

**GIL GUILHERME NAVES DA SILVA**

**Projeto de dispositivo de ensaio de torção de baixa carga de materiais compósitos**

**Gil Guilherme Naves da Silva**

**Projeto de dispositivo de ensaio de torção de baixa carga de materiais compósitos**

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Marcelo Sampaio Martins

|       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|-------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| S586p | <p>Silva, Gil Guilherme Naves da Silva</p> <p>Projeto de dispositivo de ensaio de torção de baixa carga de materiais compósitos / Gil Guilherme Naves da Silva – Guaratinguetá, 2019.</p> <p>56 f : il.</p> <p>Bibliografia: f. 54-56</p> <p>Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2019.</p> <p>Orientador: Prof. Dr. Marcelo Sampaio Martins</p> <p>1. Materiais compostos. 2. Materiais – Análise. 3. Resistência de materiais. 3. Projetos de engenharia. I. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU 620.17</p> |
|-------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

Luciana Máximo

Bibliotecária CRB-8/3595

**Gil Guilherme Naves da Silva**

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO  
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE  
“GRADUADO EM ENGENHARIA MECÂNICA”

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE  
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. MARCELO SAMPAIO MARTINS  
Coordenador

**BANCA EXAMINADORA:**

Prof. Dr. MARCELO SAMPAIO MARTINS  
Orientador/UNESP-FEG

Prof. Dr. JOSÉ ELIAS TOMAZINI  
UNESP-FEG

Prof. Me. ANTONIO DOS REIS FARIA NETO  
UNESP-FEG

**Dezembro de 2019**

Para meus pais.

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço aos meus pais *Gilvando e Cássia*, que sempre me incentivaram nos estudos e nunca duvidaram de minha capacidade, principalmente minha mãe que sempre fez tudo o que pôde para que eu pudesse ter o melhor tempo possível para me dedicar à faculdade.

ao meu orientador, *Prof. Dr. Marcelo Sampaio Martins* que jamais deixou de me incentivar. Sem a sua orientação, dedicação e auxílio, o estudo aqui apresentado seria praticamente impossível.

aos meus colegas que sempre estiveram presentes durante todo o curso, me ajudando e incentivando, especialmente *Gabriel Augusto Malvão Silva, Lucas de Andrade Gonçalves, Mariele Cristina de Oliveira Faria e Thiago Antônio Costa dos Santos*.

às funcionárias da Biblioteca do Campus de Guaratinguetá pela dedicação, presteza e principalmente pela vontade de ajudar,

aos funcionários da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá pela dedicação e alegria no atendimento.

à UNESP - FEG, instituição que me transformou em um profissional e cidadão melhor, a qual tenho orgulho de ter participado e estudado.

“Não tenha sonhos, tenha objetivos”

Harvey Specter

## **RESUMO**

Com o passar do tempo, os materiais compósitos estão sendo utilizados cada vez mais em substituição aos metais em algumas funções, principalmente aquelas em que requerem uma resistência mecânica maior e, ao mesmo tempo, o menor peso possível. Os materiais compósitos não se comportam da mesma forma que os metais quando estão sob uma solicitação mecânica, fato que ocorre devido sua constituição. Diante disso, surge uma grande necessidade de estudo dos materiais compósitos, para que sua utilização possa se tornar mais previsível, e para isso, é necessário o ensaio desses materiais em diferentes situações, para que quando sejam aplicados em alguma construção, possa-se conhecer suas características e possam ser utilizados corretamente. Quando se trata de dispositivos de ensaio, principalmente de soluções didáticas, algumas opções podem ser encontradas no mercado, porém seus custos se tornam impraticáveis quando considerados para se utilizar em um ambiente de ensino como uma universidade. Este trabalho apresenta um projeto de dispositivo de ensaio de torção simples, controlado manualmente, para ser utilizado em um ambiente didático de universidade.

**PALAVRAS-CHAVE:** Compósito. Torção. Dispositivo didático. Projeto.

## **ABSTRACT**

Over time, composite materials are increasingly being used as a substitute for metals in some functions, especially those where is required a great mechanical strength and, at the same time, the lowest possible weight. Composite materials do not behave in the same way as metals when under mechanical stress, which is due their constitution. Given this, there is a great need to study composite materials, so that their use can become more predictable, and for this, it is necessary to test these materials in different situations, so that when applied in any construction, one can know their characteristics and can be used correctly. When it comes to testing devices, especially didactic solutions, some options can be found on the market, but their costs become impractical when considered for use in a teaching environment such as a university. This paper presents a simple project of a manually controlled torsion testing device for use in a university teaching environment.

**KEYWORDS:** Composite. Torsion. Teaching device. Project.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

|                                                                                        |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 – Fase dispersa e matriz em materiais compósitos.....                         | 15 |
| Figura 2 – Representação do controle da propagação de trincas pelo uso de fibras ..... | 16 |
| Figura 3 – Bobinagem contínua ( <i>filament winding</i> ).....                         | 18 |
| Figura 4 – Esquema do processo de pultrusão .....                                      | 19 |
| Figura 5 – Extensômetro .....                                                          | 20 |
| Figura 6 – Variação $\Delta L$ de um comprimento $L_0$ .....                           | 21 |
| Figura 7 – Ponte de Wheatstone .....                                                   | 23 |
| Figura 8 – Placa Arduino.....                                                          | 26 |
| Figura 9 – Máquina de Ensaio (Biopdi) .....                                            | 27 |
| Figura 10 – Máquina de Ensaio de Torção (Nova Didacta) .....                           | 27 |
| Figura 11 – Máquina de Ensaio de Torção (Algetec).....                                 | 28 |
| Figura 12 – Deflexão $\theta$ em uma barra com torque aplicado .....                   | 29 |
| Figura 13 – Distribuição da tensão de cisalhamento $\tau$ .....                        | 29 |
| Figura 14 – Distribuição de Tensão em uma seção circular vazada.....                   | 31 |
| Figura 15 – Exemplo de posicionamento das rosetas.....                                 | 32 |
| Figura 16 – Extensômetro escolhido para o dispositivo.....                             | 33 |
| Figura 17 – Rosetas .....                                                              | 34 |
| Figura 18 – Posicionamento a) rosetas e b) extensômetros unidirecionais .....          | 34 |
| Figura 19 – Ângulos encontrados em um eixo sob torção .....                            | 37 |
| Figura 20 – Ideia no início do projeto .....                                           | 38 |
| Figura 21 – Concepção inicial .....                                                    | 39 |
| Figura 22 – Cargas atuantes no CDP (vista lateral).....                                | 40 |
| Figura 23 – Cargas atuantes no CDP (vista frontal) .....                               | 40 |
| Figura 24 – Fixação com mandris .....                                                  | 41 |
| Figura 25 – Instalação da bucha metálica.....                                          | 42 |
| Figura 26 – Simulação da fixação do tubo com a bucha instalada.....                    | 42 |
| Figura 27 – Volante para criação do torque .....                                       | 43 |
| Figura 28 – Volante para criação do torque .....                                       | 43 |
| Figura 29 – Volante com alavanca instalada .....                                       | 44 |
| Figura 30 – Detalhe volante.....                                                       | 45 |
| Figura 31 – Detalhe alavanca .....                                                     | 45 |

|                                                      |    |
|------------------------------------------------------|----|
| Figura 32 – Forças atuantes no dispositivo .....     | 46 |
| Figura 33 – Dispositivo instalado na bancada .....   | 46 |
| Figura 34 – <i>Skeleton</i> .....                    | 47 |
| Figura 35 – Desenho 2D .....                         | 48 |
| Figura 36 – Conversor de sinais Quantum MX1615 ..... | 49 |
| Figura 37 – Placa Arduino Uno .....                  | 49 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                 |    |
|-------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 – Especificações do extensômetro ..... | 33 |
| Tabela 2 – Momentos calculados .....            | 51 |
| Tabela 3 – Deformação específica Composto ..... | 52 |
| Tabela 4 – Deformação específica Aço .....      | 52 |

## SUMÁRIO

|          |                                                                             |           |
|----------|-----------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>INTRODUÇÃO</b>                                                           | <b>13</b> |
| 1.1      | OBJETIVOS                                                                   | 14        |
| <b>2</b> | <b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>                                                | <b>15</b> |
| 2.1      | MATERIAIS COMPÓSITOS                                                        | 15        |
| 2.1.1    | Reforços (fase dispersa)                                                    | 16        |
| 2.1.2    | Matriz                                                                      | 17        |
| 2.1.3    | Tubos de Fibra de Carbono                                                   | 17        |
| 2.1.3.1  | Bobinagem contínua ( <i>filament winding</i> )                              | 18        |
| 2.1.3.2  | Pultrusão ( <i>pultrusion</i> )                                             | 18        |
| 2.2      | PROJETO DE DISPOSITIVOS DIDÁTICOS                                           | 19        |
| 2.3      | EXTENSOMETRIA                                                               | 20        |
| 2.3.1    | Extensômetro Elétrico de Resistência (EER)                                  | 21        |
| 2.3.2    | Ponte de Wheatstone                                                         | 22        |
| 2.4      | PLATAFORMA ARDUINO PARA EXTENSÔMETROS                                       | 25        |
| 2.5      | PROJETOS SIMILARES DISPONÍVEIS NO MERCADO                                   | 26        |
| 2.5.1    | Máquina de Ensaio de Torção (Biopdi)                                        | 26        |
| 2.5.2    | Máquina de Ensaio de Torção (Nova Didacta)                                  | 27        |
| 2.5.3    | Máquina de Ensaio de Torção (Algetec)                                       | 28        |
| 2.6      | ANÁLISE DE TENSÕES TORCIONAIS EM BARRAS E TUBOS                             | 28        |
| 2.6.1    | Barra de seção circular                                                     | 29        |
| 2.6.2    | Tubo (seção circular vazada)                                                | 30        |
| 2.7      | SOFTWARES UTILIZADOS                                                        | 31        |
| 2.7.1    | Catia ( <i>Dassault Systems</i> )                                           | 31        |
| <b>3</b> | <b>DESENVOLVIMENTO</b>                                                      | <b>32</b> |
| 3.1      | INSTRUMENTAÇÃO                                                              | 32        |
| 3.2      | EQUACIONAMENTO                                                              | 33        |
| 3.2.1    | Determinação das tensões normal e de cisalhamento                           | 33        |
| 3.2.2    | Determinação do momento de torção efetivo $M_t$                             | 36        |
| 3.2.3    | Determinação do ângulo de deformação $\gamma$ ou do ângulo de torção $\phi$ | 36        |
| 3.3      | PROJETO BÁSICO COMPLETO DO DISPOSITIVO                                      | 37        |
| 3.3.1    | Requisitos do Projeto                                                       | 37        |
| 3.3.2    | Concepção preliminar                                                        | 38        |

|              |                                     |           |
|--------------|-------------------------------------|-----------|
| <b>3.3.3</b> | <b>Conceito definitivo .....</b>    | <b>41</b> |
| <b>3.3.4</b> | <b>Uso do programa CATIA .....</b>  | <b>47</b> |
| <b>3.3.5</b> | <b>Desenho 2D .....</b>             | <b>48</b> |
| <b>3.4</b>   | <b>CARACTERÍSTICA DO TUBO .....</b> | <b>48</b> |
| <b>3.5</b>   | <b>COLETA DE DADOS .....</b>        | <b>49</b> |
| <b>4</b>     | <b>RESULTADOS ESPERADOS .....</b>   | <b>50</b> |
| <b>4.1</b>   | <b>CONDIÇÕES INICIAIS .....</b>     | <b>50</b> |
| <b>4.2</b>   | <b>MÉTODOS E RESULTADOS .....</b>   | <b>50</b> |
| <b>5</b>     | <b>CONCLUSÃO.....</b>               | <b>53</b> |
|              | <b>REFERÊNCIAS .....</b>            | <b>54</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

Com o passar do tempo, os materiais compósitos estão sendo utilizados cada vez mais em substituição aos metais em algumas funções, principalmente aquelas em que requerem uma resistência mecânica maior e, ao mesmo tempo, o menor peso possível. Segundo Moura, Moraes e Magalhães (2005) um exemplo é a indústria aeronáutica e espacial, onde a redução no peso de uma aeronave pode resultar em uma economia de combustível e, conseqüentemente, em uma autonomia maior, além da grande resistência à corrosão, encontrada nos materiais compósitos, que é de extrema importância na vida de uma aeronave. Na indústria automotiva também pode-se encontrar uma grande utilização de materiais compósitos no desenvolvimento de carros de corrida, onde a redução do peso resulta em segundos a menos no tempo de uma volta em um circuito, por exemplo.

De acordo com Callister (2008), os engenheiros buscam cada vez mais materiais estruturais que possuam baixas densidades, sejam fortes, rígidos e apresentem resistência à abrasão e ao impacto, e que ao mesmo tempo não sejam facilmente corroídos.

Os materiais compósitos não se comportam da mesma forma que os metais quando estão sob uma solicitação mecânica, fato que ocorre devido sua constituição. Como ensina Callister (2008), os metais são materiais geralmente isotrópicos (materiais que apresentam as mesmas propriedades independentemente da direção de medição) e são mais previsíveis devido à vasta quantidade de informação disponível e já estudada sobre eles. Já os materiais compósitos apresentam diferentes propriedades em diferentes direções, também chamado de anisotrópico, e não possui uma grande quantidade de informação disponível como os metais, devido, principalmente, à grande variedade de tipos de materiais que podem ser construídos.

Diante disso, surge uma grande necessidade de estudo dos materiais compósitos para que sua utilização possa se tornar mais previsível, e para isso, é necessário o ensaio desses materiais em diferentes situações, para que quando sejam aplicados em alguma construção, possa-se conhecer suas características e possam ser utilizados corretamente.

Há disponível no mercado dispositivos de ensaio que são muito tecnológicos e que fornecem diversas informações durante e após o ensaio, porém seus custos se tornam impraticáveis quando considerados para se utilizar em um ambiente de ensino como uma universidade.

## 1.1 OBJETIVOS

Este trabalho tem por objetivo realizar um projeto inicial de um dispositivo de ensaio em bancada que permita o estudo e a análise de tensões e deformações de materiais compósitos, para fins aeronáuticos, a partir de solicitações mecânicas de torção de baixa carga.

Especificamente, busca desenvolver um dispositivo de ensaio de torção que seja simples, possa ser controlado manualmente, tenha a medição do torque aplicado no CDP através da medição da deformação do tubo por extensômetros posicionados no sentido da deformação e possa ser instalado e utilizado no Laboratório de Mecânica da FEG.

