

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

GABRIEL SILVA DIAS

**Compósito aplicado em sistema de freio de protótipo Baja : Polímero Biobased reforçado com
fibras de sisal**

Guaratinguetá

2017

Gabriel Silva Dias

Compósito aplicado em sistema de freio de protótipo Baja : Polímero Biobased reforçado com fibras de sisal

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

Orientador: Prof^o Dr. Kelly Cristina Coelho de Carvalho Benini

Coorientador: Prof^o Dr. Maria Odila Hilário Cioffi

Guaratinguetá

2017

Dias, Gabriel Silva
D541c Compósito aplicado em sistema de freio de protótipo Baja: polímero
 Biobased reforçado com fibras de sisal / Gabriel Silva Dias –
 Guaratinguetá, 2017.
 56 f : il.
 Bibliografia: f. 54-56

Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade
Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2017.
Orientadora: Prof^a. Dr^a. Kelly Cristina Coelho de Carvalho Benini
Co-Orientadora: Prof^a. Dr^a. Maria Odila Hilário Cioffi

1. Compósitos poliméricos. 2. Materiais compostos. 3. Engenharia
automotiva. I. Título

CDU 620.1


Luciana Máximo

Bibliotecária/CRB-8 3595

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

GABRIEL SILVA DIAS

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

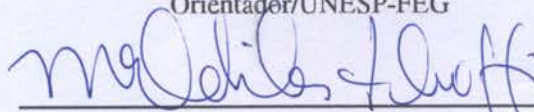
APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Profº Dr. MARCELO SAMPAIO MARTINS
Coordenador

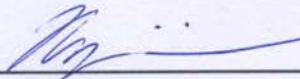
BANCA EXAMINADORA:



Profº Dr. Kelly Cristina Coelho de Carvalho Benini
Orientador/UNESP-FEG



Profº Dr. Maria Odila Hilário Cioffi
Coorientador/UNESP-FEG



Profº Dr. Marcos Yutaka Shiino
Membro Externo/UNESP-ICT

Dezembro , 2017

Dedico a todos que colaboraram, direta ou indiretamente, com esse trabalho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à minha mãe Sandra, por tudo.

Ao pessoal com quem tive sorte de trabalhar como bolsista de iniciação científica, membro de equipe de projeto de extensão e estagiário de engenharia.

Aos professores que dão o melhor de si.

À equipe de Baja Piratas do Vale, pela disponibilidade.

Ao Grupo de Fadiga e Materiais Aeronáuticos do Departamento de Materiais e Tecnologia, FEG - UNESP, onde esse trabalho tomou forma. Lá fui muito bem recebido e tive todo o suporte.

Aos poucos amigos que sempre tem uma palavra confortante.

Por fim, agradeço a força maior que me permite viver.

*“A gente sabe o que a gente estuda.”
(Prof. Peterson Ferrandini, 2016)*

RESUMO

A indústria automobilística vem adotando a substituição de materiais compósitos sintéticos por naturais, seja por fatores econômicos, apelo ambiental ou propriedades mecânicas. Nesse cenário, várias matrizes e reforços vêm sendo estudados. Um possível reforço para materiais compósitos é o sisal, sendo o Brasil como um de seus principais produtores. Dentro desse contexto, o objetivo desse trabalho é desenvolver um material compósito natural, feito de matriz polimérica biobased reforçada com tecido de sisal para propor a substituição do pedal de freio do protótipo baja da equipe Piratas do Vale da FEG/UNESP, que atualmente é feito de compósito epóxi/carbono. Foi necessário determinar a força de aplicação do piloto no pedal de freio e, para tal, foram realizados cálculos de natureza estática e dinâmica para obtenção de 65,6 N. O material compósito foi processado manualmente entre placas de vidro com molde de silicone e caracterizado quanto às suas propriedades mecânicas, superfície de fratura e densidade utilizando respectivamente ensaio de tração, MEV (Microscopia Eletrônica de Varredura) e picnometria de Hélio. Do ensaio de tração foi obtido $\sigma_{max}=9,85 \pm 0,57$ MPa, da análise da superfície de fraturada foram obtidas imagens a partir das quais foi possível verificar a interação matriz-reforço e alguns defeitos e da picnometria foi determinada a densidade do sisal e do compósito. As propriedades do material juntamente com a força de aplicação foram inseridas na biblioteca do software ANSYS 15.0. O pedal modelado e simulado obteve $\sigma_{max}=10,456$ MPa pelo critério de falha de máxima tensão principal. Dividindo-se a tensão encontrada no ensaio de tração (9,85 MPa) pela tensão simulada no ANSYS, obteve-se 0,94, que não é suficiente para nenhuma aplicação em engenharia, uma vez que o valor mínimo buscado para o coeficiente de segurança nesse caso é 3. Desta forma, com a finalidade de viabilizar o material desenvolvido neste trabalho, foi proposto uma alteração dimensional com uma mudança na espessura de 4 mm para 13,0 mm, atingindo desta forma o coeficiente de segurança igual a 3.

PALAVRAS-CHAVE: Compósito natural. Sustentabilidade. Engenharia automotiva.

ABSTRACT

The automotive industry has been adopting the substitution of synthetic composite materials for natural, either by economic factors, environmental issues or mechanical properties. In this scenario, several matrices and reinforcements have been studied. One possible reinforcement for composite materials is sisal, with Brazil being one of its main producers. The automotive industry has been adopting the substitution of synthetic composite materials for natural, either by economic factors, environmental appeal or mechanical properties. In this scenario, several matrices and reinforcements have been studied. One possible reinforcement for composite materials is sisal, with Brazil being one of its main producers. In this context, the objective of this work is to develop a natural composite material, made of biobased polymeric matrix reinforced with sisal fabric to propose the replacement of the brake pedal of the Piratas do Vale FEG/UNESP team, which is currently made of epoxy/carbon composite. It was necessary to determine the driver's application force on the brake pedal and for this purpose static and dynamic calculations were performed to obtain 65.6 N. The composite material was manually processed between glass plates with silicone mold and characterized by mechanical properties, fracture surface and density, using respectively a tensile test, SEM (Scanning Electron Microscopy) and Helium pycnometry. From the tensile test, $\sigma_{max}=9,85 \pm 0,57$ MPa was obtained, from the fracture surface analysis, by images analyses was possible to verify the matrix-reinforcement interaction and some defects and from the sisal and composite pycnometry the density was determined. The properties of the material and the application force were entered into the ANSYS's library. The modeled and simulated pedal obtained $\sigma_{max}=10,456$ MPa by the maximum stress failure criterion. By dividing the stress found in the tensile test (9.85 MPa) by the simulated stress found in ANSYS, 0.94 was obtained, which is not enough for any engineering application, since the minimum value sought for the coefficient of safety in this case is 3. Therefore, in order to make the material developed in this work feasible, a dimensional change was proposed with a change in thickness from 4 mm to 13.0 mm, thus achieving a safety factor of 3.

KEYWORDS: Natural composite. Sustainability. Automotive engineering.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	Classificação geral dos veículos	14
Figura 2	Sistemas presentes em um automóvel	15
Figura 3	Sistema de freio comum em automóveis	16
Figura 4	Sistema de freio a tambor	16
Figura 5	Sistema de freio a disco tipo pinça flutuante	17
Figura 6	Resfriamento de a) freios a tambor vs b) freios a disco	18
Figura 7	Expansão térmica de a) freios a tambor vs b) freios a disco	18
Figura 8	Perda de eficiência de frenagem por alta temperatura	19
Figura 9	Pedal do freio do protótipo baja 2016	19
Figura 10	Forças relevantes atuando em um automóvel	20
Figura 11	Fluxo de força aplicada no pedal até o torque no disco	23
Figura 12	Dimensões para cálculo do Parâmetro do pedal "C"	23
Figura 13	Esquema de um freio a disco	25
Figura 14	Planta Agave sisalana	25
Figura 15	Esquema de uma célula de fibra de Sisal com dimensões aproximadas	26
Figura 16	Análise de documentos patenteados relacionados ao sisal de 1960 a 2009	27
Figura 17	Comparação entre materiais compósitos de fibras naturais e sintéticas de carbono e vidro	28
Figura 18	Comparação de preço por massa entre fibras naturais e fibra de vidro	29
Figura 19	Nós e elementos finitos de um componente discretizado	31
Figura 20	Principais tipos de elementos finitos	31
Figura 21	Partes do trabalho	33
Figura 22	Sistema atual de freio do protótipo baja de 2016	34
Figura 23	Tecido de sisal	35
Figura 24	Tratamento alcalino	36
Figura 25	DSC Dinâmico	37
Figura 26	DSC Isotérmico - 74°C	37
Figura 27	DSC Isotérmico - 116°C	37
Figura 28	Aparato para processamento do compósito	38
Figura 29	Criação do modelo 3D do pedal e inserção de suportes e da força aplicada pelo piloto	39
Figura 30	Parâmetros da malha	40
Figura 31	Malha gerada	40
Figura 32	Defeito superficial do compósito	42
Figura 33	Curvas de Termogravimetria (TGA) das fibras de sisal	43
Figura 34	Curva DTG	43
Figura 35	Compósito nas dimensões para ensaio de tração	44

Figura 36	Gráfico tensão-deformação do compósito	45
Figura 37	Superfície de fratura	46
Figura 38	Parcela linear do gráfico tensão-deformação para determinação de E	46
Figura 39	Análise da superfície de fratura do CDP1	47
Figura 40	Análise da superfície de fratura do CDP4	47
Figura 41	Inserção de dados na biblioteca de materiais do Ansys 15.0	49
Figura 42	Resultado obtido da simulação estática	49
Figura 43	Alteração de espessura de 4 mm para 13,0 mm	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição das fibras vegetais	26
Tabela 2 – Patentes associadas ao sisal de acordo com o código CIP	28
Tabela 3 – Propriedades da resina BioPoli	36
Tabela 4 – Variáveis do baja referentes ao sistema de freio	41
Tabela 5 – Dimensões importantes do veículo baja	41
Tabela 6 – DTG - Faixa de temperatura por estágio e ocorrência	44
Tabela 7 – Temperatura inicial de degradação da fibra tratada e da fibra in natura	44
Tabela 8 – Tensão máxima do compósito	45
Tabela 9 – Valores de E	47
Tabela 10 – Densidade do material compósito e do sisal	48

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Objetivos	13
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1	Conceitos básicos sobre automóveis	14
2.2	Sistemas de freio automotivo	15
2.2.1	Sistemas de freio automotivo a disco e a tambor	16
2.3	O pedal do freio	19
2.4	Transferência de carga durante a frenagem	20
2.5	Transferência de esforço através do sistema de freio	23
2.6	As fibras de sisal	25
2.7	Fibras naturais de Sisal como reforço em compósitos poliméricos	27
2.8	Matriz polimérica Biobased: um Biopolímero	29
2.9	O método dos elementos finitos	30
2.9.1	Discretização de sistemas contínuos	30
2.9.2	Tipos de elementos finitos e formação da malha	31
2.10	Critério de falha	31
3	METODOLOGIA	33
3.1	Parte 1: Determinação da força de aplicação do piloto	33
3.1.1	Força de frenagem necessário	34
3.2	Parte 2: Obtenção do compósito	35
3.2.1	A escolha do reforço	35
3.2.1.1	Tratamento químico - Mercerização	35
3.2.1.2	Termogravimetria (TGA/DTG)	36
3.2.2	A escolha da matriz	36
3.2.2.1	Determinação dos parâmetros de cura da resina	36
3.2.3	O material compósito	38
3.2.3.1	O processamento do compósito	38
3.2.3.2	Caracterização mecânica: ensaio de tração	38
3.2.3.3	MEV (Microscópio eletrônico de varredura)	39
3.2.3.4	Determinação da densidade por picnometria	39
3.3	Parte 3: Simulação	39
3.3.1	Criação de modelo 3D e inserção suporte e esforços	39
3.3.2	Criação da malha	40
4	RESULTADOS	41
4.1	Parte 1 - Determinação da força de aplicação do piloto	41

4.2	Parte 2: Obtenção do compósito	42
4.2.1	Tratamento Alcalino	42
4.2.2	Ensaio de Tração	44
4.2.2.1	Determinação do módulo de elasticidade	46
4.2.3	Análise por microscópio eletrônico de varredura (MEV)	47
4.2.4	Determinação da densidade e porcentagem de fibras do material	48
4.3	Parte 3: Simulação	48
4.3.1	Inserção do material na biblioteca do ANSYS 15.0	48
4.3.2	Tensão máxima suportada pelo modelo do pedal	49
4.3.3	Alteração de espessura do pedal	50
5	RESUMO DOS RESULTADOS	51
6	CONCLUSÃO	52
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	53
	REFERÊNCIAS	54

1 INTRODUÇÃO

Compósitos reforçados com fibras naturais vem sendo aplicados na indústria automobilística em substituição aos compósitos com fibras sintéticas (SCOPEL et al., 2013) (BARROS, 2010) (CASTILHOS, 2011). Isso se deve ao fato de que o Brasil é um dos principais produtores mundiais de sisal (*Agave sisalana*), que, entre outras finalidades, serve de reforço em materiais compósitos. Sisal como reforço em materiais compósitos vem sendo cada vez mais estudado, como mostra o estudo de Scopel et al. (2013).

Polímeros não oriundos de petróleo são cada vez mais requisitados em função da preocupação quanto a sustentabilidade, uma vez que ajudam a reduzir a dependência de petróleo ou poliolefinas não biodegradáveis (CHAUVET; SAUCEAU; FAGES, 2017). Nesse cenário, os polímeros “biobased” desempenham papel fundamental. Eles são polímeros derivados de fontes renováveis, podendo ser polimerizados a partir de monômeros naturais (CHAUVET; SAUCEAU; FAGES, 2017). A Sociedade dos Engenheiros Automotivos (SAE) possui programas estudantis, entre eles o Baja, que tem como objetivo a concepção, construção e a realização de testes de um monoposto do tipo Baja para participar de competições regionais e nacionais. Fundada em 1997, a equipe de Baja Piratas do Vale possui em seu protótipo várias peças confeccionadas de material compósito sintético, inclusive o pedal de freio. Neste contexto, é proposto por este trabalho de graduação a substituição do pedal do protótipo Baja atualmente feito de material compósito sintético por um pedal feito de compósito biobased reforçado com fibras de sisal.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo desse trabalho é propor a substituição do pedal de freio do baja, que atualmente é feito de compósito sintético, por um pedal feito de compósito natural biobased reforçado por fibras de sisal. Para alcançar o objetivo, foi necessário:

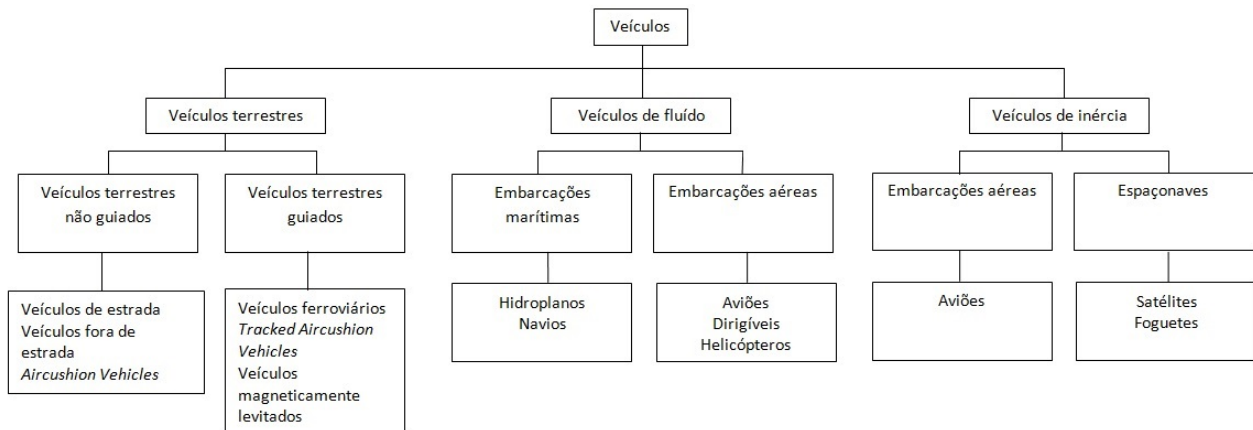
- O entendimento do sistema atual de freio do baja
- Análise de esforços no pedal de freio
- Processamento do material compósito
- Ensaio do material
- Simulação em Software

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CONCEITOS BÁSICOS SOBRE AUTOMÓVEIS

Transporte pode ser definido como o processo de mover alguma coisa ou alguém de um lugar para outro (DUKKIPATI et al., 2008). Existem vários tipos de veículos de transporte que são baseados em diferentes princípios. A Figura 1 mostra uma classificação geral de veículos com base nos princípios de suporte e propulsão.

