

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS  
CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS**

**LUANA MARTINS DE CARVALHO**

**PROSPECÇÃO DE NOVOS MATERIAIS PARA MOLAS DE  
SUSPENSÃO AUTOMOTIVA**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**LONDRINA  
2015**

<b>UTFPR</b>	<b>Prospecção de novos materiais para molas de suspensão automotiva</b>	<b>2015</b>
<b>COEMA</b>		

**LUANA MARTINS DE CARVALHO**

**PROSPECÇÃO DE NOVOS MATERIAIS PARA MOLAS DE  
SUSPENSÃO AUTOMOTIVA**

Trabalho de conclusão de curso em Engenharia de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito parcial para obtenção da aprovação na matéria de Trabalho de conclusão de curso 2.

Orientador: Prof. Dr. Márcio Andreato

LONDRINA  
2015

**Ministério da Educação**  
**Universidade Tecnológica Federal do Paraná**  
**Campus Londrina**  
**Programa de Graduação**

**Termo de aprovação**  
**Luana Martins de Carvalho**

**Prospecção de novos materiais para molas de suspensão automotiva**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Engenharia de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, campus Londrina, como parte dos requisitos para a conclusão do curso.

Aprovado em:

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Amadeu Lombardi Neto  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Prof. Dr. Fabiano Moreno Peres  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Prof. Dr. Marcio Andreato Mendes  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente a Deus que permitiu que tudo isso acontecesse ao longo deste tempo;  
À Universidade, seu corpo docente, direção e administração que oportunizaram a janela que hoje vislumbro um horizonte superior;

Agradeço a todos os professores por me proporcionarem o conhecimento não apenas racional, mas a manifestação do caráter e afetividade da educação no processo de formação profissional, por tanto que se dedicaram a mim, não somente por terem me ensinado, mas por terem me feito aprender.

Meus agradecimentos principalmente aos meus pais, que em todo tempo estiveram presentes me apoiando e me motivando, aos meus irmãos e amigos que fizeram parte dessa etapa da minha vida.

A todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado.

*“Que a sua felicidade esteja no Senhor! Ele lhe dará o que o seu coração deseja Ponha a sua vida nas mãos do Senhor, Confie nele, e ele o ajudará”.*

*Salmos 37: 4-5*

## RESUMO

CARVALHO, Luana. Prospecção de novos materiais para molas de suspensão automotiva. 2015. 78 f. Trabalho de conclusão de curso – Programa de Graduação em Bacharelado, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Londrina, 2015.

Por conta da revolução tecnológica, e da demanda do mercado atual, é de grande importância estar sempre a um passo à frente com as inovações tecnológicas. Porém, além do interesse dos avanços, é necessária a preocupação com os custos originados durante a fabricação do produto para ser colocado no mercado. Dessa maneira, nesse trabalho será abordada uma forma de inovação nos materiais utilizados para a fabricação de molas de suspensão automotiva, propondo a substituição desses materiais por novos materiais, que forneçam as propriedades e características exigidas por essas molas, sem inflacionar o custo do desenvolvimento. Utilizou-se como recurso metodológico, a pesquisa bibliográfica, na qual propôs métodos para o desenvolvimento do projeto e escolha de um material para a substituição do aço mola para a fabricação de molas helicoidais para suspensão automotiva. E o material que se apresentou mais adequado para essa aplicabilidade foi o Compósito de matriz Epóxi e Fibra de carbono longitudinal. Entretanto, por questões de custos seria melhor aplicado em carros de alto desempenho.

**Palavras-chave:** Inovação. Novos Materiais. Molas.

## ABSTRACT

CARVALHO, Luana. Prospecção de novos materiais para molas de suspensão automotiva. 2015. 78 f. Trabalho de conclusão de curso – Programa de Graduação em Bacharelado, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Londrina, 2015.

Because of the technological revolution and current market demands, it is of great importance to be always one step ahead with technological innovations. But besides the technological advancements, the rising costs of fabrication the market of such products is always a concern. Thus, this paper is discussed a way of innovation in materials used for the manufacture of automotive suspension springs, suggesting the substitution of these materials for new materials that provide the properties and characteristics required by these springs. Therefore, also taking into account the cost of developing these products. It was used as a methodological resource, the literature, which proposed methods for the development of design and choice of material for the spring steel replacement for the manufacture of coil springs for automotive suspension. And the material that appeared more suitable for such applicability was the matrix composite epoxy and carbon fiber longitudinal. However, for cost reasons would be better applied in high-performance cars.

**Keywords:** Innovation. New Materials. Springs.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Componentes de suspensão de um veículo.....	15
Figura 2 - Suspensão de quatro barras utilizadas atualmente em carro de passageiros de grande porte com eixos traseiros rígidos.....	16
Figura 3 - Componentes de uma suspensão traseira com molas semielípticas.....	16
Figura 4 - Suspensão dianteira do tipo MacPherson.....	17
Figura 5 - Componentes da parte superior de uma suspensão dianteira do tipo MacPherson.....	17
Figura 6: Representação de uma Mola helicoidal de tração. Fonte: Molas de qualidade. (a) Representação de mola helicoidal de tração real, (b) representação de esquemática de uma mola helicoidal de tração.....	19
Figura 7 - Representação de uma Mola helicoidal de compressão. (a) Representação de mola helicoidal de compressão real, (b) representação de esquemática de uma mola helicoidal de compressão.....	20
Figura 8 - Representação de uma Mola helicoidal de torção. (a) Representação de mola helicoidal de torção real, (b) representação de esquemática de uma mola helicoidal de torção.....	21
Figura 9 - Comparação do comportamento mecânico de um aço mola e um aço estrutural.....	22
Figura 10 - Diagrama esquemático da mola helicoidal cilíndrica com uma secção transversal quadrada.....	24
Figura 11 - Mola helicoidal produzida com material compósito.....	28
Figura 12: (a) CHEVROLET CORVETTE Z06 2015; (b) Feixe de molas de material compósito utilizada no CORVETTE Z06.....	29
Figura 13 - Estratégia de seleção de materiais.....	31
Figura 14 - Obtenção da matéria prima até processo de fabricação do componente, o que estará relacionado aos custos e impactos ambientais gerados.....	33
Figura 15 - Diagrama de Seleção de Materiais, Módulo de Young, E, em relação à Densidade.....	36
Figura 16 - Diagrama de Seleção de Materiais, Módulo de Young, E, em relação ao custo relativo, Cv,R.....	37
Figura 17 - Materiais para molas. Aço de alta resistência, CFRP, e certos polímeros e elastômeros são a melhor escolha para as molas.....	38

Figura 18 - Modelo simplificado de $\frac{1}{4}$ de um veículo .....	40
Figura 19 - Esforço atuantes em uma solicitação de compressão .....	41
Figura 20 - Esforços atuantes na mola: (a) Torção pura; (b) Cisalhamento; (c) Torção + Cisalhamento; e (d) Efeitos de concentração na borda interna .....	42
Figura 21 - Molas Helicoidais de compressão utilizadas para aplicação em suspensão automotiva, fabricadas pela a empresa RNA Fabrini. ....	42
Figura 22 - Mola quando sofre aplicação de carga.....	46
Figura 23 - Tipos de extremidades em molas helicoidais .....	47
Figura 24 - Curva S-N típica do ensaio de fadiga .....	51
Figura 25: ângulo de enrolamento do fio com o valor máximo do ângulo é $12^\circ$ .....	54
Figura 26 - Curva de Deflexão pelo Módulo elástico, levando em consideração o valor do coeficiente Poisson de 0,25, para materiais isotrópicos .....	55

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Materiais utilizados para a fabricação de molas.....	26
Tabela 2 - Função, restrições, objetivos e variáveis livres, a serem consideradas do componente projetado.....	31
Tabela 3 - Requisitos do projeto para molas. ....	33
Tabela 4 - Equações para cada tipo de extremidade.....	47
Tabela 5 - Constante $\alpha$ para cada tipo de extremidade.....	49
Tabela 6 – Resultados do ensaio de fadiga de molas processadas a quente.....	52
Tabela 7 - Resultados do ensaio de fadiga de molas processadas a quente .....	56
Tabela 8 - Resultados do ensaio de fadiga de molas processadas a frio.....	56
Tabela 9 - Comparação entre as propriedades apresentadas pelo Aço Mola (9254) e o material escolhido.....	57

## LISTA DE SÍMBOLOS

F	Força aplicada
m	Massa
g	Gravidade
$\tau$	Tensão de carregamento dinâmico
$\sigma_t$	Tensão de tração
$\sigma_c$	Tensão Torcional
$K_w$	Fator Wahl
C	Índice de curvatura do fio
D	Diâmetro externo da Mola
d	Diâmetro do fio
$\delta$	Deflexão da mola
k	Constante Elástica
$\varepsilon$	Deformação do material
$\varepsilon_a$	Deformação longitudinal
$\varepsilon_t$	Deformação transversal
G	Módulo de Cisalhamento
E	Módulo Elástico
$\mu$	Coefficiente Poisson
$N_a$	Número de espiras ativas
$N_t$	Número de espiras totais
$L_o$	Comprimento livre da mola
$L_s$	Comprimento sólido da mola
$\alpha$	Coefficiente
$f_n$	Frequência Natural
$\rho$	Densidade
$\tau_{MÍN}$	Tensão máxima
$\tau_{MÁX}$	Tensão mínima
$\lambda$	ângulo

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>12</b>
1.1 Objetivos.....	13
1.1.1 Objetivo geral .....	13
1.1.2 Objetivos específicos.....	13
1.2 Motivação e justificativa .....	13
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>14</b>
2.1 Sistema de suspensão .....	14
2.1.1 Funcionamento do sistema de suspensão .....	14
2.2 Molas .....	18
2.2.1 Molas de tração.....	19
2.2.2 Molas de compressão .....	20
2.2.3 Molas de torção .....	20
2.3 Propriedades .....	21
2.4 Materiais utilizados .....	24
2.4.1 Aços para construção mecânica.....	24
2.4.2 Materiais compósitos.....	26
2.5 Causas de falhas .....	29
2.5.1 Fadiga.....	29
2.6 Seleção de Materiais.....	30
2.6.1 Considerações econômicas .....	32
2.6.2 Considerações ambientais e sociais.....	32
2.7 Considerações do projeto .....	33
2.7.1 Fatores que influenciam no projeto .....	34
2.7.2 Classificação dos materiais.....	34
<b>3 METODOLOGIA.....</b>	<b>40</b>
<b>4 RESULTADOS.....</b>	<b>52</b>
4.1 Método I do cálculo da deflexão .....	53
4.2 Método II do cálculo da deflexão .....	54
<b>5. CONCLUSÃO.....</b>	<b>59</b>
<b>6. REFERÊNCIAS .....</b>	<b>60</b>
<b>7. ANEXOS .....</b>	<b>63</b>
7.1 ANEXO A .....	63

7.2 ANEXO B: Considerações da densidade dos materiais .....	66
7.3 ANEXO C: Considerações de propriedades mecânicas do materiais .....	67
7.4 ANEXO D: Considerações do custo relativo .....	71
7.5 ANEXO E: Considerações da forma do componente .....	74
7.6 ANEXO F: Considerações do processo de fabricação .....	75
7.7 ANEXO G: Considerações de reciclagem.....	77

## 1. INTRODUÇÃO

Diante das exigências do mercado e dos atuais estágios de desenvolvimento tecnológico e econômico impostos às empresas, considerando os elevados níveis de competitividade industrial que caracterizam o mundo atual, um fator de grande relevância para o sucesso de novos projetos de produtos e das próprias empresas, é a questão da inovação tecnológica.

As inovações podem ser tratadas de diferentes formas, bem como impactos distintos sobre produtos e sistemas de produção, podendo ser incrementais e radicais. As inovações incrementais estão relacionadas com a melhoria do produto ou dos processos para a sua obtenção, onde sua performance tenha sido plenamente satisfatória, seja através do aperfeiçoamento de uma tecnologia já existente ou de um novo design. Já as inovações radicais incluem o desenvolvimento de novos produtos ou processos, que apresentam melhoria significativa em relação aos existentes (NAVEIRO e GOUVINHAS, 2011).

Neste trabalho será abordada a prospecção de novos materiais para molas de suspensão automotiva como uma nova alternativa para essa aplicação, ou seja, do ponto de vista de inovação tecnológica, será proposta uma inovação incremental. Para a efetivação da proposta serão levados em consideração fatores como: qualidade, comportamento mecânico, custo e disponibilidade do produto proposto no mercado. Esses fatores visam que as molas de suspensão automotiva gerem conforto, estabilidade e uma boa dirigibilidade ao condutor, sem que se sintam os impactos das imperfeições do solo com os pneus.

Ao longo das últimas três décadas, esforços consideráveis foram feitos no desenvolvimento de aços para molas de alto desempenho para atender às necessidades de peso e redução de custos na indústria automotiva (CHOI, 2011).

A redução de peso é importante de modo a reduzir a quantidade de consumo de combustível, o que pode ser conseguido em parte por meio da melhoria de molas de suspensão. Atualmente esse é um fator bastante importante, do ponto de vista ambiental e econômico, pois o consumo de combustível gera impactos ambientais, como, por exemplo, a extração de matérias-primas não renováveis e a geração e emissão de gases carbônicos na atmosfera, afetando a qualidade do ar.

Já a questão econômica é afetada pelos gastos originados com o consumo do combustível. No entanto, essa melhoria não deve degradar outras propriedades, como o limite elástico, a resistência à fadiga e não afetar a formabilidade do componente, que são essenciais para o bom funcionamento da mola.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo geral**

Propor um material com melhor desempenho para a fabricação de molas de suspensão automotiva, focando na redução do custo, peso e desgaste, sem perdas significativas de propriedades mecânicas frente às atuais molas utilizadas no mercado e que, também, seja relativamente fácil de ser fabricada.

### **1.1.2 Objetivos específicos**

- Identificar os materiais tradicionalmente utilizados na fabricação das molas;
- Analisar as propriedades mecânicas e características de molas utilizadas em suspensão automotiva;
- Propor novos materiais para a fabricação de molas;
- Averiguar as propriedades mecânicas frente às das molas comerciais.

## **1.2 Motivação e Justificativa**

Com o passar do tempo e com as condições de uso do automóvel ocorre um desgaste constante no sistema integrado de suspensão, sendo necessária muitas vezes a sua troca.

Um dos elementos principais que faz parte do sistema de suspensão é a mola helicoidal, que pode vir a falhar por diversos motivos, dentre eles, o principal, por fadiga. De forma geral, esse mecanismo de ruptura se inicia a partir de descontinuidades do componente, que são influenciadas pelo processamento, pelas propriedades e pelas condições de uso da mola. Há uma preocupação também com o peso do componente, que está relacionado com o consumo de energia e com o custo de fabricação do produto final e desempenho da suspensão.

Visando contornar esses problemas, a procura de novos materiais para a fabricação dessas molas com os requisitos e propriedades exigidos é contínua pelos fabricantes. Foram esses motivos que despertaram a concepção desse estudo, no sentido de contribuir com os esforços que vêm sendo realizados no aperfeiçoamento desses componentes, aplicando conhecimentos da Engenharia e da Ciência de Materiais adquiridos durante o curso.



## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

O sistema de suspensão automotiva é utilizado para proporcionar conforto aos ocupantes do veículo, proteção dos sistemas mecânicos e maximizar o contato do pneu no solo. Ele é necessário devido às irregularidades encontradas no solo durante o trajeto. Esse sistema de suspensão é integrado por molas helicoidais e amortecedor entre outros componentes. O primeiro consiste na resistência elástica a uma carga e o segundo na capacidade de absorver parte da energia de uma mola após esta ter sido comprimida.

### **2.1 Sistema de Suspensão**

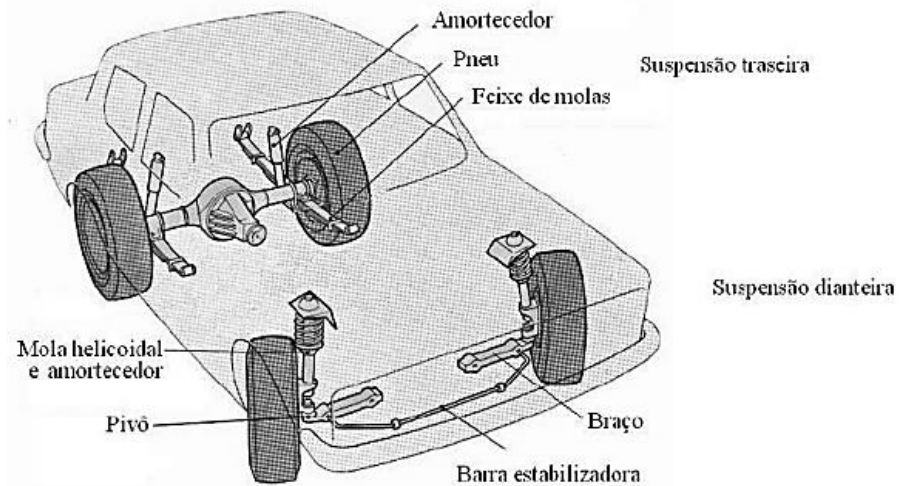
O sistema de suspensão automotiva é constituído por alguns componentes, sendo eles:

- Mola - responsável pela suavização dos movimentos verticais devido às irregularidades do solo, garantindo o conforto dos ocupantes;
- Amortecedor - responsável pela dissipação de energia, armazenada pelas molas;
- Barra estabilizadora - responsável por estabilizar o chassi em uma curva, evitando que ele gire, e assim diminuindo o risco de capotamento.
- Pinos esféricos - fazem ligação entre as partes suspensas (chassi e carroceria) e as partes não suspensas (cubo de roda manga de eixo e telescópio)
- Bandeja - controla o posicionamento das molas e amortecedores, permitindo a articulação das rodas na suspensão.

#### **2.1.1 Funcionamento do sistema de suspensão**

O sistema de suspensão pode ser dividido em dois grupos: sistema dependente (eixos rígidos) e independente. No sistema dependente, o movimento vertical de uma roda implica no movimento vertical da outra que se encontra no mesmo eixo. Já no sistema independente, os movimentos verticais das rodas são independentes.

Na Figura 1 é possível ver de forma detalhada o sistema de suspensão automotiva e seus componentes.



**Figura 1 - Componentes de suspensão de um veículo**  
**Fonte: HATTORI (2002, p. 15).**

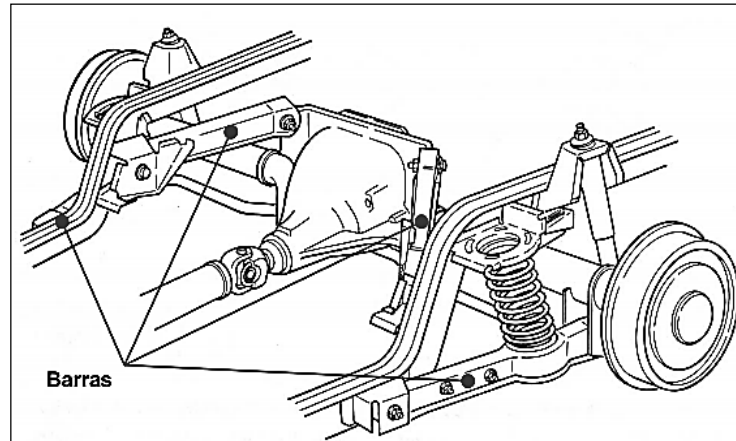
### 2.1.1.1 Sistema dependente

É um sistema caracterizado por um eixo rígido transversal unindo as rodas traseiras ou dianteiras. Existem dois tipos de suspensão dependente: com feixe de molas e com molas helicoidais.