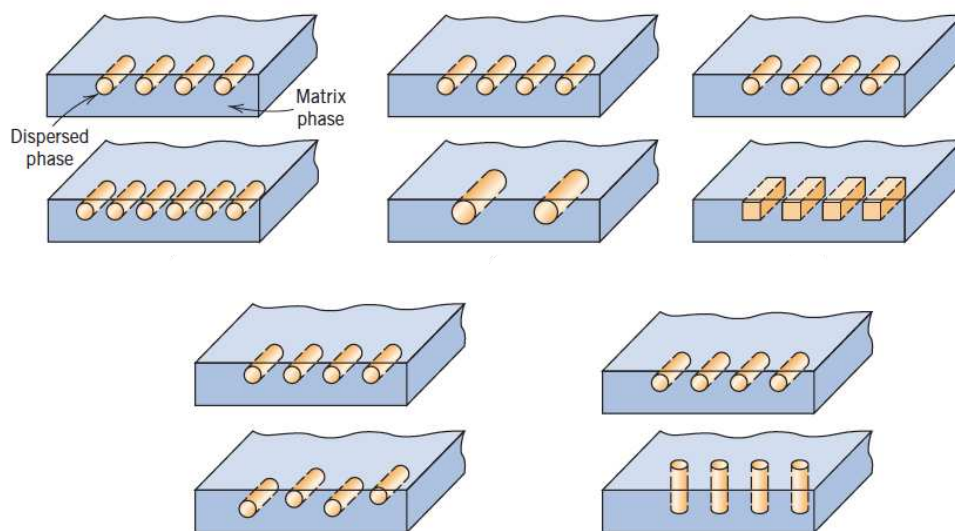
## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 MATERIAIS COMPÓSITOS

Segundo Kaw (2006) e Levy Neto e Pardini (2006), compósito é um material estrutural que consiste em dois ou mais constituintes combinados em um nível macroscópico e que não são solúveis entre si. Um constituinte é chamado de fase dispersa e o outro, que envolve esta fase, é chamado de matriz. A fase dispersa pode ser encontrada na forma de fibras, partículas ou flocos. Já a matriz é geralmente contínua, como ilustrado na Figura 1.

Para Callister (2008), um compósito é um material multifásico que é feito artificialmente, em contraste com um material que ocorre ou que se forma naturalmente. Além disso, as fases constituintes devem ser quimicamente diferentes e estar separadas por uma interface distinta. Os compósitos estruturais são combinações de compósitos e materiais homogêneos. Moura, Moraes e Magalhães (2005) seguem a mesma linha de raciocínio e dizem que um material é dito compósito quando resulta da combinação de dois ou mais materiais distintos.

Figura 1 - Fase dispersa e matriz em materiais compósitos

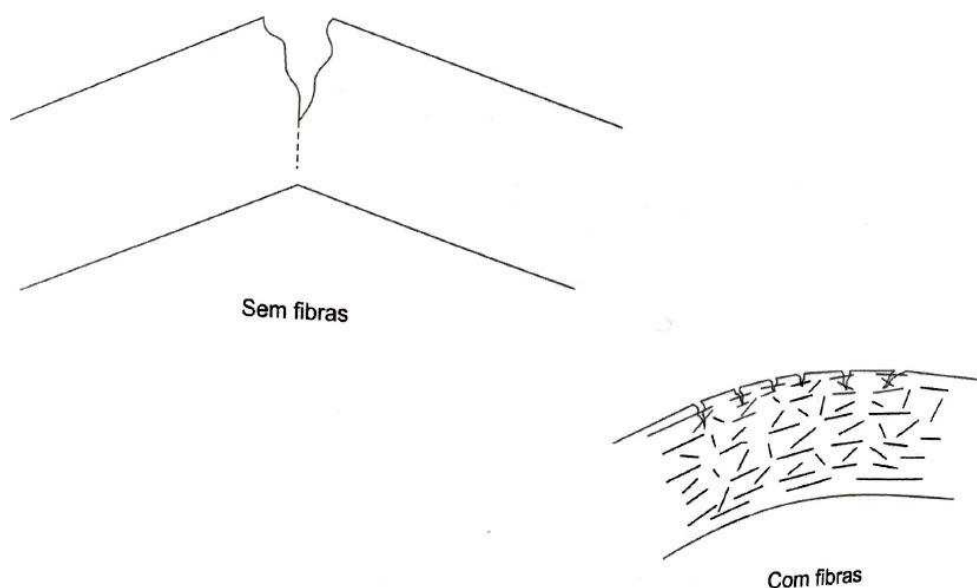


Fonte: Callister (2012)

### 2.1.1 Reforços (fase dispersa)

Desde a antiguidade, como ensinam Rezende, Costa e Botelho (2011), a história mostra os benefícios do uso de fibras no processamento de artefatos, por exemplo tijolos. A Figura 2 ilustra, esquematicamente, o controle da propagação de trincas pelo uso de fibras picadas.

Figura 2 - Representação do controle da propagação de trincas pelo uso de fibras



Fonte: Rezende, Costa e Botelho (2011)

Para Levy Neto e Pardini (2006), os reforços para compósitos podem se apresentar na forma de fibras contínuas, picadas e na forma de partículas. As fibras ou filamentos são o elemento de reforço dos compósitos estruturais que suportam carregamento mecânico e, segundo Callister (2008), os materiais classificados como fibras podem ser tanto policristalinos quanto amorfos e têm pequenos diâmetros.

Conforme Rezende, Costa e Botelho (2011), o reforço fibroso é o principal constituinte do compósito e ocupa a maior fração em volume do material. Este componente é o responsável pela resistência ao carregamento e tem uma maior influência sobre as propriedades mecânicas do material final. O desempenho estrutural do reforço depende da sua disposição em uma ou mais direções, empilhado em uma sequência de camadas definida no projeto do laminado, a fim de se obter produtos com valores desejáveis de resistência.

Conforme Levy Neto e Pardini (2006), as fibras se constituem em um meio efetivo de reforço porque apresentam menor número de defeitos que em sua forma mássica, pois à medida que se tornam mais finos, os materiais tendem a apresentar menor número de defeitos que

possam induzir a falhas e, dessa forma, a resistência tende a se aproximar da resistência teórica do material.

Segundo Rezende, Costa e Botelho (2011), a fibra por si só não apresenta uso. Porém, ao ser trançada como cordas, arranjada em diferentes tipos de tecidos ou embebidas em diferentes tipos de matrizes, este tipo de reforço passa a conferir ao material final melhores propriedades e, usualmente, uma menor massa específica final.

### **2.1.2 Matriz**

Segundo Rezende, Costa e Botelho (2011), a matriz polimérica é um constituinte vital no desempenho de um compósito, ela agrega as fibras, protege sua superfície contra danos por abrasão e atenua os efeitos adversos das condições ambientais na utilização de compósitos. A matriz deve ter uma forte adesão à superfície do reforço, de tal forma que ela se deforme no carregamento aplicado a um componente e transfira a carga entre as fibras contínuas e/ou descontínuas do compósito. As propriedades de resistência à compressão, resistência ao cisalhamento, resistência ao cisalhamento no plano e temperatura de serviço do componente também são dominadas pelo sistema de matriz polimérica.

Callister (2008) complementa dizendo que o material da matriz deve ser dúctil e que a matriz se posiciona entre as fibras e, em virtude de sua relativa baixa dureza e plasticidade, previne a propagação de trincas frágeis de uma fibra para outra, o que poderia resultar em uma falha catastrófica.

### **2.1.3 Tubos de Fibra de Carbono**

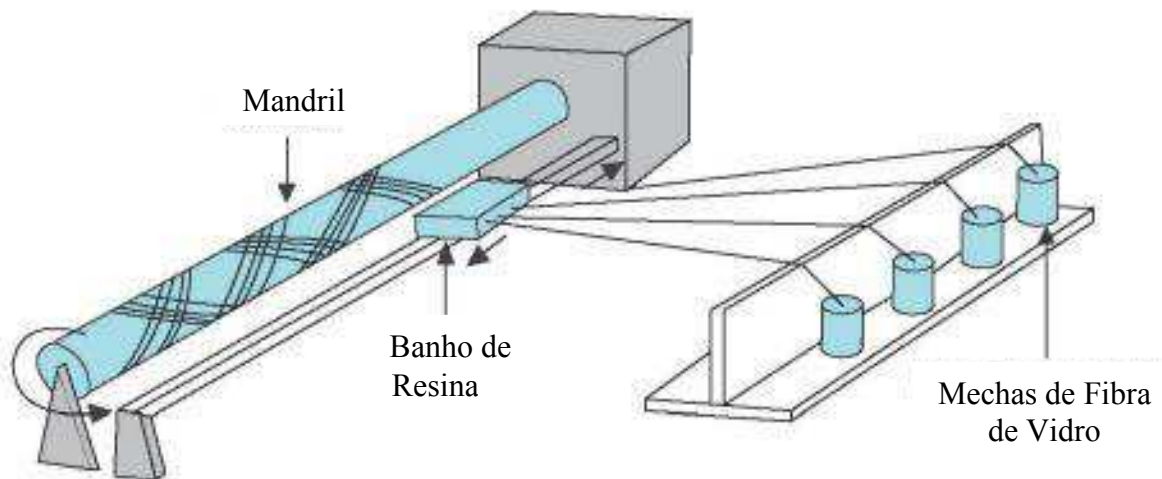
Os tubos de fibra de carbono são cada vez mais utilizados em substituição aos tubos de metal que tem função estrutural, devido ao seu baixo peso e sua alta resistência mecânica, como nas indústrias aeronáutica, automotiva e também na fabricação de bicicletas cada vez mais competitivas.

Na maioria dos casos, eles podem ser fabricados de duas formas: bobinagem contínua (*filament winding*) ou pultrusão (*pulltrusion*).

### 2.1.3.1 Bobinagem contínua (*filament winding*)

Como ensina Levy Neto e Pardini (2006), o processo de bobinagem contínua foi implementado nos primórdios da indústria de compósitos reforçados e após isso, tem se mostrado o método ideal para fabricação de componentes de revolução, como por exemplo tubos e vasos cilíndricos, utilizando como matriz tanto resinas termorrígidas como polímeros termoplásticos, e como reforço as fibras de carbono, vidro e aramida, ou híbridos destas. Nesse processo, os cabos de filamentos são apropriadamente impregnados pelo polímero e submetidos à bobinagem sobre um mandril rotatório, como mostra a Figura 3.

Figura 3 – Bobinagem contínua (*filament winding*)



Fonte: Taishan Fiberglass (2019)

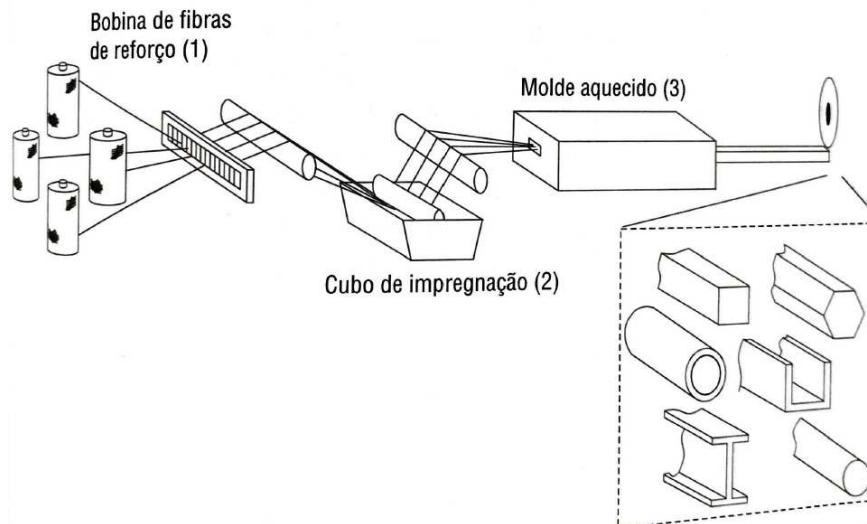
### 2.1.3.2 Pultrusão (*pultrusion*)

Para Levy Neto e Pardini (2006), o processo de pultrusão é uma técnica de processamento de compósitos introduzido no início da década de 1950, se caracterizando pela alta cadência de produção, por ser um processo contínuo e apresentando alto grau de automatização. Essa técnica de processamento é principalmente utilizada na produção de perfis retos, barras e tubos.

Levy Neto e Pardini (2006) ainda ensinam que inicialmente, o reforço, na forma de mechas de fibras contínuas, é impregnado em uma cuba, onde a resina está previamente formulada e com viscosidade adequada para impregnação. Após a impregnação, o conjunto de fibra / matriz polimérica adentra o molde que vai conferir uma geometria ao componente que

se deseja obter. O molde define a seção transversal do componente. Após a saída do molde, a peça está pronta, como pode-se ver na Figura 4 que apresenta um esquema do processo.

Figura 4 - Esquema do processo de pultrusão



Fonte: Levy Neto e Pardini (2006)

## 2.2 PROJETO DE DISPOSITIVOS DIDÁTICOS

Segundo Bortolo e Linhares (2006), o processo de aprendizagem de engenharia está intimamente ligado aos recursos didáticos utilizados pelo corpo docente em aulas presenciais. Isso leva à busca de diferentes formas e processos didáticos para que o(a) aluno(a) de engenharia consiga assimilar melhor os conteúdos de cada disciplina, sendo as que têm alto grau de dificuldade no seu aprendizado, por exemplo Resistência dos Materiais, Vibrações Mecânicas, Estática, Dinâmica, entre outras, requerem que o(a) professor(a) repasse ao aluno mais que seu conhecimento e o conhecimento empírico que está descrito em livros, apostilas e artigos. Além disso, o processo de aprendizado acadêmico em cursos de engenharia deve complementar os alunos com dispositivos didáticos físicos ou virtuais que o auxiliem na construção de seu conhecimento por meio da visualização real de fenômenos que no papel e/ou no quadro não ficam suficientemente claros. O aprendizado de conceitos fundamentais, como os que ocorrem na física e na mecânica, são essenciais, principalmente, nas primeiras fases do curso de engenharia. Geralmente, o processo de construção do conhecimento por parte do aluno é associado à visualização física do fenômeno.

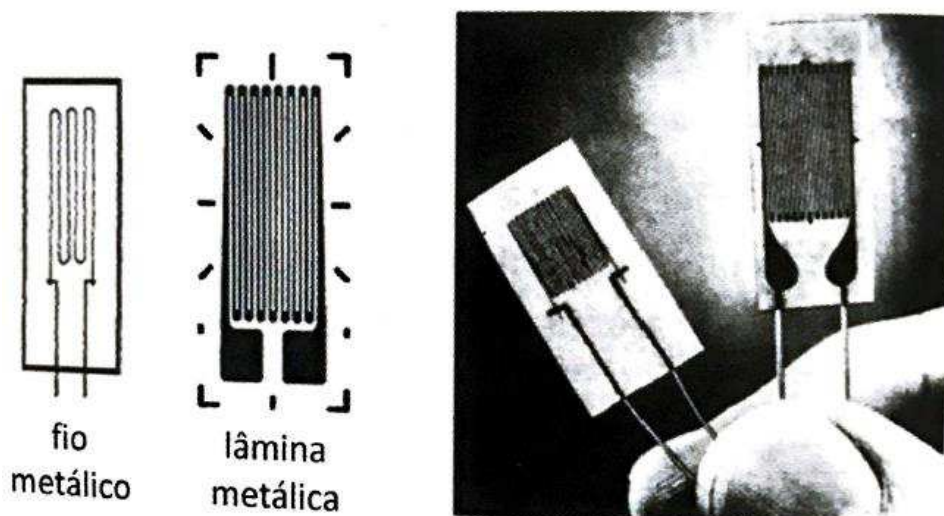
Bortolo e Linhares (2006) complementam dizendo que de uma forma geral não há uma preocupação das escolas de Engenharia no Brasil em alterar o antigo método de aulas

presenciais essencialmente teóricas, muito pouco práticas em aulas teóricas, porém com um conteúdo prático atuando simultaneamente ao conteúdo teórico, o que permite ao aluno um melhor rendimento no seu aprendizado de engenharia.

