

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DIRETORIA DE GRADUAÇÃO E EDUCAÇÃO PROFISSIONAL
BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**ACADÊMICO: MARCOS FERNANDO TRUIZ
ORIENTADOR: WALTER ANIBAL RAMMAZZINA FILHO**

**ESTUDO E PROJETO DE AEROMODELOS FABRICADOS
VIA IMPRESSÃO 3D E COMPARAÇÃO COM MODELOS
CONVENCIONAIS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CORNÉLIO PROCÓPIO

2015

MARCOS FERNANDO TRUIZ

**ESTUDO E PROJETO DE AEROMODELOS FABRICADOS
VIA IMPRESSÃO 3D E COMPARAÇÃO COM MODELOS
CONVENCIONAIS**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina Trabalho de conclusão de curso, do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel.

CORNÉLIO PROCÓPIO

2015

Dedico este trabalho aos meus pais, minha irmã e amigos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador Prof. Me. Walter Anibal Rammazzina Filho, pela sabedoria com que me guiou nesta trajetória e pelos conhecimentos transmitidos.

Aos meus amigos Ingrid Mello, Flávia Gehring, Matheus Lustosa, Emilie Moralles, Victor Hugo Bassetto, Mariella Bassetto, Marcus Koslovski, Eduardo Araujo, Samuel Rias, Adelma Perim, Renato Pascon Occik, Ana Luisa Funari, Gabriel Dominissi, Paola Vieira, Luis Eugenio Deliberador, Matheus Polo, Victor Bahls e Vinicius Geraldo Doi por todo apoio que me foi dado durante a elaboração deste trabalho e durante toda a minha faculdade.

Em especial agradeço à minha mãe Marcia Fugisawa, ao meu pai Luiz Carlos Dagnoni Truiz, minha irmã Camila Fernanda Truiz, pelo incentivo e apoio constante durante os 5 anos de faculdade. Agradeço também a Marisa Fugisawa Garani e Bruna Bardi, sem elas esse trabalho seria impossível.

Enfim, a todos os que, por algum motivo, contribuíram para a realização desta pesquisa.

“É necessário sempre acreditar que um sonho é possível, que o céu é o limite e você é imbatível.” Mano Brown.

Resumo

TRUIZ, M. F. Estudo e projeto de aeromodelos fabricados via impressão 3D e comparação com modelos convencionais. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, Paraná. 2015.

Com o auxílio da prototipagem rápida é possível se obter alta repetibilidade, confecção de peças com alta complexidade, tempo de confecção menor se comparado a um processo manual de corte. Por outro lado, a confecção de aeromodelos de forma manual apresenta certos problemas como alto custo, necessidade de habilidades com o manuseio de madeira balsa e outros materiais frágeis, baixa repetibilidade e alto tempo de confecção das peças.

A partir dos corpos de prova confeccionados em madeira balsa e ABS, foi possível observar por meio de testes que a madeira possui maior resistência a tração. Por outro lado, o ABS possui maior alongamento. Do ponto de vista da massa, o modelo em ABS apresentou um acréscimo de, aproximadamente, 77% de massa. Também foi analisado o custo final de cada um dos modelos, onde o ABS apresentou uma redução de quase 51% no valor do modelo final. Com tais fatos, foi possível afirmar que a confecção de um aeromodelo impresso tridimensionalmente com ABS mostra-se inviável.

Palavras-chave: prototipagem rápida, aeromodelos, ensaios mecânicos.

Abstract

TRUIZ, M. F. Study and project of aeromodels made by 3D printing and compared to conventional models. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, Paraná. 2015.

With the aid of rapid prototyping is possible to obtain high repeatability, production of parts with high complexity, shorter production time compared to a manual cutting process. Moreover, the manufacture of airplanes manually presents certain problems such as high cost, need for skill with balsa wood handling and other fragile materials, low repeatability and high production time of the parts.

From the specimens made of balsa wood and ABS, it was observed by testing the wood has greater tensile strength. On the other hand, ABS has greater elongation. From the weight viewpoint the model presented ABS in an increase of approximately 77% by weight. The final cost of each model, where the ABS decreased by nearly 51% in the value of the final model, was also evaluated. With these facts, it was possible to say that the production of a three-dimensional printed model airplane com ABS shows itself unfeasible.

Key words: Rapid Prototyping, aeromodels, mechanical tests

Lista de Figuras

Figura 1 - Representação do modelo CAD no fatiador.....	13
Figura 2 - Estrutura química do ABS	17
Figura 3 - Representação dos componentes básicos de um aeromodelo.....	19
Figura 4 – Gráfico de tensão por deformação e seus pontos principais	23
Figura 5 - Modelo de deformação do corpo de prova.....	24
Figura 6 - Fluxograma da metodologia da prototipagem rápida	27
Figura 7 - Corpo de prova ASTM D638.....	28
Figura 8 - Estrutura MDF 1	29
Figura 9 Estrutura MDF 2	30
Figura 10 - Estrutura MDF com base para mesa aquecida	31
Figura 11 - Motores de passo eixo X e Z.....	31
Figura 12 - Estrutura MDF com base para mesa aquecida e motores de passo para eixo X, Y e Z	32
Figura 13 - Correias presa na base para mesa aquecida	33
Figura 14 - Carrinho para extrusora no eixo X	33
Figura 15 - Extruder e idler	34
Figura 16 - Engrenagem e parafuso trator.....	34
Figura 17 - Extrusora	35
Figura 18 - Extrusora com bico aquecido.....	35
Figura 19 - Impressora Graber i3 pronta.....	36
Figura 20 - Fuselagem Frontal.....	37
Figura 21 - Cavernas 1, 2, 3 e 4.....	38

Figura 22 - Profundor	39
Figura 23 - Leme	39
Figura 24 - Haste da asa.....	40
Figura 25 - Perfil central da asa.....	40
Figura 26 - Perfil da asa.....	41
Figura 27 - Modelo final.....	41
Figura 28 - Peças do aeromodelo no software "Cura Engine"	42
Figura 29 - Peças impressas em madeira balsa.....	43
Figura 30 - Peças impressas em ABS	43
Figura 31 - Modelo pronto em ABS	44
Figura 32 - Modelo pronto em madeira balsa	44
Figura 33 - Corpos de prova em Madeira Balsa	45
Figura 34 - Corpos de prova em ABS maciço	46
Figura 35 - Corpos de prova ABS com preenchimento de 20%	46
Figura 36 - Gráfico tensão por deformação ABS maciço	47
Figura 37 - Gráfico tensão por deformação Madeira Balsa.....	48
Figura 38 - ABS com 20% de preenchimento	48

Sumário

1. Introdução	10
2. Objetivos	11
3. Revisão bibliográfica.....	12
4. Materiais e métodos	25
5. Análise e resultados.....	29
6. Conclusão	50
7. Análise de custos do trabalho.....	51
8. Referencias	52

1. Introdução

A impressão tridimensional é um processo inovador de prototipagem rápida que diminui o tempo de manufatura de modelos e de partes de protótipos e da fabricação de ferramentas de máquinas. A redução de tempo e custo proporcionada por essa impressão revolucionou a prototipagem e a manufatura (HEINZL; HERTZ, 1985). A impressora 3D pode ser utilizada para produção de peças específicas ou até mesmo de geometria complexa.

Atualmente a fabricação de aeromodelos, em sua maioria, limita-se a conformação plástica ou produção manual. Na conformação plástica, um processo industrial, valor unitário é menor e a velocidade de produção é mais elevada, porém o acabamento e a qualidade do material são comprometidos, tornando-se um aeromodelo frágil quando colide. Por outro lado, com a produção manual é possível buscar melhores acabamentos a partir de corte a laser de madeira, porém o tempo de confecção das peças é mais longo e a madeira balsa, a mais utilizada para este fim, é bastante frágil, apesar de extremamente leve. A impressão 3D consegue conciliar precisão e repetibilidade, tempo de confecção intermediário e confere alta resistência mecânica aos dispositivos confeccionados.

Com o auxílio de equipamentos de tração, é possível determinar a viabilidade da confecção de um aeromodelo do ponto de vista estrutural levando em conta o acréscimo de massa. Partindo de um mesmo modelo, também é possível determinar a viabilidade econômica desse tipo de confecção comparando o valor de cada método por volume de material.

2. Objetivos

2.1. Geral

Este trabalho visa realizar um comparativo entre um aeromodelo convencional, de madeira balsa, e o mesmo modelo produzido a partir de uma Impressora 3D Reprap Graber I3.

2.2. Específico

- Avaliar a viabilidade econômica de substituição da madeira balsa por peças impressas de ABS.
- Realizar análise de resistência mecânica e medição de massa.

3. Revisão bibliográfica

3.1. Impressão 3D

3.1.1. Fundamentação e histórico

Inúmeras empresas buscam a utilização da prototipagem rápida pois esta garante a visualização e testes preliminares os seus produtos de forma segura. Ela também permite a obtenção de peças com mesmo padrão de qualidade da produção em série. De fato, a prototipagem rápida é o processo de manufatura mais adequado possível quando se é necessário produzir pequenos lotes de peças ou também componentes específicos.

Segundo Ventola (2014), primeira impressora 3D foi desenvolvida por Chuck Hull, um norte-americano do estado da Califórnia, em meados de 1980, e foi chamada primeiramente de estereolitografia. Hull já era graduado em engenharia física e estava trabalhando na produção de peças feitas de plástico de fotorpolímeros para uma empresa da Califórnia. A estereolitografia usava a extensão STL para transformar arquivos CAD em arquivos capazes de serem reconhecidos pelo sistema eletrônico. Com o tempo e o desenvolvimento da tecnologia da prototipagem rápida, esses arquivos STL passaram a ter dados como cor e textura. Em 1988 iniciou-se a comercialização das impressoras 3D. O custo de fabricação e o avanço nos métodos de impressão têm tornado essas impressoras cada vez mais baratas. Na década de 90 era preciso dispendir em torno de um milhão de dólares por exemplar do equipamento. Vinte anos depois, existem modelos que podem ser adquiridos por até mil dólares, apenas, se comparado ao inicial. Em um futuro não muito distante, a tecnologia poderá estar disponível para grande parte da população, como a impressora convencional, podendo ser utilizada no dia a dia.

3.1.2. Etapas

Conforme Volpato (2007), a prototipagem rápida, também conhecida por impressão 3D, pode ser definida por um processo de fabricação automatizado de peças por deposição de material camada a camada. O mapeamento da cada camada é feito por um *software* que se comunica com a plataforma Arduino, que está acoplada à placa Remps (responsável pelo controle de cada

um dos componentes da impressora). Segundo Carnett (2010), a peça é produzida de baixo para cima, a partir da placa controladora de temperatura, de acordo com o seguinte processo: o plástico sólido entra pela extrusora, sofre aquecimento em um compartimento cerâmico, até chegar na resistência e se fundir, realizando a deposição pelo bico da extrusora e a impressão do objeto em três dimensões. A impressão é feita camada por camada a partir da programação gerida pelo programa Cura Engine, o qual fatia o objeto em várias camadas, que podem variar entre 0,1 mm e 0,5 mm.

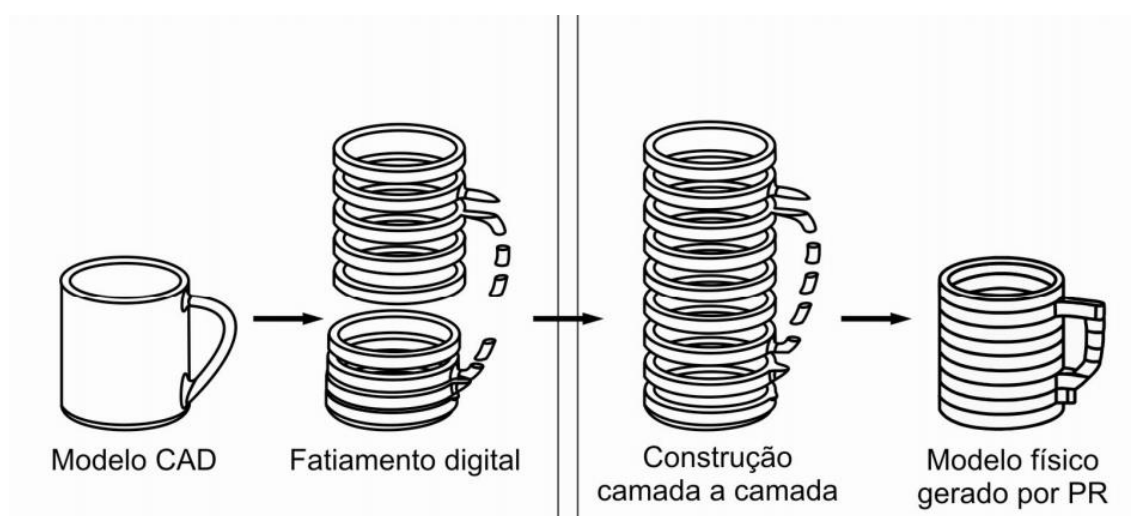


Figura 1 - Representação do modelo CAD no fatiador.

Fonte: Oliveira, M. F.

3.1.3. Propriedades e características

Essa tecnologia vem se destacando por não haver quase desperdício de matéria-prima se comparado aos processos de fabricação tradicionais por remoção de material. Segundo Casagrande (2013) pode-se classificar os tipos de prototipagem rápida conforme o estado físico da matéria-prima: no grupo de materiais líquidos os processos de estereolitografia (SL) e impressão a jato de tinta (IJP) Polyjet são os de maior destaque; já no grupo de materiais sólidos as tecnologias de modelagem por deposição de material fundido (FDM) e a impressão por jato de tinta (IJP) “Thermojet” são as principais; finalmente os processos de sinterização seletiva a laser (SLS) e impressão tridimensional indireta (3DP) são os destacados no grupo de materiais em base de pó. As

principais vantagens e desvantagens de cada processo podem ser observadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Vantagens e desvantagens dos diferentes tipos de Impressão 3D

Método de Impressão 3D	Vantagens	Desvantagens
FDM	Baixo custo, peças robustas, pouco desperdício e mínimo pós-tratamento.	Processo lento, peça porosa de baixa resolução, acabamento ruim.
SLA	Alta resolução e velocidade, e excelente acabamento, permitindo peças com boa transparência.	Material caro, frágil, sensível ao calor e umidade, tóxico antes da cura e o material deve ser polimérico.
SLS	Peças fortes, sem poros e uma variedade de materiais metálicos podem ser utilizados.	Equipamento de alto custo e consumo elevado, processo lento e acabamento ruim.
3DP	Alta velocidade, baixo custo e possibilidade de criar peças coloridas.	Produz peças frágeis, poucos materiais disponíveis e baixa qualidade superficial.

Fonte: Tomei, G. P. S.

Segundo Oliveira (2008), a prototipagem rápida por matéria-prima sólida está dividida em três partes: FDM (Fused Deposition Modeling, Stratasys Inc.), IJP (Thermojet) e IJP (Benchtop). Estes processos se diferenciam pelo tipo químico (cerâmico ou polimérico) e na forma do material (bloco ou filamento).

