

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

AIRTON SCARIOT JUNIOR

**PRÓTESE EM FIBRA DE CARBONO PARA MEMBRO TORÁCICO DE
EQUINOS UTILIZANDO A ANÁLISE ESTRUTURAL PELO MÉTODO DOS
ELEMENTOS FINITOS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PATO BRANCO

2016

AIRTON SCARIOT JUNIOR

**PRÓTESE EM FIBRA DE CARBONO PARA MEMBRO TORÁCICO DE
EQUINOS UTILIZANDO A ANÁLISE ESTRUTURAL PELO MÉTODO
DOS ELEMENTOS FINITOS.**

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 – COEM – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Câmpus Pato Branco, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Villaca Santos.

PATO BRANCO

2016

FOLHA DE APROVAÇÃO

PRÓTESE EM FIBRA DE CARBONO PARA MEMBRO TORÁCICO DE EQUINOS UTILIZANDO A ANÁLISE ESTRUTURAL PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Airton Scariot Junior

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado no dia 30/11/2016 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. Dr. Fábio R. Mandello Rodrigues
(UTFPR)

Prof. Dr. Diego Rizzotto Rossetto
(UTFPR)

Prof. Dr. Rodrigo Villaca Santos
(UTFPR)
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

AGRADECIMENTOS

Quero agradecer primeiramente a Deus por me dar saúde e força para superar as dificuldades.

A Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Pato Branco, pela oportunidade de fazer o curso.

Aos meus pais, pelo amor, incentivo e apoio incondicional.

Ao Prof. Dr. Rodrigo Villaca Santos, pela orientação, apoio e por ter aceitado o tema em estudo.

Ao Prof. Dr. Marcos Gomes Loureiro e a minha namorada Camila Cristine Surdi, por me concederem recomendações no que diz respeito à Medicina Veterinária.

RESUMO

SCARIOT JUNIOR, Airton. **Prótese em fibra de carbono para membro torácico de equinos utilizando a análise estrutural pelo método dos Elementos Finitos.** 2016. 56 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2016.

A utilização de próteses é uma alternativa para os indivíduos se tornarem mais independente e manterem uma qualidade de vida, podendo ser utilizada tanto no ser humano quanto nos animais. Assim, o mesmo ocorre com os equinos, que na maioria das vezes são sacrificados, devido à dificuldade de adquirir uma prótese, sendo pelo preço elevado que elas possuem no mercado e pela maioria das empresas residirem no exterior, o que torna o prazo de entrega alto. Com isso, esse trabalho tem como finalidade realizar um projeto para prótese em membro torácicos de equinos, a qual possui peça em fibra de carbono, alumínio 6061 e resíduo de pneu. Assim, foi realizado um questionário para constatar quais são as principais características que a prótese deve possuir, e usando um cavalo como referência, foi determinado o carregamento imposto pelo equino na prótese, e um modelo CAD. Também, foi utilizado à análise estrutural via elementos finitos para prever se a prótese irá suportar o carregamento. Além disso, foi realizada a comparação entre os tecidos de fibra de carbono que possuem as direções 0 e 90° e 45 e -45°, para definir qual desses dois tecidos é mais adequado no projeto. Desse modo, se notou que os dois tecidos irão suportar o carregamento sem que ocorra a falha. Além disso, que a direção das fibras só influenciou os resultados de tensão máxima principal, pois os valores de deslocamento foram praticamente iguais. Todavia, a prótese sendo fabricada com tecido de fibra de carbono nas direções 0 e 90° irá possuir uma tensão máxima principal menor, sendo assim, a mais indicada para esse projeto.

Palavras-chave: prótese, equino, fibra de carbono, elementos finitos, direção das fibras.

ABSTRACT

SCARIOT JUNIOR, Airton. **Carbon fiber prosthesis for thoracic limbs of horses using structural analysis using the Finite Element method.** 2016. 56 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2016.

The use of prostheses is an alternative for individuals to become more independent and maintain a quality of life, being able to be used both in humans and animals. Thus, the same happens with horses, which are often sacrificed, due to the difficulty of acquiring a prosthesis, being at the high price they have in the market and by the majority of the companies residing abroad, which makes the deadline high. Therefore, this work has the purpose of realizing a project for prosthesis in thoracic limbs of horses, which has carbon fiber, 6061 aluminum and tire residue. Thus, a questionnaire will be carried out to determine the main characteristics that the prosthesis must possess, and using a horse as reference, the load imposed by the horse in the prosthesis, and a CAD model will be determined. Also, it will be used for structural analysis via finite elements to predict whether the prosthesis will withstand loading. In addition, a comparison will be made between carbon fiber fabrics having the 0 and 90 ° and 45 and -45° directions, to determine which of these two fabrics is most suitable in the design. Thus, it will be noted that the two fabrics will withstand loading without failure, however, the prosthesis being fabricated with carbon fiber fabric in the 0 and 90° directions will have a lower main maximum tension, thus, more indicated for this project.

Keywords: Prosthesis, equine, carbon fiber, finite elements, fiber direction.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Distribuição aproximada das lesões nas diversas regiões dos membros.	16
Figura 2 - Centro de gravidade do cavalo.	18
Figura 3 - Modelo da empresa VIP.	19
Figura 4 - Modelo da empresa <i>Equine Wobbler</i> .	20
Figura 5 - Modelo do Protesista Ortesista Antônio Carlos de Oliveira.	20
Figura 6 - Classificação entre os tipos de compósitos.	22
Figura 7 - Compósitos Laminados.	22
Figura 8 - Módulo de elasticidade x peso específico de diversos materiais.	24
Figura 9 - Curva tensão x deformação de diferentes fibras e do aço.	24
Figura 10 - Malha de elementos finitos de estruturas veiculares.	28
Figura 11 - Elementos tridimensionais.	28
Figura 12 - Representação de elemento de mola.	29
Figura 13 - Representação de elementos de mola no espaço tridimensional.	30
Figura 14 - Divisão do membro anterior do cavalo para as medições.	37
Figura 15 - Principais componentes que compõem a prótese e suas regiões.	38
Figura 16 - Principais forças no deslocamento do equino no seu ponto crítico.	40
Figura 17 - Análise Via Elementos Infinitos no Software ANSYS Workbench.	43
Figura 18 - Diferenças de espessuras no Suporte do Coto.	45
Figura 19 - Condições de Contorno na Análise Estrutural Estática.	46
Figura 20 - Elementos com tamanho 3 e 1 mm possuindo refinamento de malha.	47
Figura 21 - Tensão máxima principal para o tecido 0/90°.	48
Figura 22 - Tensão máxima principal para o tecido 45/-45°.	49
Figura 23 - Deslocamento para o tecido 0/90°.	49
Figura 24 - Deslocamento para o tecido 45/-45°.	50
Figura 25 - Critério de falha Tsai-Wu para o tecido 0/90°.	51
Figura 26 - Critério de falha Tsai-Wu para o tecido 45/-45°.	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades das lâminas de fibra de carbono que em função da orientação das fibras..	25
Tabela 2 - Propriedades comparativas entre as fibras de reforço....	26
Tabela 3 - Comparação entre diferentes tipos de fibras de carbono....	27
Tabela 4 - Dimensões do membro anterior do cavalo....	37
Tabela 5 - Propriedades Mecânicas do laminado em função das direções das fibras e do seu processo de laminação....	44
Tabela 6 - Convergência da malha em termos da tensão máxima principal para os elementos Shell 181 e Surf 154.....	47
Tabela 7 - Resultados obtidos na análise estrutural pelo método dos elementos finitos.....	52

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico1 - Resposta visando o bem estar animal .	34
Gráfico 2 - Resposta visando às características da prótese.	35
Gráfico 3 - Resposta visando à adaptação do animal.	35
Gráfico 4 - Resposta visando o investimento inicial.	35

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 OBJETIVO GERAL	12
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	12
1.3 JUSTIFICATIVA	13
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1 BIOMECÂNICA	14
2.1.1 Requisitos.....	15
2.1.2 Análises de Lesões	16
2.1.3 Distribuições Das Forças.....	17
2.2 PESQUISAS DE MERCADO	18
2.3 MATERIAIS COMPÓSITOS.....	21
2.3.1 Compósitos Estrutural Laminados.....	22
2.3.2 Fibra de carbono	23
2.5 MÉTODOS DOS ELEMENTOS FINÍTOS	27
2.5.1 Critério de Tsai-Wu	31
3 MÉTODO.....	31
3.1 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA.....	32
3.2 DEFINIÇÃO DO PLANO EXPERIMENTAL.....	32
3.3 COLETA DE DADOS	33
3.4 ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DOS DADOS	33
4 RESULTADOS	34
4.1 QUESTIONÁRIO.....	34
4.2 MODELO CAD	36
4.3 PRINCIPAIS CARREGAMENTOS SOLICITADOS PELO ANIMAL	40
4.4 ANÁLISE VIA ELEMENTOS FINITOS	42
4.4.1 ACP Pre	43

4.4.2 Análise Estrutural Estática.....	45
4.4.2 ACP <i>Post</i>	50
5 CONCLUSÃO.....	53
REFERÊNCIAS.....	55

1 INTRODUÇÃO

A perda de um membro ou até mesmo uma parte dele traz grandes mudanças nas atividades físicas e psicológicas ao indivíduo. Uma forma de amenizar e proporcionar maior independência ao envolvido é a colocação de próteses no local do membro amputado, podendo ser usado tanto para o ser humano quanto para os animais em geral. Atualmente, as próteses comercializadas têm como principais materiais a fibra de carbono, o aço inoxidável e titânio, sendo a fibra de carbono a mais usada devido a sua menor deformação e por sua leveza.

Assim, é comum encontrarmos proprietários de animais buscando na prótese uma alternativa para uma melhor condição de vida, porém em situações que o animal possui um peso elevado se torna um desafio projetar, devido ao elevado carregamento que se impõem sobre a prótese.

Com frequência se relata casos de equinos que sofreram algum tipo de lesão nas suas patas, e não conseguiram mais realizar o trabalho que era destinado a eles ou até mesmo se locomover. Assim, a maioria dos proprietários toma como decisão sacrificar o animal, devido ao custo elevado das próteses que estão sendo comercializadas no momento, e até mesmo a dificuldade de se encontrar fabricantes que possam atender ao pedido rapidamente.

A prótese em equino é algo ainda pouco estudado, porém, está ganhando maior importância à medida que novas legislações estão surgindo para garantir o bem estar animal. Além disso, a sociedade está desenvolvendo uma forma mais protetora e afetiva aos animais, com isso novos investimentos e tratamentos estão sendo realizados para melhorar tanto a qualidade quanto a expectativa de vida desses animais. Assim, devido ao predomínio das empresas fornecedoras desse tipo de prótese serem do exterior, elas encontram resistência da comercialização do produto no País, em virtude do seu custo elevado e da logística. Com isso, é necessários maiores estudos e fabricações a este tipo de prótese, para que então, possa trazer os benefícios que ela oferece.

Dessa maneira, este trabalho tem como finalidade desenvolver um novo modelo de prótese móvel, para isso, será utilizado o método dos elementos finitos

usando o *software* ANSYS *Workbench* para realizar a análise. Assim, a prótese será feita em fibra de carbono, tubos de alumínio e resíduo de pneus usados e será elaborado um comparativo dos resultados obtidos pelo modelo numérico, com as propriedades do material adquiridos pelo fornecedor, além disso, serão comparados os tecidos de fibra de carbono nas direções 0/90° e 45/-45°. Portanto, espera-se obter com a realização deste trabalho uma prótese que permitirá uma melhor mobilidade e qualidade de vida ao animal e também se torne mais acessível.

