

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO PIAUÍ
CAMPUS TERESINA CENTRAL
DEPARTAMENTO DE INDÚSTRIA, SEGURANÇA E PRODUÇÃO CULTURAL
CURSO BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

DIMENSIONAMENTO E CONSTRUÇÃO DE UMA MÁQUINA DE ENSAIO DE
QUEDA *DROP TEST*

JOSÉ AUGUSTO DA COSTA SOUSA FILHO

ORIENTADOR: Dr. Darley Fiácrio de Arruda Santiago

TERESINA - PI

2018

JOSÉ AUGUSTO DA COSTA SOUSA FILHO

DIMENSIONAMENTO E CONSTRUÇÃO DE UMA MÁQUINA DE ENSAIO DE
QUEDA DROP TEST

Trabalho de conclusão de curso (monografia) apresentado como exigência parcial para obtenção do diploma do curso Bacharelado em Engenharia Mecânica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí. Campus Teresina central.

Orientador: Dr. Darley Fiácrio de Arruda Santiago

TERESINA - PI

2018

FOLHA DE APROVAÇÃO

TÍTULO: "Dimensionamento e Construção de uma Máquina de Ensaio de Queda Drop Test".

ALUNO: JOSÉ AUGUSTO DA COSTA SOUSA FILHO

MATRÍCULA Nº 20121EME0157

DATA: 23 de julho de 2018.

Este trabalho foi julgado adequado e aprovado para a obtenção do título de graduação em Engenharia Mecânica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí.

Assinado no original

Prof. Msc. **Anderson Felipe Chaves Fortes**

Coordenador do Curso de Bacharelado em Engenharia Mecânica

COMISSÃO EXAMINADORA

Assinado no original

Prof. Dr. **Darley Fiácrio de Arruda Santiago**

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí

Orientador

Assinado no original

Prof. Msc. **José Matias Ferreira Filho**

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí

Avaliador

Assinado no original

Prof. Dr. **José Francisco dos Reis Sobrinho**

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí

Avaliador

Teresina, 23 de junho de 2018.

Aos que acreditaram no meu potencial e aos
que continuam acreditando.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, porque sem ele nenhuma conquista seria possível na minha vida;

Agradeço aos familiares que se foram cedo demais e que em vida sempre me deram apoio, em especial aos meus avós que em vida sempre me incentivaram a ser dedicado aos meus estudos.

Agradeço a Célio Roberto colaborador da empresa onde realizei o estágio supervisionado, que ajudou a desenvolver ideias para o meu projeto de conclusão de curso;

Aqui presto também o meu agradecimento aos professores presentes nessa apresentação de trabalho de conclusão de curso por se mostrarem disponíveis ao convite e por auxiliar no meu processo de aprendizagem. Em especial, ao meu orientador que mesmo com pouca disposição de tempo, aceitou a proposta de me ajudar e acompanhar durante todo este trabalho.

Aos meus amigos de curso, aos que já estão formados e os que estão em fase de conclusão de curso pela amizade e apoio em momentos difíceis.

Agradeço também aos técnicos de laboratório de usinagem do IFPI, especialmente ao Carlos Eduardo, que esteve sempre presente na fase de construção do projeto.

Aqui também presto meu agradecimento a equipe Sol do Equador, por fornecer material para teste, bem como todo o conhecimento aprendido durante os 4 anos de participação na equipe.

Agradeço ao IFPI que desde 2007 proporciona o aprendizado, não somente o conteúdo das disciplinas, mas também aprendizados para toda a vida.

Agradeço também a minha namorada Mickaelle Moraes pelo apoio e compreensão e por sempre estar presente não somente nos momentos felizes, mas também nos momentos e tomadas de decisões difíceis;

Por fim, agradeço aos meus pais, Francisca Lopes e José Augusto, pelos conselhos ao longo desse período e por estarem sempre dispostos a realizar sacrifícios para me ajudar em qualquer situação.

“A Vida é uma peça de teatro que não permite ensaios. Por isso, cante, chore, dance, ria, e viva intensamente, antes que a cortina se feche e a peça termine sem aplausos”.

Charlie Chaplin

RESUMO

Os ensaios mecânicos são utilizados para a caracterização das propriedades mecânicas de materiais. As propriedades físicas uma vez obtidas, são usadas para o dimensionamento de estruturas ou elementos de máquinas. Entretanto, a maioria dos ensaios realizados com frequência são de caráter estático, sendo assim necessário a realização de testes dinâmicos para o conhecimento de outros aspectos de projeto. Os ensaios de impactos são experimentos de caráter dinâmicos realizados em corpos de provas ou em componentes aos quais haja uma necessidade de observar a resposta desses materiais aos esforços dinâmicos de impacto solicitados. O presente trabalho tem por finalidade permitir um correto dimensionamento de componentes, como, por exemplo, os utilizados em aeronaves rádios controladas confeccionadas no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí - IFPI, que estão sujeitas a ação de cargas provenientes de impacto. Para tanto, este trabalho tem por objetivo dimensionar e construir uma máquina para realização de ensaios de impacto. O impacto será realizado através de içamento e queda de conjunto de peças, esse tipo de ensaio é conhecido por *drop test*. O dimensionamento se deu através de revisões bibliográficas, com a realização de cálculos de resistência de materiais e também com a escolha de mecanismo de içamento. A construção da mesma foi realizada com utilização de materiais de fácil acesso, permitindo uma redução de custo total de projeto. Foi obtida uma máquina rígida, que permite um fácil movimento de sobe e desce do conjunto (carga e componente a ser ensaiado). Com a realização do presente trabalho agora é possível realizar um dimensionamento adequado de componentes ou peças submetidas a esforços de impacto.

Palavras chaves: *Drop Test*. Ensaio de Impacto. Projetos de Extensão.

ABSTRACT

Mechanical tests are used to characterize the mechanical properties of materials. The physical properties, once obtained, are used for the dimensioning of structures or elements of machines. However, most tests performed frequently are of a static nature, so it is necessary to perform dynamic tests when they are required. Impact tests are dynamic character experiments performed on test bodies or on components. These kinds of tests are realized where there is a need to observe the response of materials to the dynamic impact stresses. The present work has the purpose of allowing a correct dimensioning of components, such as those used in radios controlled aircraft made in the IFPI, which are susceptible to the action of loads from impact. Therefore, this work aims to size and build a machine for conducting impact tests. The impact will be achieved through lifting and dropping of parts, this type of test is known as drop test. The sizing was done through bibliographical reviews, with the accomplishment of calculations of resistance of materials and also with the choice of lifting mechanism. The construction of the same one was made using materials of easy access, allowing a reduction of total cost. A rigid machine was obtained, which allows an easy upward and downward movement of the assembly (load and component to be tested). With the accomplishment of the present work it is now possible to carry out an appropriate dimensioning of components or parts subjected to impact efforts.

Keywords: Drop Test. Impact Test. Extension Projects.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Impacto em uma barra delgada.....	20
Figura 2 – Variação da energia para a ruptura x temperatura.....	22
Figura 3 – Protótipo inicial de uma máquina de <i>drop test</i>	28
Figura 4 – Modelagem em 3D da máquina de ensaios de queda.....	29
Figura 5 – Modelagem Final.....	30
Figura 6 – Protótipo de mecanismo do projeto.....	31
Figura 7 – Rodas utilizadas para movimentação.....	32
Figura 8 – Detalhamento de estrutura para dimensionamento.....	33
Figura 9 – Corte de peças.....	37
Figura 10 – Obtenção de medidas do projeto através de aplainamento.....	38
Figura 11 – Abertura de rasgos em peças.....	39
Figura 12 – Fatores a serem considerados em aberturas de furos para parafusos.....	40
Figura 13 – Processo de abertura de furos.....	41
Figura 14 – Guincho manual.....	42
Figura 15 – Roldana em “V” de nylon.....	45
Figura 16 – Esticador de cabo de aço.....	45
Figura 17 – Projeto em sua construção final.....	46
Figura 18 – Ensaio de <i>drop test</i> realizado em trem de pouso de aeronave.....	47
Figura 19. Empeno da roda após ensaios.....	48
Figura 20. Falha decorrente de ensaio realizado no protótipo de 2017.....	49
Figura 21. Ensaio em protótipo 2015.....	50
Figura 22. Ensaio em protótipo 2013.....	50
Figura 23. Deformação em trem de pouso do modelo de 2013.....	51
Figura 24. Demonstração da realização de ensaio em bequilha.....	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tensão de cisalhamento média calculada.....	33
Tabela 2 – Tensão de flexão normal máxima no elemento.....	34
Tabela 3 – Deslocamentos máximos.....	34
Tabela 4 – Composição química aço SAE 1020.....	35
Tabela 5 – Propriedades mecânicas do aço SAE1020.....	36
Tabela 6 – Requisitos de composição química para perfil tubular conforme NBR8261.....	36
Tabela 7 – Propriedades de tração de para perfil tubular.....	37
Tabela 8 – Propriedades mecânicas do parafuso ISO 8.8.....	41
Tabela 9 – Características físicas para parafuso A2.....	42
Tabela 10 – Propriedades mecânicas para eletrodo revestido E6013.....	43
Tabela 11 – Dados para cálculos de alturas de queda e resultados da mesmas.....	47

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>
AL.	Alongamento
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CAE	<i>Computer Aided Engineering</i>
C _r	Crítico
FAA	<i>Federal Aviation Administration</i>
FAR	<i>Federal Aviation Regulation</i>
G.P.M.	Golpes por Minutos
IFPI	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
L.E.	Limite de escoamento
L.R.	Limite de resistência a tração
NBR	Norma Brasileira
Máx	Máximo(a)
Méd	Médio(a)
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