Quadro 2 - Diferença entre os tipos de PR por material sólido

Sólido: blocos ou fio de polímeros				
Tecnologia PR	Forma em que o material é dispensado	Forma da matéria-prima sólida	suporte	Natureza química da matéria prima
IJP (Thermojet)	sólido fundido	bloco	matéria-prima	cera, termopolímeros
IJP (benchtop)	sólido fundido	bloco	diferente	polímero
FDM	sólido fundido	fio	diferente	polímero

Fonte - Oliveira, M. F.

O FDM é o segundo processo mais utilizado, consistindo na deposição de um material termoplástico, o qual é fornecido à cabeça extrusora através de um rolo de filamento. As máquinas mais recentes possuem cabeças extrusoras

que se movem magneticamente a elevada velocidade, permitindo a construção dos modelos mais rapidamente. (Lino e Neto, 2002; Macedo, 2011). O FDM tem a vantagem de ser uma tecnologia barata e de fácil acesso, não precisando de muito investimento inicial (cerca de R\$1000,00) e nem de um amplo espaço para operar.

3.2. Materiais poliméricos

3.2.1. Fundamentação

Os polímeros são macromoléculas formadas por pequenas moléculas chamadas monômeros que se ligam covalentemente por meio de uma reação denominada polimerização. Podem ser classificadas em:

- Naturais, originados na natureza: látex, celulose.
- Sintéticas, obtidos através de reações químicas (polimerizações): PVC, ABS, nylon, acrílico.

A definição de polímeros conforme a IUPAC – International Union of Pure and Applied Chemistry – é:

Substância caracterizada por uma repetição múltipla de um ou mais espécies de átomos ou grupo de átomos unidos uns aos outros de maneira que mudanças na massa molar por acréscimo ou remoção de unidades monoméricas não altera as propriedades gerais

De acordo com a sua estrutura molecular os polímeros podem ser divididos em três grupos: termoplásticos, termorrígidos e elastômeros (Olivier, 2007)

Os termoplásticos são formados por cadeias bidimensionais unidas por forças secundárias fracas (força de Van der Waals), permitindo os movimentos individuais das cadeias. A medida em que são aquecidos, as ligações secundárias se enfraquecem. Tal propriedade torna possível a manipulação térmica do polímero, amolecendo quando aquecido e tornando-se rígido quando resfriado. Este processo é totalmente reversível (Olivier, 2007). Podem

ser conformados mecanicamente repetidas vezes, desde que sejam aquecidos. Exemplo: acrilonitrila butadieno estireno (ABS), polietileno de alta densidade (HDPE).

No caso dos termorrígidos, estes são infusíveis e insolúveis, ou seja, uma vez produzido, não permitem reprocessamento. Para este tipo de polímero, a elevação de temperatura leva a queima do material antes que a estrutura molecular sofra qualquer alteração, por este motivo, os termorrígidos não são recicláveis. Segundo Vernilli (2007) apresentam cadeias conectadas entre si por ramificações ou braços compartilhados. Assim, ligações químicas primárias (covalentes) são responsáveis pelas ligações cruzadas entre cadeias. A rigidez do material se deve a forte interação entre as cadeias. Exemplo: poliéster (PET), baquelite.

Os elastômeros são caracterizados por poderem variar significativamente suas dimensões sem sofrerem alterações moleculares, porém, são pouco resistentes se submetidos a energia na forma de calor. Borracha e silicone são exemplos de elastômeros.

3.2.2. Acrilonitrila butadieno estireno – ABS.

O ABS é um copolímero (provem da reação de dois ou mais monômeros) obtido através da reação entre a acrilonitrila e do estireno na presença do polibutadieno. É caracterizada por possuir alta resistência mecânica e flexibilidade.

Segundo Landi e Silva (2004) as resinas de ABS são termopolímeros formados por um componente elastomérico e dois componentes termoplásticos amorfos. Os componentes do terpomolímero possuem diferentes composições químicas e coexistem em duas fases. Em todos os modelos químicos de ABS, a fase contínua (matriz) consiste no copolímero de estireno e acrilonitrila (SAN) e em um elastômero baseado no butadieno formando a fase dispersa.

As principais características do ABS são: resistência química que varia de média a alta, rigidez alta, dureza alta, estabilidade dimensional excelente, contração de moldagem alta e propriedades dielétricas boas (SPERLING,

1996). Por isso é viável para vários campos de aplicação, como por exemplo: nas indústrias automobilística, eletrodomésticos, em embalagens de alimentos.

Devido ao fato de poder ser reaquecido e conformado sem que haja perda nas suas propriedades mecânicas, este polímero tornou-se um dos principais materiais utilizados na prototipagem rápida, permitindo, inclusive, a reciclagem de peças já confeccionadas.

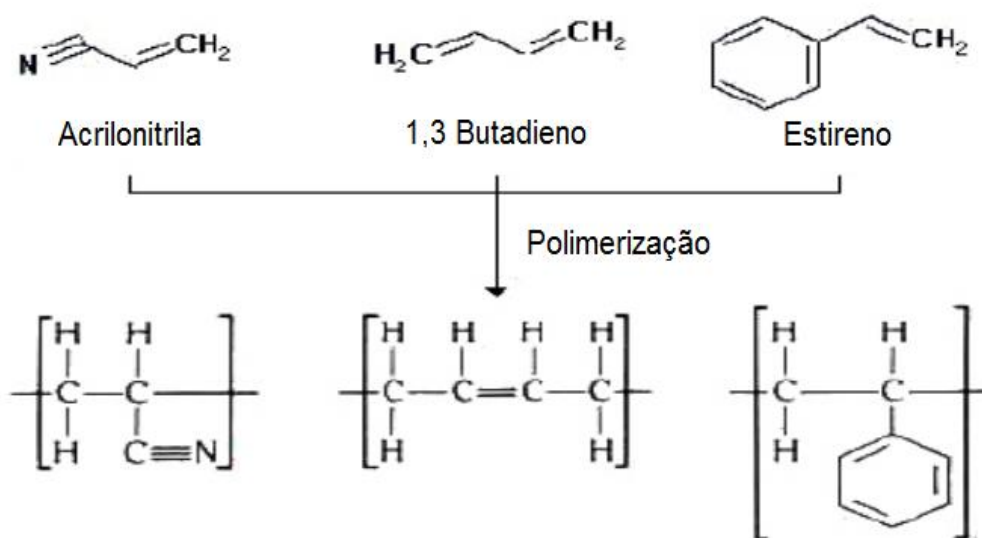


Figura 2 - Estrutura química do ABS
Fonte: Pinto, R. J. F.

3.3. Confeção de aeromodelos

3.3.1. Fundamentação e histórico

A primeira produção de aeromodelos em larga escala foi destinada para fins militares. Os primeiros registros da utilização de veículos aéreos não tripulados em cenário de guerra, de agosto de 1849, quando os austríacos atacaram a cidade italiana de Veneza com balões não tripulados carregando explosivos controlados por temporizadores. No entanto, a primeira produção em larga escala de VANTs (Veículos Aéreos Não-Tripulados) foi feita por Reginald Denny, que havia servido à Força Aérea Britânica na Primeira Guerra Mundial. Após a guerra ele imigrou para os Estados Unidos e montou as indústrias Reginald Denny, que produzia as aeronaves rádio-controladas. Como apresentado anteriormente, embora o aeromodelismo tenha surgido com

a finalidade de ser utilizado em ataques de guerra, com o passar do tempo passou a ser utilizado para outros fins.

Segundo a Confederação Brasileira de Aerodelismo (COBRA), o Aerodelismo é o conjunto de atividades que envolvem a construção e o vôo de modelos, em escala reduzida, de aeronaves e espaçonaves (aviões, balões, foguetes etc.). Conforme o Art 24º do Regulamento Geral da Confederação Brasileira de Aerodelismo (COBRA, 2007, p.5):

O aerodelismo é dividido em três modalidades em função da forma de prática, a saber:

I - VÔO LIVRE: É a prática do aerodelismo por arremesso manual sem uso de motores ou controles de rádio ou cabos;

II - VÔO CIRCULAR CONTROLADO (VCC): É a prática do aerodelismo com uso de motores e controlados através de cabos;

III - VÔO RÁDIO CONTROLADO (RC): É a prática do aerodelismo com uso de motores e controlados por rádio-freqüência;

Atualmente a categoria mais praticada de aerodelismo é o rádio controlado (RC), que se divide basicamente em duas modalidades, que se diferem pelo seu tipo de motor: combustão interna ou elétrico

Os aerodelos são construídos conforme as seguintes configurações:

- Asa - principal parte do avião que gera sustentação para o vôo.
- Trem de pouso – Suporte para as rodas e as rodas do avião. Podem ser retráteis, escondendo-se nas semi-asas.
- Fuselagem – Estrutura principal do avião, que une as asas ao conjunto de cauda.
- Aileron – Superfície móvel que faz o avião rolar para esquerda/direita no eixo da fuselagem.

- Leme – Superfície móvel apoiada sob a deriva, com o objetivo de guinar o avião para a esquerda ou direita.
- Profundor – Estrutura responsável por manter o vôo alinhado horizontalmente.

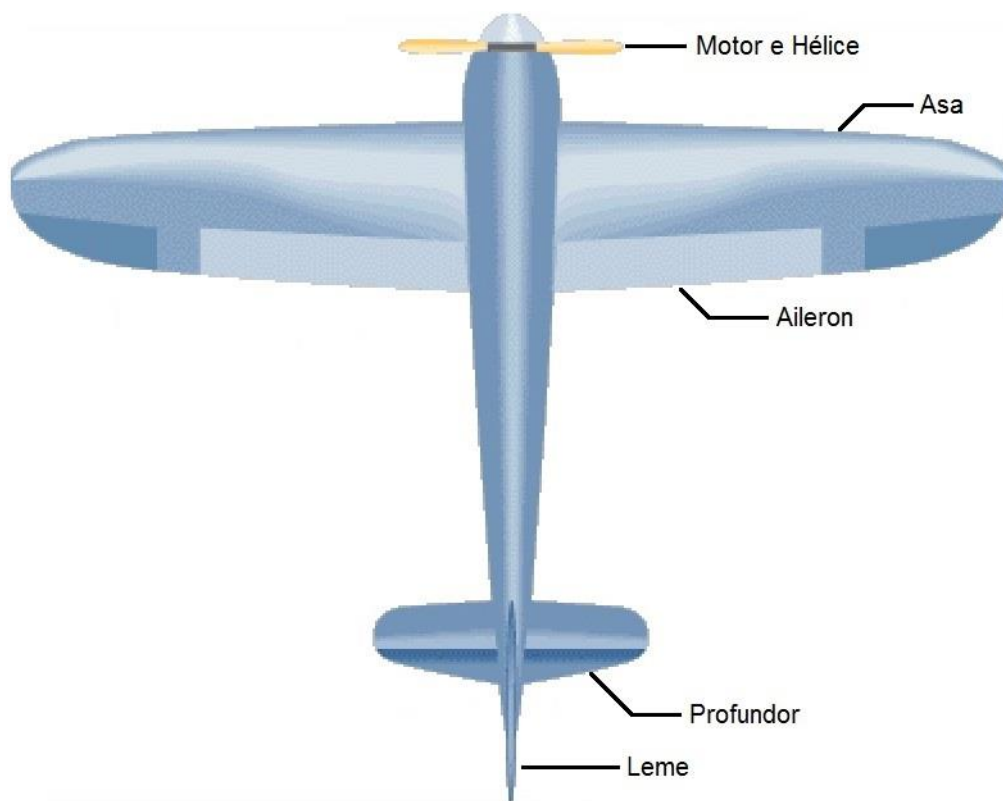


Figura 3 - Representação dos componentes básicos de um aeromodelo

Para fins de competição, os aeromodelos são objeto do estudo de alunos que participam do SAE AeroDesign. Realizada uma vez por ano na cidade de São José dos campos, é uma competição que reúne universitários de varias instituições e propõe, sob normas e critérios específico, que, na competição, sejam apresentadas aeronaves aptas a alçar vôos. As caraterísticas de produção do aeromodelo são de extrema importância para o sucesso na competição, e serão apresentadas a seguir.

3.3.2. Produção manual

A produção do VANT se divide em cinco fases: escolha do modelo, projeto, confecção, montagem e entelagem. A escolha no modelo deve ser algo bastante minucioso pois irá determinar a estabilidade aerodinâmica, velocidade de vôo e facilidade ou não em se praticar acrobacias. Basicamente existem três tipos: asa alta, asa média e asa baixa. No projeto deve-se prever ao máximo o que será feito nas próximas fases, desde a escala a ser utilizada, material para confecção das peças até o método de entelagem. Feito o projeto, deve-se começar a confecção das peças a partir do material pré-definido, o mais comum é a madeira balsa, derivada do pau-de-balsa, suas principais características estruturais são de estrutura leve, suave, de fácil crescimento, porém pouco resistente mecanicamente. Após a confecção é feita a montagem das peças e depois a entelagem da asa e da fuselagem, se necessário.

3.4. Impressão 3D na produção de aeromodelos

3.4.1. Aplicações da prototipagem rápida.

Buscando uma maneira rápida, prática e eficiente para modelagem de protótipos em diversas áreas, a impressão 3D tem sido uma ferramenta com resultados satisfatórios. Pode-se viabilizar a utilização desta tecnologia em áreas como a arquitetura e construção civil, medicina, fabricação de joias e até mesmo na gastronomia.

Segundo Celani (2009), a digitalização de imagens e impressão está relacionada em geral à produção de maquetes de edifícios históricos, ou à reprodução de elementos construtivos por meios automatizados em trabalhos de restauro. Um ornamento quebrado pode ser digitalizado, manipulado digitalmente para correção de seus defeitos e depois impresso. Também é possível encontrar a busca por contribuições da prototipagem rápida para a confecção de joias como apresenta Fonseca (2006): a prototipagem rápida é importante nas etapas de modelagem virtual e física, na confecção de moldes e na injeção de cera para a fundição das joias.

Na medicina a prototipagem rápida permite a manufatura de implantes personalizados e próteses anteriormente ao procedimento cirúrgico. Iniciando com imagens de tomografia computadorizadas e ou ressonância magnética, os implantes podem ser projetados especialmente para determinado paciente e com formas e propriedades mecânicas otimizadas (Bertol, 2008).

3.5. Ensaios de mecânicos

3.5.1. Fundamentação

Os ensaios mecânicos são utilizados para a quantificação de propriedades mecânicas como limite de escoamento, deformação plástica e elástica, limites de proporcionalidade, resiliência, resistência a tração e ruptura. Tais propriedades são relevantes para saber se um projeto deve ou não seguir a diante. Uma vez realizado os ensaios para determinar as propriedades mecânicas, é possível prever como uma estrutura em maior escala iria se comportar.

Dentre os parâmetros necessários para a realização dos ensaios mecânicos estão presentes: natureza da carga aplicada, duração de aplicação da carga e condições ambientais. Tudo isso é padronizado por norma conforme o tipo de material e tipo de ensaio. O ensaio utilizado neste trabalho será o de tração.

