
- Diâmetro dos furos: 3.3mm;
- Distância entre centros de furos (d_c): 10mm;
- Distância do centro do furo à borda no sentido da força (d_b): 10mm.

O escoamento da seção bruta do material não é facilmente visualizável. Devido a isso, optou-se por reduzir a espessura no centro da peça, mas ainda assim deve-se observar atentamente e aplicar a força lentamente com a catraca, pois caso muita força seja aplicada a seção bruta atinge a tensão de ruptura e a peça se rompe. Para facilitar a visualização, a peça pode ser impressa em TPU, em virtude de sua maior flexibilidade e alongamento. Entretanto, o fenômeno ainda ocorre no PETG, tornando a impressão com este material igualmente viável.

4.1.2 Falha por ruptura da seção líquida

Para demonstrar o modo de falha por ruptura da seção líquida foram calculadas (Apêndice B.2) as seguintes dimensões:

- Espessura da seção bruta central (e_c): 1mm;
- Espessura da seção na ligação (e_l): 1mm;
- Largura da seção (L): 15mm;
- Diâmetro dos furos: 3.3mm;
- Número de furos: 3;
- Distância entre centros de furos no sentido perpendicular a força (g): 4.5mm;
- Distância entre centros de furos no sentido da força (s): 4.5mm.

Ao analisar as propriedades dos materiais apresentadas nesta pesquisa, determinou-se que o melhor material para a produção dessas peças é o PETG, pois ele apresenta um grande alongamento e ainda pode ser rompido, diferentemente do TPU. Ademais, em comparação ao PLA, o PETG apresenta valores menores de resistência, necessitando de uma menor força para falhar.

4.1.3 Falha por esmagamento

Para demonstrar o modo de falha por pressão de contato entre o parafuso e a borda do furo foram calculadas (Apêndice B.3) as seguintes dimensões:

- Espessura da seção bruta central (ec): 0.8mm;
- Espessura da seção na ligação (el): 0.8mm;
- Largura da seção (L): 25mm;
- Número de furos: 2;
- Diâmetro dos furos: 3.3mm;
- Distância do centro do furo a borda no sentido da força (db): 5.15mm.

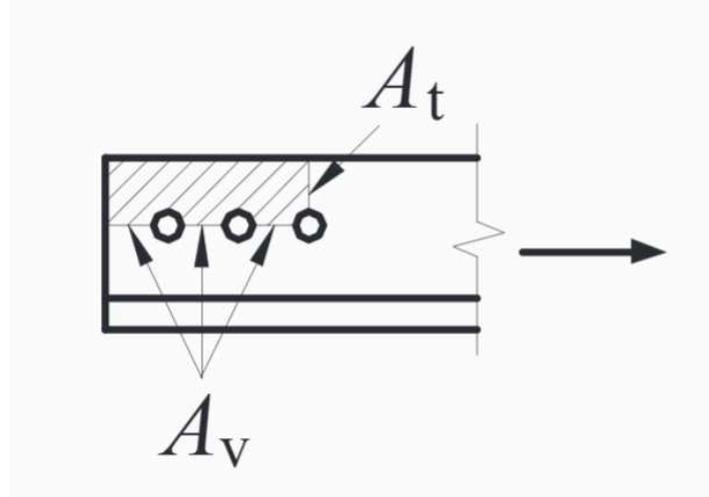
Foi considerada também uma configuração de 4 furos, onde ao se utilizar 2 parafusos nos furos mais próximos à borda (db=5.15mm), a peça falha por pressão de contato e quando utilizados 4 parafusos a falha ocorre por ruptura da seção líquida, demonstrado também no Apêndice B.3.

Pelos mesmos motivos descritos para a peça anterior, o PETG foi o material escolhido para a produção da peça que falha por pressão de contato.

4.1.4 Falha por rasgamento (cisalhamento em bloco)

Para demonstrar o modo de falha por cisalhamento em bloco foi replicada uma das seções típicas nas quais deve ser verificado o estado-limite por colapso por rasgamento (Figura 21), porém com uma configuração de apenas dois furos.

Figura 21 – Seção típica selecionada para demonstrar cisalhamento em bloco



Fonte: ABNT Figura 18 NBR 8800. Pg. 88 (2008)

No item B.4 do Apêndice B pode ser verificada a força necessária e as dimensões de A_v e A_t calculadas para as quais a peça falha por colapso por rasgamento. Sendo um valor aplicável pelo equipamento de catraca, esse modo de falha também pode ser demonstrado na prática. Seguindo a mesma lógica usada para a peça que falha por ruptura da seção líquida, o PETG foi o material escolhido para a produção da peça que apresenta falha por cisalhamento em bloco.

4.1.5 Atividades sugeridas com o uso dos modelos

Com base nos modelos desenvolvidos, foram vislumbradas algumas formas de utilização desse material em sala de aula.

A primeira atividade consiste em imprimir peças com diferentes modos de falha, distribuí-las aleatoriamente entre os alunos ou grupos de alunos já em posse de um paquímetro para que eles verifiquem as dimensões da peça em seu poder e, assim, determinem qual será o provável modo de falha daquela peça. Em seguida, submeter as peças ao teste utilizando a catraca. O objetivo dessa forma de utilização do material é fazer com que os alunos apliquem de forma prática os conhecimentos adquiridos durante a disciplina e visualizem aquilo que calcularam na teoria. Além disso, podem ser distribuídos pontos extras como motivação aos alunos que participaram com sucesso da atividade. Essa sugestão de uso aplica os métodos de aprendizagem baseada em problemas e aprendizagem baseada em times, além de possibilitar experiências práticas e visuais aos alunos.

Caso tenha uma impressora 3D de fácil acesso, o professor pode sugerir que os alunos ou grupos de alunos dimensionem uma ligação que apresente um modo de falha específico, impondo limitações de peso, quantidade de material e dimensões. Após os alunos apresentarem seus resultados, devem imprimir as peças dimensionadas e, com o auxílio da catraca, verificar se falham da forma desejada. Podem ser concedidos pontos às equipes que obtiverem êxito na atividade. Esta sugestão aplica os métodos de aprendizagem baseada em problemas, aprendizagem baseada em projetos, aprendizagem baseada em times e *design thinking*, além de proporcionar experiências práticas e visuais aos alunos e despertar o interesse em novos assuntos, favorecendo a multidisciplinaridade.

Salienta-se que as formas de utilização descritas não são exaustivas, sendo apenas sugestões de utilização. A intenção do trabalho é justamente estimular a criatividade dos docentes e discentes a criar diferentes formas de utilização do material.

4.2 Geometria da solda

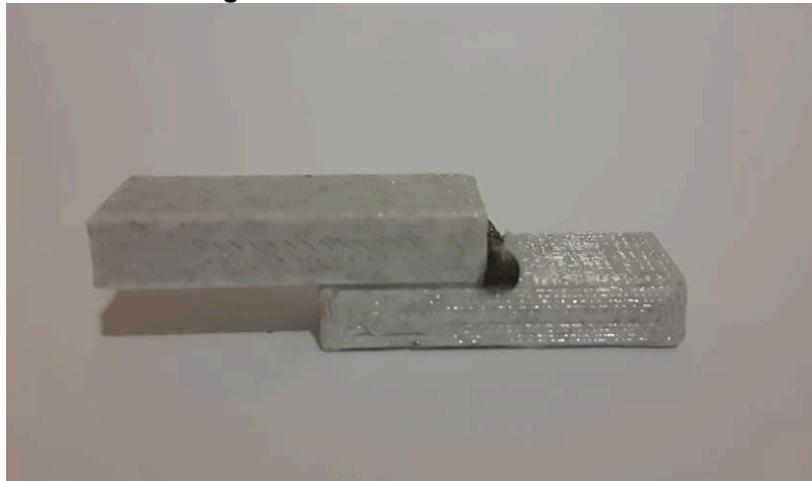
Como mencionado na metodologia, a operação de soldagem foi simulada usando uma caneta 3D para unir duas pequenas placas em diferentes configurações. Buscou-se mostrar uma solda de filete, uma de entalhe com penetração total, uma de entalhe com penetração parcial e uma perpendicular. Os resultados podem ser observados nas Fotografias de 7 a 11. A qualidade da solda depende da habilidade de manusear a caneta 3D, sendo possível obter melhores resultados com a prática. Para execução dos entalhes utilizou-se uma lixa, desgastando localmente o material.

Fotografia 7 – Modelos de solda



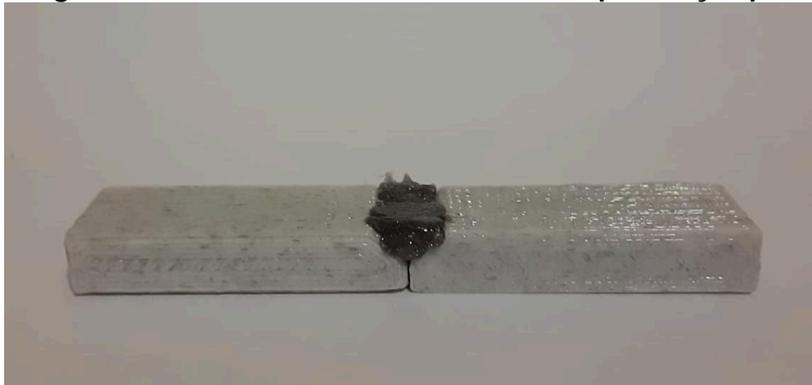
Fonte: Autoria própria (2023)

Fotografia 8 – Modelo de solda de filete



Fonte: Autoria própria (2023)

Fotografia 9 – Modelo de solda de entalhe com penetração parcial



Fonte: Autoria própria (2023)

Fotografia 10 – Modelo de solda de entalhe com penetração total



Fonte: Autoria própria (2023)