### 2.3 EXTENSOMETRIA

Conforme Dally e Riley (1965), historicamente, o desenvolvimento de extensômetros seguiu diferentes caminhos e foram desenvolvidos baseados nos princípios da elétrica, mecânica, ótica, acústica e pneumática. Apesar da ampla variação nos conceitos de extensômetros, existem quatro características básicas que cada um apresenta: comprimento  $l_0$  do extensômetro, sensibilidade, alcance e a precisão ou reprodutibilidade. O extensômetro elétrico de resistência, visto na Figura 5, é o que mais se aproxima dos requisitos de um extensômetro ideal.

Figura 5 - Extensômetro



Fonte: Pereira (2014)

Segundo Pereira (2014), na extensometria pretende-se medir as tensões mecânicas em elementos estruturais submetidos a diversos carregamentos, porém, essas tensões mecânicas são impossíveis de se medir diretamente. No entanto, sabe-se que as tensões são relacionadas às deformações produzidas pelos carregamentos.

Em um carregamento, em um estado uniaxial de tensões, e, estando as tensões abaixo do limite de proporcionalidade, vale a lei de Hooke:

$$\sigma_x = E \cdot \varepsilon_x , \quad (1)$$

onde  $\sigma_x$  é a tensão mecânica normal,  $E$  o módulo de elasticidade longitudinal e  $\varepsilon_x$  a deformação específica normal na direção  $x$ .

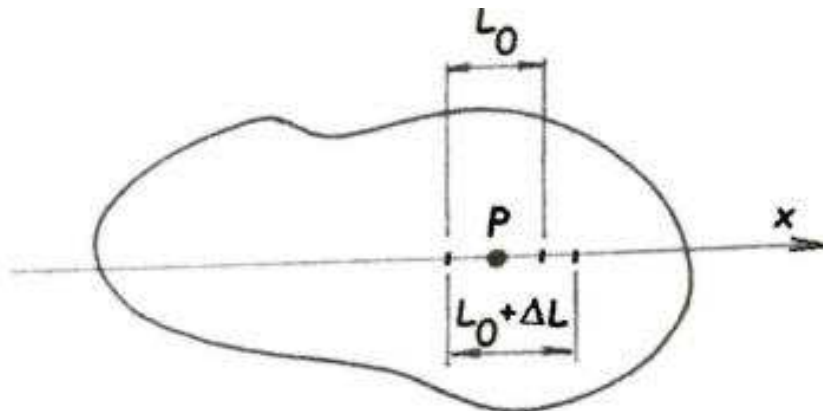
A deformação específica  $\varepsilon_x$  é dada por:

$$\varepsilon_x = \frac{\Delta L}{L_0} , \quad (2)$$

onde  $L_0$  é um comprimento-base (referência) e  $\Delta L$  a variação do comprimento-base.

Conforme Pereira (2014),  $\Delta L$  é uma grandeza mensurável, portanto pode-se medir a tensão mecânica indiretamente através da medida da deformação e sua relação com a tensão. Como pode-se visualizar na Figura 6, pode-se determinar a tensão no ponto  $P$  e na direção  $x$ , fazendo duas marcas em torno do ponto, distantes de um comprimento  $L_0$ . Após a aplicação da carga, teremos uma variação  $\Delta L$  desse comprimento que pode ser medido. Assim, pode-se determinar a deformação específica normal e, pela lei de Hooke, a correspondente tensão.

Figura 6 - Variação  $\Delta L$  de um comprimento  $L_0$



Fonte: Pereira (2014)

### 2.3.1 Extensômetro Elétrico de Resistência (EER)

Segundo Pereira (2014), sabe-se que os extensômetros nada mais são do que resistores e que irão sofrer a mesma deformação produzida na peça sobre a qual estão colados. Assim, a deformação mecânica do extensômetro é igual à da peça no ponto em que ele está aplicado. Para resistores, em geral, é válida a expressão simples:

$$R = \rho \cdot \frac{L}{A}, \quad (3)$$

onde R é a resistência elétrica do condutor [ $\Omega$ ],  $\rho$  a resistividade elétrica [ $\Omega \cdot m$ ], A é a área da seção transversal do fio [ $m^2$ ] e L o comprimento do fio [m].

Os extensômetros colados ao corpo da peça que sofrerá deformação terão seus fios alongados ou encurtados, à medida que o corpo se deforma, modificando assim a resistência elétrica do extensômetro, portanto pode-se medir suas deformações simplesmente monitorando a variação da resistência elétrica. Foi ainda verificado experimentalmente que “a uma deformação específica normal  $\varepsilon$  ( $=\Delta L/L$ ) correspondia uma variação unitária de resistência  $\Delta R/R$ , e que dentro de certos limites, era sensivelmente proporcional à deformação do fio”.

Portanto:

$$\frac{\Delta R}{R} = k \cdot \varepsilon, \quad (4)$$

onde R é a resistência elétrica do extensômetro,  $\Delta R$  a variação da resistência elétrica do extensômetro,  $\varepsilon$  a deformação específica normal da peça ao qual o extensômetro está colado e k o fator de sensibilidade do extensômetro (fornecido pelo fabricante).

E com isso, pode-se medir a deformação de uma peça medindo simplesmente a variação da resistência experimentada pelo extensômetro:

$$\varepsilon = \frac{1}{k} \frac{\Delta R}{R} \quad (5)$$

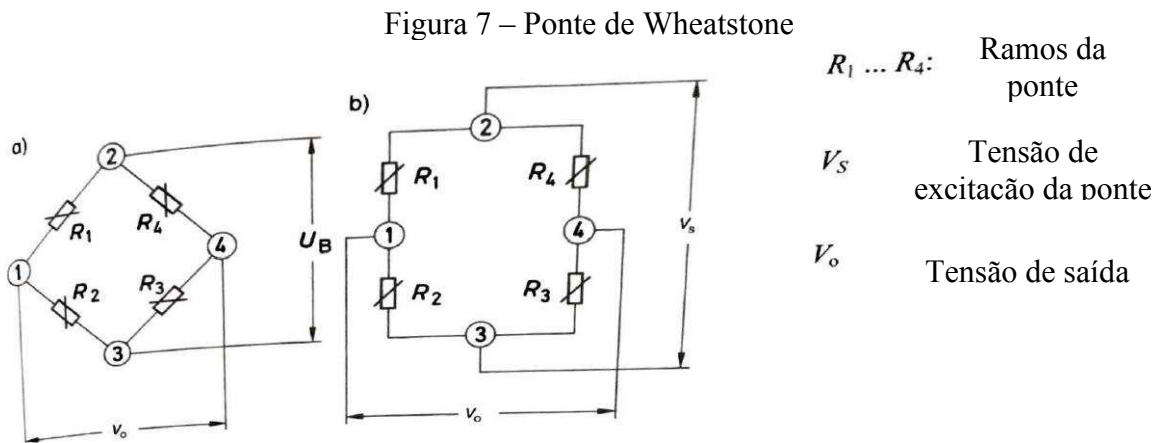
### 2.3.2 Ponte de Wheatstone

Segundo Hoffmann (1989), a ponte de Wheatstone pode ser usada de várias maneiras para medir a resistência elétrica:

- Para determinação do valor absoluto de uma resistência por comparação com uma resistência conhecida;
- Para a determinação de alterações relativas na resistência;

O último método é usado em relação às técnicas de extensometria. Ele permite que mudanças relativas de resistência no extensômetro, que geralmente são na ordem de  $10^{-4}$  a  $10^{-2}$   $\Omega/\Omega$  possam ser medidas com grande precisão.

A Figura 7 mostra duas ilustrações diferentes da ponte de Wheatstone, que são eletricamente idênticas. Os quatro braços ou ramos do circuito da ponte são formados pelas resistências  $R_1$  a  $R_4$ . Os nós 2 e 3 da ponte designam as conexões para a excitação da ponte  $V_S$ ; a tensão de saída da ponte  $V_o$ , que é o sinal de medição, está disponível nos nós de 1 a 4. A excitação da ponte é geralmente uma tensão aplicada, estabilizada direta ou alternada  $V_S$ .



Fonte: Hoffmann (1989)

Hoffmann (1989) ainda complementa dizendo que se uma tensão de alimentação  $V_S$  é aplicada aos pontos de alimentação da ponte 2 e 3, logo a tensão de alimentação é dividida nas duas metades da ponte:  $R_1$ ,  $R_2$  e  $R_4$ ,  $R_3$  como uma relação das resistências da ponte correspondente, ou seja, cada metade da ponte forma um divisor de tensão.

A ponte pode ser desequilibrada, devido à diferença nas tensões das resistências elétricas em  $R_1$ ,  $R_2$  e  $R_4$ ,  $R_3$ . Isto pode ser calculado da seguinte forma:

$$V_o = V_S \cdot \left( \frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) \quad (6)$$

se a ponte é equilibrada e

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4} \quad (7)$$

onde a tensão de saída da ponte  $V_o$  é zero.

Com uma tensão predefinida, a resistência do extensômetro varia de acordo com a quantidade  $\Delta R$ . Isso resulta na seguinte equação:

$$V_o = V_s \left( \frac{R_1 + \Delta R_1}{R_1 + \Delta R_1 + R_2 + \Delta R_2} - \frac{R_4 + \Delta R_4}{R_3 + \Delta R_3 + R_4 + \Delta R_4} \right) \quad (8)$$

Para medições de tensão, as resistências  $R_1$  e  $R_2$  devem ser iguais na ponte Wheatstone. O mesmo se aplica a  $R_3$  e  $R_4$ .

Com algumas suposições e simplificações, a seguinte equação pode ser determinada:

$$\frac{V_o}{V_s} = \frac{1}{4} \left( \frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \quad (9)$$

Substituindo a Equação (4) na Equação (9), tem-se:

$$\frac{V_o}{V_s} = \frac{k}{4} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) \quad (10)$$

Hoffmann (1989) finaliza dizendo que as equações assumem que todas as resistências na ponte mudam. Por exemplo, essa situação ocorre em transdutores ou com objetos de teste executando funções semelhantes. Em testes experimentais, isto dificilmente é o caso e geralmente apenas alguns dos braços da ponte contêm extensômetros ativos, o restante consistindo em resistores de complemento de ponte. Dependendo da tarefa de medição, um ou mais extensômetros são utilizados no ponto de medição. Embora designações como ponte completa, meia ponte ou ponte de um quarto sejam usadas para indicar tais arranjos, na verdade elas não estão corretas. Fato é que o circuito utilizado para a medição é sempre completo e é total ou parcialmente formado pelos extensômetros e pela amostra. É então completado pelos resistores fixos, incorporados nos instrumentos.

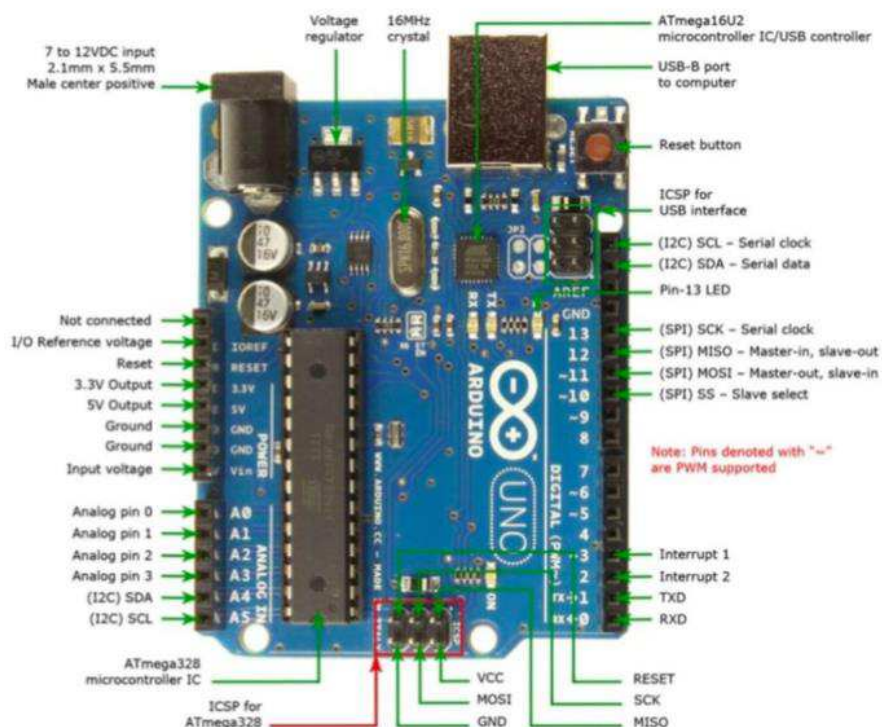
## 2.4 PLATAFORMA ARDUINO PARA EXTENSÔMETROS

Segundo Silva *et al.* (2018), em muitas situações práticas da engenharia, o conhecimento de esforços e tensões que são aplicadas em uma estrutura é de vital importância, pois a predictibilidade dos materiais depende particularmente desses parâmetros. Além disso, é importante evitar deformações que podem levar a estrutura a falhar quanto a proposta a qual ela foi construída. Geralmente, modelos matemáticos ou métodos de elementos finitos são necessários para prever os esforços na estrutura. Porém há algumas situações que modelamentos não são possíveis ou seus resultados são aproximações que não podem ser comparadas com as tensões reais que agem na estrutura. Nesses casos, para evitar o superdimensionamento, o ensaio é uma alternativa.

O método mais comum na medição de tensões é o extensômetro elétrico de resistência, como já citado anteriormente, ele permite que a tensão seja medida indiretamente, realizando a medição da variação da resistência elétrica conforme a peça é submetida a deformação, o que é comumente realizado através da Ponte Wheatstone. Porém, visto que o custo para o uso de extensômetros é relativamente elevado, que eles não são reutilizáveis e que o tratamento dos dados obtidos no experimento geralmente necessita de um equipamento já preparado, que plota as curvas de tensão x deformação e apresenta as tensões obtidas durante o ensaio, o custo total do experimento é geralmente alto.

Nesses casos, o uso do micro controlador Arduino, como pode ser visto na Figura 8, para leitura de deformação dos extensômetros e tratamento dos dados tem sido amplamente utilizado, como mostra Vieira (2016) e Gonçalves e Soares (2016), devido ao seu baixo custo e facilidade de programação, pois utiliza uma linguagem um pouco mais familiar ao mundo da eletrônica, a linguagem C++.

Figura 8 – Placa Arduino



Fonte: Vieira (2016)

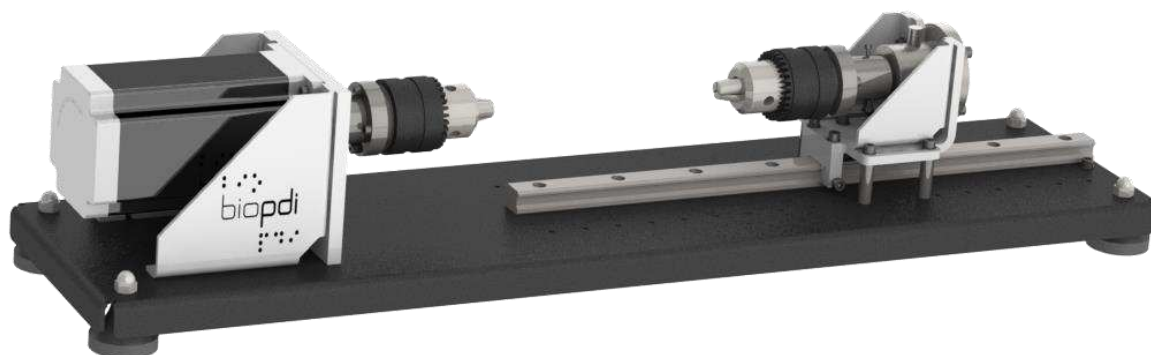
## 2.5 PROJETOS SIMILARES DISPONÍVEIS NO MERCADO

Quando se trata de dispositivos de ensaio, principalmente de soluções didáticas, algumas opções podem ser encontradas no mercado, mas deve-se avaliar cada uma delas, verificando se todas as suas funcionalidades serão realmente utilizadas e se seu custo está no orçamento.