3.5.2. Propriedades mecânicas

- Deformação elástica: fase da deformação onde o material é capaz de recuperar-se totalmente após a remoção da carga. Além disso, a deformação elástica é independente do tempo, ou seja, quando há uma carga aplicada, a deformação elástica permanece constante durante o período em que a carga é mantida constante.
- Limite de proporcionalidade: ponto onde a deformação deixa de ser proporcional a carga aplicada. Representado na Figura 4 pelo ponto B.
- Limite de elasticidade: máxima tensão para deformação elástica.

- Resiliência: capacidade de absorver energia na fase elástica.
- Tenacidade: indica a sua resistência a deformação ou ruptura.
- Deformação plástica: deformação que ocorre após o limite de elasticidade, ou seja, deformações permanentes no corpo de prova.
- Limite de escoamento: ponto onde as deformações plásticas se tornam significativas.
- Limite de resistência a tração: máxima tensão suportada pelo material até o início de sua ruptura.
- Limite de ruptura: após o limite de resistência a tração, inicia-se a ruptura do material até sua ruptura por completo. A tensão suportada no limite de ruptura é menor se comparado ao limite de resistência a tração devido a diminuição da área transversal do corpo de prova.

3.5.3. Ensaio de tração

Consiste em submeter um corpo de prova, de dimensões determinadas por norma, a uma carga de tração axial crescente até a sua ruptura. Trata-se de um ensaio destrutivo, ou seja, após o ensaio o corpo de prova é destruído.

Segundo Dalcin (2007), é possível afirmar que as deformações sofridas pelo material são uniformemente distribuídas em todo o seu corpo até que o material atinja a carga máxima suportada. Durante a deformação elástica do material há uma região de proporcionalidade onde a deformação em razão da tensão são constantes, em outras palavras, o material obedece a lei de Hooke, tal região é caracterizada na Figura 1 pela reta OA. Após a deformação elástica, inicia-se a deformação plástica, regime onde há deformações permanentes no material devido a tensão extrapolar o limite de elasticidade.

Depois do limite de escoamento ser atingido, começa a aparecer o fenômeno de estrição do corpo de prova, representado por uma redução significativa na secção transversal. O início da ruptura pode ser observado pelo

ponto U da Figura 4, é possível também afirmar que o ponto U é caracterizado por determinar a tensão máxima suportada pelo material. A ruptura sempre se dá na região mais estreita do material, caso a mesma não ocorra na região de estricção significa que há uma falha interna no corpo de prova, invalidando o ensaio.

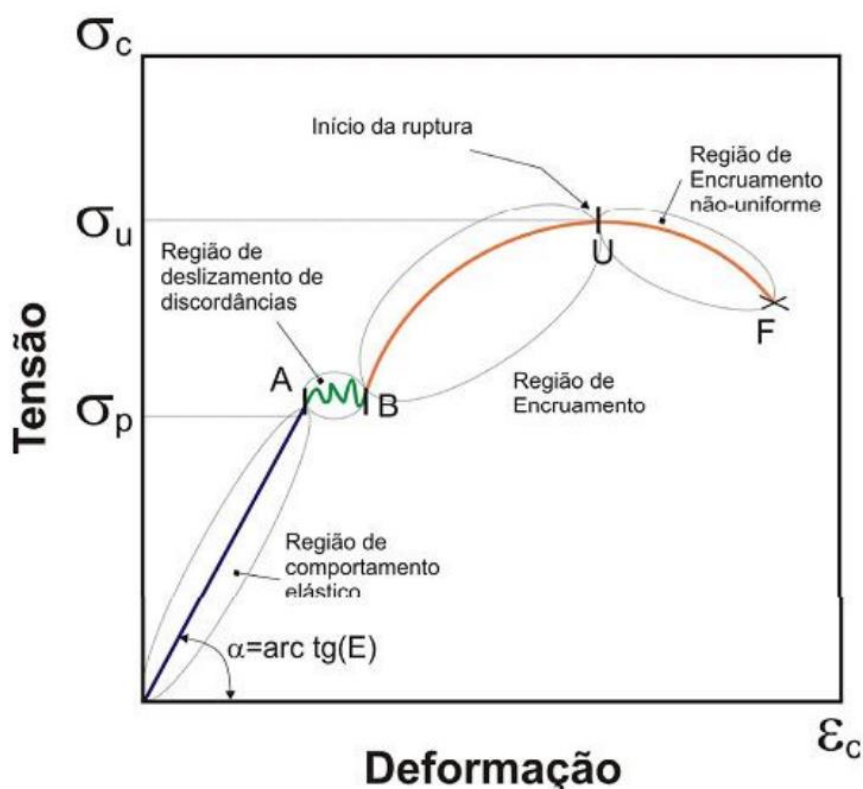


Figura 4 – Gráfico de tensão por deformação e seus pontos principais
Fonte: DALCIN, G.

O corpo de prova é preso pelas extremidades nas garras de fixação do dispositivo de teste. Enquanto o corpo de prova é alongado uniformemente, há um extensômetro no dispositivo de teste responsável por quantificar as deformações sofridas pela peça ao mesmo tempo que monitora a força uniaxial aplicada este processo é descrito por Garcia (2000). Todos esses dados são utilizados para gerar um gráfico tensão-deformação como na Figura 4.

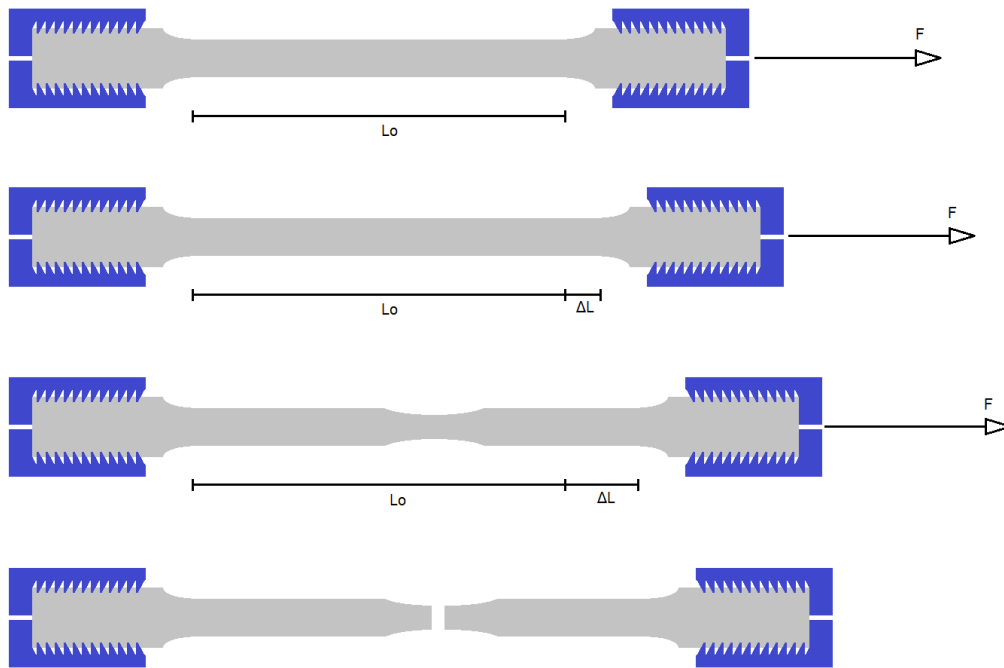


Figura 5 - Modelo de deformação do corpo de prova
Fonte: Autoria própria

O equipamento utilizado para o ensaio de tração é composto pelos seguintes componentes: cabeçote móvel, garras de fixação, base fixa, unidades de controle e registrador gráfico.

4. Materiais e métodos

4.1 Materiais

Para a confecção dos dois aeromodelos e dos corpos de prova, foram necessários 53049,038 [cm³] de ABS e 59968.528 [cm³] de madeira balsa. A partir do modelo CAD, observou-se que eram necessários 46129.637 [cm³] de cada material para a confecção dos aeromodelos, porém houve um desperdício de 15% e 30% em ABS e madeira balsa respectivamente.

4.2 Métodos

4.2.1 Modelo CAD

Foi desenhado um modelo CAD a partir do software SolidWorks e salvo uma cópia do arquivo na extensão STL para que o software responsável por gerar o código G pudesse reconhecê-lo. As ferramentas utilizadas para a criação do modelo são divididas em três classes, cada uma delas representando uma etapa do desenho: esboço, recursos e montagem.

Esboço:

- Linha;
- Círculo;
- Retângulo central;
- Offset de entidades;
- Filete;
- Plano de esboço.

Recursos:

- Ressalto/Base extrudado;
- Corte extrudado;
- Corte por revolução.

Montagem:

- Peça/Montagem a inserir;
- Posicionar.

4.2.2 Prototipagem

A partir do arquivo STL, foi possível estabelecer os parâmetros de corte da impressora. Estes parâmetros foram definidos no software Cura Engine que é responsável por gerar o código G (extensão: GCODE). Os parâmetros de corte são divididos em três classes: resolução, preenchimento e impressora.

Resolução:

- Altura da camada: 0,15 mm;
- Espessura da casca: 0,75 mm.

Preenchimento:

- Espessura da base/topo: 0,75 mm;
- Preenchimento: 20%.

Parâmetros da impressora:

- Diâmetro do bico: 0,5 mm;
- Velocidade de impressão: 50 mm/s;
- Velocidade de deslocamento: 150 mm/s;
- Temperatura de impressão: 230 °C;
- Diâmetro do filamento: 1,75 mm;
- Flow: 99%.

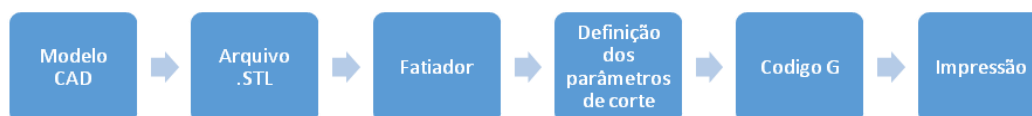


Figura 6 - Fluxograma da metodologia da prototipagem rápida

Fonte: Autoria própria

4.2.3 Produção manual

O mesmo aeromodelo feito em madeira balsa utilizando-se do corte manual para a confecção das peças. O corte foi feito com o auxílio de um estilete e o acabamento das foi realizado com lixa d'agua

4.2.4 Ensaio de tração

Com o auxílio do equipamento WDW modelo 100E foi possível realizar os ensaios de tração de cada material. Cada corpo de prova teve seu teste de tração repetido cinco vezes. A velocidade de tração foi de 5 mm/min.

4.2.5 Corpo de prova

Os corpos de prova foram confeccionados seguindo os mesmos procedimentos dos itens 4.2.2 e 4.2.3 para ABS e madeira balsa respectivamente. A norma utilizada para os corpos de prova foi o ASTM D638. As dimensões estão presentes na Figura 7.

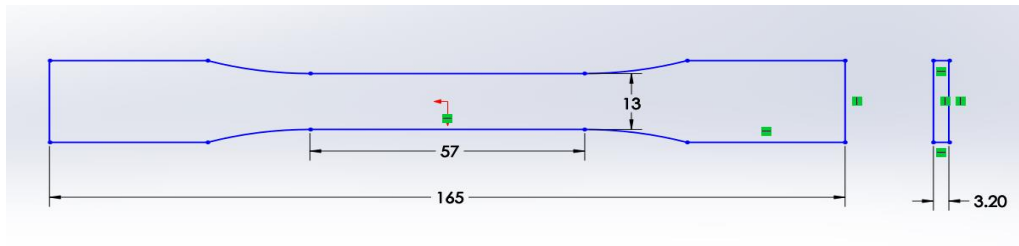


Figura 7 - Corpo de prova ASTM D638

Fonte: Autoria própria

Foram utilizados três tipos de corpos de provas: madeira balsa, ABS maciço e ABS com 20% de volume preenchido pelo polímero e 80% vazio. As peças prototipadas foram feitas a partir da impressora 3D Prusa Graber I3.

5. Análise e resultados

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos desde a montagem da impressora até os métodos de comparação entre os dois aeromodelos.

5.1 Montagem da impressora

A montagem da impressora foi feita a partir de um kit de montagem, adquirida do site www.reprap3d.com.br. O kit possui todas as peças necessárias para a montagem da mesma.

5.1.1 Estrutura MDF

O primeiro passo para a montagem da impressora foi por meio da montagem da estrutura em madeira MDF. Iniciando-se pela estrutura superior em junção com a lateral seguindo da base, como mostrado nas Figuras 8 e 9.



Figura 8 - Estrutura MDF 1
Fonte: Manual de montagem Graber i3



Figura 9 Estrutura MDF 2

Fonte: Manual de montagem Graber i3

Após esta etapa, foi possível fixar os trilhos para a mesa aquecida, responsável pelo controle no eixo y, as torres para controle do eixo z e também os trilhos para o acoplamento do bico aquecido e da extrusora, responsável pelo movimento ao longo do eixo x. Para os eixos foram necessárias barras lisas de 8 mm e rolamentos lineares LM8UU, conforme Figura 10.



Figura 10 - Estrutura MDF com base para mesa aquecida
Fonte: Manual de montagem Graber i3

Paralelo ao processo de montagem dos eixos, foi feito o acoplamento dos motores de passo Nema 17. Ao todo são cinco motores, sendo que 4 deles são presos na estrutura de MDF (Figuras 11 e 12) e o último motor é utilizado na extrusora, conforme Figura 17.



Figura 11 - Motores de passo eixo X e Z.
Fonte: Manual de montagem Graber i3



Figura 12 - Estrutura MDF com base para mesa aquecida e motores de passo para eixo X, Y e Z

Fonte: Manual de montagem Graber i3

Depois de toda estrutura montada foi possível acoplar as correias aos motores e rolamentos, finalizando assim a etapa de montagem da estrutura.



Figura 13 - Correias presa na base para mesa aquecida
Fonte: Manual de montagem Graber i3



Figura 14 - Carrinho para extrusora no eixo X
Fonte: Manual de montagem Graber i3

5.1.2 Extrusora

Para montagem da extrusora foram necessários os seguintes itens: extruder, idler, parafuso trator, parafuso M4, porcas, engrenagens, três rolamentos 608 e um motor de passo Nema 17.

Primeiro foi montado o idler ao extruder e acoplado os rolamentos em seus respectivos lugares.



Figura 15 - Extruder e idler
Fonte: Manual de montagem Graber i3

Após isso foi possível posicionar e fixar, com o auxílio de uma porca, o parafuso trator passando entre os rolamentos.



Figura 16 - Engrenagem e parafuso trator
Fonte: Manual de montagem Graber i3

E então foi posto os parafusos M4, as molas, as arruelas, as porcas borboleta, o motor de passo Nema 17 e a segunda engrenagem juntamente com o motor.



Figura 17 - Extrusora

Fonte: Manual de montagem Graber i3

Assim foi possível acoplar o bico aquecido ao sistema de extrusão e fixá-lo no carrinho responsável pelo movimento ao longo do eixo X.

