

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

RÔMULO HENRIQUE DINIZ FERRAZ

MULETA HÍBRIDA DE BAIXO CUSTO

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PATO BRANCO

2017

RÔMULO HENRIQUE DINIZ FERRAZ

MULETA HÍBRIDA DE BAIXO CUSTO

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso de Engenharia Mecânica da Coordenação de Engenharia Mecânica – COEME – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Campus Pato Branco, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro.

Orientador: Prof. Dr. Fábio Rodrigo Mandello Rodrigues

PATO BRANCO

2017

FOLHA DE APROVAÇÃO
MULETA HÍBRIDA DE BAIXO CUSTO

Rômulo Henrique Diniz Ferraz

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado no dia 15/11/2017 como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro Mecânico, do curso de Engenharia Mecânica do Departamento Acadêmico de Mecânica (DAMEC) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Câmpus Pato Branco (UTFPR-PB). O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora julgou o trabalho **APROVADO**.

Prof. Me. Roberto Nunes da Costa
(UTFPR - Departamento de Mecânica)

Prof. Dr. Fabiano Ostapiv
(UTFPR - Departamento de Mecânica)

Prof. Dr. Fábio Rodrigo Mandello Rodrigues
(UTFPR - Departamento de Mecânica)
Orientador

Prof. Dr. Bruno Bellini Medeiros
Responsável pelo TCC do Curso de Eng. Mecânica

A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso de Engenharia Mecânica

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a Deus aos meus familiares, inclusive a minha mãe Fatima e minha irmã Cristiane, tias e avós, e a todos meus amigos e colegas.

AGRADECIMENTOS

Eu agradeço primeiramente à Deus pela saúde e força para realizar este trabalho com sabedoria e serenidade. Agradeço a minha família principalmente minha mãe Fatima, irmã, tias e avós “in memoria”, os quais foram a grande base e força para seguir até o fim, e sempre buscar o melhor.

Meu agradecimento especial para o professor Fabio Rodrigo Mandello Rodrigues, pela competência na orientação deste trabalho, principalmente na parte estrutural do componente. Também agradeço ao co-orientador Fabiano Ostapiv, o qual me guiou com muita clareza no assunto de bambus.

RESUMO

Diniz Ferraz, Rômulo Henrique. Muleta híbrida de baixo custo. 2017. F65 Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2017.

Este trabalho apresenta a justificativa da escolha para a aplicação de bambu em muletas, visando reduzir o custo do produto para torna-lo mais acessível para populações carentes. As muletas são componentes auxiliares para a locomoção de pessoas, as quais apresentam algum tipo de necessidade física, e dependendo do tipo da necessidade o uso destes componentes podem variar de curto a longo prazo. As utilizações das muletas para locomoção apresentam diversas vantagens, quando comparadas a cadeira de rodas, trazendo benefícios para a saúde sendo físicos e até mesmo mentais. As muletas tradicionais utilizam materiais como alumínio e madeira em sua composição, porém estes materiais tornam estes componentes com um custo elevado, tornando-o então restrito a pessoas de baixa renda. Logo, o objetivo deste trabalho foi encontrar um material que atendesse as restrições do componente e reduzisse o custo do mesmo, devido ao seu baixo custo. Sendo assim, foi selecionado o bambu como um substituto, devido a sua ampla existência, sustentabilidade e resistência. Logo, foram realizados dois procedimentos para a comprovação deste material, sendo a seleção do material através da aplicação das cartas de Ashby e a simulação do componente através do Inventor ® 2017. Os quais comprovaram o atendimento das restrições através das cartas de Ashby e a eficiência deste material quando submetido aos esforços simulados.

Palavras-chave: Muletas. Baixo custo. Cartas de Ashby. Inventor ® 2017.

ABSTRACT

Diniz Ferraz, Rômulo Henrique. **Hybrid crutches of low cost**. 2017. F65. Course Completion Work - Mechanical Engineering Course, Federal Technological University of Paraná. Pato Branco, 2017.

This paper presents the justification of the choice for the application of bamboo on crutches, in order to reduce the cost of the product aiming to make it more accessible to poor populations. Crutches are auxiliary components for locomotion of people which have some kind of physical need. Depending on the type of need of these people, the use of those components may vary from short to long term. The uses of the crutches for locomotion present several advantages when compared to the wheelchair. It can bring health benefits being physical and even mental. Traditional crutches are usually made of aluminum and wood, but these materials make these components costly. So, it becomes restricted to low-income people. Therefore, the objective of this work was to find a material that would meet the constraints of the component and reduce its cost. And, it can make the component with low-cost as well. The choice of bamboo as a substitute material had some reasons, like: its wide existence, sustainability and resistance. And, to prove this choice two procedures were performed. The first one were based in material selection through Ashby's charts. And the final one was used a simulation of the component through Inventor® 2017. As a result, this methods proved the compliance with the restrictions through the Ashby's charts and the efficiency of this material when submitted to the simulated efforts.

Keywords: Crutches. Low cost. Ashby's charts. Inventor® 2017.

LISTAS DE FIGURAS

Figura 1- Muleta axilar e muleta canadense.....	4
Figura 2- Muleta com mola em sua base	5
Figura 3- Muleta a base de compósito.....	6
Figura 4- Forças uniaxiais em uma muleta axilar.	9
Figura 5- Muleta de Madeira.	10
Figura 6- Os três eixos principais da madeira, relacionando com a direção do seu grão....	11
Figura 7- Muleta de alumínio.....	11
Figura 8- Diferentes espécies de bambu.	13
Figura 9 - Distribuição das fibras no bambu em um corte transversal.	14
Figura 10- Comparação dos materiais de construção civil considerando a sua resistência, rigidez e densidade.....	15
Figura 11- A seleção dos materiais é determinada por função. As vezes a forma também influencia na seleção.	16
Figura 12- Módulo de Young (E) x Densidade (ρ).	21
Figura 13- Resistência (MPa) x Densidade (ρ).	22
Figura 14- Preço por unidade de volume dos materiais.	23
Figura 15- Barra principal lateral.....	24
Figura 16- Base central.	25
Figura 17- Modelo completo	26
Figura 18- Propriedades do novo material criado através do Software Inventor ® 2017.....	31
Figura 19- Propriedades iniciais do Inventor ® para a simulação.....	32
Figura 20- Propriedades da muleta de alumínio.	33
Figura 21- Geração das malhas na muleta de alumínio e suas considerações para a simulação.....	35
Figura 22- Propriedades da muleta de bambu com base de alumínio.....	36
Figura 23- Geração das malhas na muleta de bambu com base de alumínio e suas considerações para a simulação.	37
Figura 24- Propriedades da muleta de bambu com base de alumínio.....	39
Figura 25- Geração das malhas na muleta de bambu e suas considerações para a simulação.....	40
Figura 26- Análise da tensão de Von Misses na muleta de Alumínio.....	41
Figura 27- Análise do deslocamento da muleta de Alumínio.	42
Figura 28- Análise da tensão de Von Misses na muleta de Bambu com base central de Alumínio.	43
Figura 29- Análise do deslocamento da muleta de Bambu com base central de Alumínio. ..	44
Figura 30- Tensão máxima de Von Misses, localizada no pino central.....	45
Figura 31- Análise da tensão de Von Misses na muleta de Bambu.....	46
Figura 32- Análise do deslocamento da muleta de Bambu.....	47
Figura 33 - Coeficiente de segurança da muleta de Bambu.	48

LISTA DE QUADROS E TABELAS

Quadro 1: Metodologia para a seleção do material	19
Tabela 1: Componentes da liga Al 6061.....	27
Tabela 2: Resistência à tração, módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson das partes basal, centro e topo, com e sem nó, do bambu <i>Guadua angustifolia</i>	28

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO	2
1.2 OBJETIVO	2
1.2.1 Objetivos Específicos	2
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1 MULETAS.....	3
2.1.1 Tipos de Muletas.....	3
2.1.2 Problemas relacionados ao uso de muletas	7
2.1.3 Forças atuantes	7
2.2 MATERIAS UTILIZADOS NAS MULETAS	9
2.2.1 Madeira	11
2.2.2 Alumínio	11
2.3 BAMBU	12
2.3.1 Características dos Bambus	13
2.3.2 Aplicações.....	14
2.4 SELEÇÃO DOS MATERIAIS	15
3 METODOLOGIA.....	19
3.1 JUSTIFICATIVA DA ESCOLHA DO MATERIAL	19
3.2 COMPONENTES DA MULETA	24
3.3 PROPRIEDADES A SEREM SIMULADAS	26
3.3.1 Alumínio	26
3.3.2 Bambu	28
3.4 ANÁLISE DE TENSÕES, DESLOCAMENTO E FATOR DE SEGURANÇA	29
4 SIMULAÇÃO	31
4.1 MULETA DE ALUMÍNIO	33
4.2 MULETA DE BAMBU COM BASE DE ALUMÍNIO	35
4.3 MULETA DE BAMBU	37
5 RESULTADOS	41
5.1 MULETA DE ALUMÍNIO	41
5.2 MULETA DE BAMBU COM BASE CENTRAL DE ALUMÍNIO	42
5.3 MULETA DE BAMBU	45
6 ORIENTAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	49
7 CONCLUSÃO	51
REFERÊNCIAS	53

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, a sustentabilidade é um dos fatores mais importantes para o desenvolvimento ou aplicação de um novo material. Sendo assim, a busca por novos materiais de engenharia que causem menos impacto ao meio ambiente tem aumentado gradativamente. Segundo Lugt et al. (2006), materiais de construção são selecionados conforme a sua funcionalidade, requerimento técnico e financeiro. Porém, sabe-se que estes critérios não se aplicam apenas a materiais de construção e sim a todos os materiais, cuja suas aplicações exijam um certo nível de confiabilidade. Seguindo estes critérios, materiais naturais, híbridos e compósitos têm garantido o seu espaço em novas aplicações. Neste artigo, iremos unir um material natural em ascensão, o bambu, com um produto já disponível no mercado, as muletas, tomando como principal objetivo a redução do custo destas, assim este produto pode ser também acessível à população de baixa renda.

O bambu é um material natural, cujo não é classificado como árvore e sim como uma planta. Este, atualmente tem sido pesquisado e aplicado com grande frequência, principalmente em áreas de construção civil ou como um compósito de fibra reforçada (Tan et al., 2011). Este fato se deve principalmente pelo baixo custo da utilização do bambu, desde a sua produção até a sua aplicação e pelo fato de ser um material abundante e sustentável. Já as muletas, tem como registro de seus primeiros usos a utilização de galhos caídos de árvores para o auxílio na ambulação de pessoas com dificuldades para se locomover (Epstein, 1937). Porém, segundo LeBlanc et al. (1993), estas não tiveram uma mudança significativa durante os seus 5000 anos de uso.

Neste trabalho iremos utilizar o software Inventor®, da Autodesk para realizar uma simulação entre muletas de bambu e muletas de alumínio, assim, tentando comprovar a eficiência do bambu como um material para muletas. O Autodesk Inventor® é um software CAD 3D para modelagem e simulação, o qual oferece uma ampla gama de opções para desenho e modelagem.

A simulação gerada através do software oferece vários parâmetros de extrema importância para este trabalho, como: parâmetros de flambagem, local de ruptura, maior reação da força aplicada ao material. Sendo assim, com estes dados será possível realizar as otimizações na estrutura da muleta, e até mesmo ajudar a otimizar outros elementos da muleta em trabalhos futuros.

1.1 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO

O uso de muletas é algo essencial para o auxílio da locomoção para pessoas que possuem algum tipo de doença que impossibilite a perfeita ambulação ou por pessoas que apresentam alguma contusão e venha necessitar a utilização destas. Sendo assim, as muletas se tornam artigos de extrema importância para pessoas que possuem estas características. Porém, com os atuais materiais utilizados nas muletas, o custo de produção destas eleva o custo do produto para o consumidor, logo, nem todos podem adquirir este bem.

Com a mudança do principal material constituinte da muleta para bambu, é possível que o custo de produção desta seja reduzido e as muletas passem a ser acessíveis a todas as classes sociais. Sendo que, a utilização do bambu como principal material não irá diminuir as qualidades do produto e nem mesmo a sua confiabilidade, apresentando assim apenas vantagens para pessoas que necessitam das muletas para o auxílio de sua locomoção.

1.2 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é reduzir o custo das muletas axilares através da substituição do alumínio como seu principal material de constituição para bambu.

1.2.1 Objetivos Específicos

Esse trabalho possui como objetivo específico estudar o bambu como principal material constituinte de uma muleta axilar, visando assim reduzir o seu custo final com o objetivo de tornar as muletas acessíveis à todas as classes sociais.

Antes de se iniciar os estudos através das simulações, será mostrado utilizando as cartas de Ashby, o porquê o bambu foi selecionado como o principal material para substituir o alumínio, levando em consideração as suas propriedades e o seu custo.

E por fim, será realizada a comparação através de uma simulação no software Autodesk Inventor® entre muletas axilares de alumínio com muletas axilares de bambu, visando provar que o bambu pode ser aplicado a este tipo de produto como principal material. Consequentemente, provar que a aplicação do bambu irá reduzir o custo deste produto, tornando-o acessível à população de baixa renda.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 MULETAS

Durante séculos, as muletas têm sido um elemento essencial no auxílio da locomoção de pessoas, geralmente, estas pessoas apresentam um determinado tipo de deficiência para se locomover. Para se locomoverem, os usuários realizam um movimento tipo a um pêndulo através das muletas, estes se movem para frente alternando o apoio em um ou ambos os pés e através das muletas (Thys et al., 1996).

Como citado acima, muitas pessoas dependem do uso das muletas para se locomoverem e muitas destas são encorajadas a usá-las devido os benefícios fornecidos por estas. Segundo Axelson et al. (1987) existem muitas razões para levantar-se e caminhar, estas razões abrangem motivos psicológicos e fisiológicos. Como exemplo, podemos citar que a circulação do sangue de uma pessoa a qual está caminhando é melhor do que uma pessoa que passa a maior parte do tempo sentada. E, como um exemplo psicológico podemos citar que quando a pessoa está se levantando e caminhando, ela adquire uma certa independência e apresenta maiores benefícios recreativos (Rovick et al., 1988).

Os argumentos apresentados acima têm como objetivo fornecer motivos consistentes para demonstrar os benefícios das muletas, quando estas são comparadas a cadeiras de rodas, as quais não fornecem mobilidade a seus usuários. Benefícios estes que incluem: melhora do crescimento do osso, circulação do sangue, evita a infecção de bexiga, criação e pressão sobre feridas e previne contraturas (LeBlanc et al, 1993).

2.1.1 Tipos de Muletas

Atualmente, existem dois tipos de muletas as quais são mais utilizadas, estas são: muletas axilares e muletas canadenses, como mostrado na figura 1. Porém, existem vários outros tipos de muletas as quais foram desenvolvidas, algumas ainda utilizadas e outras não, e muitas outras as quais vem sendo adaptadas. Cada uma destas apresentam as suas particularidades.

Segundo Shortell et al. (2001), as muletas axilares são mais utilizadas por usuários que dependem destas em um curto período e as muletas de cotovelo são utilizadas a longo prazo. As muletas axilares são caracterizadas por apresentarem o apoio do corpo distribuído em uma almofada abaixo das axilas, e um suporte com

altura ajustável para se fixar as mãos, gerando então um determinado equilíbrio e controle do movimento. Já as muletas canadenses são uma união de design, entre as muletas axilar e de cotovelos, estas apresentam o seu suporte até próximo aos cotovelos e um suporte como nas axilares utilizado para se fixar as mãos (Segura et al., 2004).

Figura 1 - Muleta axilar e muleta canadense.



Fonte: Ortopinhais (2017).

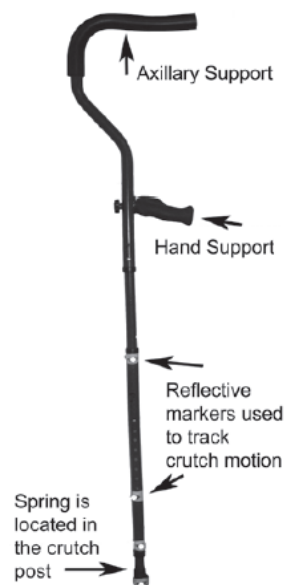
Já as muletas as quais caíram em desuso ou nem vieram a ser produzidas, podemos citar dois grandes autores LeBlanc e Andrews. LeBlanc et al. (1993) desenvolveu quatro protótipos de muletas axilares e as comparou, estas eram: muleta suspensa, muleta de balanço, muleta com mola e muleta com pé protético. Os estudos mostraram que estas apresentavam mais desvantagens do que a muleta axilar convencional, além de exigir um certo tipo de treino para a utilização das mesmas. Já Andrews et al. (1994), desenvolveu uma muleta com cintos (harness crutch), esta mostrou diminuir drasticamente as forças atuantes nos membros superiores e também a diminuição do consumo de oxigênio. Porém, não se encontrou nenhum registro de continuidade do estudo.

Com relação a adaptação de muletas convencionais, pode-se destacar a evolução das pesquisas relacionadas em muletas que apresentam a utilização de mola em seu corpo. Segura et al. (2007) realizou uma comparação entre muletas axilares convencionais e muletas axilares com mola acoplada em sua estrutura. Se concluiu com este estudo que, as muletas com mola em sua estrutura oferecem maior

conforto ao usuário, porém, foi constatado que necessita de um maior aprofundamento em estudos posteriores para provar a sua eficiência.

Ainda seguindo na mesma categoria de muletas com o auxílio de molas, um novo modelo de muleta axilar foi criado, apresentando um design diferenciado e uma mola acoplada em seu pé, mostrada na figura 2. Seeley et al. (2011), realizou uma comparação cinemática entre uma muleta com mola em seu pé e uma muleta convencional, concluiu-se com o estudo que uma certa energia potencial elástica é criada devido a compressão da mola, esta se converte em energia cinética e retorna a muleta, o que facilita a locomoção do usuário. Porém, o retorno de energia para a muleta é mínimo, não apresentando uma grande diferença de uma muleta convencional, assim, considera-se que a muleta com a mola não apresenta vantagem diante uma muleta convencional.