Fotografia 11 – Modelo para visualização da geometria da solda



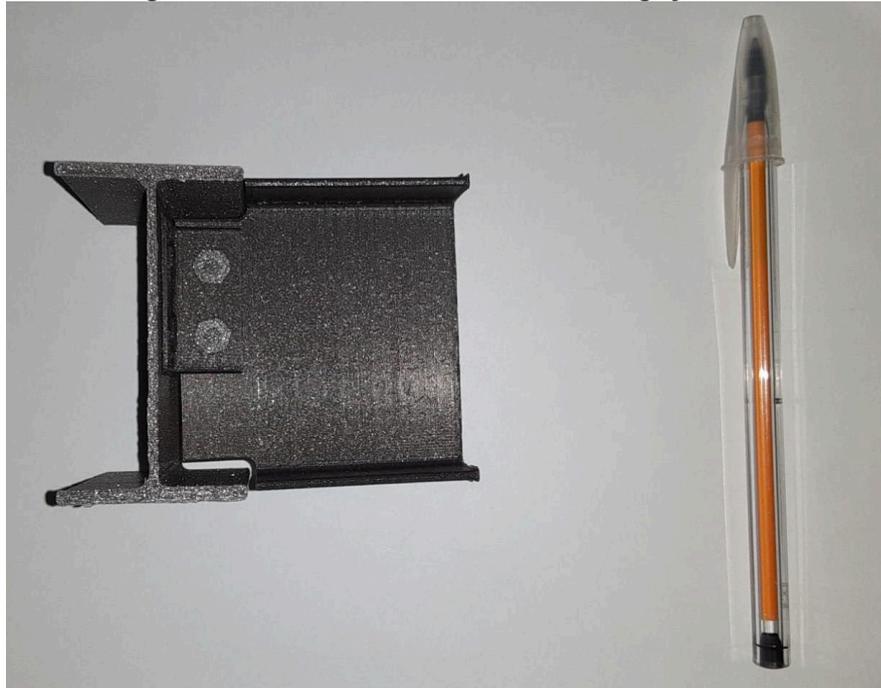
Fonte: Autoria própria (2023)

Esses modelos permitem aos alunos manusearem e verem fisicamente como uma solda se parece. Além disso, caso o professor possua em mãos uma caneta 3D, ele pode permitir que os próprios alunos simulem configurações específicas de soldas, criando uma atividade que proporciona uma experiência prática e sensorial.

4.3 Ligações e apoios rígidos e flexíveis

Conforme dito, foram confeccionados modelos em escala reduzida simulando ligações e apoios rígidos e flexíveis para exibição em sala de aula. Nas Fotografias de 12 a 14 são apresentadas imagens das impressões bem sucedidas, demonstrando ser viável sua utilização.

Fotografia 12 – Modelo em escala de uma ligação flexível



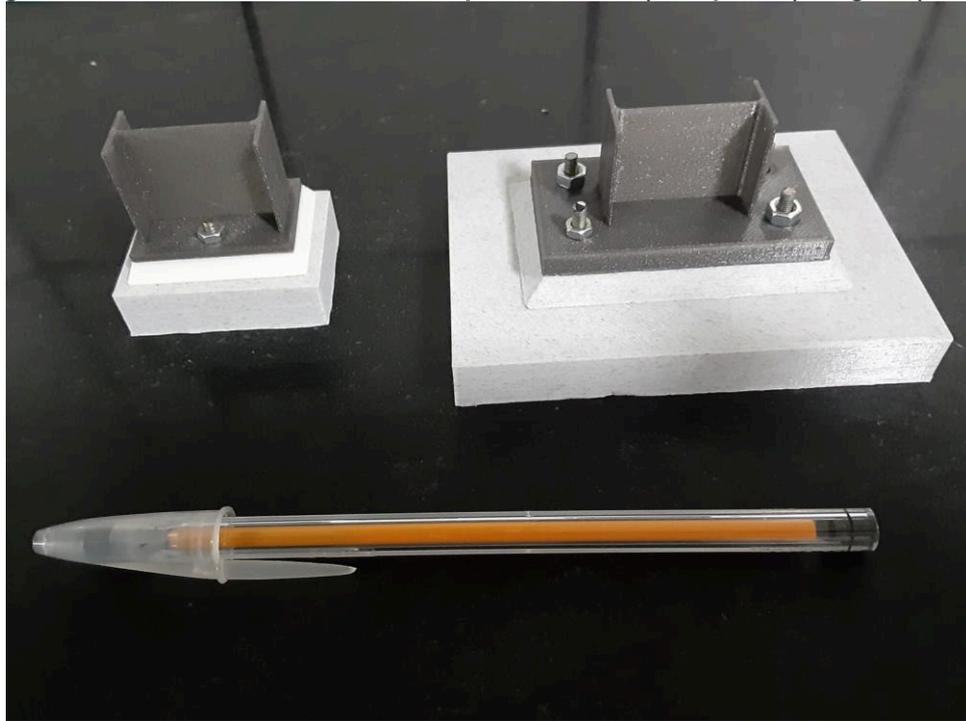
Fonte: Autoria própria (2022)

Fotografia 13 – Modelos em escala de uma ligação rígida



Fonte: Autoria própria (2022)

Fotografia 14 – Modelos em escala dos apoios flexível (à esquerda) e rígido (à direita)

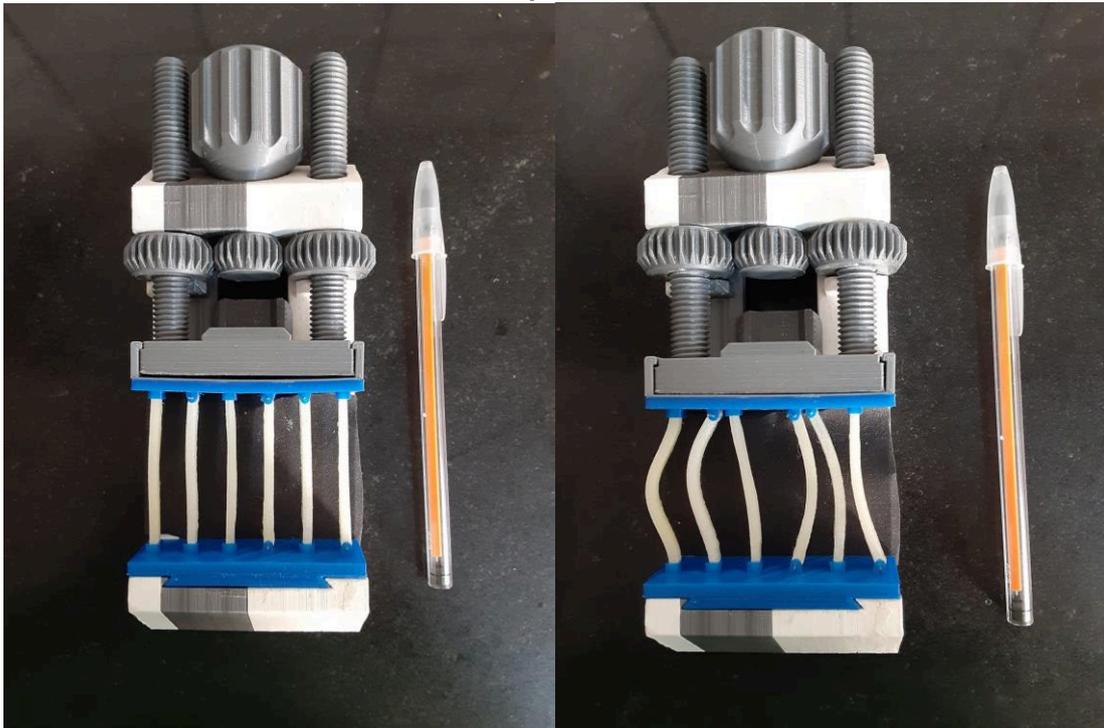


Fonte: Autoria própria (2022)

4.4 Compressão

O primeiro modelo relativo ao comportamento de elementos estruturais em aço submetidos a esforços de compressão auxilia na visualização dos coeficientes de flambagem de acordo com a vinculação de colunas. Inspirado na morsa mecânica representada na Imagem 3, o protótipo funcionou da maneira desejada, como pode ser visualizado na Fotografia 15. A impressão da morsa foi realizada em PLA, pois o material apresenta maior resistência e é mais fácil de imprimir que o PETG, enquanto as colunas foram impressas em TPU, pois a flexibilidade e elasticidade do material são bem aproveitadas, permitindo demonstrar a curvatura inúmeras vezes sem danificar o material.

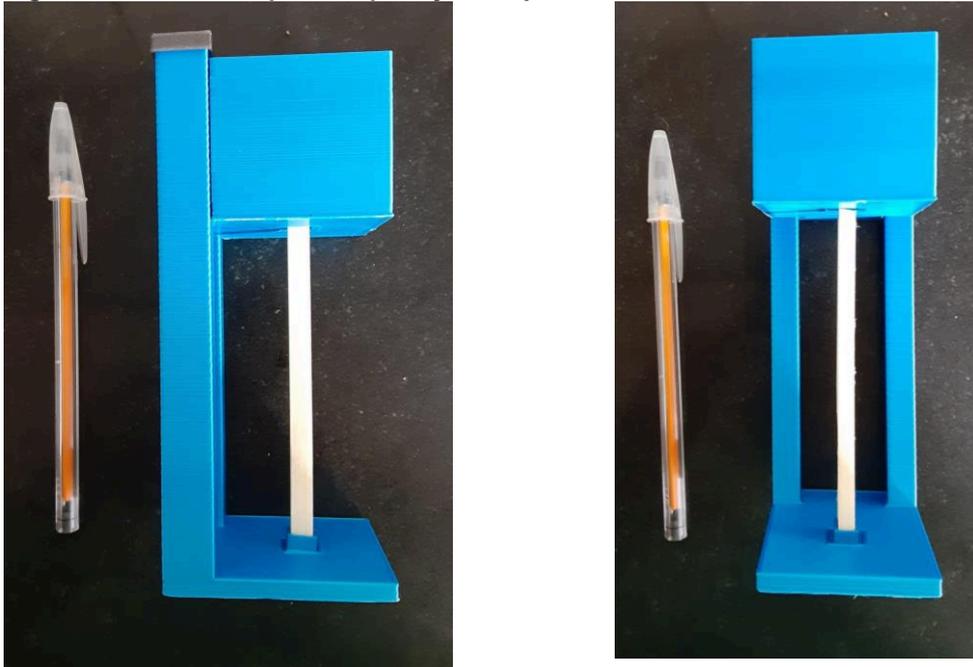
Fotografia 15 – Modelo para visualização dos coeficientes de flambagem de colunas sob compressão



Fonte: Autoria própria (2023)

O resultado para o segundo modelo de compressão também foi satisfatório. O modelo é de fácil impressão e permite a alteração do apoio, do peso e da coluna utilizados, além de que pode ser facilmente adaptado para diferentes ideias de uso, já que funciona de maneira bem simples e intuitiva. Foi impresso em PLA, pois é o material mais fácil de se trabalhar dentre as 3 opções e possui valores maiores de resistência. A coluna submetida à flambagem pode ser impressa em TPU, permitindo usar o mesmo perfil para mais de uma demonstração, além de suportar uma menor carga aplicada. Na Fotografia 16 pode ser observada a peça impressa e montada para a aplicação de peso no recipiente (“copo”).

