

# APRIMORAMENTO DE UM MECANISMO AUTOMOBILÍSTICO COM FOCO EM RECICLAGEM

**João Paulo Barros Mangini**

joao.mangini@terra.com.br

**Resumo.** O meio ambiente está sendo e será cada vez mais objeto de discussões e sua conservação é fundamental para qualquer plano de desenvolvimento. Tendo em vista esse cenário, deve-se considerar a reciclagem, reutilização e reaproveitamento de qualquer produto adotando o conceito de desenvolvimento sustentável. O processo de reciclagem dos componentes automotivos após o fim de vida começa justamente no projeto do automóvel, onde são projetadas peças de fácil separação dos materiais, fácil identificação dos materiais (principalmente os polímeros) e utilização de materiais de fácil reciclagem. Com o mundo cada vez mais globalizado e com legislações cada vez mais rígidas, a questão da reciclagem se torna mais central e sua discussão cada vez mais importante. Portanto, surge a importância de desenvolver tecnologias ambientais não só após o fim de vida do automóvel, mas também durante a fase de projeto. O projeto implicará na pesquisa e no entendimento de novos materiais para a indústria automotiva e o projeto de um cilindro mestre (utilizado no sistema automotivo de freio) visando um menor impacto ambiental.

**Palavras chave:** Reciclagem, Cilindro mestre, impacto ambiental.

## 1. Introdução

Tendo em vista a atual preocupação com o meio ambiente - pauta de muitas discussões - este trabalho se dedica a entender o motivo dessa preocupação e utilizar o conhecimento adquirido ao longo do curso de Engenharia Mecânica para agregar valores nessa direção e reprojeter um mecanismo automotivo visando a preservação do meio ambiente.

Atualmente, os novos veículos já têm uma grande preocupação ambiental e cada vez mais torna-se evidente por dois motivos. O primeiro, são as novas legislações em todo o mundo visando a menor geração de impactos ambientais pela indústria automotiva. O segundo motivo é a procura, pelo consumidor, de carros ecologicamente corretos. São vastas as montadoras que apelam pela preservação do meio ambiente em suas estratégias de marketing e estão cada vez mais apostando nessa direção.

Portanto, é nesse cenário que este trabalho se insere. A primeira parte do trabalho consiste em estudar o motivo da preocupação atual com o meio ambiente e definir os parâmetros do projeto que auxiliem no processo de reciclagem após o fim de vida do automóvel. A seguir, será feito um estudo do sistema hidráulico de freio utilizado nos automóveis e será dado um foco no mecanismo a ser reprojetoado: o cilindro mestre. Assim, diferentes alternativas de soluções serão apresentadas. Será realizada a escolha da melhor alternativa com o auxílio de uma matriz de decisão e, por fim, será dimensionado o cilindro mestre escolhido para ser aplicado no automóvel Toyota *Corolla* com as respectivas análises do resultado e conclusões do trabalho.

## 1. Reciclagem

Reciclagem é um conjunto de técnicas que tem por finalidade reaproveitar os detritos de produtos após seu uso e inseri-lo novamente em um ciclo de produção. O processo de reciclagem consiste em diversas etapas, como coleta dos detritos, separação e processamento para serem usados como matéria-prima na manufatura de outros produtos. Reciclar consiste, portanto, em poupar energia e recursos naturais para que novos produtos sejam fabricados [COMPAM, 2009].

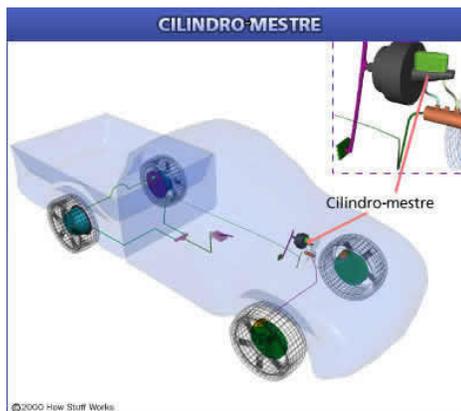
Para o processo de reciclagem ser atrativo financeiramente, o projeto tem que levar em consideração todos os custos envolvidos. Os mais importantes são: recolhimento do material, transporte, desmantelamento e reprocessamento [MARCO, 1994]. Apesar dos custos de transporte e recolhimento estarem fora do controle do projetista do produto, os processos de desmantelamento e reprocessamento podem ser aprimorados para que haja sucesso na viabilidade do processo [MEDINA, 2002].

## 2. Sistema Hidráulico de Freio

O sistema hidráulico de freio é responsável por transmitir a força aplicada na alavanca de freio do automóvel às pinças de freio do automóvel. Seu funcionamento consiste basicamente em um cilindro mestre (que será o objeto de estudo) que, quando acionado pelo pedal de freio, transmite fluido sob alta pressão para os diferentes tipos de freio (tambor ou a disco). Como mostra a figura 1, o cilindro mestre é alocado na alavanca de freio.

## 3. Componentes

### 3.1. Fluidos de freio



**Figura 1. Posição do cilindro Mestre [HOWSTUFFWORKS]**

Existem três principais tipos de fluidos de freio no mercado, seguindo as especificações do Ministério dos Transportes dos Estados Unidos (Department of Transportation). São estes o DOT3, DOT4 e DOT5.

A nomenclatura destes é devido aos seus respectivos pontos de fusão. Quanto maior o número do DOT, maior seu ponto de fusão. Os pontos de fusão mínimos dos fluidos DOT3, DOT4 e DOT5 são, respectivamente 205°C, 230°C e 260°C.