1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo deste trabalho é o projeto de uma prótese para membros torácicos de equinos, sendo ela móvel, permitindo que o animal tenha uma melhor mobilidade e qualidade de vida, tornando-se mais acessível economicamente. Assim será feito um estudo pelo método dos elementos finitos sobre a prótese para descobrir se irá resistir ao carregamento que é imposto pelo animal, e também, uma comparação entre os tecidos de fibra de carbono nas direções 0/90° e 45/-45°.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para cumprir com o objetivo geral, serão desenvolvidos os seguintes objetivos específicos:

- Revisão bibliográfica em relação à biomecânica, aos materiais compósitos, e também ao Método dos Elementos Finitos;
- Questionário referente as características principais da prótese;
- Definição do protótipo usando o CAD Autodesk Inventor;
- Definição do carregamento solicitado do animal no ponto crítico;
- Análise numérica via Elementos Finitos, usando como ferramenta o *software* ANSYS *Workbench*;

1.3 JUSTIFICATIVA

Devido ao pouco estudo referente a próteses em animais de grande porte e uma predominância de empresas, que possuem essa tecnologia, residirem no exterior, faz com que o valor da prótese e o prazo de entrega sejam elevados. Sendo assim, este trabalho vem a contribuir com essa problemática, pois, com isso, se dificulta que o proprietário possa adquirir a prótese, e que o animal consiga sobreviver um longo tempo deitado, devido o seu elevado peso. Dessa forma, é importante que existam maiores estudos relacionados à prótese para membros de equinos, tornando-se uma alternativa para que o animal não seja sacrificado.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, são apresentados os requisitos iniciais que o animal e o seu proprietário devem possuir para que possa ser implementada a prótese no equino. Também se menciona a análises de lesões o qual eventualmente esses animais possam sofrer, e de que maneira e feita à distribuição das forças. Além disso, se relata o que já é encontrado no mercado a respeito de prótese para membro torácico em equinos. Posteriormente, é mostrada uma revisão sobre Materiais Compósitos, por fim, o Método dos Elementos Finitos.

2.1 BIOMECÂNICA

O uso de uma prótese é uma alternativa que um indivíduo encontra quando se faz necessário à amputação de um membro, podendo ser a causa da amputação uma doença que não tenha tratamento ou por um acidente grave que não permita a regeneração do membro. Isso se reflete também nos equinos, os quais são muito dependentes dos seus membros inferiores para a realização de trabalho.

A prótese em membro inferior pode ser do tipo fixo, que estará fixada diretamente no osso do membro amputado, e do tipo móvel, a qual acopla o membro podendo ser retirada facilmente. Por mais que a prótese móvel seja mais fácil de adaptar no animal em consequência de uma cirurgia menos agressiva, é necessário entender quais são os requisitos que deve possuir tanto a prótese quanto o animal e seu proprietário para que seja realizada adequadamente a sua implementação.

2.1.1 Requisitos

Com a finalidade de definir qual a maneira mais adequada para se projetar uma prótese, é necessário entender quais são os critérios que o sistema musculoesquelético exige para que a prótese também atenda a esses requisitos (FALLIS, 2013).

Sendo eles:

- Que a força seja transmitida a prótese sem que ocorra uma deformação excessiva ou fratura;
- Uso de uma pequena quantidade de energia para que se mantenha um custo metabólico de manutenção. Assim, o equino não deve apresentar grandes esforços no movimento da prótese, pois isso poderá sobrecarregar o seu organismo e não deixará em equilíbrio o seu metabolismo;
- Realizar o transporte de maneira segura. Assim, o animal pode locomover-se e efetuar certos trabalhos sem que isso traga riscos a sua saúde;
- O equino não deve usar toda a sua energia com finalidade de se locomover, pois caso ocorra alguma situação de sobrecarga no animal que ele consiga superar a circunstância que se encontra. Dessa maneira, a prótese deverá contribuir para que exista esta reserva de energia, pois caso seja necessário, ela poderá ser usada.

Mesmo que a prótese atenda a todos esses requisitos, também é necessário que o equino seja um animal dócil e possa se adaptar tanto ao barulho que a prótese eventualmente possa fazer e até mesmo as exigências clínicas que uma cirurgia de amputação leva. A disposição do proprietário também é importante para o sucesso do processo, pois ele terá que ser capaz de fornecer cuidados posteriores ao longo da vida do animal (GRANT, 2008).

2.1.2 Análises de Lesões

Mesmo com os requisitos sendo atendidos, é importante ter conhecimento de qual o local que apresenta uma maior probabilidade de possuir uma lesão, pois a prótese será projetada para aquele devido local e, além disso, terá que atender as necessidades exigidas pelo membro lesionado.

Uma pesquisa foi feita para saber qual era a incidência das lesões locomotoras mais frequentes em cavalos, para isso, foram utilizados raios-x de 95 cavalos, realizados entre os anos de 2005 e 2011. Após isso, foram verificados os dados e executado uma análise estatística e assim pode se determinar quais eram os pontos mais críticos de lesões conforme apresenta a figura 1 (HORTA; GOMES; COSTA, 2012).

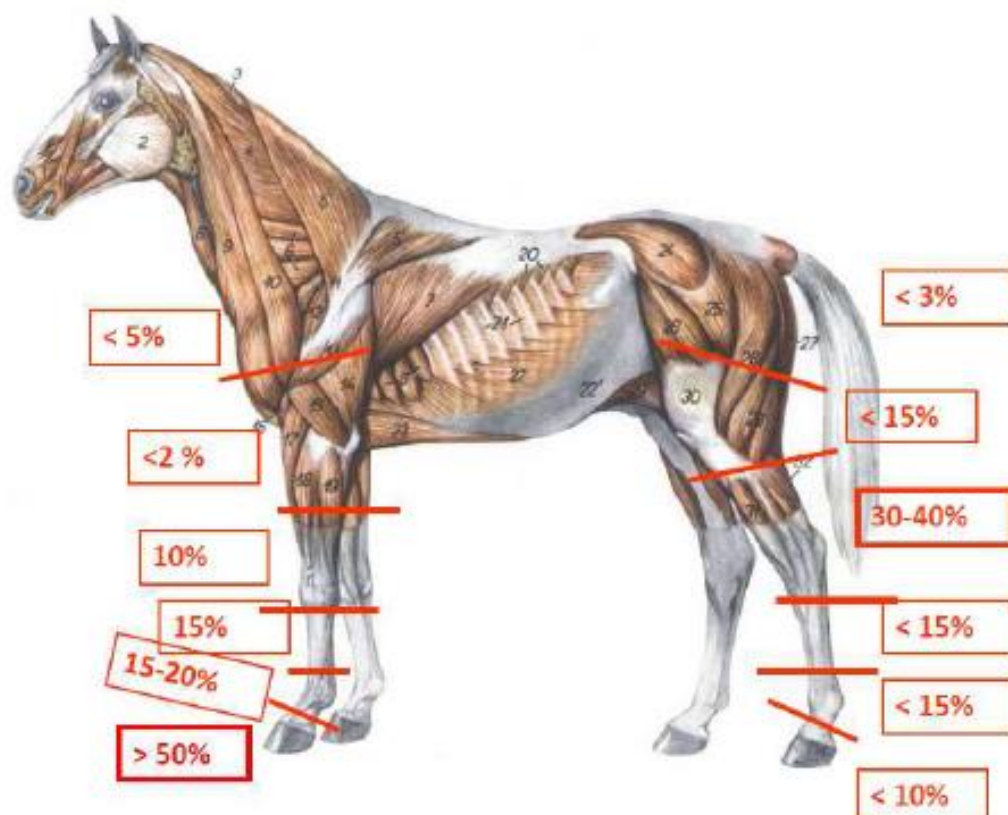


Figura 1 – Distribuição aproximada das lesões nas diversas regiões dos membros.
 Fonte: Horta, Gomes e Costa (2012)

Desse modo, a figura 1 mostra que a região onde apresenta uma maior chance de ocorrer uma lesão locomotora é nas patas frontais do cavalo, na ordem de 50%. Logo, é nesse local onde se tem maior necessidade do estudo de uma prótese, pois eventualmente será o local mais solicitado pelo animal.

2.1.3 Distribuições Das Forças

Sabendo que as patas frontais estão sujeitas a uma maior chance de fratura, é fundamental que se faça um estudo de como ocorre à distribuição das forças neste local, para que assim a prótese seja implementada adequadamente. No momento em que é levado em consideração o peso do animal, os membros anteriores de um cavalo estão submetidos a um estresse maior quando comparados com os membros posteriores. Conforme apresenta a figura 2, o centro de gravidade está deslocado para os membros anteriores, o que representa cerca de 60% do peso do animal, ou seja, uma força peso (F_{peso}) com uma magnitude dependente do peso estará agindo na prótese. Esta distribuição pode variar conforme o trabalho que for usado o cavalo, mudando assim seu centro de gravidade (HORTA; GOMES; COSTA, 2012).

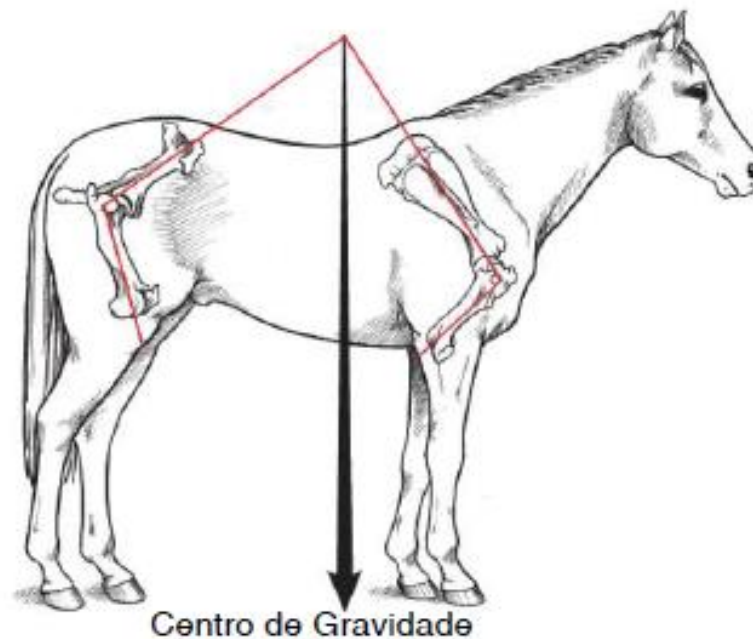


Figura 2 – Centro de gravidade do cavalo.
Fonte: Horta, Gomes e Costa (2012)

Outra força que também estará agindo sobre a prótese, é a força devido ao deslocamento do cavalo, a qual atua no sentido horizontal (F_{horiz}). Esta força deve ser maior que a força de atrito (F_{atrito}), a qual quer impedir o movimento do animal.

Desse modo, a força axial é dependente da velocidade que o cavalo estará se deslocando, e a velocidade máxima que o cavalo pode chegar, conforme Fallis (2013), é de 75 Km/h.

2.2 PESQUISAS DE MERCADO

Atualmente, a maioria dos fabricantes especializados em próteses para equinos residem em países do exterior. Portanto, se tem poucos modelos nacionais que possam ser adquiridos e adaptados nesses animais. Dessa maneira, foi realizada uma pesquisa de mercado e foram analisadas algumas marcas e modelos nacionais e internacionais existentes, assim, observaram-se algumas características, como vantagens e desvantagens e o tipo de material usado por cada modelo.

No caso da empresa *Veterinary Inclusive Prosthetics/Orthotics (VIP)*, empresa americana, a prótese é móvel e apresenta um polímero, que é modelado conforme o tamanho do membro do animal, juntamente com partes metálicas para dar rigidez à estrutura, como mostra a figura 3. Sua absorção também é feita por um polímero o qual diminui o impacto sobre o membro amputado do equino. Relatam-se casos do próprio fabricante que essa absorção às vezes não é feita adequadamente, provocando inchaço na pata do equino, e não deixando que ele se locomova apropriadamente.



**Figura 3 – Modelo da empresa VIP.
Fonte: VIP (2014)**

O outro fabricante é da empresa do *Equine Wobbler*, empresa também americana, o qual sua prótese é feita de fibra de carbono, podendo ser visualizado na figura 4, tendo assim maior leveza que a prótese anterior, e uma quantidade maior de partes móveis.



Figura 4 – Modelo da empresa *Equine Wobbler*
Fonte: GRANT (2008)

Já no Brasil foi possível encontrar o modelo do Protesista Ortesista Antônio Carlos de Oliveira que é especializado na produção de próteses para humanos. Sua prótese tem encaixe em polipropileno, tubo de alumínio de liga de titânio e revestimento de silicone a base de borracha para não machucar o animal, podendo ser observado na figura 5.