Figura 2 - Muleta com mola em sua base.

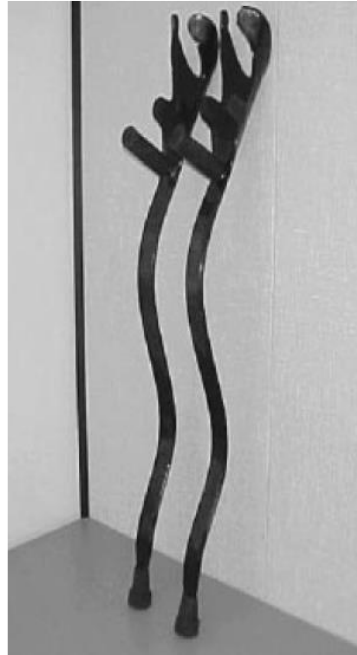


Fonte: Seeley et al. (2011).

Saindo da zona de muletas convencionais e com materiais tradicionais, foi desenvolvida uma muleta a base de compósito tendo como base o grafite, esta também simulava em sua estrutura uma mola. Shortell et al. (2001), desenvolveu este protótipo baseando em nove critérios: suportar o peso do usuário, empregar a absorção do choque e providenciar o retorno da energia, ser durável, leve, apresentar uma mobilidade máxima, facilidade de alcance, conforto, silêncio e melhor autoestima do usuário. Com o auxílio da ferramenta de Elementos Finitos, foi definido um novo design e na sua estrutura foram criadas duas curvas em formato de S, as quais

simulavam uma mola, ilustrado na figura 3 a seguir. Após vários testes, se concluiu que o design precisava ser melhorado e futuros estudos eram necessários, visando: melhorar a geometria do modelo, testar novas posições para o suporte do pulso e realizar um teste de consumo de energia.

Figura 3 - Muleta a base de compósito.



Fonte: Shortell et al. (2001).

2.1.2 Problemas relacionados ao uso de muletas

Como o uso das muletas apresentam seus benefícios, estas também apresentam as suas desvantagens. E entre estas, está incluso principalmente o grande consumo de energia para se locomover utilizando as muletas, relacionando diretamente com o consumo de oxigênio e batimento cardíaco, como também, estão inclusas muitas lesões relacionadas ao uso de muletas, seja das muletas tipo axilares, de cotovelo ou canadense.

De acordo com MacGivillivray et at. (2016), o uso de muletas requer muito mais energia para se caminhar quando comparada a caminhada normal, levando a constantes fadigas. Têm se registro que, um usuário dependente de muletas necessita 78% mais energia do que uma pessoa que não necessita (McBeath et al., 1974). Já para Fisher et al. (1981), para o uso de muletas necessita duas vezes mais energia para se caminhar do que uma caminhada normal. Estudos como estes são realizados

através das medições dos batimentos cardíacos e o consumo de oxigênio, assim, gerando os resultados da quantia de energia gasta.

Problemas muito comuns ligados ao uso das muletas são as lesões nos membros superiores. Segundo McQuade et al. (2011), quando o uso da muleta é incorreto, 34% do peso do corpo é depositado sobre as axilas, esta sobrecarga causa uma pressão indevida nas estruturas neurovasculares da região axilar. Sendo assim, este uso incorreto pode acarretar graves problemas com o tempo, como exemplo, um aneurisma ou uma trombose arterial axilar. Outro problema identificado, o qual é constantemente relacionado ao uso incorreto das muletas, é a paralisia parcial ou total dos nervos das axilas. Isto se dá devido ao uso prolongado da muleta, a almofada a qual as axilas são acomodadas acabam danificando os nervos locais, assim causando a paralisia (Subramony, 1989). São encontrados também, problemas relacionados aos ombros e pulsos, devido ao excesso de força necessário para a locomoção com muletas (Segura et al., 2004).

2.1.3 Forças atuantes

Como já foi citado, as muletas apresentam como principal função o alívio do peso do corpo sobre os membros inferiores, sejam estes operados, machucados ou paralisados, facilitando a locomoção do seu usuário. Como também, já se foi apresentado os problemas os quais podem ser causados pelo uso das muletas, sejam estes devido ao uso incorreto ou pelo uso excessivo, e tudo isto se deve as forças atuantes do peso do corpo em reação com as muletas. Segundo Stallard et al (1978) as forças de reações verticais do solo aumentam 24,5% para o apoio em um pé e 35,1% para o apoio em ambos os pés, quando comparado com a caminhada normal.

Um estudo realizado por Slavens et al (2009) com crianças que possuem Mielomeningocele, as quais utilizam muletas canadenses para se locomover, utilizou o método de Elementos Finitos para se identificar as forças atuantes na muleta. Se utilizou forças para simular uma caminhada normal igual a 50,9 N em ambos os lados e durante o balanço nas muletas, se simulou 89,3 N (no lado direito) e 91,4 N (no lado esquerdo), está simulação foi utilizando liga de alumínio como material da muleta. As crianças apresentavam a altura de 1,3 m (1,0 m – 1,7 m) e pesos de 42,6 kg (17,2 – 83,9 kg) respectivamente. Nenhum dos resultados foi superior a tensão de ruptura da liga de alumínio (214 MPa), porém, foram encontradas elevadas tensões de Von Mises, sendo 21,2 MPa para a caminhada normal para ambos os lados, e durante o

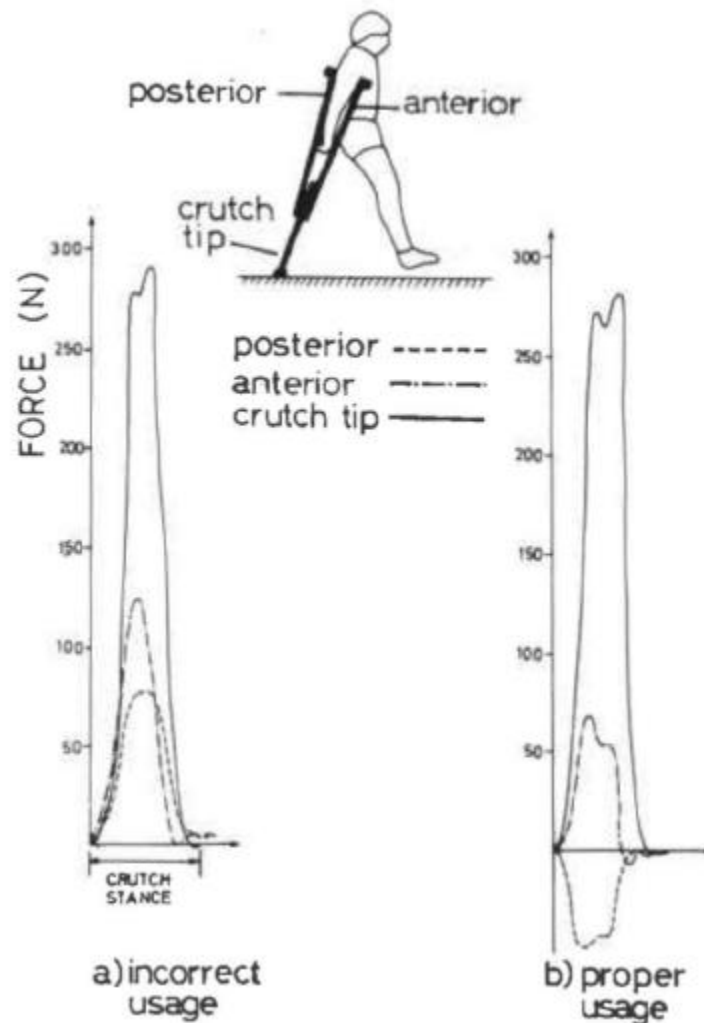
balanço com a muleta, foi encontrado 37,7 MPa para o lado esquerdo e 37,2 MPa para o lado direito. Este elevado valor se dá devido à grande força aplicada nos membros superiores, o que equivale a 53% do peso do corpo durante a caminhada com a muleta.

Outro estudo realizado por Sherif et al (2016) analisou em diferentes muletas as pressões exercidas sobre os membros superiores, além de analisar os movimentos durante a movimentação com a muleta. Durante o estudo foi constatado que as pressões nas mãos podem atingir aproximadamente 120 kPa e a força máxima pode ser maior que 100 N. Este estudo mostra como grandes forças podem ser aplicadas aos membros, assim, com o uso prolongado, estes podem vir a apresentar graves problemas, seja por má circulação ou problemas nos ligamentos.

Um dos estudos sobre força mais importantes foi desenvolvido por Goh et al (1986), o qual analisou um estudo biomecânico sobre a caminhada utilizando uma perna com o auxílio de muletas axilares. No estudo foram publicadas a maioria das forças relacionadas com o peso do corpo envolvida no uso das muletas axilares, e foi constatado que as componentes de reações das forças verticais do solo no movimento com os pés apoiados no chão, representam uma força de 21,6% maior do que em uma caminhada normal. Como também que, a força transmitida para o braço é de 44,4% do peso do corpo, causando sérios problemas a pessoas com fraquezas nos membros superiores.

Para finalizar, Goh et al (1986) ainda realizou um estudo comparando o uso correto e incorreto de muletas axilares, mostrado na figura 4 a seguir. O resultado apresentado foi que, as forças uniaxiais não se diferenciam muito, seja utilizando a muleta de maneira correta ou incorreta, estas podem alcançar aproximadamente 280 N, como apresentado na figura. Porém, o uso incorreto das muletas axilares causa uma força compressiva de 34% do peso do corpo nas axilas, o que pode gerar graves danos para estas, como citado no tópico acima.

Figura 4 - Forças uniaxiais em uma muleta axilar.



Fonte: Goh et al. (1986).

2.2 MATERIAS UTILIZADOS NAS MULETAS

Como apresentado por LeBlanc et al (1993), as muletas não apresentaram uma mudança significativa durante os 5000 anos de existência. Sabe-se que os primeiros registros do uso das muletas foram com galhos caídos das árvores (Shortell et al., 2001). E foi assim que surgiu o primeiro material a serem empregados como muletas, a madeira. Desde então, estas ainda são utilizadas como material para muletas, apresentando apenas mudanças em seu design. Com a evolução dos materiais e da engenharia, novos materiais começaram a serem empregados, como o alumínio, o qual apresenta uma vasta utilização para materiais ortopédicos em geral. E atualmente, já existem novos indícios de outros materiais sendo utilizados e pesquisados para serem utilizados na estrutura das muletas, como compósitos.

Os materiais aplicados nas muletas devem ser leves e resistentes, e estes passam por testes para aprovar a sua efetividade. Segundo a regulamentação A-A-30071D de janeiro de 1993, da General Services Administration (USA), deve aplicar, por meio de um dispositivo adequado, um esforço concentrado de 300 lbs (1334N) no apoio superior (apoio axilar) da muleta, e da mesma forma, aplicar um esforço concentrado de 150 lbs (667,5 N) no apoio inferior (apoio da mão).

2.2.1 Madeira

A madeira é o material mais antigo aplicado na construção das muletas, esta vem sendo aplicada desde os primórdios até atualmente, com algumas modificações com relações em propriedades das madeiras. Já, sobre o design das muletas as quais este material é aplicado, se encontram mais aplicações em muletas axilares, como mostra a figura 5.

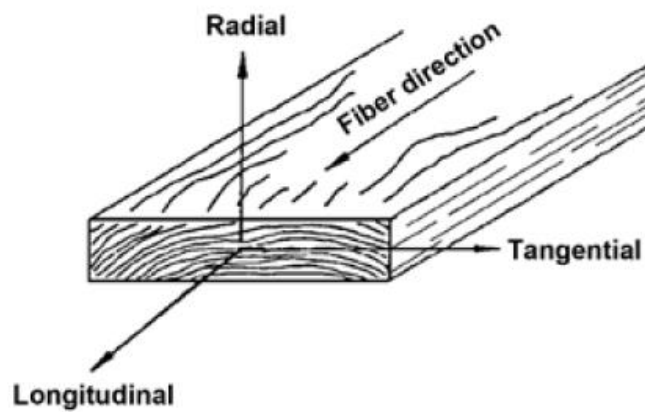
Figura 5 - Muleta de Madeira.



Fonte: Ortopinhais (2017)

Segundo Kretschmann (2010) a madeira é um material natural, logo, as suas propriedades variam constantemente dependendo de muitas variáveis, como: umidade, condição do solo e espaço de crescimento. Sendo assim, a madeira é considerada como um material ortotrópico, ou seja, apresentam a mesma propriedade mecânica nos três eixos perpendiculares: longitudinal, radial e tangencial, como ilustrado na figura 6.

Figura 6 - Os três eixos principais da madeira, relacionando com a direção do seu grão.



Fonte: Kretschmann (2010).

2.2.2 Alumínio

Atualmente, se tem indícios que os alumínios são os elementos que mais são aplicados na constituição estrutural das muletas, como também, sabe-se que esta aplicação se iniciou a anos (Pradhan, 1990). Isto se deve as boas combinações de propriedades apresentadas pelo alumínio, as quais satisfazem e o qualificam como um bom elemento para ser aplicado estruturalmente nas muletas. Segundo Kaufman (2000) a vasta aplicação do alumínio se dá devido a excelente combinação de propriedades, como: baixo peso, boa resistência mecânica e custo razoável.

Figura 7 - Muleta de alumínio.



Fonte: Ortopinhais (2017).

As mais vastas patentes utilizam ligas de alumínio fundidas ou forjadas para a aplicação em muletas, como ilustrado uma muleta de alumínio na figura 7 acima. As ligas de alumínio contêm de 90 a 96% de alumínio em sua estrutura, e apresentam um ou mais elementos adicionado em sua estrutura para atingir determinadas propriedades e características. Ainda, se é possível adicionar pequenas quantidades de outros elementos para satisfazerem outros requisitos e alcançar outras propriedades. Além das propriedades já apresentadas, os alumínio são resistentes a corrosão, possuem uma boa capacidade de absorção do choque, são fáceis de unir e de moldar, além de serem recicláveis (Kaufman, 2000).

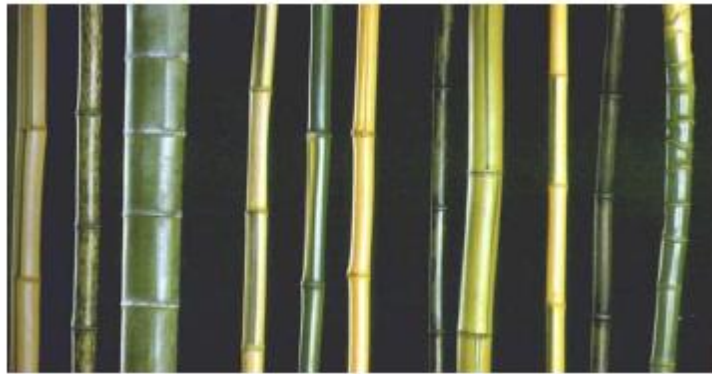
No estudo realizado por Slavens et al. (2009), foi realizada uma simulação de uma muleta através do método de Elementos Finitos, simulando então uma liga de alumínio. Neste estudo, também será utilizado as mesmas propriedades para simular a muleta de alumínio, adotando: $E = 69 \text{ GPa}$ (Modulo de Young), $\nu = 0,33$ (Coeficiente de Poison).

2.3 BAMBU

O bambu se caracteriza como uma espécie de grama, não como uma espécie de árvore, pertencendo a família Bambusoideae. Este cresce abundantemente nos países tropicais, como Ásia, África e América Latina, e existem entre 1100 a 1500 espécies registradas, variando em tamanho e forma (Lugt et al., 2006), alguns deles são mostrados na figura 8. Devido ao fato de que a estrutura do bambu se consiste em fibras celulósicas incorporada em uma matriz de lignina, este é considerado como um compósito natural (Lakkad et al., 1980).

Devido ao fato da crescente busca por materiais renováveis, a utilização de bambus vem aumentando. Isto, não se dá apenas porque este é um material renovável e de rápido crescimento, mas também devido as suas significativas propriedades. Logo, muitas pesquisas e aplicações vem sendo realizadas, e isto, será citado nos próximos tópicos.

Figura 8 - Diferentes espécies de bambu.



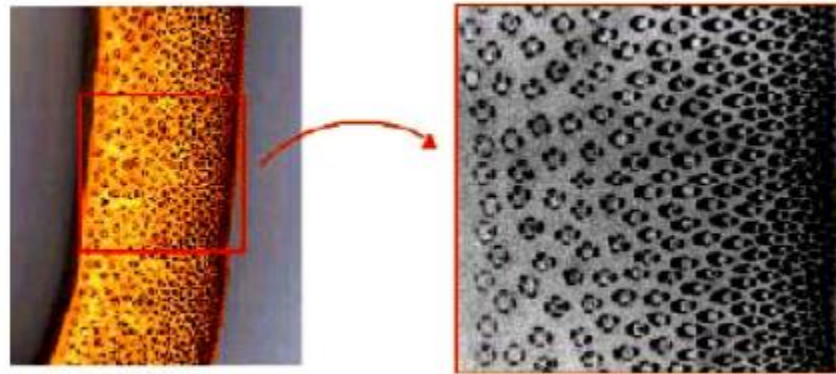
Fonte: Lugt et al. (2006).

2.3.1 Características dos Bambus

Pouco se sabe sobre as propriedades mecânicas dos bambus, alguns estudos vêm sendo desenvolvidos para um melhor aprofundamento. Porém, devido ao grande número de espécies é muito difícil de se listar todas. Os atuais estudos os quais se tem desenvolvido, se tem ligação principalmente para a utilização do bambu como um material híbrido, ou seja, a utilização do bambu junto a outros materiais, e para isto se torna útil se estudar as propriedades dos bambus isoladamente.