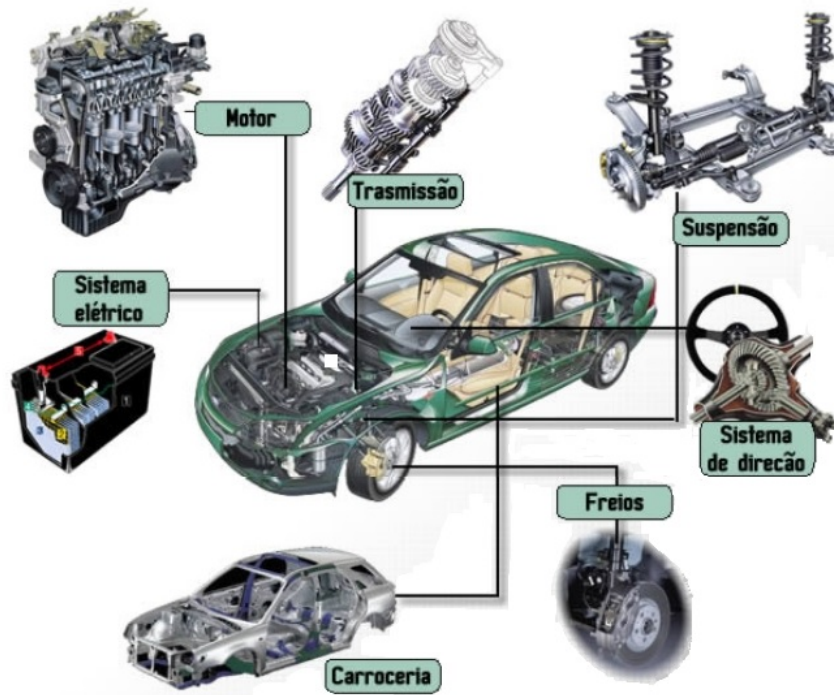
Figura 1 – Classificação geral dos veículos



fonte: (DUKKIPATI et al., 2008)

Veículos classificados como terrestres, não guiados e *off-road* são de interesse desse trabalho. Veículos terrestres não guiados, popularmente chamados de carros, possuem alguns sistemas embarcados, como mostra a Figura 2.

Figura 2 – Sistemas presentes em um automóvel



fonte: (MARIANO, 2017)

Pode-se considerar que o automóvel moderno é datado de 1886, ano em que o alemão Karl Benz solicitou patente de seu carro motorizado equipado com motor a combustão, 3 rodas, arranque feito através de uma manivela e com 0,8 Hp de potência que atingia incríveis 18 km/h (WELLE, 2017).

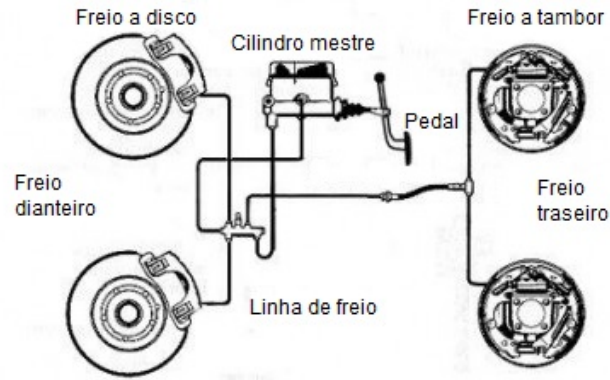
De 1886 até os dias atuais, muito foi feito em prol da melhoria dos sistemas que compõem o automóvel. Com o aumento de potência e, conseqüentemente aumento da velocidade atingida pelos automóveis, estudos a respeito de sistemas de freio mais eficientes se tornaram fundamentais (WELLE, 2017).

2.2 SISTEMAS DE FREIO AUTOMOTIVO

Sistemas de freio automotivos são projetados para uma função: parar o veículo. Pode parecer uma tarefa fácil, porém os problemas surgem devido aos requisitos do sistema, que são principalmente os seguintes: parar o veículo em alta velocidade em um curto espaço; apresentar alta durabilidade sem falhas; ser capaz de frear ao mesmo tempo que permite a dirigibilidade do veículo (PUHN, 1985).

Tais sistemas incluem normalmente fluido de freio, linhas de freio, conexões, alavancas, bem como as unidades de freio (PUHN, 1985). A Figura 3 representa o sistema de freio comumente encontrado em automóveis, com freio dianteiro a disco e freio traseiro a tambor.

Figura 3 – Sistema de freio comum em automóveis



fonte: (SHANKAR, 2017)

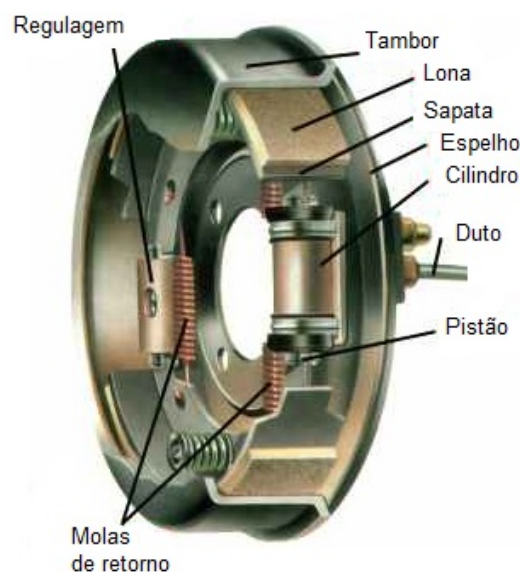
2.2.1 Sistemas de freio automotivo a disco e a tambor

Cada um dos tipos possuem vantagens e desvantagens. Com relação a desempenho de frenagem, freios a tambor necessitam de uma menor força de atuação no pedal de freio comparado com o sistema a disco devido a seu alto fator de frenagem. Por outro lado, freios a disco oferecem melhor distribuição de forças na roda e mais rápida dissipação de calor (DUKKIPATI et al., 2008).

Louis Renault em 1902 desenvolveu o primeiro freio a tambor como conhecido atualmente. O sistema era montado somente nos eixos traseiros dos automóveis devido à grande instabilidade direcional causada pela dificuldade em se construir um sistema razoavelmente homogêneo com os materiais de engenharia da época (DIULGHEROGLO, 2017). Freios a disco foram originalmente idealizados para bicicletas em 1876 pelos ingleses Browett e Harrison (DIULGHEROGLO, 2017).

Os principais componentes do freio a tambor são as sapatas, a lona, o tambor, o cilindro, o pistão e molas de retorno, como mostrado na Figura 4.

Figura 4 – Sistema de freio a tambor



fonte: (ANDERSON, 2017)

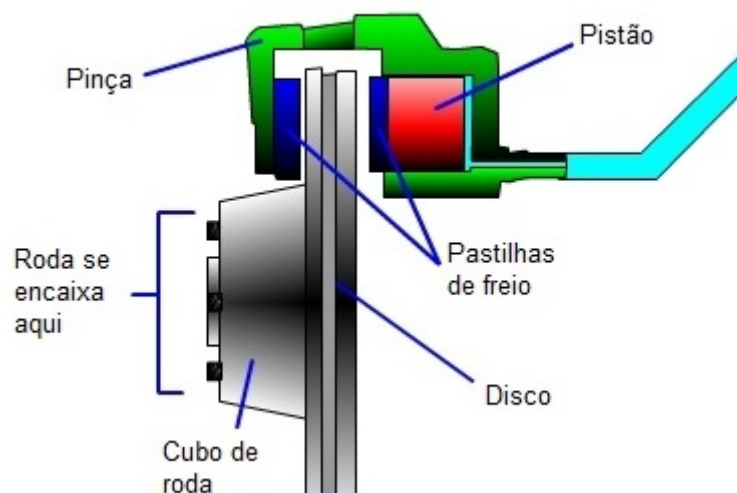
Freios a tambor vêm sendo utilizados no eixo traseiro por vários anos em carros comerciais. O tambor gira com a roda, no interior do tambor estão as sapatas de freio forradas com material de fricção. Esse material que consiste de vários compostos orgânicos e metálicos é a lona de freio. Através do acionamento do pedal do freio, fluido de freio é deslocado pela linha de freio até o cilindro, que empurra as sapatas de freio juntamente com as lonas de freio contra o tambor. O contato entre as lonas de freio e o tambor gera uma força de atrito, que, por ser uma força dissipativa, transforma energia mecânica cinética em energia térmica (PUHN, 1985).

Freios a disco, por sua vez, são utilizados no eixo frontal na maioria dos automóveis comerciais e nos dois eixos na maioria dos carros de competição. São compostos por pistão, pinça, pastilhas de freio, cubo de roda e disco, como mostrado na Figura 5. O funcionamento se assemelha ao de freios a tambor no que diz respeito ao acionamento do pedal de freio e transferência de fluido pela linha de freio. A diferença é que, em freios a disco, o pistão empurra as pastilhas de freio, feitas de material de fricção, que por sua vez pressionam o disco girante, gerando a força de frenagem e calor.

A pinça flutuante (Figura 5) possui uma construção mais simples que a pinça fixa. Seu funcionamento baseia-se na terceira lei de Newton, ação e reação. Quando a linha de freio é pressurizada, o pistão empurra a pastilha que está fixa a ele contra o disco, e, por reação, a carcaça da pinça é deslocada no sentido oposto ao movimento do pistão, trazendo com ela a outra pastilha (SANTOS, 2014).

Algumas vantagens que levaram fabricantes de automóveis a substituir freios a tambor por freios a disco são:

Figura 5 – Sistema de freio a disco tipo pinça flutuante



fonte: (KARIM, 2017)

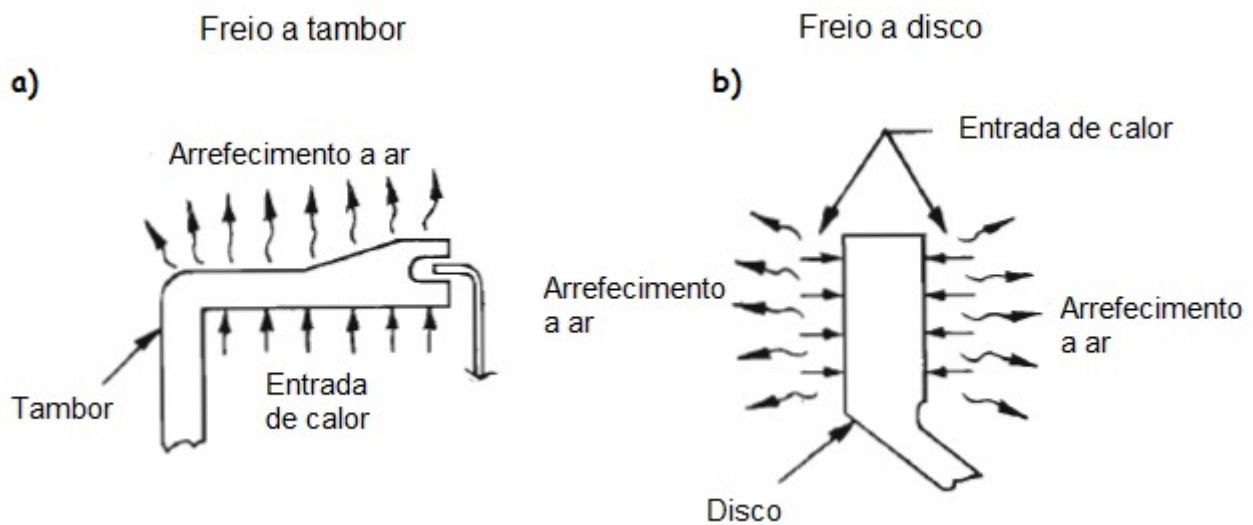
- Vantagens;
 - Maior resistência a perda total ou parcial de poder de frenagem;
 - Melhor resfriamento;
 - Maior resistência a água e sujeira;
 - Menor manutenção.

A principal vantagem dos freios a disco sobre os freios a tambor é a maior resistência a perda do poder de frenagem devido ao superaquecimento (PUHN, 1985) e as razões para isso são:

- Superfícies de fricção diretamente expostas ao ar para refrigeração;
- O efeito de deflexão do tambor é eliminado.

O motivo pelo qual freios a disco apresentam melhor resfriamento está ilustrado na Figura 6. Calor é gerado internamente no freio a tambor e deve ser conduzido pelo tambor até o meio externo para que possa ser refrigerado pelo ar, ao passo que nos freios a disco, as superfícies onde o calor é gerado estão em contato com o ar, iniciando imediatamente a troca de calor (PUHN, 1985).

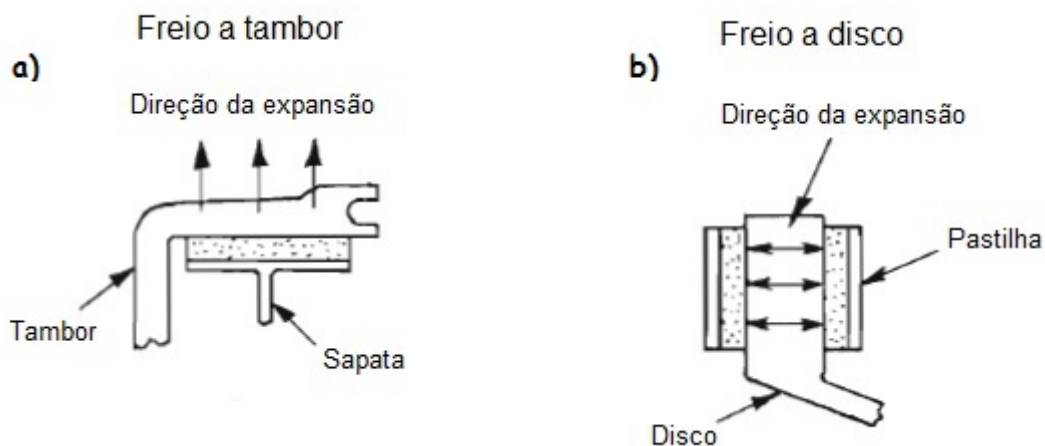
Figura 6 – Resfriamento de a) freios a tambor vs b) freios a disco



fonte: (PUHN, 1985)

A Figura 7 mostra que a expansão térmica devido a alta temperatura no disco a tambor é para fora, requerindo um maior curso no pedal. Já no freio a disco, a expansão ocorre no sentido das pastilhas, logo um maior curso do pedal não é requerido (PUHN, 1985).

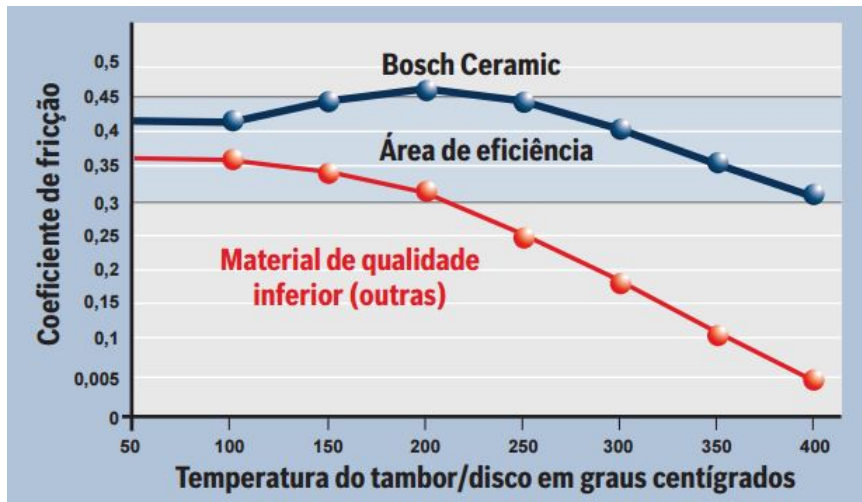
Figura 7 – Expansão térmica de a) freios a tambor vs b) freios a disco



fonte: (PUHN, 1985)

Fica claro que o aumento excessivo de temperatura causa outros problemas, como perda de eficiência de frenagem, como mostra a Figura 8 (BOSCH, 2014).