Figura 5 – Modelo do Protesista Ortesista Antônio Carlos de Oliveira.
Fonte: VALORIZAR (2013)

Os fabricantes, de forma geral, não disponibilizavam muitas informações sobre seus produtos. Porém os preços de uma prótese se iniciam no valor de US\$ 1200,00 e pode chegar até US\$ 3000,00, isso irá depender da seriedade do caso e do tipo de modelo oferecido pelo fabricante.

2.3 MATERIAIS COMPÓSITOS

Material compósito, “é qualquer material multifásico que exibe uma proporção significativa das propriedades de ambas as fases constituintes, tal que é obtida melhor combinação de propriedades”. Assim foram criados com a intenção de melhorar a combinações de características mecânicas, tais como a tenacidade, rigidez e resistência às condições do ambiente e temperatura elevada. A maioria dos materiais compósitos são constituídos por apenas duas fases, a fase matriz e a fase dispersa, o qual a fase matriz envolve a fase dispersa. Dessa maneira, suas propriedades são dependentes de três fatores:

- Das propriedades das fases constituintes;
- Das suas quantidades relativas;
- E da geometria da fase dispersa (forma, tamanho, a distribuição e a orientação das partículas) (CALLISTER; RETHWISCH, 2012).

Uma das características dos materiais compósitos é que a suas propriedades mecânicas variam de acordo com a direção cristalográfica, ou seja, são materiais anisotrópicos. Assim, é necessário entender quais são as direções de atuação dos esforços para que o laminado possa atender o que é exigido na direção especificada (SANTOS, 2013).

Os compósitos podem ser classificados de acordo com a figura 6, podendo ser do tipo reforçado com partículas, reforçado com fibras ou estrutural. Para este trabalho será usado o compósito estrutural laminado, pois apresenta propriedades suficientes para atender a demanda exigida pela prótese, tema deste trabalho.

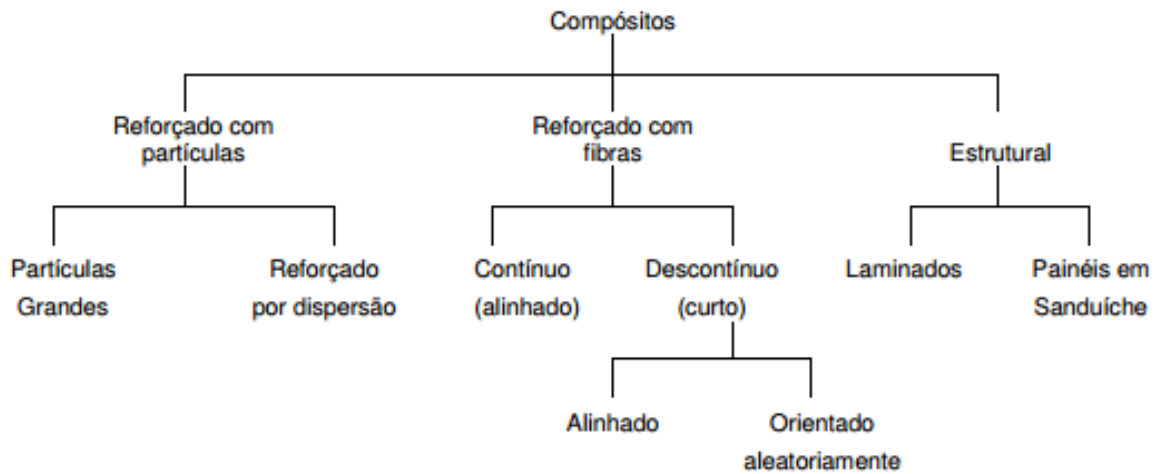


Figura 6 – Classificação entre os tipos de compósitos.
 Fonte: CALLISTER; RETHWISCH (2012)

2.3.1 Compósitos Estrutural Laminados

Os materiais compósitos laminados geralmente são constituídos de fibras que possuem um alto módulo de elasticidade, e elevada resistência mecânica envolvidas em uma matriz. São formados por lâminas ou painéis bidimensionais, conforme mostra a figura 7, os quais possui uma direção preferencial de alta resistência (SANTOS, 2013).

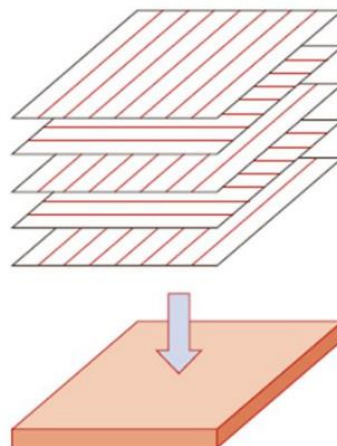


Figura 7 – Compósitos Laminados
 Fonte: CALLISTER; RETHWISCH (2012)

Um das estruturas que constituem os laminados são as fibras, o qual consiste em milhares de filamentos, onde o seu diâmetro varia entre 5 a 15 micrómetros. Os principais tipos de fibras existentes são: vidro, aramida ou kevlar, carbono, boro e carbeto de silício. Assim, essas seriam as fases dispersas, já a fase matriz pode ser dividida em dois grupos, o grupo termorrígido e o termoplástico. As matrizes poliméricas termoplásticas têm como propriedade tornarem-se mais dúcteis com o aquecimento e eventualmente fundem, e novamente endurece com o seu resfriamento. E as matrizes termorrígidas se tornam um material infusível e insolúvel através de uma reação química de cura e de caráter exotérmico (SANTOS, 2013).

2.3.2 Fibra de carbono

Um tipo de compósito laminado que frequente é utilizado devido as suas propriedades mecânicas é o laminado de fibra de carbono, sendo empregado principalmente na indústria aeroespaciais, navais e automobilísticas. Quando comparado com os metais, apresentam maior resistência ao ataque químico, são não magnéticos, não condutores, e possuem uma notável relação de resistência pelo peso. Esta comparação com os demais materiais é possível ser visualizada na figura 8, onde mostra o módulo de elasticidade em função do peso específico, assim realçando o elevado módulo de elasticidade com um baixo peso específico deste material (CAPELLA; SOUFEN, 2012).

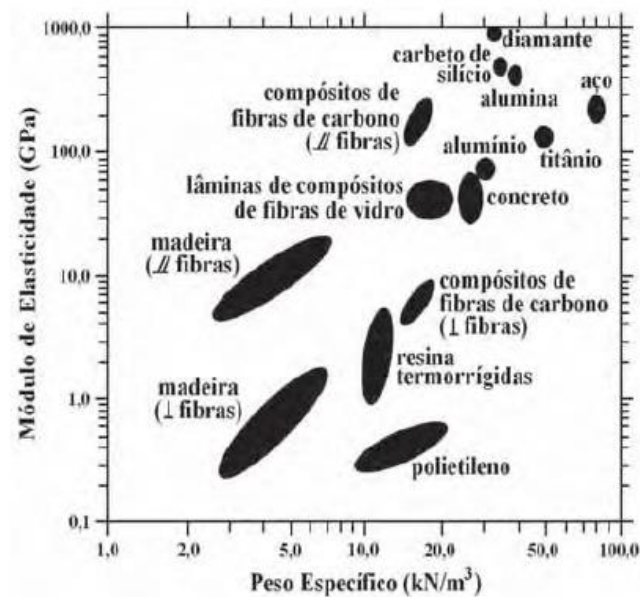


Figura 8 – Módulo de elasticidade x peso específico de diversos materiais.
Fonte: CAPELLA; SOUFEN (2012)

A fibra de carbono tem em comum com as demais fibras o comportamento linear da curva tensão em função da deformação até a sua ruptura, tal como mostrada na figura 9. Além disso, possui o seu peso específico intermediário quando comparada com a fibra de vidro, e a fibra de aramida. Sendo o peso específico da fibra de carbono entre 17 kN/m³ e 21 kN/m³ e a fibra de vidro e de aramida possuindo o maior e menor peso específico respectivamente (CARNEIRO; TEIXEIRA, 2008).

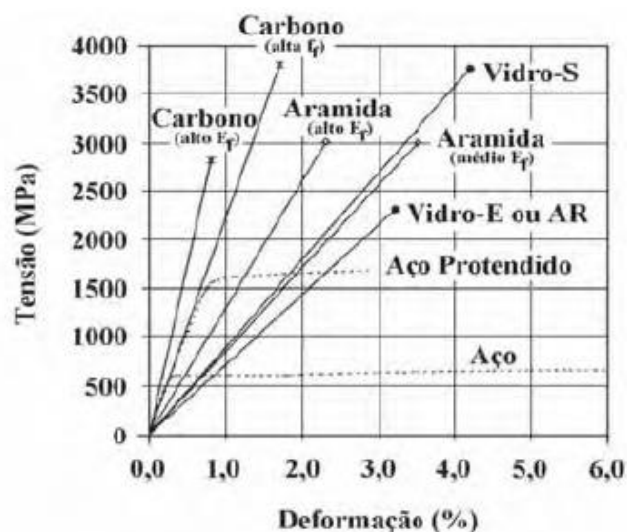


Figura 9 – Curva tensão x deformação de diferentes fibras e do aço.
Fonte: CARNEIRO; TEIXEIRA (2008)

Como mencionado anteriormente, as propriedades dos compósitos laminados são dependentes tanto da orientação quanto da porcentagem volumétrica de fibras e também da quantidade de folhas que serão adicionadas para definir a espessura, como nesse caso, a espessura da prótese. Na tabela 1 é possível observar algumas propriedades de laminados de carbono que possuem 2,5 mm de espessura e porcentagem média volumétrica de fibras de 50%. Assim, é possível notar a influência que essas variáveis têm em relação às propriedades do laminado.

Tabela 1 - Propriedades das lâminas de fibra de carbono em função da orientação das fibras.

Tipos de Lâminas	Resistência à Tração (MPa)		Módulo de Elasticidade (GPa)		Deformação (%)
	0°	90°	0°	90°	0°
Carbono (0°)	1020 a 2080	35 a 70	100 a 140	2 a 7	10 a 15
Carbono (0°/90°)	700 a 1020	700 a 1020	55 a 76	55 a 75	10 a 15
Carbono (+45°/-45°)	180 a 280	180 a 280	14 a 28	14 a 28	15 a 25

Fonte: CARNEIRO; TEIXEIRA (2008)

As fibras de carbono possuem excelente resistência à fadiga e a vibração, são fibras que tem elevada resistência com uma alongação muito pequena, devido a isso, apresentam pouca resistência ao impacto. Na tabela 2, é possível observar a comparação das propriedades entre as fibras de aramida, carbono e a de vidro (NASSEH, 2007).

Onde as letras A, B e C significam respectivamente, excelente, aceitável e baixo. Dessa maneira, entre as três fibras de reforço, àquela que possui menor custo é a fibra de vidro, porém ela tem menor resistência à compressão em comparação a fibra de carbono, e se tratando de prótese para equinos, o esforço que constantemente estará atuando na prótese será as tensões de compressão. Além disso, a fibra de vidro possui uma baixa resistência a fadiga e densidade superior, assim, obrigaria o animal a fazer maior esforço para se movimentar.

Tabela 2 – Propriedades comparativas entre as fibras de reforço.

	Aramida	Carbono	Vidro
Alta Resistência a Tração	B	A	B
Módulo de Tração	B	A	C
Resistência a Compressão	C	A	B
Módulo de Compressão	B	A	C
Resistência a Flexão	C	A	B
Módulo de Flexão	B	A	C
Resistência ao Impacto	A	C	B
Resistencia Interlaminar ao cisalhamento	B	A	A
Resistência ao Cisalhamento	B	A	A
Densidade	A	B	C
Resistência a Fadiga	B	A	C
Resistência ao Fogo	A	C	A
Isolamento Térmico	A	C	B
Expansão Térmica	A	A	A
Custo	C	C	A

Fonte: (NASSEH, 2007)

Existem quatro principais tipos de qualidades que podem ser classificadas as fibras de carbono, sendo elas: Alta resistência (HS – *High Strength*) ou Módulo Comercial, Módulo intermediário (IM – *Intermediary Modulus*), Alto Módulo (HM – *High Modulus*) e Módulo Superior (UHM – *Ultra High Modulus*). Na tabela 3 é possível ver a comparação entre as propriedades mecânicas que cada tipo de fibra de carbono apresenta (NASSEH, 2007).