Como citado acima, os bambus são compósitos naturais cuja suas fibras celulósicas são incorporadas em uma matriz de lignina. Segundo Jain et al. (1992) a lignina é o sistema de armazenamento de energia do bambu e esta responde as forças mecânicas. Uma outra característica do bambu está em sua estrutura, a qual é conhecida como colmo (corpo). O colmo do bambu, geralmente, são cascas cilíndricas divididas em diafragmas transversais em seus nós (segmentos). Estes, são ortotrópicos com uma elevada resistência na direção paralela as fibras e apresentam baixas resistências quando são perpendiculares as fibras (Ghavami, 2005), a figura 9 ilustra uma imagem microscópica das fibras do bambu.

Figura 9 - Distribuição das fibras no bambu em um corte transversal.



Fonte: Ghavami (2005).

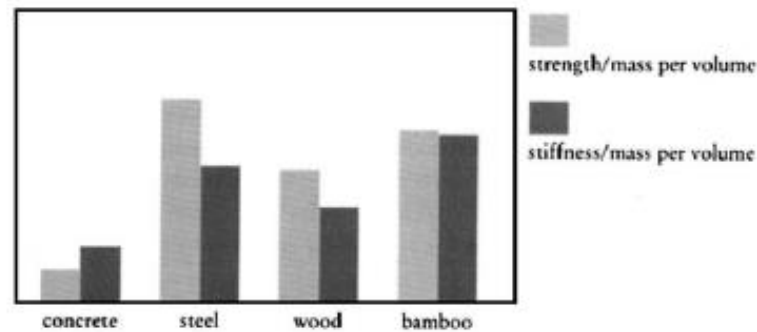
Além das características já citadas, Amada et al. (2001) realizou um estudo sobre as propriedades de fratura do bambu, a qual obteve como maior constatação que a resistência a fratura do bambu é maior do que a das ligas de alumínio e bem maiores do que as da madeira. E, para concluir, Lugt et al. (2006) lista como principais propriedades do bambu as suas favoráveis propriedades mecânicas, elevada flexibilidade, rápida taxa de crescimento, baixo peso e baixo preço de compra.

2.3.2 Aplicações

Como já foi citado acima, devido a grande preocupação com a devastação do meio ambiente e da camada de ozônio, a utilização de materiais sustentáveis vem em constante crescimento. E entre eles, se encontra o bambu, como um compósito natural, cujo vem sendo utilizado em inúmeras aplicações.

Seguindo o fluxo das atuais pesquisas, a maior aplicação do bambu se encontra nas áreas de construção civil, como mostra a figura 10 a seguir. Este, vem sendo utilizado crescentemente como reforço para concreto, isto se dá devido as suas boas propriedades mecânicas (Ghavami, 2005). Como também, é possível encontrar o bambu laminado na utilização de construção de pontes, uma aplicação a qual se permitiu devido a sua combinação de baixa densidade aliada à sua boa rigidez (Xiao et al., 2010).

Figura 10 - Comparação dos materiais de construção civil considerando a sua resistência, rigidez e densidade.



Fonte: Lugt et al. (2006).

Finalizando, o bambu apresenta tanto benefícios como uma planta e como um material. Trazendo vantagens para a ecologia (estabilizar o solo, mínimo uso da terra, etc.) e agroflorestais. Já, o uso do bambu como material na indústria se toma um grande ramo, abrangendo indústrias locais (móveis, artesanato e casas), indústrias de madeiras e papel, geração de energia e indústrias químicas e de nutrição (Gielis, 2002).

2.4 SELEÇÃO DOS MATERIAIS

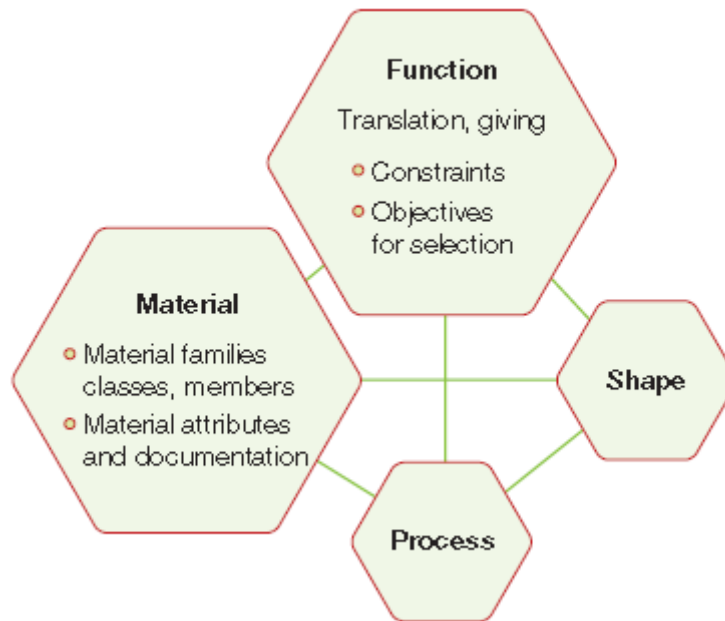
A seleção do material para um determinado produto é uma das etapas mais importantes do projeto. Esta seleção poderá fornecer vários materiais que podem ser aplicados a um determinado produto, sendo que estes irão obedecer a funcionalidade do produto. Ou, até mesmo, a seleção dos materiais pode excluir um material devido este não cumprir os requisitos do produto. A seleção do material se baseia através da função que o produto deve exercer, sendo assim, classificando os materiais através das suas propriedades, custo e até mesmo se ele é ambientalmente aconselhável.

Um novo produto ou a evolução de um já existente, foi sugerida ou tornada possível por um novo material. Já, para se tomar a decisão do material a ser utilizado, deve ser levado em consideração a escolha do processo o qual o material será feito, unido e finalizado. O custo também entra no equacionamento, seja na escolha do material ou do processo (Ashby, 1992).

Segundo Ashby (1992) a tarefa da seleção dos materiais, resumida é:

1. Identificar as propriedades desejadas para o produto, e depois;
2. Comparar estas com os reais materiais de engenharia para obter a melhor combinação.

Figura 11 - A seleção dos materiais é determinada por função. As vezes a forma também influencia na seleção.



Fonte: Ashby (1992).

A figura acima explica como se dá e o que influencia em uma seleção do material para um projeto. Em outras palavras, o primeiro passo para a seleção dos materiais é selecionar os requisitos iniciais que o material deve cumprir, ou seja, seus requisitos de funcionalidade. Assim, aqueles materiais que não cumprirem os pré-requisitos são excluídos da próxima etapa da seleção. E os que melhores cumprirem os pré-requisitos são listados em um ranking, e assim, geralmente, se selecionam os cinco melhores materiais com relação a performance que se aplicam para determinada função (Ashby, 1992).

Para finalizar, Ashby (1992) também cita que todos os produtos são adaptativos ou podem ser desenvolvidos novamente. O ponto inicial é um produto existente ou uma gama de produtos. O motivo para projetar novamente pode ser para aumentar a performance, reduzir o custo ou adaptar para as condições de mudança do mercado. Projetos adaptáveis tomam um conceito já criado e buscam incrementar um avanço na performance através de um aperfeiçoamento do princípio de trabalho. E assim subentendesse que, com a aplicação de novos materiais em um produto pode se buscar novas características, modificando a performance do produto e até mesmo no custo, por meio que o material afetará diretamente o mesmo, seja esse aumentando

ou diminuindo. Como também, atualmente, muitas adaptações em produtos e a substituição dos materiais vem sendo realizada para diminuir a depreciação ao meio-ambiente, visando então utilizar materiais sustentáveis, ou seja, que não agridem ao ambiente e podem ser reciclados.

3 METODOLOGIA

3.1 JUSTIFICATIVA DA ESCOLHA DO MATERIAL

Como apresentado anteriormente, o objetivo deste trabalho é produzir uma muleta de baixo custo, com a intenção de beneficiar e tornar acessível este material também a população de baixa renda. Para isto, o primeiro passo, seria a seleção de um material que se apresenta os requisitos básicos para serem aplicados na construção da mesma.

Como foi mostrado na figura 8, os passos seguidos por Ashby, são: listar a função do material, limitar os seus requisitos e objetivos, ranquear os materiais que se enquadram neste, depois opcionalmente, limitar a sua forma e o processo de fabricação. Sendo assim, os requisitos e objetivos da seleção serão descritos no quadro 1, a seguir.

Quadro 1 - Metodologia para a seleção do material.

Função: Muleta	
Restrições:	Tamanho especificado (restrição geométrica)
	Deve suportar uma carga axial F (280 N) sem se romper (restrição funcional)
Objetivos:	Reduzir custo
	Reduzir massa
Variáveis Livres:	Escolha do material
	Área da seção (espessura)
	Processo de fabricação

Fonte: Autoria Própria (2017)

Para utilizarmos as cartas de Ashby para a seleção, primeiro, precisamos definir as equações que regem a seleção do material. Tomando como base a muleta de alumínio tubular com dimensões definidas, restrições e variáveis citadas acima, iremos então equacionar a melhor forma de conseguir atingir os objetivos citados.

Para conseguirmos reduzir a massa de um material tubular, podemos buscar diminuir a área do mesmo, porém esta área deve ser capaz de suportar a força que será aplicada a estrutura, logo, temos:

$$m = A \cdot L \cdot \rho \quad (1)$$

$$\frac{F}{A} \leq \sigma_f \quad (2)$$

Onde, σ_f é a tensão de ruptura do material.

Utilizando as duas equações, temos que:

$$m \geq (F) \cdot (L) \cdot \left(\frac{\rho}{\sigma_f}\right) \quad (3)$$

Assim, na equação (3), adicionamos agora as duas restrições, a funcional e a geométrica do material. Sendo assim, pode-se concluir que, a muleta mais leve que irá suportar a força axial F seguramente, será a que oferecer o menor valor de $\frac{\rho}{\sigma_f}$, fração a qual representa a propriedade do material.

Agora, para selecionarmos o material através das cartas de Ashby, devemos levar em consideração os dois índices a seguir.

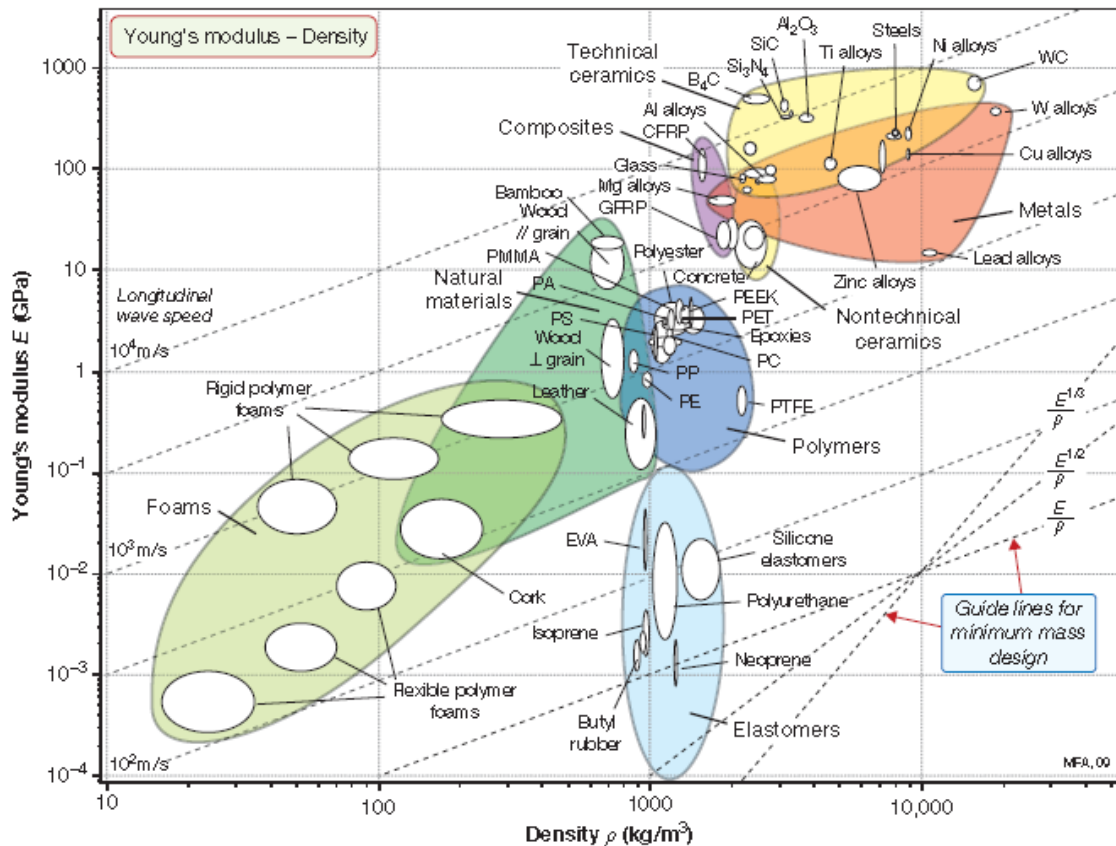
$$M_1 = \frac{\sigma_f}{\rho} \quad (4)$$

$$M_2 = \frac{E}{\rho} \quad (5)$$

Por meio que, M_1 está relacionado a massa, quanto maior o valor que este índice assumir, mais leve será o material. E, M_2 está ligado a força F submetida ao material, quanto maior o valor, maior será a resistência a falha do material submetido a mesma força F.

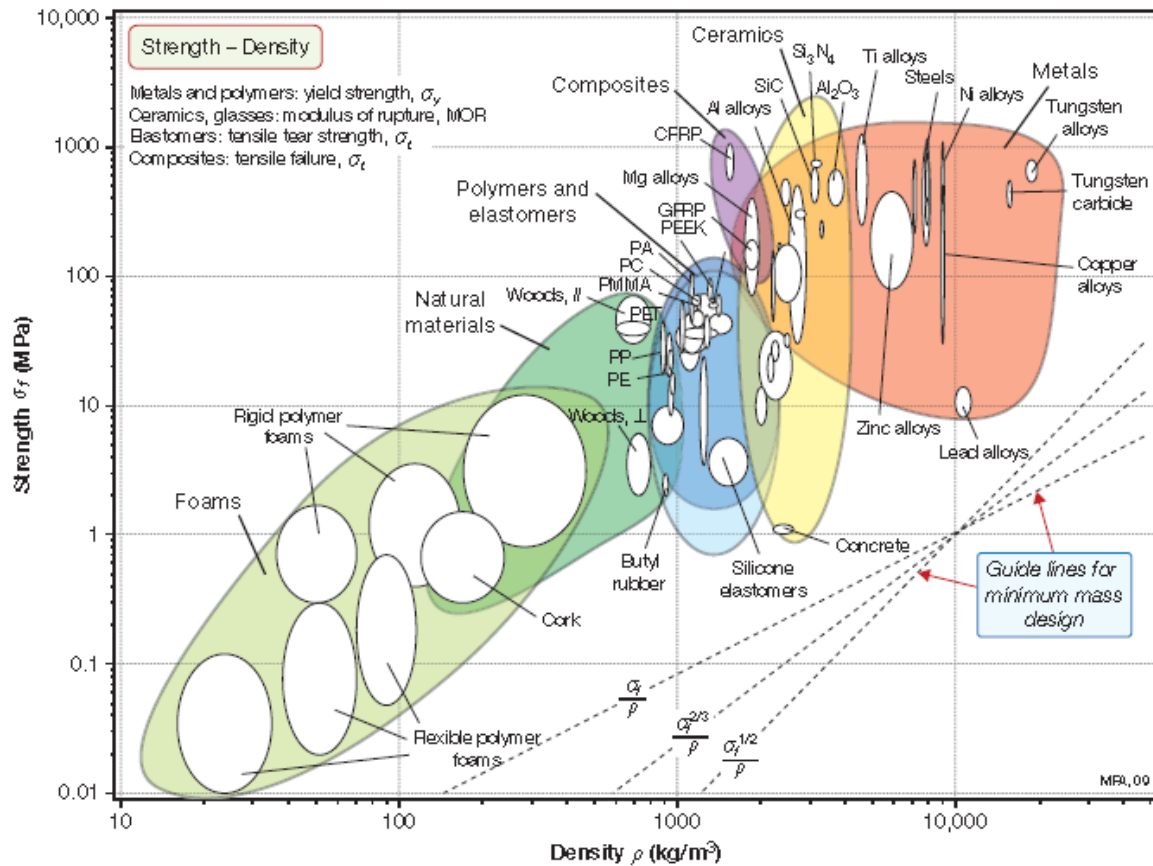
Após esta análise, o método das cartas de Ashby torna-se possível de ser utilizado. Para se utilizar este, temos que selecionar a inclinação de linha que melhor condiz com os índices determinados nas equações 4 e 5. Para a equação 5, utilizaremos a figura 9 e para a equação 4, utilizaremos a figura 10 para a comparação dos materiais, bambu e alumínio.

Figura 12 - Módulo de Young (E) x Densidade (ρ).



Fonte: Ashby (1992).

Através da figura 12, nota-se que o bambu é classificado como um material híbrido natural e apresenta as mesmas propriedades da madeira de grãos transversais. O mesmo, apresenta um módulo de Young superior a 25 GPa e uma densidade em torno de $900 \text{ (kg/m}^3\text{)}$. Já o alumínio, apresenta um módulo de Young em torno de 90 GPa e uma densidade superior a $2000 \text{ (kg/m}^3\text{)}$. Sendo assim, temos uma diferença muito grande em massa entre os materiais e uma diferença considerável entre as resistências, levando em consideração que são propriedades plotadas em conjunto.

Figura 13 - Resistência (MPa) x Densidade (ρ).

Fonte: Ashby (1992).