F_i	Força no impacto	Q	Porção superior da área da seção transversal do elemento
k	Constante de mola	t	largura da área da seção transversal do elemento
η	Fator de correção para energia cinética	P_{cr}	Carga crítica máxima
m	Massa	π	Pi
v_i	Velocidade no impacto	E	Módulo de elasticidade do material
g	Gravidade	L	Comprimento da coluna
h	Altura	K	Fator de comprimento efetivo
E	Energia potencial	W_e	Peso efetivo
w	Peso	L	Fator de carga de sustentação da asa
S_m	Área da asa	d	Deflexão sob impacto do pneu e material rodante
mm	Milímetros	MPa	Mega Pascal
τ	Tensão de cisalhamento	"	Polegadas
V	Força de cisalhamento interno	%	Porcentagem
A	Área	kW	Quilowatt
σ	Tensão de flexão	$\emptyset$	Diâmetro do furo broqueado
M	Momento interno	Rpm	Rotações por minuto
c	distância perpendicular do eixo neutro a um ponto mais afastado do eixo neutro	R_m	Resistência media
I	Momento de inércia da área	N	Newton
f	Função	m	Metros
v	Deslocamento máximo		

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
2 OBJETIVOS.....	18
2.1 OBJETIVO GERAL	18
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	18
3 ENSAIOS DE IMPACTO.....	19
3.1 IMPACTO	19
3.2 TÉCNICAS DE ENSAIO DE IMPACTO	21
3.3 IMPORTÂNCIA DO ENSAIO DE QUEDA	22
4 PROJETO DE MÁQUINAS.....	23
4.1 DESIGN DE MÁQUINA	23
5 MATERIAIS E PROCESSOS.....	24
5.1 METODOLOGIA DO PROJETO.....	24
5.2 PROJETOS DE EXTENSÃO DO IFPI	25
5.2.1 Projeto de um trem de pouso.....	26
5.3 MODELAGEM	27
5.4 ESTUDO DO MECANISMO DE MOVIMENTO	29
5.5 DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL	31
5.6 SELEÇÃO DOS MATERIAIS.....	33
5.7 CORTE E USINAGEM DE MATERIAIS.....	35
5.8 ELEMENTOS DE FIXAÇÃO	37
5.8.1 Abertura de furos para parafusos.....	37
5.8.2 Parafusos	39
5.8.3 Processo de soldagem	40
5.9 CORROSÃO.....	40
5.10 IÇAMENTO DA CARGA	41
6 RESULTADOS.....	43

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	50
REFERÊNCIAS.....	51
ANEXO 1 – MEMORIAL DE CÁLCULOS	53
ANEXO 2 – DESENHO MECÂNICO	56

1 INTRODUÇÃO

O processo de desenvolvimento ou elaboração de um equipamento ou componente requer do projetista ou engenheiro o conhecimento das características específicas de cada material que irá compor o seu projeto. O conhecimento das propriedades mecânicas de um material é de notável importância no momento em que se projeta um componente ou estrutura. Atualmente é grande a variedade de materiais que possuem suas propriedades mecânicas tabeladas. Entretanto, também se faz necessário o conhecimento de como poderá se comportar uma estrutura ou montagem diante da imposição de cargas, impacto, dentre outras, o que muitas vezes acontece diferentemente do que tinha se previsto durante a fase de projeto. Os ensaios de materiais podem prever de forma aproximada e mais econômica como que dado componente ou estrutura irá responder aos esforços solicitados após a sua produção.

A demanda por estruturas que atendam cada vez mais características específicas da indústria moderna, requerem cada vez mais técnicas que assegurem a qualidade do produto acabado. O processo de desenvolvimento de um componente ou de um produto completo, além de possuírem as características predeterminadas por quem for adquiri-lo, deve atender normas para certificarem sua qualidade e bem como a segurança do mesmo. Assegurar que determinado componente resista aos esforços solicitados é imprescindível para certificar a segurança e a finalização da tarefa para a qual ele foi designado.

As principais categorias de esforços a que uma estrutura pode ser submetida são de tração, compressão, torção e cisalhamento. As estruturas projetadas devem resistir a todos esses esforços estáticos citados e principalmente aos mais solicitados durante sua operação ou uso. Entretanto, diferentemente das solicitações estáticas a que um componente pode sofrer, existem os esforços dinâmicos que possuem características totalmente diferentes dos estáticos. Esses esforços dinâmicos são mais frequentes em máquinas ou componentes mecânicos, o impacto, por exemplo, é um dos tipos de esforços dinâmicos que uma estrutura pode estar sujeita, que pode ser observado em estruturas de carros, aviões, motocicletas, dentre outros.

É importante para o engenheiro ou projetista considerar tais esforços dinâmicos, como, por exemplo, no momento de projetar uma máquina, o impacto que um componente ou estrutura possa estar ou irá ser submetido. De acordo com

(CHIAVERINI, 1986, p. 167) “o choque, mediante a aplicação repentina de um golpe sobre um corpo, envolve a produção e a transferência de energia, ou seja, realiza-se trabalho nas partes que recebem o golpe”. Uma estrutura que vá sofrer esforço de um choque mediante a um impacto deve ser projetada de maneira que ela resista a essa carga imposta e que ainda tenha a capacidade de dissipar a energia adquirida mediante a colisão recebida.

Há diferentes categorias de ensaios e equipamentos que servem para determinar o comportamento do material ao sofrer um impacto. Esses podem variar de acordo com o material a ser ensaiado. Para os metais, por exemplo, os ensaios mais utilizados são o de “*Charpy*” e o de “*Izod*”. Já para materiais compostos pode ser utilizado um teste de impacto de queda de peso, no qual um carregamento é deixado cair em cima do corpo de prova ensaiado. Todos os diferentes ensaios de materiais mediante o impacto dentre outros, como o próprio nome já diz, são realizados em corpos de prova que representa o material que está sendo analisado para ser utilizado em determinada estrutura. Todavia, existem conjuntos de peças ou estruturas, que quando montadas irão reagir de uma forma totalmente diferente do que uma única peça ao choque recebido. Isso se deve a composição de cada material que foi aplicado nas diferentes partes do conjunto e em como o mesmo está montado em relação ao ponto de impacto, pois, cada peça apresenta propriedades mecânicas distintas entre si. Todavia, mesmo que um conjunto de peças montadas possuam o mesmo material, sua montagem vai definir como a energia proveniente do choque será dissipada.

Os grupos de extensão que existe atualmente no Instituto Federal do Piauí (IFPI) a título de exemplo, Sol do Equador Aerodesign, Baja, EcoOpala, já vem realizando ensaios em diferentes materiais para a construção de seus respectivos protótipos, para obtenção de propriedades mecânicas e seleção de material. Entretanto, os ensaios realizados, servem apenas para determinar as propriedades mecânicas dos materiais provenientes de atuação de forças estáticas e não dinâmicas. Um trem de pouso, exemplo que se aplica a uma aeronave da equipe de *aerodesign*, para ser assegurado que irá atender aos esforços solicitados tem que passar por um ensaio de *Drop Test*, e isso vem sendo realizado manualmente sem muito critério ao longo dos anos pelo grupo de *Aerodesign* do IFPI. Já o EcoOpala, ainda não possui um sistema que verifique um provável impacto que o chassi do seu protótipo possa vir sofrer. Com o intuito de analisar os esforços sofridos por conjunto

de peças montadas, o presente trabalho tem como objetivo a pesquisa e o desenvolvimento de um projeto de uma máquina de ensaios em que se possa averiguar o comportamento de uma estrutura montada em conjunto mediante o esforço de um impacto ou choque, com determinado carregamento de peso sobre a estrutura em teste.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Projetar e construir uma máquina de ensaios de impacto (*Drop Test*), para proporcionar um dimensionamento adequado de componentes ou montagens de estruturas que possam ser analisados estruturalmente em termos de resistência a determinado impacto que possam ser submetidos.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Revisar literaturas bibliográficas que fazem parte do conteúdo abordado.
- Desenvolver um mecanismo que será utilizado para erguer as cargas com as peças submetidas ao ensaio.
- Calcular os esforços ao qual à estrutura da máquina será submetida durante os ensaios.
- Realizar a modelagem do desenho através da utilização de ferramentas computacionais.
- Selecionar de forma econômica e eficaz o material que será utilizado para construção da máquina de ensaios.
- Construir de forma funcional e segura o que foi projetado nas etapas anteriores.
- Realizar ensaios de componentes para verificação de funcionamento da máquina.

3 ENSAIOS DE IMPACTO

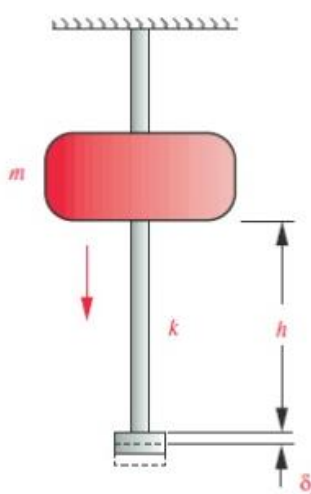
Nesse capítulo será apresentado o conceito de impacto, os mais utilizados ensaios de impacto, sua utilidade e importância no cenário dos projetos de engenharia. O presente trabalho, em relação aos ensaios de impacto, irá abordar apenas os pontos mais relevantes que devem aparecer nesse trabalho.

3.1 IMPACTO

Dependendo do objetivo para o qual uma estrutura ou componente dessa estrutura pode estar sujeita a esforços de impacto de diferentes magnitudes. O impacto é definido por Budynas e Nisbett (2011, p. 63) como sendo “uma força externa aplicada a uma estrutura ou peça é chamada de carga de impacto se o tempo em que ela é aplicada for inferior a um terço do menor período de vibração natural dessa peça ou estrutura, caso contrário, ela é denominada carga estática”.