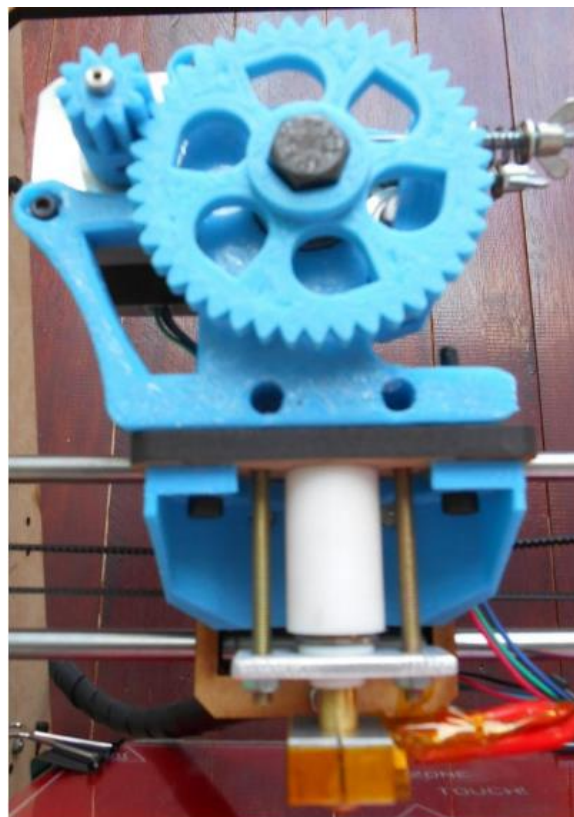


Figura 18 - Estrusora com bico aquecido

Fonte: Manual de montagem Graber i3

5.1.3 Mesa aquecida

A mesa aquecida foi posicionada e fixada sobre a base dos trilhos no eixo Y. Sobre a placa aquecida é utilizado um vidro temperado de 5 mm para a distribuição uniforme do calor sobre a superfície. O vidro é fixado com o auxílio de presilhas para o fácil manuseio do mesmo. A mesa e a impressora montadas podem ser visualizadas na Figura 19.

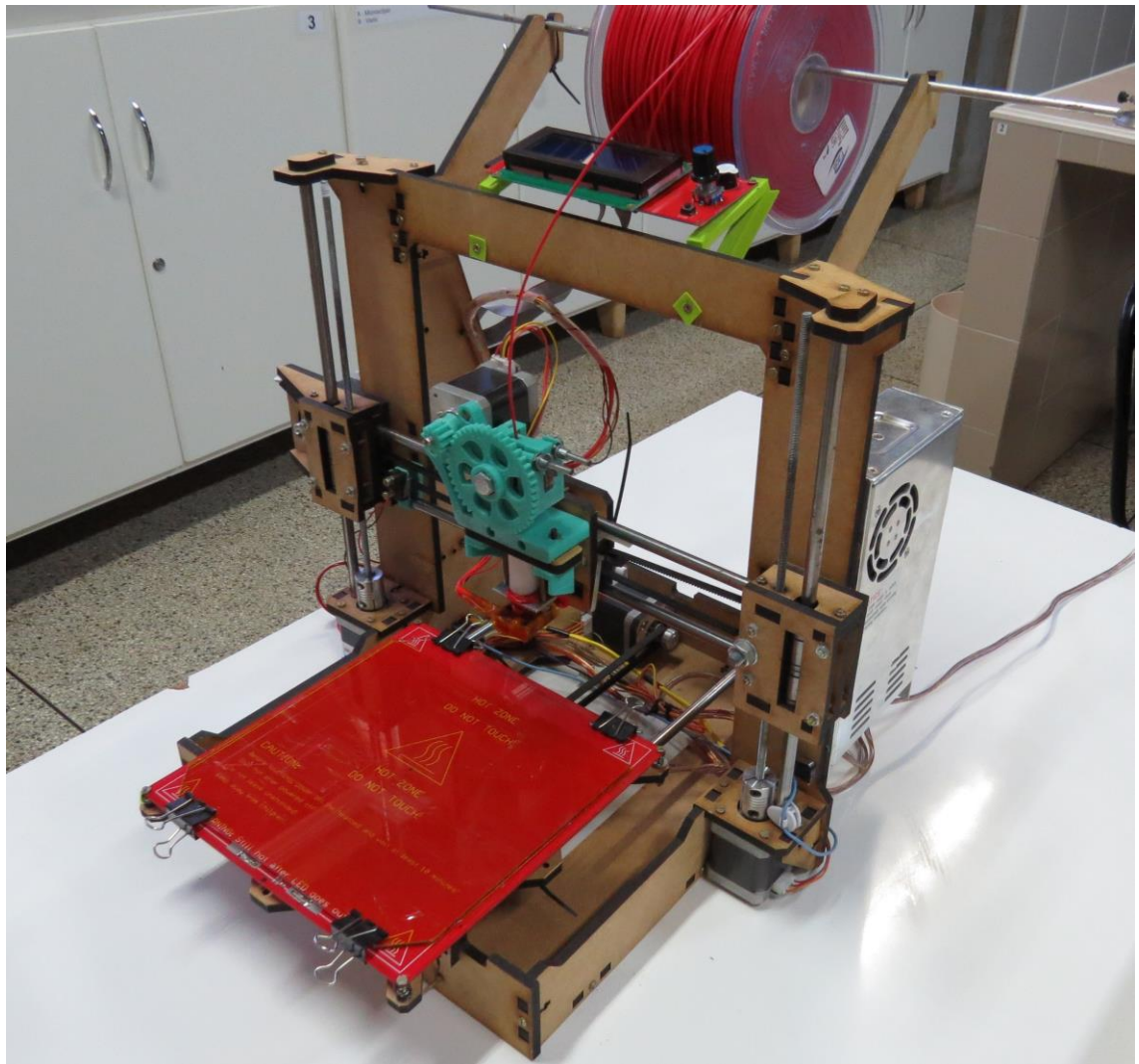


Figura 19 - Impressora Graber i3 pronta
Fonte: Autoria própria

5.2 Modelo CAD

O software utilizado para o desenvolvimento do modelo CAD foi o SolidWorks. Utilizando-se de ferramentas como linha, círculo, retângulo central, offset de entidades, filete e plano de esboço foi possível criar o esboço de cada peça do aeromodelo. Terminado o esboço, as ferramentas para a criação de peças tridimensionais foram ressalto/base extrudado, corte extrudado e corte por revolução. O modelo CAD foi dividido em 4 partes: fuselagem frontal, fuselagem dianteira, cavernas (1, 2, 3 e 4), profundador, leme, haste da asa, perfil central da asa e perfil da asa. Todos os componentes são mostrados nas Figuras de 20 a 26 a seguir.