Figura 8 – Perda de eficiência de frenagem por alta temperatura

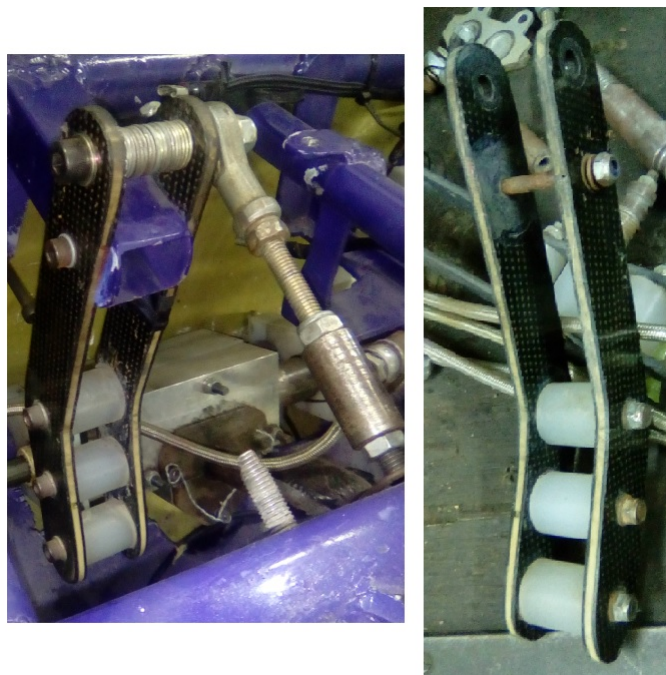


fonte: (BOSCH, 2014)

2.3 O PEDAL DO FREIO

O pedal de freio e sua ligação transmitem força e movimento do pé do condutor para o(s) cilindro(s) mestre (PUHN, 1985). A Figura 9 mostra o atual pedal do protótipo Baja 2016 montado à esquerda e desmontado à direita.

Figura 9 – Pedal do freio do protótipo baja 2016



fonte: O autor

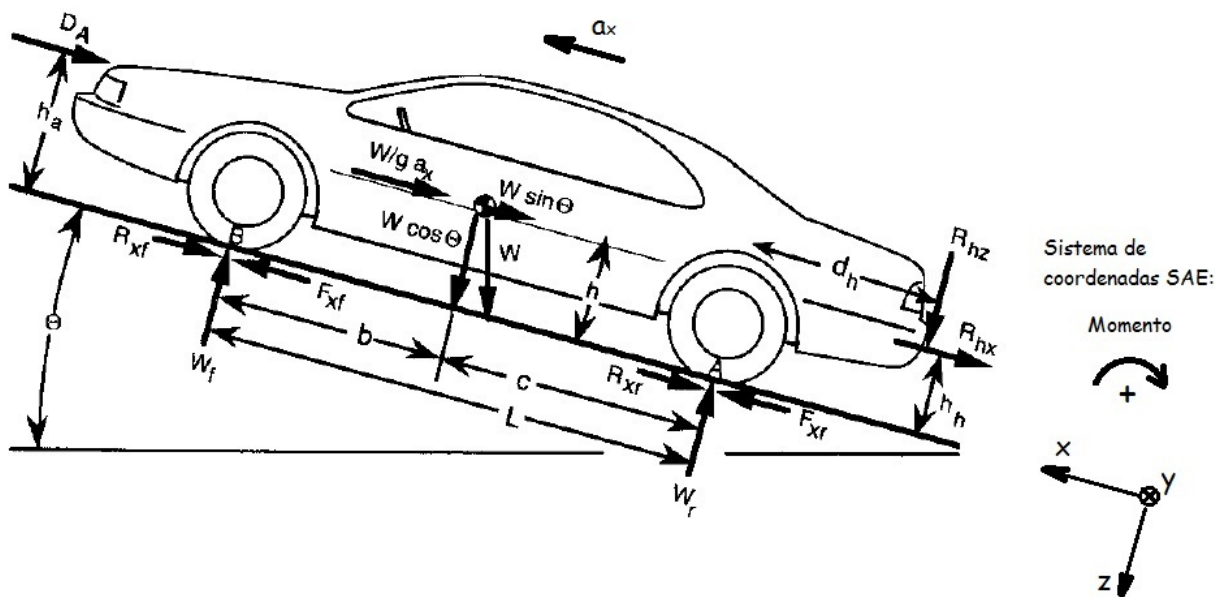
Consiste em uma haste pivotada que, através de equilíbrio de momentos em relação ao ponto de

pivoteamento, multiplica a força do condutor. A força multiplicada é entregue ao cilindro mestre, pressurizando o sistema hidráulico. Um bom pedal de freio não deve se deformar ou quebrar quando soliciado e passar uma boa sensação ao condutor, não exigindo do mesmo um grande esforço de acionamento durante a frenagem (PUHN, 1985). O pedal da Figura 9 é composto de dois corpos de material compósito epóxi/carbono laminado, cilindros de material plástico, parafusos, arruelas e porcas. O compósito tem em seu interior uma camada de material desconhecido. Tal configuração confere ao pedal rigidez suficiente para desempenhar sua função sem apresentar falhas, uma vez que o referido pedal é utilizado a alguns anos pela equipe

2.4 TRANSFERÊNCIA DE CARGA DURANTE A FRENAGEM

O primeiro passo para entender a transferência longitudinal de carga durante a frenagem é determinar um sistema de coordenadas, bem como os carregamentos relevantes aos quais um automóvel é submetido (GILLESPIE, 1992).

Figura 10 – Forças relevantes atuando em um automóvel



fonte: (GILLESPIE, 1992)

Sendo:

W : Peso do veículo atuando no Centro de Gravidade (CG) [N]

W_f : Peso dinâmico no eixo frontal [N]

W_r : Peso dinâmico no eixo traseiro [N]

g : Aceleração da gravidade [$9,81 \text{ m/s}^2$]

a : Aceleração do veículo, representado no sentido positivo de x (acelerando) [m/s^2]

θ : Inclinação do solo [graus]

L : Distância entre eixos [m]

b : Distância entre o eixo frontal e o CG [m]

c : Distância entre o eixo traseiro e o CG [m]

h : Altura do CG [m]

h_a : Altura da força de arrasto aerodinâmico [m]

h_h : Altura do engate [m]

d_h : Distância do eixo traseiro ao engate [m]

R_{xf} : Força de resistência a rolagem do eixo frontal [N]

R_{xr} : Força de resistência a rolagem do eixo traseiro [N]

F_{xf} : Força de tração no eixo frontal [N]

F_{xr} : Força de tração no eixo traseiro [N]

R_{hz} : Componente vertical da força do engate [N]

R_{hx} : Componente horizontal da força do engate [N]

D_A : Força de arrasto aerodinâmico [N]

O sistema de coordenadas representa um veículo acelerando em uma pista com a cive.

O termo $(W/g)a_x$ representa o efeito de uma força de inercia, chamada Força de d'Alembert (Jean le Rond d'Alembert, 1717-1783), agindo no centro de gravidade no sentido oposto ao da aceleração (GILLESPIE, 1992). A equação geral para frenagem pode ser descrita utilizando a segunda lei de Newton na direção de x segundo a Equação (1):

$$-D_A - R_{xf} - R_{xr} + F_{xf} + F_{xr} + (W/g)(-a_x) - W \operatorname{sen}\theta - R_{hx} = 0 \quad (1)$$

O termo $(W/g)a_x$ está no sentido oposto ao ilustrado na Figura 10, pois o veículo está em uma situação de frenagem, portanto a aceleração é no sentido oposto de x, logo a força inercial $(W/g)a_x$ é no sentido de x (positivo).

Pode-se substituir (W/g) por M, e também $(-a_x)$ por D_x , tem-se a Equação (2):

$$-D_A - R_{xf} - R_{xr} + F_{xf} + F_{xr} + MD_x - W \operatorname{sen}\theta - R_{hx} = 0 \quad (2)$$

Forças de resistência a rolagem sempre se opõem ao movimento do veículo, portanto, auxiliam a frenagem. Além disso, as forças de rolagem são da ordem de grandeza de aproximadamente 0,01 g, o que torna aceitável a não consideração (GILLESPIE, 1992).

Isolando o termo MD_x e eliminando as forças de resistência a rolagem e a componente horizontal da força de engate, obtém-se a Equação (3):

$$-MD_x = -D_A + F_{xf} + F_{xr} - W \operatorname{sen}\theta \quad (3)$$

sendo:

M : Massa do veículo [Kg]

D_x : Desaceleração no sentido de x [m/s^2]

É de interesse conhecer as forças F_{xf} e F_{xr} , pois são elas que dão origem às forças de frenagem ao longo de x. Porém apenas com a equação 3 e duas incógnitas não é possível determiná-las. A maneira apropriada de se obter equações para as forças F_{xf} e F_{xr} é por somatória de momentos nos eixos frontal e traseiro, indicados na Figura 10 como B e A, respectivamente. É importante levar em conta o sistema SAE de coordenadas, sendo o sentido positivo dos momentos o horário.

A força de arrasto aerodinâmico D_A pode ser também suprimida, pois auxilia na frenagem, porém não de maneira significativa, sobretudo em baixas velocidades.

Somatório de momentos no solo em A:

$$W_f.L - M.D_x.h - W \cos\theta.c + W \sin\theta.h = 0 \quad (4)$$

Isolando W_f tem-se:

$$W_f = \frac{W \cos\theta.c}{L} + \frac{M.D_x.h}{L} - \frac{W \sin\theta.h}{L} \quad (5)$$

Somatório de momentos em B:

$$-W_r.L + W \cos\theta.b + W \sin\theta.h - M.D_x.h = 0 \quad (6)$$

Isolando W_r tem-se:

$$W_r = \frac{W \cos\theta.b}{L} - \frac{M.D_x.h}{L} + \frac{W \sin\theta.h}{L} \quad (7)$$

Supondo uma situação onde o ângulo θ seja zero, ou seja, no plano não inclinado, tem-se:

$$W_f = \frac{1}{L}(W.c + M.D_x.h), \theta = 0 \quad (8)$$

$$W_r = \frac{1}{L}(W.b - M.D_x.h), \theta = 0 \quad (9)$$

É possível agora demonstrar a transferência de carga do eixo traseiro para o eixo frontal. Existem dois termos nas equações (8) e (9), o primeiro termo é chamado de carregamento estático, o segundo é chamado de transferência dinâmica de carga (GILLESPIE, 1992). De fato é simples analisar que, quando em movimento não acelerado ou de forma estática, o carregamento em cada eixo é simplesmente feito em função das distâncias entre-eixos. Quando o movimento é acelerado (ou desacelerado), o segundo termo assume o papel de "transferir" carregamento do eixo traseiro para o eixo frontal, fazendo com que o eixo frontal seja tão mais requisitado quanto mais alto for o valor da desaceleração. A força máxima de frenagem em cada eixo, é então dada por:

$$F_{xmf} = \mu_p W_f \quad (10)$$

$$F_{xmr} = \mu_p W_r \quad (11)$$

sendo:

F_{xmf} : Força máxima de frenagem no eixo frontal [N]

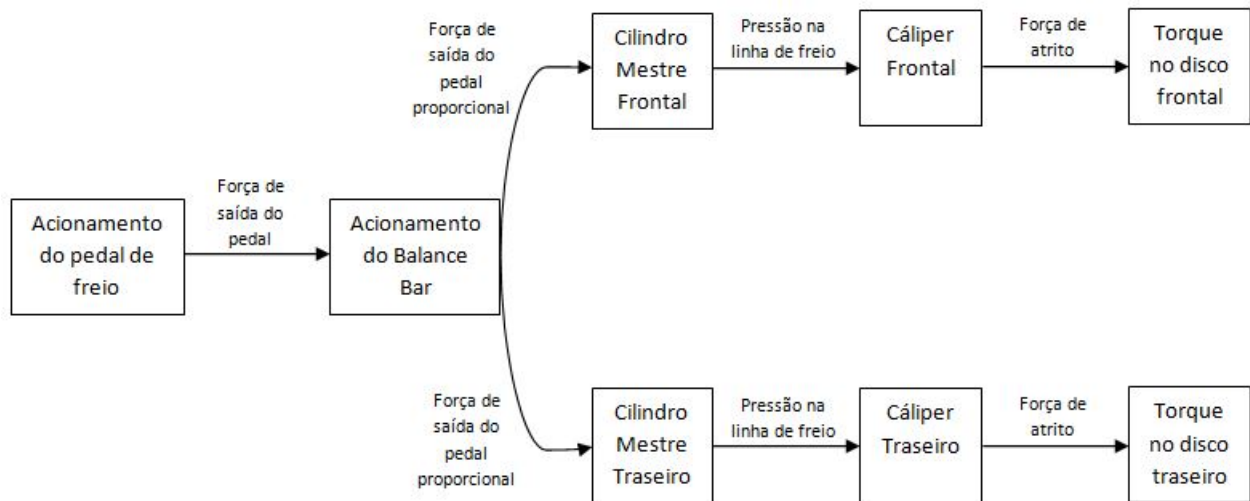
F_{xmr} : Força máxima de frenagem no eixo traseiro [N]

μ_p : Coeficiente máximo de fricção entre o pneu e o solo [-]

2.5 TRANSFERÊNCIA DE ESFORÇO ATRAVÉS DO SISTEMA DE FREIO

Ao pressionar o pedal de freio, o "balance bar" é acionado e divide a força de saída do pedal entre o cilindro mestre dianteiro e o cilindro mestre traseiro. Cada cilindro mestre é responsável por gerar uma pressão hidráulica na linha de freio, que por sua vez, pressuriza o pistão do freio a disco. A pressurização do pistão do freio a disco faz com que as pastilhas de freio se movam contra o disco de freio, gerando força de atrito e, em função das dimensões do disco de freio, um torque no disco de freio. Tal processo pode ser melhor visualizado por meio de um fluxograma da Figura 11:

Figura 11 – Fluxo de força aplicada no pedal até o torque no disco

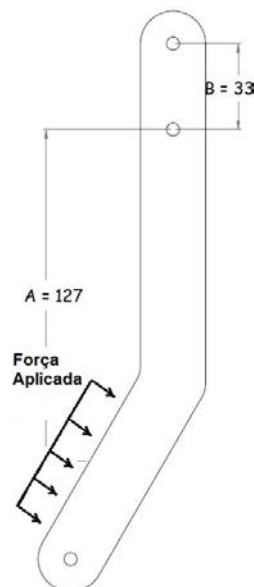


fonte: O autor

É importante ressaltar que o torque no disco de freio é diretamente proporcional a força aplicada pelo piloto, uma vez que a área efetiva do cilindro mestre e do cilindro de freio não são alteradas.

O ganho do pedal de freio é dada pela Equação (12). A Figura 12 representa a vista lateral do pedal.

Figura 12 – Dimensões para cálculo do Parâmetro do pedal "C"



fonte: O autor

$$C = \frac{A}{B} \quad (12)$$

sendo:

A : Distância do ponto central de aplicação de força até o ponto de giro [m]

B : Distância do ponto de saída de força do pedal até o ponto de giro [m]

C : Parâmetro do pedal [-]

O parâmetro "C" também pode ser chamado de vantagem mecânica, e, para carros fabricados em série equipados com freios manuais (sem assistência) o valor de C pode variar entre 5 e 6,5 (OSHIRO, 2015).

A força de saída do pedal será devido à alavanca:

$$F_{pedal} = F_{piloto} \cdot C \quad (13)$$

sendo:

F_{pedal} : Força de saída do pedal [N]

F_{piloto} : Força aplicada pelo piloto [N]

A força aplicada pelo piloto é variável.

A pressão na linha do sistema de freio é dada pela equação:

$$P = \frac{F_{piloto} \cdot C}{A_{cm}} \quad (14)$$

sendo:

P : Pressão na linha do sistema de freio [Pa]

A_{cm} : Área do pistão do cilindro mestre [m^2]

A força de contato das pastilhas é dada por:

$$F_{contato} = n \cdot A_{caliper} \cdot P \quad (15)$$

sendo:

$F_{contato}$: Força de contato das pastilhas [N]

A_{cm} : Área do pistão do calíper [m^2]

n : número de calípers no sistema de freio [-]

De acordo com Shigley (2006), força e torque atuantes em freios a disco (Figura 13), considerando pressão constante são dados por:

$$F = (\theta_1 - \theta_2) P \int_{r_i}^{r_o} r dr = \frac{1}{2} (\theta_1 - \theta_2) P (r_o^2 - r_i^2) \quad (16)$$

$$T = (\theta_1 - \theta_2) \mu P \int_{r_i}^{r_o} r^2 dr = \frac{1}{3} (\theta_1 - \theta_2) \mu P (r_o^3 - r_i^3) \quad (17)$$

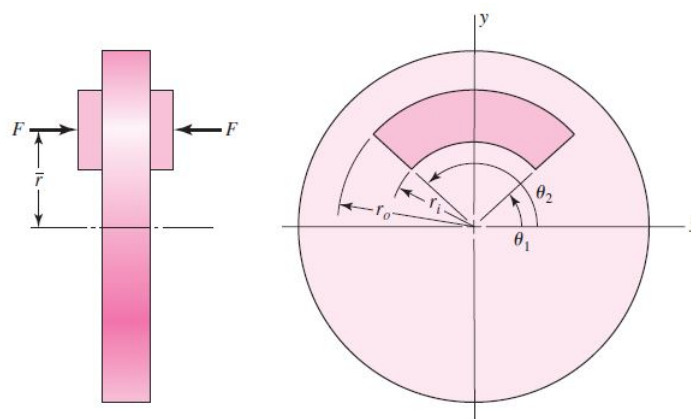
sendo, conforme Figura 13:

θ_1, θ_2 : Distância angular entre o início e fim do material de fricção [graus]

r_i, r_o : Raios interno e externo do material de fricção [m^2]

μ : Coeficiente de fricção [-]

Figura 13 – Esquema de um freio a disco



fonte: (SHIGLEY, 2006)

2.6 AS FIBRAS DE SISAL

A planta da qual é extraída as fibras de Sisal (*Agave sisalana*) é nativa das zonas tropicais e subtropicais da América do Norte e América do Sul (Figura 14). A fibra de sisal, quando comparadas a outras fibras naturais, possui relativamente baixo custo de obtenção, baixa densidade, fácil cultivo e é uma das fibras naturais mais populares (FARUK et al., 2014). O Brasil é o maior produtor mundial de sisal, sendo responsável por 40% da produção anual de 300.000 toneladas (SCOPEL et al., 2013).