Segundo Norton (2013, p. 109), utilizando-se de método de energia, para um caso de uma massa caindo na vertical, como mostra a figura 1, a equação da força de impacto (1) aplicada a equação da velocidade de impacto (2), obtendo-se a equação (3) da energia potencial de um corpo em queda a partir de uma distância h :

Figura 1. Impacto em uma barra delgada



Fonte: Norton, 2013.

$$\frac{F_i^2}{2k} = \eta \frac{mv_i^2}{2} \quad (1)$$

$$v_i^2 = 2gh \quad (2)$$

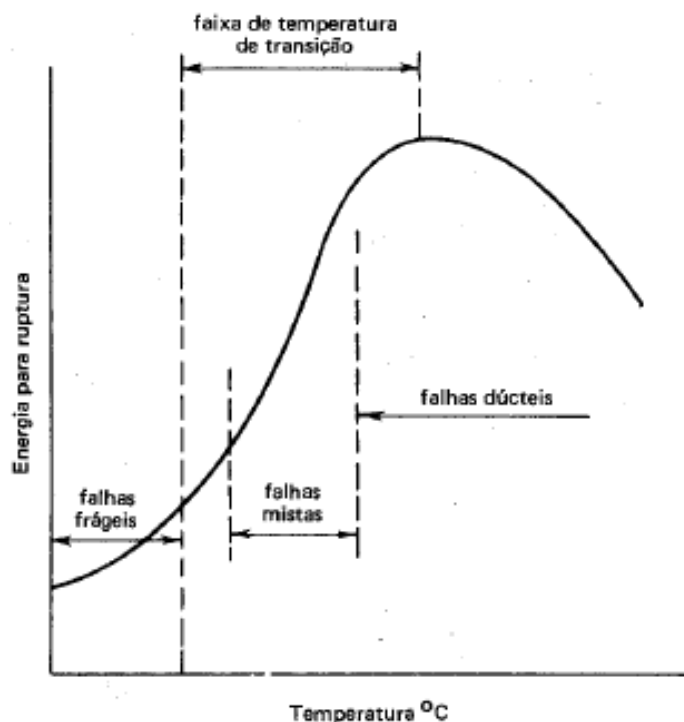
$$E = \eta \frac{mv_i^2}{2} = \eta mgh = W\eta h \quad (3)$$

Em projetos de engenharia mecânica, a presença de carregamentos devido ao impacto pode estar presente em diversos componentes de máquinas, como motores e transmissões de automóveis, em trem de pouso de aeronaves, dentre outros. A energia proveniente do choque pode ser absorvida pelas partes que recebem o impacto de 4 diferentes formas, sendo elas: por efeito de deformação plástica do próprio material, através do atrito entre os diversos elementos que compõem a estrutura, em decorrência de histerese, ou por fruto da inércia dos componentes que estão em movimento (CHIAVERINI, 1986).

Cada material reage de uma maneira diferente ao impacto de uma carga, isto deve-se a composição da peça ao qual está sendo imposta a força resultante do choque. A tenacidade, característica responsável pela ruptura de material ao choque, depende da ductilidade e da resistência do material para que ocorra a descontinuidade, mas independe da carga aplicada. O que irá afetar o surgimento de uma ruptura será a velocidade ao qual a energia proveniente do choque é absorvida (CHIAVERINI, 1986).

Outro aspecto que influencia a resposta de um material ao choque são as condições de temperatura no momento do impacto. Budynas e Nisbett (2011, p. 64), argumenta que “A temperatura crítica parece ser dependente tanto do material quanto da geometria do entalhe. Por isso, os desenhistas não devem confiar muito nos resultados de testes de impacto em barras com entalhe”. Tratando-se de metais Chiaverini (1986, p. 173) também afirma que “a temperatura tem um efeito muito acentuado na resistência ao choque dos metais, ao contrário do que ocorre na resistência estática e ductilidade, pelo menos nas faixas usuais de temperatura”. A Figura 2 mostra a relação da energia para ruptura com a temperatura de metal.

Figura 2. Variação da energia para ruptura x temperatura



Fonte: Chiaverini, 1986.

3.2 TÉCNICAS DE ENSAIO DE IMPACTO

Na literatura sempre encontramos como os dois mais utilizados processos de ensaio de impacto em corpos entalhados como sendo o ensaio de impacto do tipo Charpy e Izod, que são uns dos mais antigos no que se refere a teste de materiais ao choque. De acordo com Budynas e Nisbett (2011, p. 64), “em ambos os testes o corpo de prova é atingido por um pêndulo solto de uma altura fixa e a energia por ele absorvida, chamado valor de impacto”. Outro experimento de impacto também muito utilizado é o teste conhecido como martelo de queda ou ensaio de impacto de queda de peso, o qual uma massa é suspensa e deixada cair sobre um corpo de prova. Duell (sem data, p. 102, tradução nossa) explica que o ensaio de queda de peso assim como os ensaios acima citados é um experimento de baixa velocidade, sendo este o mais comum teste realizado em materiais compósitos.

Os ensaios mecânicos são sempre de extrema importância e devem ser realizados em qualquer projeto de engenharia. De acordo com Chiaverini (1986) os ensaios mecânicos servem mais do que apenas para caracterizar um material. Um

ensaio mecânico visa comparar as características de um material com outro e analisar a influência do processo de fabricação utilizado para sua produção. Além de atestar se o material atenderá as condições exigidas quando realmente aplicado a uma estrutura ou máquina inteira. É argumentado também por (CHIAVERINI, 1986, p. 167), “para ter-se o resultado mais representativo, o ensaio mecânico deveria ser realizado numa das peças produzidas”.

3.3 IMPORTÂNCIA DO ENSAIO DE QUEDA

Os ensaios de impacto, especialmente o de queda muitas vezes não são tomados com tão grande importância quanto os testes de tração e compressão nos projetos em geral. Entretanto, Moraes, Almeida e Godefroid (2001, p. 28) afirmam que, “os eventos de impacto a baixa energia são de ocorrência comum nas estruturas de engenharia em geral. No caso de estruturas em compósitos esse tipo de impacto leva a geração de danos internos”. Em seu trabalho com painéis de alumínio Her e Lan (2014, tradução nossa) concordam que mesmo o alumínio sendo um material com alta resistência, utilizado nas indústrias aéreas e automobilística, pode estar suscetível a impactos causados por pequenos objetos. Embora os impactos sejam a baixa velocidade a resistência e confiabilidade do material pode ser afetada.

Outro exemplo da importância da realização de ensaio de impacto especialmente em produto finalizado são os celulares. Como afirma (LI, LIU, 2011, p. 1, tradução nossa), “o tipo mais comum de falha que ocorrem em celulares é provavelmente do impacto devido às quedas acidentais, então os fabricantes têm o objetivo de desenvolver produtos que são resistentes ao choque e que podem sobreviver a um teste de queda de determinada altura”. Trazendo para uma realidade mais próxima do IFPI, para o projeto de um Aerodesign ou de uma aeronave, por exemplo, é de suma importância a realização de ensaios em partes dos protótipos já finalizados e não somente em corpos de prova. Como argumenta (HOWELL et al. 1990, tradução nossa) carregamentos dinâmicos na aeronave e vibrações advindos do pouso, decolagem e taxiamento são fatores significantes que propiciam defeitos por fadiga, esforços dinâmicos em toda a estrutura e ainda causam a dificuldade de controle do avião em solo.

4 PROJETO DE MÁQUINAS

Nesse capítulo será percorrido brevemente sobre os principais aspectos e a relevância de um projeto de engenharia mecânica.

4.1 DESIGN DE MÁQUINA

O *design* de projetos é algo que está sempre presente no cotidiano do engenheiro mecânico, seja no projeto de simples componentes ou em projetos de complexas máquinas. O engenheiro deve dimensionar os movimentos e as relações de força, para projetar determinada máquina que execute uma dada função. Através disso, ele poderá determinar quais materiais utilizar em cada peça que compõem a máquina, essa é a essência do projeto de máquinas (NORTON, 2013). De acordo com Budynas e Nisbett (2011, p. 30), “projetar é formular um plano para atender a uma necessidade específica ou resolver um problema”. Todo e qualquer projeto de engenharia deve ter por finalidade a solução de algum problema ou o melhoramento na resolução de uma tarefa que já tem resposta para o obstáculo a ser transpassado. Como argumenta Juvinall e Marshek (2008, p. 4), que “se os dispositivos não poderem ser construídos para exercer suas funções eles não terão qualquer interesse para os engenheiros”.

O engenheiro tem o papel fundamental num projeto utilizando seu vasto conhecimento de diversos assuntos para procurar resolver de forma precisa e mais econômica um dado problema que venha ser exposto. “Os engenheiros mecânicos estão associados à produção e ao processamento de energia e ao fornecimento de meios de produção, às ferramentas de transporte e às técnicas de automação” (BUDYNAS E NISBETT 2011, p. 31). O projetista através da realização de iterações e testes, comuna o seu trabalho em um projeto que atenda a objetivo pré-estabelecido, como afirma Norton (2013, p. 4), “o objetivo final do projeto de máquinas é dimensionar e dar forma às peças e escolher os materiais e os processos de manufatura apropriado, de modo que a máquina resultante possa desempenhar função desejada sem falhar”.

5 MATERIAIS E PROCESSOS

Neste capítulo será apresentado a metodologia adotada na elaboração do projeto proposto, partindo do problema inicial que surgiu dentro do IFPI e concluindo com a concepção da montagem da máquina de ensaio de queda.

5.1 METODOLOGIA DO PROJETO

A metodologia adotada para o presente trabalho constitui-se de 10 partes, que estão expostas no quadro 1. A etapa de identificação da necessidade consiste da exposição do problema de maneira ainda não especificada. Já na etapa 2, tem-se uma definição melhor do problema para que pesquisas de base sejam feitas. Na etapa 3, os objetivos devem ser traçados de forma clara. A etapa 4 é caracterizada por uma delimitação de tarefas a serem realizadas com intuito de delimitar o problema em estudo. No meio desse percurso, etapa 5, a prioridade é o alcance das mais variadas soluções possíveis. Na etapa 6 é realizada a análise e modificações das soluções dadas na etapa 5. As etapas que se seguem 7 e 8 são caracterizadas pela escolha da solução e detalhamento da mesma. A etapa 9 é caracterizada pela produção de um protótipo e a 10 pela produção em escala (NORTON, 2011).

Quadro 1. Metodologia de projeto

1	Identificação da necessidade
2	Pesquisa de suporte
3	Definição dos objetivos
4	Especificações das tarefas
5	Síntese
6	Análise
7	Seleção
8	Projeto detalhado
9	Protótipo e teste
10	Produção

Fonte: Norton, 2011

Entretanto, para o presente trabalho a etapa 10 não será realizada. Todas as etapas explanadas acima e mostradas no quadro 1, mesmo que não descritas de

maneira clara e sequencial no texto, está presente de forma intrínseca no texto e foram realizadas ao longo do projeto de forma a alcançar um objetivo final da melhor forma possível. Como argumenta Norton (2011, p. 6), “a iteração é necessária ao longo de todo o processo, indo de qualquer etapa de volta a uma etapa anterior, em todas as combinações possíveis e repetidamente”.