### 2.5.1 Máquina de Ensaio de Torção (Biopdi)

Um dos projetos disponíveis no mercado é a Máquina de Ensaio de Torção da empresa Biopdi, como pode-se ver na Figura 9, que apresenta diferentes capacidades de torque (1,5, 10 e 50 Nm), faixa de velocidade ajustável, boa precisão angular e de torque, suporta comprimentos até 200mm e diâmetros de até 20mm. Para ajustes e configuração dos ensaios, é possível instalar um software via computador para aquisição e análise dos ensaios, porém esta função só pode ser utilizada em conjunto com outra máquina de ensaio vendida por eles.

Figura 9 - Máquina de Ensaio (Biopdi)



Fonte: Biopdi (2019)

### 2.5.2 Máquina de Ensaio de Torção (Nova Didacta)

Um segundo projeto disponível no mercado é a Máquina de ensaio de torção da empresa Nova Didacta, que pode ser vista na Figura 10, que apresenta capacidade nominal de carga de 30Nm e suporta comprimentos de até 750mm. Há um medidor de deformação com encoder eletrônico e mostrador eletrônico e um medidor de torque, com célula de carga com extensômetros e mostrador digital, porém são vendidos separadamente.

Figura 10 - Máquina de Ensaio de Torção (Nova Didacta)



Fonte: Didacta (2019)

### 2.5.3 Máquina de Ensaio de Torção (Algetec)

Um outro projeto é o da empresa Algetec, visto na Figura 11, que apresenta um pouco de similaridade com o projeto anterior. A empresa não forneceu dados técnicos para análise, porém informa que o sistema de aquisição de dados do ensaio já está incluído no equipamento.

Figura 11 - Máquina de Ensaio de Torção (Algetec)



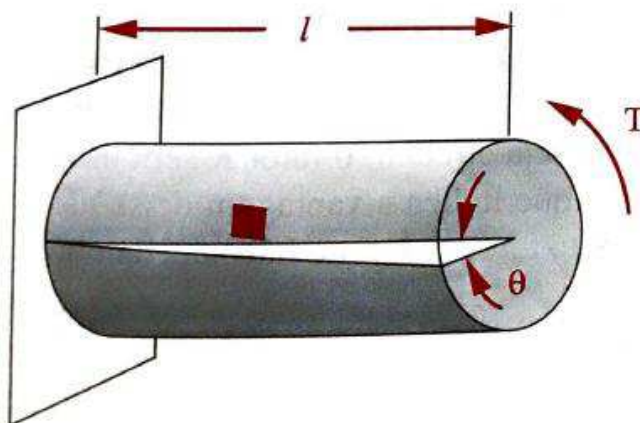
Fonte: Algetec (2019)

## 2.6 ANÁLISE DE TENSÕES TORCIONAIS EM BARRAS E TUBOS

Segundo Norton (2013), quando barras são solicitadas por um momento em relação ao seu eixo longitudinal, diz-se que estão sob torção, e o momento aplicado é então denominado torque ou momento torçor. Conforme Beer *et al.* (2011), elementos sob torção são encontrados em muitas aplicações de engenharia. A aplicação mais comum é aquela dos eixos de transmissão, utilizados para transmitir potência de um ponto para outro.

### 2.6.1 Barra de seção circular

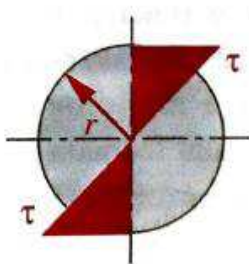
Figura 12 – Deflexão  $\theta$  em uma barra com torque aplicado



Fonte: Norton (2013)

Conforme ensina Norton (2013), pode-se ver na Figura 12 uma viga reta com seção transversal circular uniforme, com um torque aplicado de modo que nenhum momento fletor ou outras forças estão presentes. A extremidade fixa da barra está engastada em uma parede rígida. A barra gira em torno de seu eixo longitudinal, está livre e gira em um ângulo  $\theta$ .

Figura 13 – Distribuição da tensão de cisalhamento  $\tau$



Fonte: Norton (2013)

Um elemento diferencial retirado de qualquer lugar da superfície externa está sujeito a tensões de cisalhamento devido ao momento torçor. A tensão é de cisalhamento puro e varia de zero no centro até um máximo no raio externo, que pode ser visto na Figura 13,

$$\tau = \frac{T\rho}{J}, \quad (11)$$

onde T é o torque aplicado,  $\rho$  o raio até qualquer ponto e J o momento polar de inércia da seção transversal ( $J = \frac{1}{2}\pi r^4$ , para uma seção circular). Como a tensão de cisalhamento varia linearmente de acordo com a distância do eixo da barra até o ponto em consideração ( $\rho$ ) e é máxima na superfície externa e considerando o raio igual à r, tem-se:

$$\tau_{max} = \frac{Tr}{J} \quad (12)$$

Portanto:

$$\tau_{\rho} = \frac{\rho}{r} \tau_{max} \quad (13)$$

Segundo Beer *et al.* (2011), para valores de tensão de cisalhamento que não excedam o limite de proporcionalidade em cisalhamento, pode-se escrever que para qualquer material isotrópico e homogêneo,

$$\tau_{xy} = G\gamma_{xy} \quad (14)$$

Essa relação é conhecida como a lei de Hooke para tensão e deformação de cisalhamento, e a constante G é chamada de módulo de rigidez ou de elasticidade transversal do material e  $\gamma_{xy}$ , o ângulo, em radianos, da deformação no plano determinado. O módulo de rigidez G de qualquer material é menos da metade, porém mais de um terço do módulo de elasticidade E daquele material.

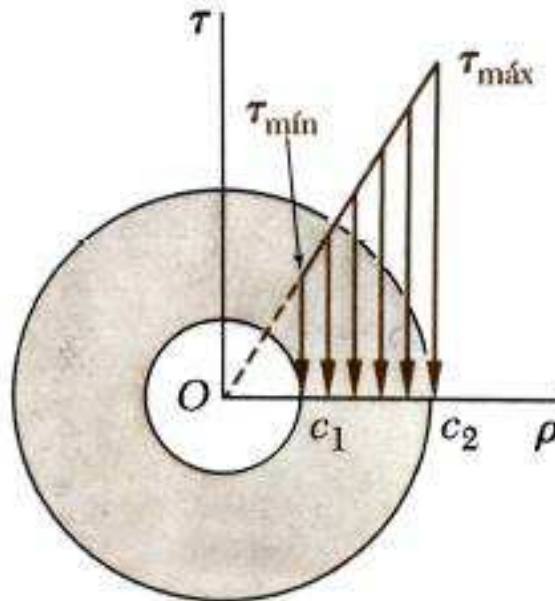
### 2.6.2 Tubo (seção circular vazada)

Para tubos submetidos à um momento, as mesmas equações podem ser consideradas, realizando as devidas adequações dada a mudança de seção transversal, logo, tem-se:

$$\tau_{min} = \frac{c_1}{c_2} \tau_{max}, \quad (15)$$

conforme Figura 14:

Figura 14 – Distribuição de Tensão em uma seção circular vazada



Fonte: Beer *et al.* (2011)

As equações (11), (12) e (13) também são válidas para o cálculo da tensão de cisalhamento em uma seção circular vazada, porém o momento polar de inércia é diferente:

$$J = \frac{1}{2}\pi(c_2^4 - c_1^4) \quad (16)$$

## 2.7 SOFTWARES UTILIZADOS

### 2.7.1 Catia (*Dassault Systems*)

Segundo Henrique (2013), o *software* líder de mercado no desenvolvimento de CAD/CAM/CAE, o CATIA V5 (*Computer Aided Three-dimensional Interactive Application*) foi desenvolvido pela empresa francesa *Dassault Systèmes* com o intuito de criar um *software* capaz de atender as exigências de projetos da indústria aeronáutica, diminuindo o tempo de projeto e aumentando a confiabilidade do produto. Por ser um *software* confiável e oferecer um pacote de poderosas ferramentas para as mais variadas áreas da indústria, o CATIA é um *software* de desenhos 3D padrão de grandes empresas.

### 3 DESENVOLVIMENTO

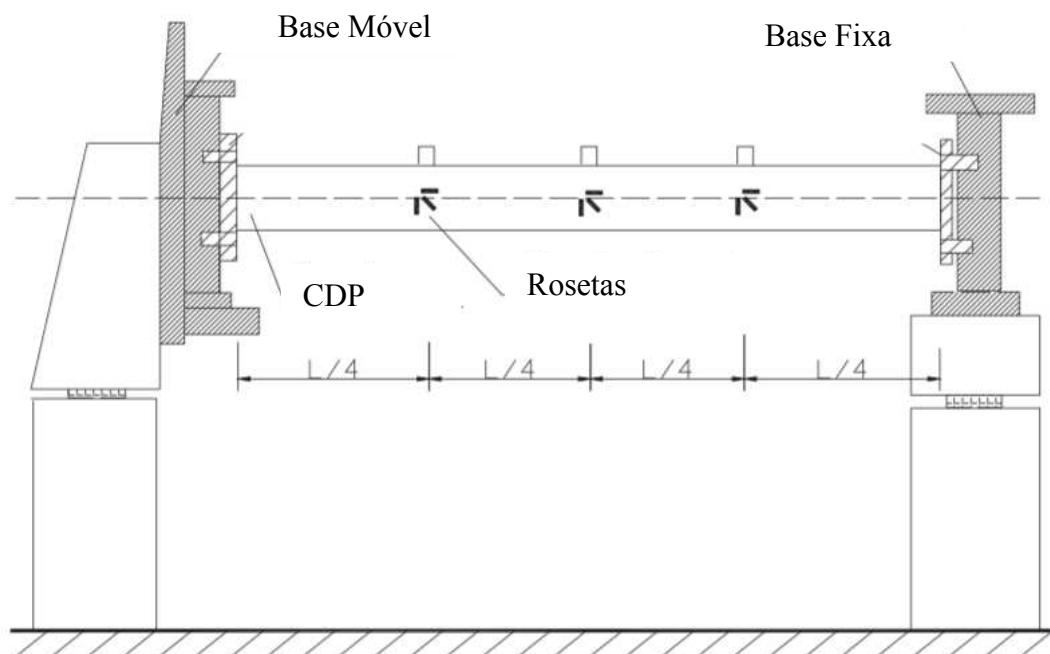
A partir desse ponto, um ensaio será proposto, visto que o objetivo deste trabalho não é a execução de um ensaio de torção e sim mostrar o projeto inicial de um dispositivo para um ensaio de torção em materiais compósitos.

#### 3.1 INSTRUMENTAÇÃO

Para a medição da deformação do tubo durante o ensaio de tração, seria possível utilizar dois tipos diferentes de extensômetros para a medição: unidirecionais ou roseta. Para este ensaio foi escolhido a utilização de rosetas, pois fornecem mais informações de deformação, além de que na instalação deve-se ter cuidado apenas para alinhá-la com o eixo longitudinal da peça, pois os outros ângulos,  $45^\circ$  e  $90^\circ$ , já vem posicionados na roseta.

Um exemplo de posicionamento das rosetas no tubo pode ser visto na Figura 15.

Figura 15 - Exemplo de posicionamento das rosetas



Fonte: Adaptado de Chen *et al.* (2016)

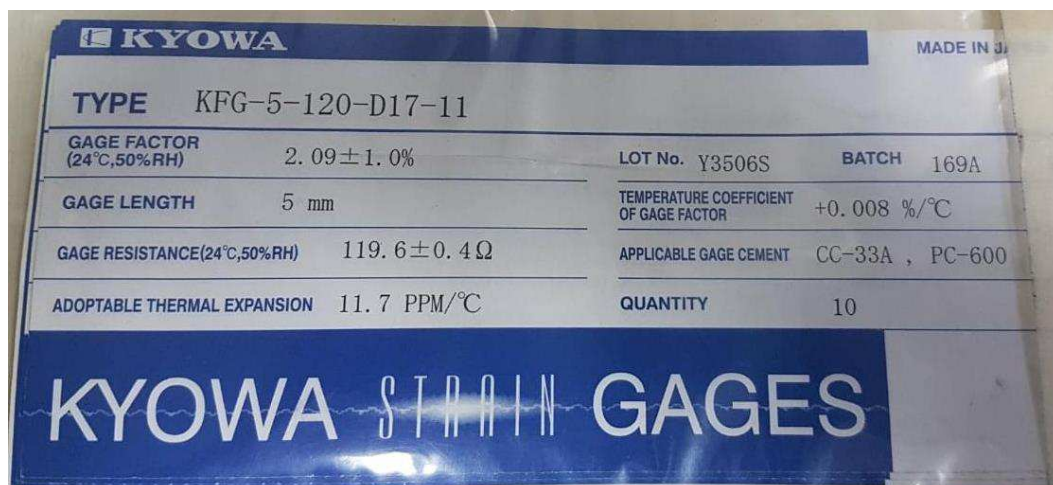
O modelo de extensômetro escolhido para esse dispositivo foi o KFG-5-120-D17-11, fabricado pela KYOWA, cujas especificações são apresentadas na Tabela 1 e como pode-se ver na Figura 16.

Tabela 1 - Especificações do extensômetro

| Tipo             | Resistência [ $\Omega$ ] | Fator            | Comprimento [mm] |
|------------------|--------------------------|------------------|------------------|
| KFG-5-120-D17-11 | $119,6 \pm 0,4$          | $2,09 \pm 1,0\%$ | 5                |

Fonte: Produção do próprio autor (2019)

Figura 16 – Extensômetro escolhido para o dispositivo



Fonte: Produção do próprio autor (2019)

## 3.2 EQUACIONAMENTO

Segundo Hoffmann (1989), uma medição em um eixo sob um carregamento de torção pode ter diferentes objetivos:

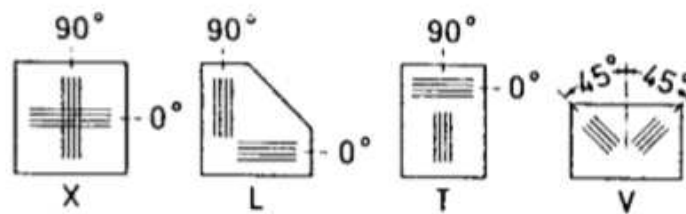
- Caso 1: a determinação das tensões normal e de cisalhamento para condições de estabilidade;
- Caso 2: a determinação do momento de torção efetivo  $M_t$ , a partir do qual a potência transmitida  $P$  pode ser calculada para um eixo rotativo;
- Caso 3: a determinação do ângulo de deformação de cisalhamento  $\gamma$  ou do ângulo de torção  $\phi$ .