Uma característica importante dos fluidos de freio é seu ponto de ebulição. Os fluidos estão em contato com todo o sistema hidráulico de frenagem e, portanto, faz parte do sistema de dissipação de calor do freio. Além disso, o sistema hidráulico utiliza o fluido de freio como fluido incompressível para transmissão de força. Caso o fluido entre em ebulição, não será mais incompressível pela presença de gases no sistema hidráulico, perdendo assim sua funcionalidade. Nessa situação, o freio trona-se inoperante. Os fluidos de freio, independentemente do tipo, é considerado perigoso e de alta toxicidade. Assim, seu descarte e reciclagem é de fundamental importância para o meio ambiente.

### **3.2. Corpo do Cilindro**

O corpo do cilindro é feito de ferro fundido. A vantagem desse tipo de material é devido à homogeneidade dos produtos resultantes de seu processo de fabricação. Do ponto de vista ambiental, é um material de fácil reciclagem e reaproveitamento sem produzir resíduos tóxicos. Porém, por ser feito de ferro fundido sofre oxidação. Para evitar dano ao sistema, alguns fabricantes aplicam uma tinta protetora, que traz resíduos indesejáveis no processo de reciclagem.

### **3.3. Reservatório do fluido de freio**

O reservatório de fluido de freio é feito de polímeros termorrígidos diferentes, conforme o fabricante. Sua função é sempre manter fluido nos componentes de freio. Como o fluido de freio também é utilizado para a refrigeração das pastilhas de freio, tem que suportar temperaturas altas. Outra preocupação ecológica do reservatório do fluido é que ele absorve o fluido (altamente tóxico), assim, deve-se usar materiais com baixo poder de absorção de fluido.

### **3.4. Molas e anéis elásticos**

As molas e anéis elásticos em geral devem ser fabricados com um material com alto limite de elasticidade, grande resistência e alto limite de fadiga. Assim, os aços carbonos, com teor variando de 0.5% a 1.2% satisfazem esses requisitos.

### **3.5. Pistões**

Os pistões do cilindro mestre são, em sua grande maioria, feitos de aço carbono e usados métodos tradicionais de proteção contra corrosão, como galvanização com cromo, zinco ou níquel. Porém, esses materiais geram lixo tóxico.

### **3.6. Anéis de Vedação**

Os anéis de vedação mais utilizados para vedação de óleo são moldados de borracha níttrica, mas podem ser feitos de diversos tipos de elastômeros. Os anéis elásticos normalmente precisam de lubrificação, mas no caso do cilindro mestre, o anel elástico está totalmente inserido no fluido de freio, funcionando como lubrificante.

## **4. Soluções:**

Após feita uma análise de função, definidos os parâmetros para a escolha da melhor alternativa, quatro alternativas de solução foram elaboradas, dentre as quais uma delas equivale a alternativa já existente (a alternativa 0). Para uma apresentação mais detalhada e um melhor entendimento das soluções, foi utilizado o software *Autodesk Inventor 2009*, no qual é possível a visualização em três dimensões do projeto.

### **4.1. Alternativa 0:**

Essa é uma solução que retrata a maioria dos cilindros mestres existentes no mercado atualmente. Como foi visto ao longo do projeto, essa alternativa traz uma grande quantidade de peças e uma dificuldade em sua desmontagem. As figuras 2 e 4 mostram uma vista 3D (interna e externa) da solução, enquanto que a figura 3 mostra uma vista em corte. A tabela 1 contém uma lista de peças da solução.

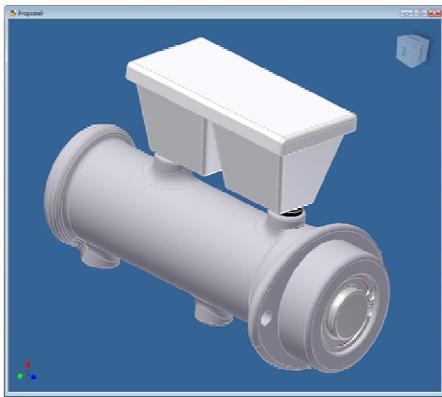


Figura 2. Solução 0: Vista 3D

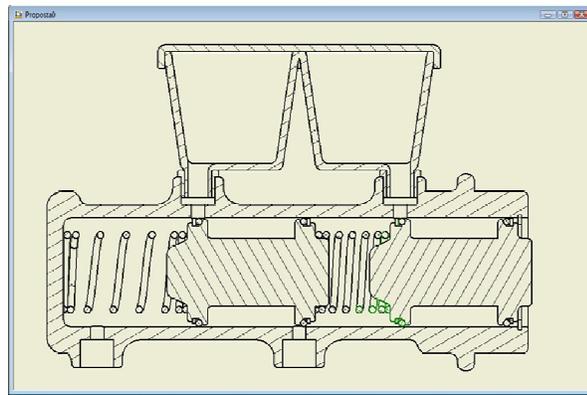


Figura 3. Solução 0: Vista em corte

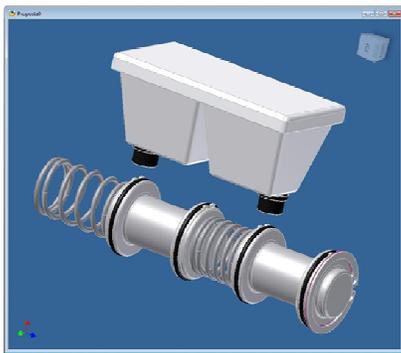


Figura 4. Solução 0: Vista 3D interna

Tabela 1. Solução 0: Lista de peças

Nome	Material	Quantidade
Tampa da Caixa	Polímero de alta densidade (PEAD)	1
Caixa	Polímero de alta densidade (PEAD)	1
Fixador da Caixa	Elastômero	2
Corpo	Ferro fundido	1
Mola1	Aço carbono	1
Cilindro	Ferro fundido	2
Mola2	Aço carbono	1
Anel elástico1	Aço carbono	1
Anel de vedação	Elastômero	4
Anel elástico2	Aço carbono	4
<b>Total</b>		<b>18</b>

As principais desvantagens dessa solução são: dificuldade de desmontagem; utilização de produtos tóxicos para garantir a não oxidação dos componentes do cilindro; dificuldade em se retirar o fluido de freio do interior do cilindro; As principais vantagens dessa solução são: baixo custo; garantia de segurança e vedação do cilindro.