Tabela 3 – Comparação entre diferentes tipos de fibras de carbono.

	Resistencia à Tração (MPa)	Módulo de Tração (GPa)	Densidade (g/cm³)	Módulo de Elasticidade Específico
Carbono HS	3500	160 – 270	1,8	90 – 150
Carbono IM	5300	270 – 325	1,8	150 – 180
Carbono HM	3500	325 – 440	1,8	180 – 240
Carbono UHM	2000	400+	2,0	240+

Fonte: (NASSEH, 2007)

2.5 MÉTODOS DOS ELEMENTOS FINITOS

A análise de Elementos Finitos, também chamado de método dos elementos finitos é um método de solução numérica que tem como finalidade resolver problemas dependentes de uma ou mais variáveis. Para situações simples, onde encontramos geometrias regulares, carregamento uniforme, material homogêneo, é possível obter resultados precisos descrevendo o problema usando apenas os métodos analíticos e algébricos, ou seja, pode-se descrever o problema em termos de expressões diferenciais parciais. Porém quando isso não é possível à análise por elementos finitos pode ser utilizada (COOK, 2002).

Algumas das vantagens em usar o método dos elementos finitos são (COOK, 2002):

- Pode ser aplicado para vários tipos de problemas, como por exemplo, transferência de calor, análise de tensões, campo magnético, entre outros.
- Não tem restrição devido à geometria. O corpo ou a região de análise pode ter várias formas.
- Não tem restrição devido a sua condição de contorno ou pelo tipo de carregamento.
- O método não se restringe somente aos materiais isotrópicos

Este método consiste no princípio de discretizar, ou seja, dividir uma estrutura em pequenas partes para transformar um problema de engenharia contínuo em vários problemas mais simples, como mostra a figura 10, onde um chassi de veículo foi dividido em vários elementos (ALVES.F, 2002).

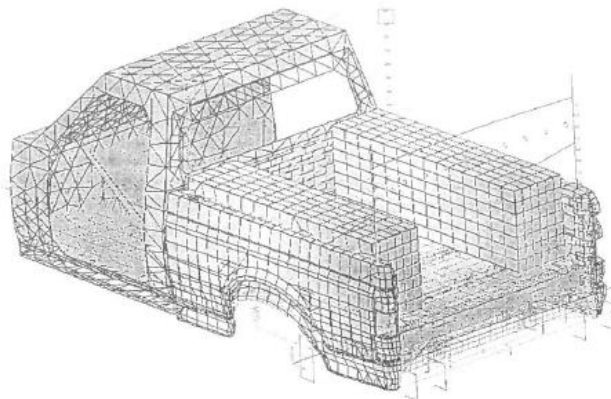
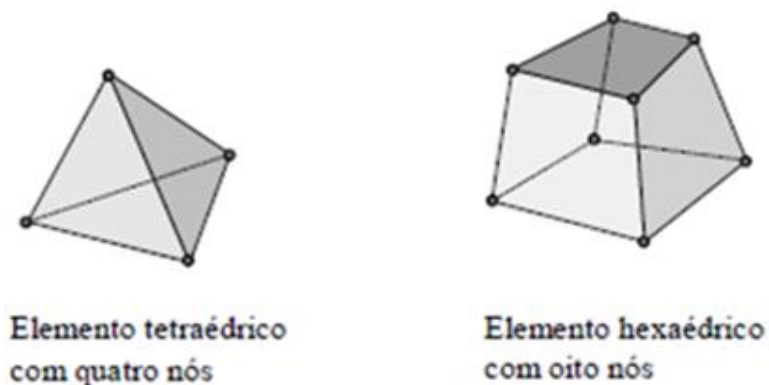


Figura 10 – Malha de Elementos Finitos de Estruturas Veiculares
Fonte: ALVES (2002)

Existem vários tipos de elementos, os quais apresentam formas geométricas diversas, e o que irá definir qual tipo de forma utilizar será a análise que se deseja realizar do problema, podendo ser uni, bi ou tridimensional. Nesse trabalho será feito a análise de estrutura estática e se usará os elementos tridimensionais para gerar a sua malha. Como exemplo, mostrado na figura 11, o elemento tetraédrico, possuindo quatro nós e o hexaedro possuindo oito nós. Assim, como o corpo estará inserido em um meio tridimensional os nós terão três graus de liberdade, ou seja, três translações nas direções x , y e z (MAGALHÃES, 2003).



Elemento tetraédrico
com quatro nós

Elemento hexaédrico
com oito nós

Figura 11 – Elementos Tridimensionais.
Fonte: MAGALHÃES (2003)

Dessa maneira, o elemento tetraédrico que possui quatro nós terá 12 graus de liberdade, já o hexaédrico que possui oito nós terá 24 graus de liberdade. Nesses elementos também é possível a colocação de um nó intermediário nas arestas entre dois nós. O motivo da colocação desses nós intermediários é o aumento do número de graus de liberdade do elemento, assim permitindo um cálculo mais preciso da deformação dentro do elemento, como consequência das tensões (ALVES.F, 2002).

Para que se possa determinar o deslocamento ocorrido em cada nó, pode-se fazer uma comparação com um sistema mola, onde os elementos serão as molas e os pontos de apoio, de aplicação das forças e de divisão entre os dois componentes serão os nós, como mostra a figura 12 (ALVES.F, 2002).

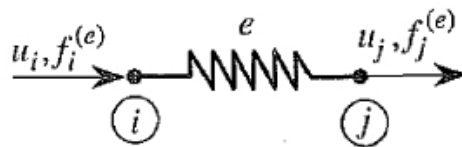


Figura 12 – Representação de elemento de mola.
Fonte: ALVES (2002)

Assim, o deslocamento é obtido da seguinte equação (1):

$$\{F\} = [k] \times \{u\} \quad (1)$$

Sendo $\{F\}$ a matriz das forças nodais, $[k]$ a matriz rigidez do elemento e $\{u\}$ a matriz deslocamentos nodais.

Nos elementos bi e tridimensionais se tem deslocamentos e rotações em todas as direções, assim, considera-se uma mola para cada um dos graus de liberdade, utilizando mola translacional para deslocamento e mola rotacional para rotação, como mostrado na figura 13. Então, usando a formulação matemática do elemento de mola, se constrói a base para a montagem de todos os outros elementos (ALVES.F, 2002).

deformações normais e cisalhantes, respectivamente; e C_{ij} com $i e j = 1, \dots, 6$ são os elementos da matriz rigidez do material (TARSO R.MENDONÇA, 2005).

2.5.1 Critério de Tsai-Wu

Para que possamos determinar se a prótese irá suportar os esforços que são submetidos sobre ela, é necessário que seja adotado um critério de falha o qual atenda ao carregamento e ao tipo de material que esta sendo usado. No caso, esta sendo admito que o suporte que estará em contato com a parte restante do membro amputado, ou seja, o coto, será fabricado em fibra de carbono.

Assim, o critério de falha que será escolhido é o critério de Tsai-Wu, pois é amplamente utilizado para determinar o fator de segurança em materiais compósitos anisotrópicos. Este critério leva em consideração a energia de esforço total, ou seja, tanto a energia de distorção quanto a de dilatação para prever falhas. Este critério é considerado mais geral quando comparado com o critério de Tsai-Hill, por exemplo, porque consegue distinguir entre as resistências a falha de compressão e de tensão. Além disso, é um melhoramento do critério de falha quadrática geral proposta pela Gol'denblat e Kopnov (DASSAULT SYSTEMES, 2015).

O critério de falha de Tsai-Wu apresenta limitações para prever diferentes modos de falha, inclusive falha de fibra, de matriz e de interface entre fibra e matriz. Assim, quando o índice do critério atingir um valor maior ou igual a 1, indica que ocorreu o surgimento de falha do material (DASSAULT SYSTEMES, 2015).

3 MÉTODO

Neste capítulo será apresentada a metodologia utilizada no trabalho e ela será dividida pelas seguintes etapas: formulação do problema, definição do plano experimental, coletas de dados e por fim a análise e interpretação dos dados.

3.1 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

O estudo iniciou procurando aprimorar as próteses que são usadas nos equinos, pois devido ao preço elevado e ao alto prazo de entrega, ocasionado pelas empresas residirem no exterior, faz com que os proprietários não utilizem esse tipo de tecnologia e assim acabem sacrificando o animal, o qual poderia ser usado para outras funções.

3.2 DEFINIÇÃO DO PLANO EXPERIMENTAL

Inicialmente, para entender quais são os requisitos mais importantes que uma prótese em equinos deve possuir, é necessário que proprietários, médicos veterinários ou interessados na área, respondam uma pesquisa revelando as principais necessidades que a prótese precisa suprir. Assim, é enviado um questionário *online*, para estudantes de medicina veterinária da Universidade Federal Catarinense (IFC) campus Concórdia, perguntas que tenham como foco o bem estar animal, à característica da prótese, a adaptação do animal e o custo inicial.

Após isso, sabendo que o ponto crítico no animal é a região torácica, se analisa as forças que estão agindo naquele ponto, usando como referência as medidas das dimensões e do peso de um cavalo. Assim, é possível determinar a quantidade do peso do animal que está sendo suportado pelo membro dianteiro.

Empregando como orientação a velocidade máxima que um cavalo pode chegar, e supondo que um animal machucado só terá a metade do rendimento, é concebível encontrar a aceleração máxima imposta pelo animal, e por fim, usando a equação da segunda lei de Newton obter a força máxima horizontal imposta pelo animal.

O modelo do protótipo é projetado usando um cavalo como referência e utilizando o *software* Autodesk Inventor como ferramenta, possibilitando assim que

seja feita a montagem das peças para que na sequência possa ser exportada para o software *ANSYS Workbench*. Para a realização da análise numérica utilizando o método dos elementos finitos, é usado o software *ANSYS Workbench* que permite o estudo de materiais anisotrópicos, dessa forma, é feita a análise dos tecidos em fibra de carbono nas direções 0/90° e 45/-45°.

3.3 COLETA DE DADOS

Com a utilização do software *ANSYS Workbench* será coletado os dados como a tensão máxima principal, deslocamento e o índice de critério de falha de Tsai-Wu do modelo testado, tanto para o tecido nas direções 0/90° quanto nas direções 45/-45°. Assim, será feita a análise primeiramente usando o processador ACP Pre, logo na sequência será realizada a análise estrutural estática e por fim será executada a análise utilizando o processador ACP Post para a obtenção dos dados.

3.4 ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DOS DADOS

Com os dados obtidos pela análise via elementos finitos, será feita a comparação com as propriedades mecânicas adquiridas pelo fornecedor, *Barracuda Advanced Composites*, dos tecidos de fibra de carbono em 0/90° e 45/-45° em função do modo de fabricação do laminado. Assim, será verificado se a prótese irá suportar o carregamento imposto pelo animal e qual é o tecido mais indicado.

4 RESULTADOS

Neste capítulo serão abordados quais são os resultados referentes ao questionário, qual o modelo CAD que se obteve para a prótese, os valores dos principais carregamentos que foram solicitados pelo animal, e a tensão máxima principal, deslocamento, e se o houve falha, nos tecidos de fibra de carbono nas direções 0/90° e 45/-45°.