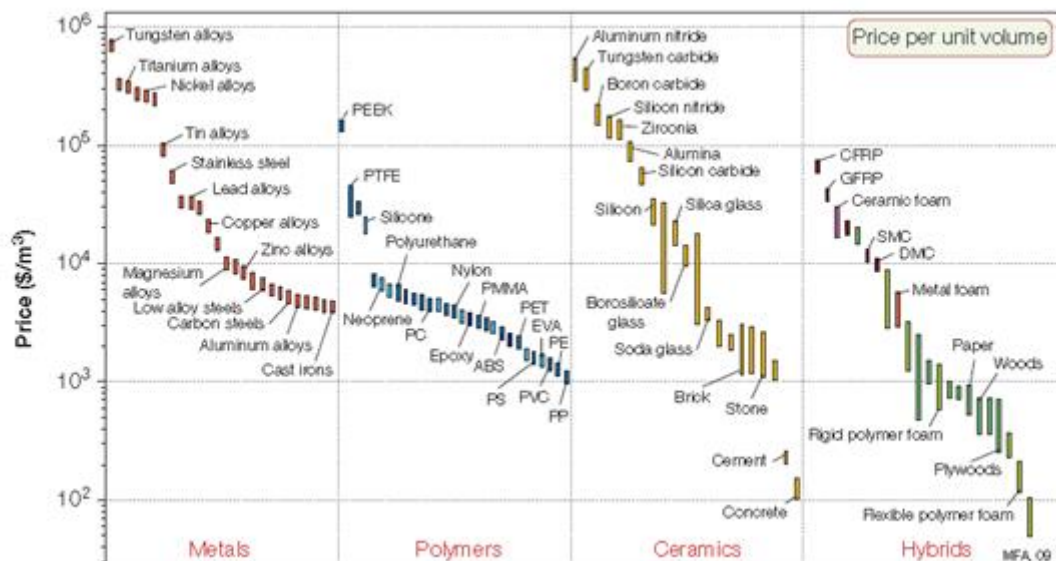
Nesta figura 13, podemos notar que não temos o bambu destacado na mesma, porém como citado acima, o mesmo apresenta propriedades próximas ou iguais a madeira de grãos transversais. Logo, iremos utilizar as propriedades da mesma para descrever a do bambu neste caso.

Nesta carta de Ashby, notamos que a resistência da madeira de grãos transversais quando plotada em conjunto com a densidade, apresenta valores próximos entre 50 e 90 MPa e o alumínio apresenta uma variação entre 50 e 150 MPa.

Após estas análises, é possível concluir que o bambu apresenta propriedades mecânicas que possa satisfazer o objetivo da aplicação da força axial de 280 N. O mesmo, apresenta propriedades próximas a do alumínio, sempre apresentando uma densidade inferior quando analisada em conjunto com outras propriedades. Além do mais, o bambu apresenta propriedades iguais ou muito próximas das madeiras de grãos transversais, a qual apresenta propriedades superiores a outros tipos de madeira. E como citado neste trabalho, a madeira é um material que também é aplicada na fabricação de muletas.

Já para os custos dos materiais, podemos analisar na figura 14 a seguir que os materiais híbridos possuem preços inferiores aos metais em sua grande maioria. E mais uma vez, aproximando o bambu das madeiras, temos que o custo desse material pode ser até dez vezes menor do que ligas de alumínio, quando considerado preço por unidade de volume. Sendo assim, o bambu atende também o objetivo de reduzir o custo do material.

Figura 14 - Preço por unidade de volume dos materiais.



Fonte: Ashby (1992).

3.2 COMPONENTES DA MULETA

As muletas convencionais são produtos simples, sendo suas estruturas principais geralmente de geometrias circulares ou tubulares, já suas estruturas auxiliares, são de geometrias diversas. Estas, são compostas basicamente por cinco elementos, sendo: duas barras principais laterais, a base central, uma proteção para a base, um suporte central para a mão e um suporte para a axila. As muletas também apresentam regulagem de altura, sendo estas podendo ser em sua base e nas axilas.

A muleta a ser simulada será modelada, montada e posteriormente simulada no software Inventor ® 2017. O modelo utilizado para o desenho, como suas dimensões, será baseado na muleta convencional de alumínio, modelo no qual também facilitara a construção em bambu, devido a sua geometria basicamente tubular. Para a simulação, todos os componentes citados acima serão fixados por pinos passantes, deixando assim uma estrutura sólida.

A barra principal lateral da muleta, ilustrada na figura 15, tem um comprimento de 1,2 m, sua seção circular apresenta um diâmetro interno de 30 mm e externo de 40 mm, sendo então, um tubo de espessura de 10 mm. O diâmetro adotado é a única dimensão diferente da muleta convencional de alumínio, onde o mesmo sofre um acréscimo de 10 mm. Isto se deve ao fato, que o bambu utilizado apresenta um diâmetro mínimo superior ao do modelo convencional da muleta de alumínio, o qual será citado posteriormente.

Figura 15 - Barra principal lateral.

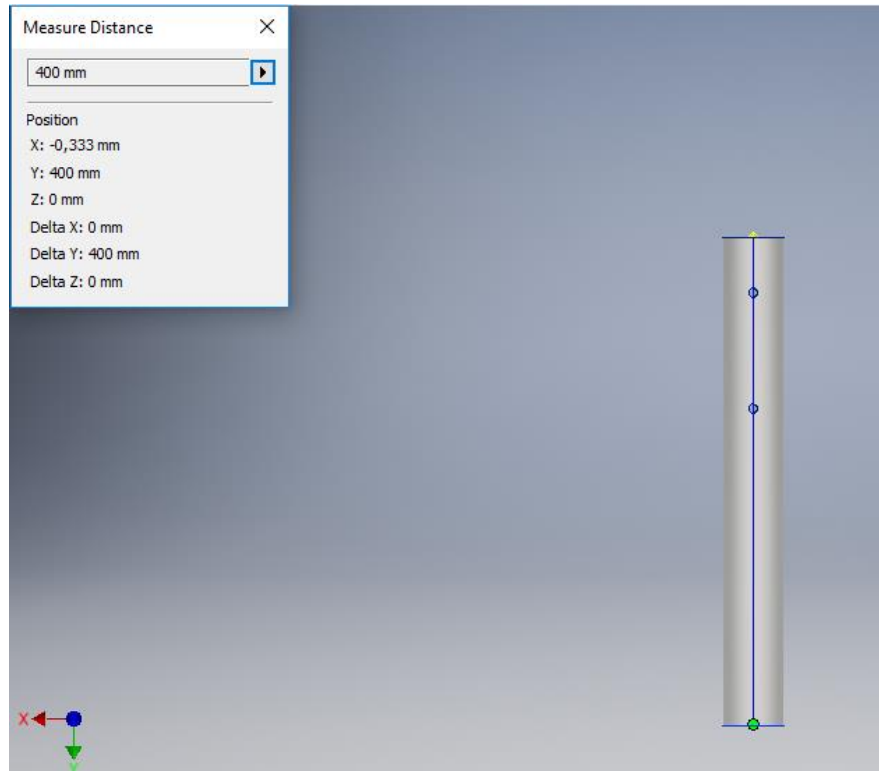


Fonte: Autoria Própria através do Inventor® (2017).

A base central também apresenta uma geometria circular, tendo um comprimento de 400 mm, seção interna de 40 mm e seção externa de 50 mm. E, a distância do seu último furo de fixação até sua base é de 250 mm, como mostrado na figura 16. Esta base será utilizada em três simulações diferentes, com os seguintes materiais: alumínio na muleta de alumínio, alumínio na muleta de bambu e bambu na muleta de bambu. Apresentando como objetivo nestas diferenças, testar e comparar as forças cisalhantes que estão presentes nos pinos passantes na base

de bambu e na base de alumínio, assim buscando a melhor combinação final para a muleta de bambu.

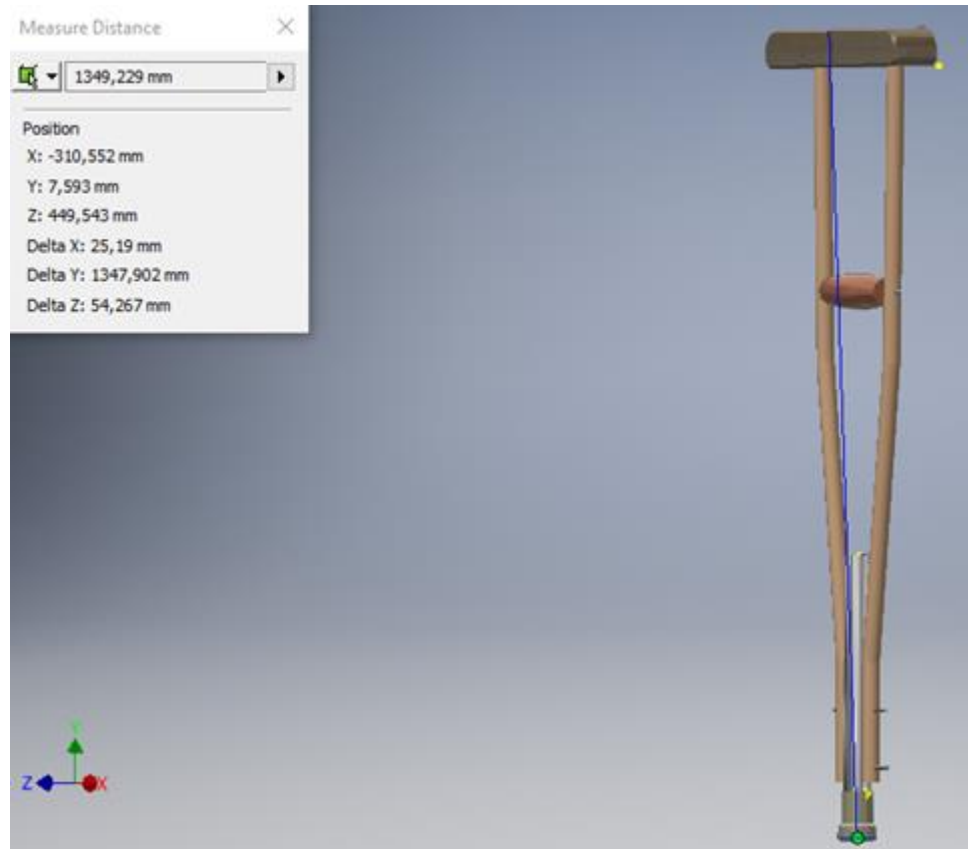
Figura 16 - Base central.



Fonte: Autoria Própria através do Inventor® (2017).

Os outros componentes da muleta serão considerados como auxiliares, os quais não irão influenciar durante a simulação estrutural da mesma. Sendo assim, figuras dos mesmos serão apenas identificadas no modelo completo a ser simulado. Este modelo final da muleta apresenta um comprimento de 1.350 mm, considerando desde a sua proteção da base até o topo do suporte para a axila, como mostra a figura 17 a baixo.

Figura 17 - Modelo completo.



Fonte: Autoria Própria através do Inventor® (2017).

3.3 PROPRIEDADES A SEREM SIMULADAS

Como citado anteriormente, realizaremos a comparação através das simulações das muletas com base predominante de bambu e de alumínio. Para estas simulações, seguiremos as propriedades que serão apresentadas a seguir, que serão as mesmas para todos os componentes compostos pelos materiais.

3.3.1 Alumínio

O alumínio a ser utilizado será o Al 6061, da série das ligas de alumínio 6000. As propriedades do mesmo serão tomadas seguindo o MatWeb, desde sua composição até suas propriedades para a simulação. A tabela a seguir, mostra os principais componentes desta liga de alumínio, sendo a liga classificada como $AlMg_1SiCu$.

Tabela 1 - Componentes da liga Al 6061.

Componentes	%
Alumínio, Al	95,8 – 98,6%
Cromo, Cr	0,04 – 0,35%
Cobre, Cu	0,15 – 0,40%
Ferro, Fe	<= 0,70%
Magnésio, Mg	0,8 – 1,2%
Manganês, Mn	<= 0,15%
Outros, cada	<= 0,05%
Outros, total	<= 0,15%
Silício, Si	0,40 – 0,80%
Titânio, Ti	<= 0,15%
Zinco, Zn	<= 0,25%

Fonte: MatWeb (2017).

Estes elementos, proporcionam para as ligas de alumínio algumas características particulares, como uma boa resistência mecânica a corrosão, boa conformabilidade e soldabilidade, além de uma boa relação de resistência por peso. Logo, isto torna o alumínio versátil em diversas aplicações, justificando então a sua vasta aplicação em diversas áreas e produtos.

Na simulação, será testado a resistência mecânica dos materiais em análise estática além da comparação do peso dos componentes em diferentes materiais, sendo assim serão necessárias três importantes propriedades, o módulo de elasticidade, o coeficiente de Poisson e a densidade. Para a liga de alumínio 6061 temos um módulo de elasticidade de 68,9 GPa e um coeficiente de Poisson de 0,33.

Já, a densidade do mesmo é de 2700 kg/m³ e para critério de conhecimento, a resistência a tração desta liga é de 276 MPa.

3.3.2 Bambu

O bambu o qual será utilizado para a simulação será da espécie *Guadua angustifolia*, uma espécie que é facilmente encontrada na América Latina. As propriedades do mesmo serão retiradas do artigo de Ghavami et al. (2005). Onde neste, foram realizados ensaios físicos e mecânicos do bambu da espécie *Guadua angustifolia*.

Ghavami et al. (2005), utilizou para os ensaios um bambu com diâmetro externo na base de 101,86 mm e no topo de 31,21 mm, apresentando um diâmetro médio de 79,56mm, e uma espessura de parede média de 10,31 mm. Através destes ensaios, foi observado que o bambu apresenta uma maior resistência à tração na parte central de seu colmo e resistências menores nas regiões com nós, devido a descontinuidade de suas fibras. E também, foi constatado que o coeficiente de Poisson, aumenta da base para o topo. Isto pode ser observado na tabela a seguir.

Tabela 3 - Resistência à tração, módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson das partes basal, centro e topo, com e sem nó, do bambu *Guadua angustifolia*.

Parte do bambu	Resistência à tração σ_t (MPa)	Módulo Elasticidade-E (GPa)	Coef. Poisson μ
Base sem nó	93,38	16,25	0,19
Base com nó	69,88	15,70	-
Centro sem nó	95,80	18,10	0,25
Centro com nó	82,62	11,10	-
Topo sem nó	115,84	18,36	0,33
Topo com nó	64,26	8,0	-
Valor médio	86,96	14,59	0,26
Variação	64,26 - 115,84	8,0 - 18,36	0,19 - 0,33

Fonte: Ghavami et al. (2005).

A partir do estudo realizado, considera-se que para a simulação, será utilizada todas as propriedades médias obtidas através do ensaio, tomando aleatoriamente a parte do colmo escolhida do bambu. Logo, teremos então um módulo de elasticidade de 14,59 GPa e um coeficiente de Poisson de 0,26. E ainda, apenas para critério de

conhecimento, temos uma resistência ao cisalhamento do bambu com um valor médio de 2,017 MPa e uma tensão de escoamento de 50,18 MPa.

Para finalizar, a densidade do bambu a ser considerada para a comparação de peso entre os componentes, será retirada de um estudo realizado por Azzini et al. (1977). Onde o mesmo constatou que, a variação da densidade básica dos colmos de bambus do gênero *Guadua*, variam de 0,661 g/cm³ a 0,429 g/cm³. E para o *Guadua angustifolia*, a densidade assume um valor de 0,429 g/cm³ na região dos nós e 0,451 g/cm³ na região dos internós.

Então para a simulação, será considerado a média dos valores de densidade do *Guadua angustifolia*, por meio que o componente irá englobar ambas as partes, devido ao seu comprimento. Logo, o valor da densidade a ser considerada será de 0,44 g/cm³, ou seja, de 440 kg/m³.

3.4 ANÁLISE DE TENSÕES, DESLOCAMENTO E FATOR DE SEGURANÇA ATRAVÉS DOS RESULTADOS DA SIMULAÇÃO

A simulação a ser realizada será uma análise estática dos componentes, como de tensões. Esta análise considera que o material exerça um comportamento linear e despreza as forças de inércia presentes no componente. Através desta análise, podemos encontrar o deslocamento do material, tensões e reações nas ligações exteriores, sempre quando submetidas a uma carga. Também, podemos determinar quando o material irá entrar em colapso, neste caso diferentes materiais entram em colapso em valores diferentes.

Ao aplicar uma força em uma análise estática, temos o aparecimento dos tensores tensões e das tensões principais. Neste caso, os tensores tensão, descrevem a distribuição de esforços internos num meio contínuo. Já as tensões principais, são formadas nos planos onde as tensões de cisalhamento são nulas, e nestes existem tensões normais atuando, as quais são chamadas de tensões principais, onde atuam nos planos principais. Nestes planos principais, as direções das superfícies normais são chamadas de eixos principais (Norton, 2004).

Determinando as tensões principais, podemos então determinar a tensão de equivalente de Von Mises, a qual depende da combinação das tensões normais e de cisalhamento no mesmo ponto. Norton (2010) define a tensão equivalente de Von Mises como, a tensão de tração uniaxial que criaria a mesma energia de distorção que é criada pela combinação atual das tensões aplicadas. Cada material apresenta

um determinado valor que, se ultrapassar o valor da tensão de Von Mises o mesmo irá falhar.

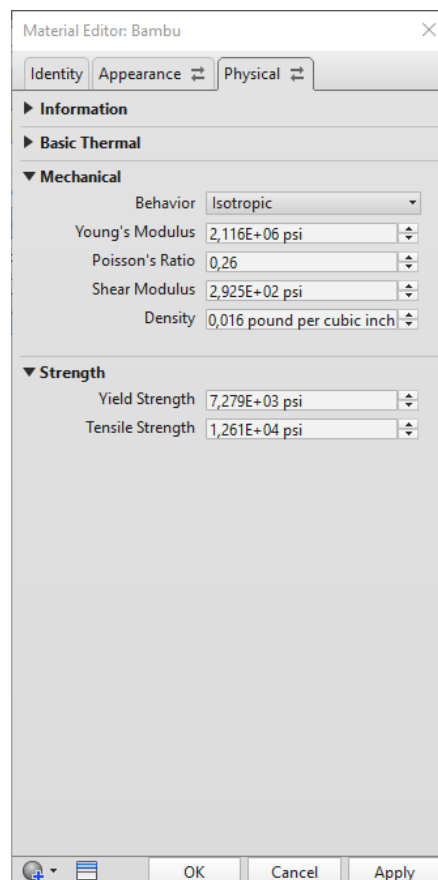
O fator de segurança, ou coeficiente de segurança, o qual será analisado para os componentes deste trabalho, apresenta uma grande importância em projetos de engenharia. O mesmo, avalia a probabilidade de existir uma falha em um determinado componente e ele é a razão entre duas quantidades que possuem a mesma unidade, ou seja, sendo sempre adimensional, estas unidades podem ser por exemplo, um esforço crítico dividido por um esforço aplicado (Norton, 2004).