#### 4.2. Alternativa 1:

O modo de funcionamento do cilindro da solução 1 é o mesmo da solução anterior, porém com diferenças no material, nas peças e na montagem destas.

A figura 5 mostra a visualização tridimensional do cilindro todo montado. Nela, é possível já perceber que o cilindro não é fechado com um anel elástico (o que ocorre na solução anterior). Há uma tampa feita de polietileno de alta densidade com a finalidade de facilitar a desmontagem. A figura 6 mostra o corte da solução, onde é possível visualizar melhor a tampa do cilindro e os anéis elásticos fixados nos cilindros. Os êmbolos e o corpo do cilindro são de alumínio.

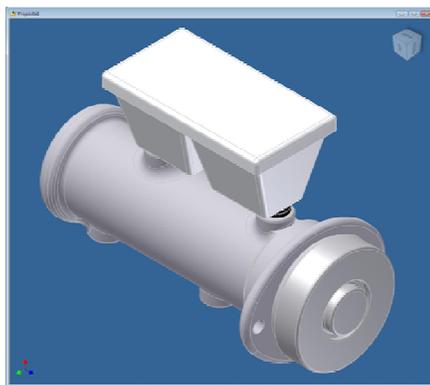


Figura 5. Solução 1: Vista 3D

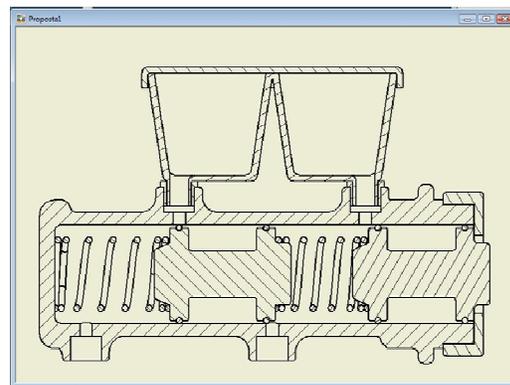


Figura 6. Solução 1: Vista em corte

As principais vantagens dessa solução são: facilidade na desmontagem dos componentes; facilidade na reciclagem do alumínio; baixo peso; menos quantidade de peças; não há necessidade de proteção do corpo do cilindro (menos impacto ambiental); facilidade em retirar o fluido de freio do interior do cilindro.

As principais desvantagens dessa solução são: custo mais elevado; a vedação do cilindro pode ser comprometida pelo desgaste do cilindro, uma vez que os anéis de vedação não estão tão bem fixados como na solução anterior.

#### 4.3. Alternativa 2:

A solução 2 tenta conter as vantagens da solução 1 e garantir que ocorra a vedação no cilindro. Com isso, haverá uma quantidade maior de peças e um custo maior. Na figura 7, é possível visualizar uma vista em corte da solução 2 e na figura 8, uma vista explodida de seu êmbolo (fabricado de PEAD). O corpo do cilindro é feito de alumínio.

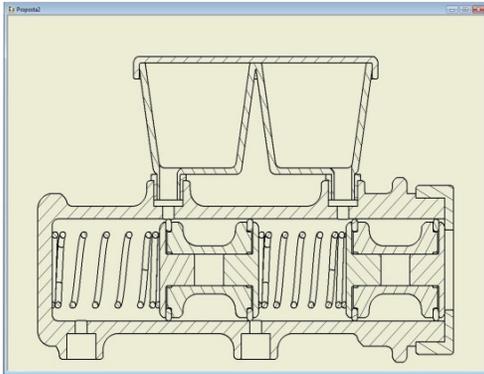


Figura 7. Solução 2: Vista em corte



Figura 8. Solução 2: Êmbolo

As principais vantagens dessa solução são: facilidade na desmontagem dos componentes; facilidade na reciclagem do alumínio; baixo peso; não há necessidade de proteção do corpo do cilindro (menos impacto ambiental); facilidade em retirar o fluido de freio do interior do cilindro.

As principais desvantagens dessa solução são: custo mais elevado, pois o alumínio fundido é mais caro do que o ferro fundido e não há redução na quantidade de peças.

#### 4.4. Alternativa 3:

Diferentemente das alternativas anteriores, na alternativa 3, os componentes não são inseridos pelo lado que o pistão é pressionado pelo pedal de freio, mas pelo lado oposto. A figura 9 mostra uma vista em corte da solução. Assim como a alternativa 2, o corpo é de alumínio e o êmbolo de PEAD.