Portanto, com o propósito de alcançar os objetivos traçados na presente pesquisa de caráter aplicado, será realizado primeiramente antes de qualquer atividade de projeto uma revisão bibliográfica, para que não seja tomada nenhuma decisão infundamentada ou sem a utilização de nenhum critério de projeto de máquina. Com esse intuito, inicialmente será realizado uma pesquisa minuciosa de artigos (publicados em anais nacionais e internacionais), em periódicos da Capes e no Google acadêmico, além da busca por teses de mestrado e doutorado, cuja temática é relativa ao campo do presente estudo aqui pretendido.

5.2 PROJETOS DE EXTENSÃO DO IFPI

Atualmente no Instituto Federal do Piauí encontra-se em contínuo desenvolvimento três projetos de extensão que atendem o curso de engenharia. Esses projetos de extensão além da prática de conhecimento de sala de aula aplicada, também contribuem para o desenvolvimento de pesquisas científicas. Dentre as quais, destaca-se uma equipe de *aerodesign* que projeta e constrói aviões rádios controlados. A equipe foi fundada no ano de 2011 dentro do IFPI. Todavia, a primeira participação oficial em competição ocorreu somente no ano de 2013. A competição é organizada pela Sociedade dos Engenheiros da Mobilidade (SAE), realizada no Brasil desde 1999 (SAE BRASIL, 2018).

A equipe utiliza de laboratórios do IFPI para fazer ensaios de materiais. Contudo, a equipe não dispõe de um aparato para realizar um dos mais importantes ensaios que se deve fazer quando se projeta uma aeronave, o ensaio de impacto de trem de pouso. Atualmente esse tipo de ensaio vem sendo feito manualmente e sem muito critério de avaliação. O presente projeto partiu dessa primeira necessidade e com o seu desenvolvimento outras necessidades podem também ser atendidas.

5.2.1 Projeto de um trem de pouso

Um projeto de um trem de pouso como qualquer outra parte de uma aeronave, envolve diversos cálculos e análises de materiais que podem ser utilizados em sua construção. De acordo com Niu (1995, p. 69, tradução nossa), “Um trem de pouso convencional possui duas funções básicas. Ele dissipa a energia associada a descida vertical da aeronave durante seu contato com o solo; e, fornece os meios para realização de manobras do avião em solo”. Para os projetos de *aerodesign* assim como aeronaves de grande porte, é necessário estudar e dimensionar as cargas atuantes no componente trem de pouso. Três situações principais de contato com o solo devem ser consideradas quando se dimensiona as cargas em aeronaves, tanto para trem de pouso convencionais como para os triciclos, são elas: pouso em três rodas, aterrissagem em duas rodas e pouso com uma das rodas tocando primeiramente o solo (ISCOLD, sem data).

Com o propósito de atender requisitos de projeto dentro da competição SAE *Aerodesign* Brasil e levar em conta as normas internacionais de projeto de aeronave, a máquina do presente trabalho foi desenvolvida para atender as características mais comuns presentes nas configurações de aeronaves para competição. Para testar os componentes do conjunto trem de pouso e observar o seu comportamento um ensaio de *drop test* deve ser realizado. De acordo com a *Federal Aviation Regulation* (FAR) vinculada a *Federal Aviation Administration* (FAA) (1996, p. 52, tradução nossa), o teste deve ser feito utilizando toda a aeronave ou na unidade de trem de pouso, a altura do experimento pode ser determinada pela seguinte equação 4 que se segue:

$$h = 41.4(m/S_m)^{0.5} \text{ mm} \quad (4)$$

Considerando-se a sustentação da asa da aeronave, o peso efetivo utilizado na fórmula acima e durante o teste de impacto deve ser calculado de acordo com a equação 5:

$$W_e = W \frac{h+(1-L)d}{(h+d)} \text{ mm} \quad (5)$$

5.3 MODELAGEM

Para o desenho inicial foi feito um croqui, que consiste numa representação à mão livre razoavelmente em escala, esse croqui serve de base ou ponto de partida para a concepção do projeto em si (NORTON, 2013). Posteriormente, foi utilizado o *software Solid Works* para a realização do desenho de forma tridimensional, de maneira a observar de forma mais detalhada o projeto. O *software Solid Works* faz parte de um grupo de programas denominados *Computer Aided Engineering* (CAE) como argumenta Budynas e Nisbett (2011, p. 35), “o termo engenharia com o auxílio de computador (CAE) geralmente se aplica a todas as interfaces das engenharias relacionadas com computadores”. O primeiro modelo após construção do presente trabalho, pode ser observado na figura 3. O protótipo foi desenvolvido durante intercâmbio acadêmico no *Confederation College*, que fica situado na província de Ontario no Canadá. A necessidade da construção da bancada na época, foi objetivando a realização de testes em produtos que seriam utilizados em protótipos de *aerodesign*, essas peças foram confeccionadas utilizando-se impressão 3D. Este trabalho teve por objetivo a possibilidade da introdução de novos materiais para serem utilizados pelos grupos de extensão do IFPI. Nesse primeiro protótipo identificou-se um erro relacionado ao atrito que impedia uma movimentação livre do carro suporte. Além disso, não foi utilizado critério nenhum para dimensionamento da estrutura, pois o objetivo principal no momento em que foi construído não era esse.

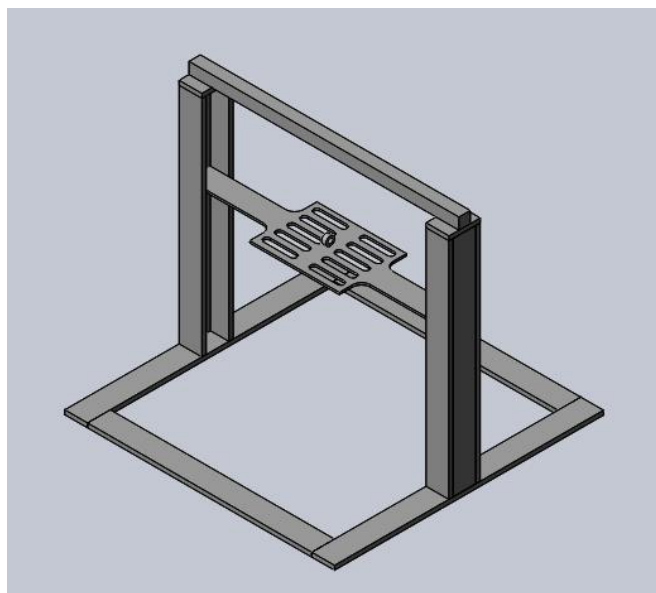
Figura 3. Protótipo inicial de uma máquina de *drop test*



Fonte: Autoria própria, 2015

O segundo modelo desenvolvido com o objetivo de superar as adversidades do primeiro projeto, pode ser visto na figura 4. Todos os modelos foram desenvolvidos de maneira a atender ao problema inicial e respeitando um custo limitado de material e mão de obra. O produto final sempre foi desenvolvido pensando na funcionalidade e, ao mesmo tempo, na simplicidade. “A complexidade desnecessária leva, normalmente, ao aumento de esforços e de tempo, maior dificuldade e maior custo de fabricação, montagem mais cara e lenta, e maior custo e dificuldade de manutenção do produto” (COLLINS, 2006, p. 10).

Figura 4. Modelagem em 3D da máquina de ensaios de queda



Fonte: Autoria própria 2017

No decorrer do desenvolvimento da modelagem acima, observou-se que a mesma ainda poderia apresentar um excessivo atrito nos trilhos ou até mesmo causar o engripamento da plataforma de movimentação nos trilhos. Portanto, foi então desenvolvido um modelo final de protótipo que utiliza trilhos e rodas para facilitar a descida e subida da plataforma ao qual é fixada os elementos para testes e onde também é alocado o carregamento. O último modelo desenvolvido pode ser visto na figura 5. Também foi colocado neste último projeto, eixo roscado com porcas para que possa ser feito um nivelamento dos trilhos e garantir uma descida rápida da peça ensaiada.

Figura 5. Modelagem final

Fonte: Autoria própria, 2018

5.4 ESTUDO DO MECANISMO DE MOVIMENTO

Segundo Vinogradov (2000), uma máquina ou mecanismo deve conter partes móveis, desde que transforme movimentos, produza trabalho, ou modifique energia. Todavia, uma estrutura que não possui partes móveis, somente há função estrutural como, por exemplo, uma ponte.

Com o objetivo de formalizar propriamente dito uma máquina e de estudar da melhor forma como se daria o movimento de subida do carro suporte de peça, foi realizado a montagem de um protótipo da máquina de ensaios de queda, figura 6, a partir de análises práticas foi retirado do projeto componentes desnecessários, por exemplo, o acréscimo de mais dois trilhos e de mais duas rodas. O protótipo proporcionou também a elucidação de dúvidas pertinentes aos modelos propostos. Por outro lado, em observância ao tempo ocioso da utilização da máquina de ensaios, preferiu-se desenvolver o projeto de modo que ele fosse desmontável em sua maior parte, obtendo-se assim um aproveitamento melhor de área disponível em laboratório para acomodação do projeto final. O projeto recebeu várias alterações, além das descritas acima, para evitar problemas pós-montagem, foi colocado três parafusos posicionados atrás de um dos trilhos, enquanto o trilho da lateral oposta permaneceu

fixo. Esses parafusos serão utilizados para evitar problemas de desalinhamentos e de folga entre trilhos e rodas.

Figura 6. Protótipo de mecanismo do projeto



Fonte: Autoria própria, 2018

As rodas utilizadas no projeto são do tipo comercial utilizadas em portões de aço, portanto, atenderão aos esforços solicitados. As rodas utilizadas no projeto são dotadas de rolamentos interno o que facilita o seu deslocamento sobre os trilhos, proporcionando assim um rápido movimento de queda, objetivo principal do ensaio que se realiza na máquina. A Figura 7 mostra uma dessas rodas utilizadas no presente trabalho.