4 SIMULAÇÃO

Para a simulação estática dos componentes, será utilizado o software AutoDesk Inventor ® 2017, como já foi citado anteriormente. Esta simulação e posterior comparação será realizada através dos Métodos de Elementos finitos, porém esta análise não será profunda e detalhada, logo, será utilizado as configurações padrões do programa para a simulação.

Para o início da simulação da análise de tensão, primeiramente é necessário definir o material dos componentes da muleta. Componentes como, borracha e alumínio estão disponíveis na biblioteca do software Inventor. Por outro lado, o material do bambu disponível na biblioteca do mesmo não apresenta as propriedades necessárias para a simulação. Sendo assim, foi gerado um novo material de bambu através do já existente, utilizando então todas as propriedades do bambu *Guadua angustifolia* citadas anteriormente, como mostra a figura 18 a seguir.

Figura 18 - Propriedades do novo material criado através do Software Inventor ® 2017.

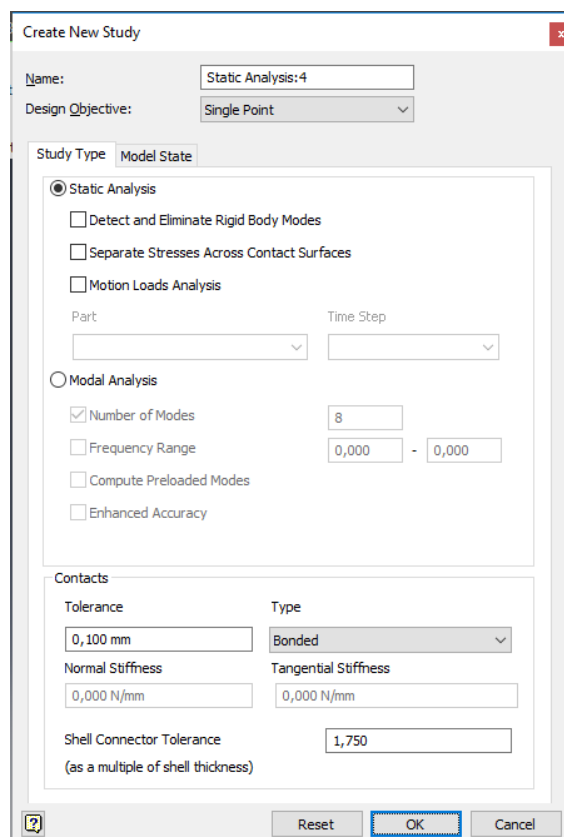


Fonte: Autoria Própria através do Inventor ® (2017).

Como mostra a figura a cima, as propriedades não estão classificadas no Sistema Internacional de unidades, estas estão através do sistema de classificação Inglês de unidades. Isto se dá devido ao fato, do programa estar instalado através do método de linguagem inglesa. Porém, as propriedades ali descritas são as mesmas que foram citadas acima, quando convertidas.

Após a definição do material dos componentes do modelo, deve-se informar ao software as restrições do modelo, neste caso, as restrições são apenas as juntas pinadas do componente. Após isto, é possível criar o estudo do modelo em forças estáticas através do Inventor ® e onde serão tomadas as propriedades básicas do software, as que são definidas na figura 19 abaixo. Após isto, deve-se definir qual componente será fixado e qual força ou pressão o componente será submetido. No caso da simulação dos modelos da muleta, será fixado apenas a base da mesma e será definido uma força axial de 280 N, aplicada no apoio das axilas, no topo do componente. Esta força foi citada anteriormente no estudo de Goh et. al (1986), como a força de pico que a pessoa ao caminhar com a muleta exerce sobre a estrutura.

Figura 19 - Propriedades iniciais do Inventor ® para a simulação.



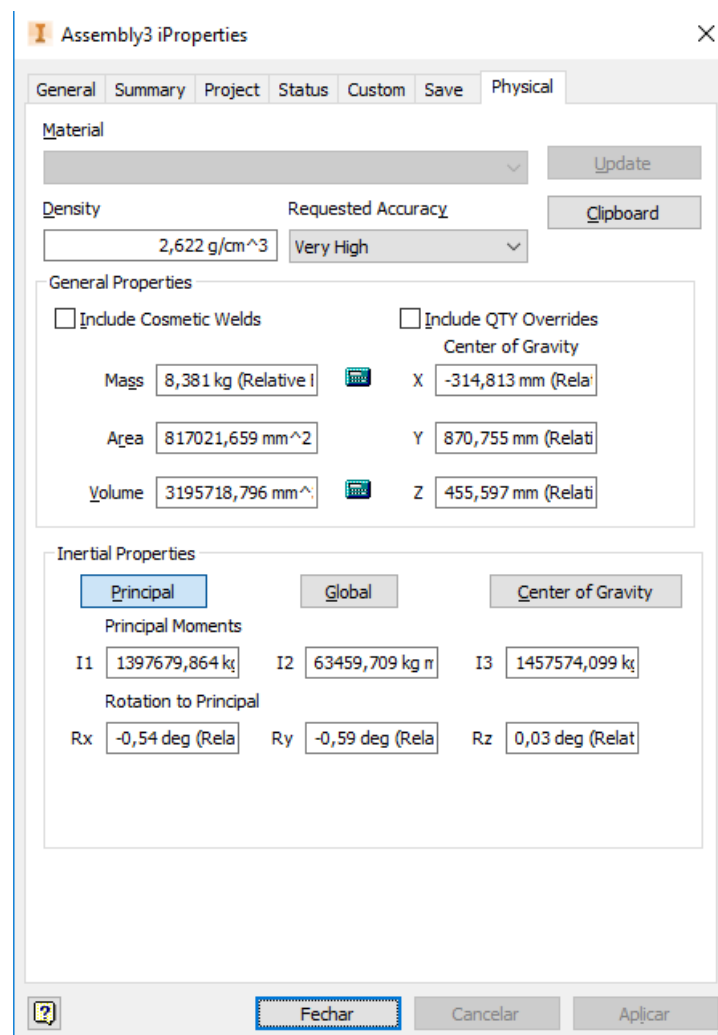
Fonte: A autoria Própria através do Inventor ® (2017).

O último passo para gerar a simulação estática do modelo, é a criação de malhas do componente, após isto, a simulação pode ser executada. Vale ressaltar que, serão analisados três diferentes modelos, diferenciando entre eles apenas seus materiais estruturais, como foi citado no tópico anterior. Porém, a força e passos para a simulação citados anteriormente serão os mesmos.

4.1 MULETA DE ALUMÍNIO

Após configurar o primeiro modelo com o material desejado, neste caso, a muleta de alumínio, podemos então retirar algumas importantes propriedades do componente, antes de gerar a simulação. Através da ferramenta iProperties do Inventor®, é possível saber a massa do componente completo, seus momentos de inércia e seu centro de gravidade, como mostra a figura 20 abaixo.

Figura 20 - Propriedades da muleta de alumínio.

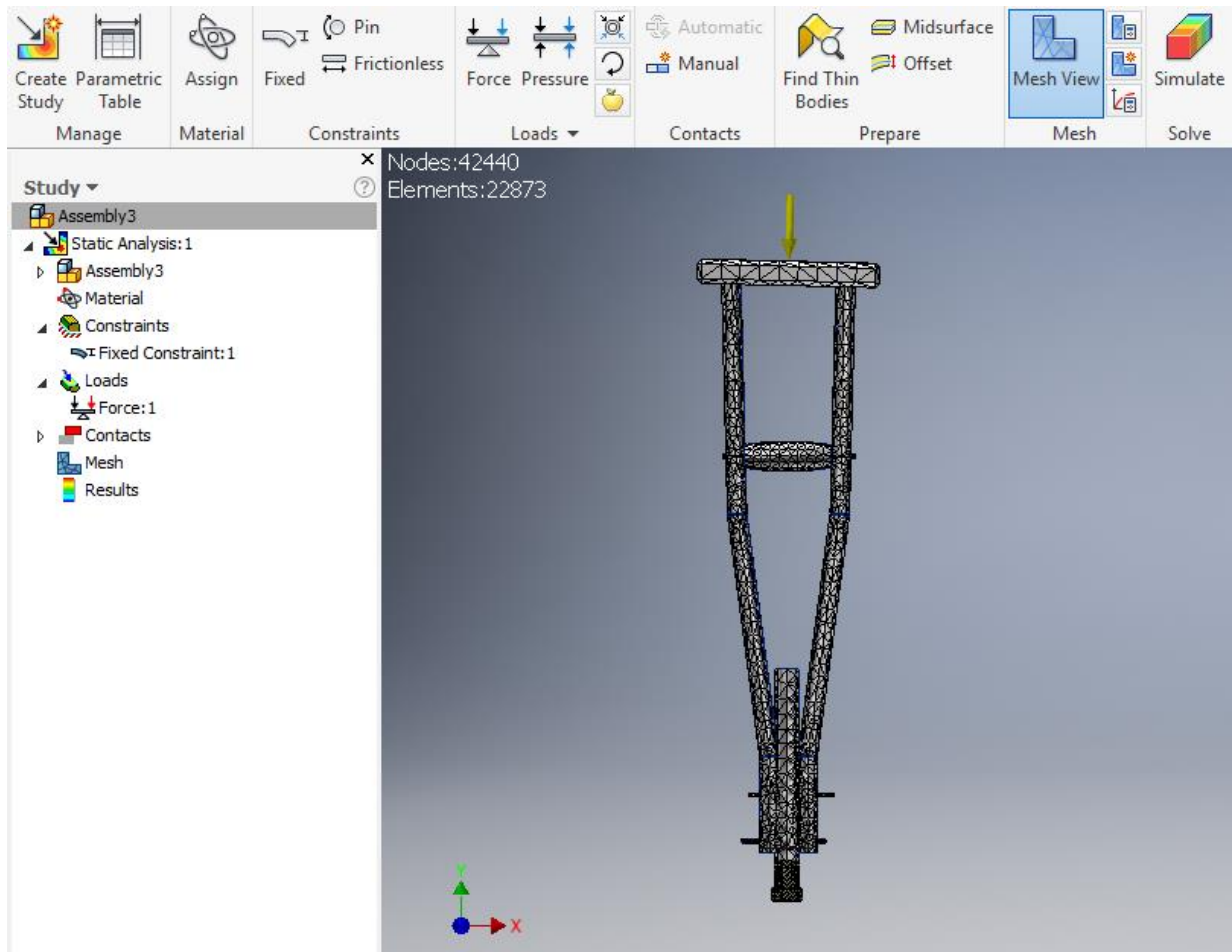


Fonte: Autoria Própria através do Inventor® (2017).

Como é possível observar, a massa do componente de alumínio ficou um pouco elevada, 8,381 kg. Isto se deve ao fato, de ter considerado dois elementos sólidos com o mesmo material, o qual seriam o suporte para as mãos e para as axilas. Estes dois elementos podem ser melhores modelados e realizar um estudo de redução de massa futuramente, porém não vem ao caso neste trabalho. Apenas para comparações futuras, os mesmos também foram avaliados sendo aplicados as propriedades do material de bambu, onde o peso reduziu então para 5,169 kg de todo a muleta.

Partindo então para a simulação, seguindo os passos os quais já foram citados anteriormente, é possível gerar as malhas do componente, podendo retirar deste os números nós e elementos. O número de nós gerado para o componente foi de 42440 e foi gerado 22873 elementos, como podemos observar na figura 21 abaixo.

Figura 21 - Geração das malhas na muleta de alumínio e suas considerações para a simulação.



Fonte: Autoria Própria através do Inventor ® (2017).

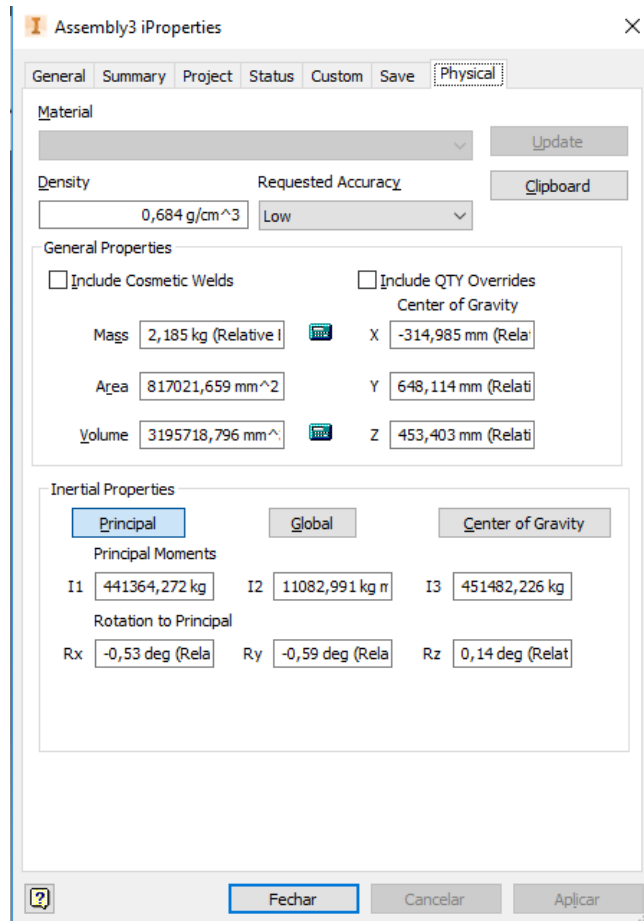
4.2 MULETA DE BAMBU COM BASE DE ALUMÍNIO

Este modelo será simulado apenas para comparar a atuação das forças cisalhantes na base da muleta de bambu, devido ao estresse causado pelos pinos passantes quando em contato com o bambu. Isto significa que, o material de bambu apresenta uma maior facilidade de se gerar e propagar as trincas, através de uma tensão cisalhante aplicada sobre o mesmo. Então, após a geração do resultado, serão comparados este modelo com a muleta de bambu e base do mesmo material, onde será analisado se através da simulação alguma tensão foi gerada devido a este fato.

Como foi analisado no modelo anterior, também iremos retirar as propriedades através da ferramenta iProperties do Inventor ® para futuras

comparações entre os modelos. Observamos então, as propriedades geradas pelo software na figura abaixo.

Figura 22 - Propriedades da muleta de bambu com base de alumínio.

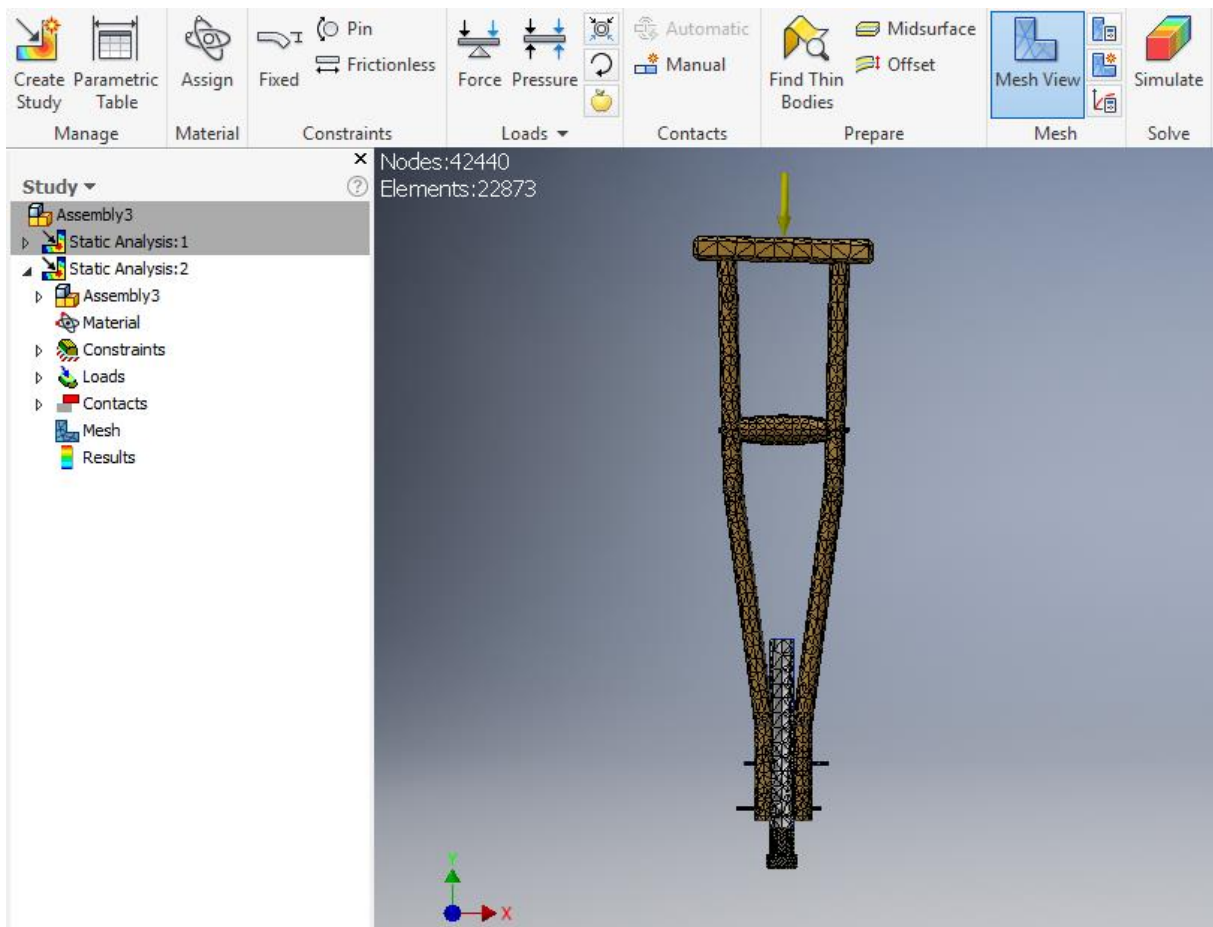


Fonte: Autoria Própria através do Inventor ® (2017).