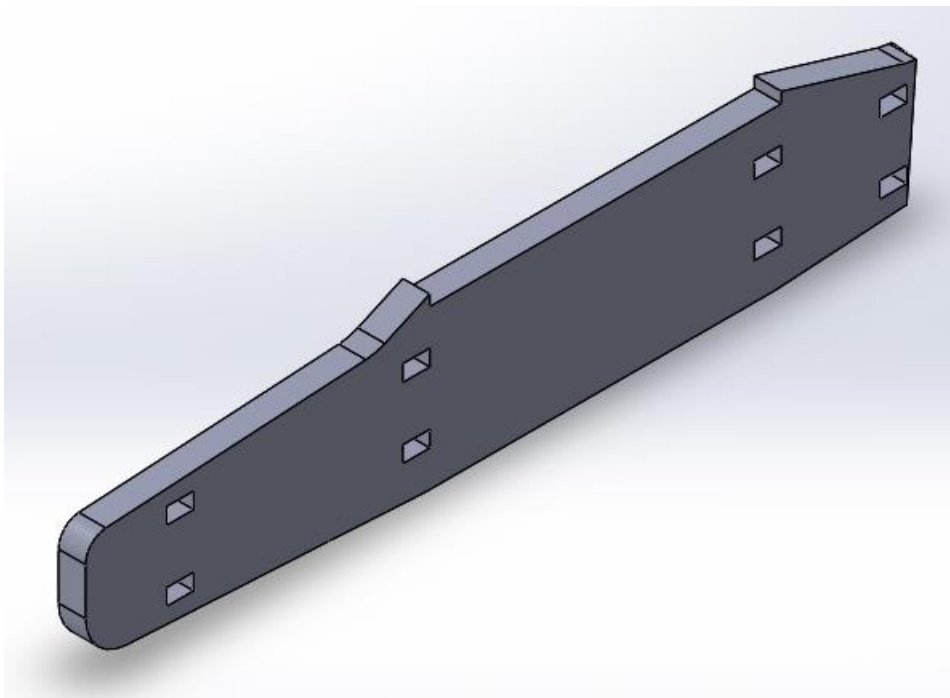


Figura 20 - Fuselagem Frontal
Fonte: Autoria própria

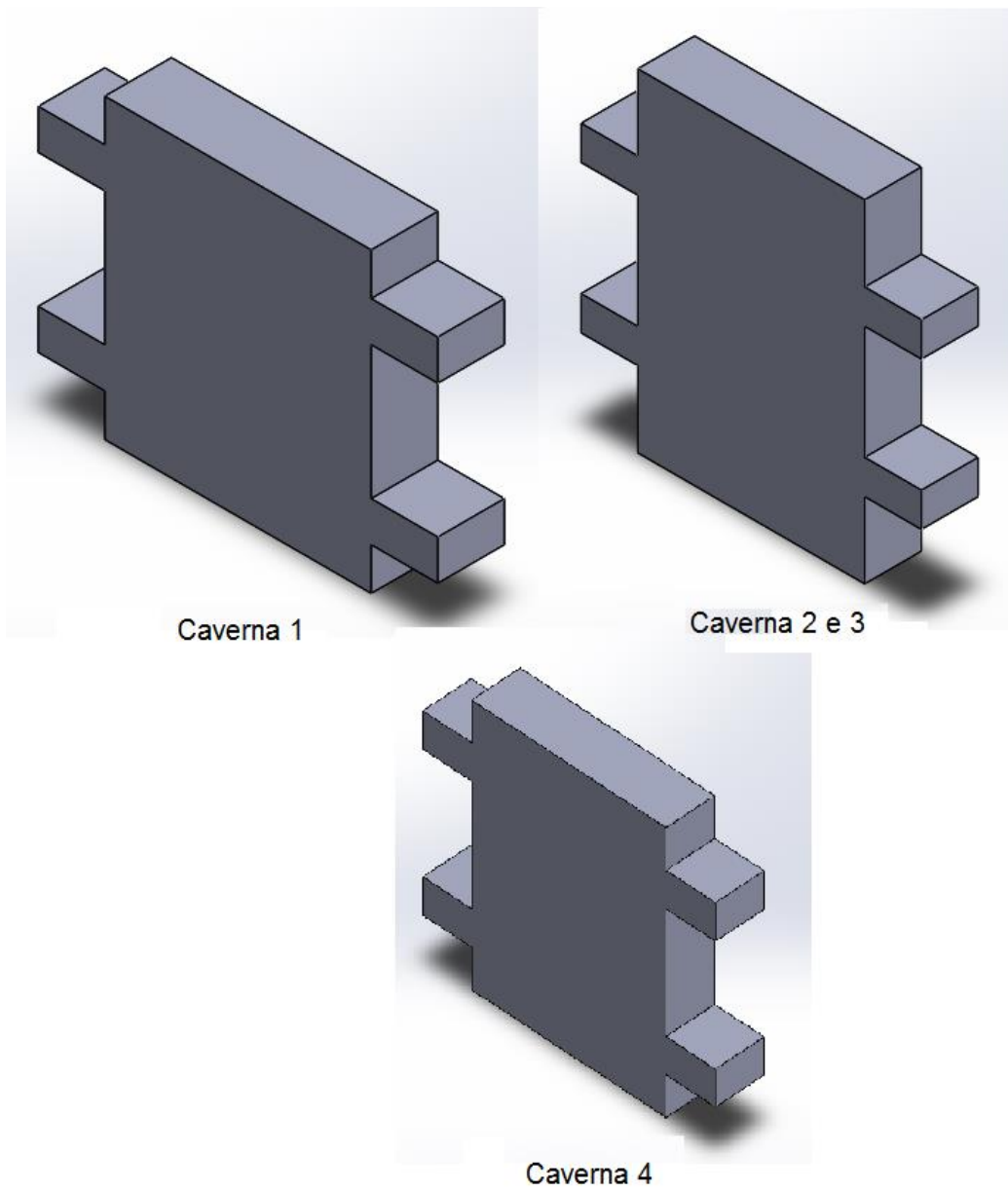


Figura 21 - Cavernas 1, 2, 3 e 4
Fonte: Autoria própria

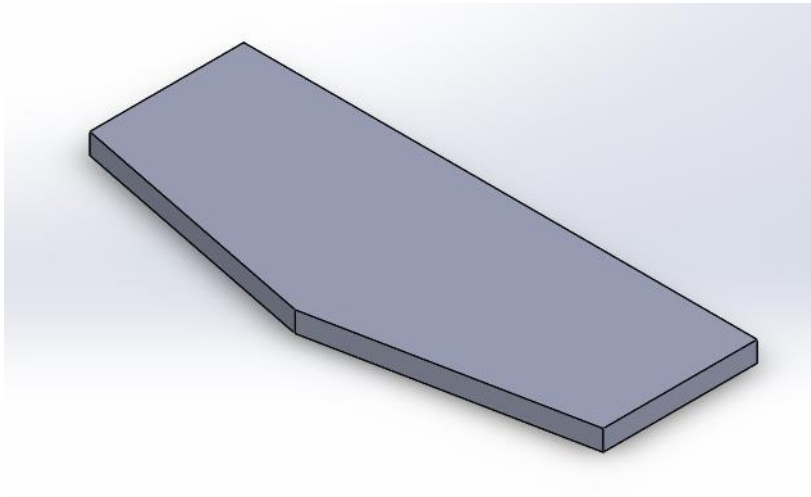


Figura 22 - Profundor
Fonte: Autoria própria

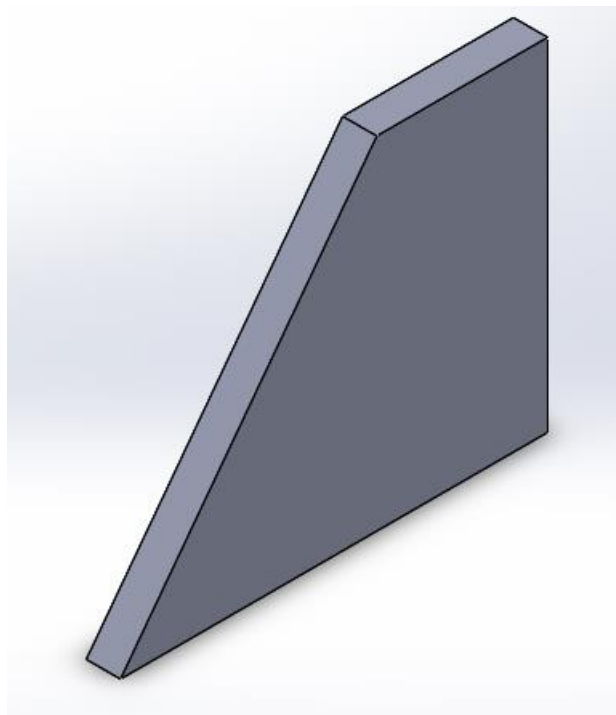


Figura 23 - Leme
Fonte: Autoria própria

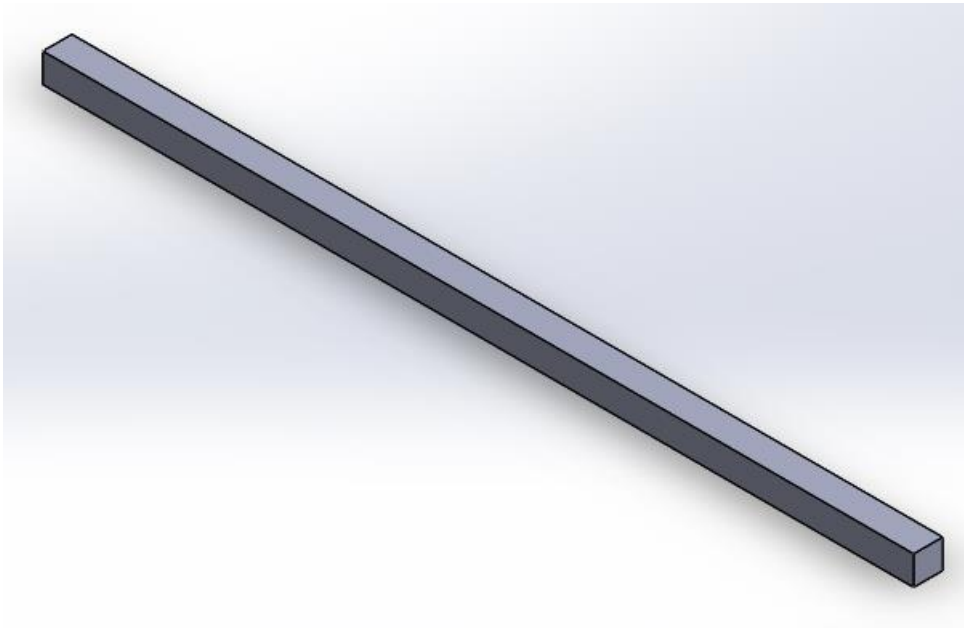


Figura 24 - Haste da asa
Fonte: Autoria própria

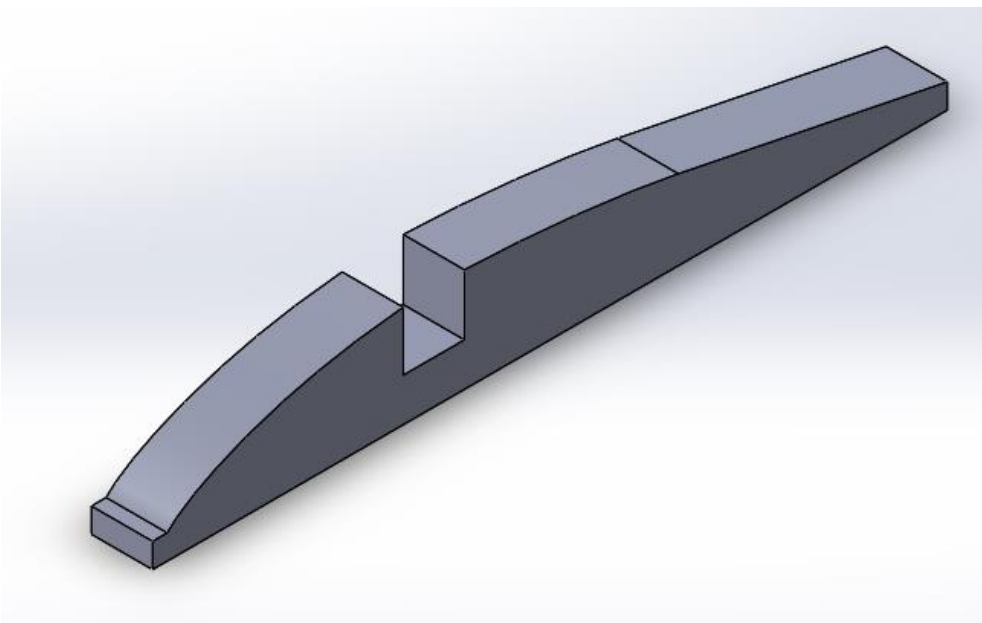


Figura 25 - Perfil central da asa
Fonte: Autoria própria

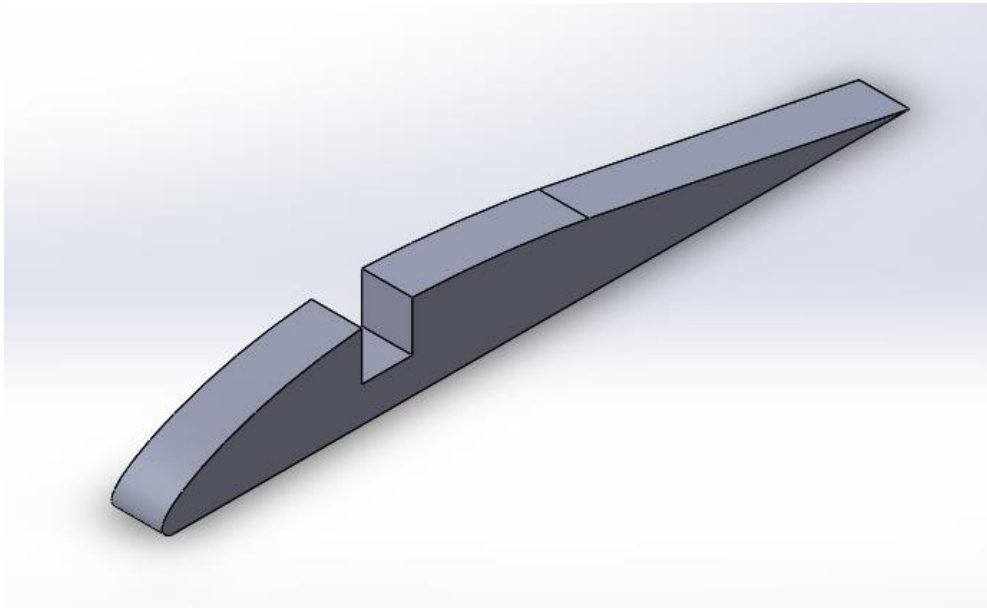


Figura 26 - Perfil da asa
Fonte: Autorial própria

Após o modelamento tridimensional de cada peça, foi possível realizar a montagem do aeromodelo. Foram utilizadas as seguintes ferramentas: “Inserir componentes” e “posicionar”. A montagem possibilita ter uma visão do aeromodelo após a confecção.

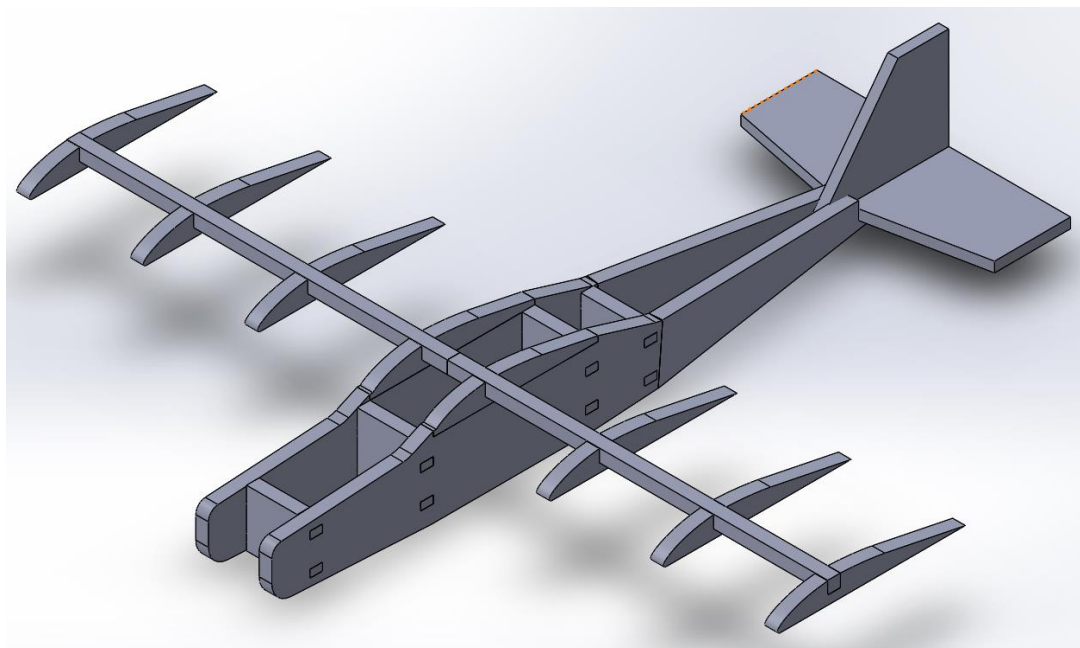


Figura 27 - Modelo final
Fonte: Autorial própria

5.3 Modelos confeccionados

Após a modelagem tridimensional, os arquivos foram salvos na extensão STL e exportados para o Cura Engine (fatiador), conforme Figura 28. Com os parâmetros definidos no item 4.2.2 o software gerou o código G para ser passado para a impressora. Ao todo foram necessárias aproximadamente 5 horas de impressão.

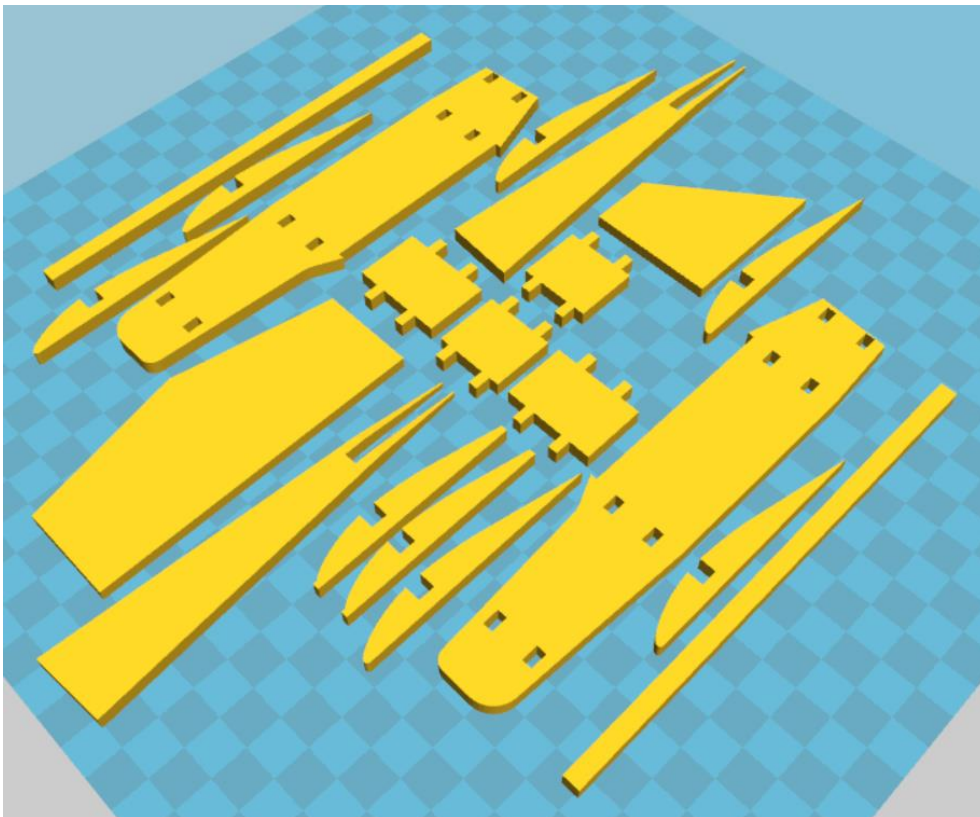


Figura 28 - Peças do aeromodelo no software "Cura Engine"
Fonte: Autoria própria

Em ambos os modelos foi utilizado a cola epóxi Araldite Hobby 10 minutos da marca Brascola para fixação das peças.