Figura 14 – Planta *Agave sisalana*



fonte: (LI; MAI; YE, 2000)

A rígida fibra é extraída da folha da planta, sendo que cada planta possui cerca de 200 a 250 folhas que por sua vez possui cerca de 1000 a 1200 feixes de fibras. A composição das folhas é de aproximadamente 4% de fibras, 0,75% de cutícula, 8% de matéria seca e 87% de água. O peso aproximado de uma folha de sisal é de 600 gramas e renderá em torno de 3% em peso de fibras (LI; MAI; YE, 2000). De acordo com Benini (2011), as fibras de origem vegetal, também chamadas de fibras lignocelulósicas, são compostas principalmente de celulose, hemicelulose, lignina e cinzas, dadas as proporções mostradas na Tabela 1.

Tabela 1 – Composição das fibras vegetais

Fibra	Celulose %	Hemicelulose %	Lignina %	Cinzas %
Bagaço de cana	32-48	27-32	19-24	1,5-5
Coco verde	32-43	0,15-0,25	40,45	-
Banana	63-64	10	5	-
Curaua	73	20	1,5	1,0
Sisal	47-62	21-24	7-9	-
Juta	41-48	18-22	21-24	0,8

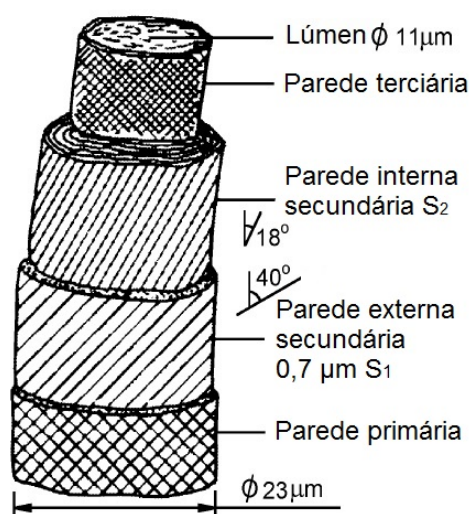
fonte: (BENINI, 2011).

Ainda segundo Benini (2011), é necessário o conhecimento dos principais componentes das fibras vegetais e a maneira como estão arranjados na estrutura da fibra para que os mesmos possam ser utilizados como reforço de compósitos poliméricos.

A celulose ($C_6H_{10}O_5$)_n é um polímero de glicose, com n variando entre 200 a 7000.

A hemicelulose, ($C_5H_8O_4$) ou ($C_6H_{10}O_5$), depois da celulose, é o complexo de maior abundância na biosfera. A Lignina é uma macromolécula complexa de estrutura polifenólica, atuando como ligante entre fibrilas e está presente em todas as camadas da parede celular do vegetal (BENINI, 2011). As paredes celulares da fibra de sisal, assim como todas as fibras lignocelulósicas, são compostas por várias camadas de estrutura fibrilar, conforme apresentado no esquema da Figura 15. Na parede primária as fibrilas de celulose tem estrutura reticulada, na parede secundária, as fibrilas são arranjadas de modo a formar espirais com ângulo de 40 graus em relação ao eixo longitudinal da célula. A parede secundária por sua vez possui ângulos de 18 a 25 graus. A terceira parede é a mais interna, mais fina e possui estrutura fibrilar paralela e envolve o lúmen. As fibrilas são compostas por microfibrilas com espessura de aproximadamente 20 nm. Microfibrilas englobam cadeias moleculares de celulose com espessura de 0,7 nm e alguns nanômetros de comprimento (KURUVILLA et al., 1999).

Figura 15 – Esquema de uma célula de fibra de Sisal com dimensões aproximadas



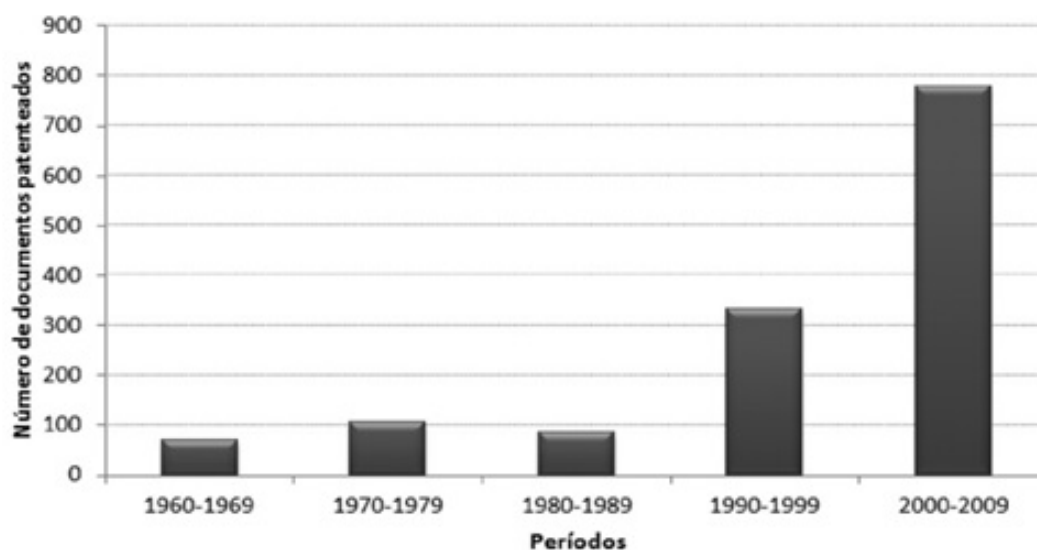
fonte: (KURUVILLA et al., 1999)

2.7 FIBRAS NATURAIS DE SISAL COMO REFORÇO EM COMPÓSITOS POLIMÉRICOS

Segundo Scopel et al., (2013), nas últimas décadas, o uso de fibras naturais em substituição às fibras sintéticas no processamento de materiais compósitos vem ganhando atenção de investidores e mais pesquisas vem sendo feitas. A indústria automobilística vem seguindo essa tendência trocando, em alguns casos, fibras de vidro por fibras naturais de sisal, cânhamo, coco, entre outras (CASTILHOS, 2011), (BARROS, 2010). A utilização de fibras naturais em compósitos se mostra como um diferencial competitivo na inovação em produtos e processos, seja por fatores econômicos, apelo ambiental ou propriedades mecânicas (SCOPEL et al., 2013).

Pesquisas recentes envolvendo aplicações de fibras naturais em matrizes poliméricas envolvem fibra de coco em biocompósito (JANG et al., 2012), piaçava em poliéster (MONTEIRO et al., 2006), sisal e curauá em poliolefinas (SPINACE et al., 2011), entre outros. Com o crescente número de informações e conhecimentos sobre de fibras naturais, em especial o sisal, é natural que aumente no mesmo sentido o número de patentes registradas sobre o assunto. A patente é um título de propriedade temporária sobre uma invenção ou modelo de utilidade (SCOPEL et al., 2013). No trabalho de Scopel, foi realizada a análise de documentos patenteados associados ao sisal, coletados da base de dados *Derwent Innovation Index* no período entre 1960 a 2009 nas seções de química, elétrica e eletrônica e engenharia. Na Figura 16 é possível observar o substantivo aumento de patenteamento relativo ao uso do sisal das últimas décadas.

Figura 16 – Análise de documentos patenteados relacionados ao sisal de 1960 a 2009



fonte: (SCOPEL et al., 2013)

Na Tabela 2 estão apresentadas as patentes associadas ao sisal de acordo com o código CIP (Classificação Internacional de Patentes), mostrando que a utilização de sisal como reforço em compósitos tem papel de destaque.

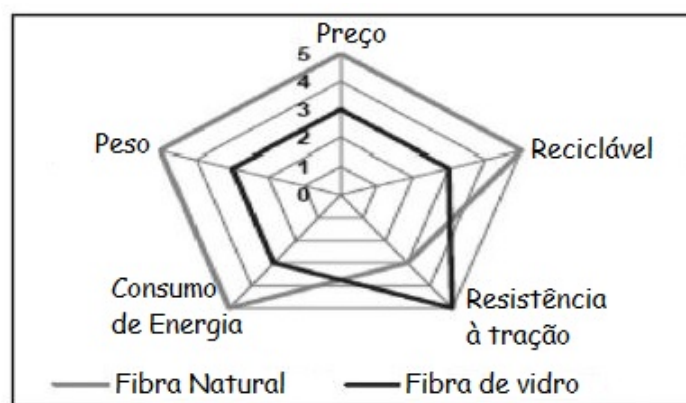
Tabela 2 – Patentes associadas ao sisal de acordo com o código CIP

Código CIP	Breve descrição	Num de patentes	% do total	% acum
C08J-005/05	Sisal como reforços plásticos	101	7,36	7,4
A61K-007/13	Fins médicos/odontológicos/higiênicos	63	2,84	10,2
C08L-097/02	Composições de matérias contendo lignina	40	1,8	12
B32B-027/12	Sisal em produtos em camadas	37	1,67	13,7
C08K-005/00	Uso do sisal em compostos orgânicos	35	1,58	15,2
C08L-067/00	Sisal em Composições de poliésteres	33	1,49	16,7
B32B-005/02	Composições de matérias contendo lignina	32	1,44	18,2
C08L-097/00	Camada que compreenda fibras ou filamentos	32	1,44	19,6
D04H-013/00	Não tecidos por desfibrilação parcial	31	1,40	21,0
B32B-005/22	Uso do sisal em compostos inorgânicos	29	1,31	22,3
-	Soma dos 10 códigos CIP de maior incidência	443	22,3	-

fonte: (SCOPEL et al., 2013).

Compósitos de fibras naturais se sobressaem em vários aspectos em relação aos compósitos feitos de fibras sintéticas, como carbono e vidro, com exceção de resistência mecânica, como pode ser analisado na Figura 17 (FARUK et al., 2014).

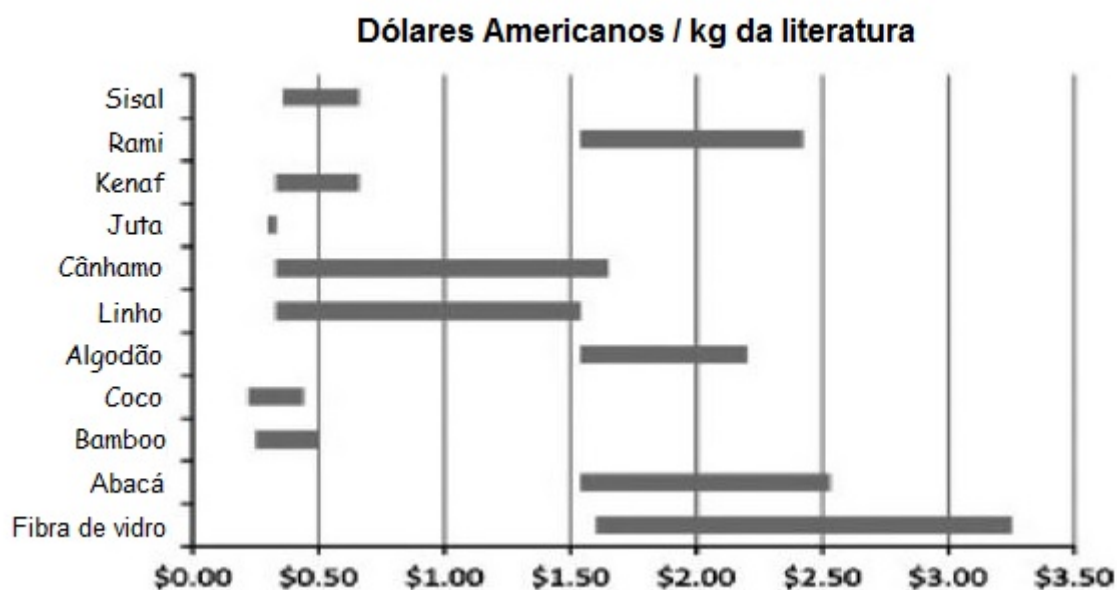
Figura 17 – Comparação entre materiais compósitos de fibras naturais e sintéticas de carbono e vidro



fonte: (FARUK et al., 2014)

A utilização de fibras naturais em materiais compósitos na indústria automobilística é guiada por preço, redução de peso, reciclabilidade, incentivos e não por demandas técnicas. Além disso, a gama de produtos não é mais restrita a aplicações não estruturais e somente a interiores (FARUK et al., 2014). No trabalho de Khalfallah (KHALFALLAH et al., 2014) por exemplo, os autores investigaram as propriedades mecânicas de uma fita de compósito de matriz termorrígida poliéster *Acrodur* (nome comercial, BASF) reforçada por linho, para aplicação em sistemas automotivos que devem suportar cargas acima de 100 quilogramas. Uma análise de preço por massa das principais fibras naturais encontradas hoje como reforço em matrizes poliméricas é citada e comparada com fibras de vidro no trabalho de Faruk, 2014. O gráfico apresentado na Figura 18 aponta o sisal como uma das alternativas mais baratas, mostrando algo em torno de 0,5 Dólares por quilograma de material.

Figura 18 – Comparação de preço por massa entre fibras naturais e fibra de vidro



fonte: (FARUK et al., 2014)

2.8 MATRIZ POLIMÉRICA BIOBASED: UM BIOPOLÍMERO

O consumo de plásticos na Europa em 2013 foi algo em torno de 46,3 milhões de toneladas, e mais da metade dessa quantidade de plástico foi obtida de petróleo ou poliolefinas não biodegradáveis (CHAUVET; SAUCEAU; FAGES, 2017). Ainda segundo Chauvet, em 2012, das 25,2 toneladas de resíduos plásticos, 62% foram recuperados e 38% foram destinados a aterros. Com a finalidade de reduzir a quantidade de material polimérico que tem como destino final aterros, preservando assim as reservas de petróleo, cada vez mais polímeros não oriundos de petróleo são requisitados. Nesse cenário, os polímeros “biobased” desempenham papel fundamental. Eles são polímeros derivados de fontes renováveis, podendo ser polimerizados a partir de monômeros naturais. Os polímeros biobased podem servir como substitutos dos polímeros obtidos a partir do petróleo em praticamente quase todas as aplicações (CHAUVET; SAUCEAU; FAGES, 2017).

Embora os polímeros biobased tenham ganhado notória evolução no mundo dos compósitos, algumas desvantagens devem ser levadas em consideração. Algumas vantagens e desvantagens sobre o uso de polímeros biobased podem ser vistas abaixo (FARUK et al., 2014).

- Vantagens;
 - Bioplásticos ajudarão a reduzir a dependência em óleo;
 - São feitos a partir de fontes renováveis;
 - Muitos bioplásticos são biodegradáveis;
 - Custo de produtos está ficando mais competitivos devido ao aumento do custo do óleo;
 - Contínua pesquisa conduzirá a melhoria de técnicas de produção e produtos que são mais ambientalmente amigáveis;

- Desvantagens;
 - Existe uma validade baixa para alguns dos bioplásticos sustentáveis;
 - Alguns bioplásticos tem baixo desempenho quando comparados a plásticos à base de petróleo;
 - Existe a preocupação de que os bioplásticos desequilibrem os métodos atuais de reciclagem;
 - Uma vez que a produção de bioplásticos como mercado é relativamente novo, o preço de fabricação não é tão efetivo quanto ao preço de fabricação de plásticos à base de petróleo, que pode ser referenciado pelo preço do próprio petróleo;

2.9 O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

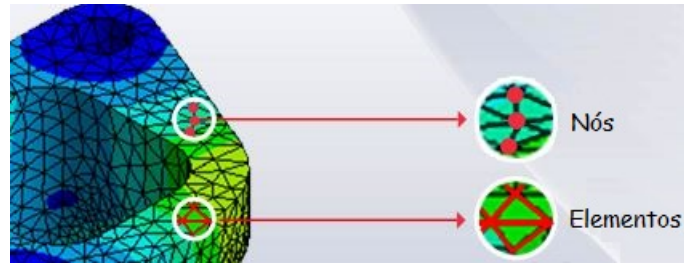
Em engenharia, a solução analítica de estruturas de importância prática são complexas e, muitas vezes o problema requer excessivas simplificações que resultam em cálculos imprecisos (FILHO, 2005). Os métodos analíticos, na esfera da resistência dos materiais, permitem o cálculo exato dos deslocamentos, deformações e tensões em todos os pontos de uma estrutura, porém somente para casos conhecidos, que fogem das aplicações práticas de engenharia (MIRLISENNA, 2016). O método dos elementos finitos apresenta procedimentos aproximados, que podem se aplicar a todos os tipos de estruturas e independentemente do tipo de carregamento fornece resultados dentro de um nível de aceitação satisfatório (FILHO, 2005).