Figura 7. Rodas utilizadas para movimentação

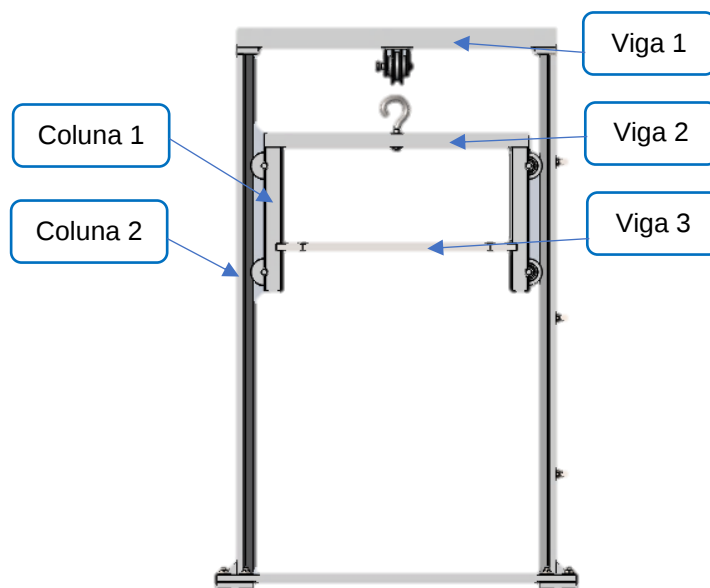


Fonte: Autoria própria, 2018

5.5 DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL

Para alcançar o objetivo de projetar qualquer tipo de componente estrutural, é necessário conhecer as características do material que pretende se empregar. Segundo (HIBELLER, 2010, p. 1) “no projeto de qualquer tipo de máquina, em primeiro lugar é necessário usar os princípios de estática para determinar as forças que agem sobre os vários elementos, bem como no seu interior”. Já para NORTON (2010), primeiramente deve ser feita uma análise cinemática do modelo de máquina que se deseja projetar, para realizar os movimentos desejados. Posteriormente a essa análise cinemática é que se daria o início da análise de forças e tensões a que ela pode ser sujeita. Para o presente trabalho excluiu-se a análise de elementos que venham ser submetidos a esforços de fadigas, pois entende-se que as partes móveis do projeto desenvolvido não sofrerão a atuação de forças cíclicas contínuas. A Figura 8 demonstra cada parte do presente projeto para o qual realizaram-se os cálculos estruturais. Os cálculos para o presente projeto foram realizados para um carregamento máximo de 50 Kg.

Figura 8. Detalhamento de estrutura para dimensionamento



Fonte: Autoria própria, 2018

A tensão de cisalhamento média que atua em cada viga pode ser calculada de acordo com a equação 6 (HIBELLER, 2010).

$$\tau_{méd} = \frac{V}{A} \quad (6)$$

Os valores encontrados podem ser observados na tabela 1.

Tabela 1. Tensão de cisalhamento média calculada

	Viga 1	Viga 2	Viga 3
$\tau_{méd}$ (Mpa)	0,70	0,55	1,23

Fonte: Autoria própria, 2018

Já a tensão de flexão máxima que atua no ponto mais afastado da linha neutra, ao qual as vigas podem estar submetidas são definidas pela equação 7 (HIBELLER, 2010).

$$\sigma_{máx} = \frac{Mc}{I} \quad (7)$$

Os valores obtidos acerca das tensões de flexões que podem ser impostas a estrutura podem ser observados na tabela 2.

Tabela 2. Tensão de flexão normal máxima no elemento

	Viga 1	Viga 2	Viga 3
$\sigma_{máx}$ (Mpa)	81,49	158,83	204,35

Fonte: Autoria própria, 2018

Outro fator que foi considerado durante a fase de dimensionamento, foi o deslocamento máximo que as vigas possam demonstrar. Se o deslocamento for demasiado além de comprometer a estrutura poderia também afetar a altura utilizada durante os ensaios. Para tal, foi utilizado o método de inclinação e deslocamento da linha elástica, o qual diz que a curva da linha elástica de uma viga pode ser

representada matematicamente por $\sigma = f(x)$ (HIBELLER, 2010). Os deslocamentos encontrados podem ser observados na tabela 3.

Tabela 3. Deslocamentos máximos

	Viga 1	Viga 2	Viga 3
v(mm)	0,1123	0,1988	0,4463

Fonte: Autoria própria, 2018

Uma análise de cisalhamento transversal foi realizada nas colunas onde são fixadas as rodas. A tensão de cisalhamento que essa parte da estrutura pode ser submetida é calculada utilizando-se a equação 8 (HIBELLER, 2010).

$$\tau = \frac{VQ}{It} \quad (8)$$

Para a coluna 1 bem como a coluna igual do lado oposto foi encontrado um valor de tensão de cisalhamento de $\tau = 15,25 \text{ MPa}$.

Para a coluna 2 e sua correspondente no lado oposto a ele foi utilizado cálculo da carga crítica máxima imediatamente antes do início da flambagem, esse carregamento não deve ser o suficiente para que a tensão na coluna exceda o limite de proporcionalidade. A carga crítica máxima pode ser determinada pela equação 9 (HIBELLER, 2010).

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{(KL)^2} \quad (9)$$

O resultado encontrado para a carga crítica máxima nas colunas acima citadas foi de $P_{cr} = 2,25 \text{ MPa}$.

5.6 SELEÇÃO DOS MATERIAIS

Os materiais para o presente projeto foram escolhidos com o objetivo principal de priorizar a economia do projeto. Portanto, a maior parte dos materiais selecionados foram encontrados em estoque no IFPI, e o projeto foi desenvolvido e desenhado de maneira a adaptar-se a essa disponibilidade de material. Um dos aços utilizado no

projeto foi o aço SAE ou *American Iron and Steel Institute* (AISI) 1020 que possui a composição química mostrada na tabela 4.

Tabela 4. Composição química aço SAE 1020

ABNT/SAE/AISI	C	Mn	P máx.	S máx.
1020	0,18 – 0,23	0,30 – 0,60	0,040	0,050

Fonte: FAVORIT – Aços Especiais. 2018

Os aços comuns, como é o caso do aço 1020, devido a sua composição química possui como características uma boa soldabilidade e forjabilidade, baixa resistência mecânica e usinabilidade. Esse aço é empregado na indústria agrícola, automobilística, de máquinas e equipamentos, dentre outros (FAVORIT, [2018]). O aço utilizado para o desenvolvimento da máquina de ensaio de queda possui as seguintes propriedades mecânicas listadas na tabela 5.

Tabela 5. Propriedades mecânicas do aço SAE 1020

SAE ou AISI	Resistência a Tração MPA	Resistência ao Escoamento MPA	Alongamento em 2", %	Redução em área, %	Dureza Brinell
1020	470	390	15	40	131

Fonte: Elementos de Máquinas de Shigley. 2011

O aço citado acima utilizado no presente trabalho atende as solicitações impostas durante a realização de ensaios de queda no aparato desenvolvido. Além das características químicas e propriedades mecânicas o aço AISI ou SAE 1020 possui uma resistência ao choque de 8,3 a 11,0 Kgf.m (CHIAVERINI, 1986).

Outro tipo de aço-carbono utilizado no projeto, foi de perfil tubular de seção quadrada. Esse perfil é muito utilizado em esquadrias e em estruturas metálicas diversas. O perfil de lado $l = 25$ mm, foi utilizado para ser fixada as rodas que percorrem os trilhos. A Norma Brasileira Regulamentadora (NBR) 8261, estabelece os critérios de composição química em porcentagem desse perfil estrutural que podem ser observados na tabela 6.

Tabela 6. Requisitos de composição química para perfil tubular conforme NBR 8261

Elemento	Composição química em função do grau, teores em massa				Norma a utilizar na análise química
	Análise de panela		Análise de produto		
	A e B	C	A e B	C	
Carbono máx.	0,26	0,23	0,30	0,27	NBR 5604 NBR 6597
Fósforo máx.	0,04	0,04	0,05	0,05	NBR 6340
Enxofre máx.	0,05	0,05	0,063	0,063	NBR 5018 NBR 5606 NBR 5612
Manganês máx.	-	1,35	-	1,40	NBR 5613 NBR 6341
Cobre min. (quando especificada)	0,20	0,20	0,18	0,18	NBR 5609

Fonte: NBR 8261. 1983

As propriedades mecânicas do perfil tubular utilizado no presente trabalho, são demonstradas na tabela 7. Os cálculos estruturais foram feitos como tendo por base o grau “A” de seção quadrada de classificação.

Tabela 7. Propriedades de tração de para perfil tubular.

Características	Propriedades de tração em função do grau					
	Seção circular			Seção quadrada		
	A	B	C	A	B	C
Limite de resistência a tração LR mínimo (MPa)	310	400	427	310	400	427
Limite de escoamento LE mínimo (MPa)	228	290	317	269	317	345
Alongamento (%) A ₄ (Lo = 50 mm) mínimo	25 ^(A)	23 ^(B)	21 ^(C)	25 ^(A)	23 ^(B)	21 ^(C)

Fonte: NBR 8261. 1983.

5.7 CORTE E USINAGEM DE MATERIAIS

Os materiais em aço 1020 foram obtidos a partir de barras obtidas através de processo de manufatura por trefilação. Para a obtenção das barras nas medidas do projeto, utilizou-se de uma serra vai e vem da marca Schneider, modelo 4580 de 12”,

para serra de 350 mm. A Figura 9 demonstra um dos cortes realizados para obtenção das barras para o presente trabalho.

Figura 9. Corte de peças



Fonte: Autoria própria, 2018

Devido às folgas que a serra possui, os cortes realizados possuíam dimensões diferentes das ajustadas para o corte sendo necessário a realização de um processo posterior ao dos cortes para a correção dos erros. O processo utilizado foi o de aplainamento, realizado na plaina limadora, máquina está de modelo ZOCCA 500, com potência instalada de 22 KW e número máximo de 112 G.P.M., esse processo de aplainamento pode ser visto na figura 10.

Figura 10. Obtenção de medidas do projeto através de aplainamento



Fonte: Autoria própria, 2018

A plaina limadora também foi utilizada para a abertura de canais em algumas partes do projeto, como pode ser observado na figura 11. Um paquímetro digital Starrett, modelo EC799A-6/150 com resolução de 0,01 mm, foi utilizado durante todo o processo de construção da máquina de ensaio de queda.