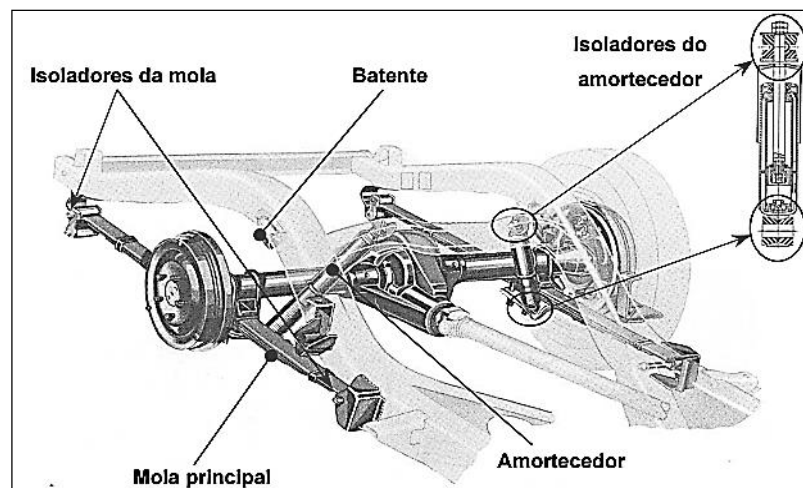
A suspensão dependente de feixe de molas é pouco utilizada em veículos de passeio por conta da falta de conforto, sendo direcionado o seu uso para veículos pesados. Já a suspensão dependente de molas helicoidais proporciona um maior conforto, são mais leves e ocupam um menor espaço (GILLESPIE, 1992).

Em geral, o sistema dependente tem como vantagem a simplicidade na construção e baixo custo, sendo utilizada em veículos comerciais.

As Figuras 2 e 3 mostram os dois tipos de sistema de suspensão de eixo rígido utilizando molas helicoidais e feixe molas, respectivamente.



**Figura 2 - Suspensão de quatro barras utilizadas atualmente em carro de passageiros de grande porte com eixos traseiros rígidos**  
**Fonte: Freitas Júnior (2006).**



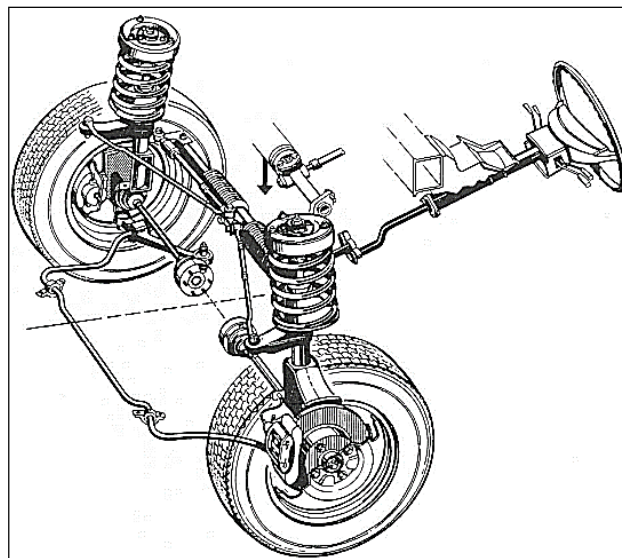
**Figura 3 - Componentes de uma suspensão traseira com molas semielípticas**  
**Fonte: Freitas Júnior (2006).**

### **2.1.1.2 Sistema de Suspensões independentes**

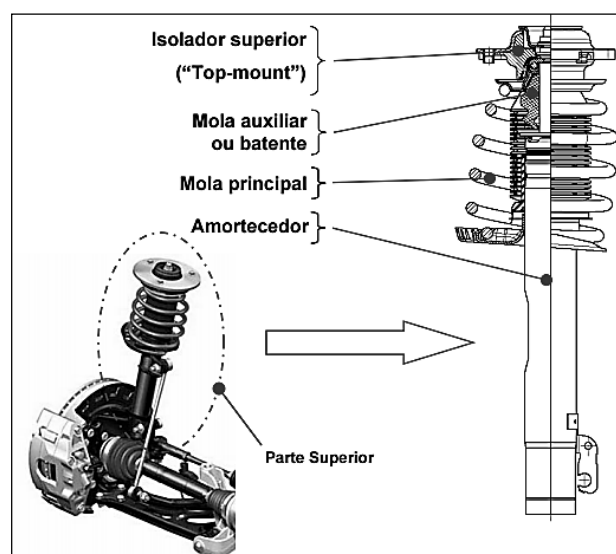
Diferente do eixo rígido, essa suspensão promove maior rigidez a rolagem relativamente à rigidez vertical. Existem vários tipos de suspensão independente: feixe de molas, barra de torção, feixe de torção, hidropneumática e MacPherson.

A suspensão MacPherson é atualmente uma das mais utilizadas na dianteira de veículos de passeio de pequeno e médio porte, com tração dianteira. A suspensão MacPherson é um tipo de suspensão automotiva com maior altura, contendo molas helicoidais e amortecedores telescópicos. Esse tipo de suspensão é empregado em cerca de 70% das suspensões dianteiras dos veículos populares (FREITAS JÚNIOR, 2006).

A fixação superior do amortecedor é feita direto na carroceria ou chassi. O amortecedor além de gerar carga axial de sentido contrário ao da velocidade de oscilação da roda, passa a suportar cargas laterais e longitudinais. A fixação inferior do amortecedor é feita direto na manga de eixo. Esse sistema de suspensão tem como vantagem o baixo custo, o arranjo compacto, a facilidade de montagem e o espaço livre para o motor quando montado na posição transversal (FREITAS JÚNIOR, 2006). As Figuras 4 e 5 mostram a suspensão dianteira do tipo MacPherson e os componentes da parte superior da mesma.



**Figura 4 - Suspensão dianteira do tipo MacPherson**  
**Fonte: Freitas Júnior (2006).**



**Figura 5 - Componentes da parte superior de uma suspensão dianteira do tipo MacPherson**  
**Fonte: Freitas Júnior (2006).**

## 2.2 Molas

Molas são elementos mecânicos que exercem forças ou torques por meio da absorção e liberação de energia, durante o seu funcionamento. Algum mecanismo fornece ou disponibiliza energia que é então absorvida pela mola, armazenada e posteriormente liberada (MARGHITU, 2005), ou seja, a função primordial de uma mola é armazenar energia elástica e, quando necessário, liberá-la novamente (ASHBY, 2012).

Independente do seu formato ou tipo, molas são elementos mecânicos elásticos; isto significa que, segundo os conceitos clássicos da resistência dos materiais, são componentes que trabalham sempre dentro da zona elástica determinada pela Lei de Hooke que afirma que a deformação é proporcional à tensão. Numa descrição simplificada, as molas armazenam energia e a devolvem sem se deformarem plasticamente (MOLAS HOESCH, 2015).

Não se sabe quando a primeira mola foi produzida; no entanto, é muito provável que era um arco. O arco foi usado para armazenar energia que poderia ser lançado em um momento preciso, sob o comando do arqueiro. O primeiro estudo formal dos membros flexíveis foi feita por Robert Hooke em 1678. Partindo desse estudo, foi formulada a famosa lei de Hooke, que afirma que "deflexão é proporcional à carga", sendo ainda a base para o projeto da mola (DESIGN HANDBOOK – ENGINEERING GUIDE TO SPRING DESIGN, 1987).

As molas utilizadas normalmente são feitas de metal, mas pode-se substituir o metal por materiais plásticos, quando as cargas atuantes nas molas forem mais leves, pois, apesar de menos resistentes, o custo é menor, embora não é aplicado em suspensão automotiva. Outra possibilidade é a substituição por materiais compósitos estruturais quando for necessária uma massa mínima, assim como em polímeros, visto que são materiais mais leves e podem possuir as mesmas propriedades de interesse que os materiais metálicos, fatores que dependem apenas do processamento e dos materiais escolhidos para a obtenção do compósito.

As condições de serviços das molas são muitas vezes severas, quer pelas cargas e tipos de esforços que irão suportar, quer pelas temperaturas, meios corrosivos, vibração etc., a que podem estar sujeitas. De modo geral, há dois tipos de molas: 1) molas helicoidais, também denominadas de espiral, sendo fabricadas a partir de barras e fios; e 2) molas planas, sendo fabricadas a partir de tiras de aço (MARGHITU, 2005).

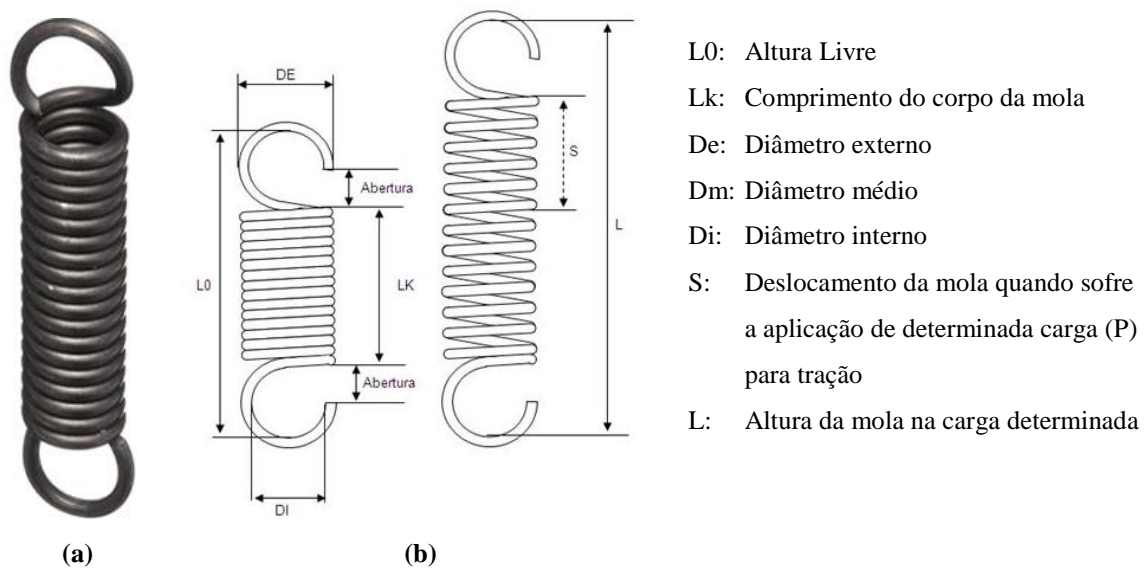
As molas planas são empregadas somente para algumas cargas, onde é fixa numa extremidade e livre na outra, e, quando sofre a ação de uma força, a mola é flexionada em direção oposta (SHIGLEY, MISCHKE e BUDYNAS, 2005). Elas podem ser classificadas em: simples, prato, feixe de molas e espiral.

Há também as molas helicoidais, que são as mais utilizadas em mecânica e aplicadas no amortecimento automotivo, sendo essa aplicação o foco do presente trabalho e, portanto, será dado maior destaque a este tipo. Esse tipo de molas pode ser subdividido em:

- Molas de tração;
- Molas de compressão;
- Molas de torção (MARGHITU, 2005).

### 2.2.1 Molas de tração

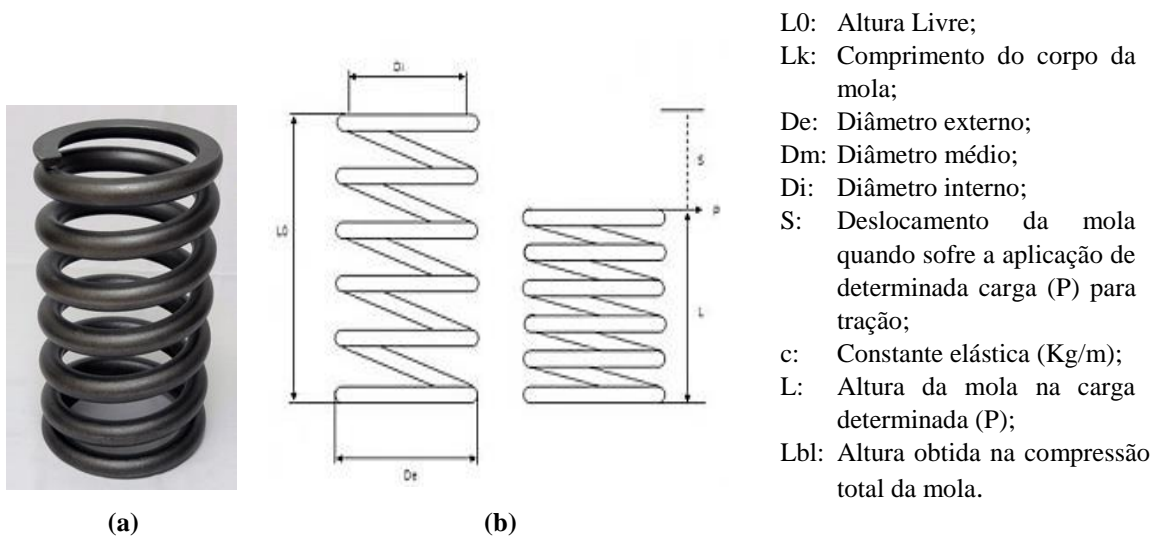
Molas de tração possuem ganchos nas extremidades, além das espiras. Para a mola helicoidal de tração desempenhar sua função, ela deve ser esticada, aumentando seu comprimento. Quando não tensionada, em seu estado de repouso, ela volta ao seu comprimento normal (MDQ, 2015). A figura 6 representa uma mola helicoidal de tração.



**Figura 6: Representação de uma Mola helicoidal de tração. Fonte: Molas de qualidade. (a) Representação de mola helicoidal de tração real, (b) representação de esquemática de uma mola helicoidal de tração Fonte: MDQ (2015).**

### 2.2.2 Molas de compressão

Molas de compressão são formadas por espiras e são empregadas em suspensão automotiva. Quando esta mola é comprimida por alguma força, o espaço entre as espiras diminui, tornando menor o seu comprimento. Após a carga ser aliviada, a mola deverá voltar a sua altura original (MDQ, 2015). A figura 7 representa uma mola helicoidal de compressão.

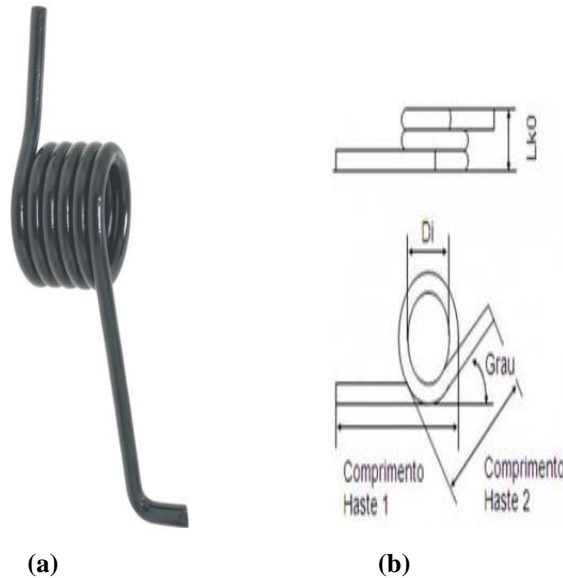


**Figura 7 - Representação de uma Mola helicoidal de compressão. (a) Representação de mola helicoidal de compressão real, (b) representação de esquemática de uma mola helicoidal de compressão**

Fonte: MDQ (2015).

### 2.2.3 Molas de torção

Molas de torção sofrem forças que atuam perpendicular ao seu eixo, enquanto que nas molas de tração e de compressão a força segue a mesma direção do eixo (MDQ, 2015). Na figura 8 está representada uma mola helicoidal de torção.



De: Diâmetro externo;  
 Dm: Diâmetro médio;  
 Di: Diâmetro interno;  
 c: Constante elástica (Kg/m);  
 Lk0: Altura (comprimento) do corpo da mola em repouso.

**Figura 8 - Representação de uma Mola helicoidal de torção. (a) Representação de mola helicoidal de torção real, (b) representação de esquemática de uma mola helicoidal de torção**  
**Fonte: MDQ (2015).**

Em outras palavras, as molas de tração e compressão trabalham sob torção e as molas de torção trabalham sob dobramento.

### 2.3 Propriedades

Do ponto de vista físico, exige-se que materiais para uma mola tenha as seguintes características mecânicas:

- Altos valores para limites de elasticidade ou proporcionalidade sob tensão ou para limite de proporcionalidade sob torção, para que possa suportar apreciáveis cargas sem apresentar deformação permanente;
- Baixa constante elástica, para propiciar deformações elásticas apreciáveis;
- Elevada vida em fadiga;
- Elevada resistência ao choque.

O principal fator a ser considerado na concepção de uma mola é a energia de deformação de um material utilizada. Energia de deformação específica no material pode geralmente ser expressa como:

$$U = \frac{\sigma^2}{\rho E} \quad Eq.(1)$$



A Equação (1) indica que um material com menor módulo de Young ( $E$ ) ou densidade ( $\rho$ ) terá energia de deformação específica (deformação por unidade de comprimento) mais elevada sob a mesma tensão ( $\sigma$ ).

A Figura 9 ilustra o comportamento mecânico de um aço, e a comparação de um aço estrutural e aço mola, que é usado para a fabricação de molas, respectivamente, através de curvas de tensão versus deformação.

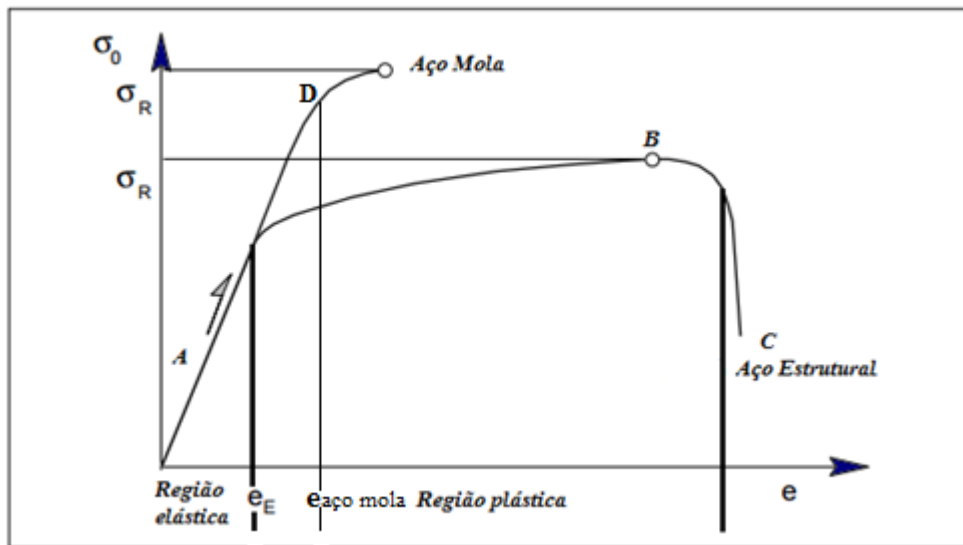


Figura 9 - Comparação do comportamento mecânico de um aço mola e um aço estrutural  
Fonte: COMPORTAMENTO MECÂNICO DOS MATERIAIS, (GUIA..., p. 64).