Como observado, este modelo apresenta uma massa inferior ao modelo de alumínio apresentado anteriormente. Lembrando que, neste modelo apenas a base da muleta e os pinos passantes são de Alumínio 6061 e todas as outras partes são compostas por bambu, até mesmo os componentes sólidos de apoio. Sendo assim, a muleta de bambu com base de alumínio apresentou uma massa de 2,185 kg.

Após o material selecionado, é possível então realizar a simulação do componente em análise estática. Partindo dos mesmos passos do modelo anterior, a sequência a ser seguida então, é: definir as restrições do modelo, a força e logo então gerar as malhas do modelo.

Figura 23 - Geração das malhas na muleta de bambu com base de alumínio e suas considerações para a simulação.



Fonte: Autoria Própria através do Inventor® (2017).

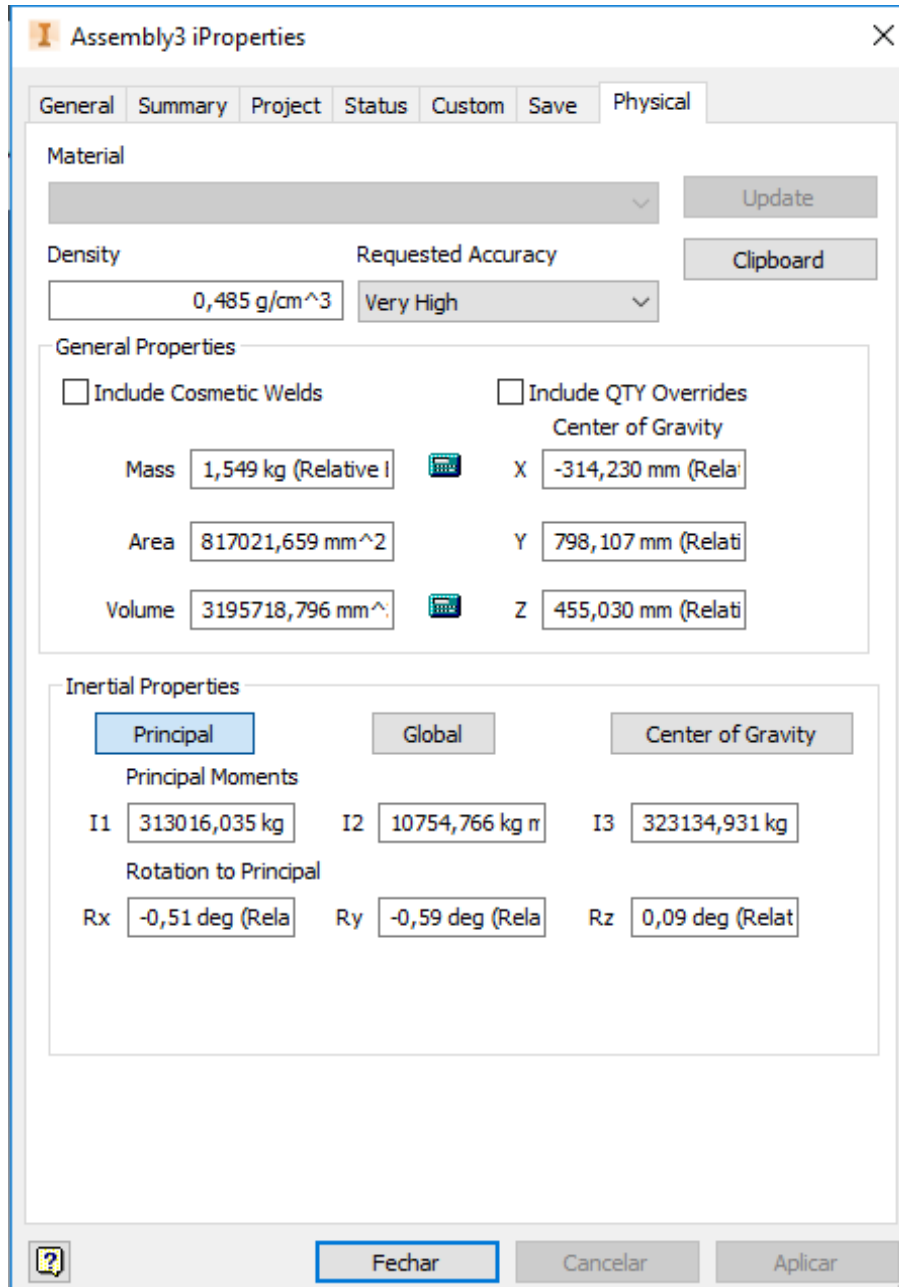
Como pode ser observado na figura 23, o número de nós e elementos é o mesmo do modelo anterior, 42440 nós e 22873 elementos. Isto se deve ao fato, de as dimensões e a estrutura do componente ser a mesma, onde os modelos só se diferenciam em seus materiais.

4.3 MULETA DE BAMBU

O último modelo a ser preparado para a simulação então, é a muleta de bambu, onde todos os seus componentes estruturais serão compostos apenas por bambu. Este modelo, é o foco deste trabalho, o qual pode apresentar o menor custo para a produção devido ao material utilizado e se comprovado a sua eficiência, pode então ser aplicado em modelos reais, tornando então as muletas mais acessíveis a populações carentes.

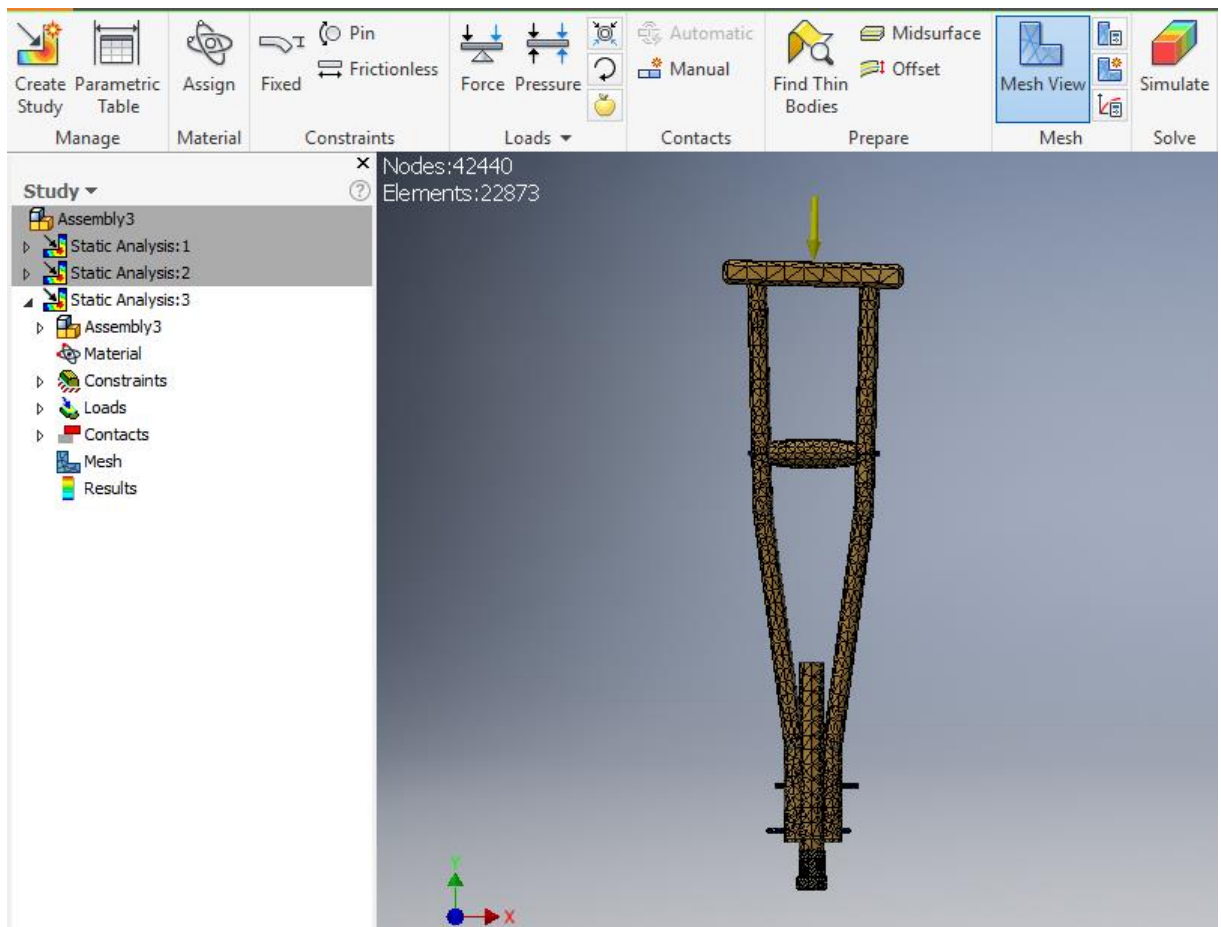
Como observado nos modelos anteriores, os componentes quando compostos por bambu apresentam uma menor massa, devido a menor densidade do bambu quando comparada ao alumínio. E neste caso, isto se comprova, porém tem uma mínima variação quando comparada ao modelo anterior, sendo a massa então de 1,549 kg. Também, como citado anteriormente, o número de nós e elementos dos componentes são os mesmos, devido a igualdade dos modelos, sendo então o número de nós de 42440 e de elementos de 22873. Estas informações podem ser observadas nas figuras 24 e 25 a seguir.

Figura 24 - Propriedades da muleta de bambu com base de alumínio.



Fonte: Autoria Própria através do Inventor ® (2017).

Figura 25 - Geração das malhas na muleta de bambu e suas considerações para a simulação.



Fonte: Autoria Própria através do Inventor ® (2017).

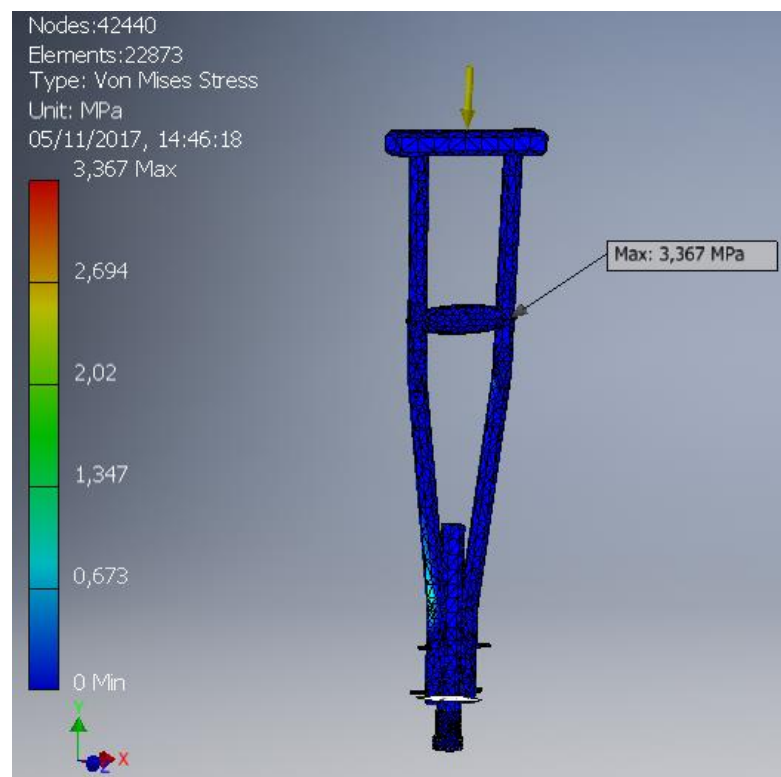
5 RESULTADOS

Após a simulação, podemos realizar então o estudo por método de elementos finitos através da análise estática dos elementos, onde o software fornece então as tensões de Von Mises, o deslocamento e o fator de segurança. Após realizar a análise das informações citadas, será realizado também uma comparação entre os modelos, verificando então o desempenho do material e os pontos a serem melhorados de cada.

5.1 MULETA DE ALUMÍNIO

Na simulação da muleta de alumínio a maior tensão de Von Mises encontrada foi de 3,367 MPa, localizada no pino passante da pegada para a mão, porém pela imagem é difícil identificar, pois esta tensão está interna a barra principal da muleta. Um outro ponto onde é possível encontrar uma maior tensão, seria na base inferior da barra principal, porém sendo esta baixa, em torno de 1,347 MPa, no máximo (onde a escala de cores se modifica). Tudo isto pode ser identificado na figura 26 abaixo.

Figura 26 - Análise da tensão de Von Mises na muleta de Alumínio.

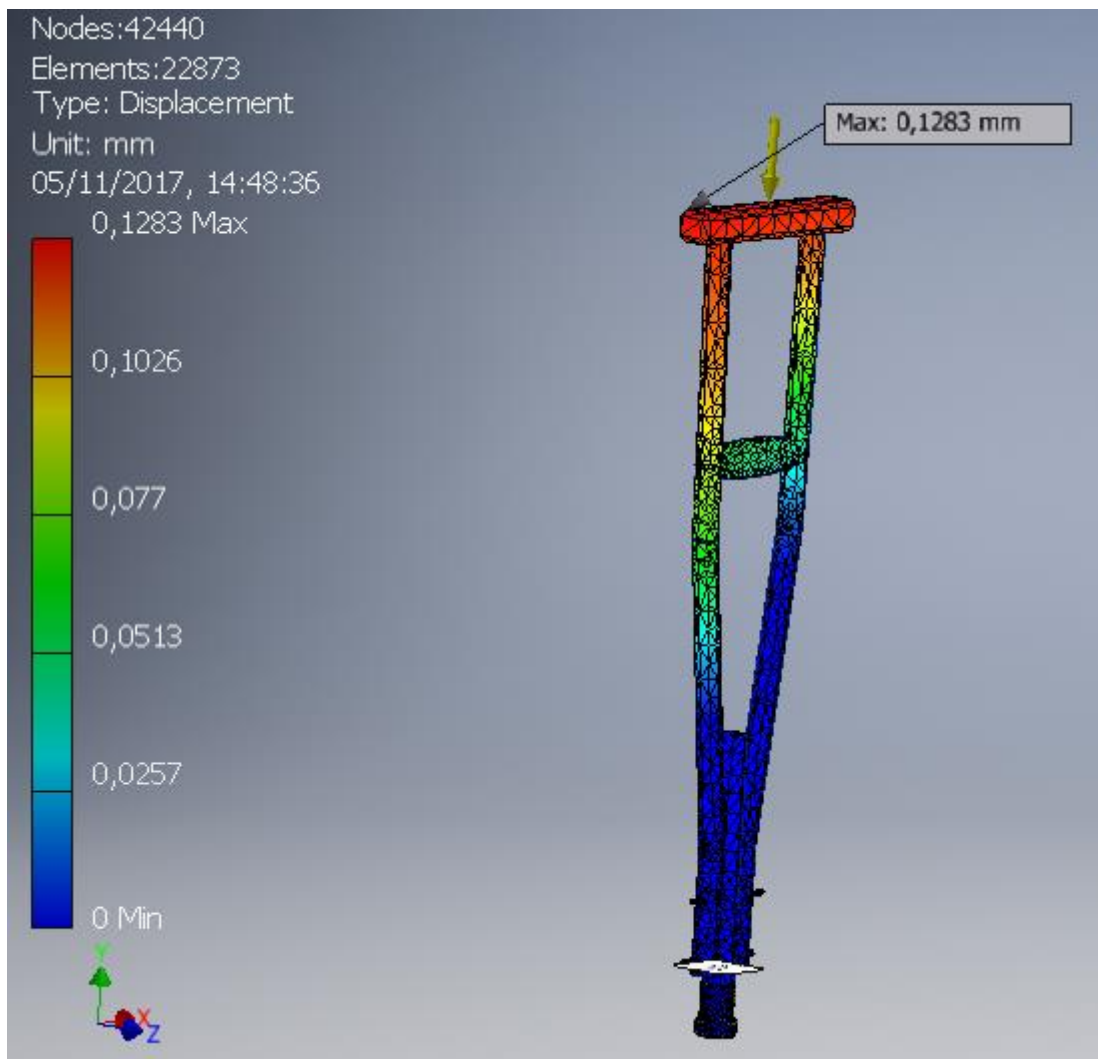


Fonte: Autoria Própria através do Inventor ® (2017).

Já o deslocamento do componente, podemos observar este em toda a estrutura, como mostrado na figura 27. Assumindo um valor máximo na ponta do apoio

de axilas, sendo de 0,1283 mm. É válido ressaltar que, o deslocamento se destaca como um todo na parte superior da muleta, afetando minimamente a sua base. Isto se dá, devido ao fato da localização da força simulada no componente e desta forma, podemos localizar os pontos críticos a partir desta localização. E o coeficiente de segurança do componente, assume um valor máximo de 15 unidades adimensionais, sendo localizado na base central da muleta, como também para o seu mínimo sendo na mesma localização e valor.

Figura 27 - Análise do deslocamento da muleta de Alumínio.



Fonte: Autoria Própria através do Inventor ® (2017).