### 3.2.1 Determinação das tensões normal e de cisalhamento (caso 1)

Conforme Hoffmann (1989), um eixo sob um carregamento de torção é sujeito a um estado biaxial de tensão. A tensão normal principal ocorre em um ângulo de  $\pm 45^{\circ}$  em relação aos planos cilíndricos (linhas paralelas ao eixo longitudinal do eixo sob torção). As deformações

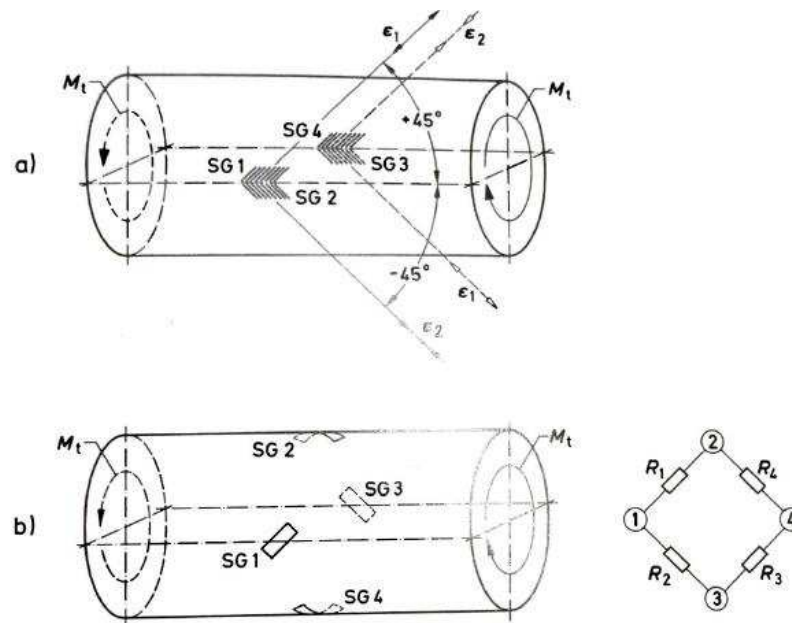
produzidas pelas tensões normais podem ser medidas com extensômetros. As rosetas, mostradas na Figura 17, são as mais adequadas para esse propósito, particularmente a com o formato V com os eixos de medição a  $\pm 45^\circ$  em relação ao eixo de simetria. Os eixos de medição devem corresponder às direções principais da tensão, conforme Figura 18.

Figura 17 – Rosetas



Fonte: Hoffmann (1989)

Figura 18 – Posicionamento a) rosetas e b) extensômetros unidirecionais



Fonte: Hoffmann (1989)

Conforme Hoffmann (1989), visto que um resultado correto somente será obtido com uma correta medição, os eixos de medição devem corresponder às direções principais das tensões. Um desvio de ângulo  $\alpha$ , ocasionará um erro  $e$  de

$$e = (\cos 2\alpha - 1) \cdot 100\% \quad (17)$$

As tensões normais principais  $\sigma_1$  e  $\sigma_2$  podem ser calculadas a partir das medidas das deformações  $\varepsilon_1$  e  $\varepsilon_2$ , de acordo com as equações (18) e (19) para estado biaxial de tensão com as direções principais conhecidas.

$$\sigma_1 = \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_1 + \nu \cdot \varepsilon_2) \quad (18)$$

$$\sigma_2 = \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_2 + \nu \cdot \varepsilon_1) \quad (19)$$

Se os extensômetros forem montados em meia ponte e nos braços 1 e 2 da ponte, então uma mudança de sinal ocorre em  $\varepsilon_2$ . O valor de deformação  $\varepsilon_i$  se torna:

$$\varepsilon_i = \varepsilon_1 - (-\varepsilon_2) = |\varepsilon_1| + |\varepsilon_2| = 2\varepsilon \quad (20)$$

onde  $\varepsilon_i$  é o valor de deformação indicado para meia ponte e ponte completa.

Um resultado correspondente é obtido para o circuito de ponte completa. Portanto, há uma mudança de sinal na expressão entre parênteses das equações (21) e (22) quando comparadas com as equações (18) e (19).

Para o circuito com meia ponte:

$$\sigma_{1,2} = \pm \frac{1}{2} \cdot \frac{E}{1-\nu^2} \cdot (1 - \nu) \cdot \varepsilon_i \quad (21)$$

Para o circuito com ponte completa:

$$\sigma_{1,2} = \pm \frac{1}{4} \cdot \frac{E}{1-\nu^2} \cdot (1 - \nu) \cdot \varepsilon_i \quad (22)$$

Segundo Hoffmann (1989), a tensão de cisalhamento  $\tau$  aumenta de  $\tau = 0$  no centro do eixo para  $\tau_{\max}$  no raio mais externo do eixo, conforme Figuras 12 e 13.

$$\tau_{max} = 2\varepsilon_{45} \cdot G \quad (23)$$

$$\tau_{max} = \varepsilon_i \cdot G, \text{ para circuito com meia ponte}$$

$$\tau_{max} = \frac{1}{2} \varepsilon_i \cdot G, \text{ para circuito com ponte completa}$$

### 3.2.2 Determinação do momento de torção efetivo $M_t$ (caso 2)

Hoffmann (1989) explica que o momento torcional  $M_t$  pode ser calculado a partir da tensão de cisalhamento  $\tau_{max}$ , a qual é determinada de acordo com a equação (23), e do momento polar de inércia  $S_p$  do eixo, como pode se ver:

$$M_t = \tau_{max} \cdot S_p = 2\varepsilon_{45} \cdot G \cdot S_p \quad (24)$$

$$M_t = \varepsilon_i \cdot G \cdot S_p, \text{ para circuito com meia ponte}$$

$$M_t = \frac{1}{2} \varepsilon_i \cdot G \cdot S_p, \text{ para circuito com ponte completa}$$

Utilizando  $\tau$  e  $G$  em  $N/m^2$  e  $S_p$  em  $m^4$ , o momento  $M_t$  é obtido em  $N.m$ .

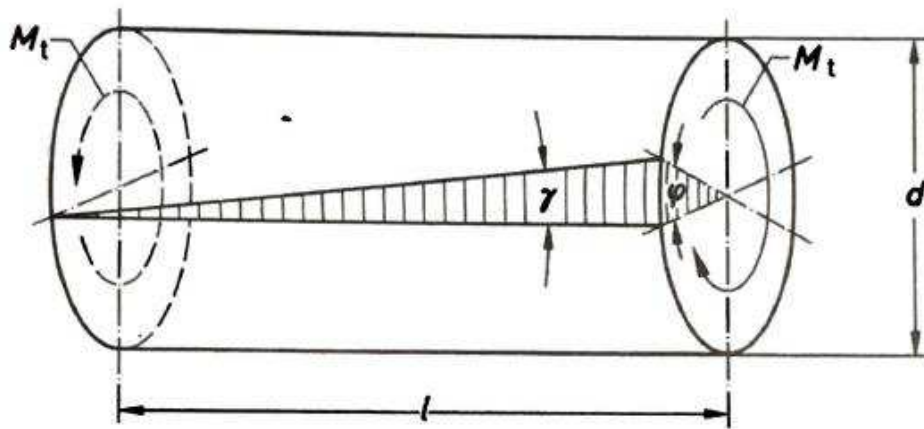
O momento polar de inércia  $S_p$  depende da seção transversal do eixo ensaiado. Conforme mostrado anteriormente, para uma seção circular vazada, o momento polar de inércia é dado pela equação (16).

$$S_p = J = \frac{1}{2} \pi (c_2^4 - c_1^4) \quad (16)$$

### 3.2.3 Determinação do ângulo de deformação $\gamma$ ou do ângulo de torção $\phi$ (caso 3)

A Figura 19 mostra o ângulo de deformação de cisalhamento  $\gamma$  e o ângulo de torção  $\phi$  no eixo sob carregamento de torsão.

Figura 19 – Ângulos encontrados em um eixo sob torção



Fonte: Hoffmann (1989)

O ângulo de deformação de cisalhamento  $\gamma$  é calculado por:

$$\gamma = \frac{\tau_{max}}{G} \quad (25)$$

E o ângulo de torção  $\varphi$  por:

$$\varphi = 2 \cdot \frac{l}{d} \cdot \gamma = 4\varepsilon_{45} \cdot \frac{l}{d} \quad (26)$$

$$\varphi = 2\varepsilon_i \cdot \frac{l}{d}, \text{ para circuito com meia ponte}$$

$$\varphi = \varepsilon_i \cdot \frac{l}{d}, \text{ para circuito com ponte completa}$$

### 3.3 PROJETO BÁSICO COMPLETO DO DISPOSITIVO

#### 3.3.1 Requisitos do Projeto

Antes de se iniciar o projeto, os requisitos do dispositivo foram coletados com o departamento que o utilizará:

- Foi definido que a fabricação do dispositivo deveria ser realizada internamente, com as ferramentas disponíveis na Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá;

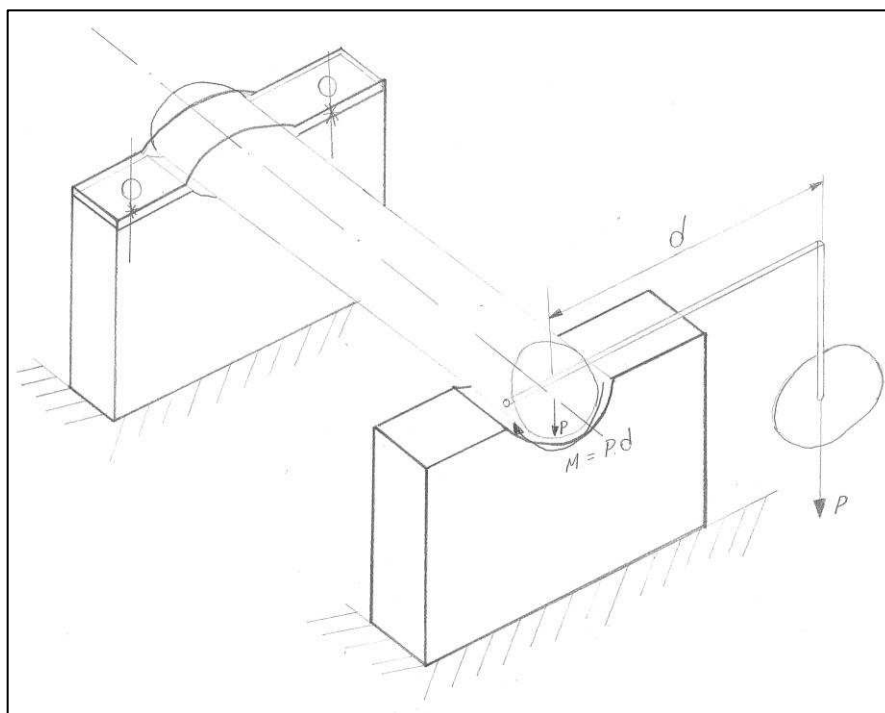
- O dispositivo deveria ser projetado para utilização em baixas cargas somente, ou seja, não seria realizado algum ensaio de torção até a fratura do material, mas sim somente seria utilizado para fins pedagógicos;

- A carga aplicada no tubo deveria ser somente de torção, evitando qualquer solução que pudesse gerar uma carga combinada de flexão e torção no tubo;

### 3.3.2 Concepção preliminar

Após a definição e coleta dos requisitos junto ao cliente, nesse caso o departamento de mecânica da FEG, iniciou-se o desenvolvimento do dispositivo com alguns rascunhos a mão e ideias no papel, como pode-se ver na Figura 20.

Figura 20 - Ideia no início do projeto

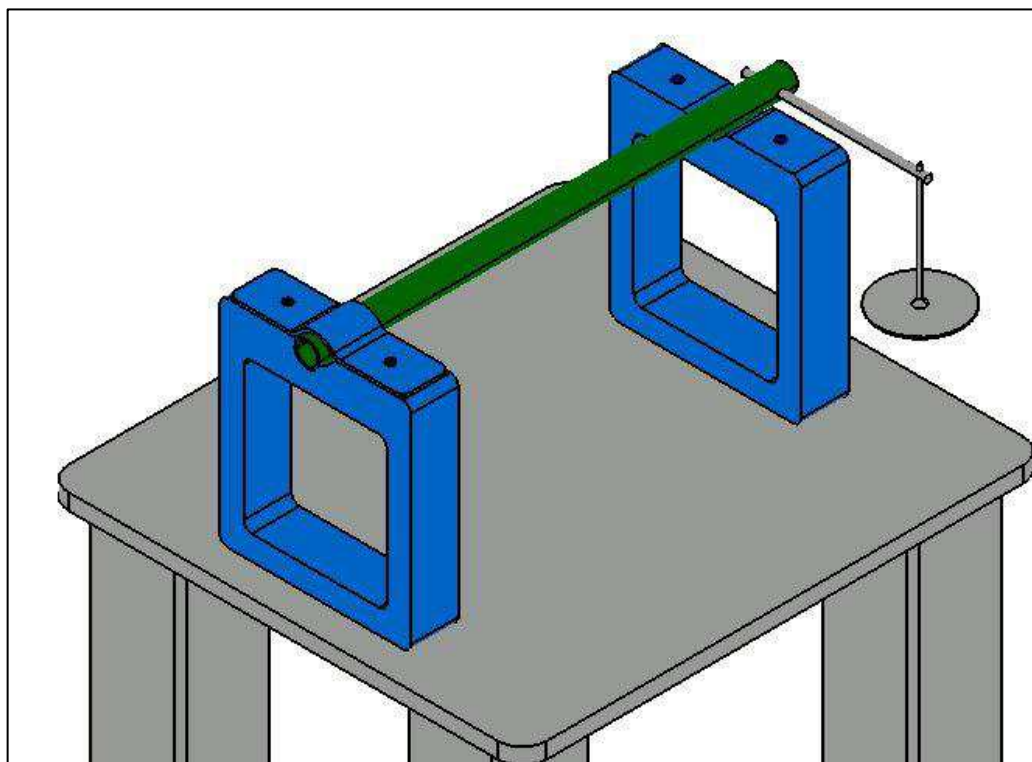


Fonte: Produção do próprio autor (2019)

A ideia inicial consistia de cinco peças: duas bases fixadas à bancada por parafusos (uma fixa e outra que poderia variar a posição na direção longitudinal, para permitir diferentes comprimentos de tubos), que serviriam de apoio para o tubo, uma peça que faria a função de braçadeira e prenderia o tubo na base, e um pequeno pratinho fixo ao tubo, similar aos dispositivos já utilizados no laboratório, onde seriam colocados os pesos que causariam a torção no tubo.

Dessa forma a ideia seguiu e os modelos começaram a ser criados no CATIA, como pode-se ver na Figura 21.