Figura 11. Abertura de rasgos em peças



Fonte: Autoria própria, 2018.

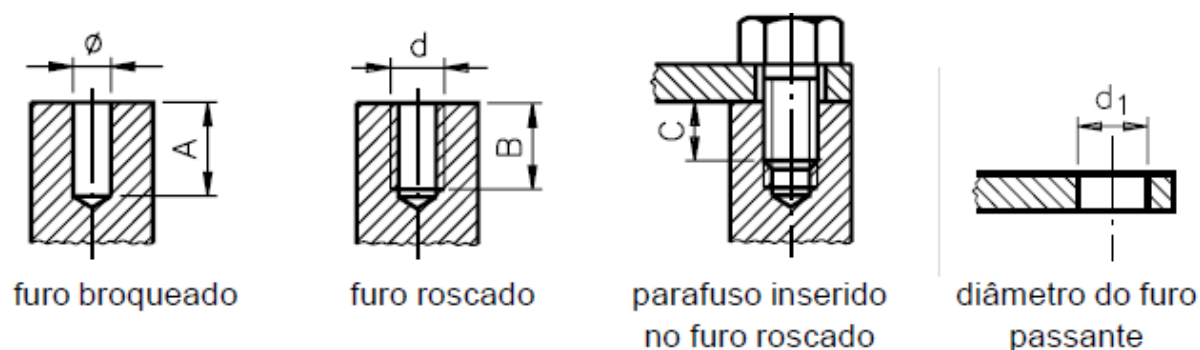
5.8 ELEMENTOS DE FIXAÇÃO

Nesta seção serão apresentados os elementos de fixação fixo ou móveis que foram utilizados no presente projeto, bem como se deu cada tipo de processo.

5.8.1 Abertura de furos para parafusos

No processo de abertura de furos para união de peças é importante considerar a profundidade do furo broqueado ou roscado, comprimento útil de penetração do parafuso e o diâmetro do furo passante (TELECURSO 2000, 1996). Esses fatores são determinantes para a preservação de roscas de parafusos, durante montagem ou desmontagem de componentes. Durante o processo de fabricação do presente projeto foi levado em consideração os fatores citados acima, utilizando-se para isso as figuras 12 e o quadro 2.

Figura 12. Fatores a serem considerados em aberturas de furos para parafusos



Fonte: Telecurso 2000, 2000

Quadro 2. Fatores a considerar ao unir peças com parafusos

Material	Profundidade do furo broqueado A	Profundidade da parte roscada B	Comprimento de penetração do parafuso C	Diâmetro do furo passante d_1
Aço	$2d$	$1,5d$	$1d$	$1,06d$
Ferro fundido	$2,5d$	$2d$	$1,5d$	
Bronze, latão	$2,5d$	$2d$	$1,5d$	
alumínio	$3d$	$2,5d$	$2d$	

Fonte: Telecurso 2000, 1996

Para o processo de abertura de furos, que pode ser observado na figura 13, utilizou-se uma furadeira do tipo radial da marca Kome, modelo KR 40, com rotação máxima de 2100 rpm, durante os processos de abertura de furos foi utilizado um nível de bolha.

Figura 13. Processo de abertura de furos

Fonte: Autoria própria, 2018

5.8.2 Parafusos

A realização da união de algumas partes da máquina, desenvolvida no presente trabalho, foram feitas através da utilização de dois tipos de parafusos. O primeiro feito em aço carbono, que possui as propriedades mecânicas descritas pela norma *International Organization for Standardization* (ISO) 898-1, algumas dessas propriedades, para a temperatura ambiente, podem ser observadas na tabela 8.

Tabela 8. Propriedades mecânicas do parafuso ISO 8.8

Propriedades físicas ou mecânicas		Classe de propriedade
		8.8
		$d \leq 16 \text{ mm}$
Resistência a tração, R_m , MPA	nom.	800
	min.	800
Dureza Vickers, $HV F \geq 98N$	min.	250
	máx.	320
Alongamento percentual após fratura para testes realizados em máquina, A,%	min.	12

Fonte: ISO, 2009

O outro parafuso utilizado no projeto, devido ao tamanho e disponibilidade no mercado local, foi o parafuso classificado como A2-70 que possui as características

físicas descritas na tabela 9, determinadas pela norma ISO 3506-1 para parafusos inoxidáveis.

Tabela 9. Características físicas para parafuso A2

Grupo de aço	Grau do aço	Classe de propriedade	Resistência a tração R_m min. MPA	Esforço a 0,2% de tensão permanente $R_{p0,2}$ min. MPA	Alongamento após a fratura min. mm
Austenítico	A1, A2,	50	500	210	0,6d
	A3, A4,	70	700	450	0,4d
	A5	80	800	600	0,3d

Fonte: ISO, 2009

5.8.3 Processo de soldagem

Para o processo de montagem da máquina de ensaio de queda algumas partes necessitaram passar por um processo de soldagem. O processo de soldagem utilizado foi o arco elétrico com eletrodo revestido. Todos os eletrodos utilizados nos processos de soldagem do presente trabalho são classificados como E6013, variando apenas o diâmetro de sua alma. Esse tipo de eletrodo “contêm um grande percentual de dióxido de titânio (rutilo - TiO_2) em seu revestimento. Eles são projetados para ter um arco de baixa penetração, permitindo que metais de pequena espessura sejam soldados sem furar a peça” (ELETRODOS REVESTIDOS, 2005, p. 13). As propriedades mecânicas desse eletrodo aplicado aos aços carbonos podem ser observadas na tabela 10.

Tabela 10. Propriedades mecânicas para eletrodo revestido E6013

L.E. (MPa)	L.R. (MPa)	AL. (%)
≥ 331	≥ 414	≥ 17

Fonte: Eletrodos revestidos, 2005

5.9 CORROSÃO

Com o objetivo de proporcionar uma melhor aparência ao projeto desenvolvido e de também proteger contra a corrosão, pois a maioria das partes envolvidas no projeto advém de materiais metálicos, um revestimento não-metálico foi realizado

sobre as peças. Gentil (2003, p. 1) argumenta que “a corrosão, em geral, um processo espontâneo, está constantemente transformando os materiais metálicos de modo que a durabilidade e desempenho dos mesmos deixam de satisfazer os fins a que se destinam”. A ação corrosiva nos metais utilizados no presente projeto ocorre devido à exposição dos mesmos a própria atmosfera. A preparação da superfície para o recebimento da proteção anticorrosiva foi realizada através de processo de lixamento manual e limpeza posterior. O processo de pintura por aspersão foi utilizado como meio de proteção contra a corrosão. O processo de pintura como uma técnica de proteção anticorrosiva, possui uma alta aceitação devida a sua facilidade de aplicação, a relação custo-benefício, fácil manutenção (Gentil, 2003).

5.10 IÇAMENTO DA CARGA

Para o processo de levantamento da carga com a peça a qual deseja-se submeter ao ensaio de queda, foi utilizado como componente auxiliar para esse procedimento um guincho manual, observável na figura 14. O guincho manual é dotado de catraca com dispositivo de trava e destrava, dotado de uma capacidade máxima de 450 Kg, diâmetro do cabo de aço de 4,5 mm, comprimento de 3 m, o gancho de amarração é dotado de uma lingueta de segurança. Para facilitar o movimento de descida durante os ensaios, o cabo de aço foi substituído por uma corda, essa substituição proporciona uma descida mais rápida, pois observou-se uma redução no atrito em relação a utilização de cabo de aço.

Figura 14. Guincho manual



Fonte: Autoria própria, 2018

Uma roldana foi utilizada para dar apoio à corda, bem como na transferência de força e movimento durante o erguimento da carga durante o ensaio. A roldana, mostrada na figura 15 abaixo, utilizada é do tipo comercial em “V” rebitada, o material da roldana é feito em nylon e a caixa possui acabamento zincado.

Figura 15. Roldana em “V” de nylon



Fonte: Autoria própria, 2018

Para prender a corda do guincho no carro que faz o movimento de sobe e desce da máquina de ensaio, foi utilizado um olhal proveniente de um esticador de cabo de aço forjado, que é vendido comercialmente. O esticador de cabo de aço pode ser observado na figura 16. O esticador é produzido de acordo com a norma DIN 1480, possui carga de trabalho de até 110 Kg (SIVA, [2018]).

Figura 16. Esticador de cabo de aço



Fonte: Autoria própria, 2018

6 RESULTADOS

Ao final do trabalho, conclui-se que a máquina de ensaios desenvolvida cumpriu com o seu principal objetivo, agora pode-se realizar um adequado dimensionamento de componentes ou produto acabado que está sujeito a atuação de cargas provenientes de impacto. A máquina de ensaio após finalizada a sua construção, durante a realização de ensaios, pode ser observada na figura 17. A estrutura do projeto após construída possui uma massa de 25 Kg, um desenho com suas principais dimensões encontra-se no anexo 2.

Figura 17. Projeto em sua construção final



Fonte: Autoria própria, 2018

Para comprovar as funcionalidades do presente projeto foram realizados diversos ensaios de *drop test* em trens de pouso de protótipos de *aerodesign*, desenvolvidos e construídos pela equipe Sol do Equador de *aerodesign* do IFPI. Os cálculos, para determinar a altura de queda, foram realizados de acordo com a norma FAR part 23, a altura para o impacto foi calculada conforme a equação 4. A tabela 11 demonstra os valores de entradas utilizados para os testes. Os valores utilizados durante os ensaios foram calculados pela equipe durante as construções dos protótipos do ano de 2013 ao ano de 2017. As alturas “h” mostradas na coluna da

direita, alturas para a realização dos ensaios, variam de acordo com a carga total e a área de asa de cada projeto desenvolvido no decorrer dos anos acima citados.