Na figura acima, observa-se o comportamento elástico dos aços, comparando o comportamento elástico do aço mola e do aço estrutural. São observadas duas regiões distintas tratando-se do comportamento mecânico, onde a elástica é definida pela tensão e deformação específica de escoamento do material, e a região plástica, definida a partir do fim da região elástica (A) até a ruptura do material. O comportamento mecânico do material durante o desenvolvimento das tensões num regime elástico permite o retorno do material à sua forma e dimensões originais, quando da ausência de carga aplicada. Já na região plástica, este comportamento não ocorre, e o material, depois de aliviado de suas tensões, permanece com deformações residuais importantes. A região plástica, por sua vez, pode estar dividida em três regiões bem diferenciadas: uma região caracterizada por um patamar de escoamento, onde as deformações se processam sem incremento das tensões (não representada); uma região de endurecimento do material (B); e uma região caracterizada por um estrangulamento localizado ou estrição da seção transversal do material, principalmente após a ocorrência de uma tensão

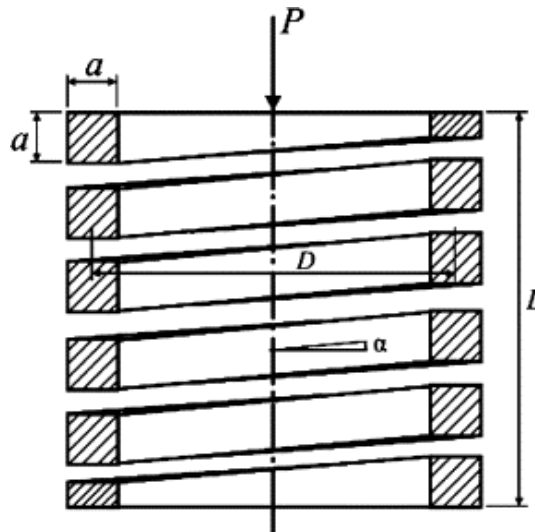
máxima, ou última, (C). Nota-se que a região elástica do aço mola é maior (D), podendo afirmar que o regime elástico permite o retorno do material à sua forma e dimensões originais, quando se tem a ausência de carga aplicada. Concluindo que, por conta de seu comportamento elástico, e por se ter características exigidas para a fabricação de uma mola, o aço utilizado foi denominado aço mola.

Quando uma mola helicoidal cilíndrica com uma seção transversal retangular está sob a ação de uma força de compressão aplicada  $P$ , a força de reação sobre a mola é de torção e, portanto, induz tensões de corte sobre a seção transversal. Para materiais homogêneos e isotrópicos, tanto a constante da mola,  $K$ , e a tensão de cisalhamento induzida sob torção,  $\tau$ , para a mola pode ser aproximadamente como descritas pelas equações abaixo (CHIU *et al.*, 2005):

$$K = \frac{P}{\delta} = \frac{Ga}{5.59nD^3} \quad Eq.(2)$$

$$\tau = \frac{2.4K'PD}{a^3} \quad Eq. (3)$$

A Figura 10 indica os fatores citados nas equações (2) e (3), sendo que  $P$  é a carga aplicada na mola (kgf);  $D$ , o diâmetro médio da bobina (mm);  $L$ , o comprimento livre (mm);  $\alpha$ , o ângulo helicoidal ( $^{\circ}$ );  $\delta$ , a deflexão (mm);  $G$ , o módulo de rigidez ao cisalhamento (kgf / mm<sup>2</sup>);  $n$ , o número de espiras ativas da mola,  $a$ , o comprimento lateral de secção transversal quadrada (mm) e  $c$  é  $D/a$ .



**Figura 10 - Diagrama esquemático da mola helicoidal cilíndrica com uma seção transversal quadrada**

Pode ser observada a partir da Equação (3) que a grandeza da constante de mola da mola helicoidal cilíndrica com uma seção transversal retangular está relacionada com o diâmetro médio da bobina (espiral), o número de enrolamentos ativos, e o comprimento lateral de seção transversal quadrada, assim como o módulo de rigidez do material utilizado (CHIU *et al.*, 2005).

## 2.4 Materiais utilizados na fabricação de molas

### 2.4.1 Aços para construção mecânica

Atualmente, em molas de suspensão automotiva comerciais são utilizados materiais metálicos no processo de fabricação, classificados como aços para construção mecânica, e os denominados aços molas.

Os aços para construção mecânica (aços-liga) contêm carbono até 0,5% e outros elementos de liga, de forma a melhorar suas características de resistência mecânica. Os aços para construção mecânica podem ser classificados pela sua composição química, pelo tratamento térmico a ser submetido e pela aplicação final dos produtos. Os principais tipos de aços são: microligados; para tratamento térmico; para forjados; para molas; para porcas e parafusos; e aqueles para rolamentos.

Os aços-carbono, com o teor de carbono variando 0,50-1,20%, satisfazem quase todos os requisitos exigidos das molas; porém, há aplicações que exigem aços-liga. Contudo, a escolha do material vai depender das aplicações, propriedades requeridas, custo e técnica de fabricação. Os aços-ligas apresentam melhores propriedades de fadiga e limites elásticos mais

elevados do que aços-carbono, sendo preferidos em determinadas aplicações; em contrapartida, são sujeitos a mais imperfeições durante seu processo de fabricação (CHIAVERINI, 1996).

Os processos de trabalho a quente e a frio são usados para fabricação de molas, dependendo do tamanho do material e das propriedades desejadas. O enrolamento da mola induz tensões residuais por flexão, mas estas são normais à direção das tensões de torção de trabalho em uma mola de espiras. Muito frequentemente na manufatura de mola, elas são aliviadas depois do enrolamento por um tratamento térmico ameno (SHIGLEY, MISCHKE e BUDYNAS, 2005).

Convém notar que os materiais para a fabricação das molas devem ser isentos de imperfeições, devido às altas tensões e a fadiga interna a que esses materiais estão sujeitos, podendo ser prejudiciais. Pesquisas feitas pela indústria automobilística revelaram que quase todas as rupturas por fadiga em mola de válvulas de compressão, começaram numa imperfeição ou defeito interno ou superficial (MARGHITU, 2005).

Estima-se que cerca de 90% dos aços para construção mecânica destina-se à indústria automobilística e de autopeças. Dentre os aços da construção mecânica citados, os aços de interesses são os de aplicação em molas de suspensão automotiva, podendo ser, por exemplo, os aços SAE 5160 e SAE 9254. O aço SAE 5160 é amplamente utilizado na indústria e tem sua aplicação destacada no setor automotivo na qual é empregado desde em barras estabilizadoras de veículo até no sistema de suspensão. O aço SAE 9254 é utilizado em molas que necessitem resistência ao choque e em temperaturas moderadamente elevadas: molas helicoidais, barras de torção, molas de arco e molas de válvula para motores de combustão interna.

Na Tabela são mostrados os materiais utilizados para a fabricação de molas, onde há variação da composição e os tipos de aplicações.

**Tabela 1 - Materiais utilizados para a fabricação de molas**

<b>Nome do material</b>	<b>Especificações similares</b>	<b>Descrição</b>
Fio musical 0,80-0,95C	UNS G10850 AISI 1085 ASTM A228-51	Este é o melhor, o mais tenaz e o mais amplamente usado entre todos os materiais de mola para molas pequenas. Ele tem a maior resistência à tração e pode suportar tensões mais elevadas sob carregamento repetido que qualquer outro material de mola. Disponível em diâmetros 0,12 a 3 mm (0,005 a 0,125 in). Não deve ser usado acima de 120°C (250°F) ou a temperaturas abaixo de zero.
Fio revenido em óleo 0,60-0,70C	UNS G10650 AISI 1065 ASTM 229-41	Este aço de mola de propósito geral é usado para muitos tipos de molas de espira nos quais o custo do fio musical é proibitivo e em tamanhos maiores que os disponíveis em fio musical. Não recomendado para carregamento de choque e impacto. Disponível em diâmetros de 3 a 12 mm (0,125 a 0,500 in), mas tamanhos maiores e menores podem ser obtidos. Não recomendado para uso acima de 180°C (350°F) ou em temperaturas abaixo de zero.
Fio repuxado duro 0,60-0,70C	UNS G10660 AISI 1065 ASTM A227-47	Este é o aço de mola mais barato de propósito geral e deve ser usado somente quando vida, acurácia e deflexão não são muito importantes. Disponível em diâmetros de 0,8 a 12 mm (0,031 a 0,500 in). Não recomendada para uso acima de 120°C (250°F) ou a temperaturas abaixo de zero.
Cromo-vanádio	UNS G61500 AISI 6150 ASTM 231-41	Este é o aço liga de mola mais popular para condições envolvendo tensões mais elevadas que pode ser usado com aços de alto-carbono e nas quais resistência à fadiga e resistência longa são necessárias. Também bom para cargas de choque e impacto. Amplamente usada para molas de válvulas de motor de aeronaves e para temperaturas até 220°C (425°F). Disponível em tamanhos recozidos ou pré-revenidos de 0,8 a 12 mm (0,031 a 0,500 in) de diâmetro.
Cromo-silício	UNS G92540 AISI 9254	Esta liga é um material excelente para molas altamente tensionadas que requerem vida longa e estão sujeitas a carregamento de choque. Durezas Rockwell de C50 a C53 são muito comuns, e o material pode ser usado a até 250°C (475°F). Disponível de 0,8 a 12 mm (0,031 a 0,500 in) de diâmetro.

Fonte: Shigley, Mishke e Budynas (2005).

Na tabela acima se observa que para cada tipo aplicação utiliza-se um determinado material, sendo que a diferença está na variação de sua composição e no seu processamento.

É possível verificar as composições, características, aplicações e propriedades mecânicas dos dois aços mencionados utilizados para a fabricação de molas em suspensão automotiva nas tabelas encontradas no Apêndice A.

#### 2.4.2 Materiais compósitos

Atualmente, além das molas comerciais fabricadas de aços molas, já existem estudos para fabricação de molas com aplicação no sistema de suspensão automotiva de materiais compósitos. Neste sistema, podem-se adquirir as propriedades desejadas com combinação de dois materiais, sendo esses fatos explorados na família de híbridos estruturais aos quais se costumou referir como compósitos particulados e fibrosos. Em princípio, quaisquer dois materiais podem ser combinados para fazer um compósito e podem ser misturados em muitas

geometrias. Além de alta resistência e leveza, materiais compósitos também são capazes de resistir à influência de solventes e intempéries, tornando-os muito adequados para a aplicação de molas em ambiente especial (ASHBY, 2012). Isso pode ser observado através de estudos realizados, onde nota-se que o custo de todo o sistema utilizando molas helicoidais de material compósito é mais elevado do que sistema convencional, mas por causa de outras vantagens, pode ser considerável (BUDAN e MANJUNATHA, 2011). E para aplicações do propósito específico, este sistema é muito eficiente. A mola produzida por material compósito foi submetida a vários testes e os resultados foram satisfatórios (BUDAN e MANJUNATHA, 2011), onde os pesos das molas helicoidais fabricadas de compósitos foram comparados com o aço de mola e são 60 % menores, por conseguinte, o sistema com peso leve é alcançado atingindo 40% da redução do peso, e então, ele ajudará no aumento da eficiência de combustível dos automóveis. A rigidez obtida por estas molas é comparada com as molas de aço da mesma dimensões e é 50% menor do que as molas de aço. Contudo pode-se aumentar as dimensões das fontes para aumentar a rigidez das molas. As dimensões do lado paralelo ao eixo das molas pode ser aumentada sem afetar a deflexão e as dimensões permitidas para fixação as molas, e isto irá aumentar a rigidez equivalente a molas de aço (BUDAN e MANJUNATHA, 2011). Ressaltam-se também estudos realizados pela empresa Henkel e o grupo Sogefi.

A empresa Henkel, fundada em 1876, com sede em Düsseldorf, na Alemanha opera no mundo com as mais importantes marcas e tecnologias em três áreas de negócios. Está trabalhando para criar componentes de resina que possam ser incorporados ao sistema de fabricação de feixes de molas de material compósito (fibra de vidro e a resina poliuretano) com aplicação na suspensão automotiva e, assim, contribuir para a otimização do processo de fabricação (FERENCZ e KIEBLING).

A Sogefi, um grupo italiano que foi fundado há 31 anos, é líder mundial na indústria de autopeças. A companhia é especializada em sistemas de motor e componentes para suspensão. O Grupo lançou a primeira mola helicoidal do mundo produzida com material compósito (Polímeros com Fibras Reforçadas) (GILINI JÚNIOR, 2012). Na Figura 11 é mostrada a imagem de molas helicoidais fabricadas a partir de materiais compósitos pela Sogefi.



**Figura 11 - Mola helicoidal produzida com material compósito**  
**Fonte: Gilini Júnior (2012)**

Existem algumas vantagens e desvantagens na substituição dos aços atualmente utilizados para fabricação de molas para materiais compósitos:

Entre as vantagens podem ser citadas:

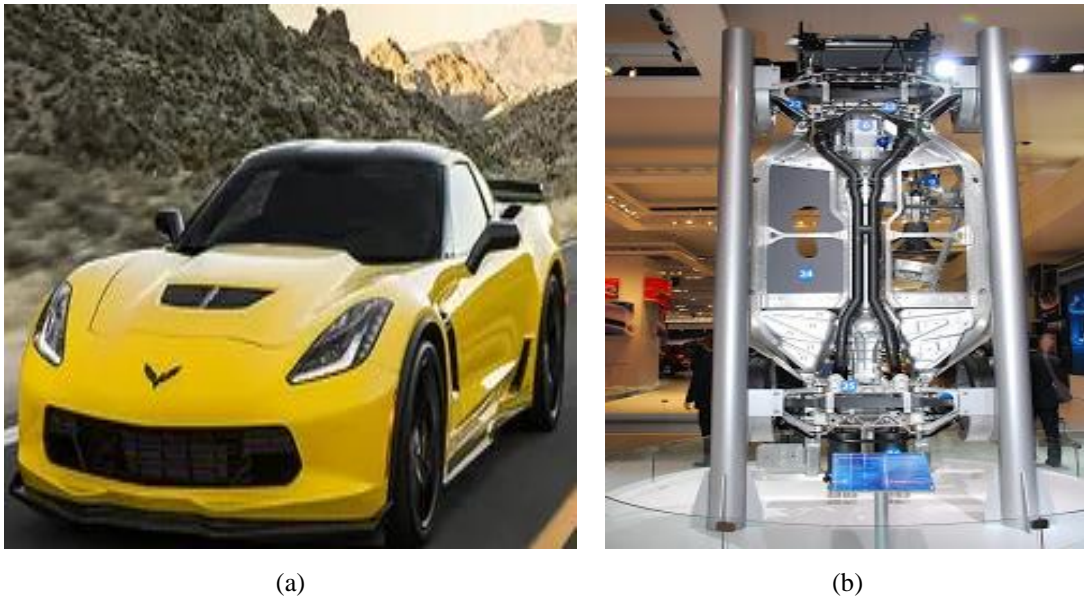
- Redução de peso, o que também reduz o consumo de combustível;
- Durabilidade maior: alta resistência a influências externas;
- Redução de barulhos em superfícies duras;
- Maior segurança, eliminando o risco de quebras inesperadas;
- Processo de produção mais ecológico;
- Economia de energia: não há tratamento diminuindo as etapas do processo;
- Redução dos resíduos;
- Economia de espaço;
- Reciclável.

Já entre as desvantagens podem ser enumeradas:

- Custo alto da matéria prima: 50 a 100 % mais caro;
- Custo de processamento alto;
- Velocidade de produção de partes aquém do desejado;
- Falta de banco de dados sobre as propriedades do material;
- Melhorias nas propriedades: falta de ductilidade e tenacidade;
- Competição de outros materiais mais atuais;
- Competição de componentes com design diferente;
- Desenvolvimento de técnicas de processamento para grandes volumes.

Como exemplo de veículo que utiliza molas desse material compósito pode-se citar o Corvette Z06, fabricado pela Chevrolet, onde é empregado feixe de molas de material

compósito. Um único feixe transversal suporta os dois lados da suspensão traseira independente com braços de controle; o Corvette usa apenas um feixe montado sob a suspensão. O esquema desta montagem economiza espaço, o feixe em compósito é mais leve, e a chance de uma falha é baixa. Na Figura 12 é possível observar o esquema desta montagem.



**Figura 12: (a) CHEVROLET CORVETTE Z06 2015; (b) Feixe de molas de material compósito utilizada no CORVETTE Z06.**

**Fonte: Ferencz e Kiebling (2015).**

## 2.5 Causas de falhas

Defeitos físicos devido ao enrolamento muitas vezes podem causar falhas prematuras por fadiga à mola. Após a formação da mola, um processo de tratamento térmico é realizado por meio de têmpera. Defeitos relativos ao tratamento térmico são outras das principais causas de insucesso da mola.

Desta forma, após a têmpera, a mola helicoidal é passada por um processo de jateamento, que consiste em uma operação de tratamento de superfícies que propulsionam um fluxo de material abrasivo contra uma superfície em alta velocidade. Esse processo é benéfico por duas razões: limpa a superfície dos defeitos, causados pelo processamento e pela têmpera e introduz tensões residuais de compressão na superfície, que aumentam a resistência à fadiga da mola.



### **2.5.1 Fadiga**

No passado, foram utilizados elementos de liga para aumentar a força da mola e melhorar o limite de fadiga de aço de mola. A resistência à fadiga é largamente influenciada pela superfície externa devido à descarbonização, defeito de superfície, e por inclusões não metálicas que representam a existência de um material estranho no interior do aço. Além disso, há uma relação entre o limite de fadiga e de tamanho do grão austenítico, pois materiais com granulações grosseiras apresentam propriedades mecânicas inferiores. A cobertura de pré-tratamento insuficiente não apenas causa a má qualidade do revestimento, mas também agrava a resistência à corrosão.

Sabe-se que a corrosão também é uma das causas de quebra da mola (MARGHITU, 2005), porém é difícil prever com certeza o efeito de um ambiente corrosivo sobre o desempenho da mola. Em geral, a corrosão galvânica e a corrosão sob tensão reduzem a vida e a capacidade de carga de molas. Os dois métodos mais comuns utilizados para combater os efeitos da corrosão são: a especificação dos materiais que são inertes com o ambiente e o uso de revestimentos protetores, que são geralmente utilizados no processo final de fabricação de molas (MARGHITU, 2005).

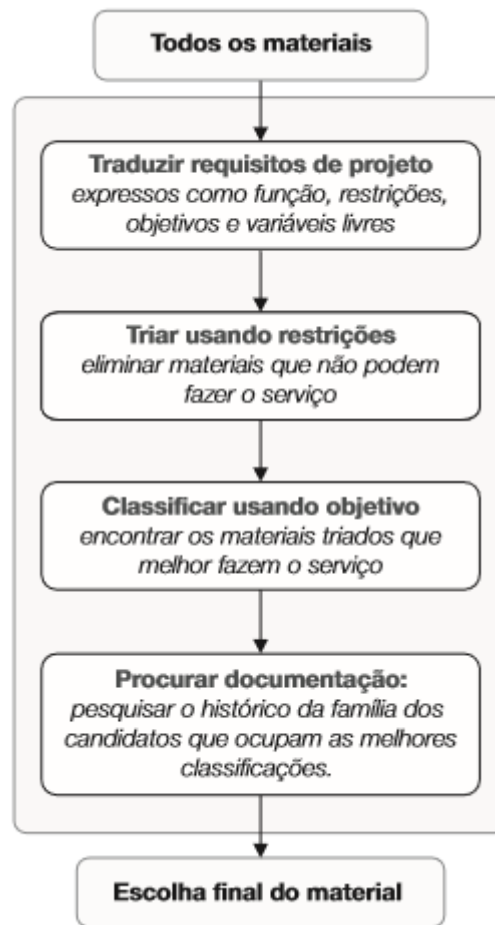
Em geral, existem dois tipos imperfeições causadas por materiais estranhos que podem ficar presos no interior da solução de aço: a) grandes imperfeições, tais como inclusões causadas por elemento de liga, na rede cristalina; e b) imperfeições menores, como a presença do defeito no vértice da estrutura cristalina. As imperfeições da superfície podem ocorrer com o endurecimento de pequenas fissuras, marcas de ferramentas, impurezas incorporadas ao material de base durante a trefilagem a frio, ou defeitos superficiais herdados da matéria-prima.