Figura 21 - Concepção inicial



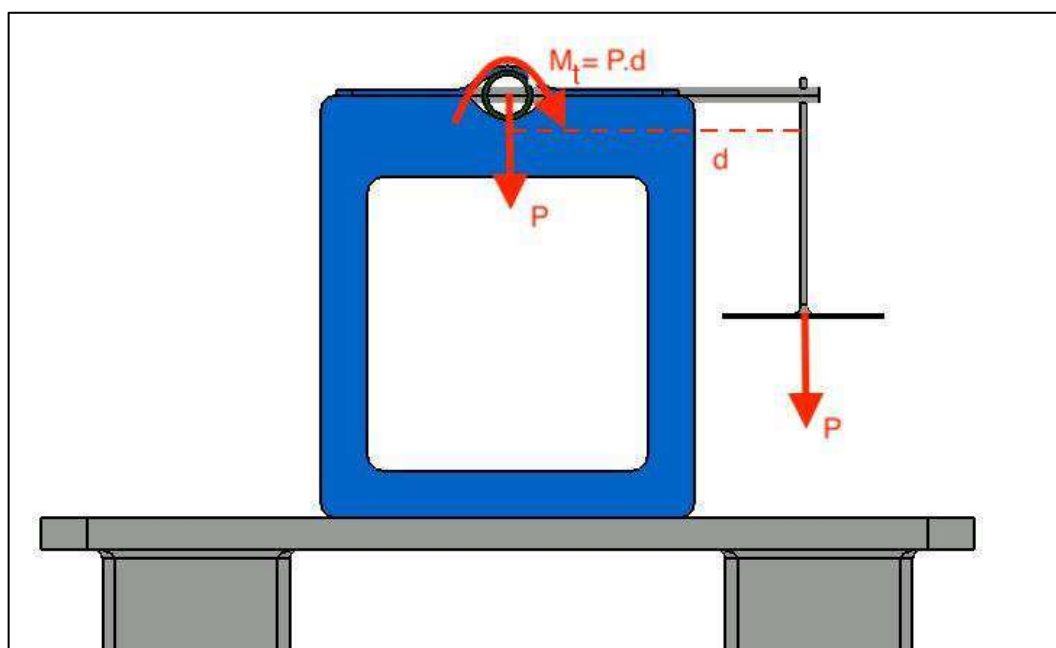
Fonte: Produção do próprio autor (2019)

No início, o intuito era fixar as bases em uma bancada existente no laboratório através de parafusos e que pudesse ser desmontada e montada momentos antes da realização do ensaio.

Porém, ao validar o conceito do dispositivo, foi encontrada uma falha de projeto que não tinha sido prevista antes nos requisitos, mas que deveria, e foi, ser incorporada como um requisito muito importante. Em um ensaio de torção deseja-se verificar o comportamento de um determinado material quando submetido a um esforço torcional, porém esse resultado pode ser impreciso, quando se pensando em materiais compósitos, se houver uma carga indesejada não prevista durante o ensaio: um momento fletor, e foi exatamente o que o primeiro conceito contemplava.

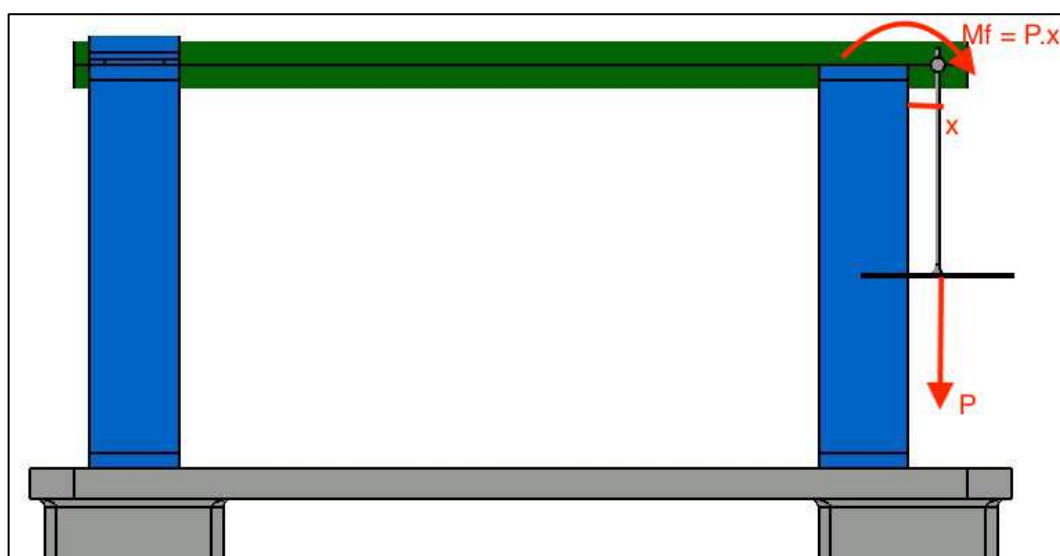
Como pode-se ver na Figura 22, se considerarmos uma vista lateral do dispositivo, a força peso das massas no pratinho gera um binário, que aplica no eixo do CDP um momento torçor ( $M_t$ ) de intensidade  $P.d$ , mas também transfere a força peso para o eixo do CDP que gera um momento fletor ( $M_f$ ) de intensidade  $P.x$ , como pode ser visto na Figura 23.

Figura 22 - Cargas atuantes no CDP (vista lateral)



Fonte: Produção do próprio autor (2019)

Figura 23 - Cargas atuantes no CDP (vista frontal)



Fonte: Produção do próprio autor (2019)

Logo encontrada essa falha, o conceito foi descartado e iniciou-se o estudo buscando a aplicação de um torque puro no CDP, em que um momento fletor não fosse causado.

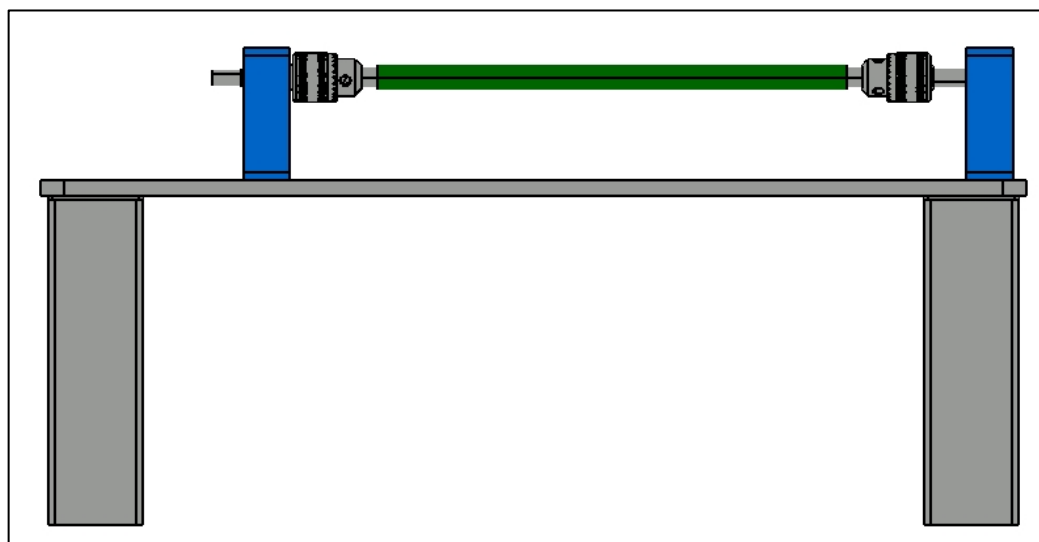
### 3.3.3 Conceito definitivo

No início previa-se um dispositivo simples para ser utilizado no laboratório da faculdade, porém como já foi visto, algumas limitações conceituais impediram de projetar o dispositivo da forma mais simples possível, o que fez com que outros projetos já existentes fossem estudados e algumas ideias provenientes deles fossem incorporadas ao dispositivo pensando com alguns ajustes.

A ideia de apoiar o tubo em dois pontos foi deixada de lado, pois era praticamente impossível de aplicar uma carga pura de torção em um tubo bi apoiado. Foi então que analisando as máquinas de ensaio disponíveis no mercado, já mostradas anteriormente, entendeu-se que para aplicar uma carga de torção no tubo, era necessário aplicar o torque diretamente no eixo, como em uma furadeira, por exemplo, em que o motor aplica o torque e rotação diretamente na broca através de um mandril.

Como pode-se ver na Figura 24, foi utilizado um modelo de mandril disponível no mercado para fixar o tubo (lado direito da imagem) e também transmitir o torque para ele (lado esquerdo).

Figura 24 – Fixação com mandris

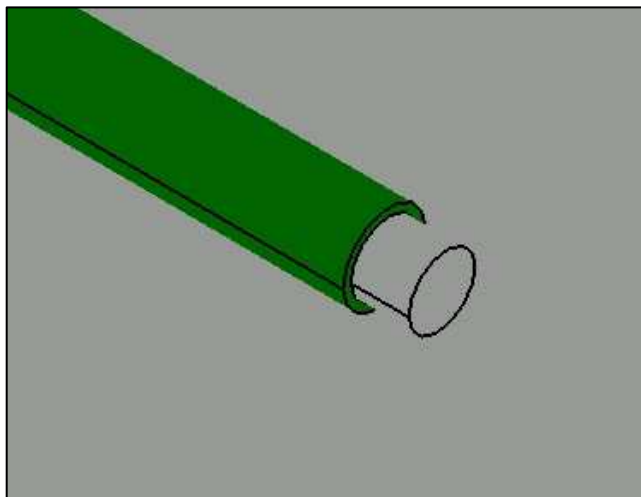


Fonte: Produção do próprio autor (2019)

Com a utilização de mandris para a fixação do tubo, surgiu um novo problema: durante a fixação do tubo, ele não poderia ser danificado pela força que o mandril faria, visto que o tubo é de material compósito e mais suscetível a danos. Foi então que surgiu a ideia de utilizar uma bucha metálica em cada uma das extremidades, para que quando o mandril fosse apertado,

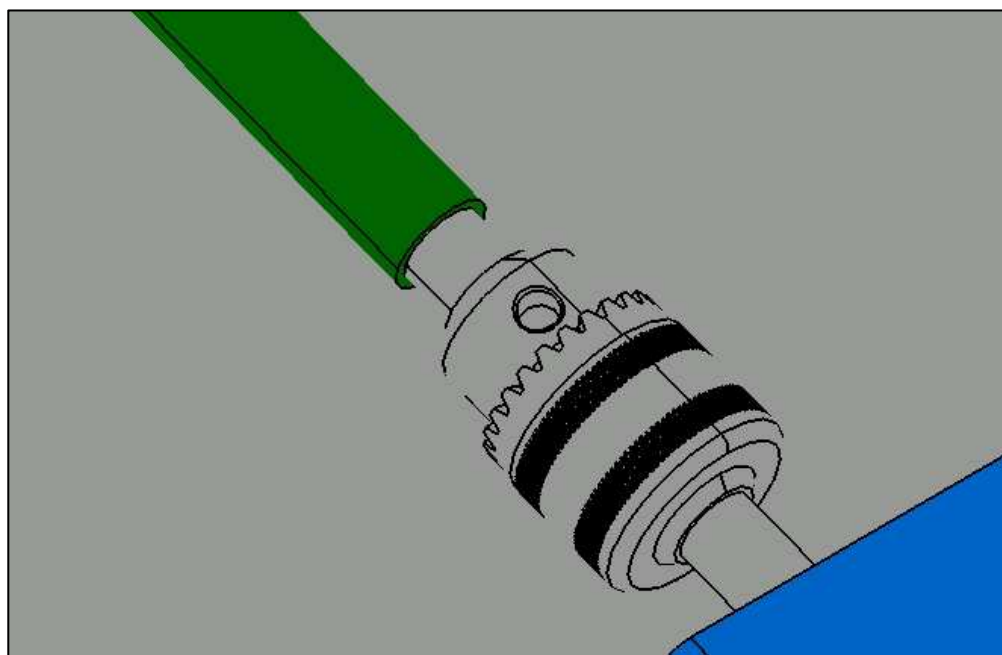
existisse algo no interior do tubo que impedisse sua deformação, como pode-se ver nas Figuras 25 e 26.

Figura 25 – Instalação da bucha metálica



Fonte: Produção do próprio autor (2019)

Figura 26 – Simulação da fixação do tubo com a bucha instalada

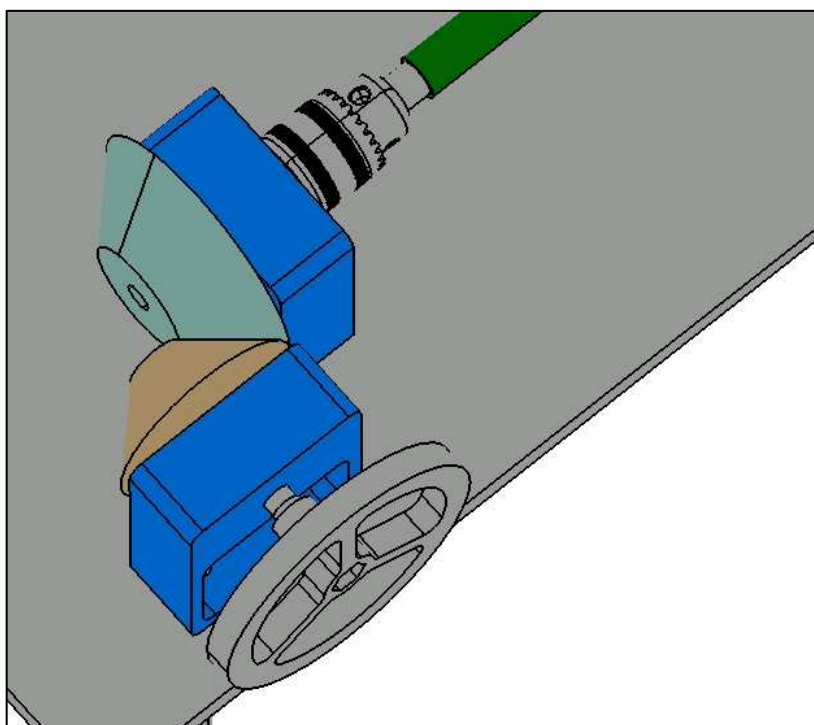


Fonte: Produção do próprio autor (2019)

Após a definição de como o torque seria transmitido para o tubo, era necessário encontrar um modo de criação do torque, visto que a ideia com os pesos, aplicando o torque diretamente no tubo, já havia sido descartada, como explicado anteriormente.

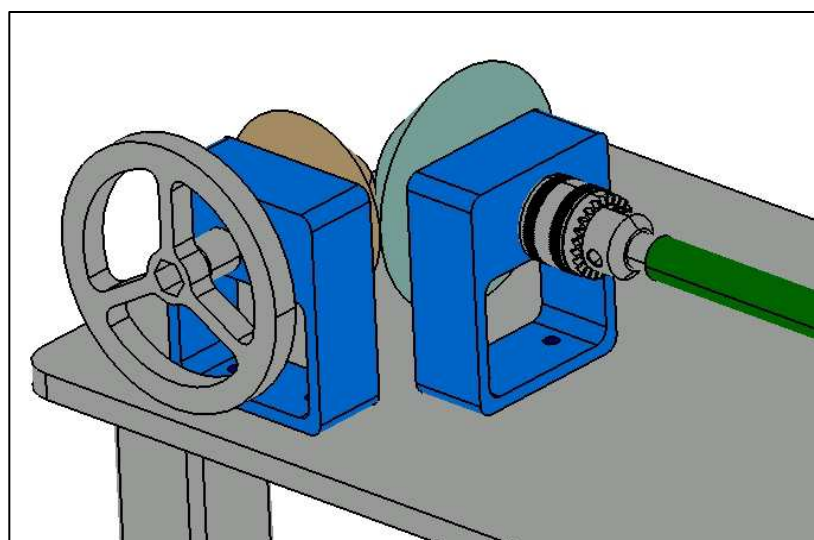
A análise das máquinas disponíveis no mercado voltou à tona e concluiu-se que a utilização de um motor elétrico para criação do torque, como algum dos modelos, era inviável considerando um dispositivo didático, mas utilizar um volante transmitindo o torque para o tubo poderia ser considerado viável, como pode-se ver em um modelo simples nas Figuras 27 e 28.