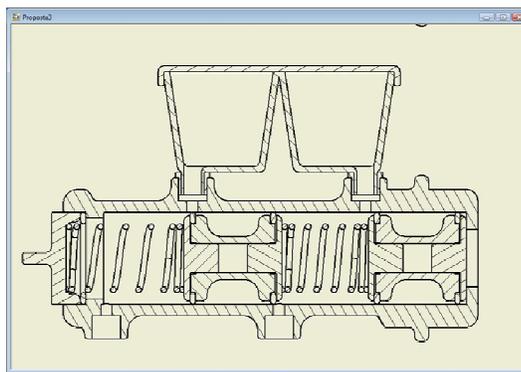


Figura 9. Solução 3: Vista em corte

As principais vantagens dessa solução são: facilidade na desmontagem dos componentes; facilidade na reciclagem do alumínio; baixo peso; não há necessidade de proteção do corpo do cilindro (menos impacto ambiental); facilidade em retirar o fluido de freio do interior do cilindro.

As principais desvantagens dessa solução são: custo mais elevado; pequeno aumento na quantidade de peças; aumento do tamanho da peça, uma vez que a rosca da tampa dessa solução deverá ser maior.

### 5. Análise dos principais Materiais envolvidos

Os principais materiais envolvidos nas alternativas do projeto são o alumínio, o ferro fundido e o polietileno de alta densidade (PEAD) e para decidir entre a melhor solução é necessário analisar esses materiais e compará-los. Pelo fato do projeto ter uma preocupação ambiental, essa comparação não deve apenas entrar no mérito de suas propriedades mecânicas e econômicas, mas também em seu impacto no meio ambiente (no processo de fabricação, de reciclagem e em sua utilização no componente).

### 5.1. O Alumínio:

O alumínio, por ser 100% reciclável e seu minério existir em abundância, é uma grande aposta para o desenvolvimento sustentável. O fato do custo do alumínio ser mais caro do que o aço é devido principalmente à energia gasta na fabricação destes. A substituição do aço por alumínio gera um custo adicional de US\$ 3,56 por Kg [ABAL].

O custo adicional do alumínio em relação ao aço não é muito alto e seu retorno pode vir de diversas formas na indústria automotiva. Por ser um material mais leve, a inserção do alumínio na indústria automotiva gera um automóvel mais leve, que consome menos combustível e polui menos. A redução de 1Kg no veículo tem o potencial de reduzir 20Kg de CO2 durante a vida média do veículo [ABAL].

Para uma análise mais aprofundada do impacto ambiental que o alumínio trás, é necessário analisar também a emissão de gases nocivos ao meio ambiente em sua produção. Para se produzir uma tonelada de alumínio primário, libera 0,47 toneladas de CO2 na atmosfera e 0,81 Kg de fluoreto [ABAL]. Outra característica importante do alumínio é a camada de óxido que forma em sua superfície, não permitindo a passagem de oxigênio nem umidade por ela. A tabela 2 mostra as principais características do alumínio.

**Tabela 2: Características do alumínio**

Característica	Unidade	
Custo	-	US\$/Kg 3,56 a mais do que o aço
Peso específico	g/(cm <sup>3</sup> )	2,7
% de material reciclável	-	100%
Consumo específico de energia *	MWh/t	10,41
CO2 emitido em sua produção*	t/tonAl	0,30409

\* Considerando 35,3% da produção proveniente de alumínio reciclado

### 5.2. O Ferro fundido:

O ferro fundido é uma liga metálica de ferro e carbono com teor variando entre 2,1% e 6,7%. Existem diversos tipos de ferro fundido dependendo de sua composição química e são divididos em três tipos principais: branco, cinzento e nodular. O mais comum é o ferro fundido cinzento pois é o mais barato. Já o ferro fundido branco é utilizado em materiais que necessitem de alta resistência à abrasão e não pode ser usinado. É utilizado em situações onde é necessária alta resistência a impactos, além de ter maior resistência à tração. Como os componentes do mecanismo estudado não requerem alta resistência à abrasão e tampouco alta resistência a impactos, consideraremos o ferro fundido cinzento na análise a seguir. Assim como o alumínio, 100% do ferro é reciclável [AMBIENTEBRASIL]. Para a produção do ferro, é preciso de 5,06 MWh por tonelada de ferro produzida [GERDAU]. Sua densidade é 7,3 g/cm<sup>3</sup>, o que representa cerca de 3 vezes a do alumínio. A tabela 3 resume as principais características do ferro fundido.

**Tabela 3: Características do ferro fundido**

Característica	Unidade	
Peso específico	g/(cm <sup>3</sup> )	7,3
% de material reciclável	-	100%
Consumo específico de energia	MWh/t	5,06
CO2 emitido na produção*	t/tonAl	2,5

\* considerando a produção em alto forno utilizando entre 25 a 35% de material reciclado

### 5.3. Polietileno de Alta Densidade Convencional (PEAD):

Adotou-se a utilização do PEAD no mecanismo estudado pelo fato dele ser o polímero que apresenta menor absorção de material (já que ele estará em contato direto com o fluido de freio, altamente tóxico). O PEAD é um polímero termorrígido muito utilizado na indústria devido à seu baixo custo e suas propriedades mecânicas (alta resistência à tração, compressão e tensão; baixa densidade se compararmos com os metais; baixa absorção de material; atóxico; inerte, etc..) [CANDIAN, 2007].

O PEAD é reciclável. Existem várias maneiras de se reaproveitar o PEAD descartado, sendo elas: reciclagem mecânica, energética e química. [SPINANCÉ, 2004].

O peso específico do PEAD é de 0,94 g/cm<sup>3</sup> [BRASKEM], e seu preço é relativamente barato (R\$ 3,5/Kg) [RECICLENET]. Sua produção exige um consumo de 1,41 MWh/m<sup>3</sup> de PEAD produzido [SPINANCÉ, 2004], o que é bem abaixo do necessário para a produção do ferro e principalmente do alumínio. A quantidade do CO2 emitido na

fabricação do PEAD é de 2,5 toneladas de CO<sub>2</sub> por tonelada de PEAD produzido. A tabela 4 mostra as principais características do PEAD convencional.