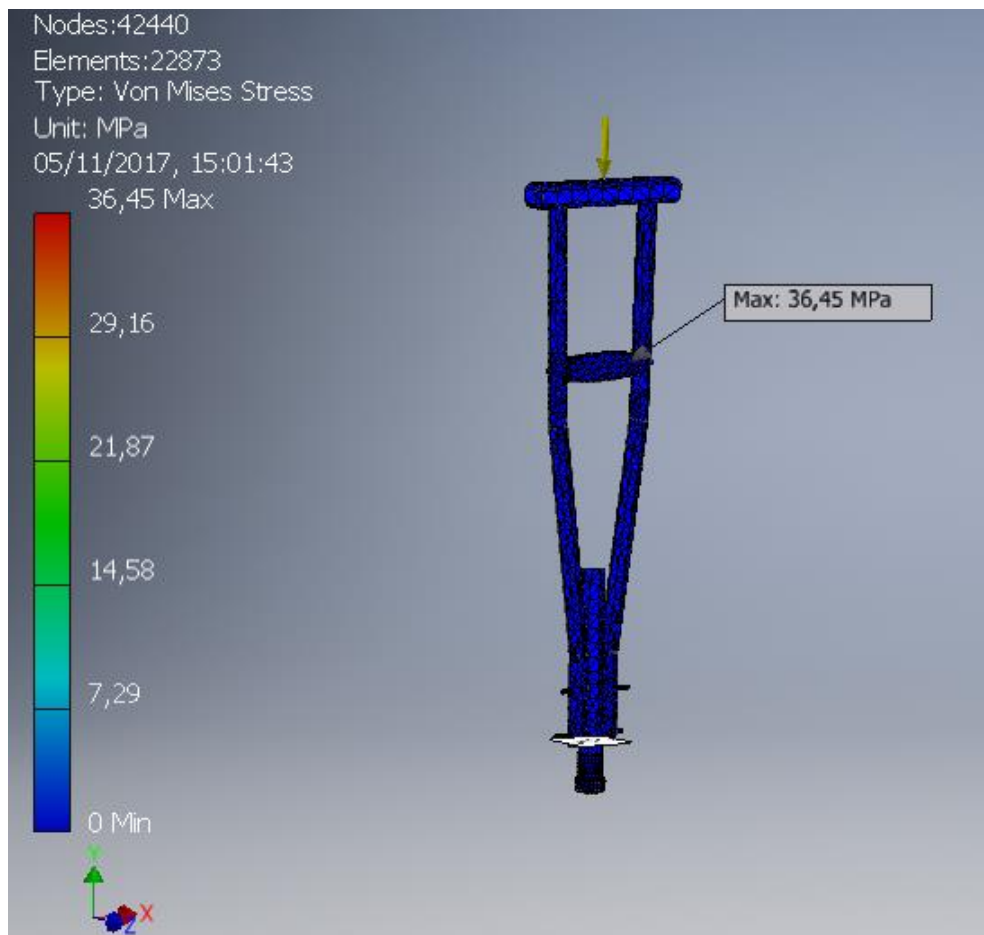
5.2 MULETA DE BAMBU COM BASE CENTRAL DE ALUMÍNIO

Lembrando que esse modelo está sendo analisado devido ao fato das tensões cisalhantes presentes na fixação do bambu, o qual se dá através de pinos passantes de alumínio. Logo, para critério de comparação com o próximo modelo

este modelo passa a ser necessário, assim poderemos entender melhor as tensões atuantes em cada modelo.

O comportamento desse modelo foi bem diferente da muleta de alumínio, por meio que não apresentou nenhuma demonstração de variação de tensão em sua estrutura, porém apresentou uma tensão de Von Mises elevada, como poderá ser observado na figura 28 abaixo. A tensão máxima de Von Mises tem a mesma localidade da análise anterior, onde também se encontrou na parte interna do pino passante do apoio para as mãos, assumindo um valor de 36,45 MPa.

Figura 28 - Análise da tensão de Von Mises na muleta de Bambu com base central de Alumínio.



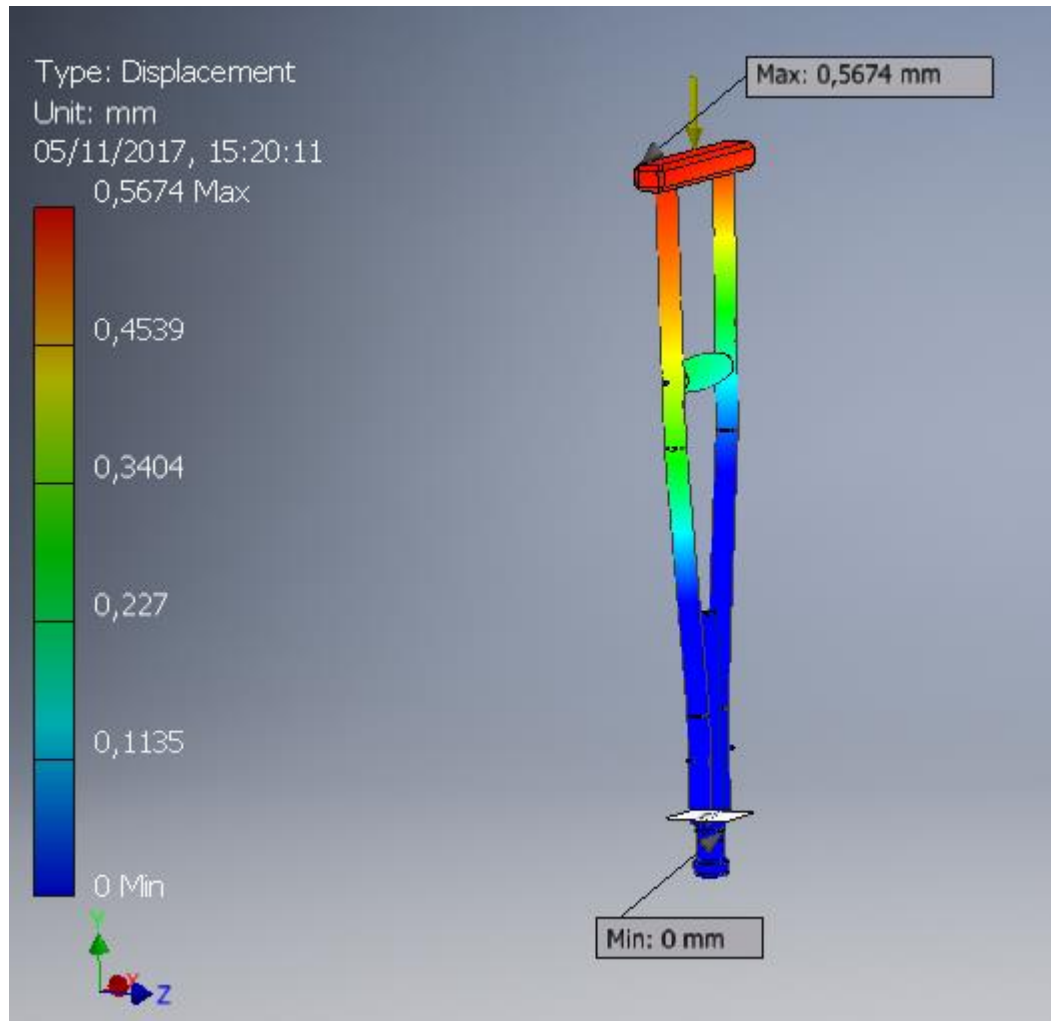
Fonte: Autoria Própria através do Inventor ® (2017).

O coeficiente de segurança dos modelos são os mesmos, permanecendo em 15 unidades (adimensionais). E o valor mínimo se encontra no pino central da muleta, ou seja, no pino do apoio para as mãos, assumindo um valor de 7,54.

O deslocamento do modelo de bambu com base de alumínio, também é maior quando comparado ao modelo anterior, porém está concentrado no mesmo local,

como já foi citado anteriormente, isto se deve a localização da força. O valor do deslocamento máximo deste modelo é de 0,5674 mm e o mesmo, também só apresenta variações de deslocamento em seu topo, assumindo um deslocamento zero em sua base. Isto pode ser observado na figura 29 abaixo.

Figura 29 - Análise do deslocamento da muleta de Bambu com base central de Alumínio.



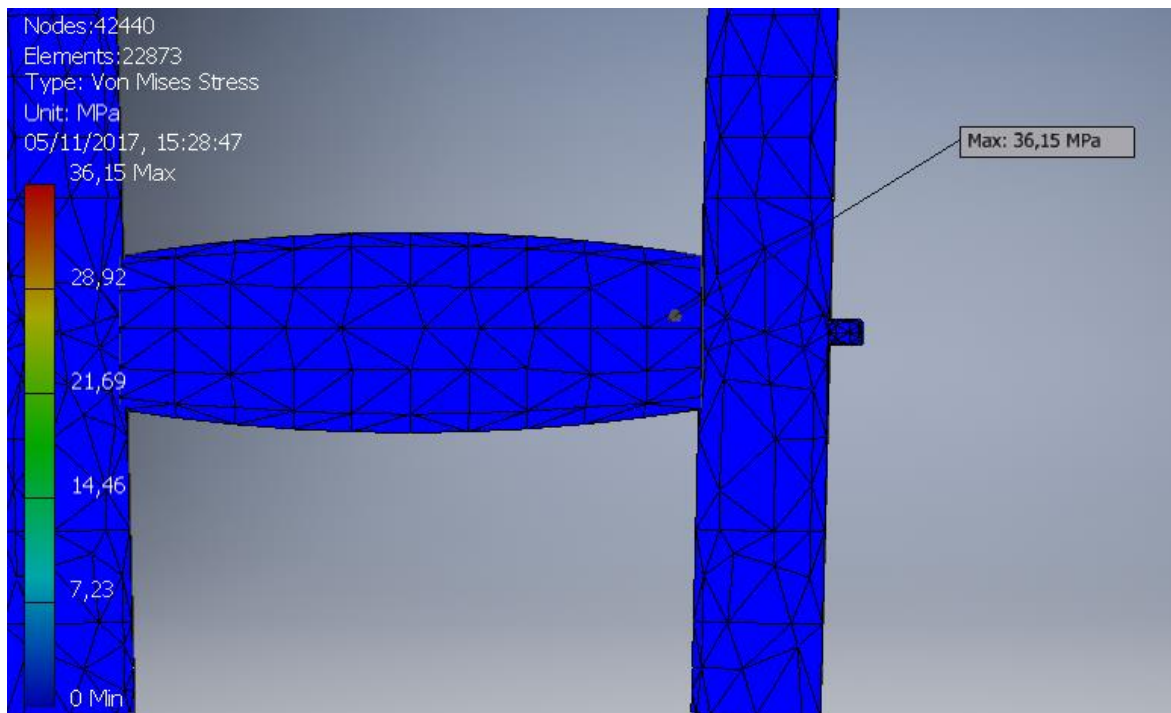
Fonte: Autoria Própria através do Inventor ® (2017).

5.3 MULETA DE BAMBU

O último modelo a ser simulado então, é a muleta composta completamente por bambu, possuindo apenas o pé de borracha e elementos de fixação de alumínio 6061. Esta muleta é o modelo ideal para o atendimento dos objetivos deste trabalho, como citado anteriormente, o modelo ideal seria um modelo com características próximas da muleta de alumínio, com um material que resistisse e fosse de baixo custo, tanto o material como a sua fabricação.

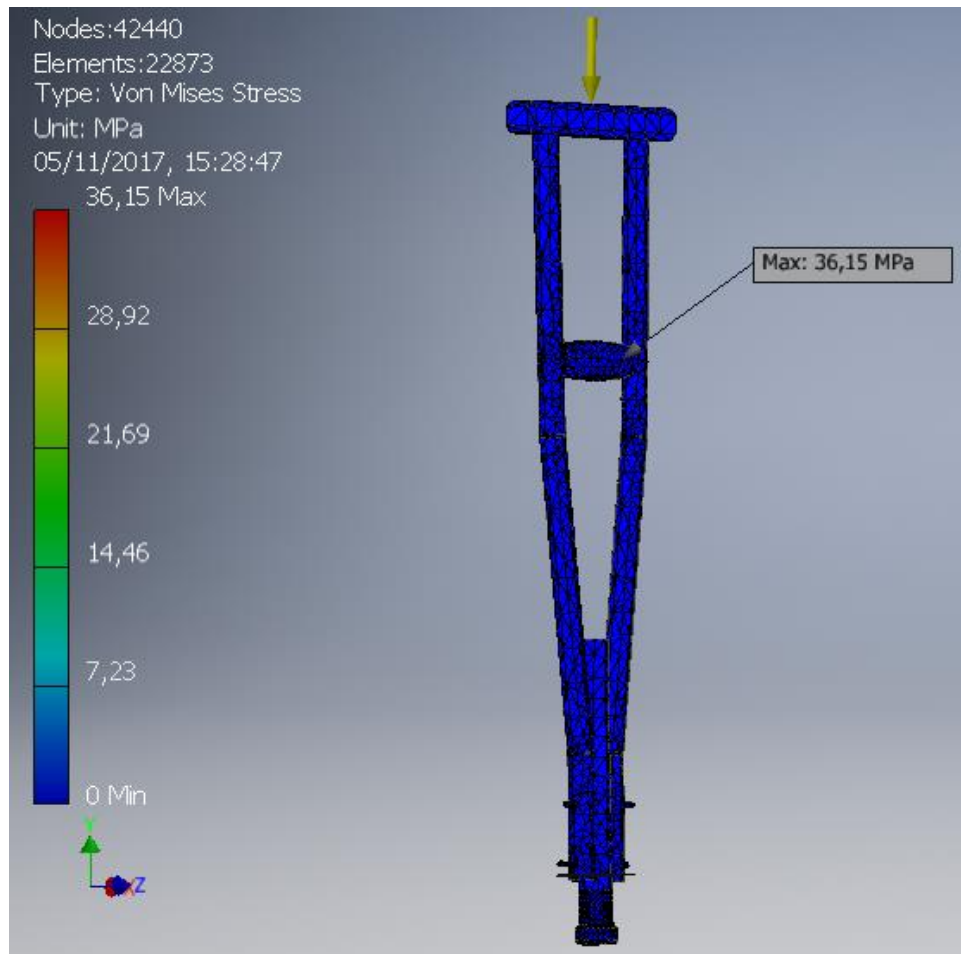
Analisando então as tensões deste modelo, podemos observar que a tensão de Von Mises foi próxima da tensão do modelo anterior, o de bambu com base central de alumínio. A tensão máxima presente no componente foi de 36,15 MPa, sendo no pino passante central novamente, como poderá ser observado na figura 30 a seguir. Também, como no modelo anterior, a variação da tensão de Von Mises pela estrutura da muleta foi mínima, apresentando-se próxima de zero. Através da escala de cores, a qual pode ser observada na figura 31, é possível constatar que existe uma pequena variação de azul no topo da muleta, próximo a localização da força e um pouco abaixo do apoio para as axilas, porém não é possível identificar o valor exato da mesma, mas é possível supor que está inferior que 7,23 MPa.

Figura 30 - Tensão máxima de Von Mises, localizada no pino central.



Fonte: Autoria Própria através do Inventor ® (2017).

Figura 31: Análise da tensão de Von Mises na muleta de Bambu.

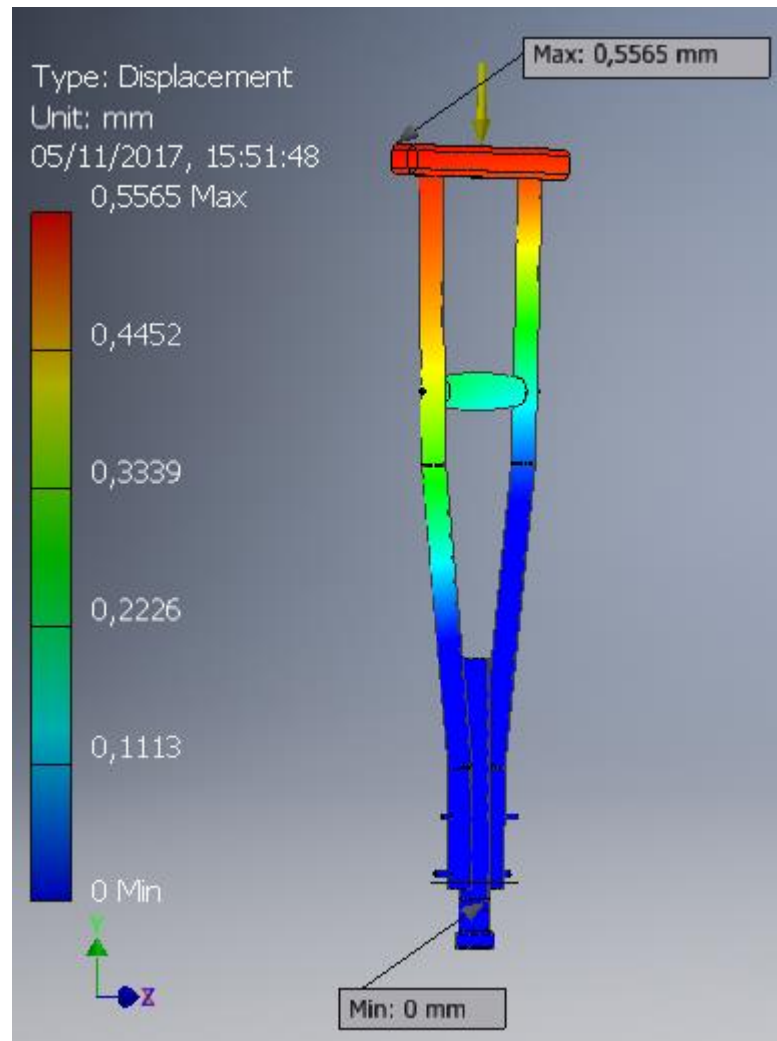


Fonte: Autoria Própria através do Inventor ® (2017).

O deslocamento e o coeficiente de segurança da muleta de bambu podem ser observados nas figuras a seguir, 32 e 33 respectivamente. O coeficiente de segurança máximo da muleta permaneceu o mesmo, sendo 15 e se localizando na base. Já o coeficiente mínimo aumentou comparado ao modelo anterior, para 7,61, localizando-se no pino passante central. Mas ainda quando comparado ao modelo de alumínio, o coeficiente de segurança mínimo apresenta metade do valor do mesmo, que assume o mesmo valor do máximo, sendo de 15, sendo também em sua base.