Fotografia 16 – Modelo para a aplicação de peso sobre coluna com diferentes apoios.



Fonte: Autoria própria (2023)

Ao aplicar o peso e verificar as alterações na resistência à flambagem que os diferentes apoios proporcionam, cria-se uma experiência prática sobre a flambagem, além de se favorecer a visualização dos coeficientes de flambagem com o uso do modelo de morsa mecânica.

4.5 Flambagem local

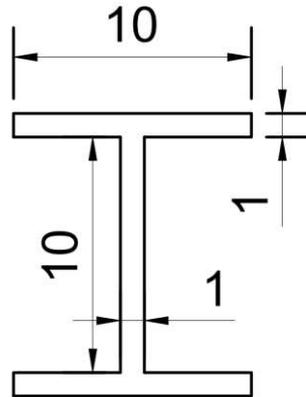
De acordo com o referencial teórico, foram realizados os cálculos para a demonstração da flambagem local, os quais constam no item B.5 do Apêndice B. As dimensões finais escolhidas para o protótipo são mostradas na Figura 22 e Fotografia 17, com um comprimento da coluna de 100mm, considerado suficiente para uma boa visualização do fenômeno. Como deseja-se curvar a coluna com perfil I diversas vezes, foi feita a opção de usar o TPU em sua produção.

Partindo do valor de 110 MPa para o módulo de elasticidade do polímero (como informado pelo fabricante do material), e aproximando-se a tensão de escoamento (apenas para fins de cálculo) para o valor imediatamente anterior a primeira curvatura do gráfico Força vs. Alongamento, próximo de 0,2kN aplicado a uma área de 41,6mm², aproximado para 5Mpa.

Durante os cálculos, considerou-se que a coluna estava simplesmente apoiada em ambas as extremidades (ou seja, com rotação livre em ambos os eixos e extremidades da coluna). Partiu-se desse pressuposto pois a força pode ser aplicada

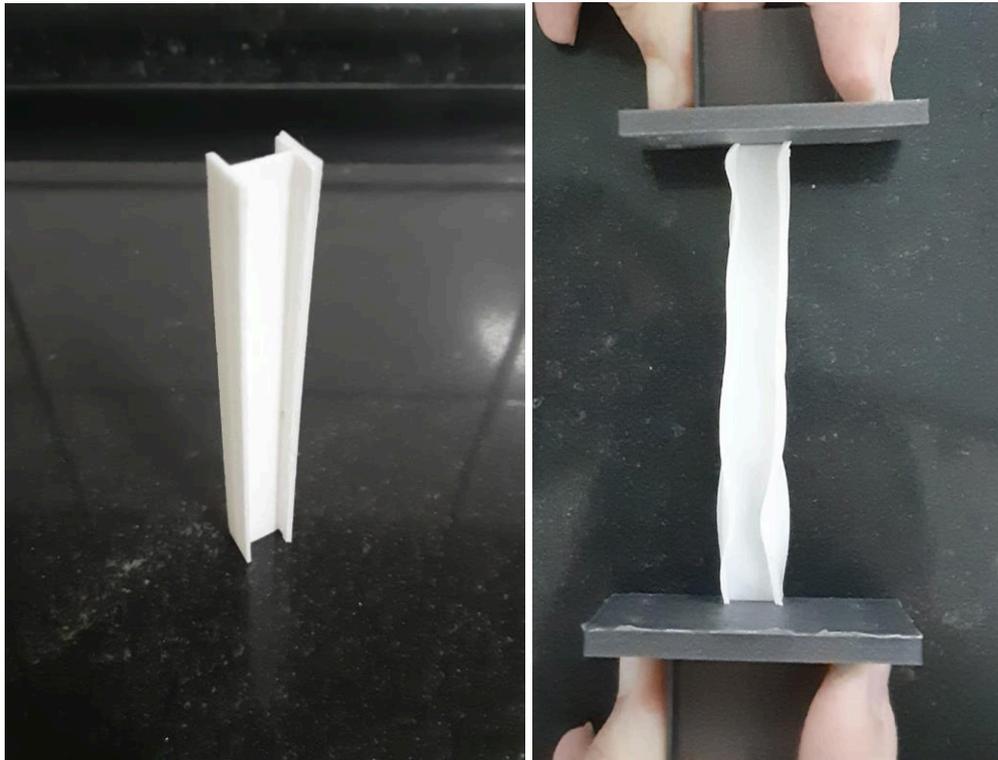
pelas mãos do usuário, que permitem a rotação. Estimou-se que a força necessária para causar a flambagem do protótipo seja de 1,38 kgf, facilmente aplicável com as mãos.

Figura 22 – Dimensões da peça para demonstração de flambagem local em mm



Fonte: Autoria própria (2023)

Fotografia 17 – Peça para demonstração de flambagem local com e sem esforço aplicado



Fonte: Autoria própria (2023)

5 CONCLUSÃO

Apesar das dificuldades enfrentadas durante a pesquisa, impressões, reimpressões, ideias, testes e aprendizados, ao final foi possível alcançar os objetivos almejados no início, sendo encontradas maneiras de demonstrar todos os fenômenos desejados.

O objetivo principal de melhorar, ainda que minimamente, o ensino universitário no Brasil só pode ser verificado após a divulgação da pesquisa, porém todos os esforços para garantir uma maior chance de isso acontecer foram envidados, mantendo o custo e a complexidade de produção o mais baixo possível, porém assegurando um visual sofisticado em relação a protótipos manufaturados. Todas essas medidas tentam estimular professores a reproduzirem o material e assim difundir não apenas os resultados desta pesquisa, mas a própria ideia de incluir novas tecnologias e metodologias de ensino às suas aulas.

Deve ser reconhecido também que esta é apenas uma ideia inicial que não apenas permite, mas também favorece modificações, aprimoramentos e avanços nas ideias e usos dos modelos. A ideia básica do *design* modular é permitir que com pouco esforço na modelagem e um baixo uso de material, possam ser adaptadas inúmeras peças a qualquer um dos modelos, usando, por exemplo, diferentes seções para as colunas dos modelos de compressão, criando travamentos para alterar as condições de apoio durante a realização dos testes e alternar o eixo de menor inércia, dimensionando diferentes geometrias de ligação para o modelo de aplicação de tração e até mesmo demonstrar outros conceitos que se aproveitem da aplicação de forças axiais, como o do coeficiente de Poisson de Resistência dos Materiais I e de flambagem em Resistência dos Materiais II. Outro possível aprimoramento que pode ser realizado consiste em acoplar um dinamômetro ao equipamento de aplicação de tração, permitindo verificar e comparar a força real aplicada com a resistência calculada, possibilitando ainda a comparação das resistências entre diferentes tipos de solda utilizados em ligações.

A conclusão deste trabalho é de que é possível e viável aplicar a tecnologia de impressão 3D e metodologias mais modernas de ensino nas disciplinas avançadas de Engenharia Civil, demonstrando isso com o material didático confeccionado, bastando interesse e motivação dos professores em usá-lo. Já quanto à eficácia de seu uso, cabe aos alunos demonstrarem interesse e dedicação em aprender, aproveitando ao máximo as oportunidades criadas pelo professor. Ao final, o ensino

continua sendo uma relação mútua que depende dos dois lados se dedicarem e cooperarem para criar a melhor interação possível. O material didático atua apenas como um facilitador, apresentando-se como mais uma opção para que essa interação possa ocorrer.

Por fim, mantendo o ideal de difundir diferentes práticas de ensino e contribuir para o avanço da educação, todos os arquivos e instruções de uso e montagem serão disponibilizados online e os modelos originais produzidos serão doados à UTFPR, na esperança de que seja feito um bom uso do material didático durante aulas futuras da disciplina de Construções em Aço.

REFERÊNCIAS

- 3D FILA. **PLA tudo o que você precisa saber sobre o filamento PLA.** Belo Horizonte, 2022. Disponível em: <<https://3dfila.com.br/pla-tudo-o-que-voce-precisa-saber-sobre-o-filamento-pla/>> Acesso em: 27 de maio 2022.
- 3D LAB. **Saiba escolher o melhor sentido de impressão das peças 3D!** Belo Horizonte, 2018. Disponível em: <<https://3dlab.com.br/sentido-de-impressao-das-pecas-3d/>> Acesso em: 27 de maio 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8800:2008:** Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro, 2008.
- AGUIAR, Leonardo De Conti Dias. **Um processo para utilizar tecnologia de impressão 3D na construção de instrumentos didáticos para o ensino de ciências.** 2016. 226 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Educação para Ciência, Faculdade de Ciências, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho". Bauru, 2016.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D638 – 14: Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics.** EUA, 2014.
- ANYCUBIC. **Anycubic i3 mega S. Especificações Técnicas.** 2022. Disponível em: <<https://www.anycubic.com/products/anycubic-i3-mega-s>> Acesso em: 27 de maio 2022.
- BELLEI, Ildony Hélio. **Edifícios Industriais em Aço.** São Paulo: Editora Pini, 1994.
- BLIKSTEIN, Paulo. **Digital fabrication and ‘making’ in education: the democratization of invention.** Stanford, 2013.
- CARBONARI, Gilberto, *et al.* Desenvolvimento de modelos didáticos para visualização de conceitos básicos de isostática. In: **Revista Principia.** Paraíba, n. 34, 2016.
- CARMO, Diego Mion do. **Avaliação comparativa das propriedades mecânicas obtidas por ensaios convencionais e por simulação computacional nos aços estruturais ASTM A36 e microligado pelo processo GMAW.** 2018. 68 f. Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande – FURG. Rio Grande, 2018.
- CARNEIRO, Alfredo. A natureza humana segundo os grandes filósofos. In: **Netmundi.org - Portal de Filosofia.** 2015. Disponível em: <<https://www.netmundi.org/filosofia/2015/filosofos-da-historia-e-natureza-humana/>> Acesso em: 8 de out. 2022.
- CHAPMAN, Alan. An Introduction to Kolb's Learning Styles. In: **BusinessBalls** 2013. Disponível em: <<https://www.businessballs.com/self-awareness/kolbs-learning-styles/>> Acesso em: 6 de set. 2022.