**Tabela 4: Características do PEAD convencional**

Característica do PEAD Convencional	Unidade	
Custo	R\$/Kg	3,5
Peso específico	g/(cm <sup>3</sup> )	0,94
% de material reciclável	-	-
Consumo específico de energia	MWh/t	1,34
CO <sub>2</sub> emitido na produção	tCO <sub>2</sub> /t	2,5

#### 5.4. PEAD Verde (Braskem)

A Braskem lançou em julho de 2007 um polietileno verde, proveniente 100% de fontes renováveis (cana-de-açúcar) e 100% reciclável. Outra grande vantagem ambiental desse polietileno é que ao invés de liberar gás carbônico para a atmosfera – como ocorre na produção do polietileno convencional – ele captura e fixa de 2 a 2,5Kg de CO<sub>2</sub> presentes na atmosfera. O fabricante afirma que o polietileno de alta densidade (PEAD) verde mantém as mesmas propriedades mecânicas do PEAD convencional e com o mesmo custo. O fabricante não informa a quantidade de energia necessária para a produção do PEAD verde, porém, como o eteno necessário para sua produção é proveniente da cana-de-açúcar, esse mesmo produto pode ser utilizado para a produção de energia (devido à proximidade da matéria). Portanto, a energia consumida para sua produção também será proveniente de uma fonte renovável (claro que essa fonte também produz impactos ambientais, mas numa escala muito menor dos combustíveis fósseis). A tabela 5 mostra as características do PEAD verde produzido pela Braskem. [BRASKEM].

**Tabela 5: Características do PEAD verde**

Característica de PEAD Verde Braskem	Unidade	
Custo	R\$/Kg	~ 3,5
Peso específico	g/(cm <sup>3</sup> )	0,94
% de material reciclável	-	100%
Consumo específico de energia	MWh/t	-
CO <sub>2</sub> emitido na produção	tCO <sub>2</sub> /t	-2,5

#### 5.5. Resumo dos Materiais:

Dentre os materiais estudados (ferro fundido, alumínio, PEAD verde e PEAD convencional), o material com as melhores características em termo de custo e de impacto ambiental foi o PEAD verde produzido pela Braskem. É um material relativamente barato, de baixa densidade, 100% reciclável e proveniente de fontes renováveis e que retém o CO<sub>2</sub> da atmosfera no seu processo de produção.

Porém, alguns componentes do projeto (como o corpo do cilindro) exigem precisão em sua fabricação para que não ocorra vazamento do fluido de freio e o PEAD não apresenta tal precisão. Assim, para esses componentes, somente o alumínio fundido e o ferro fundido apresentam a precisão necessária.

Tanto o ferro fundido e o alumínio são 100% recicláveis. Porém, para a produção do alumínio, é necessário cerca de 2 vezes a energia necessária para se produzir ferro fundido. Seu custo também é mais elevado quando comparado com ferro. Porém, o material é cerca de 3 vezes mais leve, o que irá proporcionar um melhor desempenho ao veículo, menos emissão de poluentes na atmosfera e menor gasto de combustível. Assim, do ponto de vista ambiental, o alumínio é a melhor solução e seu custo mais elevado justifica o ganho em preservação ambiental e desempenho. Prova disso é que cada vez mais o alumínio é utilizado em substituição ao aço na indústria automotiva.

#### 6. Matriz de Decisão

Definidos os parâmetros da matriz e entendidas as soluções, a matriz de decisão foi calculada e seus valores podem ser vistos na tabela 6.

**Tabela 6: Matriz de decisão**

Critérios	Peso	Alternativas			
		Alternativa 0	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Custo	30%	10	7	6	5
Confiabilidade	20%	8	5	9	9
Facilidade na reciclagem dos materiais	15%	4	8	10	10
Desmontagem dos componentes	10%	6	9	10	10
Absorção de fluido pelos polímeros	10%	9	8	8	8
Facilidade de manutenção	5%	6	9	10	10
Facilidade de remoção do fluido	5%	6	10	10	10
Peso	5%	4	8	10	10
<b>Média Ponderada</b>	<b>100%</b>	<b>7,5</b>	<b>7,35</b>	<b>8,4</b>	<b>8,1</b>

Nota-se que todas as alternativas obtiveram resultados próximos, variando entre 7,5 e 8,4. Sabe-se também que a matriz de decisão é muito sensível às mudanças nas notas e nos pesos, portanto, como os resultados são próximos, ela não pode ser encarada como uma decisão final para a tomada de decisão.

Para fazer essa decisão, além da matriz como uma ferramenta auxiliar, deve ter em mente o propósito do projeto (cujo objetivo é agregar valor ao produto visando a redução em seu impacto ambiental) e ter uma percepção que antecipe o mercado e as necessidades humanas.

Portanto, utilizando a matriz de decisão como uma ferramenta de decisão e uma consciência ambiental, a alternativa 2 é a que mais se encaixa nesse propósito. Além de ser a solução que traz menos impacto ambiental, tem a maior confiabilidade e facilidade de manutenção.