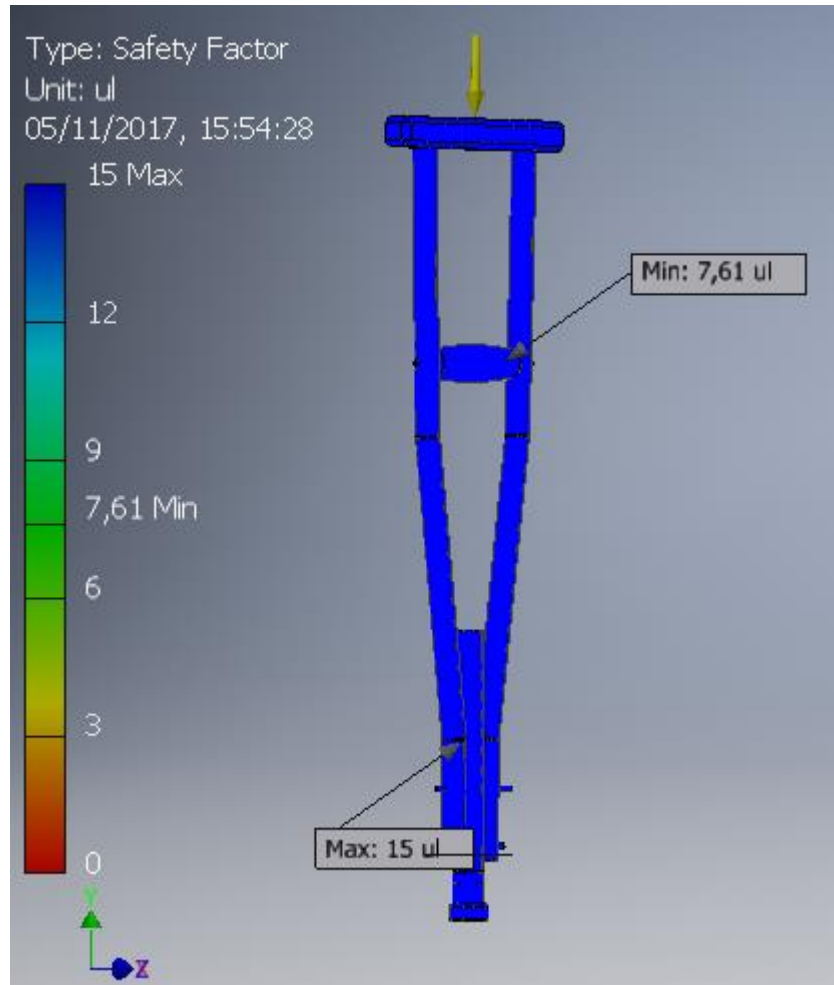
Na muleta de bambu, o deslocamento foi muito próximo quando comparado a muleta de bambu com base de alumínio e superior quando comparado a muleta de alumínio. O deslocamento máximo da muleta de bambu foi de 0,5565 mm, localizado na parte superior da muleta, como todos os modelos anteriores. E o deslocamento mínimo assumiu um valor igual a zero na sua base.

Figura 32 - Análise do deslocamento da muleta de Bambu.



Fonte: Aatoria Própria através do Inventor ® (2017).

Figura 33: Coeficiente de segurança da muleta de Bambu.



Fonte: Autoria Própria através do Inventor ® (2017).

6 ORIENTAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como foi visto, foi utilizado a espécie de bambu *Guadua angustifolia* para a simulação. Isto se deu, devido ao fato que não foi encontrado nenhum outro estudo de propriedades mecânicas relacionadas a alguma outra espécie de bambu. Esta linhagem de bambu é uma espécie de grande porte, sendo de difícil aplicação em muletas. Além disto, a espécie de *Guadua* é dificilmente encontrada no Brasil, o que torna difícil a construção de muletas utilizando esta espécie.

Outro fato da simulação que deve ser levado em consideração, se deve as propriedades médias utilizadas, ou seja, foram consideradas as médias de todas as propriedades, as quais variam ao longo do colmo do bambu. Para um projeto, deve-se considerar a propriedade padrão da parte ideal que será utilizada para a construção da muleta, logo, terá com maior exatidão a resistência aos esforços e a ação da tensão na estrutura.

Ainda com relação a espécie do bambu, o ideal para o projeto seria a utilização da espécie *Phyllostachys aurea*, a qual é encontrada com grande facilidade em toda região do país e apresenta um custo nulo ou muito baixo. Devido a isto, o custo do projeto seria mínimo e podendo assim se tornar acessível a toda população. Porém, para seguir esta linha e confirmar a utilização, seria necessário a realização de ensaio de tração com este material, sendo com toda a estrutura ou com o colmo do bambu, para assim retirar as propriedades do material e posteriormente realizar uma análise através do método de elementos finitos.

Com relação ao projeto, seria necessário alterar alguns pontos e fazer alguns ajustes, como: pontos de fixação e reforço de estrutura. O primeiro ponto citado, seriam necessários alguns ajustes nos pinos de fixação, os mesmos devem ser de parafusos castelados ou pinos com travas, evitando então que o mesmo ceda com o uso. Outro ajuste no projeto necessário, seria a colocação de dois pinos de fixação no apoio para as mãos, por meio que, o pino irá criar uma linha com um cilindro fixado, logo, o mesmo tende a rotacionar com o esforço aplicado. Sendo assim, a fixação por dois pinos traz mais segurança ao usuário, evitando então que o cilindro rotacione e tire a instabilidade da pessoa que está utilizando a muleta. E o último ajuste necessário, seria em que cada junção da estrutura fosse coladas as partes interligadas, oferecendo uma maior segurança ao projeto e evitando os desgastes dos pinos junto a estrutura e que o mesmo não se desgaste, sofrendo em excesso com as forças cisalhantes.

O segundo ponto a ser considerado, são onde as estruturas se conectam ou se tocam. Como o bambu é um material de comportamento frágil e apresenta a sua menor resistência quando perpendicular as suas fibras, quando duas estruturas se conectam ou se encostam, pode haver uma ação de esmagamento e quando isto acontece o bambu assume um comportamento extremamente frágil. Esta ação da força de esmagamento pode vir a trincar e posteriormente quebrar a parede do bambu, levando toda a estrutura a entrar em colapso. Logo, um ponto de correção para este problema, seria o embuchamento do bambu com fibra de madeira e cola, ou madeira com cola, tornando o material resistente contra a ação das forças que tentam esmagá-lo. Ou se não, outra solução seria a substituição por um material quadrado de madeira, evitando então o contato de tubos com tubos, evitando a ação de esmagamento.

7 CONCLUSÃO

Na seleção dos materiais, observou-se que o bambu é o material ideal para o atendimento do objetivo deste trabalho. Por meio que, o mesmo apresenta uma boa resistência quando relacionado a sua densidade, uma boa relação entre o módulo de Young e densidade e ainda um baixo custo quando comparado aos outros materiais.

Pelas cartas de Ashby, comparando o bambu em critérios de resistência e módulo de Young com o alumínio, observa-se que o bambu é um material que está muito próximo do alumínio, assumindo as mesmas ou características superiores a madeira. E, vale ressaltar, que a madeira é um material já utilizado em muletas, logo, subentendesse que a aplicação do bambu também é possível, apenas nunca foi realizada. Outro ponto a ser analisado, é o custo dos materiais, seguindo a carta de Ashby por unidade de volume e assumindo o bambu com custos próximos ao da madeira, observa-se que o mesmo apresenta um custo bem inferior ao alumínio, sendo mais um ponto positivo para a utilização deste material em muletas de baixo custo.

Partindo para os componentes desenhados e montados através do software Autodesk Inventor © 2017, foi possível retirar boas informações dos modelos. O primeiro ponto relevante, é a diferença de massa dos modelos. Observou-se, que os modelos compostos por bambu apresentaram uma massa aproximada bem menor do que o modelo de alumínio. Isto se deve ao fato da baixa densidade do material, ou seja, da menor densidade do bambu quando comparado ao alumínio. Outro ponto que também foi observado, foi a consideração dos dois apoios (axilas e mãos) sendo maciço. Quando aplicado no modelo de alumínio, estes elevam o peso drasticamente, porém, isto não se aplica a este trabalho, por não ser o foco esta análise.

As simulações mostraram que, a resistência quando a carga axial é aplicada é maior na muleta de alumínio. Mas vale ressaltar, que as muletas compostas de bambu também suportaram a carga, com uma resistência menor, mas atendendo ao critério. Isto é possível analisar devido a tensão de Von Mises, por meio que quanto maior for o valor desta tensão implicará que o material está mais próximo do escoamento, e que a tensão de escoamento do material é superior que a tensão máxima de Von Mises. Porém, a localização das tensões máximas das muletas de bambu foram no pino passante central, o mesmo é composto de alumínio. Logo, é

possível dizer que os componentes de bambu resistiram a força aplicada, por meio que a escala de cor na estrutura não variou de azul para outra cor.

Para resolver o problema citado acima, é possível modificar o projeto e aumentar o diâmetro do pino central, porém, neste caso, seria necessário aumentar de todos os outros pinos presentes no componente, não apenas do central. Pois, se aumentar apenas o diâmetro do pino central, a concentração da tensão passara para os outros pinos, não atendendo ao todo a necessidade do projeto.

Outro ponto citado no trabalho, foi a questão da força cisalhante dos pinos nos componentes compostos por bambu. Isto, não foi identificado durante a simulação no Inventor®, porém pode ser observado na prática. O bambu é um material frágil e a características destes materiais, como o próprio nome já diz é apresentar uma fratura frágil. E, esta fratura se caracteriza com a ocorrência de uma propagação rápida da trinca, com uma deformação plástica mínima. Também é possível resolver este problema, em soluções práticas, seria necessário revestir os furos dos materiais de bambu com algum tipo de metal, com o objetivo de evitar o contato do pino de metal com o bambu. Este contato do pino com o bambu, no caso, causa a fratura plástica mínima, devido a mínima área de contato aliado a uma força relativamente alta atuando no ponto. Logo, revestindo o furo com um material mais resistente para essa aplicação não existiria o problema da existência de uma força cisalhante naquele ponto.

De modo geral, a aplicação do bambu em muletas de baixo custo seria possível. O mesmo atende as restrições do projeto, sendo: custo, peso e resistência. Isto foi comprovado através da seleção dos materiais e análises através do Inventor®. Como também, foi identificado que para aplicações práticas alguns ajustes serão necessários, como o revestimento dos furos no bambu. Sendo assim, para trabalhos futuros, sugere-se que alguns testes reais sejam executados antes da ampla aplicação da mesma, levando em consideração a resistência ao longo do ano, conforto e adaptabilidade através dos pacientes, e assim realizar os ajustes necessários após estes.

REFERÊNCIAS

- AMADA, Shigeyasu; UNTAO, Sun. Fracture properties of Bamboo. Elsevier: Composites Part B, Oxford, v. 32, p.451-459, fev. 2001.
- ANDREWS, B.j. et al. Improved harness crutch to reduce upper limb effort in swing-through gait. Elsevier: Medical Engineering and Physics, Oxford, v. 16, p.15-18, jan. 1994.
- ASHBY, Michael F. Materials Selection in Mechanical Design. 4. ed. Oxford: Pergamon Press, 1992.
- AXELSON, P.; GURSKI, D.; LASKO-HARVILL, A. Standing and its importance in spinal cord injury management. In: Resna 87 – Meeting the Challenge: Proceedings of 10th Annual Conference on Rehabilitation Technology. Va: Rehabilitation Engineering and Assistive Technology Society of North America; p. 477-479, 1987.
- AZZINI, A.; CIARAMELLO, D.; NAGAI, V. Densidade básica e dimensões das fibras em bambus do gênero Guadua. Bragantia, Campinas, v. 36, n. 1, p.1-5, jan. 1977.
- EPSTEIN, Sigmund. Art, History and the Crutch. New York: New York, 1937.
- FISHER, S. V.; PATTERSON, R. P. Energy cost of ambulation with crutches. Archives Of Physical Medicine And Rehabilitation, [s.l.], v. 62, p.250-256, jun. 1981.
- GHAVAMI, Khosrow. Bamboo as reinforcement in structural concrete elements. Elsevier: Cement & Concrete Composites, Oxford, v. 27, p.637-649, 2005.
- GHAVAMI, Khosrow; MARINHO, Albanise B.. Propriedades físicas e mecânicas do colmo inteiro do bambu da espécie Guadua angustifolia. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, Pb, v. 9, n. 1, p.107-114, 2005.
- GIELIS, Johan. Future possibilities for bamboo in European agriculture. University Of Antwerp: Oprins Plant, Rijkevorsel, v. 1, p.1-10, 2002.
- GOH, J. C. H.; TOH, S. L.; BOSE, K. Biomechanical study on axillary crutches during single-leg swing-through gait. Prosthetics And Orthosis International, [s.l.], v. 10, p.89-95, 1986.
- JAIN, Seema; KUMAR, Rakesh; JINDAL, U. C. Mechanical behaviour of bamboo and bamboo composite. Journal Of Materials Science, [s.l.], v. 27, p.4598-4604, 1992.
- KAUFMAN, J. Gilbert. Introduction to Aluminum Alloys and Tempers. Ohio: Asm International, 2000.

- KRETSCHMANN, David. Mechanical Properties of Wood. In: Wood Handbook: Wood as an Engineering Material. Madison: USDA, 2010, p. 100-145.
- LAKKAD, S.c.; PATEL, J. M.. Mechanical properties of Bamboo, a natural composite. *Fibre Science And Technology*, [s.l.], v. 14, p.319-322, 1980.
- LEBLANC, Maurice A.; CARLSON, Lawrence E.; NAUENBERG, Teresa. A quantitative comparison of four experimental axillary crutches. *Journal Of Prosthetics And Orthotics*. [s.l.], p. 20-28. jan. 1993.
- LUGT, P. van Der; DOBBELSTEEN, A. A. J. F. van Den; JANSSEN, J. J. A.. An environmental, economic and practical assessment of bamboo as a building material for supporting structures. Elsevier: *Construction and Building Materials*, Oxford, v. 20, p. 648-656. abr. 2006.
- MACGILLIVRAY, Megan K.; MANOCHA, Ranita H. K.; SAWATZKY, Bonita. The influence of a polymer damper on swing-through crutch gait biomechanics. Elsevier: *Medical Engineering and Physics*, Oxford, v. 38, p.275-279, 2016.
- MATWEB. Componentes da liga Al 6061. Disponível em: <<http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=b8d536e0b9b54bd7b69e4124d8f1d20a>> Acesso em: 25 de outubro de 2017.
- MCBEATH, Andrew A.; BAHRKE, Michael; BALKE, Bruno. Efficiency of Assisted Ambulation Determined by Oxygen Consumption Measurement. *The Journal Of Bone And Joint Surgery*, [s.l.], v. 56, p.994-1000, jul. 1974.
- MCQUADE, Kevin J.; FINLEY, Margaret; OLIVEIRA, Anamaria S.. Upper extremity joint stresses during walker-assisted ambulation in post-surgical patients. *Revista Brasileira de Fisioterapia*, São Carlos, v. 5, n. 4, p.332-337, jul. 2011.
- NORTON, Robert L.. Projeto de Máquinas: Uma abordagem integrada. Porto Alegre, 2004.
- OTOPINHAI. Muletas. Disponível em: <<http://www.orthopiniais.com.br/produtos-index/categorias/59150/muletas.html>> Acesso em: 07/11/2017.
- PRADHAN, Ashoke Kumar. A mathematical model of optimal crutch weight of amputated human from ergonomics point of view. Elsevier: *Mathematical and Computer Modelling*, Oxford, v. 14, p.274-278, 1990.
- ROVICK, Joshua S.; CHILDRESS, Dudley S. Pendular model of paraplegic swing-through crutch ambulation. *Veteran Administration: Journal of Rehabilitation Research and Development*, Chicago, v. 25, n. 4, p.1-16, abr. 1988.

- SEELEY, Matthew K. et al. A Kinematic Comparison of Spring-Loaded and Traditional Crutches. *Journal Of Sport Rehabilitation*, [s.l.], v. 20, p.198-206, out. 2011.
- SEGURA, Adriana; PIAZZA, Stephen J. Mechanics of Ambulation With Standard and Spring-Loaded Crutches. *Archives Of Physical Medicine And Rehabilitation*, [s.l.], v. 88, p.1159-1163, set. 2007.
- SEGURA, Adriana; SCHOLAR, Mcnair; STATE, Penn. Biomechanical Evaluation of Crutch Design Variations. *The Penn State Mcnair Journal, Pensilvânia*, v. 11, p.55-70, fev. 2004.
- SHERIF, Shahoub et al. Analysis of hand pressure in different crutch lengths and upper-limb movements during crutched walking. Elsevier: *International Journal of Industrial Ergonomics*, Oxford, v. 53, p.59-66, 2016.
- SHORTELL, Dorota et al. The design of a compliant composite crutch. *Department Of Veterans Affairs: Journal of Rehabilitation Research and Development*, [s.l.], v. 38, n. 1, p.23-32, jan. 2001.
- SLAVENS, Brooke A.; GUAN, Yabo; HARRIS, Gerald F. Finite Element Analysis of Forearm Crutches During Gait in Children with Myelomeningocele. In: *31st Annual International Conference Of The Ieee Embs*, Minnessota, v. 31, p.5271-5273, set. 2009.
- STALLARD, J. et al. Assessment of Orthoses by means of speed and heart rate. *Journal Of Medical Engineering And Technology*, [s.l.], v. 2, n. 1, p.22-24, jan. 1978
- SUBRAMONY, S. Hs. Electrophysiological findings in crutch palsy. *Electroencephalography And Clinical Neurophysiology*, [s.l.], v. 29, p.281-285, jul. 1989.
- TAN, T. et al. Mechanical properties of functionally graded hierarchical bamboo structures. Elsevier: *Acta Biomaterialia*, Oxford, v. 7, p. 3796-3803. jun. 2011.
- THYS, H.; WILLEMS, P. A.; SAELS, P. Energy cost, mechanical work and muscular efficiency in swing-through gait with elbow crutches. Elsevier: *Journal of Biomechanics*, Oxford, v. 29, p.1473-1482, nov. 1996.
- XIAO, Yan; ZHOU, Quan; SHAN, Bo. Design and Construction of Modern Bamboo Bridges. *Journal Of Bridge Engineering*, [s.l.], v. 15, p.533-541, set. 2010.