CHERRY, Kendra. Overview of VARK Learning Styles. VARK Learning Styles. In: **Verywellmind**. 27 de nov. 2019. Disponível em: <<https://www.verywellmind.com/vark-learning-styles-2795156>> Acesso em: 21 de set. 2022.

COFFIELD, Frank, *et al.* Learning styles and pedagogy in post-16 learning: a systematic and critical review. In: **Learning & Skills Research Centre**. London, 2004.

COLPES, Karen Mello. **Impressora de gráficos em alto-relevo para cegos: um facilitador no ensino da física e matemática**. 2014. 98 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

CUNTO FILHO, Rafael, *et al.* Utilização De Objetos Educacionais Interativos Para Auxílio No Ensino No Curso De Engenharia Civil. In: **Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia**. Fortaleza, 2019.

CURA. Versão 5.2.1. **Ultimaker**, 2022. Disponível em: <<https://ultimaker.com/software/ultimaker-cura/>> Acesso em: 15 de mar. 2022.

DENG, Ruiqi; BENCKENDORFF, Pierre; GAO, Yifan. Limited usefulness of learning style instruments in advancing teaching and learning. In: **The International Journal of Management Education**. Brisbane; Hangzhou: Editorial Board, v.20, n. 3. 2022. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S147281172200088X>> Acesso em: 2 de jul. 2022.

DESCARTES, René. **Meditações**. São Paulo: Editora Abril, 2 ed., 1979.

DREYFUSS, Henry; TILLEY, Alvin. **The measure of man and woman: human factors in design**. New York: Whitney Library of Design, 1993.

EL AISSAOUI, Ouafae, *et al.* Combining supervised and unsupervised machine learning algorithms to predict the learners' learning styles. In: **Second International conference on intelligent computing in data sciences**. Marrocos, v. 148, p. 87-96, 2019. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050919300122>> Acesso em: 21 de abr. 2022.

EVANGELISTA, Yago Cristiano Freitas, *et al.* Protótipos Para Auxiliar Ao Ensino Da Mecânica Estrutural No Curso De Engenharia Civil. In: **Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia**. Fortaleza, 2019.

FLEMMING, Neil; MILLS, Colleen. Not Another Inventory, rather a Catalyst for Reflection. In: **To Improve the Academy**. Canterbury, v. 11, 1992. Disponível em: <<https://digitalcommons.unl.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1245&context=podimproveacad>> Acesso em: 4 de jun. 2022.

FLORINDO, Girlane Maria Ferreira; MACHADO, Veruska Ribeiro; SILVA, Jailson Rodrigues da. Tecnologia 3d: Ferramenta Para O Ensino De Artes Visuais Para Pessoas Com Deficiência Visual. In: **Simpósio Brasileiro de Informática na Educação**. Recife, 2017.

FRĂSINEANU, Sarah Ecaterina. The beginning of studies and the prediction of university abandonment. In: **Revue des Sciences Politiques**, Craiova, n.61, p.68-79. 2019.

FUNCTION3D, **PETALOT**. 2017. Disponível em: <<https://github.com/function3d/petalot/tree/master/STLs>> Acesso em: 26 de maio 2023

GERDAU. **Guia Prático para Estruturas com Perfis Laminados**. 2018. Disponível em: <https://mais.gerdau.com.br/catalogos-e-manuais/?gclid=Cj0KCQiA4aacBhCUARIsAI55maF66HiLp2TxRImAp1LYUjvO-xDPO1y4gmCdhJxeSpWd1GNDPuXwSA0aAjyvEALw_wcB> Acesso em: 15 de jul. 2022.

GERDAU. **Catálogo de Barras e Perfis**. Disponível em: <https://mais.gerdau.com.br/catalogos-e-manuais/?gclid=Cj0KCQiA4aacBhCUARIsAI55maF66HiLp2TxRImAp1LYUjvO-xDPO1y4gmCdhJxeSpWd1GNDPuXwSA0aAjyvEALw_wcB> Acesso em: 15 de jul. 2022.

HOBBS, Thomas. **Leviatã**. São Paulo: Editora Abril, 2 ed., 1979.

KIECKOW, Flávio; FREITAS, Denizard Batista de; LIESENFELD, Janaina. O ensino e a aprendizagem na engenharia: realidade e perspectivas. In: **Brazilian Applied Science Review**. Curitiba, v. 2, n. 1, p. 347-356, jan./mar. 2018. Disponível em: <<https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BASR/article/view/393/336>> Acesso em: 27 de ago. 2021.

KOLB, Alice; KOLB, David. **The Kolb Learning Style Inventory 4.0: a comprehensive guide to the theory, psychometrics, research on validity and educational applications**. Ohio: Case Western Reserve University. 2013. E-book. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/profile/David-Kolb-2/publication/303446688>> Acesso em: 12 de ago. 2022.

KOSTAKIS, Vasilis.; NIAROS, Vasilis; GIOTITSAS, Christos. **Open-source 3D printing as a means of learning: An educational experiment in two high schools in Greece**. Telematics and informatics, v. 32, n. 1, p. 118-128, 2014.

LOCKE, John. **Ensaio acerca do entendimento humano**. Indianapolis: Hackett Publishing, 1993.

MARQUES, Paulo, *et al.* **Soldagem – Fundamentos e Tecnologia**, Belo Horizonte: Editora UFMG, 2009. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=ulxCK9lCgJEC&printsec=frontcover#v=onepage&q&f=false>> Acesso em: 25 de maio 2023.

MYMINIFACTORY. **Education**. 2022. Disponível em:
<<https://www.myminifactory.com/category/education>> Acesso em: 27 de maio 2022.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION. **3D Resources**. EUA, 2023. Disponível em: <<https://nasa3d.arc.nasa.gov/models/printable>> Acesso em 20 de jun. 2023.

NATIONAL INSTITUTE OF HEALTH. **NIH 3D**. EUA, 2023. Disponível em:
<<https://3d.nih.gov>> Acesso em 20 de jun. 2023.

OLIVEIRA, Márcio Sequeira. **Modelo Estrutural Qualitativo pra pré-avaliação do comportamento de estruturas metálicas**. Ouro Preto. 2008.

OLIVEIRA, Matheus M.; MEDEIROS, Klaus A. S.; MEDEIROS, Igor J.N. Modelos Experimentais Para Auxiliar Na Didática E No Ensino Da Resistência Dos Materiais. In: **Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia**. Fortaleza, 2019.
ONISAKI, Hadassa Harumi Castelo; VIEIRA, Rui Manoel de Bastos. Impressão 3D e o desenvolvimento de produtos educacionais. In: **Educitec, Revista de Estudos e Pesquisas sobre Ensino Tecnológico**. Manaus, v. 05, n. 10, p. 128-137, mar. 2019.

OTHMAN, Norasmah; AMIRUDDIN, Mohd Hasril. Different Perspectives of Learning Styles from VARK Model. In: **ScienceDirect**. 2010. Disponível em:
<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877042810020926>> Acesso em: 6 de set. 2022.

PEREIRA, Mariana Cristina Buratto. Práticas Pedagógicas Humanistas No Curso De Graduação Em Engenharia Civil: Uma Possibilidade. In: **Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia**. Salvador, 2018.

PLATÃO. **Apologia de Sócrates**. São Paulo: Editora Abril, 1972.

PRINTABLES. **Education**. 2022. Disponível em:
<<https://www.printables.com/education>> Acesso em: 27 de maio 2022.

PRITHISHKUMAR, Ivan James; MICHAEL, S. A. Understanding your student: Using the VARK model. In: **Journal of Postgraduate Medicine**, Tamil Nadu, v. 60, n. 2, p. 183-6, abr. 2014.

ROCHA, Alba C. C., *et al.* Análise Do Comportamento Estrutural Através De Simulações De Protótipos: Para Fins Didáticos. In: **Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia**. Salvador, 2017.

SANTOS, Jarles Tarsso Gomes; ANDRADE, Adja Ferreira de. Impressão 3D como recurso para o desenvolvimento de material didático: Associando a cultura maker à resolução de problemas. In: **Revista Novas Tecnologias na Educação**. Porto Alegre, v. 18, n. 1, jul. 2020.

PARANÁ. Secretaria da Educação do Estado do Paraná, **Metodologias Ativas**. Paraná, 2019. Disponível em:

<https://professor.escoladigital.pr.gov.br/metodologias_ativas> Acesso em: 25/05/2023.

SHIER, Mary. **Student Success: an invaluable resource for college and university students**. Victoria: BC campus, 2020. E-book. Disponível em: <<https://opentextbc.ca/studentsuccess/>> Acesso em: 29 de jul. 2022.

SILVA, Diony Monteiro, *et al.* Flambagem De Vigas Verticais: Construção De Uma Prensa Artesanal Para Comparação Entre Dados Analíticos E Experimentais. In: **Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia**. Fortaleza, 2019.

SILVA, Pedro Coelho, *et al.* Impressão 3D: Um Guia Prático. In: **Brazilian Journal of Development**. Curitiba, v. 6, n. 11, p. 84478-84493, nov. 2020.

SILVEIRA, Rosemari Monteiro Castilho Foggiatto; BAZZO, Walter. Ciência, tecnologia e suas relações sociais: a percepção de geradores de tecnologia e suas implicações na educação tecnológica. In: **Ciência & Educação**, Bauru, v. 15, n. 3, p. 681-694, 2009.

SOUZA, Adysson A. F.; SOUZA, Anderson H. F. Desenvolvimento de modelos didáticos para visualização de conceitos básicos de isostática. In: **Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia**. Salvador, 2017.

TESSARI, Rodolfo Krul. **Notas de Aula da disciplina de Construções Metálicas**. Apucarana, 2018.

THEODORE, Thudium. David Kolb (Psychologist Biography). In: **Practical Psychology**. 16 de fev. 2022. Disponível em: <<https://practicalpie.com/david-kolb/>> Acesso em: 12 de ago. 2022.