A descarbonização pode ser considerada como um fator menos agravante em toda a lista de defeitos. Descarbonização parcial é geralmente permitida em arame de mola, pelo menos de forma ligeira (CHOI, 2011).

## **2.6 Seleção de Materiais**

A seleção de materiais para um projeto é realizada com base em estudos e pesquisa de dados relacionados aos materiais, verificando, dessa maneira, qual deles será mais compatível com os requisitos propostos pelo projeto.

Na Figura 15 é mostrada a estratégia para a seleção de materiais, e assim realizar a escolha do material final.



**Figura 13 - Estratégia de seleção de materiais**  
Fonte: Ashby (2012).

Na Tabela a seguir são observadas as considerações a serem feitas sobre o componente projetado.

**Tabela 2 - Função, restrições, objetivos e variáveis livres, a serem consideradas do componente projetado**

Função, restrições, objetivos e variáveis livres	
Função	O que o componente faz?
Restrições*	Quais são as condições não negociáveis que ele deve cumprir? Quais são as condições negociáveis, porém desejáveis, que ele deve cumprir?
Objetivo	O que deve ser maximizado ou minimizado?
Variável livre	Quais são os parâmetros do problema que o projetista tem liberdade de mudar?

Fonte: Ashby (2012).

Os principais fatores que têm relação com a seleção de um material e com o atendimento às exigências de projeto são:

- Disponibilidade;

- Custo;
- Propriedades mecânicas, físicas, químicas e dimensionais do material;
- Processos de fabricação - usinabilidade, formabilidade, capacidade de união, acabamento e revestimento (Fundamentos do projeto).

### **2.6.1 Considerações econômicas**

Existem três fatores que afetam o custo de um produto:

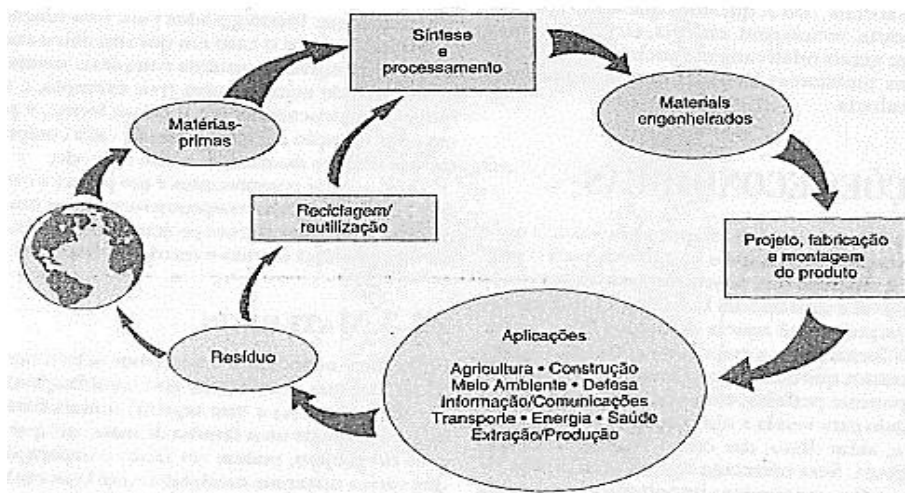
- O projeto do componente;
- O material empregado; e,
- A técnica de fabricação.

### **2.6.2 Considerações ambientais e sociais**

As modernas tecnologias e a fabricação dos produtos que estão associados a elas causam impactos, sendo esses de natureza econômica e ambiental; e internacionais em termos de abrangência, uma vez que:

- Os recursos exigidos para uma nova tecnologia vêm, com frequência, de muitos países diferentes,
- A prosperidade econômica que resulta de desenvolvimentos tecnológicos é de âmbito global; e,
- Os impactos ambientais podem se estender além das fronteiras de um único país.

Portanto, para o desenvolvimento de um bom projeto, na escolha de um material que melhor se adéqua, além das suas propriedades, é indispensável que se pense desde a obtenção da matéria prima até o processo de fabricação do componente, o que estará relacionado aos custos e impactos ambientais gerados, assim como mostrado na figura a seguir.



**Figura 14 - Obtenção da matéria prima até processo de fabricação do componente, o que estará relacionado aos custos e impactos ambientais gerados**  
**Fonte: Callister e Rethwisch (2009, p. 562).**

## 2.7 Considerações do projeto

Neste trabalho o componente de interesse são as molas helicoidais utilizadas no sistema de suspensão automotiva, e esse sistema de suspensão absorve as tensões, forças e impactos gerados por buracos e demais avarias das pistas de rodagem, minimizando a transmissão dos seus efeitos para os passageiros do carro. Então, neste caso, as molas são as responsáveis por:

- Sustentar o peso do carro;
- Determinar a altura entre ele e o solo;
- É o principal componente por absorver os impactos;
- Maximizar o tempo do contato do pneu com o solo.

Na Tabela 3 são ressaltados os requisitos do projeto para a fabricação de molas.

**Tabela 3 - Requisitos do projeto para molas**

Requisitos de projeto para molas	
Função	Mola elástica
Restrição	Não pode falhar, o que significa $\sigma < \sigma_c$ em toda a mola
Objetivo	Máxima energia elástica armazenada por unidade de volume ou máxima energia elástica armazenada por unidade de peso
Variável livre	Escolha de material

**Fonte: Ashby (2012).**

### 2.7.1 Fatores que influenciam no projeto

Uma das funções requeridas pela mola é a elasticidade, absorver energia e liberá-la quando requisitada; portanto, o módulo elástico do material é um dos fatores a serem estudados para a seleção dos materiais. Esta é uma propriedade intrínseca dos materiais que depende da composição química, microestrutura e defeitos do material, tendo origem na energia de ligação entre os átomos no qual descreve a relação entre tensão e deformação no regime elástico. E essa propriedade divide os materiais em aproximadamente duas classes: os flexíveis e os rígidos. Um material com um elevado valor do Módulo de Young é um material rígido.

O módulo elástico é uma das propriedades mais estudadas nas molas, pois a constante elástica é a característica mais importante da mola já que irá influir nas condições de conforto e estabilidade do veículo, através do sistema de suspensão automotivo.

A escolha a ser feita levará em consideração o material que melhor atenda aos requisitos propostos na aplicação do componente e como a indústria automobilística é de produção em massa, a redução de custo torna-se uma característica dominante no ciclo de desenvolvimento do produto. Em princípio, a indústria automotiva vem priorizando a redução no peso do automóvel.

Levando em consideração as propriedades mecânicas apresentadas pelo material utilizado na fabricação de molas de suspensão automotiva; as condições de uso da suspensão automotiva e os requisitos necessários para aplicação da mola, é preciso fazer algumas considerações para a escolha do material final que será aplicado nesse projeto que trata da substituição dos materiais atuais utilizados em molas comerciais. O material final a ser escolhido no projeto será baseado nas suas propriedades fornecidas e nas considerações que serão feitas através da aplicabilidade e função do componente, além de considerações do ciclo de vida do material, do processamento do material, da manufatura dos componentes e das medidas de desempenho em serviço.

### 2.7.2 Classificação dos materiais

Os materiais utilizados para fins estruturais podem ser classificados em:

- **Metais** - são condutores extremamente bons de eletricidade e calor, e não são transparentes à luz visível; uma superfície metálica polida possui uma aparência lustrosa. Além disso, os metais são muito resistentes, e ainda assim deformáveis, o que é responsável pelo seu uso extenso em aplicações estruturais;

- **Cerâmicos** - estes materiais são tipicamente isolantes à passagem de eletricidade e calor, e são mais resistentes a altas temperaturas e ambientes abrasivos do que os metais e polímeros. Com relação ao comportamento mecânico, os cerâmicos são duros, porém muito quebradiços;
- **Polímeros** - possuem tipicamente baixas densidades e podem ser extremamente flexíveis;
- **Compósitos** - um compósito é projetado para mostrar uma combinação das melhores características de cada um dos materiais que o compõe;
- **Semicondutores** - as características elétricas destes materiais são extremamente sensíveis à presença de minúsculas concentrações de átomos de impurezas, que podem ser controladas ao longo de regiões espaciais muito pequenas;
- **Biomateriais** - esses materiais não devem produzir substâncias tóxicas e devem ser compatíveis com os tecidos do corpo;
- **Materiais avançados** - materiais utilizados em aplicações de alta tecnologia, são tipicamente materiais tradicionais cujas propriedades foram aprimoradas, ou então materiais de alto desempenho recentemente desenvolvidos.

Apesar do progresso que tem sido feito ao longo dos últimos anos, ainda existem desafios tecnológicos, incluindo o desenvolvimento de materiais ainda mais sofisticados e especializados, bem como considerações em relação ao impacto ambiental da produção dos materiais (CALLISTER e RETHWISCH, 2009).

Muitas considerações são feitas na escolha de um material para uma mola, como, por exemplo, as molas para suspensão de veículos que devem resistir à fadiga e à corrosão, e as molas para válvulas de motor que devem suportar temperaturas elevadas (ASHBY, 2012).

De forma geral, alguns materiais que desempenham bem os requisitos para molas normalmente são as ligas leves de magnésio, alumínio e titânio. Grande parte da pesquisa tem como alvo melhorar suas propriedades mecânicas. Porém, elas não são todas tão leves e nem tão rígidas, havendo materiais que desempenham melhor essas propriedades, como os polímeros, que têm densidades muito mais baixas, e as cerâmicas, que são muito mais rígidas.

Em qualquer projeto existem algumas restrições para a seleção do material, selecionando materiais que melhor cumprem as propriedades e exigências requeridas no projeto. Essas restrições podem ser representadas como retas horizontais ou verticais em diagramas de propriedades de materiais. E dentro desses diagramas, pode-se escolher o

subconjunto de materiais que cumprem as restrições das propriedades, as que maximizam o desempenho do componente (ASHBY, 2012).

Esses diagramas que facilitam a visualização e identificação dos materiais para a escolha em um projeto são construídos a partir da compilação de dados tabelados e apresentados na literatura na forma gráfica (ASHBY, 2012). Por exemplo, na Figura 15 e na Figura 16 estão representados os diagramas de Módulo de Young,  $E$ , em relação à densidade, o Módulo de Young,  $E$ , em relação ao custo relativo,  $C_{v,R}$ , respectivamente. Essas figuras representam os diagramas de seleção de materiais com as propriedades mais interessantes para o desenvolvimento do projeto de molas helicoidais para suspensão automotiva. E através desses diagramas consegue-se propor a seleção de materiais para essa aplicação.

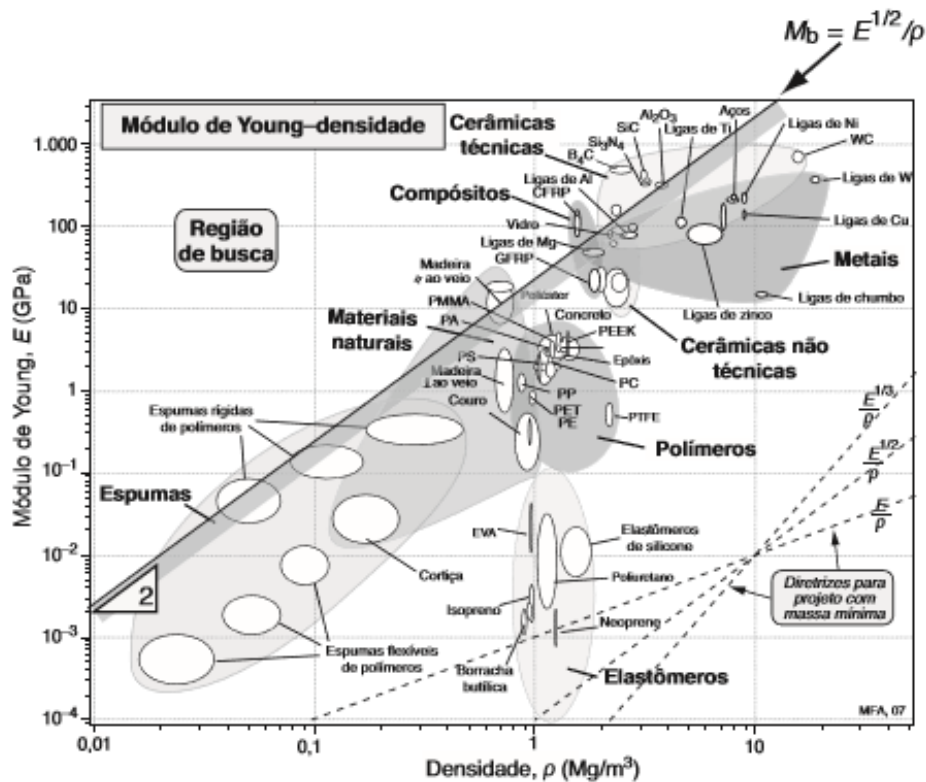


Figura 15 - Diagrama de Seleção de Materiais, Módulo de Young,  $E$ , em relação à Densidade  
Fonte: Ashby (2012, p. 123).

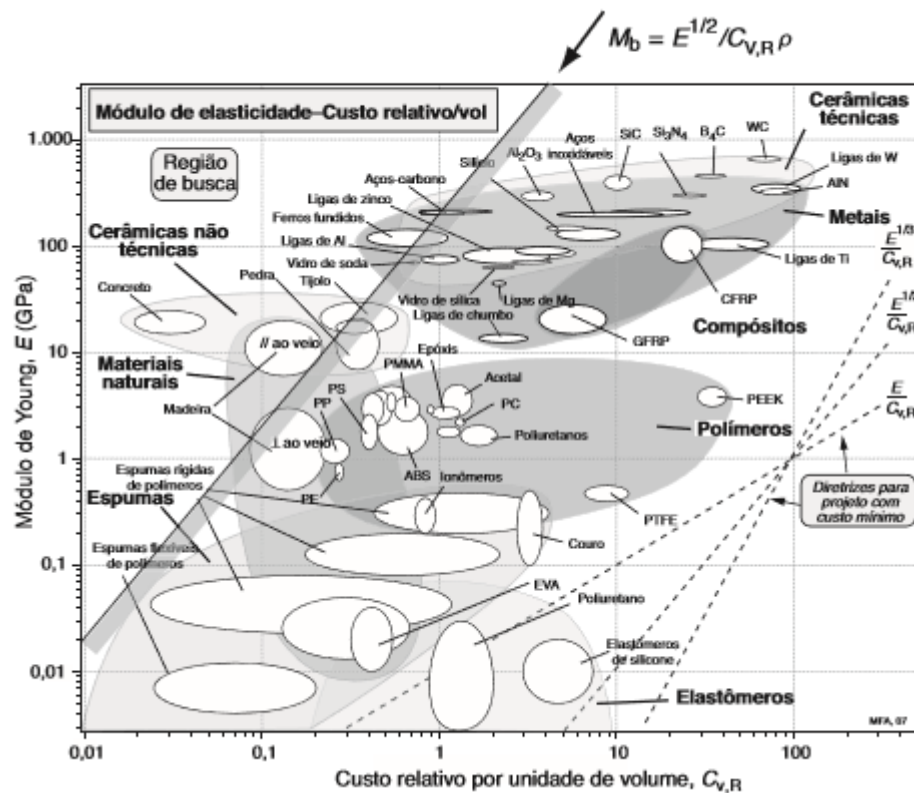


Figura 16 - Diagrama de Seleção de Materiais, Módulo de Young, E, em relação ao custo relativo,  $C_{v,R}$   
 Fonte: Fonte: Ashby (2012, p. 127).

Assim, analisando as propriedades da mola, sabe-se que a energia elástica armazenada por unidade de volume em um material que suporta uma tensão de tração  $\sigma$ , é dada por  $\sigma^2/2E$ . Se a mola sofrer escoamento, ela sofre deformação permanente e para de cumprir sua função; portanto, o valor máximo de  $\sigma$  não deve ultrapassar  $\sigma_y$  (tensão de escoamento), quando a energia armazenada é  $\sigma_y^2/2E$  por unidade de volume. Então, o melhor material para uma mola de volume mínimo é o que tiver o maior valor do resultado obtido com a Eq. (4), sendo M o índice das propriedades de interesse do material (ASHBY, 2012).

$$M = \frac{\sigma_y^2}{E} \quad \text{Eq. (4)}$$

Porém, se o que importa é o peso, e não o volume, logo se divide a Eq. (4) pela densidade, tornando-a como descrita na Eq. (5):



$$M_2 = \frac{\sigma_f^2}{\rho E} \quad \text{Eq. (5)}$$

O índice de propriedades encontrado que maximiza o desempenho para a escolha do material para molas é o mesmo para todos os tipos de molas, não dependendo de sua geometria, ou seja, a melhor escolha de material para uma delas é a melhor escolha para todas com o mesmo valor do índice (ASHBY, 2012).

A escolha de materiais para molas de volume mínimo é mostrada na Figura 17. Uma família de retas de inclinação liga materiais com valores iguais a  $M_1 = \sigma_y^2/E$ , e os que têm os valores mais altos de  $M_1$  encontram-se na direção da parte inferior direita. A linha cheia, que representa uma das inclinações das retas, está posicionada de modo tal que um subconjunto de materiais fica em evidência para serem analisados (ASHBY, 2012).

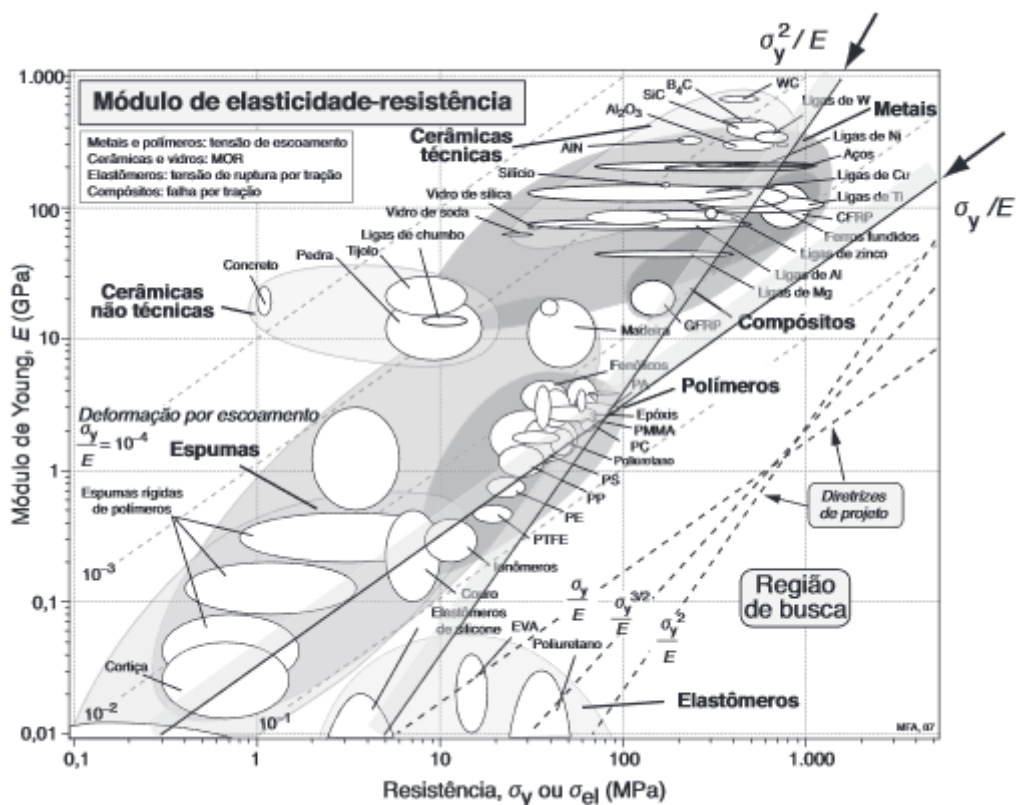


Figura 17 - Materiais para molas. Aço de alta resistência, CFRP, e certos polímeros e elastômeros são a melhor escolha para as molas  
Fonte: Ashby (2012, p. 127).