## 7. Dimensionamento

Como o dimensionamento de um cilindro mestre depende de todo o dimensionamento do sistema hidráulico de freio, será dimensionado neste projeto um cilindro mestre para ser aplicado em um *Toyota Corolla*. A principal característica do cilindro mestre de freio a ser mantida é o diâmetro interno do cilindro (20,64mm) [KAWAGUCHI, 2005]. A tabela 7 resume as principais características do sistema de freio do *Toyota Corolla* que serão pertinentes no dimensionamento dos componentes do cilindro. Será admitida uma pressão máxima exercida pelo cilindro mestre de 200bar (20Mpa) para o dimensionamento de seu curso e um coeficiente de segurança de 2,5 [KAWAGUCHI, 2005].

**Tabela 7: Características do sistema de freio do Corolla**

Diâmetro interno do cilindro mestre	20,64 mm
Relação do servo-freio	7
Relação do pedal de freio	2,8
Pressão pré-operativa do freio traseiro	1 bar
Pressão pré-operativa do freio dianteiro	1 bar

### 7.1. Dimensionamento da espessura da parede:

Considerando o cilindro mestre como um vaso de pressão de parede fina, a tensão resultante da pressão interna como sendo distribuída uniformemente ao longo da espessura da parede, a tensão tangencial devida à pressão interna é dada por [SHIGLEY, 1984]:

$$\sigma_1 = \frac{pD}{2e}$$

Onde  $\sigma_1$  é a tensão tangencial; p é a pressão interna; D é o diâmetro interno do cilindro; E é a espessura da parede.

Como o cilindro é fechado, existirá também uma tensão longitudinal devida à pressão nas extremidades do vaso. Deve-se igualar a força que atua nas extremidades com a tensão longitudinal vezes a área na qual atua a tensão. Assim,

$$\frac{p\pi D^2}{4} = \sigma_2(\pi D e) \quad (1)$$

$$\sigma_2 = \frac{pD}{4e}$$

Assim, temos as duas tensões principais,  $\sigma_1$  e  $\sigma_2$ . Utilizando o critério de resistência de Tresca, temos que:

$$\tau_{\text{máx}} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \quad (2)$$

$$\tau_{\text{máx}} \leq \frac{\sigma_e}{2S}$$

Onde  $\sigma_e$  é a tensão de escoamento do material e S é o coeficiente de segurança. Assim, temos:

$$\sigma_1 = \frac{20 \cdot 20,64}{2e} \text{ MPa} = \frac{206,4}{e} \text{ MPa}$$

$$\sigma_2 = \frac{pD}{4e} = \frac{20 \cdot 20,64}{4e} = \frac{103,2}{e} \text{ MPa}$$

$$\tau_{\text{máx}} = \frac{\frac{206,4}{e} - \frac{103,2}{e}}{2} \leq \frac{\sigma_e}{5}$$

$$\sigma_e \geq \frac{258}{e} \text{ MPa} \quad (3)$$

Essa expressão nos permite relacionar o módulo de elasticidade do material com a espessura da parede do cilindro. Como há várias ligas de alumínio no mercado, com diferentes tensões de escoamento, deve-se escolher a que melhor satisfaz o critério. Para o caso estudado, utilizou-se a liga 1100-H14 (uma liga de alumínio puro com tratamento mecânico para encruamento (limite de escoamento é 117 MPa e a espessura da parede será 2,2mm).

### 7.2. Dimensionamento da mola:

Para dimensionar as molas, é necessário considerar o curso do cilindro, o diâmetro interno do cilindro (que limita o diâmetro máximo da mola), o coeficiente de elasticidade da mola e a pré-carga. O diâmetro do cilindro já foi

definido anteriormente e vale 20,65 mm. Para se calcular o curso do cilindro, é necessário saber as relações do pedal, do cervo-freio e o curso do pedal.

$$\frac{1}{k_{eq}} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} = \frac{2}{k} \quad (4)$$

$$k_{eq} = \frac{k}{2} \quad (5)$$

O curso máximo do pedal foi medido experimentalmente no Toyota Corolla e vale 75mm. Como margem de segurança, será considerado um curso 50% a mais do que o calculado experimentalmente ( $75 \cdot 150\% = 112,5$  mm). Assim, o curso do cilindro (C) é dado por:

$$C = 112,5 \cdot \frac{1}{2,8} \cdot \frac{1}{7} = 5,74\text{mm} \quad (6)$$

Como as molas estão ligadas em série, o curso de cada mola será a metade do curso total. Portanto, o curso de cada mola (L) é  $5,74/2 = 2,87$  mm.

Como pré carga, será utilizada 0,5 Kgf no pedal e o coeficiente de elasticidade ( $k_{eq}$ ) igual a 0,2 Kgf/mm. Assim, o k adotado de cada mola será

$$k = 0,02 \cdot 2 = 0,4 \text{ Kgf/mm} \quad (7)$$

Os componentes da mola a serem dimensionados são: o diâmetro médio (D), o diâmetro do fio (d), o material e seu comprimento (L)

Segundo Shigley [SHIGLEY, 1984], para se determinar a constante da mola, usa-se a expressão

$$k = \frac{d^4 \cdot G}{8 \cdot D^3 \cdot N} \quad (8)$$

Onde N é o número de espiras e G é o módulo de elasticidade ao cisalhamento. O diâmetro externo é dado por

$$D_{ext} = D + d \text{ e } D_{ext} < 20,6 \quad (9)$$

Assim, será adotado um diâmetro médio de 15mm (sendo que o d não deverá passar de 3mm). O material utilizado será um aço cromo-vanádio [SHIGLEY, 1984], pois é um aço que resiste à temperaturas de até 220 oC, em que se deseja bom resistência à fadiga e boa durabilidade. Seu módulo de elasticidade ao cisalhamento 130.000 Mpa. Assim, chega-se na relação abaixo, entre número de espiras e diâmetro do fio:

$$0,08 \cdot N = d^4 \quad (10)$$

Utilizando 10 espiras, o diâmetro do fio será de 0,95mm. Para que a pré carga seja satisfeita, o deslocamento inicial da mola será:

$$F = k_{eq} \cdot x = 0,2 \cdot x = 0,5 \quad (11)$$

$$x = 2,5\text{mm}$$

O comprimento da mola, para que seu curso seja de 2,87mm será:

$$L = 2,87 + 2,5 + 10 \cdot 0,95 = 14,9 \text{ mm} \quad (12)$$

## 8. Solução Final

A figura 10 e 11 ilustram o novo cilindro mestre aplicado no veículo *Toyota Corolla*. O mecanismo de funcionamento é o mesmo do explicado na solução 2, com as dimensões calculadas no item anterior. A figura 12 mostra uma vista explodida da solução e a figura 13 uma vista em corte com as dimensões. A tabela 8 mostra a lista de peças



Figura 10. Solução Final: Vista 3D (externo)



Figura 11. Solução 3: Vista 3D (interno)

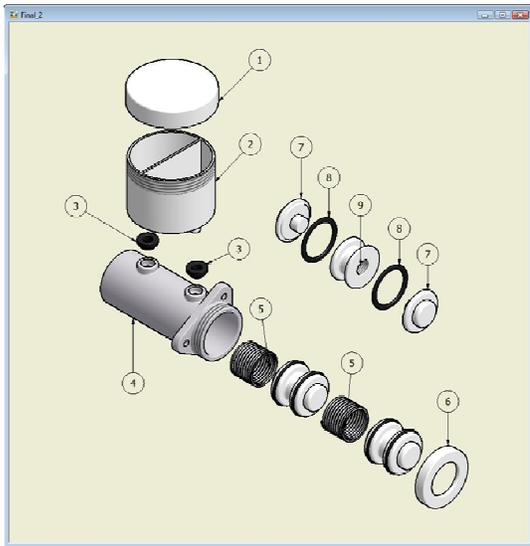


Figura 12. Solução Final: Vista explodida

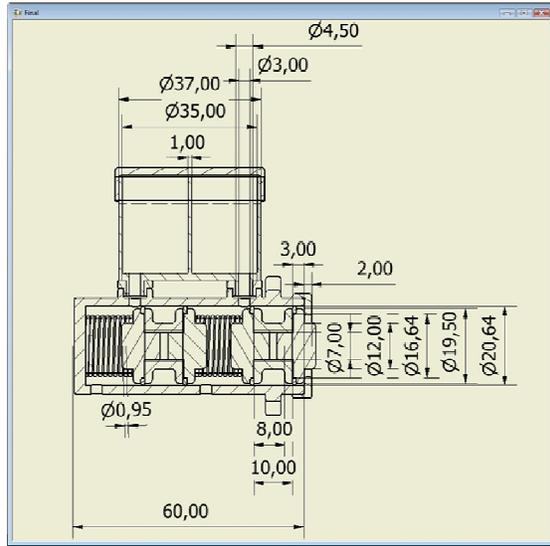


Figura 13. Solução Final: Vista em corte

Tabela 8. Solução Final: Lista de componentes

Número do componente	Componente	Quantidade	Material
1	Tampa da Caixa	1	PEAD Verde
2	Caixa	1	PEAD Verde
3	Fixador da Caixa	2	Elastômero
4	Corpo	1	Alumínio
5	mola	2	Aço
6	Tampa do Corpo	1	PEAD Verde
7	Cilindro 1	4	PEAD Verde
8	Anel de vedação	4	Elastômero
9	Cilindro 2	2	PEAD Verde

## 9. Análise do resultado

O cilindro mestre projetado para o Toyota Corolla apresenta diversas vantagens econômicas e ambiental comparada à solução trivial. Do ponto de vista ambiental, o novo projeto oferece uma maneira muito mais simples de desmontar os componentes, baixo peso e quase sua totalidade é reciclável (com exceção dos elastômeros que são imprescindíveis para garantir a vedação e seu funcionamento correto). A tabela 9 mostra os componentes do mecanismo com seus respectivos volume (*calculado pelo Autodesk Inventor 2009*). Assim, o peso total do mecanismo é apenas 56,1g sendo que 99% de seu peso é reciclável.

Tabela 9. Análise de resultado

Número do componente	Componente	Quantidade	Volume (mm <sup>3</sup> )	Material	Peso			
					específico (g/cm <sup>3</sup> )	Peso (g)	reciclável ?	Peso reciclável
1	Tampa da Caixa	1	3.192	PEAD Verde	0,94	3,00	Sim	3,00
2	Caixa	1	5.895	PEAD Verde	0,94	5,54	Sim	5,54
3	Fixador da Caixa	2	119	Elastômero	1,00	0,24	Não	0,00
4	Corpo	1	11.558	Alumínio	2,70	31,21	Sim	31,21
5	mola	2	336	Aço	1,00	7,30	Sim	7,30
6	Tampa do Corpo	1	977	PEAD Verde	0,94	0,92	Sim	0,92
7	Cilindro 1	4	1.250	PEAD Verde	0,94	4,70	Sim	4,70
8	Anel de vedação	4	104	Elastômero	1,00	0,42	Não	0,00
9	Cilindro 2	2	1.478	PEAD Verde	0,94	2,78	Sim	2,78
<b>Total</b>						<b>56,1</b>		<b>55,4</b>
								<b>99%</b>

Do ponto de vista econômico, há um acréscimo no custo do alumínio em relação ao ferro, mas a substituição do aço pelo PEAD traz um benefício financeiro. A diminuição do peso também traz um benefício econômico, uma vez que o veículo consumirá menos combustível.