THINGIVERSE. **Learning**. 2022. Disponível em: <https://www.thingiverse.com/?category_id=69&page=1> Acesso em: 27 de maio 2022.

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ. **Projeto Pedagógico de Curso Superior de Engenharia Civil**. Apucarana, 2018. Disponível em: <www.utfpr.edu.br> Acesso em: 02 de maio 2022.

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ. **Relatório de Auditoria RA201912. Evasão**. Curitiba, 2019. Disponível em: <www.utfpr.edu.br> Acesso em: 02 de maio 2022.

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ. **O que todo calouro deveria saber antes de ingressar na UTFPR**. Curitiba, 31 de jul. 2017. Disponível em: <http://hpc.ct.utfpr.edu.br/calouro_informativo.html> Acesso em: 02 de maio 2022.

ZEE, Maarten van der; MOLENVELD, Karin. **The fate of (compostable) plastic products in a full scale industrial organic waste treatment facility**. 2020. Wageningen University & Research, Wageningen, The Netherlands, 2020.

APÊNDICE A – Guia de Impressão

A.1 PROCESSO DE IMPRESSÃO 3D

O processo de impressão 3D por FDM (modelagem por deposição fundida) consiste na construção de um objeto tridimensional através da deposição de múltiplas camadas de material. A impressora funciona utilizando um arquivo com um sistema de coordenadas (X, Y, Z), determinado por um software fatiador, que controla todo o processo de impressão. Um bom exemplo é o software Cura, gratuito, disponibilizado pela Ultimaker, uma empresa que produz também impressoras 3D. Sua função é “traduzir” um modelo 3D de um arquivo “.stl” ou “.obj”, por exemplo, para um arquivo “.gcode”, que pode ser lido pela impressora.

Pela natureza da tecnologia de impressão 3D, relacionada à programação e informática, grande parte de seu desenvolvimento surgiu e ainda surge em fóruns e sites relacionados, onde usuários trocam informações sobre suas experiências e ideias, acelerando o aprendizado da comunidade com um fluxo muito maior de tentativas e erros, em um processo de *brainstorm* global e ininterrupto. Exemplos de tecnologias que surgiram em fóruns são as funções implementadas em *softwares* fatiadores, formas de nivelamento automático (como o *BLTouch*) e diferentes formas de leitura dos arquivos “.gcode”.

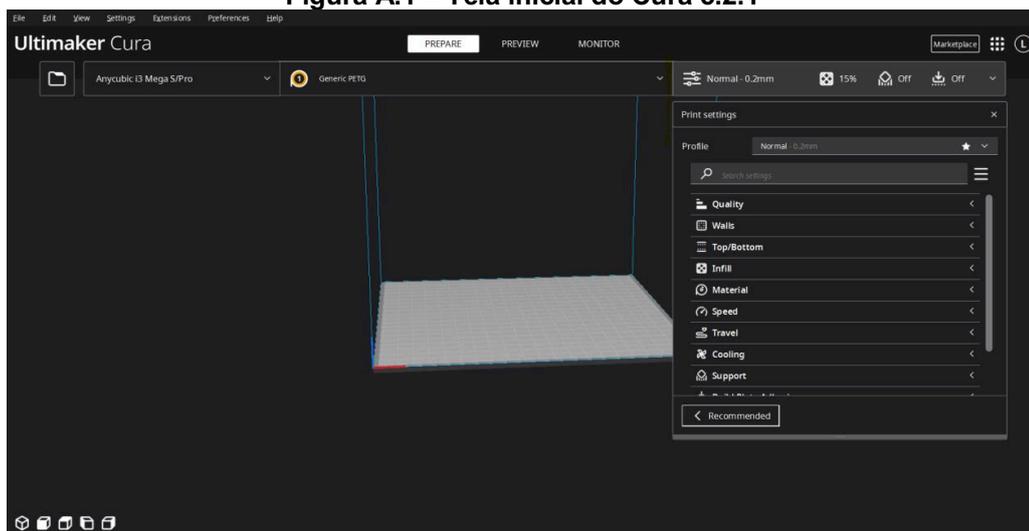
Isso significa que grande parte do conhecimento nessa área acontece de modo informal. Usuários geralmente aprendem por tentativa e erro e, quando compartilham seus aprendizados, o fazem fora dos meios tradicionais, como publicações de artigos e trabalhos. Por isso existe uma relativa dificuldade em encontrar referências formais comparadas às fontes informais.

A.2 COMO IMPRIMIR

Após ter em mãos o arquivo 3D do objeto, para executar sua impressão é necessária sua parametrização com as configurações de impressão. Este processo consiste na “tradução” do arquivo em uma linguagem que possa ser lida pela impressora. O programa que realiza essa tradução é chamado de fatiador, sendo escolhido o *software* Cura no presente trabalho.

Como pode ser observado na Figura A.1, o fatiador permite controlar inúmeras características da impressão, que se traduzem em variações no tempo de impressão, qualidade do acabamento, resistência mecânica, aderência, além de causar ou solucionar diferentes tipos de erros.

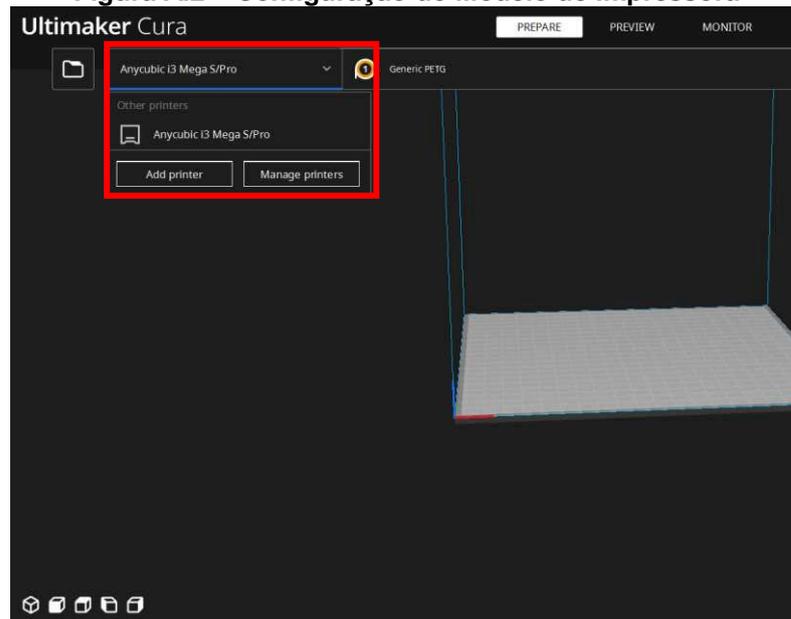
Figura A.1 – Tela inicial do Cura 5.2.1



Fonte: CURA (2022)

Primeiramente deve-se configurar no software o modelo de impressora que será usado. Várias marcas disponibilizam perfis já prontos para seus produtos, em parceria com a *Ultimaker*, como é o caso da *ANYCUBIC*, marca utilizada na impressão dos modelos deste trabalho (Figura A.2).

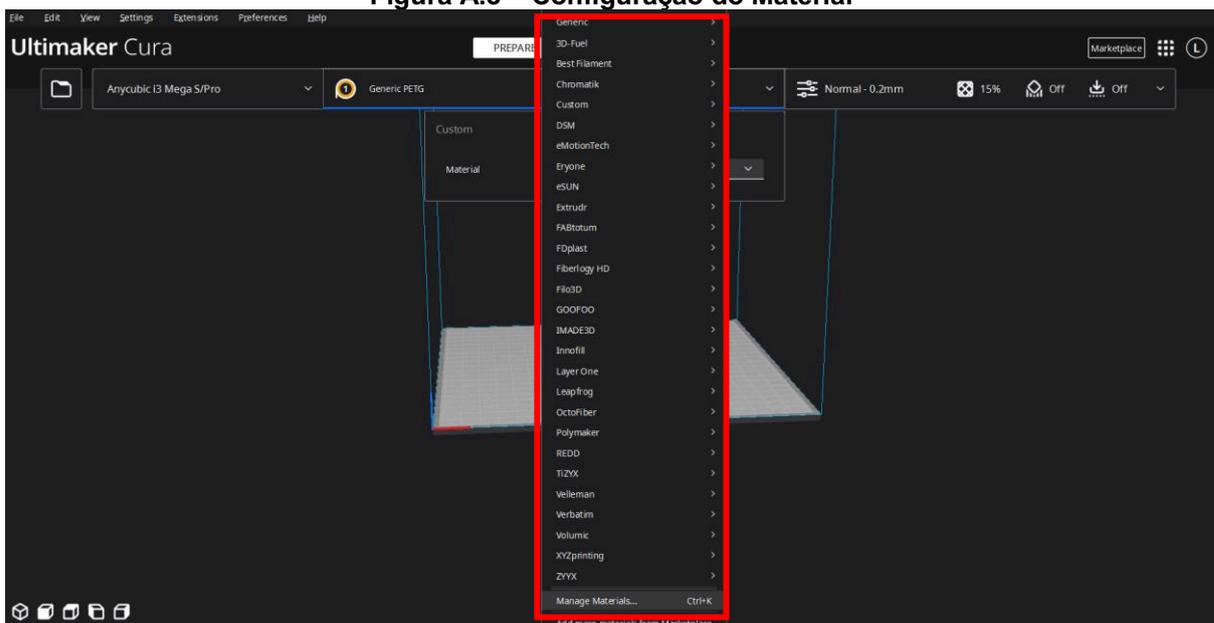
Figura A.2 – Configuração do Modelo de Impressora



Fonte: CURA (grifo nosso) (2022)

As configurações de material vêm em seguida, apesar de ser possível ajustar os parâmetros de impressão relativos ao material posteriormente. Na opção “Perfil do material” (Figura A.3) é possível adicionar informações como densidade, valor e cor, possibilitando ao software calcular a massa e custo de impressão de forma precisa. Os perfis genéricos disponibilizados podem ser usados como base para um ajuste fino posterior, de acordo com os parâmetros desejados pelo usuário.