O melhor material para uma mola, independentemente da sua forma ou do modo como ela é carregada, é a de um material com um grande valor de  $\sigma^2_{el}/E$ . A mola elástica não pode falhar, o que significa tensão abaixo da do escoamento em toda a mola (ASHBY, 2012).

Levando em consideração que os aços utilizados para a fabricação de molas devem apresentar alto limite de elasticidade, grande resistência e alto limite de fadiga (PROVENZA, 1960), logo os materiais a serem propostos devem apresentar as mesmas características dos utilizados para a fabricação de molas. E como também se tratam de materiais que precisam ter baixa densidade e baixo custo relativo, então, as melhores escolhas, baseadas na Figura 17, são: aços de alta resistência que estejam próximos da extremidade superior da reta, CFRP (usado para molas de caminhão), ligas de titânio (boas, mas com alto custo), náilon (exemplos são brinquedos de crianças que têm molas de náilon) e, elastômeros (ASHBY, 2012).

### 3 METODOLOGIA

Para alcançar os objetivos propostos, utilizou-se como recurso metodológico a pesquisa bibliográfica realizada a partir da análise pormenorizada de materiais já publicados na literatura, artigos científicos divulgados no meio eletrônico e revistas especializadas da área de molas de suspensão automotiva.

Para o projeto de um sistema de suspensão, é preciso saber os tipos de esforços a que os componentes estão sujeitos. No caso deste trabalho, o estudo será focado na mola helicoidal. Então, considera-se que a curva característica de rigidez da mola é linear e obedece a equação:

$$F = k \cdot x \quad \text{Eq. (6)}$$

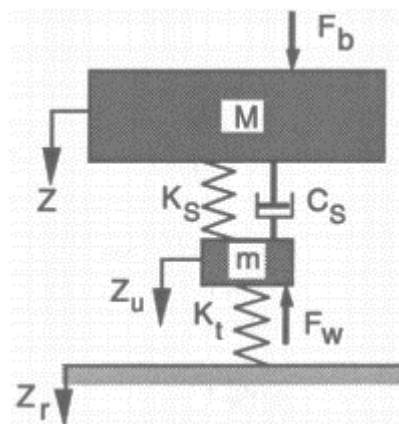
Sendo,

F= Carga sobre a mola;

k= Constante elástica da mola;

x = Deformação da mola

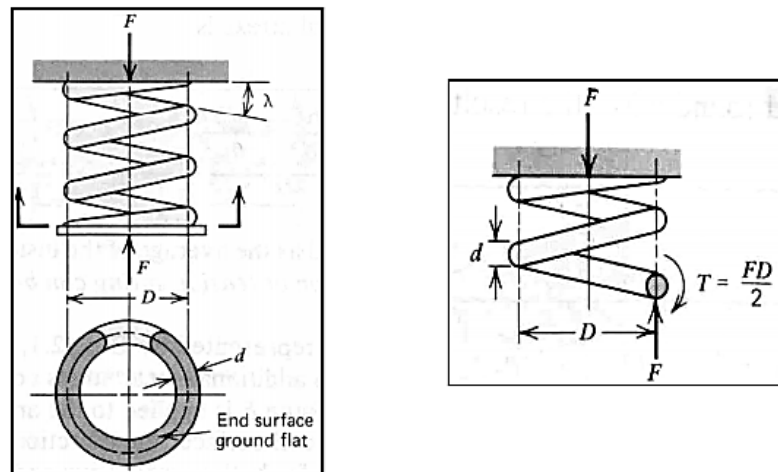
Porém, a diminuição da altura da suspensão do veículo conforme o aumento do carregamento do veículo é indesejável. O mais desejável seria a utilização de molas cuja curva de rigidez não fosse linear. Para isso são avaliados os esforços atuantes no sistema de suspensão, como mostrado na Figura 18, que representa os esforços que atuam na massa suspensa e não suspensa do veículo:



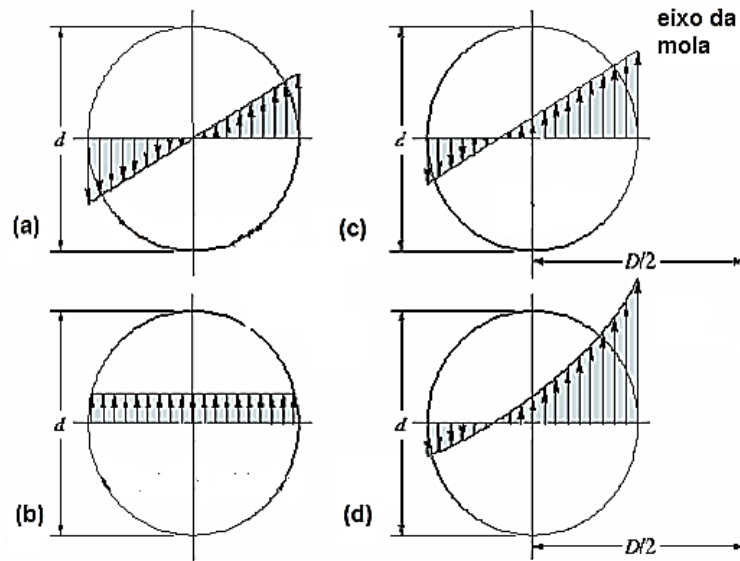
**Figura 18 - Modelo simplificado de 1/4 de um veículo**  
**Fonte: Gillespie (1992, p. 200).**

$F_b$  = Força atuante na massa suspensa;  
 $M$  = Massa suspensa (Carroceria completa)  
 $Z$  = Deslocamento da massa suspensa “M”;  
 $K_s$  = Rigidez da mola principal da suspensão;  
 $C_s$  = Coeficiente de amortecimento da suspensão;  
 $m$  = Massa não suspensa (massa do eixo + massa da roda)  
 $Z_u$  = Deslocamento da massa não suspensa “m”;  
 $K_t$  = Rigidez do pneu  
 $Z_r$  = Deslocamento do solo;  
 $F_w$  = Força do pneu.

Dessa maneira, é interessante prever os esforços que chegam às molas e saber as propriedades necessárias que o componente precisa apresentar. Nas Figuras 19 e 20 são mostrados os esforços atuantes diretamente na mola. Estas figuras representam um fio cortado em qualquer ponto, e é observado que o esforço para equilibrá-la é uma força cortante e um torque, para que não haja movimento linear e nem rotação devida ao deslocamento de meio diâmetro  $D$  entre a força de atuação e a que equilibra no fio.



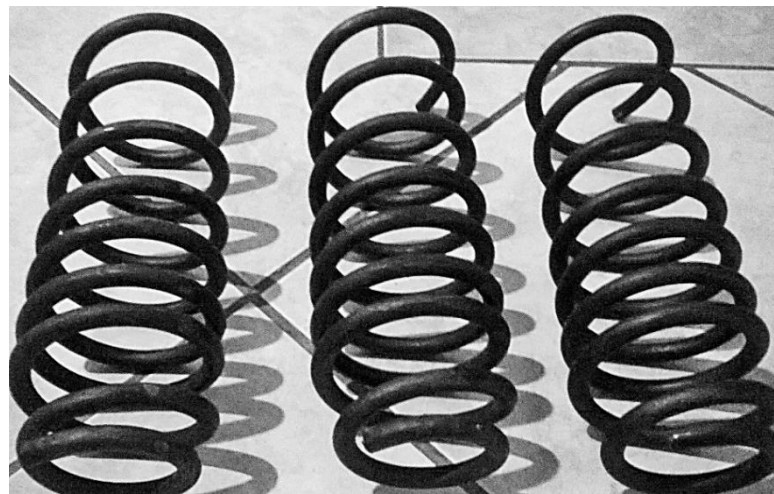
**Figura 19 - Esforço atuantes em uma solicitação de compressão**  
 Fonte: Santos Júnior (2001, p. 3).



**Figura 20 - Esforços atuantes na mola: (a) Torção pura; (b) Cisalhamento; (c) Torção + Cisalhamento; e (d) Efeitos de concentração na borda interna**

Fonte: Norton (2013, p. 798).

Para o conhecimento dos valores dos esforços atuantes nas molas helicoidais de suspensão automotiva será considerado o desenho de amostras de molas helicoidais de compressão que são comercialmente utilizadas concedidas pela empresa RNA Fabrini.



**Figura 21 - Molas Helicoidais de compressão utilizadas para aplicação em suspensão automotiva, fabricadas pela a empresa RNA Fabrini.**

Seguem abaixo as informações das dimensões da mola helicoidal de compressão da empresa RNA Fabrini:

- Diâmetro externo: 0,1 m;
- Diâmetro do fio: 0,01 m;

- Altura: 0,3 m;

A carga estimada aplicada na suspensão dianteira ou traseira de um veículo de passeio é de 840 Kg. Esse valor de carga está de acordo com os fabricantes de veículos de passeio da Volkswagen.

Dessa forma, serão utilizadas as equações abaixo para o cálculo dos esforços atuantes na Mola Helicoidal:

Força aplicada na mola:

$$F = m \cdot g \quad \text{Eq.(7)}$$

Sendo,

F= Força aplicada na Mola;

m= massa distribuída do veículo;

g= Aceleração da gravidade, sendo  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ .

Tensão em carregamento dinâmico:

$$\tau = \frac{8 \cdot F \cdot D}{\pi \cdot d^3} K_w \quad \text{Eq. (8)}$$

**Fonte: Prawoto; Ikeda et al. (2008)**

Sendo,

$\tau$ = Tensão em carregamento dinâmico;

F= Força aplicada na Mola;

D= Diâmetro da Mola;

d= Diâmetro do fio da mola;

$K_w$ = Fator de Wahl.

O Fator de Wahl é o estudo do efeito do cisalhamento transversal conjuntamente aos efeitos da curvatura da mola, levando em consideração a rigidez (solicitação variável), sendo calculado através da seguinte equação:

$$K_w = \frac{4.C - 1}{4.C - 4} + \frac{0,615}{C} \quad Eq. (9)$$

Fonte: Budynas e Nisbett (2011)

O primeiro termo da Eq. (9) corresponde a um “fator de concentração de tensões”, onde “C” indica o índice de curvatura do fio, e o segundo termo é equivalente ao fator de correção de cisalhamento.

O índice de curvatura do fio da mola, indicando o quanto o fio deve ser curvado para formar o diâmetro da mola (relação do diâmetro da mola e do fio), dá-se através da seguinte relação:

$$C = \frac{D}{d} \quad Eq. (10)$$

Fonte: Budynas e Nisbett (2011)

Sendo,

D= Diâmetro da Mola;

d= Diâmetro do fio da Mola;

A curvatura em uma mola é responsável pelo aumento das tensões originais.

O parâmetro de deflexão da Mola informa alteração ou desvio da posição natural do componente, ou seja, auxiliando no valor de deslocamento que o componente sofrerá, assim:

$$\delta = \frac{8.F.D^3.N}{d^4.G} \quad Eq. (11)$$

Fonte: Prawoto et al. (2008)

Sendo,

$\delta$ = Deflexão da Mola;

F= Força aplicada na Mola;

D= Diâmetro da mola;

N= Número de espiras ativas na Mola;

d= Diâmetro do fio da Mola;

G= Módulo de cisalhamento do material.

Há um modo simplificado para o cálculo da deflexão da mola quando se conhece a constante elástica da mola:

$$\delta = \frac{F}{k} \quad \text{Eq. (12)}$$

Sendo,

$\delta$ = Deflexão da mola;

F= Força aplicada na Mola;

k= Constante elástica da mola.

A Constante Elástica da mola é um valor específico para cada mola, pois depende principalmente da natureza do material de fabricação da mola e de suas dimensões. Dessa forma a constante elástica pode ser obtida através:

$$k = \frac{d^4 \cdot G}{8 \cdot D^3 \cdot Na} \quad \text{Eq. (13)}$$

**Fonte: Prawoto et al. (2008)**

Sendo,

D= Diâmetro da mola;

Na= Número de espiras ativas na Mola;

d= Diâmetro do fio da Mola;

G= Módulo de cisalhamento do material.

O Módulo de Cisalhamento, que é uma propriedade mecânica de cada material, está relacionada com a força  $F$  que atua sobre o corpo que é paralela a uma das faces enquanto a outra face permanece fixa, ocorrendo a deformação denominada de cisalhamento em que não tem variação de volume e sim de forma, logo:

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \mu)} \quad \text{Eq. (14)}$$

Sendo,

G= Módulo de cisalhamento do material;



$E$ = Módulo elástico do Material;

$\mu$ = Coeficiente de Poisson.

O Coeficiente de Poisson mede a deformação transversal (em relação à direção longitudinal de aplicação da carga) de um material, sendo uma propriedade específica de cada material. Para efeitos dos cálculos de forma hipotética foi adotado o valor do coeficiente de Poisson igual a 0,25 para materiais isotrópicos e 0,5 para materiais que não tenha nenhuma variação líquida (LIMA), assim:

$$\mu = \frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_a} \quad \text{Eq. (15)}$$

Sendo,

$\mu$ = Coeficiente de Poisson;

$\varepsilon_t$ = Deformação na direção transversal;

$\varepsilon_a$ = Deformação na direção longitudinal.

Além dos esforços que atuarão no componente, é preciso investigar o formato do desenho da mola, avaliando a quantidade de espiras, formato das extremidades, diâmetro do fio e da mola, comprimento da mola (Comprimento Livre,  $L_0$ ), a distância entre as espiras (passo,  $p$ ) e o comprimento sólido (quando há uma força atuando no componente ocorrendo o deslocamento da mola,  $L_s$ ) como ilustrado na Figura 22, para que seja possível a realização dos cálculos para o conhecimento das propriedades necessárias do material.

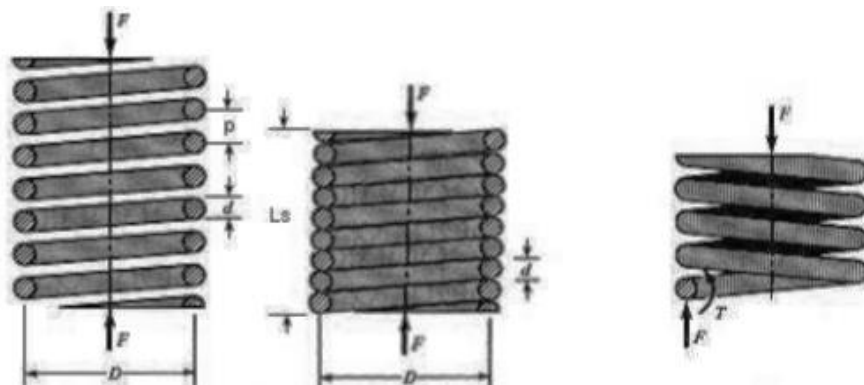
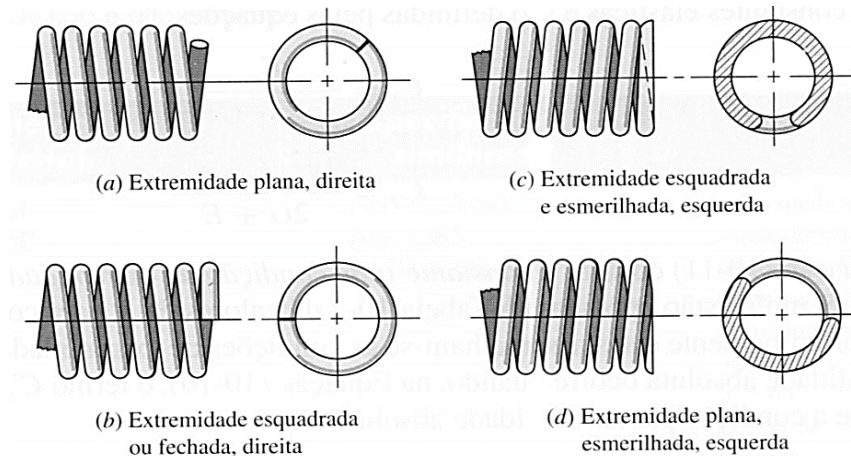


Figura 22 - Mola quando sofre aplicação de carga

Há quatro tipos de extremidades que são geralmente utilizados em molas de compressão, o que dependerá da aplicação da mola e o esforço que estará sujeita. O interesse em conhecer o formato da extremidade é para identificar qual equação da Tabela 4 que melhor se adéqua para ser utilizada. Esses tipos de extremidades podem ser observados na Figura 23.



**Figura 23 - Tipos de extremidades em molas helicoidais**

Fonte: Budynas e Nisbett (2011, p. 529)

Para os cálculos do comprimento sólido, livre, passo e número de espiras, é necessário saber o formato das extremidades da mola, para a escolha adequada da equação. As equações para esses cálculos podem ser verificadas na Tabela 4.