2.9.1 Discretização de sistemas contínuos

Ao se projetar um componente que sofre esforços mecânicos, por exemplo, é necessário o entendimento de sua rigidez e também outros parâmetros importantes para se ter uma previsão de seu comportamento em serviço (MIRLISENNA, 2016). Para conhecer o deslocamento, deformação e tensões de um componente frente à um esforço mecânico, métodos analíticos clássicos tratam o problema dividindo-o componente em finitos e muito pequenos elementos (diferenciais) e, a partir do comportamento desses elementos, é possível se ter domínio do comportamento do todo. Tal método oferece resposta exata, porém as soluções das equações diferenciais são conhecidas apenas para alguns casos e fogem das aplicações práticas de engenharia (FILHO, 2005).

A discretização de sistemas contínuos consiste na divisão de um determinado componente em partes distintas, conectadas entre si nos pontos discretos, chamados de nós. Nesse caso, a montagem dos elementos de dimensões finitas (não mais diferencial) e conhecidas estabelece o todo. No modelo discretizado, cálculos são realizados em alguns pontos, e não mais em infinitos pontos, como no caso contínuo. A partir do conhecimento de cada elemento finito, é possível entender o comportamento do componente. Ao conjunto de nós e elementos, se dá o nome de malha (MIRLISENNA, 2016). Deve-se tomar cuidado para que o número de pontos discretos seja suficiente para representar de forma minimamente satisfatória determinado componente. A Figura 19 ilustra nós e os elementos finitos de um componente discretizado.

Figura 19 – Nós e elementos finitos de um componente discretizado

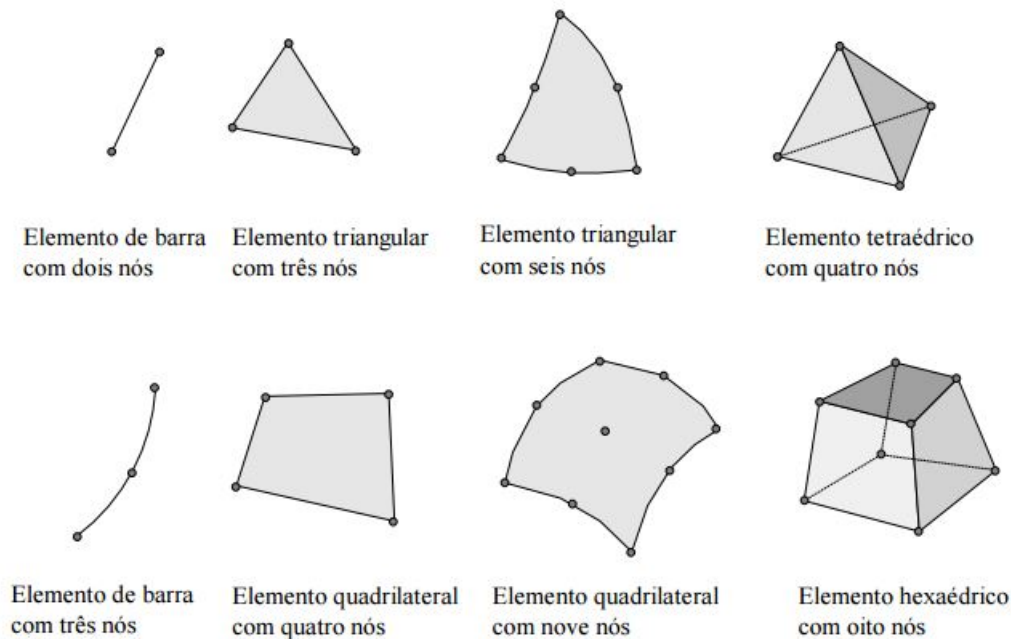


fonte: (MIRLISENNA, 2016)

2.9.2 Tipos de elementos finitos e formação da malha

Para aplicação do método dos elementos finitos é necessária a discretização do componente a ser estudado. A discretização consiste na transformação do sistema contínuo em um sistema discreto, composto de vários elementos de dimensões conhecidas (FILHO, 2005). A Figura 20 traz os principais elementos finitos.

Figura 20 – Principais tipos de elementos finitos



fonte: (SOUZA, 2003)

A precisão do método dos elementos finitos depende diretamente da quantidade de nós, tamanho e tipo dos elementos presentes na malha. Embora seja um método aproximado, pode-se dizer que no limite, quando o tamanho dos elementos tende a zero, a solução obtida converge para a solução exata do problema (SOUZA, 2003).

2.10 CRITÉRIO DE FALHA

Ao projetar um componente com um determinado material, deve ser estabelecido um limite superior para o estado de tensão que defina a falha do material. Para materiais dúcteis, esse limite pode ser

marcado como o início do escoamento, ao passo que para materiais frágeis pode ser marcado pela fratura (HIBBELER, 2004). Quando submetido a um estado multiaxial de tensões, algumas teorias de falhas são frequentemente utilizadas na engenharia.

A teoria da tensão de cisalhamento máxima, também conhecido por critério do escoamento de Tresca, é utilizada para prever a tensão de falha de um material dúctil (BEER, 1982). A teoria da energia de distorção máxima, que às vezes leva no nome de R. von Mises e H. Hencky, também é utilizada para materiais dúcteis, porém essa última define seu critério de falha baseado nas distorções provocadas pela energia de deformação (HIBBELER, 2004).

Para materiais frágeis, quando o comportamento do gráfico tensão-deformação é similar tanto para tração quanto para compressão, a teoria da tensão normal máxima pode ser aplicada, ela diz que um material frágil falha quando a tensão principal máxima atinge um valor limite igual ao que o material resiste quando submetido à tração simples. Ainda para materiais frágeis, o critério de falha de Mohr pode ser aplicado quando as propriedades do material sob tração são diferentes das propriedades sob compressão (BEER, 1982).

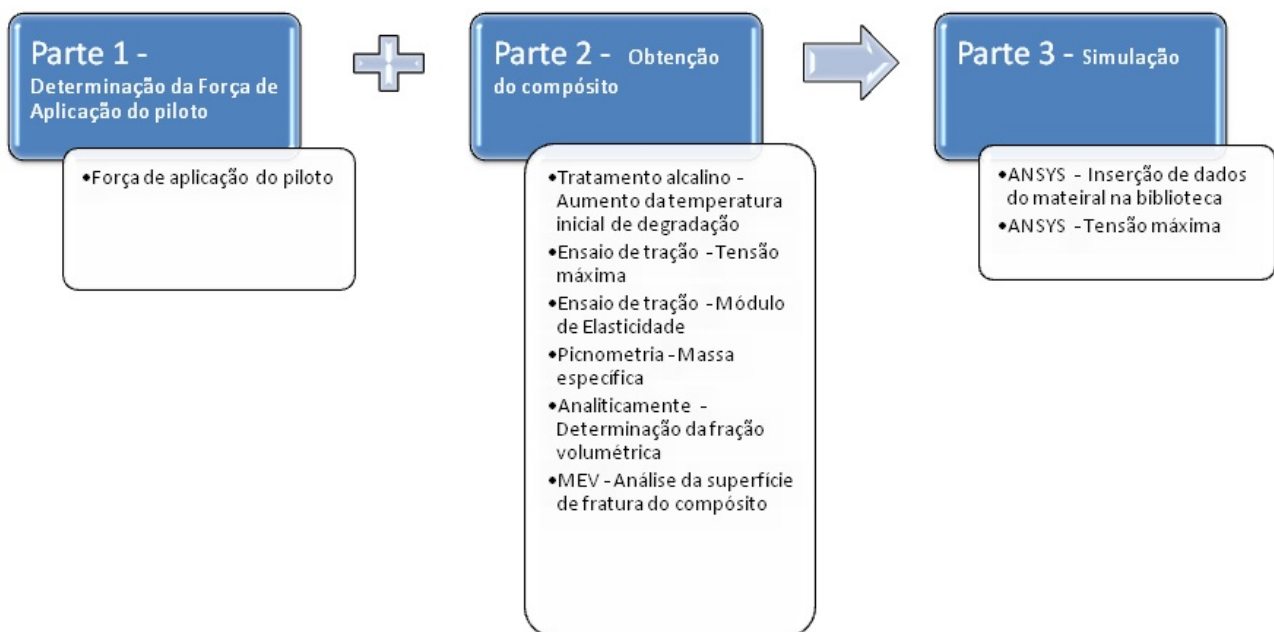
Simulações envolvendo materiais compósitos laminados apontam o critério de falha Tsai-Wu como o mais indicado para esse tipo de material (SIQUEIRA et al., 2009), (TITA; CARVALHO; SANTOS, 2002). O critério de máxima tensão e Tsai-Wu apresentam resultados coerentes quando o modelo é submetido apenas a carregamentos simples (TITA; CARVALHO; SANTOS, 2002).

3 METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho foi dividida em três partes principais. A primeira parte consta de uma análise do sistema de freio e tem como objetivo a determinação da força de aplicação do piloto necessária para uma máxima desaceleração do veículo. Na segunda parte o compósito foi processado, ensaiado em tração e algumas caracterizações foram realizadas. Na terceira e última parte, dados obtidos através das caracterizações do material foram inseridos na biblioteca do ANSYS e um modelo 3D do pedal foi ensaiado.

A Figura 21 mostra as três partes do trabalho bem como seus resultados.

Figura 21 – Partes do trabalho

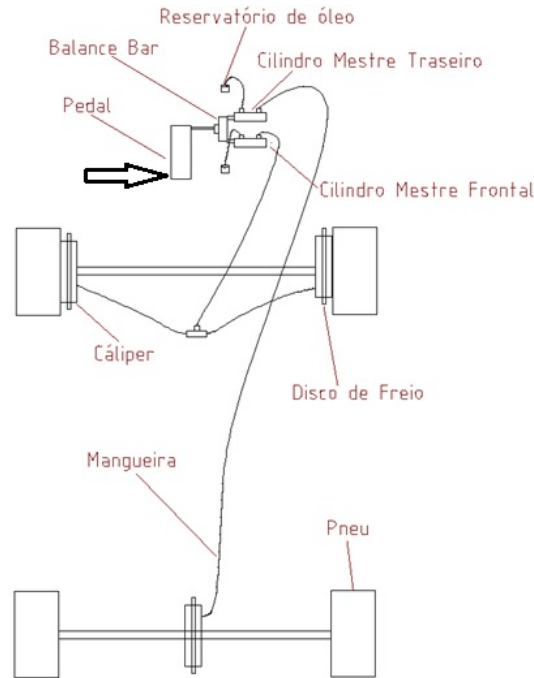


fonte: O autor

3.1 PARTE 1: DETERMINAÇÃO DA FORÇA DE APLICAÇÃO DO PILOTO

O sistema de freio do atual protótipo (de 2016) do Baja está representado na Figura 22.

Figura 22 – Sistema atual de freio do protótipo baja de 2016



fonte: O autor

- Componentes de interesse desse trabalho:

- Pedal;
- Balance Bar;
- Cilindros mestre;
- Discos de freio;
- Calíperes;

Os componentes citados acima serão importantes para a análise de esforços que seguirá ao longo desse trabalho. Não será considerada nesse trabalho a perda de carga devido à mangueira flexível do sistema de freio.

3.1.1 Força de frenagem necessário

O objetivo da parte 1 deste trabalho é determinar a força de aplicação do piloto, pois esse valor será utilizado na parte 3, onde o valor é necessário para a simulação.

As Equações (10) e (11) fornecem o valor da força máxima de frenagem por eixo, devido a análise do movimento do carro como um todo e a transferência de carga durante a frenagem.

Manipulando as Equações (12) a (17), pode-se chegar a:

$$F_{xf} = \frac{4 \cdot \mu \cdot F_{piloto} \cdot C \cdot (r_o^3 - r_i^3) \cdot D_{caliper}^2}{3 \cdot (r_o^2 - r_i^2) \cdot R_{pneu} \cdot D_{CM}^2} \quad (18)$$

$$F_{xt} = \frac{2 \cdot \mu \cdot F_{piloto} \cdot C \cdot (r_o^3 - r_i^3) \cdot D_{caliper}^2}{3 \cdot (r_o^2 - r_i^2) \cdot R_{pneu} \cdot D_{CM}^2} \quad (19)$$

sendo:

F_{xf} : Força de frenagem no eixo frontal [N]

F_{xt} : Força de frenagem no eixo traseiro [N]

$D_{caliper}$: Diâmetro do cilindro do calíper [m]

D_{CM} : Diâmetro do cilindro do cilindro mestre [m]

R_{pneu} : Raio do pneu [m]

O lado esquerdo das equações 10, 11, 18 e 19 trata da mesma grandeza, que é a força de frenagem por eixo.

3.2 PARTE 2: OBTENÇÃO DO COMPÓSITO

3.2.1 A escolha do reforço

O material escolhido foi o sisal. O material se encontra em forma de tecido bidirecional. Segundo a norma ASTM D123 (2009), o material apresenta um arranjo *Plain weave*, com trama e urdume. Na Figura 23 se encontram algumas propriedades do tecido de sisal utilizado.

Figura 23 – Tecido de sisal



Distância média entre os filamentos do urdume, em mm	2,00
Distância média entre os filamentos da trama, em mm	3,50
Diâmetro da fibra*, em μm	100 - 200
Gramatura, em g/m^2	$947,3 \pm 74,0$

* valores obtidos por MEV

fonte: (MILANESE, 2012)

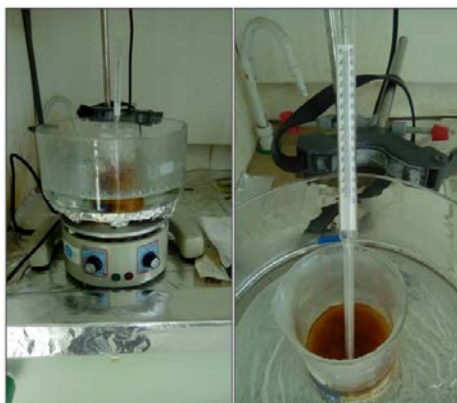
3.2.1.1 Tratamento químico - Mercerização

Foi utilizado Hidróxido de Sódio (NaOH) PM: 40,00 do fabricante Dinâmica.

Uma solução alcalina de NaOH 5% (m/v)(100 ml) foi preparada para imersão do tecido de sisal. A solução em banho-maria foi elevada a 70 °C por uma placa aquecedora e mantida a essa temperatura por uma hora, conforme Figura 24.

Após uma hora, o tecido foi filtrado com água destilada e levado a estufa por 24 horas a temperatura de 60 °C.

Figura 24 – Tratamento alcalino



fonte: o autor

3.2.1.2 Termogravimetria (TGA/DTG)

Uma amostra do tecido de sisal tratado quimicamente foi comparada com uma amostra do tecido *in natura*, com a finalidade de observar uma possível elevação da temperatura inicial de degradação do material.

O equipamento utilizado foi a termobalança Seiko modelo TGA-50, disponível no DMT/FEG/UNESP, operando com fluxo de nitrogênio. A taxa de aquecimento utilizada foi de 10 °C/min, e uma faixa de temperaturas de 40 a 600 °C/min.

3.2.2 A escolha da matriz

A matriz utilizada foi a resina poliéster insaturada BioPoli UC 5788, com endurecedor Peróxido de Acetila Acetona (AAP), suas propriedades se encontram na Tabela 3.