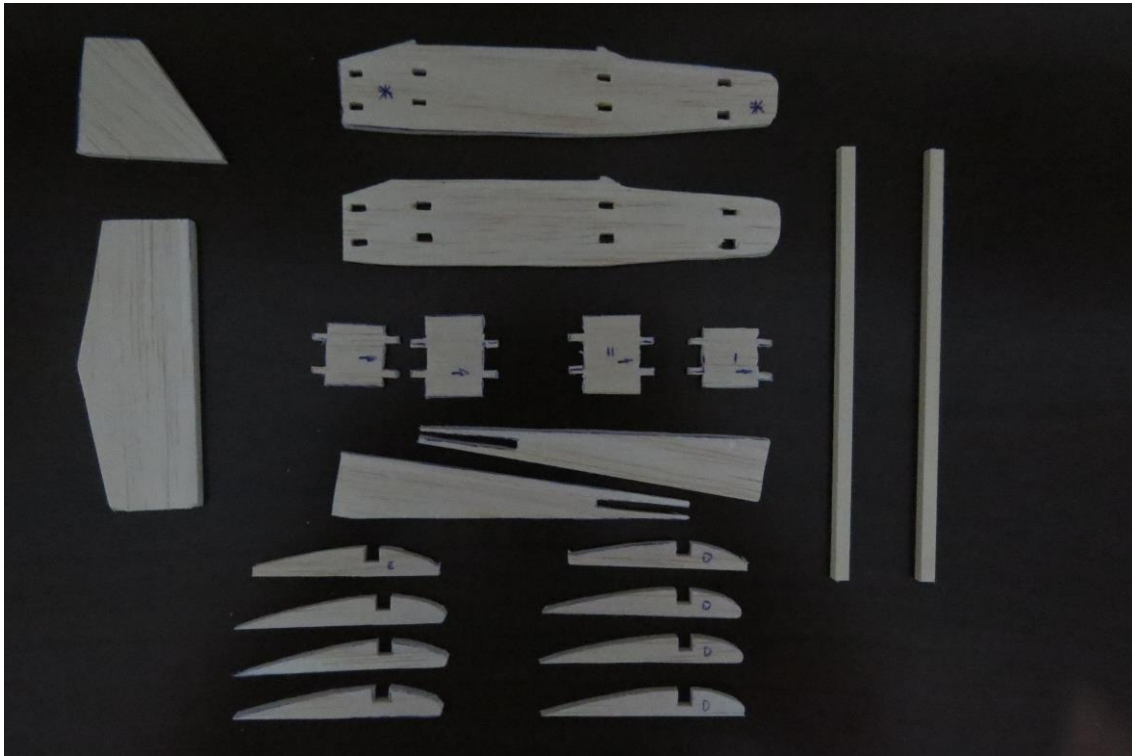


Figura 29 - Peças impressas em madeira balsa
Fonte: Autoria própria

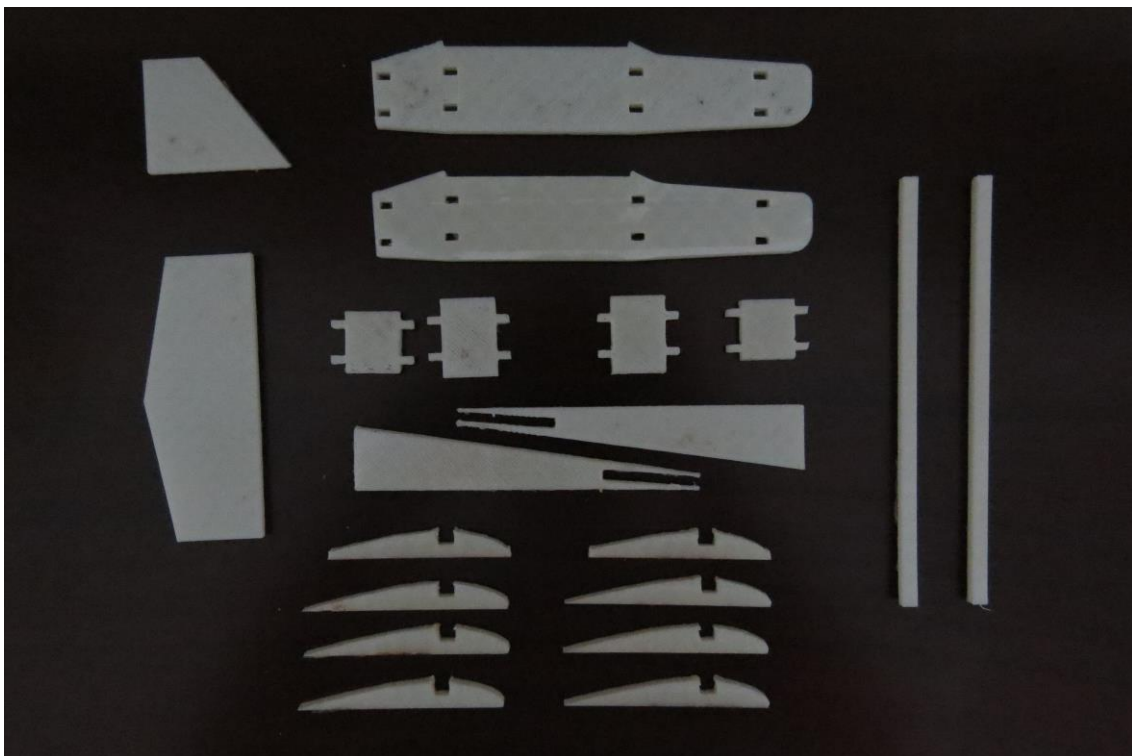


Figura 30 - Peças impressas em ABS
Fonte: Autoria própria

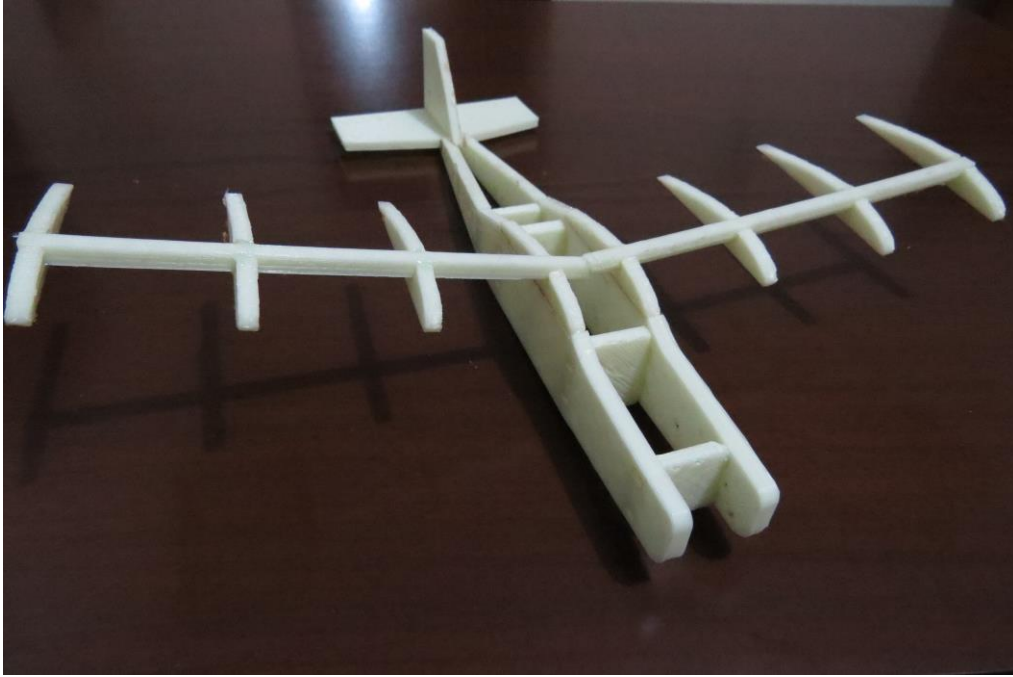


Figura 31 - Modelo pronto em ABS
Fonte: Aatoria própria

O modelo confeccionado em madeira foi, primeiramente, desenhado na mesma, para então ser realizado o corte com o auxílio de um estilete e uma lixa d'agua Norton 400 para o acabamento das peças.

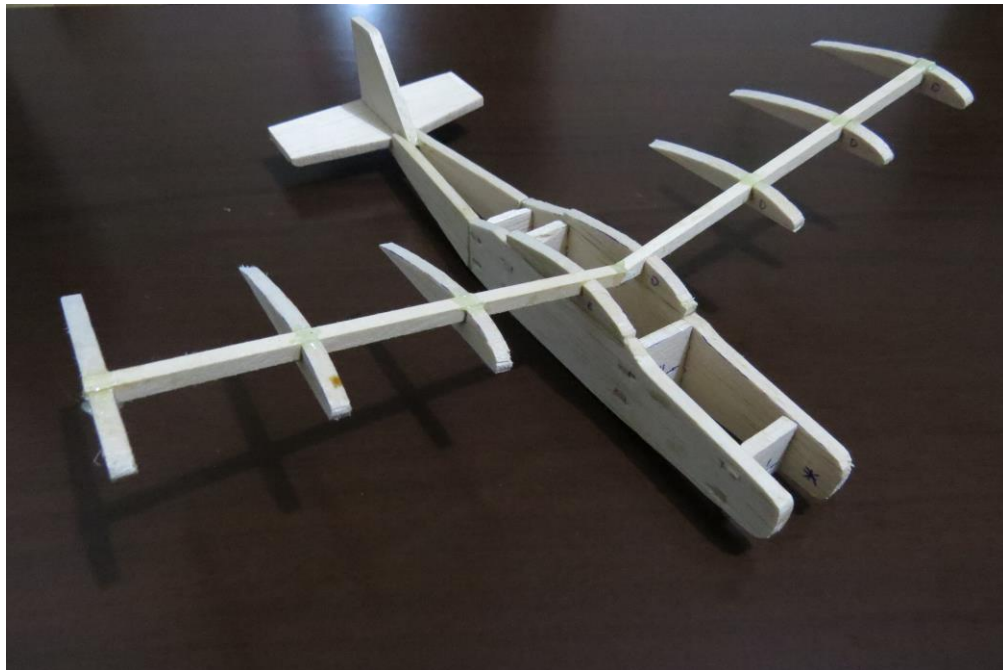


Figura 32 - Modelo pronto em madeira balsa
Fonte: Aatoria própria

5.4 Métodos de comparação

5.4.1 Teste de tração

Os corpos de prova confeccionados em madeira balsa e ABS foram submetidos a ensaio de tração, os padrões de corpos de prova foram ensaiados cinco vezes cada, gerando gráficos de tensão por deformação onde foi possível analisar a resistência máxima a tração de cada material.

Os corpos de prova (Figuras 33, 34 e 35) foram presos nas pinças de fixação do equipamento de tração e realizado os ensaios com velocidade de tração de 5 mm/min até a fratura ocorrer.

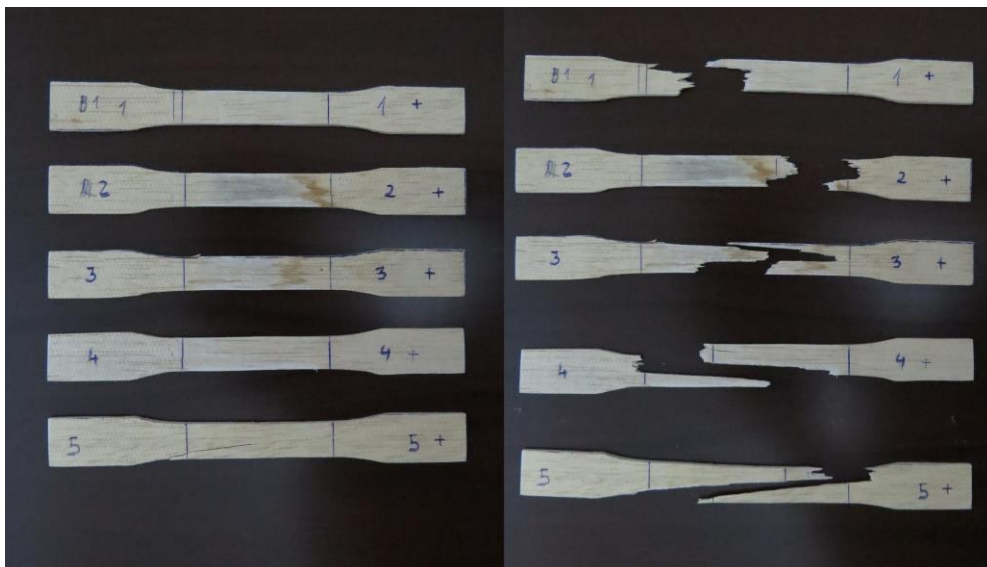


Figura 33 - Corpos de prova em Madeira Balsa
Fonte: Autoria própria

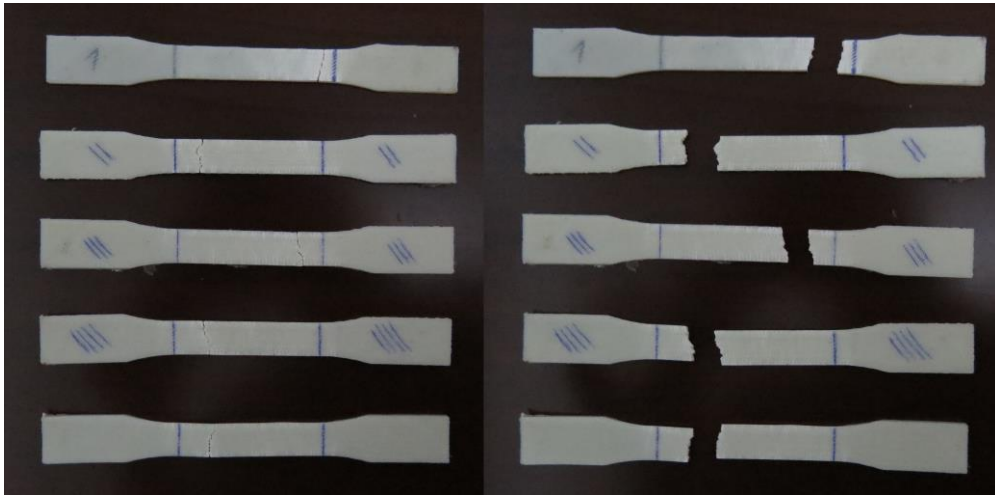


Figura 34 - Corpos de prova em ABS maciço
Fonte: Autoria Própria

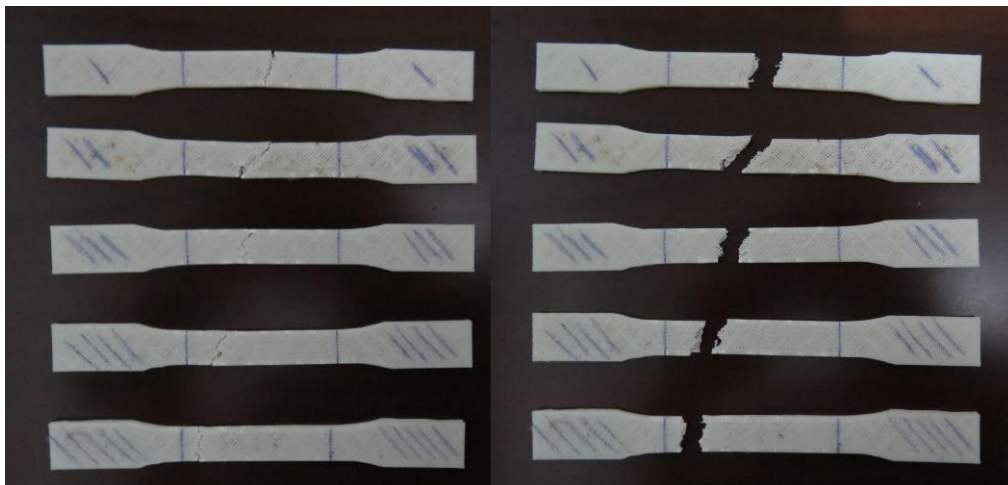


Figura 35 - Corpos de prova ABS com preenchimento de 20%
Fonte: Autoria Própria

Nos corpos de prova de madeira balsa não foram observadas porcentagens significativas tanto de alongamento, no sentido da tração, quanto de estrição, na seção transversa. Segundo Zolin (2011) tal comportamento é característico de materiais frágeis onde não há sinal de deformação plástica. A falha ocorre imediatamente após a fase elástica e essa, em alguns casos, é pequena. Nos corpos de prova de ABS foram observados uma média de 3,5% de alongamento dos corpos de prova tanto no maciço, quanto no preenchido com 20%.

Do ponto de vista da resistência a tração dos materiais, foi observado que a madeira balsa obteve resultados superiores se comparada ao ABS. Em seus melhores desempenhos, os corpos de prova de cada material obtiveram: 1,24388 kN para madeira balsa, 0,64695 kN para o ABS maciço e 0,29794 kN para ABS com preenchimento de 20%. Por outro lado, o polímero apresenta um maior alongamento e não possui comportamento frágil, havendo indícios de redução gradual da tensão em relação ao limite de resistência antes da ruptura.

A resistência máxima a tração foi dada pelo software do equipamento WDW 100E. Foram elas: 22,74 MPa, 21,16 MPa e 7,98 MPa de madeira balsa, ABS maciço e ABS preenchido com 20%, respectivamente, conforme Figuras 36 a 38 a seguir.