Figura 27 – Volante para criação do torque



Fonte: Produção do próprio autor (2019)

Figura 28 – Volante para criação do torque

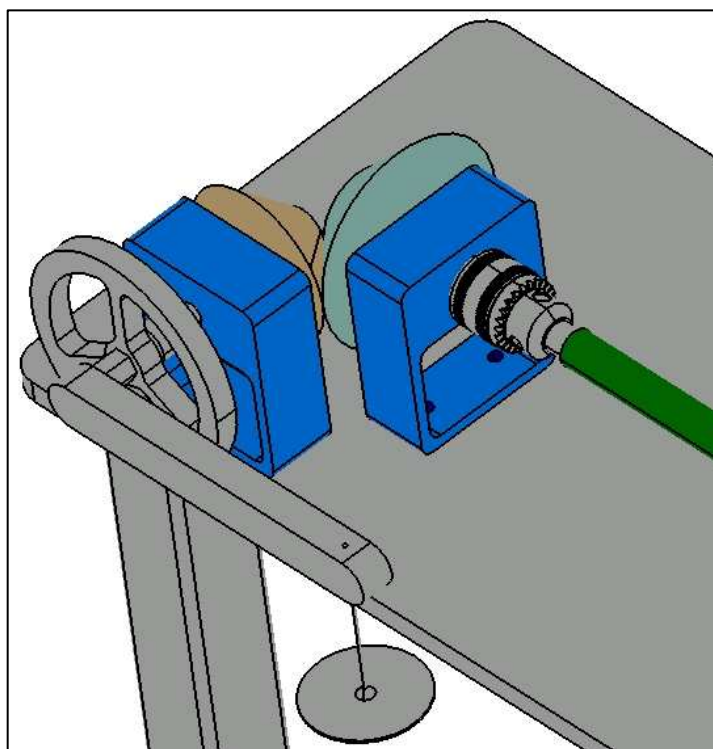


Fonte: Produção do próprio autor (2019)

Como pode-se ver na Figura 28, o torque é aplicado no volante e este é transmitido ao eixo em que o tubo a ser ensaio está instalado através de duas engrenagens cônicas de dentes retos, devido sua alta eficiência, instaladas de modo que a relação de velocidade ( $i$ ) entre elas seja 1, ou seja, o torque criado pelo volante é o mesmo transmitido ao tubo ensaiado.

Porém para simplificar o ensaio, era necessário encontrar uma solução para a medição do torque aplicado no CDP. Por esse motivo, foi pensado em uma alavanca que pudesse substituir o volante e nela serem colocados alguns pesos conhecidos, como no conceito inicial. No entanto, o volante ainda era uma boa ideia a ser aproveitada, pois uma escala graduada poderia ser montada atrás do volante para medição do ângulo de giro do volante, e a alavanca poderia ser utilizada como um item que poderia ser montado ou desmontado quando necessário. E assim foi feito, como pode se ver na Figura 29.

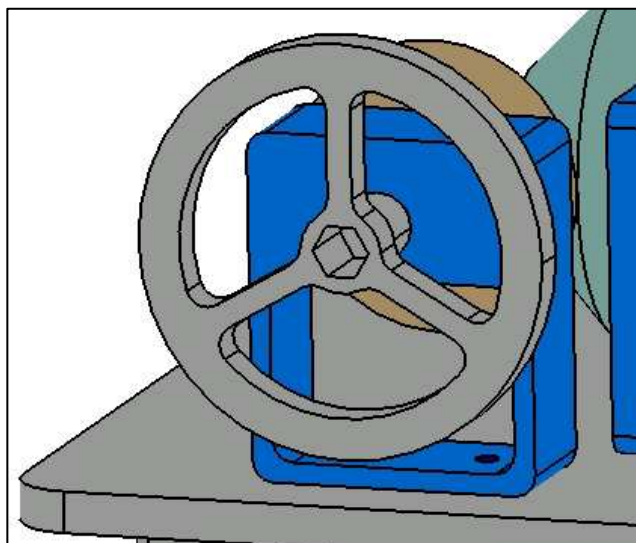
Figura 29 – Volante com alavanca instalada



Fonte: Produção do próprio autor (2019)

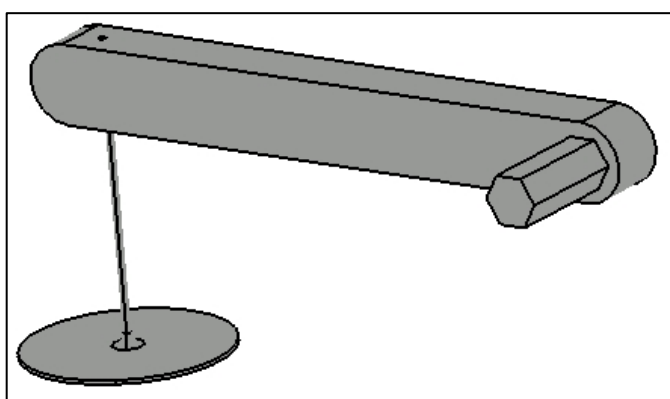
A transmissão do torque da alavanca para o volante é realizada por um encaixe sextavado, externo na alavanca e interno no volante, como é mostrado nas Figuras 30 e 31. O pratinho para acomodação dos pesos, mostrado na Figura 31, é independente da alavanca e pode ser preso à alavanca através de um pino trava.

Figura 30 – Detalhe volante



Fonte: Produção do próprio autor (2019)

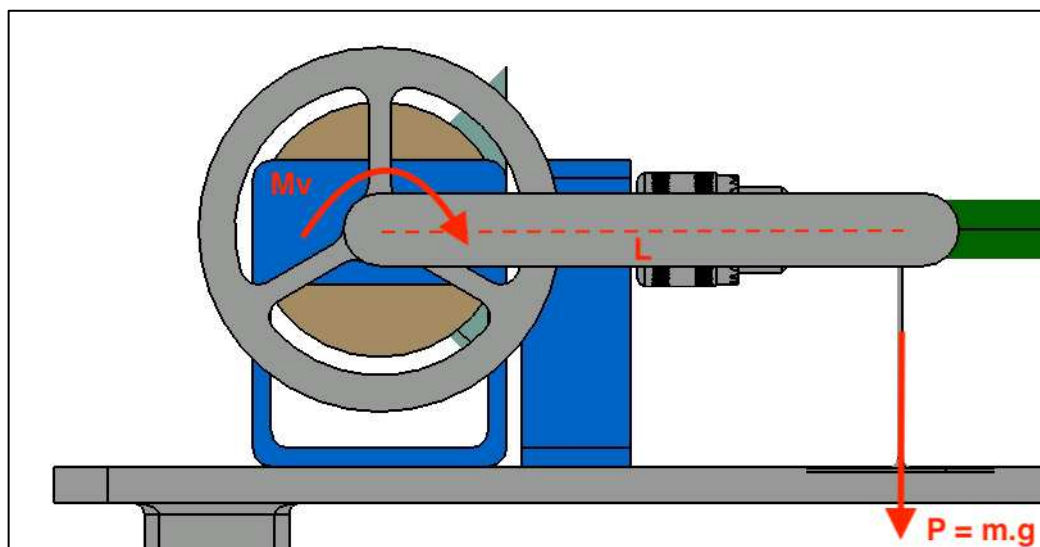
Figura 31 – Detalhe alavanca



Fonte: Produção do próprio autor (2019)

Dessa forma, para encontrar o torque aplicado no volante ( $M_v$ ) é necessário multiplicar a força peso  $P$  gerada pelas massas colocadas no pratinho pela distância ( $L$ ) até o centro do volante, como pode-se ver na Figura 32.

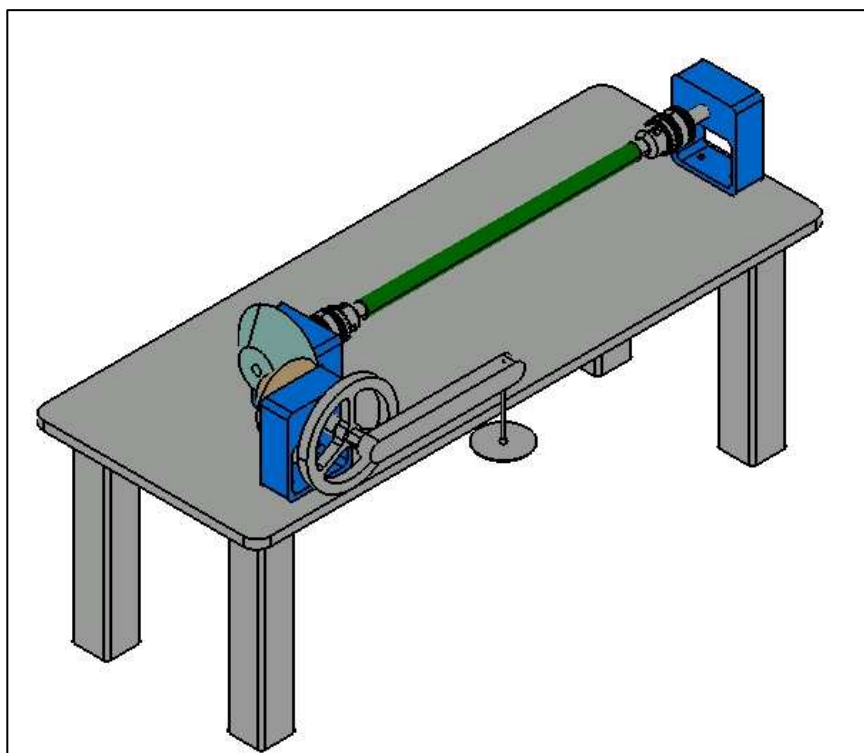
Figura 32 – Forças atuantes no dispositivo



Fonte: Produção do próprio autor (2019)

Na Figura 33, pode-se ver uma imagem geral do dispositivo imaginado e instalado em uma bancada.

Figura 33 – Dispositivo instalado na bancada



Fonte: Produção do próprio autor (2019)

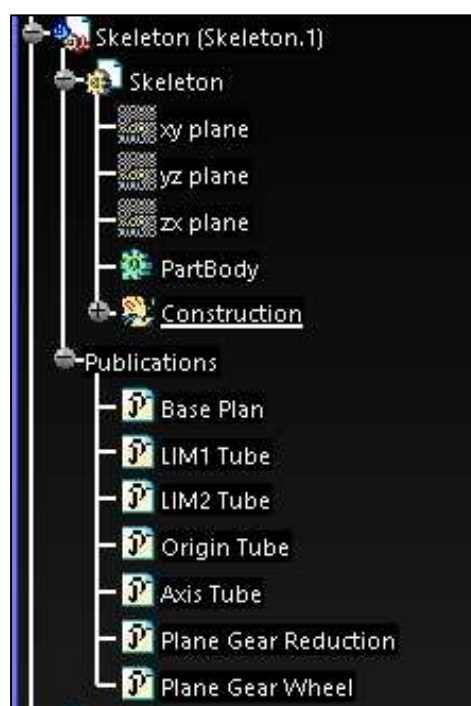
### 3.3.4 Uso do programa CATIA

Para o modelamento das peças no CATIA, foi utilizado um recurso bastante utilizado por empresas de projeto quando são necessárias muitas referências para a criação das peças.

Em outras palavras, quando se faz necessária a definição de planos, linhas ou pontos que serão comuns para diferentes áreas, cria-se o chamado *Skeleton*, que é um arquivo no CATIA que contém os dados para serem utilizados na construção das peças. Esses dados são publicados e utilizados com link no projeto, o que permite que caso algum dia um desses dados precise ser alterado, como a posição do eixo do tubo por exemplo, a correção nos modelos será mínima.

No projeto deste dispositivo foram definidos alguns dados que foram considerados importantes e estes foram criados no *Skeleton*, como podemos ver na Figura 34.

Figura 34 – *Skeleton*



Fonte: Produção do próprio autor (2019)

Os dados que foram considerados importantes na modelagem deste dispositivo foram:

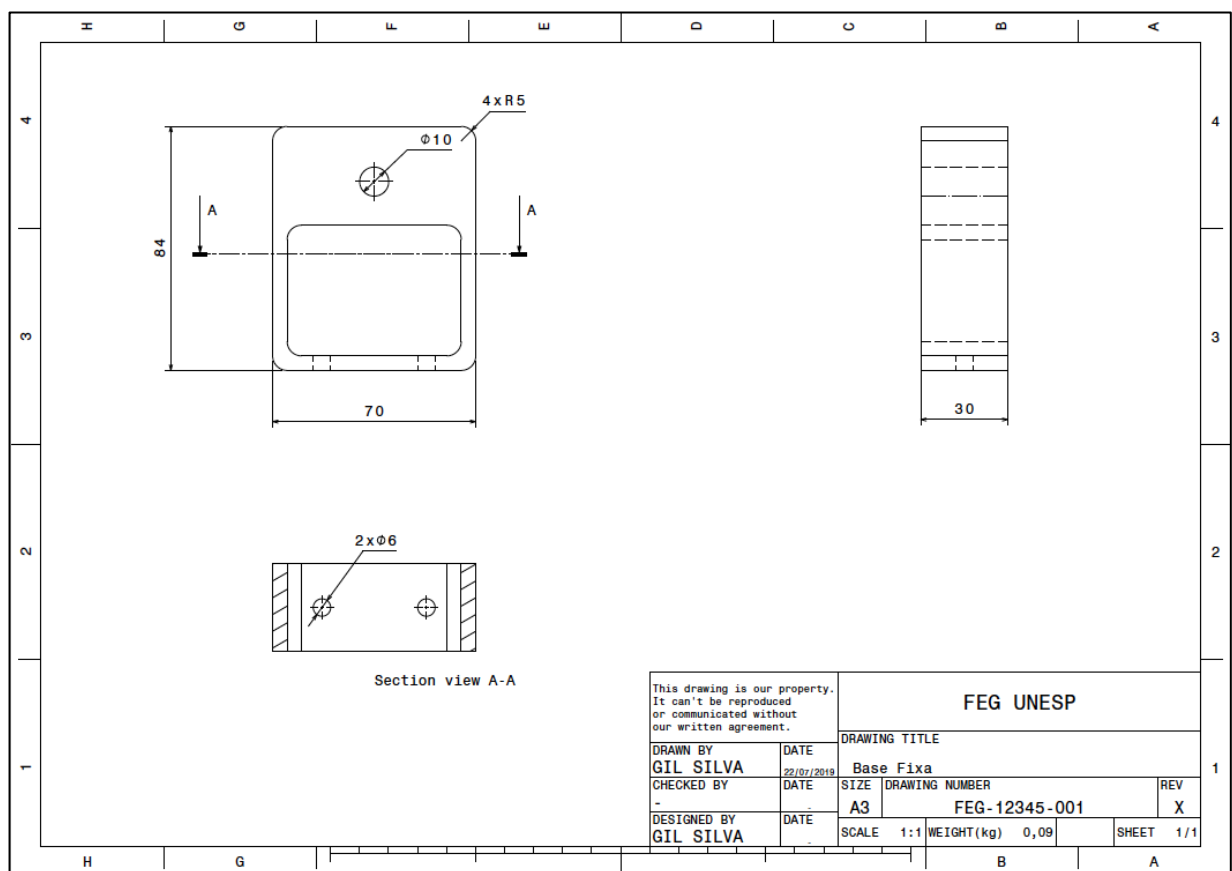
- *Base Plan*: Plano da bancada de instalação do dispositivo;
- *LIM1 Tube* e *LIM2 Tube*: Limites do comprimento do tubo a ser ensaiado;
- *Origin Tube*: Ponto central do tubo a ser ensaiado;
- *Axis Tube*: Eixo do tubo a ser ensaiado;

- *Plane Gear Reduction e Plane Gear Wheel*: planos utilizados para definição da posição das engrenagens

### 3.3.5 Desenho 2D

Após a modelagem das peças, elas devem ser detalhadas em desenho 2D para permitir a fabricação, como pode-se ver um exemplo na Figura 35.