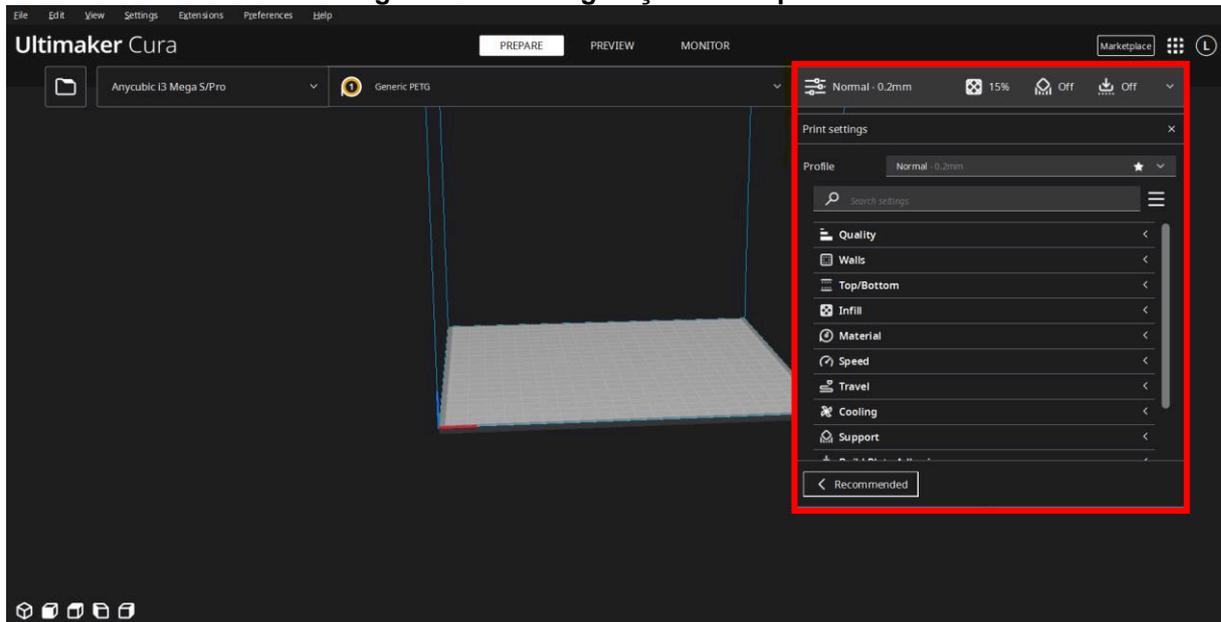
Figura A.3 – Configuração do Material



Fonte: CURA (grifo nosso) (2022)

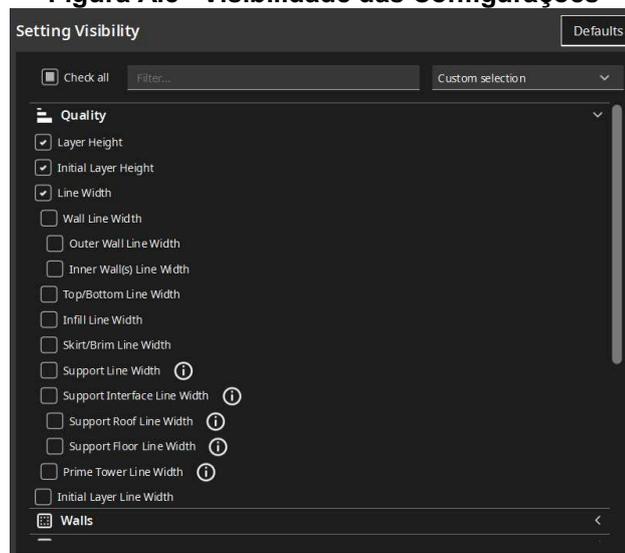
Por fim, temos as configurações de impressão, nas quais os parâmetros ajustáveis são organizados em categorias, que podem ser exibidas ou minimizadas (Figura A.4). Além disso, é possível selecionar quais parâmetros serão exibidos nas configurações avançadas (Figura A.5). Existe um número muito grande de configurações para serem listadas, porém a opção de “Ajuda” do *software* auxilia sobremaneira novos usuários a entenderem cada função. Além disso, existe a possibilidade de utilização de perfis simplificados, facilitando o uso, mas reduzindo o controle sobre a impressão.

Figura A.4 – Configurações de Impressão



Fonte: CURA (grifo nosso) (2022)

Figura A.5– Visibilidade das Configurações



Fonte: CURA (2022)

As configurações consideradas mais importantes serão listadas abaixo, devidamente acompanhadas de uma breve explicação de sua função, baseadas no manual do usuário do software Cura, bem como pelo guia prático de impressão 3D de Silva (2020).

A.2.1 Qualidade

O parâmetro qualidade é usado para controlar a altura das camadas de impressão, que geralmente variam entre 0.05mm e 0.3mm. Isso acaba definindo a qualidade da impressão, pois uma menor diferença de altura entre camadas gera uma melhor resolução, analogamente à maneira como pixels funcionam em uma imagem. Também é interessante utilizar uma maior altura apenas para a primeira camada, garantindo uma melhor aderência à mesa de impressão.

Uma novidade interessante nos softwares fatiadores é a opção de altura adaptativa das camadas. No *Cura*, ela fica localizada na seção “opções experimentais” e funciona adaptando camadas maiores para superfícies verticais simples e menores onde existem detalhes e diferentes inclinações, otimizando o tempo de impressão e qualidade da peça. As características das camadas adaptativas são definidas, por exemplo, pela altura média das camadas e diferença máxima entre uma camada e outra.

A.2.2 Paredes, topo e base

As configurações de parede, topo e base definem a largura da “casca” da peça (limites, invólucro), melhorando sua aparência e resistência. Um valor padrão é calculado automaticamente pelo programa dependendo da peça, material e outros parâmetros definíveis. Esse valor geralmente é aceitável e não são necessárias muitas alterações.

Uma solução encontrada para muitos problemas encontrados durante a impressão das peças durante essa pesquisa foram as configurações de compensação da deformação térmica dos materiais. A compensação horizontal negativa melhora um problema chamado “*elephant foot*” onde as camadas inferiores se expandem devido à compressão das camadas mais elevadas em peças maiores. A expansão de furos também é muito útil, para garantir que a tolerância de encaixes, de parafusos por exemplo, seja suficiente.

A.2.3 Infill

Infill, ou preenchimento, é a porcentagem preenchida no interior da peça. O valor de 0% equivale a uma peça oca e o valor de 100% a uma peça maciça. Nesta seção existe a possibilidade de escolher o formato da rede de filamento no interior da peça. Claramente a densidade é dependente da porcentagem escolhida, mas diferentes padrões podem apresentar diferentes propriedades mecânicas. Existem formatos simples, como linhas e zigzagues, e formatos complexos, como giróides e polígonos tridimensionais. A escolha do padrão é feita de acordo com a preferência do usuário e função da peça. Novas opções são comumente adicionadas conforme vão sendo desenvolvidas em pesquisas mais recentes.

Ainda nesta seção cabe ressaltar um detalhe importante: durante os testes, verificou-se que, nas impressões em TPU, a parede da peça se separava do infill facilmente, principalmente quando a peça era flexionada. Isso foi solucionado aumentando a porcentagem de sobreposição, na função “*infill overlap*”, criando uma conexão mais firme entre o interior e exterior da peça.

A.2.4 Material

Esta é uma das opções mais importantes. Nesta seção são definidas as temperaturas de operação do bico aquecido e da mesa, que dependem do tipo de material utilizado, sendo comumente indicadas por seu fabricante. Para uma melhor aderência à mesa, é prudente selecionar uma temperatura superior a padrão por alguns graus, tomando-se cuidado para evitar o empenamento da base, que pode ocorrer devido à deformação do material ao resfriar de forma desigual, ou escorregar devido a passar muito tempo em temperaturas superiores à sua temperatura de fusão.

A.2.5 Velocidade

Deve ser escolhida a velocidade com que se move o bico tanto quando está imprimindo quanto quando está apenas se deslocando entre pontos. Uma maior velocidade pode reduzir a qualidade da peça, mas reduz significativamente o tempo de impressão e evitam um defeito conhecido como *stringing*, onde fios similares a fios de cabelo são formados na superfície da peça. Para obter um maior controle, podem ser definidas diferentes velocidades para cada etapa da impressão.

A.2.6 Deslocamento

O fator mais importante a se atentar nesta seção é a função de retração, onde é definida a velocidade e distância que o filamento é “puxado” de volta, quando são necessários “saltos” e mudanças de camadas.

A.2.7 Resfriamento

O funcionamento do cooler é controlado por uma porcentagem de sua velocidade máxima. Dependendo do material e do tipo de peça a ser impressa, é mais interessante deixar a peça um pouco mais quente, com uma melhor conexão entre camadas; ou mais fria, quando as camadas sofrem menor deformação, caso típico de pontes ou superfícies muito inclinadas.

A.2.8 Suporte e Adesão

As duas últimas seções controlam o apoio da peça na mesa. Suportes são utilizados para superfícies inclinadas ou horizontais e são removidos posteriormente. Portanto, posições de impressão que evitam um excesso de suportes economizam tempo e material.

O suporte pode ser simples ou do tipo árvore. Implementado nas versões mais recentes do Cura, o suporte árvore usa uma estrutura orgânica, reduzindo o consumo de material.

A seção de adesão, por sua vez, é usada para fixar a peça à mesa. Quanto mais superfície tocar a mesa, melhor a peça vai aderir, precisando de tipos menos robustos de adesão, os quais podem ser *skirt*, *brim* e *raft*, indo do menos para o mais efetivo. Apesar de melhorar a aderência, assim como os suportes, essas estruturas devem ser removidas após a impressão e podem gerar superfícies defeituosas, além de aumentar o consumo de material.

A.2.9 Experimentais

Nesta seção se encontram novidades, ainda não completamente testadas, mas úteis o suficiente para disponibilizar para usuários mais aventureiros testarem.

Aqui se encontra a opção de altura de camada adaptativa descrita acima, e uma outra função utilizada durante a pesquisa, chamada *fuzzy skin*, que cria uma

superfície rugosa nas peças, melhorando a textura para partes onde ocorrerá o contato dos usuários, por exemplo.