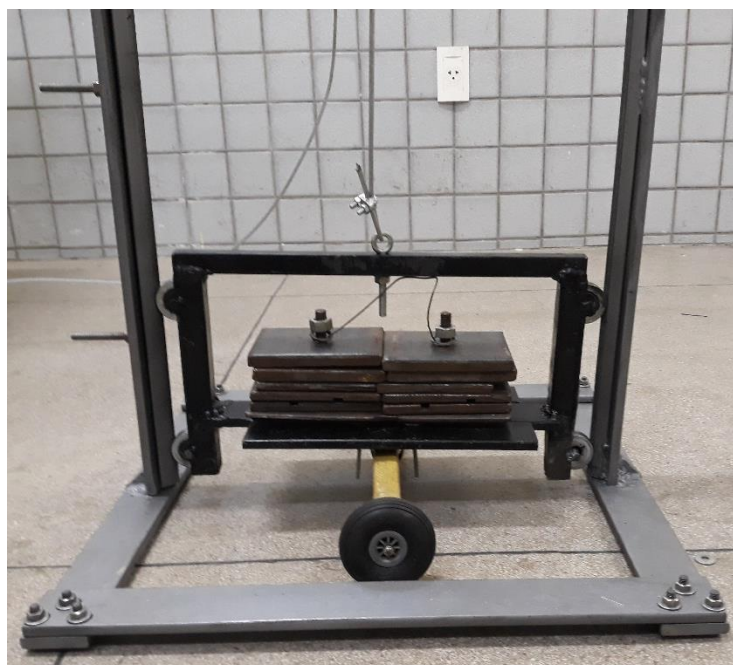
Tabela 11. Dados para cálculos de alturas de queda e resultados das mesmas

Protótipo	m (Kg)	S_m (m ²)	L	h (mm)
2013	16,00	0,64	0,67	206,16
2014	12,00	0,45	0,67	211,10
2015	12,00	0,54	0,67	195,16
2016	12,00	0,5	0,67	202,82
2017	14,00	0,61	0,67	201,67

Fonte: Relatórios Sol do Equador, 2013 a 2017

A figura 18 ilustra a preparação de um dos trens de pouso para a realização de ensaio de queda, o trem de aterrissagem principal foi fixado de maneira a evitar folgas e nivelado em relação ao solo.

Figura 18. Ensaio de *drop test* realizado em trem de pouso de aeronave



Fonte: Autoria própria, 2018

Para o protótipo de trem de pouso da figura acima, modelo do ano de 2017, foram realizados três ensaios de queda com a carga máxima para a decolagem de acordo com a tabela 11. Durante a realização dos ensaios alternou-se entre rodas de

borracha e de nylon. Notou-se que a utilização de rodas de borracha proporciona uma melhor absorção do impacto, entretanto a aeronave irá realizar “saltos” devido ao material de borracha causar esse efeito elástico. Esses “saltos” podem acarretar uma perda de controle do piloto com a aeronave durante o pouso e causar danos a aeronaves ou a saída do avião da pista. Após esses ensaios, pode-se observar que as rodas dos dois lados sofreram uma inclinação, o que podia determinar um empenamento de eixo devido aos impactos sofridos, observável na figura 19.

Figura 19. Empeno da roda após ensaios



Fonte: Autoria própria, 2018

Todavia, ao realizar a desmontagens das rodas, observou-se que os eixos não sofreram empenamento. Entretanto, o que ocorreu devido aos ensaios realizados, foi uma falha na estrutura no próprio trem de pouso, que pode ser observada na figura 20. A estrutura desse protótipo é composta de espuma de PVC, como material interno, e de fibra de aramida como composto externo. O trem de pouso foi laminado manualmente e devido a isso, uma laminação de baixa qualidade ou um eixo de pequeno diâmetro pode ter ocasionado a falha.

Figura 20. Falha decorrente de ensaio realizado no protótipo de 2017



Fonte: Autoria própria, 2018

Também, foram realizados ensaios no protótipo de 2015, diferentemente do procedimento adotado nos experimentos descritos, neste foram efetuadas tentativas variando a carga gradativamente, de acordo com a tabela 12.

Tabela 12. Carga utilizada durante ensaio do protótipo do ano de 2015

Ensaio	Carga total (Kg)
1	4,60
2	7,00
3	8,60
4	12,00

Fonte: Autoria própria, 2018

A Figura 21 demonstra o ensaio realizado com a carga máxima que foi determinada em projeto pela equipe de *aerodesign* do IFPI. O trem de pouso avaliado nesses ensaios, suportou sem sofrer nenhum dano, a todas as cargas impostas durante os ensaios. É notável ressaltar que o material empregado nesse modelo é o mesmo do modelo anteriormente estudado. Todavia o formato é diferente e o eixo que fica preso ao trem de pouso possui um diâmetro maior.

Figura 21. Ensaio em protótipo 2015



Fonte: Autoria própria, 2018

Para o protótipo do ano inicial da equipe em 2013, foi realizado apenas um ensaio, pois o mesmo logo sofreu uma deformação plástica em sua estrutura, a estrutura da lateral onde são presas as rodas sofreu um empenamento após a queda. A carga utilizada para esse ensaio foi a carga máxima projetada. O modelo de trem de pouso pode ser observado na figura 22 abaixo.

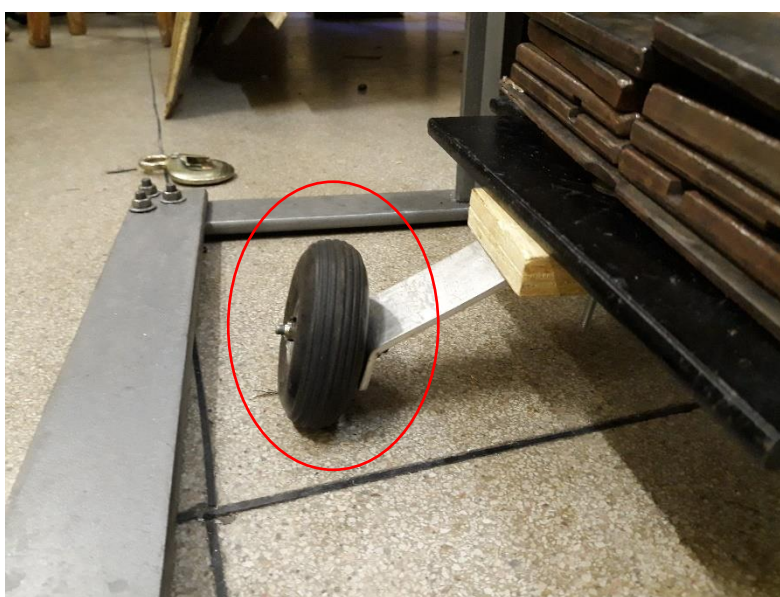
Figura 22. Ensaio em protótipo 2013



Fonte: Autoria própria, 2018

O material empregado nesse trem de pouso foi o alumínio, na época que foi construído acreditava-se que o mesmo suportaria a todas as solicitações impostas a ele, mas como pode ser observado na figura 23 abaixo, o mesmo não suportaria essas solicitações. Diante disso, é possível notar que a utilização de uma máquina de ensaios de *drop test* teria proporcionado um melhor dimensionamento do componente e um trem de pouso que suportaria ao esforço solicitado em projeto teria sido construído.

Figura 23. Deformação em trem de pouso do modelo de 2013



Fonte: Autoria própria, 2018

Por fim, a máquina de ensaios projetada e construída além de proporcionar a realização de ensaios em trem de pouso principal, a mesma também possibilita a realização de ensaios em trem de pouso do nariz ou bequilha. Podendo assim serem realizados ensaios para determinar se uma bequilha irá responder de maneira satisfatória aos carregamentos impostos. Outro ponto que poderá ser avaliado durante os ensaios de bequilha é a angulação da mesma em relação ao solo, fator esse que influenciará na dissipação de energia em sua estrutura. Os testes podem ser realizados com a bequilha já presa em parte da fuselagem que irá dar forma a fuselagem completa. A equipe Sol do Equador de *aerodesign* do IFPI desde os primeiros protótipos até os atuais empregaram o mesmo material e modelo sempre bem semelhantes de bequilha. As bequilhas são construídas utilizando-se o alumínio

como material principal, o que deixa o componente muito pesado em relação as outras partes da aeronave. Por serem de modelos idênticos e mesmo material, não foram realizados diversos ensaios como os realizados no trem de pouso principal, pois seria obtido resultados de valores iguais. A Figura 24 mostra a bequilha, utilizada no modelo de 2017, presa na máquina de ensaio.

Figura 24. Demonstração da realização de ensaio em bequilha



Fonte: Autoria própria, 2018

O projeto dimensionado e construído será cedido ao IFPI, com o objetivo de incentivar a realização de novos ensaios, a máquina de ensaios ficará alocada no laboratório do *aerodesign* prédio “C”, sala C2-02. Alunos do curso de engenharia mecânica sob a supervisão do capitão da equipe Sol do Equador terão acesso para utilizar e realizar ensaios de queda.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O autor sugere para trabalhos futuros, a utilização de elementos digitais, para aquisição mais precisa de resultados. Sugere também a utilização de um sistema hidráulico para a realização do içamento de carga, deixando o mesmo de ser realizado manualmente.

Sugere-se ainda a realização de outros testes com a produção de artigos científicos. Um dos testes que podem ser realizados, com as devidas adaptações na máquina construída, é o teste de impacto em painéis do tipo sanduíche ou somente em compósitos laminados, seguindo a norma *American Society for Testing and Materials* (ASTM) D 5628, bem como as normas relacionadas ao ensaio a ser realizado. Pode-se ainda realizar ensaios de impacto em lâminas de alumínio, utilizando também adaptações para a realização de ensaio. Os dois ensaios acima citados podem ser de grande importância para os grupos de extensão EcoOpala e IFPI Baja.