4.1 QUESTIONÁRIO

Para fins de determinar o que um proprietário de um equino acharia importante em uma prótese caso o seu animal viesse a precisar, foi enviado um questionário para quarenta estudantes de Medicina Veterinária responder a respeito desse tema. Assim, foram realizadas quatro perguntas onde esses estudantes deveriam escolher apenas uma alternativa sendo a mais importante que uma prótese deveria possuir. Visando o bem estar animal, quanto à característica da prótese, a adaptação do animal e referente ao custo inicial. Com isso foi obtido os seguintes resultados:

1. Visando o bem estar animal, julgue o que você considera mais importante para uma prótese:

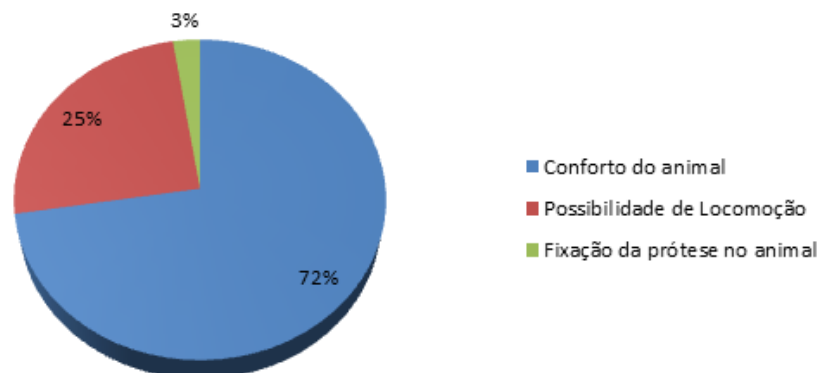


Gráfico1 – Resposta visando o bem estar animal.
Fonte: Acervo Pessoal

2. Quando às características da prótese, o que você considera mais relevante:

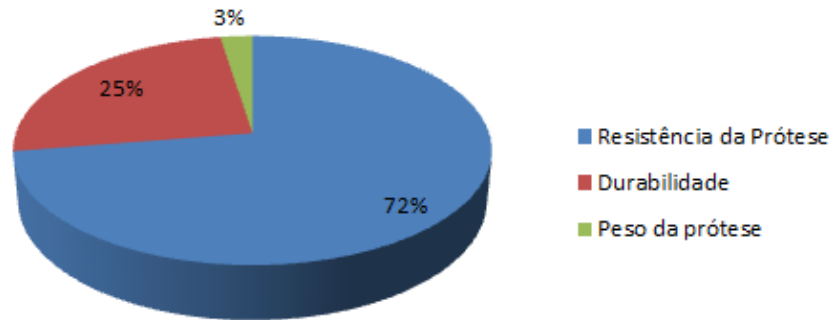


Gráfico 2 – Resposta visando às características da prótese.
Fonte: Acervo Pessoal

3. O que você considera mais importante para a adaptação do animal com a prótese:

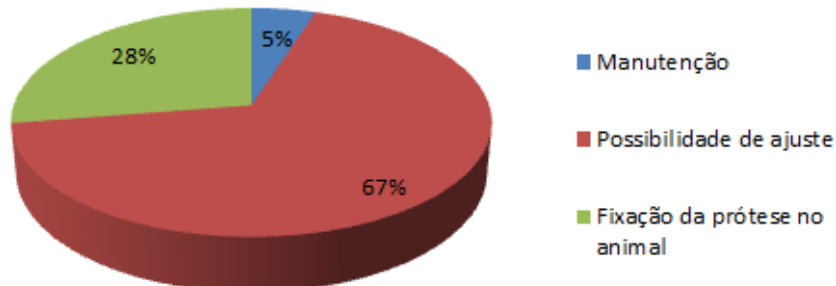


Gráfico 3 – Resposta visando à adaptação do animal.
Fonte: Acervo Pessoal

4. Em relação ao investimento inicial, o que você julga como sendo a característica mais importante:

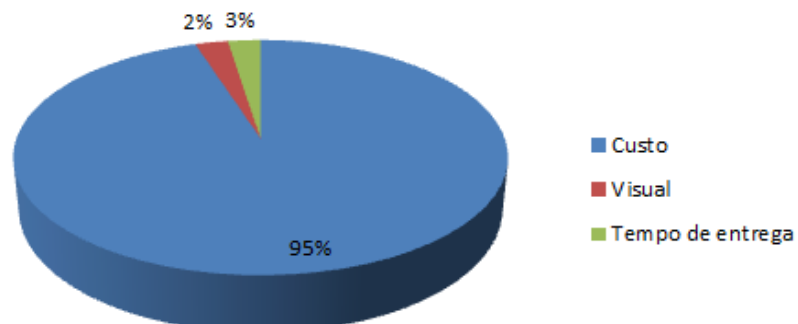


Gráfico 4 – Resposta visando o investimento inicial.
Fonte: Acervo Pessoal

Com esse questionário, pode-se notar que os fatores mais importantes são que a prótese seja confortável para o uso do animal, pois caso contrário pode provocar inchaço do membro torácico e assim não permitindo que se utilize. Também, que possua elevada resistência, para que possa aguentar os esforços que forem exigidos sobre ela. Além disso, que seja regulável, pois com uma prótese regulável é possível diminuir a quantidade de próteses que o cavalo tenha que usar até que chegue à idade adulta.

Por fim, o custo que a prótese irá possuir, pois deverá ser acessível ao proprietário dos equinos para que eles tomem a decisão de comprar a prótese ao invés de sacrificar o animal.

4.2 MODELO CAD

Para a realização de um modelo, é necessário que tenha um animal como base para que sejam efetuadas as medições sobre ele. Assim, se utilizou como modelo um cavalo de porte médio com o peso de aproximadamente 500 Kg, o qual foi dividido o seu membro anterior seguindo a divisão óssea do animal, ficando da seguinte maneira:

- Região A: Composto pelos ossos Rádio e Carpo;
- Região B: Formado pelo Metacarpo;
- Região C: Distância da Falange Proximal até a Distal;
- Região D: Dimensão do membro torácico do equino.

Além disso, foi realizada a medição perimetral, usando uma fita métrica, dos membros citados anteriormente nas marcações brancas, como mostra a figura 14. Sendo seis marcações da região A, três marcações da região B e uma marcação da região C, tendo uma distância equidistante entre elas.



Figura 14: Divisão do membro anterior do cavalo para as medições.
Fonte: Acervo Pessoal.

Assim, pode-se obter medidas que mostrem qual a variação perimetral do membro anterior nas regiões A, B e C, obtendo os resultados da tabela 4.

Tabela 4: Dimensões do membro anterior do cavalo.

Peso	≈ 500 Kg
A	460 mm
B	275 mm
C	180 mm
D	920 mm
Perímetro A-1	540 mm
Perímetro A-2	505 mm
Perímetro A-3	410 mm
Perímetro A-4	330 mm
Perímetro A-5	300 mm
Perímetro A-6	305 mm
Perímetro B-1	190 mm
Perímetro B-2	195 mm
Perímetro B-3	260 mm
Perímetro C-1	425 mm

Fonte: Acervo pessoal.

Desse modo, a dimensão do membro torácico é de 920 mm e a região A indicaria o local do coto do animal no caso de ser realizada uma cirurgia de amputação. Nas regiões B e C foram realizadas medições para que a prótese mantenha as mesmas proporções que o animal possui.

Com isso, usando o *software Inventor* foi possível realizar o modelamento da prótese, o qual está representado na figura 15, assim os principais componentes que a compõem são: Suporte do coto, Tubo de regulação, Sistema de amortecimento e Resíduo de pneu.

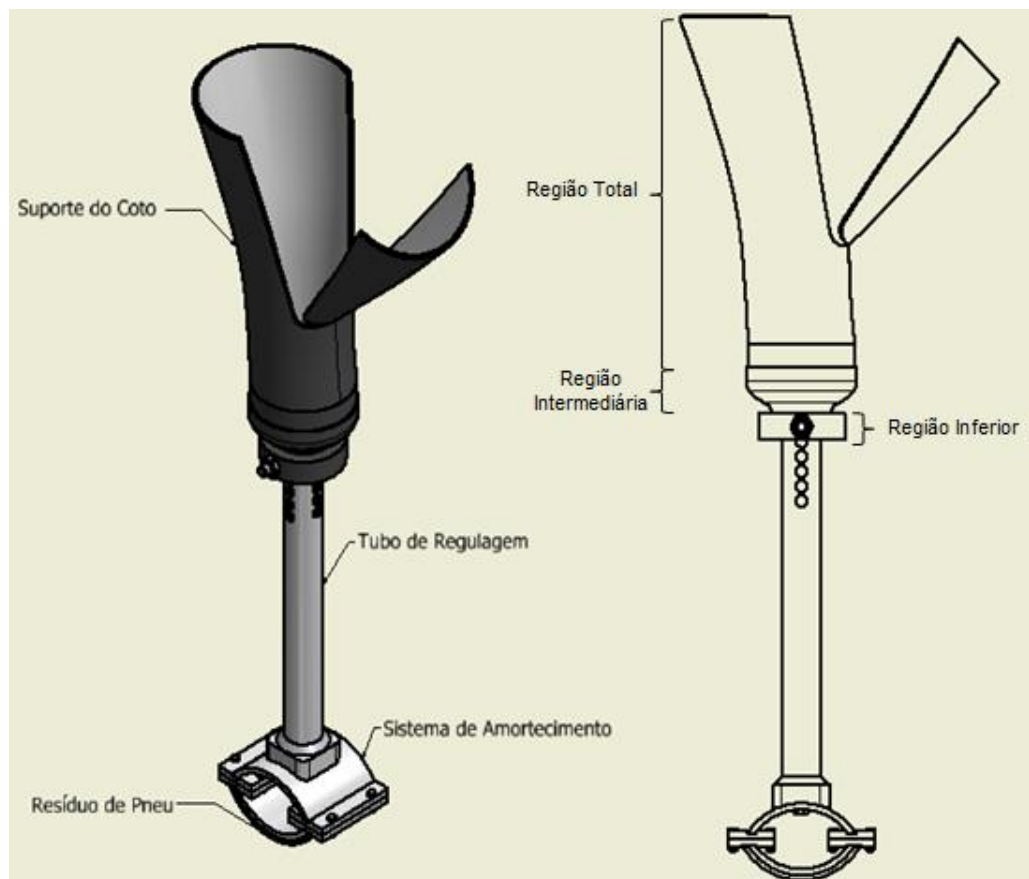


Figura 15: Principais componentes que compõem a prótese e suas regiões.
Forte: Acervo pessoal.

O Suporte do Coto é um componente que tem como finalidade sustentar e manter fixo o coto do animal na prótese quando ele se movimentar. O suporte apresenta uma abertura que é controlada com uma dobradiça, o qual permite que seja fixada a prótese no animal sem causar atrito com o coto. Além disso, essa

abertura é fechada por amarrações, a qual não está representada no desenho. Este componente será fabricado em fibra de carbono, e também é sobre ele que é feito um estudo estrutural, via elementos finitos para saber quais são as regiões que precisam de uma maior espessura para suportar o carregamento imposto pelo animal.

Assim, o Suporte do Coto é dividido em três regiões, como mostra a imagem 15, sendo elas, a região inferior que é o local onde é fixado o pino e consequentemente o local com maior tensão. A região Intermediária é logo acima da região inferior e é aonde existem curvaturas na peça para diminuir concentrações de tensões. E a região total que é se inicia depois da região do meio e termina no final da peça.

O Tubo de Regulagem é uma peça usada tanto para fazer a união entre o suporte do coto com o sistema de amortecimento quanto para regular a altura necessária para a adaptação da prótese no animal. Esse componente possui 6 furos passantes nos seus quadrantes e a distância do centro de furação de um quadrante para o outro é de 1 cm, assim possuindo 12 possíveis regulagens. Esse componente será fabricado usando tubo de alumínio 6061.

Já o Sistema de Amortecimento tem como finalidade amortecer o impacto causado pelo deslocamento do animal, essa peça também será fabricada usando tubo de alumínio 6061 cortado na direção horizontal. Seu amortecimento será realizado devido à deformação elástica do material que proporciona uma deformação reversível.

O Resíduo de Pneu terá como função aumentar o atrito da prótese com o solo, assim transmitindo maior estabilidade para que o animal possa se locomover com segurança. Além disso, se torna uma alternativa de baixo custo para contribuir com a diminuição do preço da prótese.

4.3 PRINCIPAIS CARREGAMENTOS SOLICITADOS PELO ANIMAL

Como mencionado anteriormente, a força peso é dependente da massa que o equino apresenta e a porcentagem do peso que é exposto na pata do animal quando ele se movimenta, o qual essa porcentagem varia com o centro de gravidade do equino. Desse modo, será feito uma estimativa do carregamento dinâmico para o estático, assim tendo uma percepção do esforço que o animal estaria fazendo sobre a prótese. A força peso e as demais forças principais estão ilustradas na figura 16.