APÊNDICE B – Folhas de Cálculo

Apêndice B

B.1 - Cálculo das dimensões para falhar por escoamento da seção bruta:

Tensão de escoamento:	Tensão de Ruptura:	Diâmetro do Parafuso:
$f_y := 10.2 \text{ MPa}$	$f_u := 20.3 \text{ MPa}$	$db := 3 \text{ mm}$
		$df := 3.3 \text{ mm}$
Módulo de Elasticidade:	Coefficientes:	
$E := 780.15 \text{ MPa}$	$\gamma := 1$ $Ct := 1$	

Escoamento da Seção Bruta:

$$b := 20 \text{ mm}$$
$$t := 0.6 \text{ mm}$$

$$Ag := b \cdot t = 12 \text{ mm}^2$$

$$Nb := \frac{Ag \cdot f_y}{\gamma} = 12.481 \text{ kgf}$$

Ruptura da Seção Líquida:

$$b := 20 \text{ mm}$$
$$t := 1 \text{ mm}$$
$$np := 2$$
$$s := 1 \text{ mm}$$
$$g := 3.5 \text{ mm}$$
$$ne := 0$$

$$An := \left(b - (np \cdot (df)) + \left((ne) \cdot \left(\frac{s^2}{4g} \right) \right) \right) \cdot t = 13.4 \text{ mm}^2$$

$$Ae := An \cdot Ct = 13.4 \text{ mm}^2$$

$$Nl := \frac{Ae \cdot f_u}{\gamma} = 27.738 \text{ kgf}$$

Pressão de Contato:

$$lf := 10 \text{ mm}$$

$$Fcrdmax := 2.4 \cdot db \cdot t \cdot f_u = 14.904 \text{ kgf}$$

$$Fcrd := 1.2 \cdot lf \cdot t \cdot f_u = 24.84 \text{ kgf}$$

Apêndice B

B.2 - Cálculo das dimensões para falhar por ruptura da seção líquida:

Tensão de escoamento: $fy := 10.2 \text{ MPa}$ Tensão de Ruptura: $fu := 20.3 \text{ MPa}$ Diâmetro do Parafuso:
 $db := 3 \text{ mm}$
 $df := 3.3 \text{ mm}$

Módulo de Elasticidade: $E := 780.15 \text{ MPa}$ Coeficientes:
 $\gamma := 1$ $Ct := 1$

Escoamento da Seção Bruta:

$b := 15 \text{ mm}$
 $t := 1 \text{ mm}$

$$Ag := b \cdot t = 15 \text{ mm}^2$$

$$Nb := \frac{Ag \cdot fy}{\gamma} = 15.602 \text{ kgf}$$

Ruptura da Seção Líquida:

$b := 15 \text{ mm}$
 $t := 1 \text{ mm}$
 $np := 3$
 $s := 4.5 \text{ mm}$
 $g := 4.5 \text{ mm}$
 $ne := 2$

$$An := \left(b - (np \cdot (df)) + \left((ne) \cdot \left(\frac{s^2}{4g} \right) \right) \right) \cdot t = 7.35 \text{ mm}^2$$

$$Ae := An \cdot Ct = 7.35 \text{ mm}^2$$

$$Nl := \frac{Ae \cdot fu}{\gamma} = 15.215 \text{ kgf}$$

$b := 15 \text{ mm}$
 $t := 1 \text{ mm}$
 $np := 2$
 $s := 0 \text{ mm}$
 $g := 9 \text{ mm}$
 $ne := 0$

$$An := \left(b - (np \cdot (df)) + \left((ne) \cdot \left(\frac{s^2}{4g} \right) \right) \right) \cdot t = 8.4 \text{ mm}^2$$

$$Ae := An \cdot Ct = 8.4 \text{ mm}^2$$

$$Nl := \frac{Ae \cdot fu}{\gamma} = 17.388 \text{ kgf}$$

Pressão de Contato:

$$lf := 7.5 \text{ mm}$$

$$Fcrdmax := 3 \cdot db \cdot t \cdot fu = 18.63 \text{ kgf}$$

$$Fcrd := 1.5 \cdot lf \cdot t \cdot fu = 23.288 \text{ kgf}$$

Apêndice B

B.3 - Cálculo das dimensões para falhar por pressão de contato:

Tensão de escoamento: $f_y := 10.2 \text{ MPa}$ Tensão de Ruptura: $f_u := 20.3 \text{ MPa}$ Diâmetro do Parafuso:
 $db := 3 \text{ mm}$
 $df := 3.3 \text{ mm}$

Módulo de Elasticidade: $E := 780.15 \text{ MPa}$ Coeficientes:
 $\gamma := 1$ $Ct := 1$

Escoamento da Seção Bruta:

$b := 25 \text{ mm}$
 $t := 0.8 \text{ mm}$

$$Ag := b \cdot t = 20 \text{ mm}^2$$

$$Nb := \frac{Ag \cdot f_y}{\gamma} = 20.802 \text{ kgf}$$

Ruptura da Seção Líquida:

$b := 25 \text{ mm}$
 $t := 0.8 \text{ mm}$
 $np := 2$
 $s := 4.5 \text{ mm}$
 $g := 4.5 \text{ mm}$
 $ne := 0$

$$An := \left(b - (np \cdot (df)) + \left((ne) \cdot \left(\frac{s^2}{4g} \right) \right) \right) \cdot t = 14.72 \text{ mm}^2$$

$$Ae := An \cdot Ct = 14.72 \text{ mm}^2$$

$$Nl := \frac{Ae \cdot f_u}{\gamma} = 30.471 \text{ kgf}$$

Pressão de Contato:

$$lf := 3.5 \text{ mm}$$

$$Fcrdmax := 3 \cdot db \cdot t \cdot f_u = 14.904 \text{ kgf}$$

$$Fcrd := 1.5 \cdot lf \cdot t \cdot f_u = 8.694 \text{ kgf}$$

$$2 \cdot Fcrd = 17.388 \text{ kgf}$$

$$4 \cdot Fcrd = 34.776 \text{ kgf}$$

Apêndice B

B.4 - Cálculo das dimensões para falhar por cisalhamento em bloco:

Tensão de escoamento: $f_y := 10.2 \text{ MPa}$ Tensão de Ruptura: $f_u := 20.3 \text{ MPa}$ Diâmetro do Parafuso:
 $db := 3 \text{ mm}$
 $df := 3.3 \text{ mm}$

Módulo de Elasticidade: $E := 780.15 \text{ MPa}$ Coeficientes: $\gamma := 1$ $Ct := 1$

Escoamento da Seção Bruta:

$$b := 20 \text{ mm}$$

$$t := 0.8 \text{ mm}$$

$$Ag := b \cdot t = 16 \text{ mm}^2$$

$$Nb := \frac{Ag \cdot f_y}{\gamma} = 16.642 \text{ kgf}$$

Ruptura da Seção Líquida:

$$b := 20 \text{ mm}$$

$$t := 0.8 \text{ mm}$$

$$np := 1$$

$$s := 1 \text{ mm}$$

$$g := 3.5 \text{ mm}$$

$$ne := 0$$

$$An := \left(b - (np \cdot (df)) + \left((ne) \cdot \left(\frac{s^2}{4g} \right) \right) \right) \cdot t = 13.36 \text{ mm}^2$$

$$Ae := An \cdot Ct = 13.36 \text{ mm}^2$$

$$Nl := \frac{Ae \cdot f_u}{\gamma} = 27.656 \text{ kgf}$$

Cisalhamento em Bloco:

$$l_r := 10.95 \text{ mm} \quad n := 2$$

$$Agv := t \cdot l_r = 8.76 \text{ mm}^2$$

$$Anv := t \cdot (l_r - (n \cdot df)) = 3.48 \text{ mm}^2$$

$$Ant := t \cdot 0.8 \text{ mm} = 0.64 \text{ mm}^2$$

$$F_{cmax} := (0.6 \cdot f_y \cdot Agv) + (Ct \cdot f_u \cdot Ant) = 6.792 \text{ kgf}$$

$$Fc := (0.6 \cdot f_u \cdot Anv) + (Ct \cdot f_u \cdot Ant) = 5.647 \text{ kgf}$$

Pressão de Contato:

$$lf := 3 \text{ mm}$$

$$F_{crdmax} := 3 \cdot db \cdot t \cdot f_u = 14.904 \text{ kgf}$$

$$F_{crd} := 1.5 \cdot lf \cdot t \cdot f_u = 7.452 \text{ kgf}$$

Apêndice B

B.5 - Cálculo das dimensões para falhar por flambagem local da alma e mesa:

Tensão de escoamento:

$$f_y := 5 \text{ MPa}$$

Módulo de Elasticidade: Coeficientes:

$$E := 110 \text{ MPa} \quad \gamma := 1$$

AA Grupo 2:

$$b_{lim} := 1.49 \cdot \sqrt{\left(\frac{E}{f_y}\right)} = 6.989 \frac{\text{mm}}{\text{mm}}$$

$$b := 10 \text{ mm}$$

$$t := 1 \text{ mm}$$

$$b_t := \frac{b}{t} = 10 \frac{\text{mm}}{\text{mm}}$$

$$b_{ef} := 1.92 \cdot t \cdot \sqrt{\left(\frac{E}{f_y}\right)} \cdot \left(1 - \left(\frac{0.34}{\left(\frac{b}{t}\right)} \cdot \sqrt{\left(\frac{E}{f_y}\right)}\right)\right) = 7.569 \text{ mm}$$

$$A_g := b \cdot t = 10 \text{ mm}^2$$

$$A_{ef} := A_g - ((b - b_{ef}) \cdot t) = 7.569 \text{ mm}^2$$

$$Q_a := \frac{A_{ef}}{A_g} = 0.757 \frac{\text{mm}^2}{\text{mm}^2}$$

AL Grupo 4:

$$b_{lim} := 0.56 \cdot \sqrt{\left(\frac{E}{f_y}\right)} = 2.627 \frac{\text{mm}}{\text{mm}}$$

$$b := 5 \text{ mm}$$

$$t := 1 \text{ mm}$$

$$b_t := \frac{b}{t} = 5 \frac{\text{mm}}{\text{mm}}$$

$$1.03 \cdot \sqrt{\left(\frac{E}{f_y}\right)} = 4.831 \frac{\text{mm}}{\text{mm}}$$

$$Q_{s1} := 1.415 - \left(0.74 \cdot \frac{b}{t} \cdot \sqrt{\frac{f_y}{E}}\right) = 0.626 \quad Q_{s2} := \frac{0.69 \cdot E}{f_y \cdot \left(\frac{b}{t}\right)^2} = 0.607$$