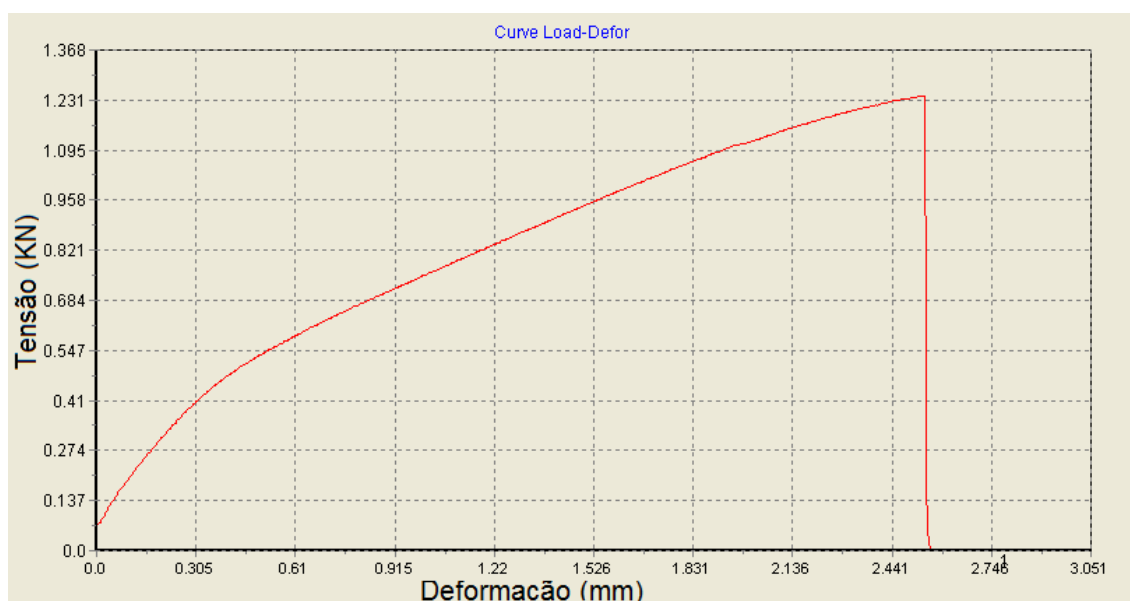


Figura 36 - Gráfico tensão por deformação Madeira Balsa
Fonte: Autoria própria

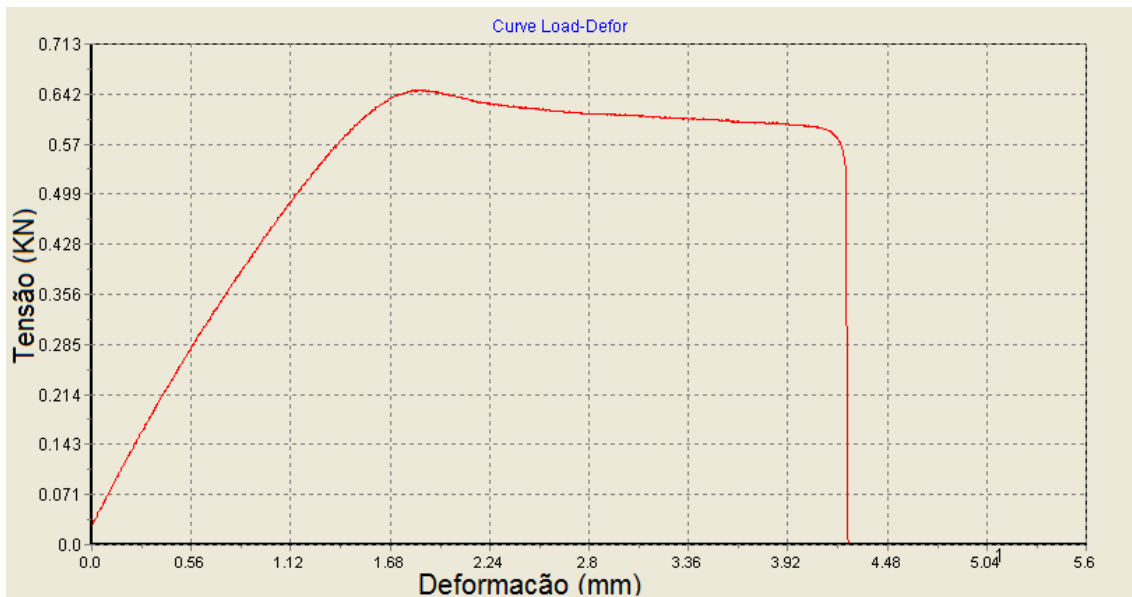


Figura 37 - Gráfico tensão por deformação ABS maciço
Fonte: Autoria própria

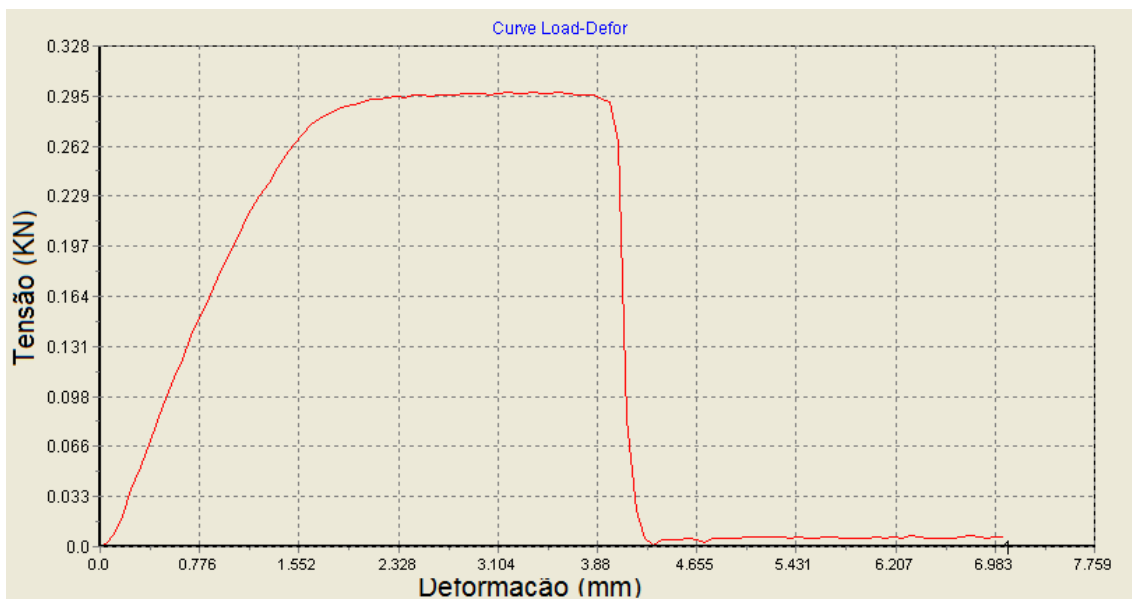


Figura 38 - ABS com 20% de preenchimento
Fonte: Autoria própria

Segundo Dias (2011), o gráfico tensão por deformação (Figuras 37 e 38) é característico de um polímero plástico devido ao seu alongamento plástico que antecede a ruptura, não acontecendo de forma brusca e repentina.

5.4.2 Massa

A comparação de massa foi feita utilizando uma balança de precisão marca Gehaka modelo BK600. Depois de montados os modelos, foi observado que para a madeira balsa em seu modelo final tem 12,613 g e o modelo em ABS tem 55,171 g, portanto houve uma redução de aproximadamente 77% de massa para a versão em madeira balsa.

5.4.3 Custo

O custo final de material para cada modelo foi calculado com base no preço por quilo de cada um deles. O ABS foi adquirido pelo valor de R\$ 100,00/Kg, enquanto a madeira balsa, devido a sua baixa densidade, possui um valor de aproximadamente R\$ 900,00/Kg. Logo, o custo final de ABS foi R\$ 5,51 e o de madeira balsa foi de R\$ 11,35, resultando em uma economia de aproximadamente 51% no modelo em ABS.

6. Conclusão

Com o auxílio da prototipagem rápida é possível se obter alta repetibilidade, confecção de peças com alta complexidade, tempo de confecção menor se comparado a um processo manual de corte. Por outro lado, a confecção de aeromodelos de forma manual apresenta certos problemas como alto custo, necessidade de habilidades com o manuseio de madeira balsa e outros materiais frágeis, baixa repetibilidade e alto tempo de confecção das peças.

A partir dos corpos de prova confeccionados em madeira balsa e ABS, foi possível observar por meio de testes que a madeira possui maior resistência a tração, porém apresenta um comportamento frágil, rompendo-se bruscamente. Por outro lado, o ABS possui maior alongamento, apresentando indícios antes da ruptura ocorrer de fato. Do ponto de vista da massa, o modelo em madeira balsa possui 12,613 g no total, enquanto o de ABS possui 55,171 g, portanto o modelo em ABS apresentou um acréscimo de, aproximadamente, 77% de massa. Também foi analisado o custo final de cada um dos modelos, onde o ABS apresentou uma redução de quase 51% no valor do modelo final.

Devido ao fato de o ABS apresentar menor resistência e maior massa, torna-se inviável a confecção de um aeromodelo feito puramente de ABS, mesmo que haja alta repetibilidade e redução significativa no custo, as propriedades de resistência e massa são de maior importância para a confecção de aeromodelos.

7. Análise de custos do trabalho

Descrição	Custo [R\$]
Impressora 3D Reprap Graber I3	2000
ABS [1 Kg]	120
Madeira [500 cm ³]	100
Operação da impressora	50

Total	2270
-------	------

8. Referencias

AGOSTINHO, F. **Obtenção de fotografias aéreas de pequeno formato e videografia por meio de aeromodelo artesanal adaptado.** Universidade Estadual do Centro-Oeste, Irati, Paraná, 2011.

BERTOL, L. S. **Contribuição ao estudo da prototipagem rápida, digitalização tridimensional e seleção de materiais no design de implantes personalizados.** Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul. 2008.

CARNETT, J. B. **Making the MakerBot: for less than \$1,000, the makerbot kit provides nearly everything you need for your very own 3d plastic printer. We find out what it takes to build and use one.** Popular Science, EUA, ESTADOS UNIDOS, v.277.1, p.82, 2010.

CASAGRANDE, M. V. S. **Projeto de um cabeçote de extrusão de uma máquina de prototipagem rápida FDM.** Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

CELANI, G. **Digitalização tridimensional de objetos: um estudo de caso.** São Paulo, SP, BRASIL, 2009.

CHIAVERINI, V. **Tecnologia Mecânica.** 2. ed. São Paulo: MvGraw Hill, 1986.

Confederação Brasileira de Aeromodelismo – COBRA. **Regulamento Geral.** 2007.

DALCIN, G. **Ensaio dos Materiais.** Santo Ângelo, RS, Brasil. 2007.

FONSECA, J. H. O. **As possíveis contribuições da prototipagem rápida para a melhoria da competitividade na produção joalheira da cidade do Rio de Janeiro.** Fortaleza, CE, Brasil, 2006

GARCIA A. **Ensaio dos materiais. Livros técnicos e científicos Editora.** São Paulo, SP, Brasil. 2000.

HEINZL, J.; Hertz, C. H. **Ink-Jet printing. Advances in Electronics and Electron Physics.** Orlando, 1985.

LANDI, T. R. L.; Silva, L. G. A. **Estudo do Efeito da Radiação Ionizante com Feixe de Elétrons sobre o Terpolímero Acrilonitrila Butadieno Estireno – ABS**. Revista Mackenzie de Engenharia e Computação, Ano 4, n. 4, p. 107-117.

MACEDO, G. M. A. **Utilização de tecnologias de prototipagem rápida no processo de desenvolvimento de produto: um estudo de caso**. 2011

OLIVEIRA, M. F. **Aplicações da prototipagem rápida em projetos de pesquisa**. Universidade Estadual de Campinas. Campinas. SP. 2008.

SPERLING, L. H. **Introduction to physical polymer science**. 1996 p. 487-488.

TOMEI, G. P. S. **Desenvolvimento de um protótipo de um robô de cinemática paralela do tipo delta para impressão tridimensional de peças**. Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas do Centro Universitário UNIVATES, 2014.

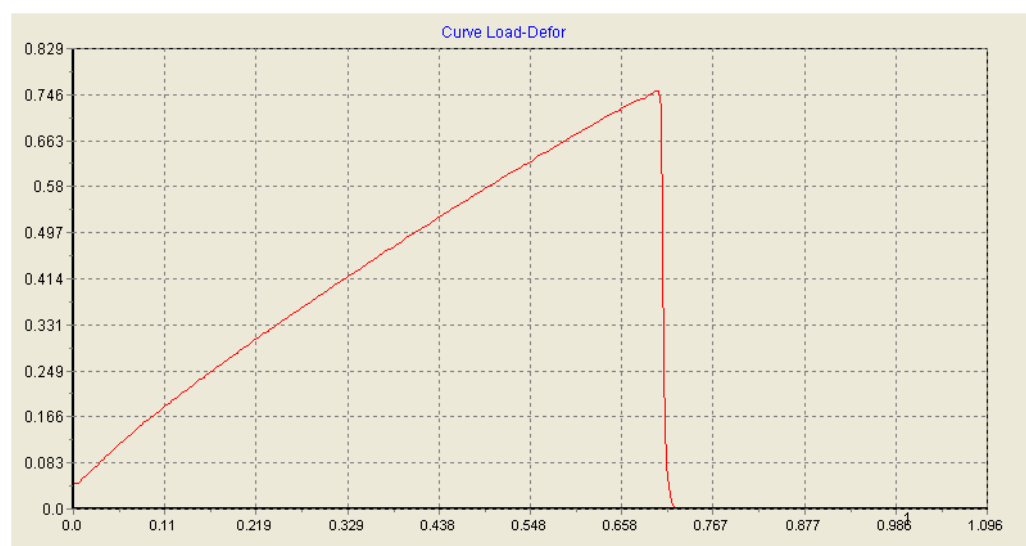
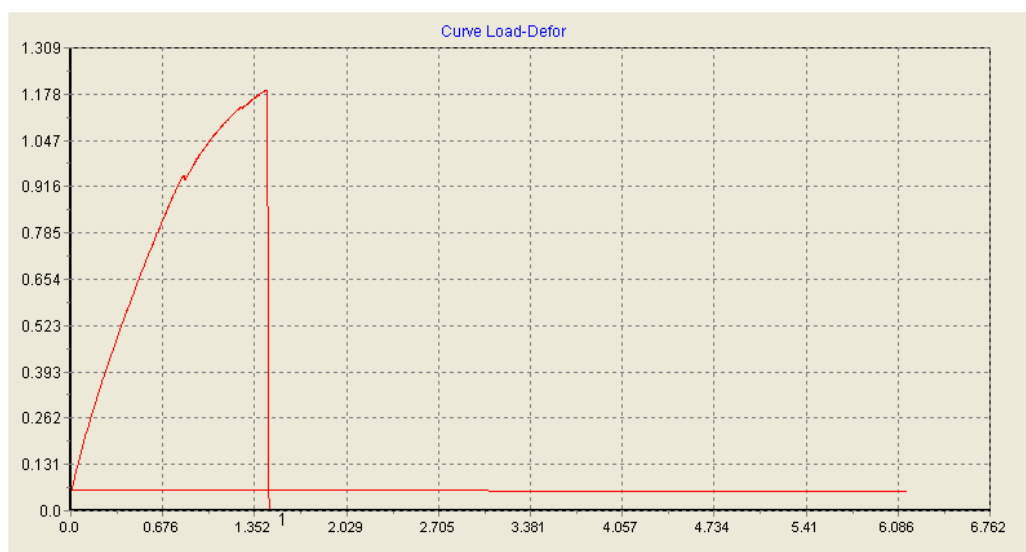
VENTOLA, C. L. **Medical applications for 3D printing: current and projected uses**. MS. 2014