Figura 16: Principais forças no deslocamento do equino no seu ponto crítico.
Fonte: GUIA (2013)

O cavalo escolhido, o qual será usado como modelo, possui massa total de aproximadamente 500 Kg. Adotando que 60% da massa do animal ficam distribuídos nas patas dianteiras, ou seja, a massa local (m_l), e no momento que o animal esta galopando apenas um das patas da frente mantém contanto com o chão, teremos que a força peso (F_{peso}) e a massa local (m_l) serão,

$$m_l = 500 \times 0.6 = 300 [Kg] \quad (1)$$

$$F_{peso} = m_l \times g = 300 \times 9,81 = 2943 [N] \quad (2)$$

A força horizontal dependerá da aceleração (a) transmitida pelo passo que o cavalo tem para atingir certa velocidade (V_f) em uma distância (ΔS). Esses fatores dependem muito do modo que o cavalo se movimenta, devendo assim pressupor valores que possuam uma margem de segurança ideal.

Assim, sabendo que a velocidade máxima em que um cavalo pode chegar é de 75 Km/h, e que ela pode ser atingida numa distância de 200 metros partindo do repouso, podemos supor que um animal machucado só conseguiria chegar numa velocidade de 40 Km/h também numa distancia de 200 metros (Guia, 2013).

Assim teremos que,

$$V_f = \frac{40}{3,6} = 11,11 [m/s] \quad (3)$$

$$a = \frac{(V_f^2 - V_i^2)}{2x\Delta S} = \frac{(11,11^2 - 0)}{2 \times 200} = 0,308 [m/s^2] \quad (4)$$

Sendo assim, deve-se determinar a força de atrito (F_{atrito}) que esta agindo na pata do animal, desse modo, o coeficiente de atrito cinético (μ) mais próximo encontrado da situação que se pretende fabricar a prótese será dos pneus com a estrada, tendo um valor de 0,5. (PROVENZA, 1996)

Dessa maneira,

$$F_{atrito} = \mu \times F_{normal} \quad (5)$$

$$F_{normal} = F_{peso} = 2943 [N] \quad (6)$$

$$F_{atrito} = 0,5 \times 2943 = 1471,5 [N] \quad (7)$$

Sabendo que:

$$\Sigma F_x = m_l \times a \quad (8)$$

$$F_{horiz} - F_{atrito} = m_l \times a \quad (9)$$

$$F_{horiz} = F_{atrito} + (m_l \times a) \quad (10)$$

$$F_{horiz} = 1471,5 + (300 \times 0,308) = 1563,9[N] \quad (11)$$

Com isso, teremos que a força resultante (F_{result}) imposta no suporte do coto será igual ao modulo da força axial com a força peso.

$$F_{result} = \sqrt{(1563,9)^2 + (2943)^2} = 3332,7 [N] \quad (12)$$

Desse modo, com o carregamento já determinado é possível iniciar a análise via elementos finitos. Sendo definido qual é a melhor maneira de fabricar o suporte do coto do animal, para que possa suportar os esforços que serão impostos sobre ele.

4.4 ANÁLISE VIA ELEMENTOS FINITOS

O *software* utilizado para a análise via elementos finitos foi o ANSYS *Workbench* e nele será feita dois estudos sobre o Suporte do Coto. No primeiro estudo serão utilizados tecidos de fibra de carbono nas direções 0/90° e no segundo estudo nas direções 45/-45°, os dois tecidos são encontrados comercialmente.

Para a realização da análise, foi aplicada a sequencia representada na figura 17, onde primeiramente usou-se o processador ACP *Pre*, para informar as características tanto do compósito quanto do modelo. Na sequência se fez uma Análise Estrutural Estática (*Static Structural*) para obter o deslocamento da prótese e a sua tensão máxima principal, e por fim pelo processador ACP *Post* obteve-se os resultados utilizando o critério de falha de Tsai-Wu.

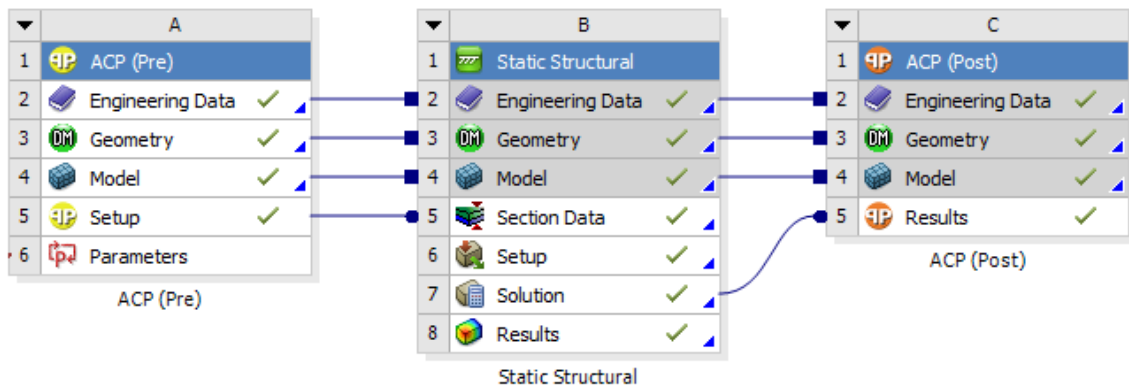


Figura 17: Análise Via Elementos Infinitos no Software ANSYS Workbench.
Fonte: Acervo pessoal.

4.4.1 ACP Pre

No ACP Pre iniciou informando qual o tipo de material esta sendo utilizado nesse estudo. Como se trata de um material compósito, suas propriedades mecânicas dependem de como é feita a laminação e não somente das propriedades da fibra de carbono, como ocorre nesse caso. Assim, primeiramente deveria se produzir um corpo de prova e realizar inúmeros testes, seguindo normas para obter as reais propriedades que o laminado possui.

Porém, o que se fez foi através do fornecedor, Barracuda *Advanced Composites*, se adquiriu as propriedades mecânicas do tecido em fibra de carbono nas direções $0/90^\circ$ e $45/-45^\circ$ em função do modo de fabricação do laminado, como mostra a tabela 5. Com isso, se obteve como resultados as propriedades mecânicas do laminado, onde os modos de laminação são do tipo *Handy Lay* (laminação manual) e por Infusão (laminação usando uma bolsa de vácuo na pressão maior que a atmosférica).

Nesse estudo foi admitido que o processo de laminação usado para a fabricação é o *Vacuum bag* (laminação usando uma bolsa de vácuo na pressão atmosférica), pois permite melhores propriedades mecânicas do que o *Handy Lay* e é um processo mais barato que por Infusão. Desse modo, como a laminação

Vacuum bag não se encontra na tabela, serão adotados os valores do processo *Handy Lay*, por segurança, para a comparação dos resultados na análise.

Tabela 5: Propriedades Mecânicas do laminado em função das direções das fibras e do seu processo de laminação.

Tipo de Filamento	-	0/90°	45/-45°
Peso (g/m²)	-	768	778
Densidade (g/cm³)	Infusão	1,53	1,53
	<i>Hand Lay</i>	1,41	1,41
% Fibra	Infusão	65	65
	<i>Hand Lay</i>	45	45
Módulo de Elasticidade (GPa)	Infusão	63,7	41,5
	<i>Hand Lay</i>	42,4	27,5
Tração (MPa)	Infusão	703,26	496,42
	<i>Hand Lay</i>	468,84	330,95
Compressão (MPa)	Infusão	496,42	317,16
	<i>Hand Lay</i>	330,95	213,74
Flexão	Infusão	461,95	317,16
	<i>Hand Lay</i>	310,26	213,74

Fonte: (NASSEH, 2007)

Dessa maneira, comparando as propriedades mecânicas da tabela com os materiais compósitos da biblioteca do software ANSYS notou-se que o material que se aproximou mais da situação é o *Epoxy Carbon Woven 230 GPa Wet*, o qual é um material feito de tecido de fibra de carbono que utiliza a resina Epoxy para a laminação.

Além disso, a característica *Wet* se refere ao processo de fabricação, a qual não apresenta muito controle na quantidade de Epoxy que ainda irá permanecer na peça. Ao contrário do processo *Dry*, que permite maior controle na quantidade de Epoxy e conseqüentemente tendo peças mais leves, porém sendo um processo com o custo mais elevado. Sendo assim, alguns dos processos de fabricação *Wet* mais comuns são o *Handy Lay*, Infusão e *Vacuum bag*.

Por fim, para determinar o tipo de fibra de carbono a ser utilizado e definido a espessura do tecido, o fornecedor indicou o tecido RC300P para o projeto, o qual possui uma espessura de 0,32 mm, sendo trama *Plain* em carbono e tendo uma gramatura de 285 g/m². Desse modo, a espessura na região total é 2,56 mm,

na região Intermediária ficou com uma espessura de 7,04 mm e na região inferior de 25,28 mm, como mostra a imagem 18.

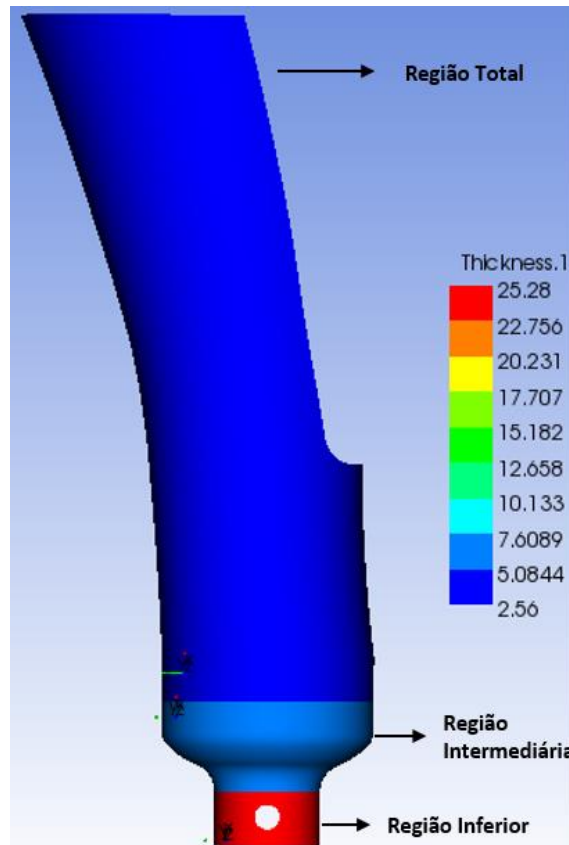


Figura 18: Diferenças de espessuras no Suporte do Coto.
 Fonte: Acervo pessoal

4.4.2 Análise Estrutural Estática

Na análise estrutural estática é necessário definir algumas condições de contorno, podendo ser observadas na figura 19, onde na superfície da região total estariam atuando a força resultante, a qual é composta pela força peso e a força axial. Além disso, nas furações necessárias para o parafuso, foi imposto que o deslocamento e a rotação nas direções x, y e z seriam nulos, pois, como existe um parafuso naquele local, que tem como finalidade não permitir a movimentação do Suporte do coto, impediria que a peça se movimente e rotacione nessas direções.

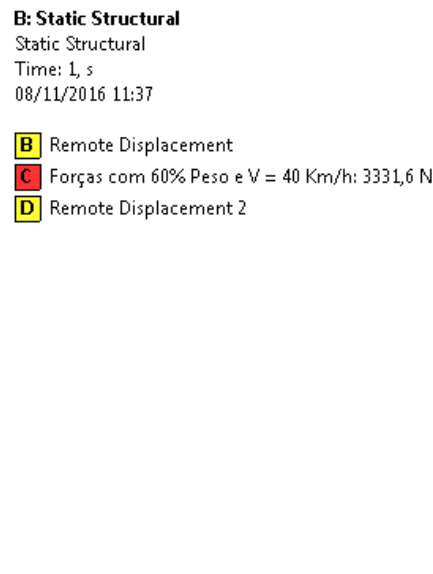


Figura 19: Condições de Contorno na Análise Estrutural Estática.
Fonte: Acervo pessoal.

Com isso, para que seja possível realizar a análise, também é necessário a adequação da Malha com o estudo que se deseja implementar. Somente no caso com as fibras $0/90^\circ$ foi realizado uma convergência da malha, em termos da tensão máxima principal para os elementos *Shell 181* e *Surf 154* pois, caso a malha viesse a convergir para esse caso, também iria convergir para a situação de $45/-45^\circ$.