**Tabela 4 - Equações para cada tipo de extremidade**

Termo	Tipos de Extremidades de Mola			
	Plana	Plana e esmerilhada	Esquadrada ou fechada	Esquadrada e esmerilhada
Espiras de extremidade, $N_e$	0	1	2	2
Espiras totais, $N_t$	$N_o$	$N_o + 1$	$N_o + 2$	$N_o + 2$
Comprimento livre, $L_0$	$pN_o + d$	$p(N_o + 1)$	$pN_o + 3d$	$pN_o + 2d$
Comprimento inefectivo (sólido), $L_s$	$d(N_t + 1)$	$dN_t$	$d(N_t + 1)$	$dN_t$
Passo, $p$	$(L_0 - d)/N_o$	$L_0/(N_o + 1)$	$(L_0 - 3d)/N_o$	$(L_0 - 2d)/N_o$

Fonte: Budynas e Nisbett (2011, p. 529)

Neste trabalho será considerado o formato da extremidade esquadrada ou fechada, pois é o formato da extremidade da mola utilizada pela empresa RNA Fabrini aplicada em suspensões automotivas. Sendo assim, serão utilizadas as seguintes equações da tabela apresentada:

Distância entre as espiras sem aplicação de força:

$$p = \frac{L_o - 3 \cdot d}{N} \quad \text{Eq. (16)}$$

Fonte: Budynas e Nisbett (2011)

Número total de espiras na mola:

$$N_t = N + 2 \quad \text{Eq. (17)}$$

Fonte: Budynas e Nisbett (2011)

Sendo,

N= Número de espiras ativas - N=8;

N= Número total de espiras;

Comprimento livre, comprimento da mola sem aplicação de carga:

$$L_o = p \cdot N + 3 \cdot d \quad \text{Eq. (18)}$$

Fonte: Budynas e Nisbett (2011)

No projeto do comprimento livre de mola é necessário considerar 10% a mais para evitar o encosto gradual das espiras (BUDYNAS e NISBETT, 2011). Então, para considerar essa porcentagem é feita a soma do comprimento sólido ( $L_s$ ) com a deflexão da mola no cálculo do comprimento livre:

$$L_o = \delta + L_s \quad \text{Eq. (19)}$$

E para evitar a flambagem do componente é feita a seguinte relação (BUDYNAS e NISBETT, 2011):

$$L_o < 2,63 \frac{D}{\alpha}$$

Para cada extremidade o  $\alpha$  tem um valor diferente, e esses valores seguem na Tabela :

**Tabela 5 - Constante para cada tipo de extremidade**

Condição de extremidade	Constante $\alpha$
Mola suportada entre superfícies planas paralelas (extremidades fixas)	0,5
Uma extremidade apoiada por superfície plana perpendicular ao eixo de mola (fixa); outra extremidade pivotada (articulada)	0,707
Ambas as extremidades pivotadas (articuladas)	1
Uma extremidade engastada; outra extremidade livre	2

**Fonte: Budynas e Nisbett (2011, p. 530)**

Nesse caso, o valor a ser considerado é  $\alpha=0,5$ , pois são extremidades esquadradas ou fechadas.

Assim, para o cálculo do comprimento sólido, que é o comprimento no qual a mola está sujeita com a aplicação de carga, segue a Eq. (20):

$$L_s = d(N_t + 1) \quad \text{Eq. (20)}$$

**Fonte: Budynas e Nisbett (2011)**

É preciso conhecer a frequência natural de vibração do sistema, que é a oscilação em máxima amplitude do sistema em certas frequências, que influenciará no conforto dos ocupantes do veículo por causa das vibrações que podem ser transmitidas para os passageiros. Atualmente uma das características principais dos veículos, é o conforto do condutor e dos seus passageiros, que, infelizmente, pode ser afetado por vibrações indesejáveis. É possível saber quando o sistema pode vibrar, podendo alguns problemas dinâmicos ser corrigidos ou diminuídos durante a fase de design ou processos de teste, modificando a estrutura original. Para isso utiliza-se:

$$f_n = \frac{d}{9D^2 N_t} \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad \text{Eq. (21)}$$

**Fonte: Freitas Júnior (2006)**

E para saber a resistência de escoamento torcional no qual o componente está sujeito, estima-se grosseiramente que o escoamento torcional pode ser obtido admitindo que a

resistência de escoamento de torção esteja entre 60% e 90% da resistência a tração. Assim a teoria de energia de distorção pode ser empregada para obter a resistência de escoamento torcional, então:

$$\sigma_c = 0,56\sigma_t \quad \text{Eq. (22)}$$

**Fonte: Norton (2013)**

E também para a escolha eficaz do material é necessário conhecer a sua durabilidade em tempo de serviço, e essa análise pode ser feita através da vida em fadiga do material. Assim, é preciso saber a tensão mínima e máxima atuantes no componente, e para isso utilizam-se as equações seguintes:

Tensão máxima:

$$\tau_{MÁX} = \frac{16.P.R}{\pi.d^3} \left[ \frac{4C-1}{4C-4} + \frac{0,615}{C} \right] \quad \text{Eq. (23)}$$

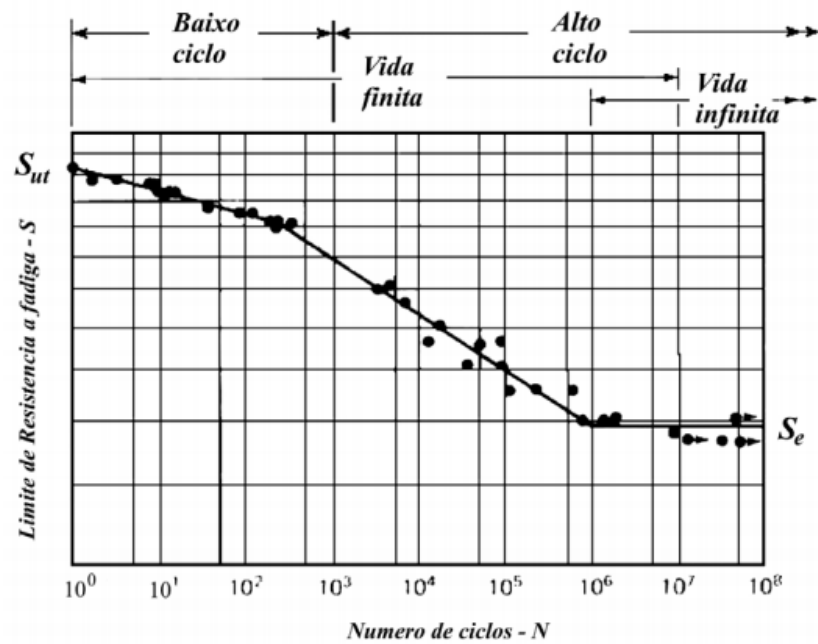
**Fonte: Prawoto et al. (2008)**

Tensão mínima:

$$\tau_{MÍN} = \frac{16.P.R}{\pi.d^3} \left[ \frac{4C+1}{4C+4} - \frac{0,615}{C} \right] \quad \text{Eq. (24)}$$

**Fonte: Prawoto et al. (2008)**

Para se conhecer da durabilidade do material que sofre essas tensões, é realizado o ensaio de fadiga, que mostra a durabilidade através de ciclos que o componente suporta até a sua falha. Os resultados destes ensaios são usualmente apresentados na forma gráfica, de valores da tensão alternante aplicada contra o número de ciclos da vida. Como a vida pode ser tão curta como 10 ciclos ou tão longa como  $10^9$  ciclos, a escala usada é normalmente logarítmica (ROSA, 2002). Um exemplo dessa forma gráfica é apresentado na Figura 24, no qual se obtém a curva S-N o nível de tensão suportado por um determinado material para um número específico de ciclos.



**Figura 24 - Curva S-N típica do ensaio de fadiga**  
**Fonte: Rosa (2002, p. 258).**

A tensão limite de fadiga para carga axial, ou seja, tração e compressão podem ser estimadas como 85% da tensão limite de fadiga correspondente, ou seja, à flexão rotativa causada pela carga axial (ROSA, 2002).

## 4. RESULTADOS

O presente capítulo trata da descrição dos dados e discussão dos resultados, coletados a partir da pesquisa documental e valores obtidos através do emprego das equações apresentadas.

Levando em consideração que a carga aplicada na suspensão é distribuída entre as duas rodas, então o valor a ser considerado na força aplicada:

$$Carga = \frac{840 \text{ Kg}}{2} = 420 \text{ Kg}$$

Utilizando as equações já apresentadas na metodologia para a obtenção dos resultados das forças atuantes no componente e propriedades requeridas pelo material, pode-se então chegar à conclusão da escolha de um material que melhor apresenta os requisitos exigidos no projeto. Na Tabela 6 é observada a obtenção dos valores das propriedades calculadas.

**Tabela 6 - Propriedade calculadas e valores obtidos**

<b>Propriedades</b>	<b>Valores</b>
Força aplicada	4120,2 N
Índice de curvatura	10
Fator de Wahl	1,1448
Tensão dinâmica	120,1 Mpa
Tensão torcional	672,560 Mpa
Tensão máxima	120,1Mpa
Tensão mínima	91,3 Mpa
Passo	0,03375m
Comprimento sólido	0,11 m
Comprimento livre	0,3 m

Para evitar flambagem:  $L_0 < 2,63 \sqrt{\frac{D}{\alpha}}$ , logo,  $0,3 < 0,526$

Para o cálculo da constante elástica  $k$ , que é uma importante propriedade na qual está relacionada com Módulo de Cisalhamento e Módulo Elástico do material, utilizou-se dois métodos. O primeiro encontrando o valor da deflexão da mola baseada na quantidade de passos da mola, e o segundo achando o valor da deflexão através do ângulo de curvatura das espiras da mola.

#### 4.1 Método I do cálculo da deflexão

Considerou-se o valor do passo da mola através da relação do comprimento livre *Eq. (18)*, e multiplicou-se o valor encontrado pela quantidade de passos existentes na mola, e o valor resultante foi considerado como o possível deslocamento (deflexão) que a mola sofrerá com a aplicação de carga, então:

$$\delta = p. (\text{qtidade de } p) \quad \text{Eq. (25)}$$

Sendo,

$$p = 0,0337m$$

Quantidade de  $p = 7$

Logo,

$$\delta = 0,23625 m$$

E assim, empregando a *Eq. (12)*:

$$k = 17440 N/m$$

Dessa forma, foi feita a relação da constante elástica com o módulo de cisalhamento, *Eq. (13)*, e em seguida a relação do módulo de cisalhamento com o módulo elástico *Eq. (14)*, então:

$$G = 111,6 GPa$$

$$v = 0,25, E = 279 GPa$$



## 4.2 Método II do cálculo da deflexão

Considerou-se o valor do passo da mola através do ângulo de enrolamento do fio, sendo o valor máximo do ângulo é  $12^\circ$  (ALMEIDA e ERTHAL) e fazendo uma associação simples de hipotenusa, então:

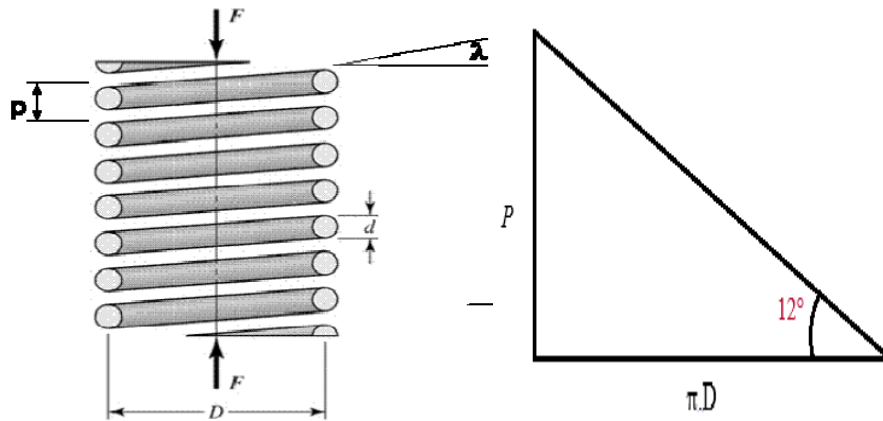


Figura 25: ângulo de enrolamento do fio com o valor máximo do ângulo é  $12^\circ$   
Fonte: Almeida e Erthal ( )

Assim,

$$Tg\lambda = \frac{p}{\pi \cdot D} \quad Eq. (26)$$

Sendo,

$$\lambda = 12^\circ$$

$$D = 0,1m$$

$$p = 0,0668m$$

$$\delta = 0,4676m$$

$$k = 8811,38N/m$$

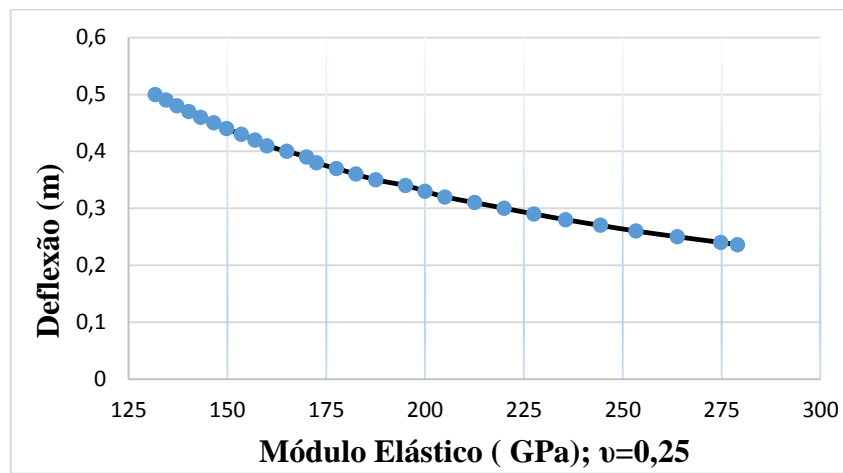
$$G = 56,3928GPa$$

$$\nu = 0,25, E = 140,98GPa$$

Promovendo a otimização dos dois métodos utilizados para o cálculo do módulo elástico, foi traçada uma curva com a variação da deflexão pelo módulo elástico e verificaram-se os melhores materiais que se enquadraram neste intervalo.

A variação da deflexão proposto foi de 0,2362 m até 0,4676 m, pois foram os dois valores obtidos pelos dois métodos citados.

Assim, com essa variação foi possível observar os módulos elásticos sugeridos nesta escala para a escolha do material adequado. Na curva obtida conforme a Figura 26, é considerado o valor do Coeficiente de Poisson como 0,25, sendo esse valor utilizado de maneira geral para materiais isotrópicos.



**Figura 26 - Curva de Deflexão pelo Módulo elástico, levando em consideração o valor do coeficiente Poisson de 0,25, para materiais isotrópicos**

Analisando a Figura 26, observou-se que os materiais adequados para aplicação neste projeto, encontra-se entre 140 até 280 GPa dos valores do módulo elástico.

Deste modo, para a escolha de um material no qual tenha uma durabilidade superior ou igual ao do material atualmente aplicado em molas de suspensão, foi necessário conhecer a vida em fadiga do aço mola, e para isso foram analisados resultados de trabalhos realizados ensaiando o aço SAE 9254. Para molas de processo de fabricação a quente, aplicou-se uma carga máxima de 3720 N e carga mínima de 3500 N. Já para molas de processo de fabricação a frio, a carga máxima aplicada foi de 3057 N e carga mínima de 2907 N (HATTORI, 2012). Sendo assim, os valores encontrados seguem nas Tabelas 7 e 8:

**Tabela 7 - Resultados do ensaio de fadiga de molas processadas a quente**

<b>Processo de fabricação das molas a quente</b>	<i>Números de ciclos</i>	<i>Ruptura</i>
<i>Com Jateamento</i>	450.000	Não
<i>Sem Jateamento</i>	147.570	Sim

Fonte: Hattori (2012, p. 82)

**Tabela 8 - Resultados do ensaio de fadiga de molas processadas a frio**

<b>Processo de fabricação das molas a frio</b>	<i>Números de ciclos</i>	<i>Ruptura</i>
<i>Com Jateamento</i>	1.000.000	Não
<i>Sem Jateamento</i>	195.000	Sim

Fonte: Hattori (2012, p. 82)

Portanto, a partir dos resultados obtidos realizou-se o processo de análise das considerações necessárias exigidas no projeto, alguns aspectos foram abordados através das tabelas contidas nos apêndices B, C, D, E, F e G. De modo geral, os resultados se referem à descrição dos fatos verificados no corpus estudado, e nos valores obtidos através das equações. Dessa maneira, o material que se apresentou mais adequado para essa aplicabilidade foi o Compósito de matriz Epóxi e Fibra de carbono longitudinal.

O Compósito de resina epóxi reforçado com fibra de carbono, possui alta rigidez específica permitindo obter a mesma rigidez do aço com peso de 5 a 15 vezes menor. A tensão específica também é elevada sendo de 3 a 10 vezes a do aço. Dessa maneira, as peças de compósitos podem ser mais leves que as comumente feitas de metal e oferecer a mesma resistência. A resiliência, característica de resistência à fadiga, também é maior, pode atingir 90% da tensão estática em compósitos unidirecionais de carbono/epóxi, contra cerca de 50% da tensão estática apresentada pelo aço. A possibilidade de direcionamento de fibras e de moldagem plástica oferece maior flexibilidade de projeto do objeto. Estruturas complexas, difíceis de fabricar com metais podem ser moldadas diretamente no plástico reforçado aumentando a confiabilidade e reduzindo o tempo de fabricação. Possibilitando muitas vezes a redução nos custos finais (PINHEIRO, 2014).

As resinas epóxis tem alta capacidade de adesão/interface com as fibras além de alto módulo de elasticidade. Transmitem os esforços para as fibras de forma eficiente,

proporcionando melhor aproveitamento da resistência mecânica das fibras. A Fibra de Carbono apresenta a maior rigidez específica de todas as fibras comerciais, alta resistência à tração e compressão e alta resistência à corrosão, fluência e fadiga (PINHEIRO, 2014).

Contudo, a principal desvantagem da Fibra de Carbono é seu custo elevado de aquisição. Esta característica tem maior relevância, sobretudo para produtos industrializados, feitos em série, cujos custos de fabricação são reduzidos pelo ganho de escala e prevalece o custo de material (PINHEIRO, 2014).

A Tabela 9 mostra um comparativo realizado com as propriedades de maior interesse apresentadas pelo aço mola (SAE 9254) e o compósito de Fibra de carbono.

**Tabela 9 - Comparação entre as propriedades apresentadas pelo Aço Mola (9254) e o Material escolhido**

	<b>Limite de escoamento a tração (Mpa)</b>	<b>Módulo Elástico (GPa)</b>	<b>Densidade (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Custo relativo (\$US/Kg)</b>	<b>Energia no processo de fabricação</b>
<i>Aço Mola (SAE 9254)</i>	1720-2240	210	7,85	4	31-34,3
<i>Compósito (Matriz epóxi e fibras de carbono longitudinal)</i>	-	200	1,7	49-66	259-286

Através deste resultado, no qual propôs o material, foi possível calcular a frequência natural apresentada pelo material Compósito utilizando a Eq. (21), e assim deduzir se a vibração resultante harmoniza-se com a vibração oferecida pelo componente requerido.

Sendo,

$$E=200 \text{ GPa e } \nu=0,25$$

Utilizando a Eq. (14),

$$G= 80 \text{ MPa}$$

Logo,

$$f_n=2,4 \text{ Hz}$$

A Frequência Natural depende basicamente da distribuição de massa e rigidez do material, e a literatura sugere para o modelo de ¼ do veículo modos de vibração para a massa

suspensa com frequências naturais de 1 a 1,5 Hz para veículos de passeio (GILLESPIE, 1992), garantindo um maior conforto para os ocupantes do veículo. Pode-se concluir que se deve proceder ao design dos componentes de suspensões atendendo ao fato de que estes devem possuir frequências naturais baixas, conseguindo um melhor isolamento de vibrações e conforto para o condutor. Assim, comparando o valor obtido com o valor literário recomendado, houve um erro relativo em relação ao valor teórico e experimental, porém devido ao valor resultante ser baixo pode-se considerar o material como ideal nesta aplicação.

Entretanto, as vantagens dos componentes fabricados por materiais compósitos em relação ao aço, os quais são apontados para justificar o crescimento da participação dos polímeros nos automóveis, são: a redução de peso, sua grande resistência à corrosão e a sua facilidade no processo de reciclagem. Contudo, o custo relativo do material compósito e o seu consumo de energia no processo de fabricação são maiores, não se adequando com o objetivo proposto no trabalho, que propõe a redução do custo e a facilidade de fabricação.

## 5. CONCLUSÃO

Atualmente, a indústria automobilística é influenciada de certa maneira, a adotar processos que envolvam novos materiais para os seus produtos, garantindo as exigências do consumidor, e sempre inovando no mercado. Novos materiais são essenciais no desenvolvimento de um automóvel mais eficiente que possa melhorar a redução de peso, e aumentar sua resistência mecânica e à corrosão.