Figura 35 – Desenho 2D



Fonte: Produção do próprio autor (2019)

### 3.4 CARACTERÍSTICAS DO TUBO

O tubo utilizado para o projeto deste dispositivo foi um tubo de fibra de carbono, com 20mm de diâmetro (2mm de espessura), de 10 camadas, configuração 0/45°.

### 3.5 COLETA DE DADOS

A aquisição de dados de deformação específica através dos extensômetros poderia ser realizada através de um conversor de sinais Quantum MX1615, que pode ser visto na Figura 36, disponível para a utilização no laboratório da faculdade, o que não impacta no custo do ensaio.

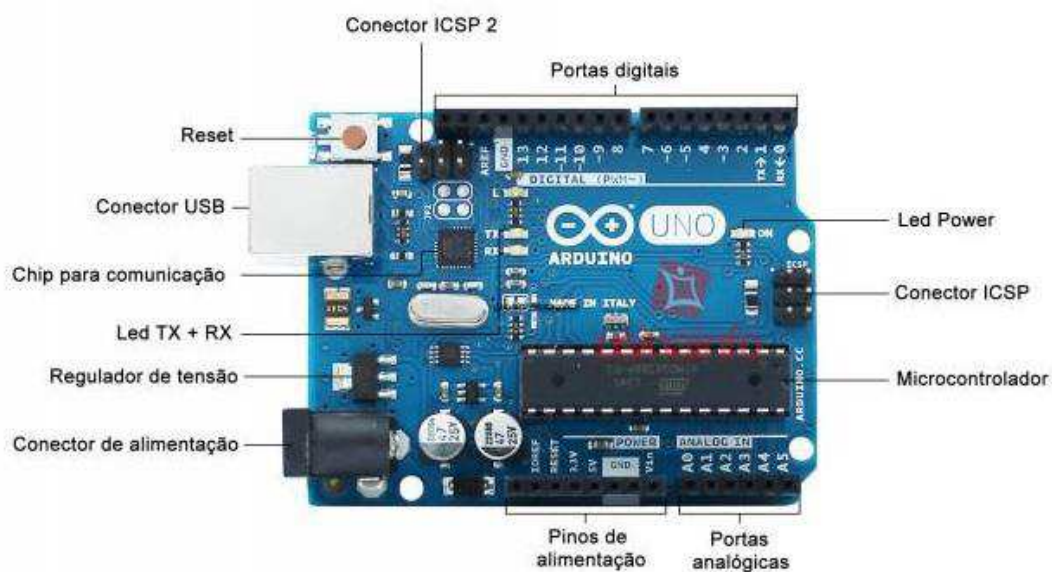
Figura 36 – Conversor de sinais Quantum MX1615



Fonte: Dias (2017)

Porém, para atender um dos objetivos desse projeto que é a simplicidade, também pode ser utilizada uma ferramenta desenvolvida para substituir o conversor de sinais Quantum, de forma menos custosa e com margem de erro próxima do aceitável. Conforme Camarotto Filho (2016), esta ferramenta utiliza uma plataforma Arduino Uno, conforme mostrado na Figura 37.

Figura 37 – Placa Arduino Uno



Fonte: Camarotto Filho (2016)

## 4 RESULTADOS ESPERADOS

Como o objetivo do trabalho é um projeto inicial de um dispositivo de ensaio, o resultado esperado é, além do próprio projeto inicial, é uma simulação do ensaio que o dispositivo executará.

Os dados do material utilizado nessa simulação foram encontrados no artigo de Al-Khazraji (2017), visto que o material que será ensaiado no Laboratório da FEG ainda não foi 100% ensaiado e não possui todas as propriedades catalogadas.

### 4.1 CONDIÇÕES INICIAIS

Para que a simulação pudesse ser realizada, algumas condições iniciais tiveram que ser assumidas:

- O material ensaiado é um tubo de Carbono-epóxi Prepreg (SE 84LV/HSC/300g/400mm/37% /1 blue) com módulo de elasticidade transversal  $G = 2,6 \text{ GPa}$ ;
- A relação de velocidade (i) entre as engrenagens cônicas é igual a 1, logo o momento calculado no volante é o mesmo aplicado ao tubo;
- O comprimento L da alavanca de transmissão do torque é 150mm;
- O diâmetro do tubo é igual a 20mm e espessura de parede igual a 2mm;
- A gravidade no local do ensaio é igual a  $9,81 \text{ m/s}^2$ ;
- As massas utilizadas no ensaio são de 7,64kg e podem ser somadas para aumentar o torque no tubo;
- Não há perda de eficiência na transmissão do torque no dispositivo;

### 4.2 MÉTODO E RESULTADOS

Para cálculo do momento polar de inércia, foi utilizada a equação 16:

$$S_p = \frac{1}{2}\pi(c_2^4 - c_1^4) \quad (16)$$

$$S_p = \frac{1}{2}\pi(0,010^4 - 0,009^4)$$

$$S_p = \frac{1}{2}\pi \cdot 3,439 \cdot 10^{-9}$$

$$S_p = 5,4019 \cdot 10^{-9} \text{ m}^4$$

Os diferentes momentos  $M_t$  foram calculados utilizando o valor das massas ( $M$ ) e do comprimento da alavanca ( $L$ ) que transmite o torque ao volante, como mostrado para a primeira massa:

$$M_t = M \cdot g \cdot L \quad (27)$$

$$M_{t1} = 7,64 \cdot 9,81 \cdot 0,150$$

$$M_{t1} = 11,2423 \text{ N.m}$$

Foram realizadas simulações com 1 a 6 massas, como pode-se ver os valores calculados na Tabela 2.

Tabela 2 – Momentos calculados

| Quantidade de Massas | Massa [kg] | Peso [N] | Momento [N.m] |
|----------------------|------------|----------|---------------|
| 1                    | 7,64       | 74,9484  | 11,2423       |
| 2                    | 15,28      | 149,8968 | 22,4845       |
| 3                    | 22,92      | 224,8452 | 33,7268       |
| 4                    | 30,56      | 299,7936 | 44,9690       |
| 5                    | 38,20      | 374,742  | 56,2113       |
| 6                    | 45,84      | 449,6904 | 67,4535       |

Fonte: Produção do próprio autor (2019)

Os valores de deformação específica no extensômetro foram encontrados através da equação 24, como mostrado para a primeira massa:

$$M_t = 2\varepsilon_{45} \cdot G \cdot S_p \quad (24)$$

$$11,2423 = 2\varepsilon_{45} \cdot 2,6 \cdot 10^9 \cdot 5,4019 \cdot 10^{-9}$$

$$\varepsilon_{45} = 400,226 \cdot 10^{-3}$$

Para as outras massas, os valores foram calculados e mostrados na Tabela 3.

Tabela 3 – Deformação específica Composto

| Quantidade de Massas | Momento [N.m] | $\epsilon_i$      |
|----------------------|---------------|-------------------|
| 1                    | 11,2423       | $400,226.10^{-3}$ |
| 2                    | 22,4845       | $800,452.10^{-3}$ |
| 3                    | 33,7268       | 1,2               |
| 4                    | 44,9690       | 1,6               |
| 5                    | 56,2113       | 2,0               |
| 6                    | 67,4535       | 2,401             |

Fonte: Produção do próprio autor (2019)

Para efeito de comparação, os mesmos cálculos foram realizados utilizando as propriedades do aço, visto que os resultados de ensaios em materiais metálicos são encontrados com mais facilidade, podendo validar assim a forma de cálculo utilizada.

Os resultados da simulação com um tubo de aço ( $G = 75,8 \text{ GPa}$ ) de mesmo diâmetro e espessura podem ser encontrados na Tabela 4.

Tabela 4 – Deformação específica Aço

| Quantidade de Massas | Momento [N.m] | $\epsilon_i$     |
|----------------------|---------------|------------------|
| 1                    | 11,2423       | $13,728.10^{-3}$ |
| 2                    | 22,4845       | $27,456.10^{-3}$ |
| 3                    | 33,7268       | $41,184.10^{-3}$ |
| 4                    | 44,9690       | $54,912.10^{-3}$ |
| 5                    | 56,2113       | $68,640.10^{-3}$ |
| 6                    | 67,4535       | $82,368.10^{-3}$ |

Fonte: Produção do próprio autor (2019)

## 5 CONCLUSÃO

Durante o projeto, pode-se perceber que nem sempre a primeira ideia que vem a mente no início de um projeto é a melhor ideia, pois nem todos os requisitos foram minuciosamente estudados e podem ocorrer alguns erros, como mostrado na primeira concepção do projeto.

Mas ao mesmo tempo, a ideia inicial não pode ser descartada completamente, pois a partir dela, pode-se extrair alguns conceitos que podem ser úteis no conceito final, como também pôde ser visto neste projeto.

E, diante de todo projeto aqui apresentado, pode-se concluir que o objetivo deste trabalho foi atendido, pois pôde-se ver um projeto inicial de um dispositivo de ensaio em bancada com um conceito simples e que cumpre os requisitos propostos.

## REFERÊNCIAS

ABREU, João Felipe Araújo Carneiro de. **Estudo computacional via ANSYS de vigas, arcos e anéis com restrições de contato impostas por bases elásticas**. 2016. 97 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Civil, Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2016. Disponível em: [https://www.propec.ufop.br/uploads/propec\\_2016/teses/arquivos/dissertacao-joao-felipe-a-c-de-abreu-rev6.pdf](https://www.propec.ufop.br/uploads/propec_2016/teses/arquivos/dissertacao-joao-felipe-a-c-de-abreu-rev6.pdf). Acesso em: 14 jun. 2019.

AL-KHAZRAJI, Mustafa. Design and failure analysis of a laminated composite tube using maximum stress and tsai- Wu Failure Criteria. **International journal of science and research (IJSR)**, Iraque, v. 6, n. 8, p.686-693, ago. 2017.

ALGETEC. **Máquina de ensaio de torção**. 2019. Disponível em: <https://www.algetec.com.br/br/maquina-de-ensaio-de-torcao>. Acesso em: 08 jun. 2019.

BORTOLO, Karla Fernanda; LINHARES, João Carlos. Verificação da necessidade de dispositivos didáticos para o ensino na graduação em engenharia mecânica. **Anais do 19º Cobenge**, Passo Fundo, Rs, v. 2006, n. 1, p.1.128-1.139, set. 2006. Disponível em: [http://www.abenge.org.br/cobenge/arquivos/13/artigos/1\\_69\\_790.pdf](http://www.abenge.org.br/cobenge/arquivos/13/artigos/1_69_790.pdf). Acesso em: 26 maio 2019.

BIOPDI. **Máquina de ensaio de torção - básica**. Disponível em: <https://biopdi.com.br/ensaios-mecanicos/maquina-de-ensaio-de-torque/basica>. Acesso em: 08 jun. 2019.

BEER, Ferdinand P. *et al.* **Mecânica dos materiais**. 5. ed. Porto Alegre: Amgh, 2011. 800 p.

CALLISTER, William D.. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 7. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2008. 705 p.

CAMAROTTO FILHO, Hélio Aparecido. **Desenvolvimento de um dispositivo portátil capaz de ler e mostrar dados de deformação normal em equipamentos utilizados pela indústria de petróleo e gás**. 2016. 96 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2016.

CHEN, Baochun *et al.* Torsional behavior of a new dumbbell-shaped concrete-filled steel tubes. **Thin-walled Structures**, Fuzhou, China, v. 1, n. 110, p.35-46, out. 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tws.2016.10.016>. Acesso em: 14 ago. 2019.

DALLY, James W.; RILEY, William F.. **Experimental stress analysis**. Tóquio: Mcgraw-hill Book Company, 1965. 520 p.

DIAS, Rodrigo Augusto Alves. **Dispositivo didático para aferição de deflexão horizontal em vigas curvas isostáticas**. 2017. 65 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2017.

DIDACTA, Nova. **Máquina de ensaios de torção (30Nm)**. 2019. Disponível em: [http://www.novadidacta.com.br/produtos-categoria-produto.php?id\\_cate=11&id\\_sub=110&id\\_prod=404](http://www.novadidacta.com.br/produtos-categoria-produto.php?id_cate=11&id_sub=110&id_prod=404). Acesso em: 08 jun. 2019.

FIBERGLASS, Ctg - Taishan. **Filament winding**. Disponível em: <http://www.ctgf.com/EnglishWeb/contents/203/3886.html>. Acesso em: 22 maio 2019.

GONÇALVES, Ana Carolina; SOARES, Álvaro Manoel de Souza. **Medidas de deformação utilizando um sistema de baixo custo**. In: Congresso de iniciação científica da unesp, 28., 2016, Guaratinguetá. Iniciação Científica. Guaratinguetá: Pró-reitoria de Pesquisa, 2016. p. 1 - 1.

HENRIQUE, Mateus. **CATIA V5: conheça o software e sua história**. 2013. Disponível em: <https://cad.cursosguru.com.br/catia-v5-conheca-o-software-e-sua-historia/>. Acesso em: 14 jun. 2019.

HOFFMANN, Karl. **An introduction to measurements using strain gages**. Darmstadt, Deutschland: Hottinger Baldwin, 1989. 291 p.

KAW, Autar K.. **Mechanics of composite materials**. 2. ed. Boca Raton: Taylor & Francis Group, Llc, 2006. 457 p.

LEVY NETO, Flaminio; PARDINI, Luiz Claudio. **Compósitos estruturais: Ciência e Tecnologia**. São Paulo: Edgard Blücher, 2006. 313 p.

MOURA, Marcelo F. S. F. de; MORAIS, Alfredo B. de; MAGALHÃES, António G. de. **Materiais compósitos: Materiais, Fabrico e Comportamento Mecânico**. 2. ed. Porto: Publindústria, 2005. 369 p.

NORTON, Robert L.. **Projeto de máquinas: Uma abordagem integrada**. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 1028 p.

PEREIRA, Celso Pinto Moraes. **Mecânica dos materiais avançada**. Rio de Janeiro: Interciência, 2014. 432 p.

REZENDE, Mirabel Cerqueira; COSTA, Michelle Leali; BOTELHO, Edson Cocchieri. **Compósitos estruturais: tecnologia e prática**. São José dos Campos: Atrliber, 2011. 396 p.

SILVA, Anderson Langone *et al.* A study of strain and deformation measurement using the Arduino microcontroller and strain gauges devices. **Revista brasileira de ensino de física**, Dourados, v. 41, n. 3, p.1-7, 06 nov. 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2018-0206>. Acesso em: 03 jun. 2019.

VIEIRA, Manuel António Rodrigues. **Sensor inteligente para medição de cargas mecânicas**. 2016. 70 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Industrial, Instituto Politécnico de Bragança, Bragança, Portugal, 2016. Disponível em: <https://bibliotecadigital.ipb.pt/bitstream/10198/13185/1/Dissertação.pdf>. Acesso em: 07 jun. 2019.