O elemento *Shell 181* é apropriado para situações em que a casca se apresenta com uma fina estrutura, ou até mesmo moderadamente grossa. Esse é um elemento de quatro nós o qual possui seis graus de liberdade em cada nó.

Já o elemento *Surf 154* pode ser usado para várias aplicações de carga e tipos de superfícies e também aplicado na análise de estruturas tridimensionais, onde várias cargas e tipos de superfícies podem existir simultaneamente. O elemento é definido por quatro a oito nós, juntamente com as propriedades do material.

Assim, foi efetuada a variação do tamanho do elemento, sendo de 8 a 3 mm de variação na região total, com uma parte na região Intermediária. E de 8 a 1 mm de variação na região inferior, a qual possui refino de malha, incluindo uma pequena parte na região Intermediária. Foram escolhidos elementos menores nessa última situação, pois é uma região mais crítica e necessita resultados mais precisos,

como mostra a imagem 20, a qual possui elementos com 3 e 1 mm, tendo refinamento de malha no perímetro da furação.

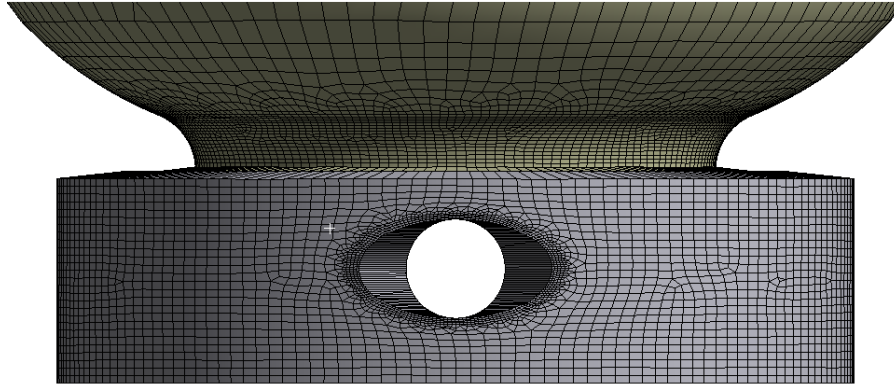


Figura 20: Elementos com tamanho 3 e 1 mm possuindo refinamento de malha no perímetro da furação.

Fonte: Acervo pessoal.

Desse modo, como mostra a tabela 6, os números de elementos variam de 1929 a 14679, sendo que a tensão máxima principal indica uma convergência para próximo de 200 MPa e no deslocamento total, praticamente não ocorre variação, ficando entre 3,2 a 3,6 mm.

Tabela 6: Convergência da malha em termos da tensão máxima principal para os elementos *Shell 181* e *Surf 154*.

<i>Shell 181 / Surf 154</i> (elementos de quatro nós)			
Tamanho do elemento (mm)	Número de Elementos (N)	Tensão Máxima Principal (MPa)	Deslocamento Total (mm)
8,0 / 8,0	1929	133,37	3,5999
5,0 / 5,0	2815	173,6	3,4647
3,0 / 3,0	5062	160,32	3,3742
2,0 / 2,0	9419	183,3	3,3022
3,0 / 1,0	12856	176,62	3,2308
3,0 / 1,0 / <i>Refinement</i>	14679	194,9	3,2302

Fonte: Acervo pessoal.

Por fim, é possível obter os resultados da tensão máxima principal, e do deslocamento para os tecidos de fibra de carbono nas direções 0/90° e 45/-45°.

Assim, como mostra figura 21, o Suporte do Coto fabricado com o tecido 0/90° apresenta a tensão máxima principal, sendo relativamente baixa em toda a peça, tendo somente elevadas tensões na região interna da furação, a qual pode chegar ao seu valor máximo de 194,9 MPa.

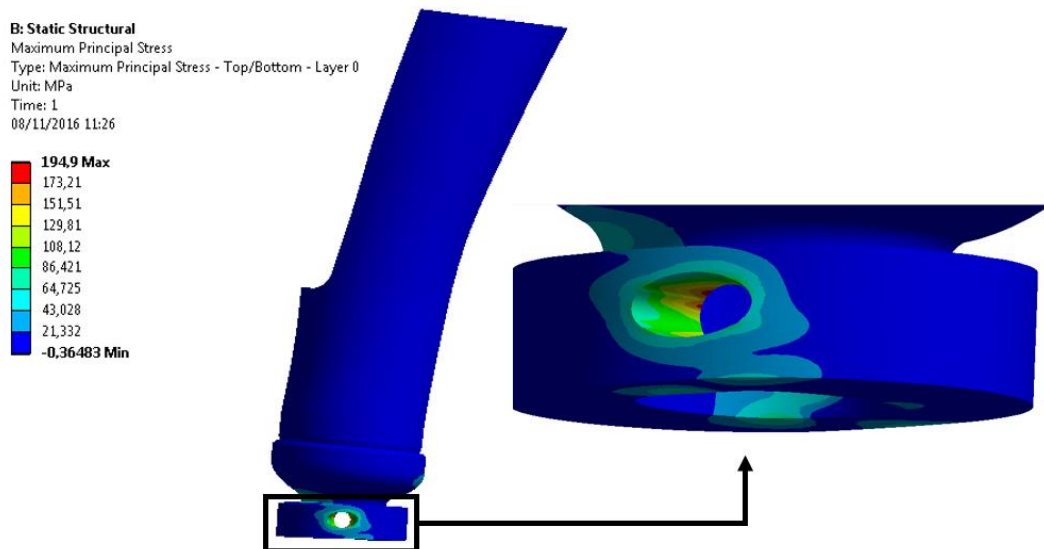


Figura 21: Tensão máxima principal para o tecido 0/90°.
Fonte: Acervo pessoal.

Já na situação com o Suporte do Coto sendo fabricado em tecido 45/-45°, como mostra a imagem 22, tivemos também que a tensão máxima principal se manteve baixa em praticamente toda a peça. Além disso, possui tensões elevadas na região interna da furação e nessa situação a sua tensão máxima é de 213,6 MPa, ou seja, um aumento de 9,6% da tensão máxima principal devido à variação da direção das fibras.

Tanto no primeiro, quanto no segundo caso, não ultrapassaram a tensão de compressão que pode ser suportada, o qual esse valor é de 330,95 MPa, quando usado como método de fabricação o processo *Handy Lay* para as direções 0/90° e 213,74 MPa para as direções 45/-45°. Portanto, no primeiro caso, teve como carregamento um valor de 58,89% em relação à tensão de compressão máxima, já no segundo caso foi de 99,93%.

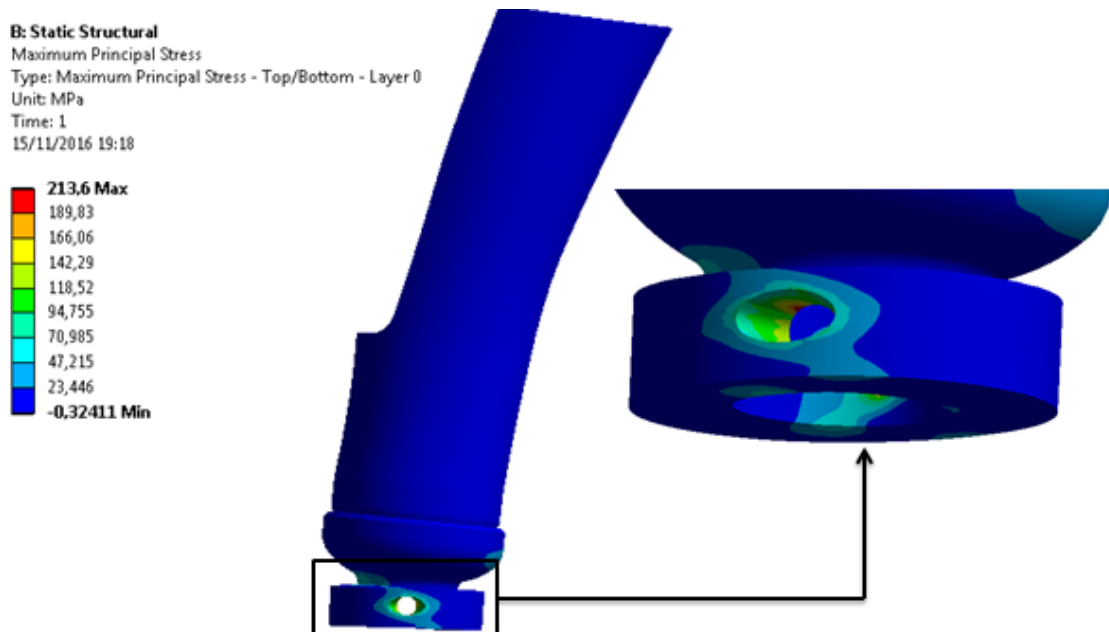


Figura 22: Tensão máxima principal para o tecido 45/-45°.
 Fonte: Acervo pessoal.

Em relação ao deslocamento, na situação em que o tecido é 0/90°, o deslocamento máximo foi encontrado na região total, o qual o seu valor é de 3,23 mm, e na região inferior ocorrerá o menor deslocamento, sendo praticamente nulo, como mostra a imagem 23.

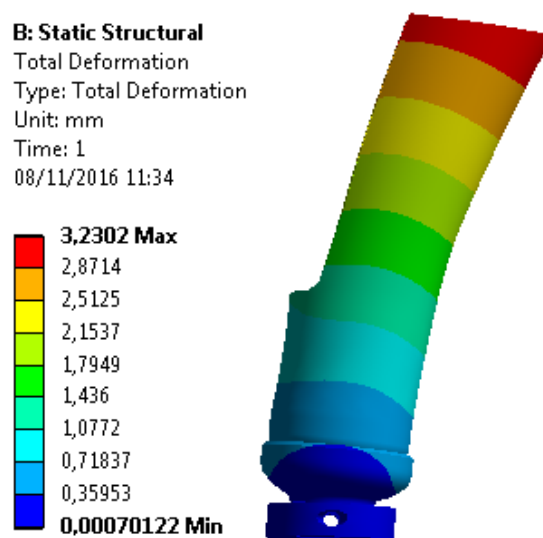


Figura 23: Deslocamento para o tecido 0/90°
 Fonte: Acervo pessoal.

No caso em que o tecido é 45/-45° o deslocamento máximo é de 3,22 mm o mesmo se encontra na região total, já o deslocamento mínimo também foi praticamente nulo, e é obtido na região inferior, como mostra a figura 24. Comparando os dois resultados, se nota que é igual os deslocamentos nas duas situações, assim não existindo influência da direção das fibras para o deslocamento.

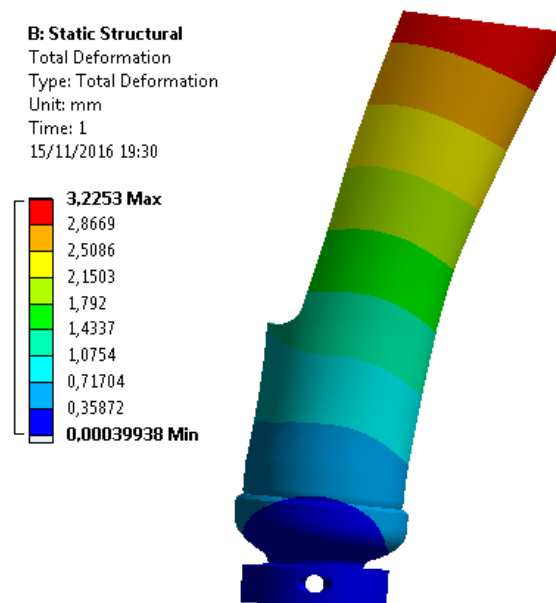


Figura 24: Deslocamento para o tecido 45/-45°.
Fonte: Acervo pessoal.

4.4.2 ACP *Post*

Usando como critério de falha o Tsai-Wu no processador ACP *Post*, podemos observar que na maior parte da peça os valores são menores do que 1, indicando assim, que não ocorreu falha do material como mostra a imagem 25. Na furação é possível observar que os maiores valores de falha estão se propagando nas direções das fibras, ou seja, 0/90°. Todavia, uma pequena parte em torno da furação apareceu com valores maiores do que 1, entretanto isso não pode ser afirmado como falha, pois como os elementos estão totalmente impedidos de movimentos de translação e rotação, nas furações os nós que estão ao redor do seu

perímetro não conseguem se deslocar, surgindo assim inconsistência na análise e ocasionando singularidade numérica.