## 10. Conclusões:

A maioria dos componentes automotivos hoje em dia já tem uma preocupação com a reciclagem do veículo em seu fim de vida. Essa idéia não é nova, mas a cada dia adquire mais importância. Com o desenvolvimento de novos materiais e novas técnicas, esse foco será sempre constante e será sempre possível melhorar um mecanismo para que se produza menos impacto ambiental.

No caso do mecanismo estudado, houve diversas propostas de aprimoramento e diversos materiais foram comparados, sendo que o escolhido apresentou diversas vantagens ecológicas em relação ao cilindro mestre existente no mercado, entre elas, facilidade em reciclagem, maior utilização de materiais recicláveis, maior utilização de materiais menos danosos ao meio ambiente em sua fase de fabricação e menor peso, propiciando menor consumo de combustível do veículo.

Ficou claro que o desenvolvimento do PEAD verde desenvolvido pela Braskem, proveniente de recursos naturais, 100% reciclável, trouxe muitas vantagens ao projeto do veículo, reduzindo seu impacto ambiental, seu peso e seu custo. Com esse novo material, o PEAD, que já vinha substituindo o aço e o alumínio em diversos componentes, pode tornar essa substituição ainda mais atrativa, uma vez que além do benefício econômico, também traz claramente o benefício ambiental. O alumínio também apresentou vantagem em relação ao aço por reduzir seu peso e produzir menos poluente em seu processo de fabricação. Porém é um material mais caro.

O estudo conhecimento desses materiais é importante também para outros projetos com foco em reciclagem, não se limitando apenas ao cilindro mestre. E com a importância de um desenvolvimento sustentável, o estudo de novos materiais e sua implementação será cada vez mais importante.

## 11. Referências

- ABAL – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO. Fundada em 1970, congrega 63 empresas (representando 100% dos produtores de alumínio primário), discute os assuntos da indústria do alumínio. Disponível em: <www.abal.org.br>. Acessado em 10, Ago., 2009.
- AMBIENTEBRASIL – Portal online contendo informações on line em constante pesquisa e renovação. Disponível em: <www.ambientebrasil.com.br>. Acessado em 10, Out., 2009.
- s da indústria do alumínio. Disponível em: <www.abal.org.br>. Acessado em 10, Ago., 2009.
- BRASKEM. Maior petroquímica brasileira. Disponível em: <www.braskem.com.br>. Acessado em 20, Ago., 2009.
- CANDIAN, Lívia Matheus. Estudo do polietileno de alta densidade reciclado para uso em elementos estruturais. São Carlos, 2007. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- COMPAM (COMÉRCIO DE PAPÉIS E APARAS MOOCA Ltda). Apresenta a importância da reciclagem e sua legislação. Disponível em: <www.compam.com.br>. Acessado em 01, Mai., 2009.
- GERDAU – Líder no segmento de aços longos nas Américas e um dos maiores fornecedores de aços longos especiais no mundo. Disponível em: <www.geradu.com.br>. Acessado em 2, Set., 2009.
- HOWSTUFFWORKS – Site norte americano que disponibiliza diversos materiais didáticos de como as coisas funcionam. <www.howstuffworks.com>. Acessado em 01, Out., 2009
- KAWAGUCHI, Hiroaki. Comparação da análise de conforto de condução subjetiva x objetiva de um veículo de passeio. São Paulo, 2005. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.
- MARCO, Di; EUBANKS, Charles F.; ISHII, Kos. Compatibility of Product Design for Recyclability and Reuse. Columbus, OH. 1994 (Relatório apresentado para ASME Computers In Engineering Conference)
- MEDINA, Heloísa & GOMES, Dennys. A indústria automobilística projetando para a reciclagem. Rio de Janeiro, 2002. (artigo apresentado no 5o congresso nacional de P&D em Design, realizado pela UNB – Universidade de Brasília)
- RECICLENET – Portal contendo anúncios de venda e compra de diferentes tipos de materiais (PEAD, PVC, Aço, papel). Disponível em <www.reciclenet.com.br>. Acessado em 5, Out., 2009.
- SHIGLEY, Joseph. Elementos de Máquinas 1. Ed. Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. Rio de Janeiro, RJ, 1984. 1a ed.
- SPINACÉ, Márcia Aparecida da Silva & DE PAOLI, Marco Aurelio. A tecnologia da reciclagem de polímeros. Quím. Nova, vol.28, n.1, pp. 65-72. São Paulo, 2005.

## 12. Direitos autorais

### AUTOMOBILE MECHANISM'S IMPROVEMENT FOCUSING IN RECYCLING

**João Paulo Barros Mangini**

joao.mangini@terra.com.br

**Abstract.** The environment is being and will be more and more the object of discussions and its conservation is fundamental for any development plan. Inside this scenario, it must be considered the recycling and reuse of any product adopting the concept of sustainable development. The recycling process of auto components after the life ends starts at its project. At this stage, the component is projected in order to disassemble easily, to identify the material (mainly the polymers) and the use of recyclable materials. Nowadays, the world is much more integrated and the laws are restricting more the auto industry. So, the recycling discussion being more important, and new technology in order to preserve the environment is being developed not only in the auto's life end, but also during its project phase. This report will research and understand the materials used in the auto mechanism and the process of recycling focusing in the Brazilian economic and cultural scenario. This report will also study how to improve a master cylinder of a brake system focusing in recycling. **Keywords.** *Recycling, Master cylinder, environmental.*