REFERÊNCIAS

- AÇO SAE 1020. In: Aços construção mecânica. **Favorit aços especiais**. [2018]. Disponível em: <<http://www.favorit.com.br/produtos/acos-construcao-mecanica/aco-sae-1020>>. Acesso em: 07 abr. 2018.
- ALMEIDA, J. R. M.; GODEFROID L. B.; MORAIS W. A. Efeito de impactos repetidos de baixa energia em compósitos pultrudados. **Polímeros: Ciência e tecnologia**, Rio de Janeiro, v. 11, n. 1, p. 27-34, 2001. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/po/v11n1/v11n1a06>>. Acesso em: 02 out. 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8261**: Perfil tubular, de aço-carbono, formado à frio, com e sem costura, de seção circular, quadrada ou retangular para usos estruturais. Rio de Janeiro, 1983.
- BUDYNAS, R. G.; NISBETT, J. K. **Elementos de máquinas de Shigley**. Tradução João Batista de Aguiar, José Manuel de Aguiar. 8. ed. Porto Alegre: AMGH, 2011.
- CHIAVERINI, V. **Tecnologia mecânica**. 2. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1986.
- COLLINS, J.A. **Projeto mecânico de elementos de máquinas**: uma perspectiva de prevenção da falha. Rio de Janeiro: LTC, 2014.
- DUELL, J. M. **Impact testing of advanced composites**. In: KESSLER, M. R. Victoria, BC, Canada: Trafford, 2004. Disponível em: <http://collectionsCanada.gc.ca/ourl/res.php?url_ver=Z39.88-2004&url_tim=2018-04-07T18%3A36%3A03Z&url_ctx_fmt=info%3Aofi%2Ffmt%3Akev%3Amtx%3Actx&rft_d at=30745492&rft_id=info%3Aid%2FcollectionsCanada.gc.ca%3Aamicus&lang=eng>. Acesso em: 04 abr. 2018.
- FEDERAL AVIATION REGULATION. **Part 23 Airworthiness Standards**: Normal, Utility, Acrobatic and Commuter Category Airplanes. Estados Unidos da America, 1996.
- FORTES, C. **Apostila de eletrodos revestidos**. Brasil: ESAB, 2005.
- GENTIL, V. **Corrosão**. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003.
- HER S.; LAN S. Dynamic analysis of an aluminum plate subjected to drop test. **Applied mechanical engineering**, Taiwan, v. 3, n. 3, p. 1-2, 2014.
- HIBELLER, R. C. **Resistência dos materiais**. Tradução Arlete Simille Marques. 7. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.
- HOWELL, W. E. et all. F-106B Airplane Active Control Landing Gear Drop Test Performance. **NASA Technical Memorandum**. Langley Research center: Hampton, 1990. Disponível em: <<https://ntrs.nasa.gov>>. Acesso em: 02 ago. 2017.

INTERNATIONAL STANDARD. **ISO 3506-1**: Mechanical properties of corrosion-resistant stainless-steel fasteners. Part 1: bolts, screws and studs. Suíça, 2009.

INTERNATIONAL STANDARD. **ISO 898-1**: Mechanical properties of fasteners made of carbon steel and alloy steel. Part 1: Bolts, screws and studs with specified property classes — Coarse thread and fine pitch thread. Suíça, 2009.

ISCOLD, P. H. A. O. **Introdução as cargas nas aeronaves**. Belo Horizonte: UFMG, 2001.

JUVINALL, R. C.; MARSHEK, K. M. **Fundamentos do projeto de componentes de máquinas**. Tradução Fernando Ribeiro da Silva. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

LIU, W.; LI, H. Impact Analysis of a Cellular Phone. In **ANSA & µETA International Conference**, 4th, 2011, Thessaloniki. P. 1-7. Disponível em: <<https://www.beta-cae.com>>. Acesso em: 02 ago. 2017.

NIU, M. C. **Airframe structural design: Practical design information and data on aircraft structures**. 8. ed. Hong Kong: Conmilit, 1995.

NORTON, R. L. **Projeto de máquinas**: Uma abordagem integrada. Tradução Konstantinos Dimitriou Stavropoulos *et al.* 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

OLEG, V. **Fundamentals of kinematics and dynamic of machines and mechanisms**. Nova Iorque: CRC, 2000.

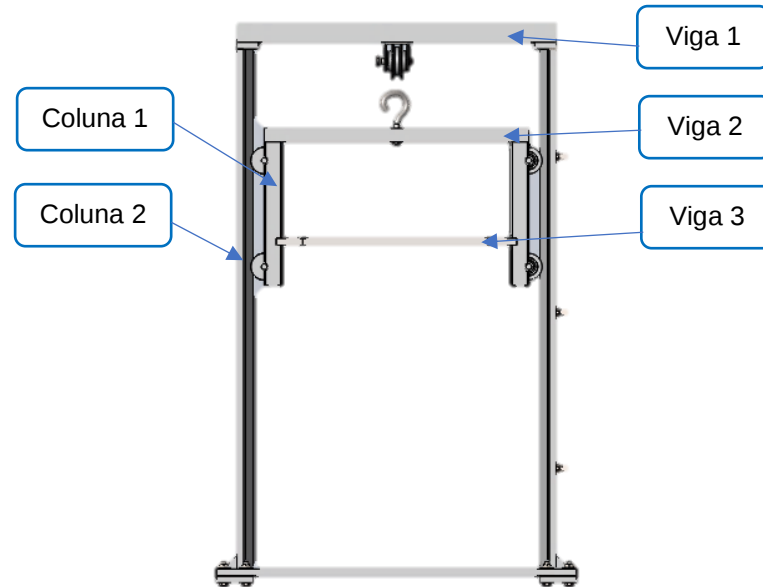
SIVA. **Esticador DIN 1480 - gancho x olhal**. [2018]. Disponível em: <<http://www.siva.com.br/produtos/acessorios/comuns/esticador-din-1480-gancho-x-olhal>>. Acesso em: 08 abr. 2018.

SOCIEDADE DE ENGENHEIROS DA MOBILIDADE BRASIL. **Aerodesign**. São Paulo, [2018]. Disponível em: <<http://portal.saebrasil.org.br/programas-estudantis/sae-brasil-aerodesign>>. Acesso em: 04 abr. 2018.

TELECURSO 2000 PROFISSIONALIZANTE. **Mecânica**: Elementos de máquina. São Paulo: Editora Globo, 1996.

ANEXO 1 – MEMORIAL DE CÁLCULOS

Para os cálculos foi considerada a seguinte figura:



Equação 6

Cisalhamento médio na viga 3

$$\tau_{med} = \frac{V}{A} = \frac{490,5/2}{200 \cdot 10^{-6}} = 1,23 MPa$$

Cisalhamento médio na viga 2

$$\tau_{med} = \frac{V}{A} = \frac{526,40/2}{475 \cdot 10^{-6}} = 0,55 MPa$$

Cisalhamento médio na viga 1

$$\tau_{med} = \frac{V}{A} = \frac{536,51/2}{762 \cdot 10^{-6}} = 0,70 MPa$$

Equação 7

Tensão de flexão máxima na viga 3

$$\tau_{m\acute{a}x} = \frac{Mc}{I} = \frac{456,96 \cdot 4,765 \cdot 10^{-3}}{3,66 \cdot 10^{-9}} = 204,35 MPa$$

Tensão de flexão máxima na viga 2

$$\tau_{m\acute{a}x} = \frac{Mc}{I} = \frac{180,56 \cdot 9,5 \cdot 10^{-3}}{1,08 \cdot 10^{-8}} = 158,83 MPa$$

Tensão de flexão máxima na viga 1

$$\tau_{m\acute{a}x} = \frac{Mc}{I} = \frac{222,65 \cdot 12,7 \cdot 10^{-3}}{3,47 \cdot 10^{-8}} = 81,49 MPa$$

Equação 8

Tensão de cisalhamento na coluna 1

$$\tau = \frac{VQ}{It} = \frac{245,25 \cdot 1,84 \cdot 10^{-4}}{3,70 \cdot 10^{-7} \cdot 8 \cdot 10^{-3}} = 15,25 MPa$$

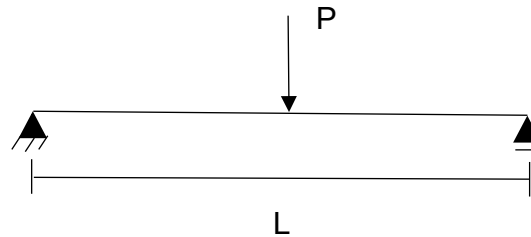
Equação 9

Carga crítica na coluna 2

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{(KL)^2} = \frac{\pi^2 \cdot 205 \cdot 10^9 \cdot 3,66 \cdot 10^{-9}}{(2,0735)^2} = 1,06 KN$$

Cálculo da linha elástica

Método da integração



Para um lado da viga têm-se:

$$Elv'' = M_1(x) = \frac{Px}{2}$$

$$Elv' = \frac{Px^2}{4} + c_1$$

$$Elv = \frac{Px^3}{12} + c_1x + c_2$$

Para o outro lado:

$$Elv'' = \frac{-Px}{2} + \frac{Pl}{2}$$

$$Elv' = \frac{-Px^2}{4} + \frac{Plx}{2} + k_1$$

$$Elv = \frac{-Px^3}{12} + \frac{Plx^2}{4} + k_1x + k_2$$

Aplicando-se as condições de contorno:

- $P/x = 0 \longrightarrow v_1=0, c_2=0$
- $P/x = l \longrightarrow v_2=0$
- $P/x = l/2 \longrightarrow \Theta_1=\Theta_2$

Resolvendo as equações utilizando as equações de contorno encontra-se os valores das constantes:

- $k_1 = \frac{-3}{16}Pl^2$
- $k_2 = \frac{Pl^3}{48}$
- $c_1 = \frac{-Pl^2}{16}$

Fazendo as substituições necessárias, encontram-se as equações da linha elástica:

$$v_1 = \frac{P}{48EI} (4x^3 - 3l^2x) \quad \text{para } 0 \leq x \leq l/2$$

$$v_2 = \frac{P}{48EI} (-4x^3 + 12lx^2 - 9l^2x + l^3) \quad \text{para } l/2 \leq x \leq l$$

Deslocamento máximo para viga 2

$$v = \frac{526,40}{48.205.10^9 \cdot 1,086.10^{-8}} (4.0,171^3 - 3.0,343^2 \cdot 0,171) = -0,1988mm$$

Deslocamento máximo para viga 1

$$v = \frac{536,51}{48.205.10^9 \cdot 3,47.10^{-8}} (4.0,207^3 - 3.0,415^2 \cdot 0,207) = -0,1123mm$$

Deslocamento máximo para viga 3

$$v = \frac{490,5}{48.205.10^9 \cdot 3,66.10^{-8}} (4.0,160^3 - 3.0,320^2 \cdot 0,160) = -0,4463mm$$

ANEXO 2 – DESENHO MECÂNICO