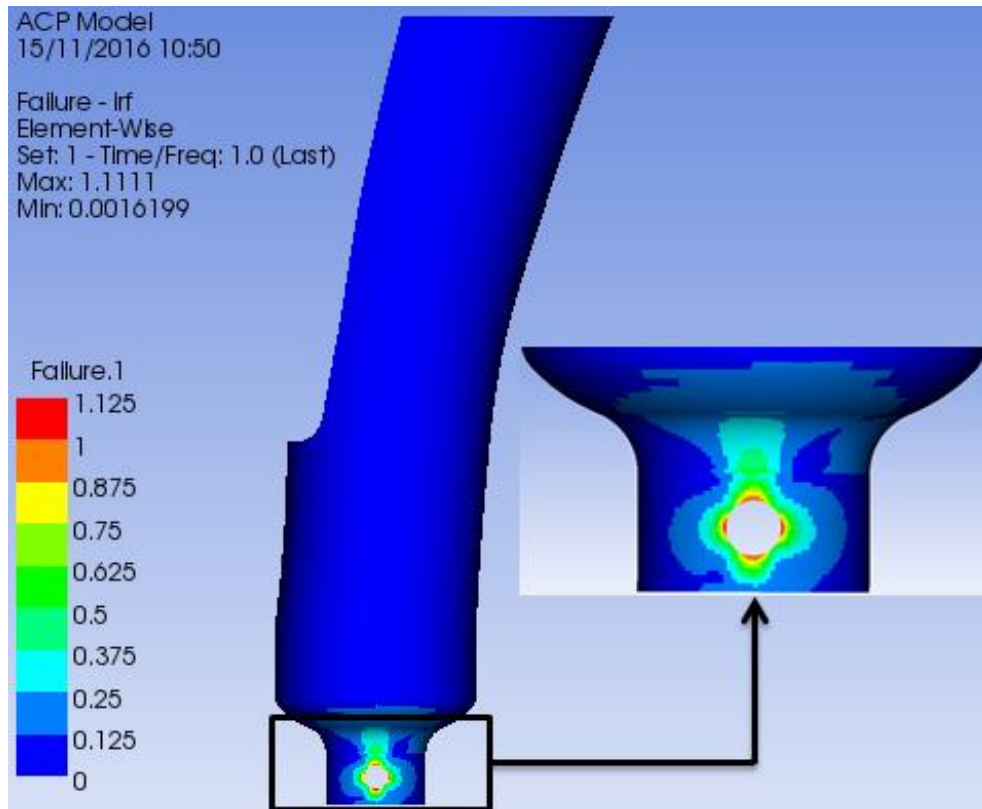


Figure 25: Critério de falha Tsai-Wu para o tecido 0/90°.
Fonte: Acervo pessoal.

O tecido 45/-45° também apresenta resultados bem parecidos em comparação ao anterior, onde na maior parte da peça dispõe valores de falha menores do que 1. E os máximos valores de falha se propagam nas direções das fibras. No entanto também possui resultados maiores do que 1, sendo esses iguais ao caso anterior. Devido ao travamento da região da furação, ocorreu um erro numérico. Podendo ser visualizado na figura 26.

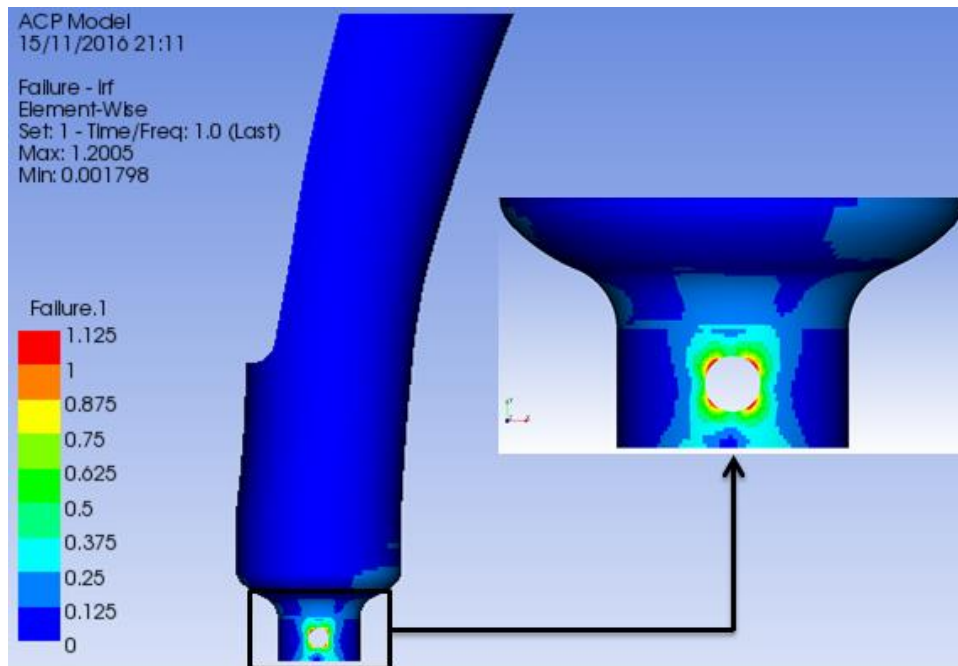


Figure 26: Critério de falha Tsai-Wu para o tecido 45/-45°.
Fonte: Acervo pessoal.

Desse modo, o tecido que possuirá maior valor em relação à tensão máxima principal será o tecido nas direções 45/-45, assim, praticamente possuindo o valor máximo de compressão suportada pelo material, como mostra a tabela 7. Além disso, o deslocamento foi praticamente igual nos dois tecidos e também nos dois casos não ocorreu falha usando como critério o Tsai-Wu.

Tabela 7: Resultados obtidos na análise estrutural pelo método dos elementos finitos.

Direções das fibras	0/90°	45/-45°
Tensão máxima principal (Mpa)	194,9	213,6
Deslocamento (mm)	3,23	3,22
% Em relação a Compressão do material	58,89	99,93
Falha (Tsai-Wu)	Não	Não

Fonte: Acervo Pessoal

5 CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou um estudo sobre prótese em fibra de carbono para membro torácico de equinos, assim, foi utilizado o método dos elementos finitos para realização da análise estrutural. Desse modo, teve por objetivo estimar um modelo de prótese que fosse mais acessível para o proprietário e, além disso, sendo confortável e seguro para a locomoção do animal.

Sendo assim, pode-se notar a necessidade de maiores estudos relacionados à prótese de membro torácico de equino, pois de forma geral, percebe-se que na maioria dos casos o proprietário não possui muitas alternativas caso surja alguma situação que provoque a amputação do membro.

Após um incidente que ocasione a amputação, normalmente o animal é sacrificado, pois não pode mais ser utilizado para o trabalho, porém, essa prática tende a mudar se forem criadas alternativas mais viáveis para o proprietário, permitindo que o animal ainda seja usado para a reprodução.

Assim, buscado uma prótese que traga conforto ao animal e também permita a locomoção de maneira segura, foi possível projetar um modelo através de um cavalo que serviu como base para cálculos e dimensões. Desse modo, tendo como principais componentes o Suporte do Coto o qual será fabricado em fibra de carbono, o Eixo de Regulagem e Sistema de Amortecimento sendo os mesmo fabricados em alumínio 6061 e por fim o Resíduo de Pneu que se localiza na base da prótese.

Com o auxílio da análise numérica via elementos finitos, usando o *software ANSYS Workbench*, foi possível testar o Suporte do Coto, para descobrir qual é a espessura necessária em cada local da peça que resista o carregamento imposto pelo animal. Sendo as dimensões de 2,56 mm na região total, 7,04 mm na região intermediária e 25,28 mm na região inferior. Também foi possível comparar os dois tipos de tecidos, e perceber que o mais adequado para esse projeto é o tecido de fibra de carbono, tendo as fibras nas direções 0/90°. Pois esse modelo teve como resultado uma tensão máxima principal de 194,9 MPa, sendo menor em comparação com o outro tecido, além disso, foi praticamente obtida o valor máximo de

compressão suportado pelo material nas direções 45/-45°. Assim, sendo menos seguro usar esse tipo de tecido no projeto, pois caso ocorra uma sobrecarga, ele não irá suportar o carregamento. E com a auxílio do critério de falha Tsai-Wu, podemos perceber que os dois tecidos de fibra de carbono não irão falhar, quando usada as condições de contorno admitidas no trabalho.

Com isso, se o projeto atendeu o carregamento aplicando o processo de fabricação do tipo *Handy Lay*, também seria atendido de forma mais adequada pelo processo *Vacuum bag*, o qual é o método que se pretende fabricar a peça, pois irá permitir propriedades mecânicas melhores.

Desse modo, como nesse trabalho se realizou somente a análise estrutural de um componente, ou seja, o Suporte do coto. Seria relevante que futuros trabalhos fizessem a análise dos demais componentes que compõem a prótese.

REFERÊNCIAS

ALVES, Avelino. F. **Elementos finitos - a base da tecnologia CAE**. 7. ed. São Paulo, SP: Érica,2002.

CALLISTER, Willian. D. J.; RETHWISCH, David. G. **Ciência e Engenharia de Materiais uma Introdução**. 8. ed. Rio de Janeiro,RJ:LTC,2012.

CAPELLA, M.; SOUFEN, C. **Propriedades Mecânicas em Laminados Fibras de vidro e Fibra de carbono em Resina epóxi**. Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, p. 11663–11671. 2012.

CARNEIRO, Luiz. A; TEIXEIRA, Ana. M. A. J. **Propriedades e características dos materiais compósitos poliméricos aplicados na Engenharia de Construção**. Revista Militar de Ciência e Tecnologia, v. XXV, p. 54–66. 2008.

COOK, Robert. **Concepts and Applications of Finite Element Analysis**. 4. ed.

COSTA, Maria.H.C. **Incidência De Lesões Locomotoras No Cavalo , Diagnosticadas Por Raio-X**. [s.l.] Universidade Lusófona de Humanidade e Tecnologias. Lisboa. 2012.

DASSAULT SYSTEMES. **Critério de Falha Tsai-wu**. Disponível em: <http://help.solidworks.com/2016/Portuguese-brazilian/SolidWorks/cworks/r_TsaiWu_Failure_Criterion.htm >. Acesso em: 25 out. 2016

FALLIS, A. **Anatomia, Biomecânica e Principais Patologias do Membro distal de Equinos: Quartela e Casco**. Journal of Chemical Information and Modeling, v. 53, n. 9, p. 1689–1699, 2013.

GRANT, D. B. **Equine wobblers**. Disponível em: <http://www.equinewobblers.com/other_surgeries/amputation_slideshow.htm>. Acesso em: 1 abr. 2016.

GUIA. Disponível em: <<http://guiadegaranhoes.com.br/velocidade-dos-cavalos-voce-sabehttp://guiadegaranhoes.com.br/velocidade-dos-cavalos-voce-sabe>>. Acesso em: 12 abr. 2016.

MAGALHÃES, Remo. **O Método dos Elementos Finitos Aplicado ao Problema de Condução de Calor**. 2003.

NASSEH, Jorge. **Barcos - Métodos Avançados de Construção em Composites**. Rio de Janeiro, 2007.

SANTOS, Júlio.C dos; **Carbono em Matriz Epóxi Reforçada com Micro**. 2013.99f. Programa de Pós -graduação em Engenharia mecânica, Universidade Federal De São João Del - Rei, 2013.

MENDONÇA, Paulo.T.R. **Materiais Compostos e Estruturas-Sanduíches**. 1. ed. São Paulo, SP: Manole, 2005.

PROVENZA, F. **Projestista de Máquinas**. 71. ed. São Paulo

VALORIZAR.-. **Aprenda a Valorizar**. Disponível em: <<http://www.aprendaavalorizar.com.br/2014/09/uma-segunda-chance-para-os-cavalos.html>>. Acesso em: 10 abr. 2016.

VIP.-. **Veterinary Inclusive Prothetics/Orthotics**. Disponível em: <<http://http://www.equineprosthetics.com>>. Acesso em: 10 abr. 2016.