Entretanto, o material compósito no qual melhor se adequou aos requisitos exigidos do projeto, o compósito de resina epóxi reforçado com fibra de carbono, não é novidade para o mercado consumidor e o seu custo benefício para produção em larga escala ainda não é apropriada para carros de passeios populares, sendo melhor aplicado em carros de alto desempenho.

Concluiu-se que a eficácia da aplicação de materiais compósitos na fabricação de molas helicoidais para suspensão automotiva ainda é baixa quando comparada com os aços molas, pois tem um maior custo em sua produção e não é relativamente fácil de ser fabricada, apesar do fornecimento de grandes vantagens como: baixo peso e melhores propriedades mecânicas.

## 6. REFERÊNCIAS

ALMEIDA, Júlio Cezar de; ERTHAL, Jorge Luiz. **Elementos de Máquinas I**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná.

ASHBY, Michael F. **Seleção de materiais no projeto mecânico**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012.

BUDAN, D.; MANJUNATHA, T. S. **Carbon Fiber Reinforced Composite Coil Springs**. Proc. of Int. Conf. on Advances in Industrial and Production Engineering 2011. Davangere: AMAE. 2011. p. 21.

BUDYNAS, Richard G.; NISBETT, J. Keith. **Elementos de máquinas de Shigley**. 8 ed. Porto Alegre: Bookman Ltda, 2011.

CALLISTER, Willian D.; RETHWISCH, David G. **Ciência e Engenharia de Materiais: uma Introdução**. 8 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

CHIAVERINI, Vicente. **Aços e ferros fundidos**. 7 ed. São Paulo: ABM, 1996.

CHIU, Chang-Hsuan; HWANB, Chung-Li; TSAIA, Han-Shuin et al. An experimental investigation into the mechanical behaviors of helical composite springs. **Science Direct**, Taichung, 19 set. 2005. 1-10.

CHOI, S Sangwoo. **Optimization of microstructure and properties of high strength spring steel**, Master of Science in Materials Science and Engineering Korea Advanced Institute of Science and Technology, Korea born at Gwangju, Korea, 2011.

COMPORTAMENTO mecânico dos materiais. [S.l.]: [s.n.], Cap. 3, p. 47-86.

**DESIGN HANDBOOK- ENGINEERING GUIDE TO SPRING DESIGN**. Front Cover. Associated Spring, Barnes Group, 1987. .

FERENCZ, Andreas; KIEBLING, Ralph. **Henkel Brasil**. Disponível em: < [www.henkel.com.br](http://www.henkel.com.br)> Acesso em: 05 set.2015.

FREITAS JÚNIOR, Luís Mauro Pereira. **Estudo da dinâmica vertical de uma suspensão veicular do tipo Macpherson**. 2006. 139 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. São Carlos, 2006.

GILLESPIE, Thomas D. *Fundamentals of Vehicle Dynamics*. Society of Automotive Engineers. p. 237-47, 1992.

GILINI JÚNIOR, Devaldo. **Sport cars**. Disponível em: <blogs.odiario.com> Acesso em: 05 set.2015.

HATTORI, Carolina Sayuri. **Comparação de molas de suspensão temperadas e revenidas enroladas a quente e a frio**. 2012. 98 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais). Universidade Presbiteriana Mackenzie. São Paulo. 2012.

LIMA, L. **Capítulo 3 - Resistência dos Materiais**. Pontifícia Universidade Católica. Rio de Janeiro, p. 9.

MARGHITU, Dan B. Mechanical Springs. In: \_\_\_\_\_ **Kinematic chains and machine components design**. Alabama: Elsevier, 2005. p. 723-54.

MAHDI, E.; HAMOUDA, A. M. S. An experimental investigation into mechanical behavior of hybrid and nonhybrid composite semi-elliptical springs. **Science Direct**, Doha, 30 maio 2013. 1-10.

MOLAS HOESCH. **Molas**. 2012. Disponível em: <www.hoesch.com.br> Acesso em: 03 nov.2015.

MOLAS DE QUALIDADE. **Molas de compressão, tração, torção**. Disponível em: <www.mdqmolas.com.br> Acesso em: 09 set.2014.

NAVEIRO, Ricardo Manfredi; GOUVINHAS, Reidson Pereira. Projeto do produto, competitividade e inovação. In: ROMEIRO FILHO, Eduardo (Coord.). **Projeto de produto**. São Paulo: Elsevier, 2011. p. 43-65.



NORTON, Robert L. **Projeto de máquinas**: uma abordagem integrada. 4 ed. São Paulo: Bookman, 2013.

PINHEIRO, Filipe Martins. **Fibra de carbono em equipamentos de laboratório para aplicações em engenharia naval e oceânica**. Rio de Janeiro: UFRJ, 2014.

PRAWOTO, Yunan; IKEDA, M.; MANVILLE, S. K. *et al.* Design and failure modes of automotive suspension springs. **ScienceDirect**, Yokohama, 21 Fevereiro 2008.

PROVENZA, Francesco. **Desenhista de máquinas**. São Paulo: Editora Provenza, 1960.

ROSA, Edison da. **Análise de resistência mecânica**. Florianópolis: UFSC, 2002. (Apostila).

SANTOS JÚNIOR, Auteliano Antunes dos. **Elementos de máquinas**: molas helicoidais e planas. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 2001. (Apostila).

SHIGLEY, Joseph E.; MISHKE, Charles R.; BUDYNAS, Richard G. **Projeto de Engenharia Mecânica**. 7 ed. Porto Alegre: Bookman, 2005.

## 7. ANEXOS

## ANEXO A

Tabela A. 1: Composição química dos aços, dando relevância para os aços SAE 9254 e SAE 5160, utilizados na fabricação de molas de suspensão automotiva.

Família	AÇO	% C	% Mn	% P	% S	% Si	% Al	% Cr	% Ni	% Mo
Carbono	SAE 1020	0,180-0,230	0,300-0,600	Máx.0,040	Máx.0,050	0,15-0,35	-		-	0,15-0,25
	SAE 1040	0,38-0,44	0,300-0,600	Máx.0,040	Máx.0,050	0,15-0,35	-		-	-
	SAE 1045	0,43-0,50	0,300-0,600	Máx.0,040	Máx.0,050	0,15-0,35	-		-	-
Ligado	SAE 4140	0,38-0,43	0,75-1,00	Máx.0,035	Máx.0,040	0,15-0,35	-	0,80-1,10	Máx.0,25	-
	SAE 5115	0,13-0,18	0,70-0,90	Máx.0,035	Máx.0,040	0,15-0,30	-	0,70-0,90	-	-
	SAE 5120	0,17-0,22	0,70-0,90	Máx.0,035	Máx.0,040	0,15-0,30	-	0,70-0,90	-	-
	SAE 5135	0,33-0,38	0,60-0,80	Máx.0,035	Máx.0,040	0,15-0,30	-	0,80-1,05	-	-
	SAE 5140	0,38-0,43	0,70-0,90	Máx.0,035	Máx.0,040	0,15-0,30	-	0,70-0,90	-	-
	SAE 5160	0,56-0,64	0,75-1,00	Máx.0,035	Máx.0,040	0,15-0,35	-	0,70-0,90	-	-
	SAE 8620	0,18-0,23	0,70-0,90	Máx.0,035	0,020-0,040	0,15-0,35	0,015-0,040	0,40-0,60	0,40-0,70	-
	SAE 9254	0,51-0,59	0,60-0,80	Máx.0,035	Máx.0,040	1,20-1,60	-	0,60-0,80	-	-
	34MnCr5	0,32-0,36	1,20-1,40	Máx.0,035	Máx.0,040	0,20-0,35	-	0,35-0,45	-	0,05-0,10
	31CrV3	0,34-0,38	0,40-0,60	Máx.0,035	Máx.0,040	0,25-0,40	-	0,40-0,70	-	-
	20MnCr5	0,17-0,22	1,10-1,40	Máx.0,035	Máx.0,035	1,15-0,40	-	1,00-1,30	-	-
	41Cr4	0,38-0,45	0,60-0,90	Máx.0,035	Máx.0,030	< 0,40	-	0,90-1,20	-	-

Tabela A. 2: Composição, propriedades mecânicas, cargas de trabalho e aplicações dos aços, dando relevância para os aços temperado em óleo, utilizados na fabricação de molas de suspensão automotiva.

	Condição do aço		
	Temperado em óleo e revenido em banho de chumbo	enruado	Patenteado e enruado (corda de plano)
carbono	0,60-0,70	0,45-0,75	0,75-1,00
manganês	0,60-1,20	0,90-1,20	0,25-0,50
fósforo	0,04 max.	0,045 max.	0,03 max.
enxofre	0,04 max.	0,045 max.	0,035 max.
silício	0,10-0,20	0,10-0,20	0,10-0,25
limite de resistência à tração	108-210 kgf/mm <sup>2</sup> (1060-2060 MPa)	105-210 kgf/mm <sup>2</sup> (1030-2060 MPa)	175-280 kgf/mm <sup>2</sup> (1720-2750 MPa)
limite de elasticidade em tensão	84-175 kgf/mm <sup>2</sup> (820-1720 MPa)	70-140 kgf/mm <sup>2</sup> (690-1370 MPa)	105-210 kgf/mm <sup>2</sup> (1030-2060 MPa)
limite de torção	80-140 kgf/mm <sup>2</sup> (780-1370 MPa)	84-154 kgf/mm <sup>2</sup> (820-1520 MPa)	105-210 kgf/mm <sup>2</sup> (1030-2060 MPa)
limite de elasticidade em torção	70-84 kgf/mm <sup>2</sup> (690-820 MPa)	77-98 kgf/mm <sup>2</sup> (760-960 MPa)	91-140 kgf/mm <sup>2</sup> (890-1370 MPa)
alongamento	5-2%	3-2%	cerca de 8%
módulo de elasticidade em tensão	20.300 kgf/mm <sup>2</sup> (199 GPa)	20.300 kgf/mm <sup>2</sup> (199 GPa)	21.000 kgf/mm <sup>2</sup> (210 GPa)
idem em torção	8.050 kgf/mm <sup>2</sup> (80 GPa)	8.050 kgf/mm <sup>2</sup> (80 GPa)	8.050 kgf/mm <sup>2</sup> (80 GPa)
dureza Rockwell C	40-50	40-48	42-46
cargas de trabalho recomendadas:			
serviço leve	56 kgf/mm <sup>2</sup> (510 MPa)	42 kgf/mm <sup>2</sup> (410 MPa)	70 kgf/mm <sup>2</sup> (690 MPa)
serviço médio	45,5 kgf/mm <sup>2</sup> (445 MPa)	35 kgf/mm <sup>2</sup> (340 MPa)	59,5 kgf/mm <sup>2</sup> (585 MPa)
serviço pesado	38,5 kgf/mm <sup>2</sup> (375 MPa)	28 kgf/mm <sup>2</sup> (270 MPa)	52,5 kgf/mm <sup>2</sup> (515 MPa)
aplicações usuais	Empregos gerais onde a carga não é muito elevada e quando a mola não é sujeita a choques contínuos. Um dos tipos de molas mais importantes dentro desta classe é o de molas para válvulas	Tipo de menor preço; empregos em molas sujeitas a cargas constantes ou quando a repetição de esforços não é muito frequente.	Um dos aços de melhor qualidade que se conhece; para pequenas molas helicoidais e de torção que devem obedecer a rigorosos requisitos físicos, sujeitas a cargas elevadas ou a cargas repentinamente aplicadas. Sobretudo em molas até 1/8" de dia.

Fonte: Vicente Chiaverini

**Tabela A. 3: Características e aplicações de aços ligados, dando relevância para os aços SAE 9254 e SAE 5160, utilizados na fabricação de molas de suspensão automotiva.**

ACOUSA	EQUIVALENTES	CARACTERÍSTICAS	APLICAÇÕES
<b>ACOS LIGADOS PARA BENEFICIAMENTO</b>			
5135	COPANT 5135; UNS G51350; DIN 37C4 (1.7034); AFNOR 38 C 4; JIS SCr 3 H	Baixa temperabilidade, temperado em água, no caso de peças de tamanho moderado, ou em óleo, para peças de pequeno tamanho.	Parafusos de vários tipos para a indústria mecânica, sem-fins de direção, carretéis de câmbio de automóveis, eixos intermediários, pontas de eixo.
5140	COPANT 5140; SAE 5140; UNS 51400; DIN 41C4 (1.7035); AFNOR 42 C 4; JIS SCr 4 H	Média Temperabilidade.	Parafusos de alta resistência, de tampa e de cabeça chanfrada, braços de direção, grampos para feixe de mola e barra estabilizadora.
5160	COPANT 5160; SAE 5160; AISI 5160; UNS G51600	Média Temperabilidade, usados na fabricação de componentes com pequena área de seção transversal submetidos a condições severas de serviço.	Parafusos, molas helicoidais, barras de torção, barras estabilizadoras. Perfis especiais: buchas de correntes, molas parabólicas e facas para colheitadeiras agrícolas.
6150	COPANT 6150; SAE 6150; AISI 6150; UNS G61500; DIN 50GV4 (1.8159); AFNOR 50 CV 4; JIS SUP 10	Aço com adição de vanádio e média temperabilidade.	Molas semi-elípticas e helicoidais, molas para válvulas (para temperaturas máximas de 350°C) e barras de torção. Perfis especiais: molas parabólicas.
8640	COPANT 8640; SAE 8640; AISI 8640; UNS G86400; DIN 40NiCrMo2-2 (1.6546)	Média temperabilidade, apresenta as melhores características mecânicas dentro da categoria.	Peças de tamanho médio a grande para as quais um alto grau de resistência e tenacidade é exigido, como braços e pontas de eixo.
8640H	COPANT 8640; SAE 8640; AISI 8640; UNS G86400; DIN 42CrMo4 (1.7225); DIN 40NiCrMo2-2 (1.6546)	Aço com temperabilidade controlada de alta resistência mecânica, boa usinabilidade, alta tenacidade, boa temperabilidade e baixa soldabilidade. Dureza superficial deste aço temperado pode variar entre 52 e 57 HRC	Amplamente utilizado na fabricação de eixos, bielas e virabrequins, na indústria agrícola, automobilística, de máquinas e equipamentos, etc.
9254	COPANT 9254; SAE 9254; UNS G92540; DIN 56S17 (1.5026); AFNOR 55 S 7	Média Temperabilidade, utilizado em molas que necessitem resistência ao choque e em temperaturas moderadamente elevadas.	Molas helicoidais, barras de torção, arco e molas de válvula para motores de combustão interna.

Fonte: www.acovisa.com.br

**Tabela A. 4: Composição e propriedades mecânicas dos aços, dando relevância para o aço ASTM 401 utilizado na fabricação de molas de suspensão automotiva.**

Material	Gráu e especificação	Composição nominal %	Propriedades de tração				Propriedades de torção módulo de rigidez G		Dureza HRC (b)	Temperatura permissível °C
			Resistência à tração min. (a)		Módulo de Elasticidade E		GPa	kgf/mm <sup>2</sup>		
			MPa	kgf/mm <sup>2</sup>	GPa	kgf/mm <sup>2</sup>				
Fio trellado a frio Aço alto carbono	fio de música ASTM A 228	C – 0,70/1,00 Mn – 0,20/0,60	1590– 2750	161– 279	210	21.000	80	8.050	41–60	120
	trellado duro ASTM A 227	C – 0,45/0,85 Mn – 0,30/1,30	classe I 1010–   102,9– 1950   198,1		210	21.000	80	8.050	31-52	120
	trellado duro de alta resistência ASTM A679	C – 0,65/1,00 Mn – 0,20–1,30	1640– 2410	166,6– 245	210	21.000	80	8.050	41–60	120
	temperado e revenido ASTM A 229	C – 0,55/0,85 Mn – 0,30/1,20	classe I 1140–   115,5– 2020   205,8		210	21.000	80	8.050	42–55	120
	carbono VSQ (c) ASTM A 230	C – 0,60/0,75 Mn – 0,60/0,90	1480– 1650	150,5– 168	210	21.000	80	8.050	45–49	120
Aço-liga	Cr-V ASTM A 231, A 232	C – 0,48/0,53 Cr – 0,80/1,10 V – 0,15 min	1310– 2070	133– 210	210	21.000	80	8.050	41–55	220
	Cr-Si ASTM 401	C – 0,51/0,59 Cr – 0,60/0,80 Si – 1,20/1,60	1620– 2070	164,5– 210	210	21.000	80	8.050	48–55	245

(a) a resistência à tração máxima é cerca de 200 MPa (21 kgf/mm<sup>2</sup>) acima do valor mínimo; (b) a correlação entre dureza e propriedades de tração do fio é aproximada e não deve ser usada para aceitação ou rejeição; (c) qualidade "valve spring quality" (qualidade mola de válvula).

Fonte: Vicente Chiaverini

Tabela A. 5: Composição e propriedades mecânicas dos aços, dando relevância para o aço AISI 9254 utilizado na fabricação de molas de suspensão automotiva.

Material	Grau e especificação	Composição nominal, %	Propriedades de tração				Dureza HRC	Temperatura permissível °C
			Resistência à tração, min.		Módulo de elasticidade E			
			MPa	kgf/mm <sup>2</sup>	GPa	kgf/mm <sup>2</sup>		
Tira laminada e frio aço-carbono	C médio (1050) A682	C - 0,47/0,55 Mn - 0,60/0,90	Revenida 1100/1930 112/196		210	21.000	Recozida 85 max. Revenida 38-5	120
	C "regular" (1074) A682	C - 0,69/0,80 Mn - 0,50/0,80	Revenida 1100/2210 112/224		210	21.000	Recozida 85 max. Recozida 38-50	120
	Alto C (1095) A682	C - 0,90/1,04 Mn - 0,30/0,50	Revenida 1240/2340 126/238		210	21.000	Recozida 88 max. Revenida 40-52	120
aço-liga	Cr-V (AMS 6455)	C - 0,48/0,53 Cr - 0,80/1,10 V - 0,15 min.	1380/1720	140/175	210	21.000	42-48	220
	Cr-Si (AISI 9254)	C - 0,51/0,59 Cr - 0,60/0,80 Si - 1,20/1,60	1720/2240	175/227	210	21.000	47-51	245

Fonte: Vicente Chiaverini

Tabela A. 6: : Composição e propriedades mecânicas dos aços, dando relevância para os aços ASTM A 689 e ASTM 401, utilizados na fabricação de molas de suspensão automotiva.