Tabela 3 – Propriedades da resina BioPoli

Código	Viscosidade [cps]	Gel time [min]	Catalisador	Processo
UC 5518 - TMI	70 - 90	15 - 20	AAP	RTM

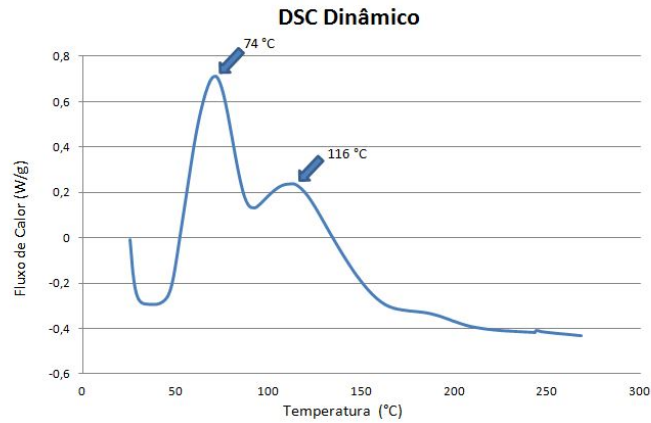
fonte: O autor

3.2.2.1 Determinação dos parâmetros de cura da resina

Os parâmetros de cura foram determinadas de acordo com o *datasheet* da resina juntamente com análise por Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) dinâmico e isotérmico, realizadas em um calorímetro Perkin Elmer modelo DSC 8000.

O gráfico do DSC dinâmico (Figura 25) mostra dois picos de cura, o primeiro a 74 °C e o segundo a 116 °C.

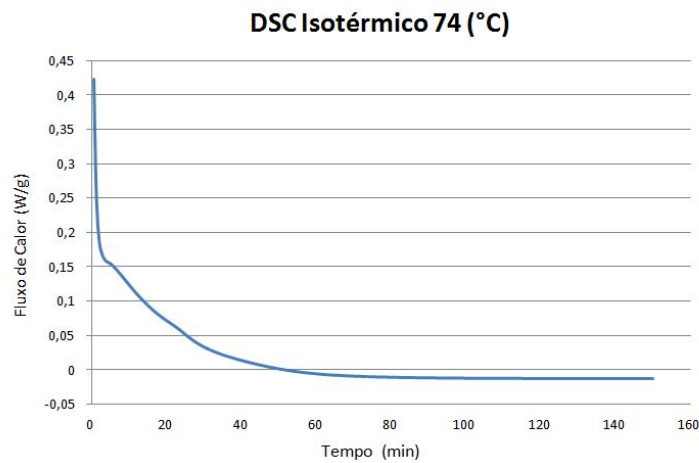
Figura 25 – DSC Dinâmico



fonte: Laboratório de Fadiga e Materiais Aeronáuticos

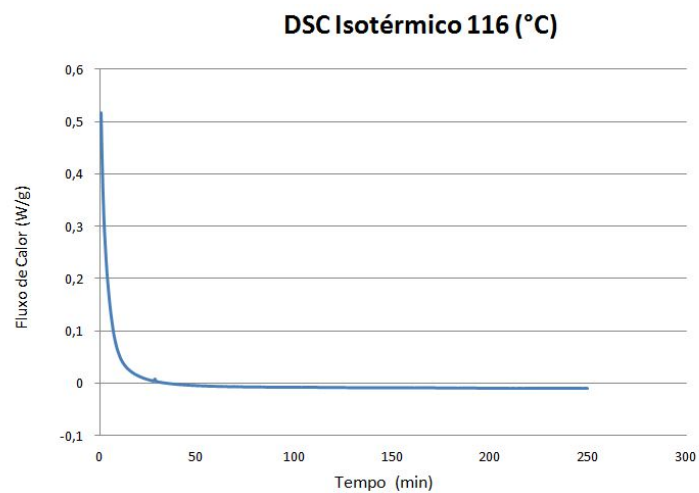
Para determinar o tempo de cura em cada um dos patamares, foram feitos DSC isotérmicos às temperaturas de 74 °C e 116 °C, conforme Figuras 26 e 27.

Figura 26 – DSC Isotérmico - 74°C



fonte: Laboratório de Fadiga e Materiais Aeronáuticos

Figura 27 – DSC Isotérmico - 116°C



fonte: Laboratório de Fadiga e Materiais Aeronáuticos

O tempo de 120 minutos foi adotado como o suficiente para ambos os patamares de cura que, juntamente com a pré-cura à 25 °C sugerida pelo fabricante, constituíram a seguinte configuração de cura:

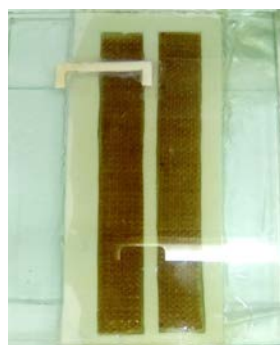
- Patamar 1 - 24 horas a 25 °C;
- Patamar 2 - 120 minutos a 74 °C;
- Patamar 3 - 120 minutos a 116 °C;

3.2.3 O material compósito

3.2.3.1 O processamento do compósito

Para o processamento do material foi utilizado 1% (v/v) de catalisador misturado à resina e agitado manualmente. O aparato para a cura do material foi feito com duas placas de vidro, um molde de silicone, pasta de silicone para fixar o molde de silicone e desmoldante, como mostra a Figura 28.

Figura 28 – Aparato para processamento do compósito



fonte: O Autor

Pasta de silicone foi utilizada entre a placa de vidro inferior e o molde de silicone, a fim de que seja minimizado o vazamento de resina. Fitas do tecido de sisal tratadas quimicamente foram cortadas com tesoura de modo que coubessem no molde de silicone. Resina catalisada foi então vertida cuidadosamente sobre o tecido. Após verter a resina no molde de silicone, a placa superior de vidro foi cuidadosamente acomodada sobre o aparato. Após o fechamento do aparato com a placa de vidro superior, o mesmo foi levado a estufa para curar conforme os patamares de cura pré estabelecidos. Um material metálico, de aproximadamente 3 kg, foi colocado sobre o aparato durante a cura, para comprimir o material.

3.2.3.2 Caracterização mecânica: ensaio de tração

Para determinar a tensão máxima do compósito foi realizado o ensaio de tração. O ensaio foi realizado no DMT/FEG/UNESP na máquina universal de ensaios, marca SHIMADZU, modelo AG-X, em temperatura ambiente. A velocidade de avanço constante de 2mm/min e célula de carga de 10 kN. As dimensões dos cinco corpos de prova e parâmetros do ensaio foram tomados de acordo com a norma ASTM D 3039.

Após a cura, o material foi desmoldado, cortado em serra de fita e lixado nas dimensões sugeridas pela norma.

3.2.3.3 MEV (Microscópio eletrônico de varredura)

As análises foram feitas utilizando o MEV de alta definição Zeiss EVO LS-15 com EDS/EBDSOxford INCA Energy 250 operando com filamento de tungstênio a 10 keV, técnica de baixo vácuo e distância de trabalho de 12 mm.

3.2.3.4 Determinação da densidade por picnometria

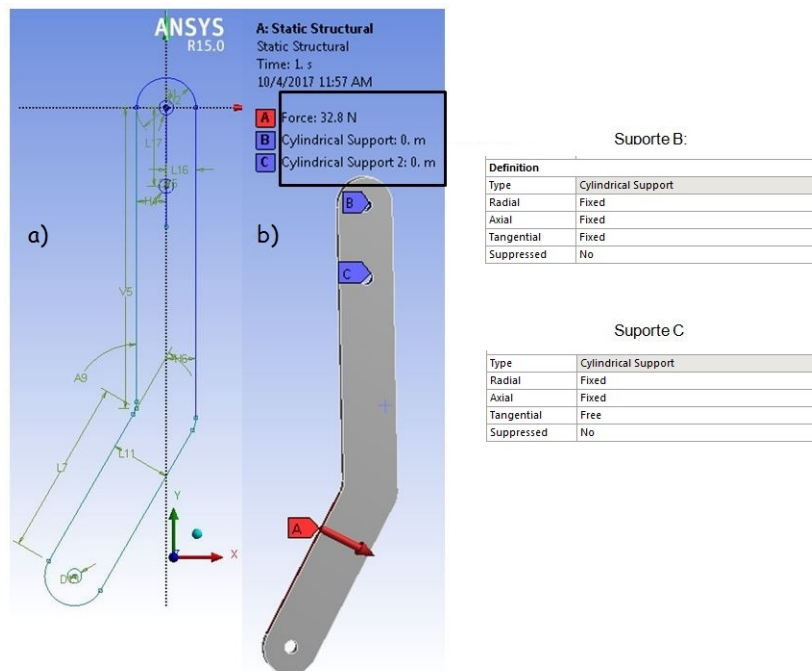
Para determinação da densidade do compósito e do sisal foi utilizado o picnômetro a gás Ultrapyc 1200e, do fabricante Quantachrome Instruments.

3.3 PARTE 3: SIMULAÇÃO

3.3.1 Criação de modelo 3D e inserção suporte e esforços

Foi utilizado o software ANSYS 15.0 para simular o comportamento do pedal em serviço. Um modelo 3D (Figura 29-b) foi criado a partir de um *sketch* (Figura 29-a) e sobre ele inserido suportes e uma força distribuída na face do pedal (Figura 29-b), de módulo igual à metade de F_{piloto} .

Figura 29 – Criação do modelo 3D do pedal e inserção de suportes e da força aplicada pelo piloto



fonte: o autor

Os suportes B e C foram estabelecidos de forma a representar uma situação de máxima solicitação mecânica do pedal. Os graus de liberdade do suporte C ilustram que o pedal está livre para girar em torno de C. Já o suporte B foi travado para representar uma situação onde o piloto pressiona o pedal porém o mesmo não se movimenta, caracterizando uma situação de máxima solicitação mecânica.

3.3.2 Criação da malha

A discretização do modelo se deu de acordo com as propriedades da malha na Figura 30.

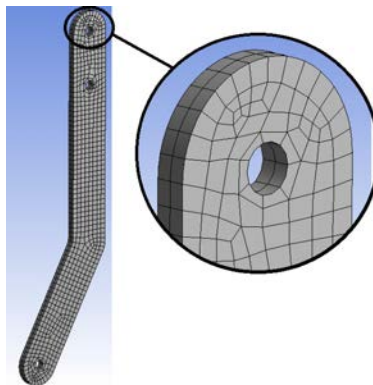
Figura 30 – Parâmetros da malha

Defaults			
Physics Preference	Mechanical		
<input type="checkbox"/> Relevance	0		
Sizing			
Use Advanced Size Function	Off		
Relevance Center	Coarse		
<input type="checkbox"/> Element Size	Default		
Initial Size Seed	Active Assembly		
Smoothing	Medium		
Transition	Fast		
Span Angle Center	Coarse		
Minimum Edge Length	4,e-003 m		
Inflation			
Use Automatic Inflation	None		
Inflation Option	Smooth Transition		
<input type="checkbox"/> Transition Ratio	0,272		
<input type="checkbox"/> Maximum Layers	5		
<input type="checkbox"/> Growth Rate	1,2		
Inflation Algorithm	Pre		
View Advanced Options	No		
Patch Conforming Options			
Triangle Surface Mesher	Program Controlled		
Patch Independent Options			
Topology Checking	Yes		
Advanced			
Number of CPUs for Parallel Part M...	Program Controlled		
Shape Checking	Standard Mechanical		
Element Midside Nodes	Program Controlled		
Straight Sided Elements	No		
Number of Retries	Default (4)		
Extra Retries For Assembly	Yes		
Rigid Body Behavior	Dimensionally Reduced		
Mesh Morphing	Disabled		
Defeaturing			
Pinch Tolerance	Please Define		
Generate Pinch on Refresh	No		
Automatic Mesh Based Defeaturing	On		
<input type="checkbox"/> Defeaturing Tolerance	Default		
Statistics			
<input type="checkbox"/> Nodes	8156		
<input type="checkbox"/> Elements	1348		
Mesh Metric	None		
Scope			
Scoping Method	Geometry Selection		
Geometry	1 Face		
Definition			
Suppressed	No		
Type	Element Size		
<input type="checkbox"/> Element Size	3,e-003 m		
Behavior	Hard		

fonte: o autor

Como resultado obteve-se 1348 elementos e 8156 nós. Utilizou-se parametrização automática do ANSYS 15.0, como mostra Figura 31.

Figura 31 – Malha gerada



fonte: o autor

4 RESULTADOS

4.1 PARTE 1 - DETERMINAÇÃO DA FORÇA DE APLICAÇÃO DO PILOTO

As variáveis das Equações (18) e (19), com exceção da Força de aplicação do piloto (que é o que se deseja) são conhecidas, e se encontram na Tabela 4.

Tabela 4 – Variáveis do baja referentes ao sistema de freio

Variável	Descrição	Valor	Unidade
μ	Coefficiente de fricção	0,65	-
C	Ganho do pedal (alavanca)	3,86	-
r_i	Raio interno do material de fricção	0,1546	m
r_o	Raio externo do material de fricção	0,18	m
R_{pneu}	Raio do pneu	0,2665	m
$D_{caliper}$	Diâmetro do atuador do Cáliper	0,02542	m
D_{CM}	Diâmetro do atuador do Cilindro Mestre	0,0127	m

fonte: o autor

O coeficiente de fricção foi de 0,65 (SANTOS, 2014).

As variáveis das Equações (10) e (11) também são conhecidas, conforme Tabela 5. As variáveis podem ser visualizadas na Figura 10.

Tabela 5 – Dimensões importantes do veículo baja

Variável	Descrição	Valor	Unidade
M	Massa total do baja	233	kg
c	Distância entre o eixo traseiro e o CG	0,54	m
b	Distância entre o eixo frontal e o CG	0,96	m
h	Altura do CG	0,6	m
L	Distância entre eixos	1,5	m
μ_p	Coefficiente de fricção entre pneu e solo	0,65	-

fonte: o autor

Segundo Puhn (1985), a máxima desaceleração é atingida quando os eixos dianteiro e traseiro estão na eminência de travamento, segundo a Equação (20):

$$D_{max} = \frac{\frac{\mu_p \cdot g}{L} \cdot (c + b)}{1 + 2 \cdot \frac{\mu_p \cdot h}{L}} \quad (20)$$

Os valores das variáveis estão na Tabela 2. Substituindo os valores, tem-se:

$$D_{max} = 4,2 \left[\frac{m}{s^2} \right]$$

Pode-se, agora, determinar o valor de W_f (Equação 8). Substituindo os valores encontrados na Tabela 2, tem-se:

$$W_f = 1214,3 [N]$$

O valor de 1214,3 N equivale a 123 Kg, que corresponde a 53% da massa do veículo. Quanto em situação estática, a massa suportada pelo eixo frontal é de 84 kg (36%). Fica evidenciado, portanto, a transferência de carga durante a frenagem.

Pode-se também encontrar o valor de F_{xmf} (Equação 10):

$$F_{xmf} = 789,3[N]$$

Somente a força de frenagem no eixo frontal será considerada nos cálculos para determinação da força F_{piloto} , pois, devido a transferência de carga durante a frenagem, é exigido uma força de aplicação maior do piloto para o travamento do eixo frontal.

Substituindo os valores da Equação 18, tem-se:

$$F_{xf} = 12,62F_{piloto}$$

F_{xmf} e F_{xf} representam a força de frenagem no eixo frontal, obtidas por caminhos diferentes. Igualando F_{xmf} a F_{xf} , pode-se finalmente obter a força de aplicação do piloto necessária para uma desaceleração máxima do veículo:

$$F_{xmf} = F_{xf}$$

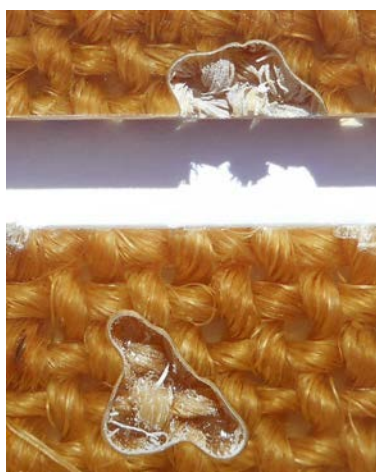
$$789,3 = 12,62 F_{piloto}$$

$$F_{piloto} = 65,6 [N]$$

4.2 PARTE 2: OBTENÇÃO DO COMPÓSITO

Obteve-se o material compósito mostrado na Figura 32 com alguns defeitos superficiais. Esses defeitos são decorrentes da presença de bolhas que foram formadas durante o processamento devido à eliminação de voláteis durante a cura da resina em estufa convencional.