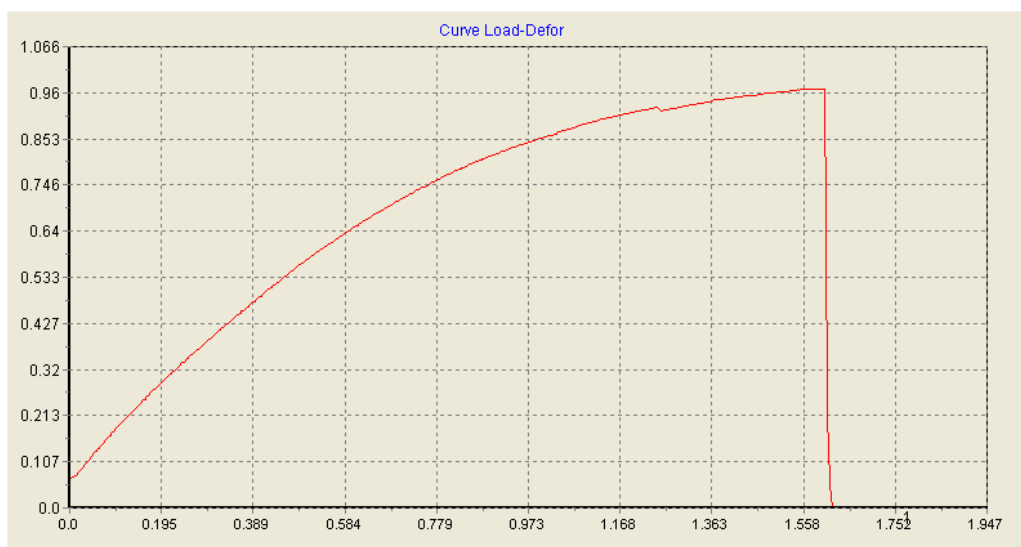
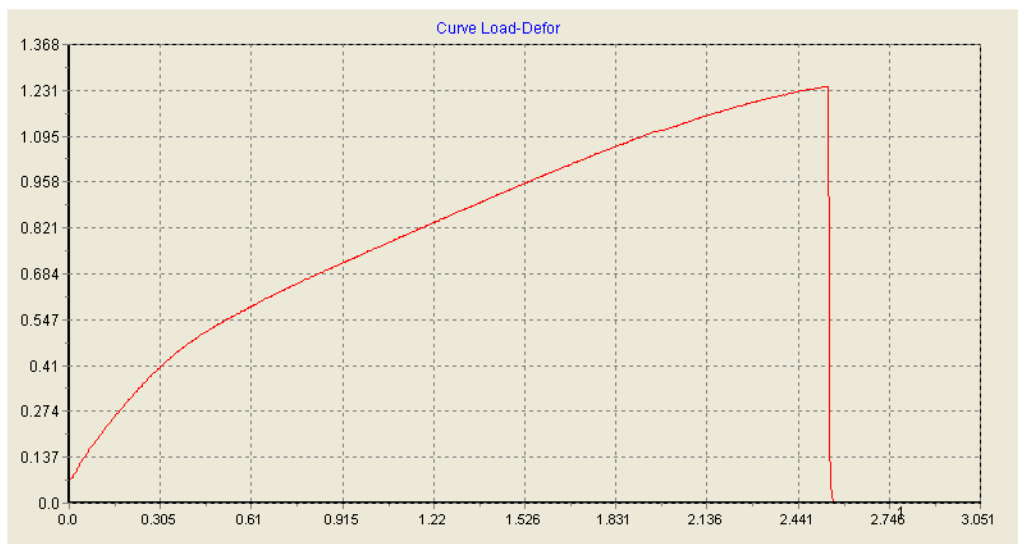
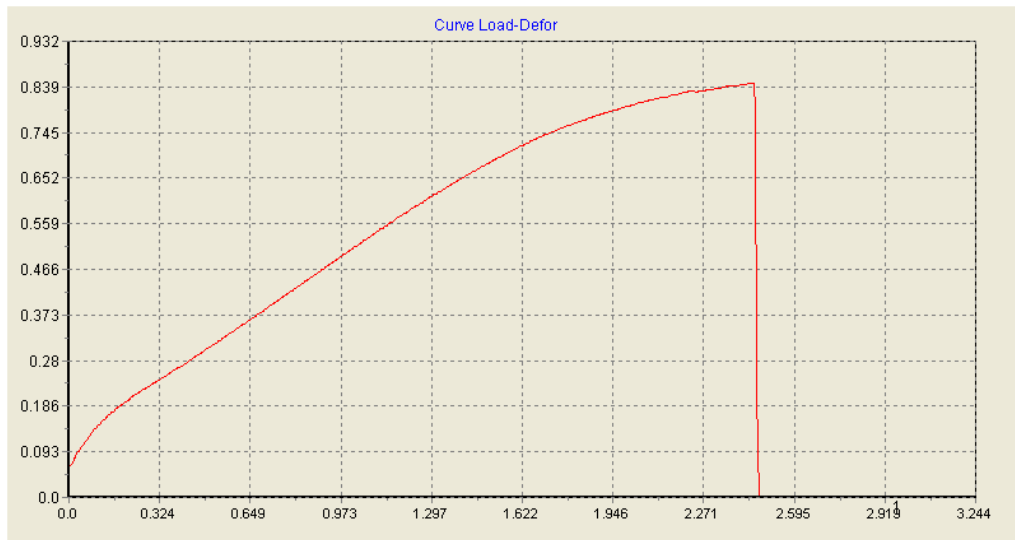
VOLPATO, N. **Prototipagem Rápida: Tecnologias e Aplicações**. São Paulo: Edgard Blucher, 2007.

ZOLIN, I. **Ensaio mecânicos e análise de falhas**. Escola Técnica Aberta do Brasil. Santa Maria, RS. 2011

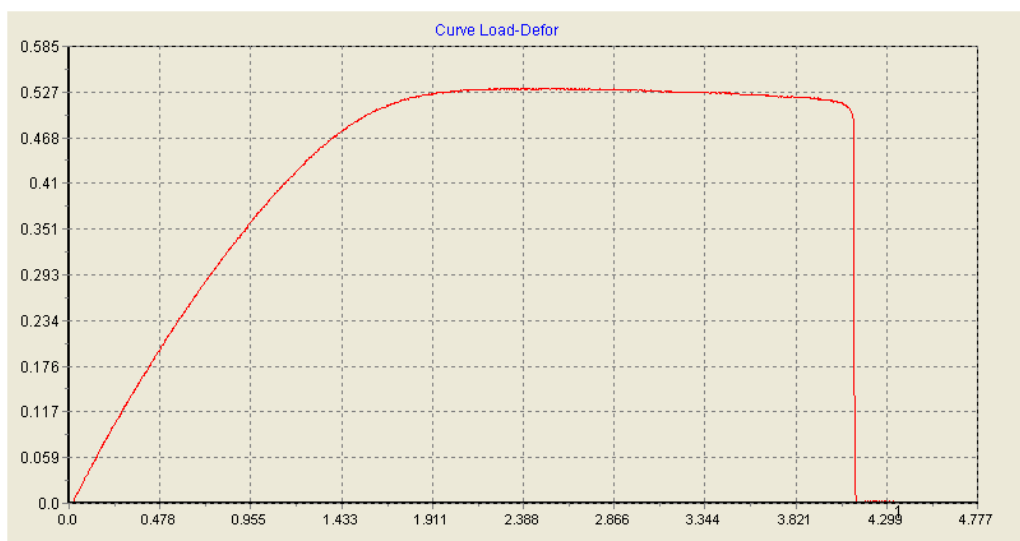
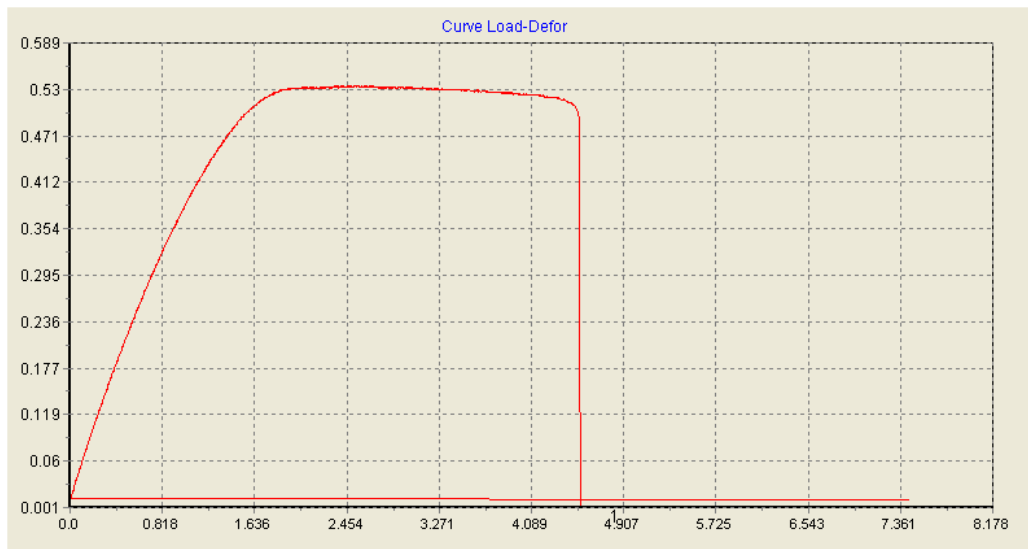
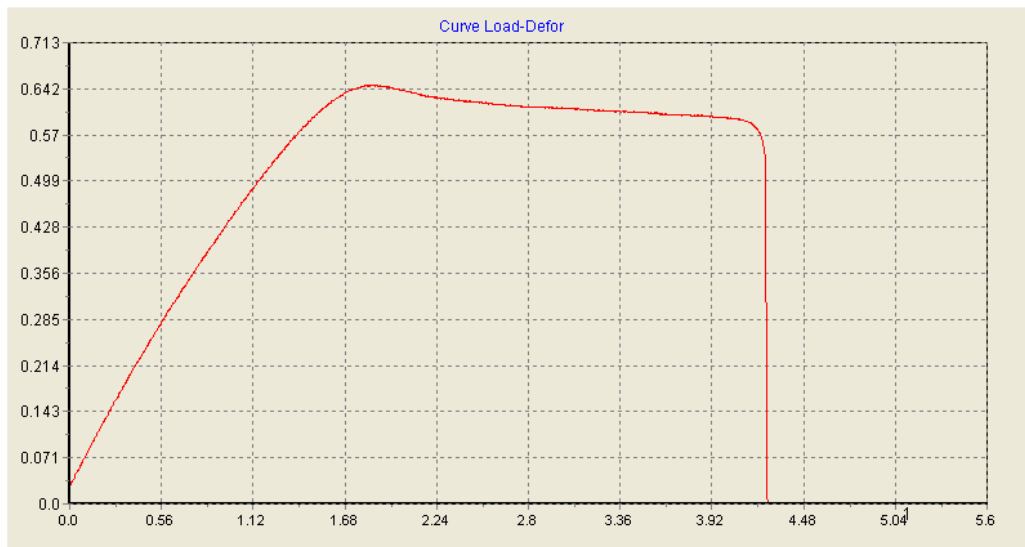
Apêndice A – Gráficos de tensão por deformação

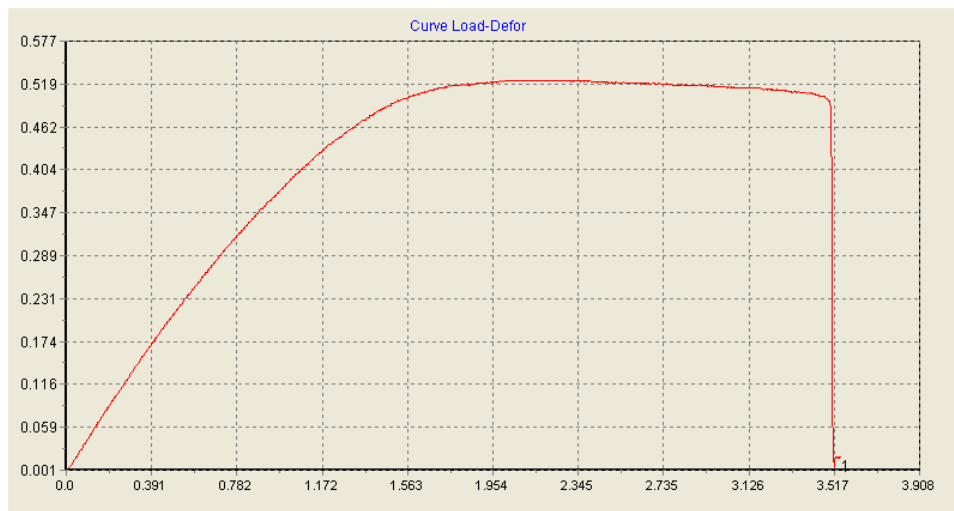
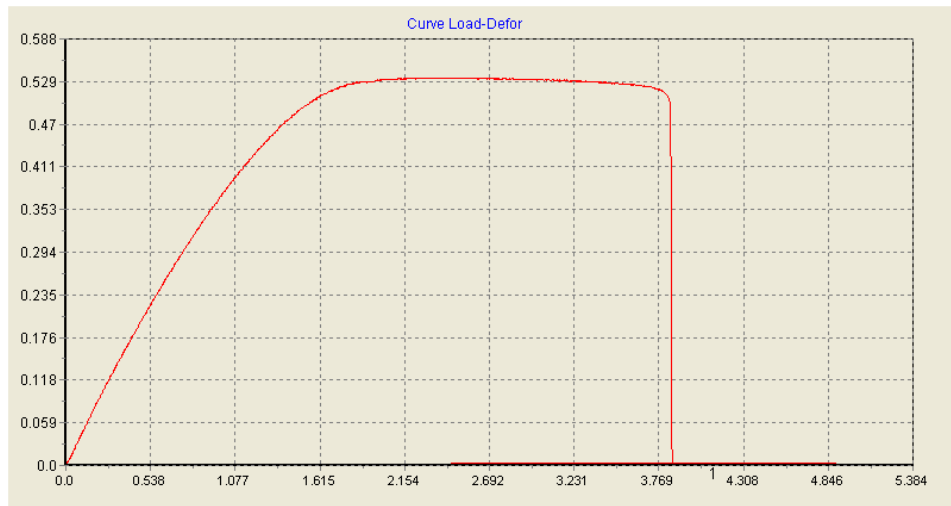
Gráficos de tensão por deformação – Madeira balsa





Gráficos de tensão por deformação – ABS maciço





Gráficos de tensão por deformação – ABS com preenchimento de 20%