$$Q := Q_a \cdot Q_{s2} = 0.46$$

$$b_a := 1 \text{ mm} \quad h_a := 10 \text{ mm}$$

$$b_m := 10 \text{ mm} \quad h_m := 1 \text{ mm}$$

$$A := (b_a \cdot h_a) + 2 \cdot (b_m \cdot h_m) = 30 \text{ mm}^2$$

$$I_a := \frac{b_a \cdot h_a^3}{12} = 83.333 \text{ mm}^4 \quad I_m := \frac{b_m \cdot h_m^3}{12} = 0.833 \text{ mm}^4$$

$$I_x := I_a + \left(2 \cdot \left(I_m + \left(b_m \cdot h_m \right) \cdot \left(\frac{h_a}{2} + \frac{h_m}{2} \right)^2 \right) \right) = 690 \text{ mm}^4$$

$$I_a := \frac{h_a \cdot b_a^3}{12} = 0.833 \text{ mm}^4 \quad I_m := \frac{h_m \cdot b_m^3}{12} = 83.333 \text{ mm}^4$$

$$I_y := I_a + (2 \cdot I_m) = 167.5 \text{ mm}^4$$

$$K_x := 1 \quad L_x := 100 \text{ mm}$$

$$K_y := 1 \quad L_y := 100 \text{ mm}$$

$$N_{ex} := \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_x}{(K_x \cdot L_x)^2} = 7.639 \text{ kgf}$$

$$N_{ey} := \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{(K_y \cdot L_y)^2} = 1.854 \text{ kgf}$$

$$\lambda_0 := \sqrt{\frac{Q \cdot Ag \cdot fy}{N_{ey}}} = 1.124$$

$$\chi_1 := 0.658^{\lambda_0^2} = 0.589$$

$$\chi_2 := \frac{0.877}{\lambda_0^2} = 0.694$$

$$N_{cRd} := \frac{\chi_1 \cdot Q \cdot Ag \cdot fy}{\gamma} = 1.381 \text{ kgf}$$

$$\lambda := \frac{K_y \cdot L_y}{\sqrt{\frac{I_y}{A}}} = 42.321 \quad \sigma_e := \frac{\pi^2 \cdot E}{\lambda^2} = 0.606 \text{ MPa}$$

APÊNDICE C – Configurações de Impressão

C.1 CONFIGURAÇÕES DE IMPRESSÃO

Cada modelo possui suas próprias configurações de impressão, ainda que muitas coincidam devido a utilização do mesmo material, suas posições, dimensões e funções determinam a utilização de estruturas de adesão à mesa, suportes e densidade, também deve-se ressaltar a necessidade de ajustar a resolução de impressão dependendo da presença de ângulos e curvas, reduzindo a altura das camadas para peças que precisem de maior resolução. A seguir estão exemplos de peças impressas com cada tipo de material, porém é importante avaliar cada impressora e peça separadamente para determinar as características a serem utilizadas. Nos três exemplos a seguir podem ser verificadas as características utilizadas para diversas situações, cabendo ao usuário da impressora determinar a utilização ou não dessas configurações para cada peça.

C.2 Configurações padrão para cada material

A estrutura da catraca foi impressa em PLA com as seguintes configurações:

- Qualidade:
 - Altura da camada: 0.3mm
 - Altura da primeira camada: 0.3mm
 - Largura da linha: 0.4mm
- Paredes:
 - Largura da parede: 1.2mm
 - Número de linhas na parede: 3
 - Imprimir paredes finas: ✓
 - Expansão horizontal: 0.0mm
 - Expansão horizontal da primeira camada: -0.4mm
 - Expansão horizontal de furos: 0.3mm
 - Alinhamento da costura em Z: Canto mais agudo
- Topo/Base:
 - Espessura do Topo/Base: 1.3mm
 - Camadas do topo: 5
 - Camadas da base: 5
 - Padrão do Topo/Base: Linhas
 - Padrão da primeira camada: Linhas
 - Percentual de sobreposição da pele: 5%
- Preenchimento:
 - Densidade: 100%
 - Padrão: Linhas

- Percentual de sobreposição do preenchimento: 15%
- Material
 - Temperatura de Impressão: 205°C
 - Temperatura de impressão da primeira camada: 210°C
 - Temperatura da mesa de Impressão: 60°C
 - Temperatura da mesa de impressão na primeira camada: 60°C
 - Fluxo: 100%
- Velocidade
 - Velocidade de impressão: 50mm/s
 - Velocidade de deslocamento: 100mm/s
 - Velocidade da primeira camada: 20mm/s
 - Número de camadas mais lentas: 3
- Deslocamento
 - Retração: ✓
 - Distância de retração: 6mm
 - Velocidade de retração: 30mm/s
 - Salto em Z quando retraído: ✓
- Resfriamento:
 - Resfriamento: ✓
 - Velocidade do ventilador: 60%
 - Velocidade inicial do ventilador: 30%
 - Velocidade normal do ventilador na camada: 3
- Suporte:
 - Gerar suporte: ✓
 - Estrutura do suporte: Árvore
 - Posição do suporte: Tocando a mesa de impressão
 - Ângulo para suporte: 60°
 - Distância do suporte em Z: 0.2mm
 - Densidade do teto: 33%
- Adesão à mesa de impressão
 - Tipo de adesão: Borda
 - Distância da borda: 0.4mm
 - Borda apenas no exterior: ✓

As peças para verificar o modo de falha foram impressas em PETG com as seguintes configurações:

- Qualidade:
 - Altura da camada: 0.2mm
 - Altura da primeira camada: 0.3mm
 - Largura da linha: 0.4mm
- Paredes:
 - Largura da parede: 1.2mm
 - Número de linhas na parede: 3
 - Imprimir paredes finas: ✓
 - Expansão horizontal: 0.0mm
 - Expansão horizontal da primeira camada: -0.4mm

- Expansão horizontal de furos: 0.3mm
- Alinhamento da costura em Z: Canto mais agudo
- Topo/Base:
 - Espessura do Topo/Base: 1.3mm
 - Camadas do topo: 5
 - Camadas da base: 5
 - Padrão do Topo/Base: Linhas
 - Padrão da primeira camada: Linhas
 - Percentual de sobreposição da pele: 5%
- Preenchimento:
 - Densidade: 100%
 - Padrão: Linhas
 - Percentual de sobreposição do preenchimento: 15%
- Material
 - Temperatura de Impressão: 235°C
 - Temperatura de impressão da primeira camada: 240°C
 - Temperatura da mesa de Impressão: 80°C
 - Temperatura da mesa de impressão na primeira camada: 85°C
 - Fluxo: 100%
- Velocidade
 - Velocidade de impressão: 60mm/s
 - Velocidade de deslocamento: 150mm/s
 - Velocidade da primeira camada: 30mm/s
 - Número de camadas mais lentas: 2
- Deslocamento
 - Retração: ✓
 - Distância de retração: 7mm
 - Velocidade de retração: 30mm/s
 - Salto em Z quando retraído: ✗
- Resfriamento:
 - Resfriamento: ✓
 - Velocidade do ventilador: 60%
 - Velocidade inicial do ventilador: 0%
 - Velocidade normal do ventilador na camada: 5
- Suporte:
 - Gerar suporte: ✗
- Adesão à mesa de impressão
 - Tipo de adesão: Saia
 - Número de linhas: 3
 - Distância da saia: 2mm

A peça para verificar a falha por escoamento da seção bruta também foram impressas em TPU com as seguintes configurações:

- Qualidade:
 - Altura da camada: 0.2mm
 - Altura da primeira camada: 0.3mm
 - Largura da linha: 0.4mm
- Paredes:

- Largura da parede: 1.2mm
- Número de linhas na parede: 3
- Imprimir paredes finas: ✓
- Expansão horizontal: 0.0mm
- Expansão horizontal da primeira camada: -0.4mm
- Expansão horizontal de furos: 0.2mm
- Alinhamento da costura em Z: Canto mais agudo
- Topo/Base:
 - Espessura do Topo/Base: 1.3mm
 - Camadas do topo: 5
 - Camadas da base: 5
 - Padrão do Topo/Base: Linhas
 - Padrão da primeira camada: Linhas
 - Percentual de sobreposição da pele: 80%
- Preenchimento:
 - Densidade: 100%
 - Padrão: Linhas
 - Percentual de sobreposição do preenchimento: 80%
- Material
 - Temperatura de Impressão: 230°C
 - Temperatura de impressão da primeira camada: 235°C
 - Temperatura da mesa de Impressão: 0°C
 - Temperatura da mesa de impressão na primeira camada: 0°C
 - Fluxo: 100%
- Velocidade
 - Velocidade de impressão: 50mm/s
 - Velocidade de deslocamento: 100mm/s
 - Velocidade da primeira camada: 20mm/s
 - Número de camadas mais lentas: 2
- Deslocamento
 - Retração: ✓
 - Distância de retração: 6mm
 - Velocidade de retração: 30mm/s
 - Salto em Z quando retraído: ✓
- Resfriamento:
 - Resfriamento: ✓
 - Velocidade do ventilador: 100%
 - Velocidade inicial do ventilador: 30%
 - Velocidade normal do ventilador na camada: 3
- Suporte:
 - Gerar suporte: ✗
- Adesão à mesa de impressão
 - Tipo de adesão: Saia
 - Número de linhas: 3
 - Distância da saia: 2mm

Informações adicionais:

Como recomendado para a morsa mecânica impressa em PLA, uma densidade de 35% é suficiente para suportar as forças que ocorrerão durante seu uso. Com isso foram utilizadas as seguintes configurações:

- Preenchimento:
 - Densidade: 35%
 - Padrão: Zig Zag
 - Percentual de sobreposição do preenchimento: 15%

As peças que possuírem “pontes”, “balanços” ou declividade negativa superior a 60% necessitam de suportes e peças muito alongadas ou muito altas precisam de borda para garantir uma melhor aderência à mesa e evitar empenamento. Além disso, para peças onde os furos não são encaixes, pode ser utilizada uma compensação de expansão horizontal de furos de 0.2mm. Peças com superfícies arredondadas ou que necessitam de melhor acabamento podem ser impressas com uma altura de camada de 0.1mm, porém se forem constituídas apenas de paredes perpendiculares à mesa, uma resolução de 0.2mm por camada é suficiente.