Figura 32 – Defeito superficial do compósito



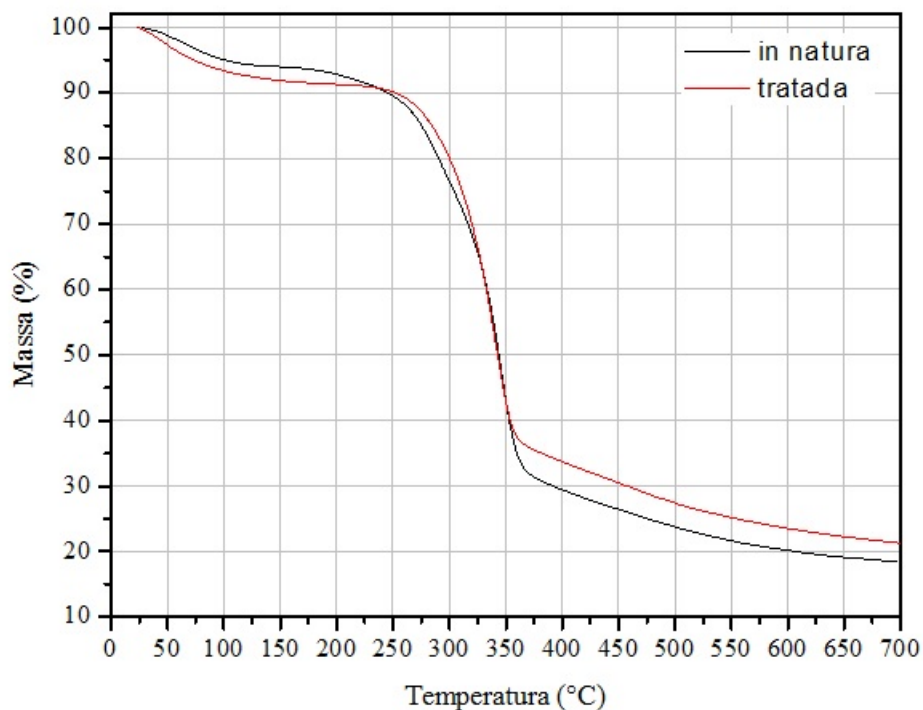
fonte: o autor

4.2.1 Tratamento Alcalino

Para verificar a eficácia do tratamento alcalino na estabilidade térmica das fibras de sisal, as mesmas foram analisadas por termogravimetria e os gráficos gerados estão apresentados nas Figuras 33 e 34.

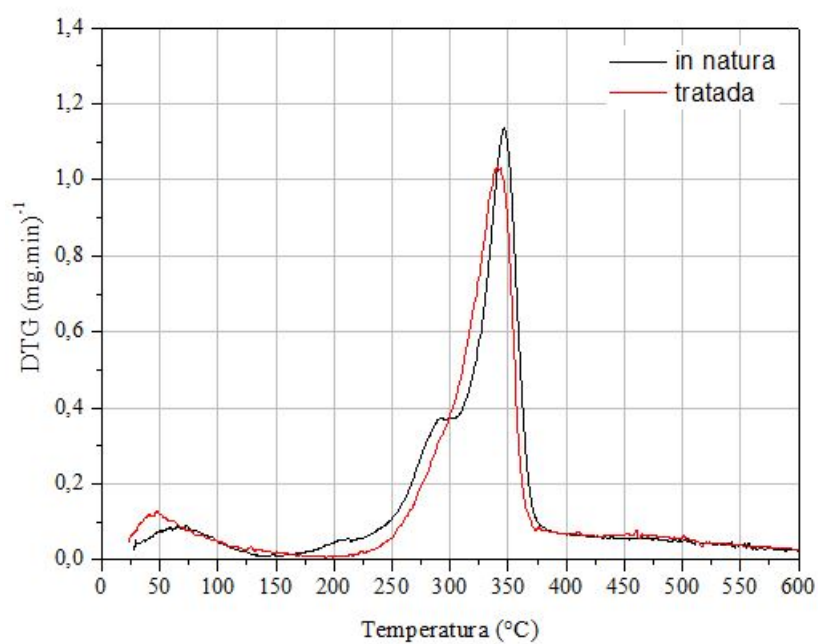
No gráfico TGA (Figura 33), ue representa a % de massa para as fibras de sisal in natura e após o tratamento químico em função da temperatura, é possível observar uma perda de massa com o aumento da temperatura.

Figura 33 – Curvas de Termogravimetria (TGA) das fibras de sisal



fonte: o autor

Figura 34 – Curva DTG



fonte: o autor

Analisando as curvas de TGA e DTG é possível observar que as fibras de sisal apresentam três

estágios distintos de perda de massa nos intervalos descritos na Tabela 6. No primeiro estágio abaixo de 100°C a perda de massa é referente à perda de umidade (BENINI et al., 2017). O segundo estágio que parece apenas na curva da fibra *in natura* é referente à degradação de componentes amorfos, principalmente hemicelulose. No terceiro estágio ocorre a degradação da celulose, componente presente em maior quantidade. A partir da determinação da temperatura inicial de degradação das fibras, de acordo com a Tabela 7, é possível inferir que o tratamento alcalino foi eficiente no aumento da estabilidade térmica da fibra, em torno de 50°C, que permite que a mesma seja utilizada como reforço para a matriz poliéster proposta neste trabalho, visto que as temperaturas de cura da resina se aproximam do valor da temperatura de degradação da fibra *in natura*.

Tabela 6 – DTG - Faixa de temperatura por estágio e ocorrência

Estágio	Faixa de Temperatura	Ocorrência
1	até 150°C	Perda de umidade
2*	de 225 a 310°C	Degradação de componentes amorfos
3	de 250 a 400°C	Degradação da Celulose

*Apenas para a fibra *in natura*. fonte: o autor

As temperaturas iniciais de degradação da fibra *in natura* e da fibra tratada, considerando o início do Estágio 3 como o início da degradação, são dadas na Tabela 7.

Tabela 7 – Temperatura inicial de degradação da fibra tratada e da fibra *in natura*

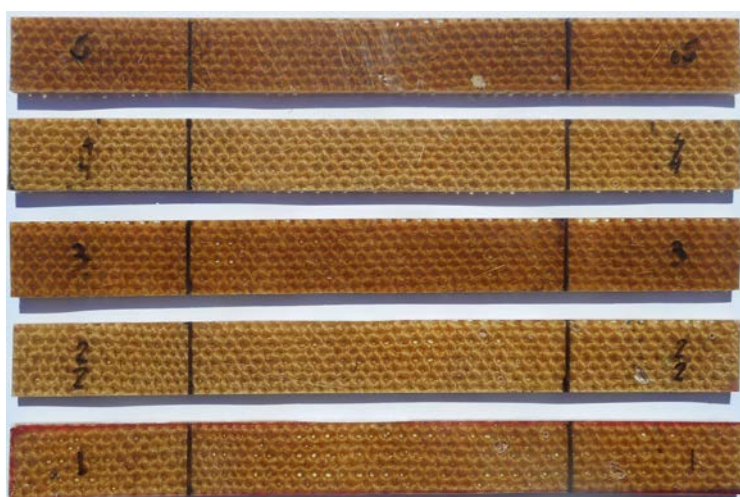
Fibra	Temperatura inicial de degradação
In natura	150 °C
Tratada	200 °C

fonte: o autor

4.2.2 Ensaio de Tração

Após a cura, o material foi desmoldado, cortado em serra de fita e lixado nas dimensões sugeridas pela norma ASTM D3039, como mostra a Figura 35.

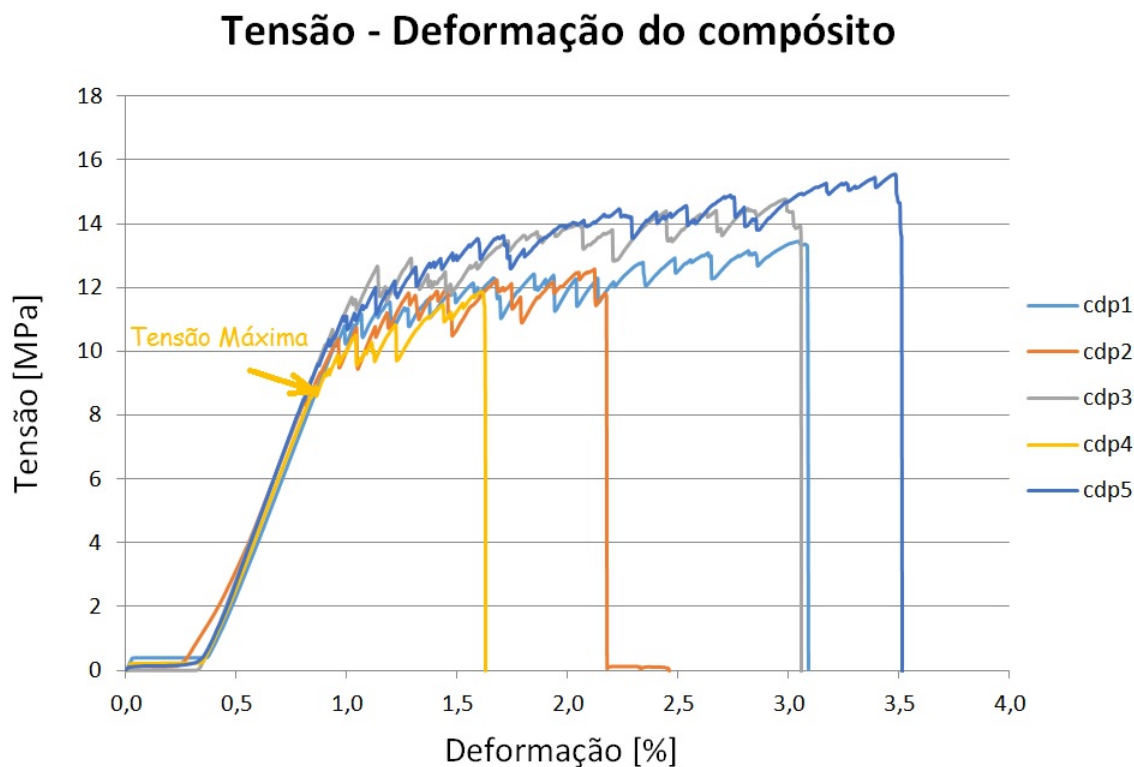
Figura 35 – Compósito nas dimensões para ensaio de tração



fonte: o autor

A Figura 36 mostra o gráfico tensão-deformação dos cinco corpos de prova ensaiados.

Figura 36 – Gráfico tensão-deformação do compósito



A tensão máxima para cada corpo de prova foi adotada como sendo a tensão que antecede a região inconstante do gráfico tensão-deformação (dentes). Como exemplo está ilustrado na Figura 36 a tensão máxima para o CDP 4.

Os valores de tensão máxima e desvio padrão obtidos no ensaio de tração estão descritos na Tabela 8.

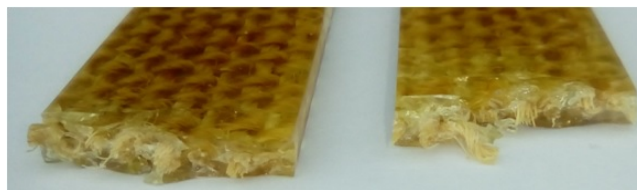
Tabela 8 – Tensão máxima do compósito

Corpo de prova	$\sigma_{max}[MPa]$
CDP1	10,29
CDP2	10,06
CDP3	9,89
CDP4	8,85
CDP5	10,16
Média \pm desvio padrão	9,85 \pm 0,57

fonte: o autor

A superfície fraturada pode ser vista na Figura 37.

Figura 37 – Superfície de fratura



fonte: o autor

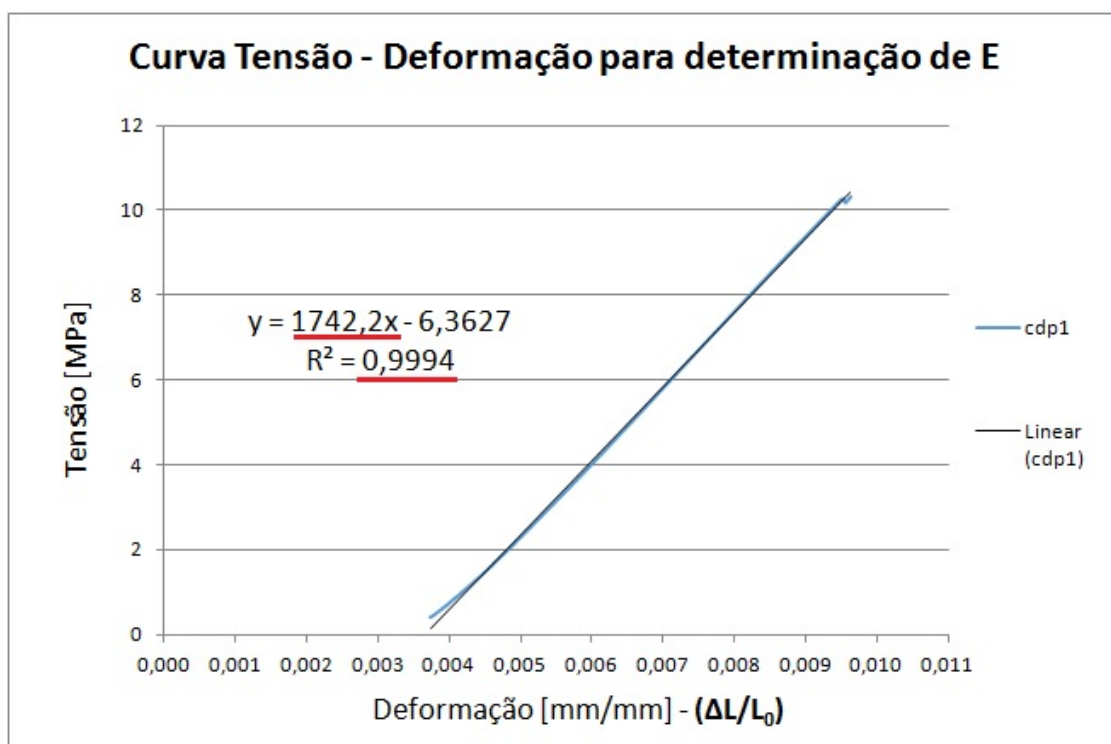
O valor médio do limite de resistência à tração do compósito foi de 9,85 MPa e o valor do desvio padrão foi de 0,57. No trabalho de Milanese (2012), material compósito de epóxi reforçado com duas camadas do mesmo tecido de sisal utilizado nesse trabalho e processado por RTM (*Resin Transfer Molding*), obteve tensão de ruptura à tração de 36,1 MPa e desvio padrão de 1,18.

4.2.2.1 Determinação do módulo de elasticidade

Para determinar o módulo de elasticidade (ou módulo de Young) E, foi utilizado o método gráfico. A parcela linear do gráfico de tensão-deformação foi plotada e uma linha de tendência foi gerada. O coeficiente angular da linha de tendência corresponde ao valor de E em MPa. Valores de R^2 (coeficiente de determinação) variam de 0 a 1, sendo que quanto maior o valor de R^2 , mais próximo do modelo está a amostra.

A Figura 38 mostra o procedimento feito para o CDP1 e a Tabela 9 o resultado para os demais CDPs.

Figura 38 – Parcela linear do gráfico tensão-deformação para determinação de E



fonte: o autor

Tabela 9 – Valores de E

Corpo de prova	Módulo de elasticidade E [GPa]
CDP1	1,17
CDP2	1,54
CDP3	1,83
CDP4	1,74
CDP5	1,82
Média \pm desvio padrão	1,62 \pm 0,25

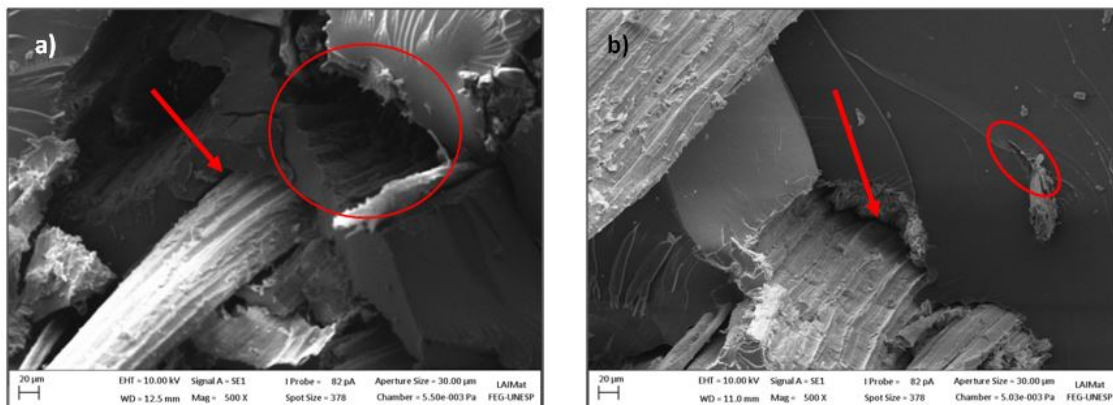
fonte: o autor

O valor médio de E é de 1,62 GPa com desvio padrão de $\pm 0,25$. Na biblioteca de materiais do ANSYS 15.0, o valor de E para resina poliéster é de 3 GPa. De acordo com o website da empresa ATCP Engenharia Física (FÍSICA, 2017), valores de E para poliéster termofixo podem variar de 2,06 a 4,41 GPa.

4.2.3 Análise por microscópio eletrônico de varredura (MEV)

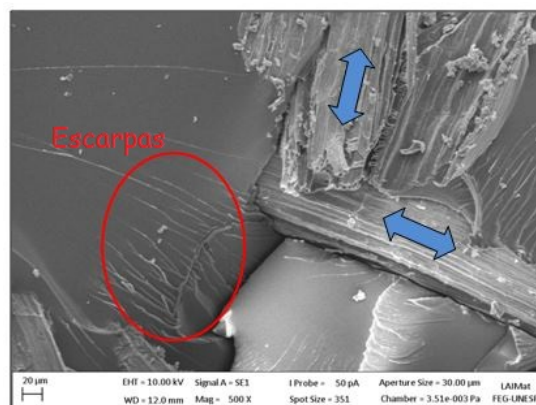
Amostras da região fraturada em tração dos CDPs 1 e 4 foram analisadas. As Figuras 39 e 40 mostram a superfície de fratura dos corpos de prova 1 e 4, respectivamente.

Figura 39 – Análise da superfície de fratura do CDP1



fonte: o autor

Figura 40 – Análise da superfície de fratura do CDP4



fonte: o autor

É possível notar marcas de arrancamento da fibra na matriz na Figura 39a, circulado, indicando que houve interação fibra-matriz fraca. Por outro lado, nas Figura 39a e 39b, indicado pelas setas, nota-se a interface fibra/matriz com um espaçamento grande quando comparado ao espaçamento encontrado no trabalho de Benini et. al. (2017). A elipse na Figura 39b indica um local de início de trinca, próximo à uma fibra cortada. Na Figura 40 é possível perceber claramente as direções da trama e do urdume, indicados pela seta. Ainda na Figura 40, indicado pela elipse, nota-se marcas de escarpa, que são consideradas um fator contribuinte para a redução da resistência à compressão também do módulo de tração (SHIINO et al., 2015).

4.2.4 Determinação da densidade e porcentagem de fibras do material

Os resultados obtidos estão na Tabela 10.

Tabela 10 – Densidade do material compósito e do sisal

Material	Densidade [g/cm^3]	Desvio Padrão
sisal	1,4098	0,0023
compósito	1,2527	0,0020

fonte: o autor

É possível obter a porcentagem de fibras do compósito de 26,65 % [volume de sisal / volume de resina].

4.3 PARTE 3: SIMULAÇÃO

4.3.1 Inserção do material na biblioteca do ANSYS 15.0

Utilizando como base o material poliéster já existente na biblioteca do ANSYS 15.0, foi criado um novo material com características isotrópicas com propriedades determinadas experimentalmente nesse trabalho, que são a densidade do material compósito e o módulo de elasticidade. O procedimento está ilustrado na Figura 41.

Figura 41 – Inserção de dados na biblioteca de materiais do Ansys 15.0

Properties of Outline Row 16: Resin_Polyester			
A	B	C	
Property	Value	Unit	
Density	1,2E-09	mm ⁻³ t	
Isotropic Elasticity			
Derive from	Young's Modulus and Poisson's Ratio		
Young's Modulus	3000	MPa	
Poisson's Ratio	0,316		
Bulk Modulus	2,7174E+09	Pa	
Shear Modulus	1139,8	MPa	
Ply Type			
Type	Isotropic		

Inserção de dados do compósito

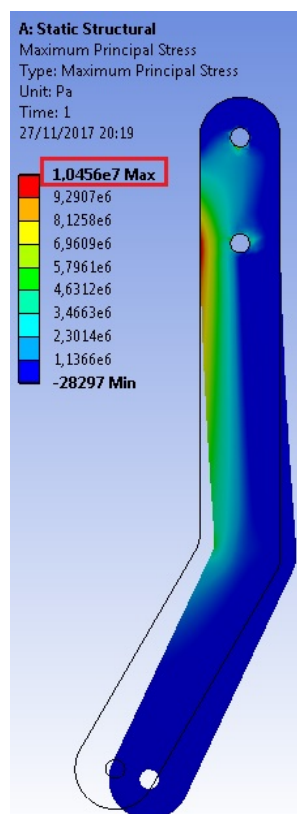
Properties of Outline Row 3: sisal polyester TG			
A	B	C	
Property	Value	Unit	
Density	1,2527	g cm ⁻³	
Isotropic Elasticity			
Derive from	Young's Modulus and Poisson's Ratio		
Young's Modulus	1620	MPa	
Poisson's Ratio	0,316		
Bulk Modulus	1,4674E+09	Pa	
Shear Modulus	6,155E+08	Pa	

fonte: o autor

4.3.2 Tensão máxima suportada pelo modelo do pedal

Realizando uma simulação estática com a modelagem apresentada no item 3.3.1 e utilizando o critério de falha de máxima tensão principal, tem-se o resultado obtido na Figura 42.

Figura 42 – Resultado obtido da simulação estática



fonte: o autor

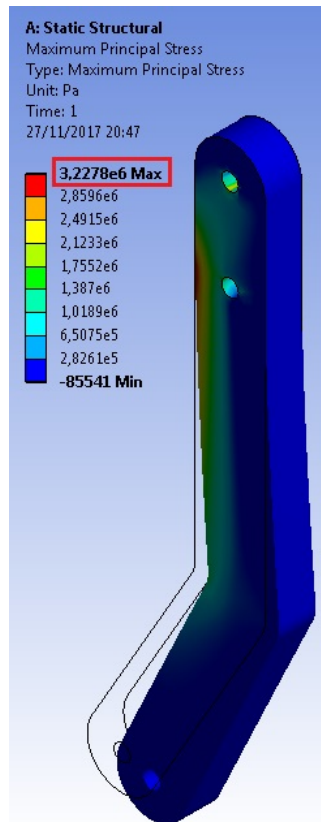
A tensão máxima segundo o critério de máxima tensão principal, de acordo com o esforço e suportes apresentados no item 3.3.1 é de 10,456 MPa. O local da máxima tensão aparece em vermelho na Figura 42 e corresponde ao local onde o material sofre tração. A deformação do pedal pode ser percebida pelo seu traçado original em linha preta.

4.3.3 Alteração de espessura do pedal

Ao considerar o material desenvolvido nesse trabalho como o material que irá compor o pedal de freio do baja, estaria admitindo um coeficiente de segurança de 0,94 (9,85/10,452), ou seja, menor que 1, algo que é absolutamente inadequado. Segundo Puhn (1985), para partes críticas como o pedal do freio, um coeficiente de segurança de no mínimo 3 deve ser adotado.

Uma alternativa para elevar o coeficiente de segurança é alterar a geometria do pedal de forma que diminua a tensão máxima. Na Figura 43 se encontra uma proposta de aumento de espessura de 4 mm para 13,0 mm com o objetivo de atingir coeficiente de segurança igual a 3.

Figura 43 – Alteração de espessura de 4 mm para 13,0 mm



fonte: o autor

5 RESUMO DOS RESULTADOS

Foi obtido através de cálculos de estática e dinâmica veicular a força $F_{piloto}=65,6$ [N] necessária no pedal de freio para que o veículo atinja uma desaceleração máxima.

O tecido de sisal passou por tratamento alcalino para eliminar parte dos componentes amorfos, melhorar a interação fibra/matriz e permitir patamares um pouco mais elevados de temperatura durante a cura do material. Após processado o material foi ensaiado em tração para determinação da tensão máxima de tração $\sigma_{max}=9,85 \pm 0,57$ MPa e o módulo de elasticidade $E = 1,62 \pm 0,25$ GPa. A densidade do compósito de $1,2527$ [g/cm^3], fração volumétrica de 26,65% foram também determinadas.

O compósito foi adotado como isotrópico por simplificação e após a criação da malha de elementos finitos, foi simulado a resposta do material conforme a sollicitação. Obteve-se o valor de tensão máxima $\sigma_{max}=10,456$ MPa para o critério de falha de máxima tensão principal, para a espessura original de 4mm. Verificou-se um coeficiente de segurança inadequado de 0,94 e, com a finalidade de atingir um coeficiente mínimo de 3, uma proposta de aumento de espessura para 13mm foi sugerida.

6 CONCLUSÃO

A partir do estudo realizado sobre o sistema de freio foi possível determinar a força de aplicação necessária e um material compósito foi processado com a finalidade de suportar essa solicitação.

Após caracterizações do material e simulação no software ANSYS, conclui-se que o material desenvolvido nesse trabalho é capaz de substituir o material atualmente utilizado no pedal de freio desde que sofra um aumento de espessura, mantidas as demais dimensões do projeto.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Os métodos utilizados para determinação da força de aplicação do piloto no pedal de freio podem ser ajustados em busca de valores mais precisos. Para tal, é necessário o estudo aprofundado da dinâmica veicular. Ainda no aspecto da força de aplicação do piloto, métodos experimentais podem auxiliar na verificação de resultado, como por exemplo, a instalação de um dinamômetro ou dispositivo semelhante capaz de medir durante serviço, a força de aplicação do piloto.

No que diz respeito ao processamento do material compósito, um método mais avançado pode ser analisado. Um candidato é o processamento via RTM, uma vez que apresenta vantagens tecnológicas quando comparado ao processamento manual.

REFERÊNCIAS

- ANDERSON, D. **Carros in foco. Acesso em 20 out. 2017.** 2017. Disponível em: <<http://www.carrosinfoco.com.br/carros/2012/07/como-funciona-o-freio-a-tambor/>>.
- BARROS, G. Industria automobilistica investe na produção de peças “verdes”. **Plástico Industrial**, v. 102, n. 1, p. 1–6, 2010.
- BEER, F. P. J. E. R. **Resistência dos materiais**. São Paulo, São Paulo - Brasil: Editora McGraw Hill, 1982.
- BENINI, K. et al. Effect of fiber chemical treatment of nonwoven coconut fiber/epoxy composites adhesion obtained by rtm process. **POLYMER COMPOSITES**, v. 38, n. 11, p. 2518 – 2527, 2017.
- BENINI, K. C. C. de C. **Desenvolvimento e caracterização de compósitos poliméricos reforçados com fibras lignocelulósicas**. Guaratinguetá, São Paulo - Brasil: [s.n.], 2011. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica.
- BOSCH. **Pastilhas bosch ceramic. Acesso em 02 out. 2017.** 2014. Disponível em: <http://br.bosch-automotive.com/media/parts/download_2/freios/pastilhasdeceramica.pdf>.
- CASTILHOS, L. Aproveitamento da fibra de coco. **Serviço Brasileiro de Respostas Técnicas**, v. 1, n. 1, p. 1–29, 2011.
- CHAUVET, M.; SAUCEAU, M.; FAGES, J. Extrusion assisted by supercritical co2: A review on its application to biopolymers. **The Journal of Supercritical Fluids**, v. 1, n. 120, p. 408–420, 2017.
- DIULGHEROGLO, P. A. **A história dos freios. Acesso em 15 out. 2017.** 2017. Disponível em: <<https://boechatfreios.wordpress.com/a-historia-dos-freios/>>.
- DUKKIPATI, R. V. et al. **Road vehicle dynamics**. [S.l.]: SAE International, 2008.
- FARUK, O. et al. Progress report on natural fiber reinforced composites. **Macromolecular materials and engineering**, Macromolecular Journals, v. 299, n. 1, p. 9–26, 2014.
- FILHO, A. A. **Elementos finitos: a base da tecnologia CAE**. São Paulo, São Paulo - Brasil: Editora Érica, 2005.
- FÍSICA, A. E. **propriedades de materiais, polímeros**. 2017. Disponível em: <<http://www.atcp.com.br/pt/produtos/caracterizacao-materiais/propriedades-materiais/tabelas-propriedades/polimero-fibrosos.html>>.
- GILLESPIE, T. D. **Fundamentals of vehicle dynamics**. Warrendale, Pennsylvania - EUA: SAE, 1992.
- HIBBELER, R. C. **Resistência dos materiais**. São Paulo, São Paulo - Brasil: Editora Pearson Prentice Hall, 2004.
- JANG, J. et al. Thermal stability and flammability of coconut fiber reinforced poly(lactic acid) composites. **Composites Part B: Engineering**, v. 43, n. 5, p. 2434–2438, 2012.
- KARIM, N. **How stuff works. Acesso em 13 out. 2017.** 2017. Disponível em: <<http://auto.howstuffworks.com/auto-parts/brakes/brake-types/disc-brake1.htm>>.

- KHALFALLAH, M. et al. Innovative flax tapes reinforced acrodur biocomposites: A new alternative for automotive applications. **Materials and Design**, v. 64, n. 1, p. 116–126, 2014.
- KURUVILLA, J. et al. A review on sisal fiber reinforced polymer composites. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 3, n. 3, p. 367–379, 1999.
- LI, Y.; MAI, Y.; YE, L. Sisal fibre and its composites: a review of recent developments. **Composites Science and Technology**, v. 60, n. 1, p. 2037–2055, 2000.
- MARIANO, S. B. **Apostilas mecânica de automóveis - conserto e manutenção. Acesso em Acesso em 04 out. 2017.** 2017. Disponível em: <http://www.editoraprofissionalizante.com.br/Mecanica_autos/index.htm>.
- MILANESE, A. C. **Processamento e caracterização de compósito fibra de sisal/resina epóxi via RTM.** Guaratinguetá, São Paulo - Brasil: [s.n.], 2012.
- MIRLISENNA, G. **Método dos elementos finitos, o que é? Acesso em 12 out. 2017.** 2016. Disponível em: <<http://www.esss.com.br/blog/2016/01/metodo-dos-elementos-finitos-o-que-e/>>.
- MONTEIRO, S. et al. Tenacidade ao entalhe por impacto charpy de compósitos de poliéster reforçados com fibras de piaçava. **Revista Matéria**, v. 11, n. 3, p. 204–210, 2006.
- OSHIRO, D. S. **The brake article. Acesso em 01 out. 2017.** 2015. Disponível em: <<http://www.deanoshiro.com/brakes/brakearticle.html>>.
- PUHN, F. **Brake handbook.** Tucson, Arizona - EUA: HPBooks, 1985.
- SANTOS, G. C. M. dos. **Projeto e dimensionamento de um sistema de freios aplicado a um veículo fórmula SAE.** Rio de Janeiro, Rio de Janeiro - Brasil: [s.n.], 2014.
- SCOPEL, F. et al. Tendências tecnológicas do uso do sisal em compósitos a partir da prospecção em documentos de patentes. **Polimeros Ciência e Tecnologia**, v. 23, n. 4, p. 514–520, 2013.
- SHANKAR, S. **Car trade. Acesso em 23 out. 2017.** 2017. Disponível em: <<https://www.cartrade.com/blog/2011/auto-guides/brake-systems-in-cars-17.html>>.
- SHIGLEY, J. E. **Mechanical engineering design. 8ed.** United States of America: McGrawHill, 2006.
- SHIINO, M. et al. The relationship between pure delamination modes i and ii on the crack growth rate process in cracked lap shear specimen (cls) of 5 harness satin composites. **Composites: Part A**, v. 78, n. 11, p. 350 – 357, 2015.
- SIQUEIRA, E. J. et al. Estudo dos critérios de falhas em flexão em compósitos pps/fibras de carbono utilizando elementos finitos. **Cadernos UniFOA**, v. 11, n. 1, p. 11 – 17, 2009.
- SOUZA, R. M. de. **O método dos elementos finitos aplicado ao problema de condução de calor. Acesso em 02 dez. 2017.** 2003. Disponível em: <http://www.ufpa.br/nicae/integrantes/remo_souza/TrabPublicados/Apostilas/ApostilaElementosFinitosNiCAE.pdf>.
- SPINACE, M. et al. Poliolefinas reforçadas com fibras vegetais curtas: sisal vs. curauá. **Polímeros**, v. 21, n. 3, p. 168–174, 2011.
- TITA, V.; CARVALHO, J.; SANTOS, N. C. Estudo do comportamento mecânico de materiais compósitos utilizando o método dos elementos finitos. in: **CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, 2. Anais**, São Paulo, p. 1 – 11, 2002.

WELLE, D. **Há 125 anos Carl Benz solicitava patente do primeiro automóvel.**
Acesso em: 13 out. 2017. 2017. Disponível em: <<http://www.dw.com/pt-br/h%C3%A1-125-anos-carl-benz-solicitava-patente-do-primeiro-autom%C3%B3vel/a-14799147>>.