MATERIAIS PARA MOLAS MATERIALS FOR SPRINGS											
Material	Grau e especificação Grade & Specification		Composição nominal Chemical Composition	Resistência à tração Tensile Strength Minimum		Módulo de Elasticidade Modulus of Elasticity		Módulo de rigidez torsional (G) Modulus In Torsion		Dureza Rockwell Hardness	Temperatura máxima Maximum Temperature
	ASTM	equivalencia equivalence	%	psi x 10 <sup>3</sup> MPa	kgf/mm <sup>2</sup>	psi x 10 <sup>6</sup> MPa x 10 <sup>3</sup>	kgf/mm <sup>2</sup>	psi x 10 <sup>6</sup> MPa x 10 <sup>3</sup>	kgf/mm <sup>2</sup>	[1]	°C
Aço-liga Alloy Steel	ASTM A231, A232	A929 G150 SAE 3132, 3157 JIS G3565, G3566 DIN 1.7223(2) AISI 6150	C- 0,48/0,53 Cr- 0,80/1,10 V- 0,15 min.	190 - 300 1311 - 2070	133-210	30 207	21000	11,5 79,3	8.050	C41-55	220
	ASTM 401	A929 G254 AISI 9254 BS 250A61	C- 0,51/0,59 Cr- 0,60/0,80 Si- 1,20/1,60	235 - 300 1621 - 2070	165 - 210	30 207	21000	11,5 79,3	8.050	C48-55	245
	ASTM A 689	A929 G150 SAE 3160 BSS27A60 JIS SUP3A	C-0,55-0,65 Mn-0,75-1,00 Si-0,15-0,30 Cr-0,6-1,00	115 -259 800 - 1793	80,5 - 181	30 207	21000	11,5 79,3	8.050	C20-63	220

Fonte: www.tecem.com.br

**ANEXO B: Considerações da densidade dos materiais**  
**Tabela B. 1: Densidade dos Materiais**

Material	Densidade		Material	Densidade	
	g/cm <sup>3</sup>	lb <sub>m</sub> /pol. <sup>3</sup>		g/cm <sup>3</sup>	lb <sub>m</sub> /pol. <sup>3</sup>
<b>METAIS E LIGAS METÁLICAS</b>					
<b>Aços Comuns ao Carbono e Aços de Baixa Liga</b>					
Liga de aço A36	7,85	0,283	• Classe G3000	7,30	0,264
Liga de aço 1020	7,85	0,283	• Classe G4000	7,30	0,264
Liga de aço 1040	7,85	0,283	Ferros nodulares		
Liga de aço 4140	7,85	0,283	• Classe 60-40-18	7,10	0,256
Liga de aço 4340	7,85	0,283	• Classe 80-55-06	7,10	0,256
			• Classe 120-90-02	7,10	0,256
<b>Aços Inoxidáveis</b>					
Liga inoxidável 304	8,00	0,289	<b>Ligas de Alumínio</b>		
Liga inoxidável 316	8,00	0,289	Liga 1100	2,71	0,0978
			Liga 2024	2,77	0,100
Liga inoxidável 405	7,80	0,282	Liga 6061	2,70	0,0975
Liga inoxidável 440A	7,80	0,282	Liga 7075	2,80	0,101
Liga inoxidável 17-7PH	7,65	0,276	Liga 356.0	2,69	0,0971
<b>Ferros Fundidos</b>					
Ferros cinzentos			<b>Ligas de Cobre</b>		
• Classe G1800	7,30	0,264	C11000 (cobre eletrolítico tenaz)	8,89	0,321
			C17200 (berílio-cobre)	8,25	0,298
			C26000 (latão para cartuchos)	8,53	0,308
			C36000 (latão de fácil usinagem)	8,50	0,307
			C71500 (cobre-níquel, 30%)	8,94	0,323
			C93200 (bronze para mancais)	8,93	0,322
<b>MATERIAIS SEMICONDUCTORES</b>					
Arseneto de gálio	5,32	0,192	<b>MATERIAIS FIBROSOS</b>		
Carbeto de silício			Aramida (Kevlar 49)	1,44	0,0520
• Prensado a quente	3,3	0,119	Carbono (precursor PAN)		
• Sinterizado	3,2	0,116	• Módulo alto	1,81	0,0653
Concreto	2,4	0,087	• Módulo intermediário	1,78	0,0643
Diamante			• Módulo padrão	1,78	0,0643
• Natural	3,51	0,127	Vidro E	2,58	0,0931
• Sintético	3,20-3,52	0,116-0,127	<b>MATERIAIS COMPÓSITOS</b>		
Grafita			Fibras aramidás-matriz epóxi		
• Extrudada	1,71	0,0616	(V <sub>f</sub> = 0,60)	1,4	0,050
• Molhada isostaticamente	1,78	0,0643	Fibras de carbono de módulo		
Nitreto de silício			alto-matriz epóxi (V <sub>f</sub> = 0,60)	1,7	0,061
• Colado por reação	2,7	0,0975	Fibras de vidro E-matriz epóxi		
• Prensado a quente	3,3	0,119	(V <sub>f</sub> = 0,60)	2,1	0,075
• Sinterizado	3,3	0,119	Madeira		
			• Carvalho vermelho		
			(12% umidade)	0,61-0,67	0,022-0,024
			• Pinheiro de Douglas		
			(12% umidade)	0,46-0,50	0,017-0,018

ANEXO C: Considerações de propriedades mecânicas do materiais  
Tabela C. 1: Propriedades mecânicas dos Materiais.

Material	Módulo de Elasticidade		Material	Módulo de Elasticidade	
	GPa	10 <sup>6</sup> psi		GPa	10 <sup>6</sup> psi
<b>METAIS E LIGAS METÁLICAS</b>			<b>Metais Refratários</b>		
<b>Aços Comuns ao Carbono e Aços de Baixa Liga</b>			Molibdênio (comercialmente puro) 320 46,4 Tântalo (comercialmente puro) 185 27 Tungstênio (comercialmente puro) 400 58		
Liga de aço A36	207	30	<b>Ligas Não Ferrosas Diversas</b>		
Liga de aço 1020	207	30	Níquel 200	204	29,6
Liga de aço 1040	207	30	Inconel 625	207	30
Liga de aço 4140	207	30	Monel 400	180	26
Liga de aço 4340	207	30	Liga de Haynes 25	236	34,2
<b>Aços Inoxidáveis</b>			Invar	141	20,5
Liga inoxidável 304	193	28	Super invar	144	21
Liga inoxidável 316	193	28	Kovar	207	30
Liga inoxidável 405	200	29	Chumbo comercialmente puro	13,5	2
Liga inoxidável 440A	200	29	Estanho (comercialmente puro)	44,3	6,4
Liga inoxidável 17-7PH	204	29,5	Solda chumbo-estanho (60Sn-40Pb)	30	4,4
<b>Ferros Fundidos</b>			Zinco (comercialmente puro)	104,5	15,2
Ferros cinzentos			Zircônio, classe reator 702	99,3	14,4
• Classe G1800	66-97 <sup>a</sup>	9,6-14 <sup>a</sup>	<b>GRAFITA, CERÂMICAS E</b>		
• Classe G3000	90-113 <sup>a</sup>	13,0-16,4 <sup>a</sup>	<b>MATERIAIS SEMICONDUTORES</b>		
• Classe G4000	110-138 <sup>a</sup>	16-20 <sup>a</sup>	Arseneto de gálio, monocristal		
Ferros nodulares			• Na direção <100>	85	12,3
• Classe 60-40-18	169	24,5	• Na direção <110>	122	17,7
• Classe 80-55-06	168	24,4	• Na direção <111>	142	20,6
• Classe 120-90-02	164	23,8	Carbeto de silício		
<b>Ligas de Alumínio</b>			• Prensado a quente	207-483	30-70
Liga 1100	69	10	• Sinterizado	207-483	30-70
Liga 2024	72,4	10,5	Concreto	25,4-36,6 <sup>a</sup>	3,7-5,3 <sup>a</sup>
Liga 6061	69	10	Diamante		
Liga 7075	71	10,3	• Natural	700-1200	102-174
Liga 356.0	72,4	10,5	• Sintético	800-925	116-134
<b>Ligas de Cobre</b>			Grafita		
C11000 (cobre eletrolítico tenaz)	115	16,7	• Extrudada	11	1,6
C17200 (berílio-cobre)	128	18,6	• Moldada isostaticamente	11,7	1,7
C26000 (latão para cartuchos)	110	16	Nitroto de silício		
C36000 (latão de fácil usinagem)	97	14	• Colado por reação	304	44,1
C71500 (cobre-níquel, 30%)	150	21,8	• Prensado a quente	304	44,1
C93200 (bronze para mancais)	100	14,5	• Sinterizado	304	44,1
<b>Ligas de Magnésio</b>			Óxido de alumínio		
Liga AZ31B	45	6,5	• 99,9% puro	380	55
Liga AZ91D	45	6,5	• 96%	303	44
<b>Ligas de Titânio</b>			• 90%	275	40
Comercialmente pura (ASTM classe 1)	103	14,9	Silica, fundida	73	10,6
Liga Ti-5Al-2,5Sn	110	16	Silício, monocristal		
Liga Ti-6Al-4V	114	16,5	• Na direção <100>	129	18,7
<b>Metais Preciosos</b>			• Na direção <110>	168	24,4
Ouro (comercialmente puro)	77	11,2	• Na direção <111>	187	27,1
Platina (comercialmente pura)	171	24,8	Vidro, borossilicato (Pyrex)	70	10,1
Prata (comercialmente pura)	74	10,7	Vidro, cal de soda	69	10
			Vidro cerâmico (Pyroceram)	120	17,4
			Zircônia, 3 mol% Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	205	30
			<b>POLÍMEROS</b>		
			Cloroto de polivinila (PVC)	2,41-4,14	0,35-0,60
			Elastômeros		
			• Butadieno-acrilonitrila (nitrila)	0,0034 <sup>b</sup>	0,00049 <sup>b</sup>
			• Estireno-butadieno (SBR)	0,002-0,010 <sup>b</sup>	0,0003-0,0015 <sup>b</sup>

Material	Módulo de Elasticidade		Material	Módulo de Elasticidade	
	GPa	10 <sup>6</sup> psi		GPa	10 <sup>6</sup> psi
Epóxi	2,41	0,35			
Fenólico	2,76-4,83	0,40-0,70			
Náilon 6.6	1,59-3,79	0,230-0,550			
Poli(butileno tereftalato) (PBT)	1,93-3,00	0,280-0,435			
Polícarbonato (PC)	2,38	0,345			
Políéster (termofixo)	2,06-4,41	0,30-0,64			
Poliestireno (PS)	2,28-3,28	0,330-0,475			
Políéster-éter-cetona (PEEK)	1,10	0,16			
Poli(etileno)					
• Alta densidade (HDPE)	1,08	0,157			
• Baixa densidade (LDPE)	0,172-0,282	0,025-0,041			
• Peso molecular ultra-alto (UHMWPE)	0,69	0,100			
Poli(etileno tereftalato) (PET)	2,76-4,14	0,40-0,60			
Polimetil metacrilato (PMMA)	2,24-3,24	0,325-0,470			
Polipropileno (PP)	1,14-1,55	0,165-0,225			
Politetrafluoretileno (PTFE)	0,40-0,55	0,058-0,080			
<b>MATERIAIS FIBROSOS</b>					
Aramida (Kevlar 49)	131	19			
Carbono (precursor PAN)					
• Módulo alto	400	58			
• Módulo intermediário	285	41,3			
• Módulo padrão	230	33,4			
Vidro E	72,5	10,5			
<b>MATERIAIS COMPÓSITOS</b>					
Fibras aramidas-matriz epóxi					
Longitudinal	76	11			
Transversal	5,5	0,8			
( $V_f = 0,60$ )					
Fibras de carbono de módulo alto-matriz epóxi ( $V_f = 0,60$ )					
Longitudinal	220	32			
Transversal	6,9	1,0			
Fibras de vidro E-matriz epóxi					
Longitudinal	45	6,5			
Transversal	12	1,8			
( $V_f = 0,60$ )					
Madeira					
• Carvalho vermelho (12% umidade)					
Paralelo ao grão	11,0-14,1 <sup>e</sup>	1,60-2,04 <sup>e</sup>			
Perpendicular ao grão	0,55-0,71 <sup>e</sup>	0,08-0,10 <sup>e</sup>			
• Pinheiro de Douglas (12% umidade)					
Paralelo ao grão	10,8-13,6 <sup>e</sup>	1,57-1,97 <sup>e</sup>			
Perpendicular ao grão	0,54-0,68 <sup>e</sup>	0,078-0,10 <sup>e</sup>			

Material/Condição	Límite de Escoamento (MPa [ksi])	Límite de Resistência à Tração (MPa [ksi])	Alongamento Percentual
<b>METAIS E LIGAS METÁLICAS</b>			
<b>Aços Comuns ao Carbono e Aços de Baixa Liga</b>			
Liga de aço A36			
• Laminada a quente	220-250 (32-36)	400-500 (58-72,5)	23
Liga de aço 1020			
• Laminada a quente	210 (30) (mín)	380 (55) (mín)	25 (mín)
• Estirada a frio	350 (51) (mín)	420 (61) (mín)	15 (mín)
• Recozida (a 870°C)	295 (42,8)	395 (57,3)	36,5
• Normalizada (a 925°C)	345 (50,3)	440 (64)	38,5
Liga de aço 1040			
• Laminada a quente	290 (42) (mín)	520 (76) (mín)	18 (mín)
• Estirada a frio	490 (71) (mín)	590 (85) (mín)	12 (mín)
• Recozida (a 785°C)	355 (51,3)	520 (75,3)	30,2
• Normalizada (a 900°C)	375 (54,3)	590 (85)	28,0
Liga de aço 4140			
• Recozida (a 815°C)	417 (60,5)	655 (95)	25,7
• Normalizada (a 870°C)	655 (95)	1020 (148)	17,7
• Temperada em óleo e revenida (a 315°C)	1570 (228)	1720 (250)	11,5
Liga de aço 4340			
• Recozida (a 810°C)	472 (68,5)	745 (108)	22
• Normalizada (a 870°C)	862 (125)	1280 (185,5)	12,2
• Temperada em óleo e revenida (a 315°C)	1620 (235)	1760 (255)	12
<b>Aços Inoxidáveis</b>			
Liga inoxidável 304			
• Acabada a quente e recozida	205 (30) (mín)	515 (75) (mín)	40 (mín)
• Trabalhada a frio (1/4 dureza)	515 (75) (mín)	860 (125) (mín)	10 (mín)
Liga inoxidável 316			
• Acabada a quente e recozida	205 (30) (mín)	515 (75) (mín)	40 (mín)
• Estirada a frio e recozida	310 (45) (mín)	620 (90) (mín)	30 (mín)
Liga inoxidável 405			
• Recozida	170 (25)	415 (60)	20
Liga inoxidável 440A			
• Recozida	415 (60)	725 (105)	20
• Revenida a 315°C	1650 (240)	1790 (260)	5
Liga inoxidável 17-7PH			
• Laminada a frio	1210 (175) (mín)	1380 (200) (mín)	1 (mín)
• Endurecida por precipitação a 510°C	1310 (190) (mín)	1450 (210) (mín)	3,5 (mín)
<b>Ferros Fundidos</b>			
Ferros cinzentos			
• Classe G1800 (como fundido)	—	124 (18) (mín)	—
• Classe G3000 (como fundido)	—	207 (30) (mín)	—
• Classe G4000 (como fundido)	—	276 (40) (mín)	—
Ferros nodulares			
• Classe 60-40-18 (recozido)	276 (40) (mín)	414 (60) (mín)	18 (mín)
• Classe 80-55-06 (como fundido)	379 (55) (mín)	552 (80) (mín)	6 (mín)
• Classe 120-90-02			
Liga 6061			
• Recozida (revenida O)	55 (8)	124 (18)	30
• Tratada termicamente e envelhecida (revenida T6 e T651)	276 (40)	310 (45)	17

<i>Material/Condição</i>	<i>Limite de Escoamento (MPa [ksf])</i>	<i>Limite de Resistência à Tração (MPa [ksf])</i>	<i>Alongamento Percentual</i>
<b>Metais Refratários</b>			
Molibdênio (comercialmente puro)	500 (72,5)	630 (91)	25
Tântalo (comercialmente puro)	165 (24)	205 (30)	40
Tungstênio (comercialmente puro)	760 (110)	960 (139)	2
<b>Ligas Não Ferrosas Diversas</b>			
Níquel 200 (recozido)	148 (21,5)	462 (67)	47
Inconel 625 (recozido)	517 (75)	930 (135)	42,5
Monel 400 (recozido)	240 (35)	550 (80)	40
Liga de Haynes 25	445 (65)	970 (141)	62
Invar (recozido)	276 (40)	517 (75)	30
Super invar (recozido)	276 (40)	483 (70)	30
Kovar (recozido)	276 (40)	517 (75)	30
Chumbo comercialmente puro	6-8 (0,9-1,2)	16-19 (2,3-2,7)	30-60
Chumbo antimonial (6%) (fundido em coquilha)	—	47,2 (6,8)	24
Estanho (comercialmente puro)	11 (1,6)	—	57
Solda chumbo-estanho (60Sn-40Pb)	—	52,5 (7,6)	30-60
Zinco (comercialmente puro)	—	—	—
• Laminado a quente (anisotrópico)	—	134-159 (19,4-23,0)	50-65
• Laminado a frio (anisotrópico)	—	145-186 (21-27)	40-50
Zircônio, classe reator 702	—	—	—
• Trabalhado a frio e recozido	207 (30) (mín)	379 (55) (mín)	16 (mín)
<b>GRAFITA, CERÂMICAS E MATERIAIS SEMICONDUTORES*</b>			
Arseneto de gálio	—	—	—
• Orientação {100}, superfície polida	—	66 (9,6) <sup>†</sup>	—
• Orientação {100}, superfície conforme cortada	—	57 (8,3) <sup>†</sup>	—
Carbeto de silício	—	—	—
• Prensado a quente	—	230-825 (33-120)	—
• Sinterizado	—	96-520 (14-75)	—
Concreto <sup>†</sup>	—	37,3-41,3 (5,4-6,0)	—
Diamante	—	—	—
• Natural	—	1050 (152)	—
• Sintético	—	800-1400 (116-203)	—
Grafita	—	—	—
• Extrudada (com a direção do grão)	—	13,8-34,5 (2,0-5,0)	—
• Moldada isostaticamente	—	31-69 (4,5-10)	—
Nitreto de silício	—	—	—
• Colado por reação	—	250-345 (36-50)	—
• Prensado a quente	—	700-1000 (100-150)	—
• Sinterizado	—	414-650 (60-94)	—
Óxido de alumínio	—	—	—
• 99,9% puro	—	282-551 (41-80)	—
• 96%	—	358 (52)	—
• 90%	—	337 (49)	—
Silica, fundida	—	104 (15)	—
Silício	—	—	—
• Orientação {100}, riscada a laser	—	81,8 (11,9)	—
• Orientação {100}, superfície conforme cortada	—	130 (18,9)	—
Vidro, borossilicato (Pyrex)	—	69 (10)	—
Vidro, cal de soda	—	69 (10)	—
Vidro cerâmico (Pyroceram)	—	123-370 (18-54)	—
Zircônia, 3 mol% Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (sinterizada)	—	800-1500 (116-218)	—



<i>Material/Condição</i>	<i>Limite de Escoamento (MPa [ksi])</i>	<i>Limite de Resistência à Tração (MPa [ksi])</i>	<i>Alongamento Percentual</i>
<b>POLÍMEROS</b>			
Cloreto de polivinila (PVC)	40,7-44,8 (5,9-6,5)	40,7-51,7 (5,9-7,5)	40-80
Elastômeros			
• Butadieno-acrilonitrila (nitrila)	—	6,9-24,1 (1,0-3,5)	400-600
• Estireno-butadieno (SBR)	—	12,4-20,7 (1,8-3,0)	450-500
• Silicone	—	10,3 (1,5)	100-800
Epóxi	—	27,6-90,0 (4,0-13)	3-6
Fenólico	—	34,5-62,1 (5,0-9,0)	1,5-2,0
Náilon 6,6			
• 50% de umidade relativa	44,8-58,6 (6,5-8,5)	75,9 (11)	150-300
• Seco, como moldado	55,1-82,8 (8-12)	94,5 (13,7)	15-80
Polibutileno tereftalato (PBT)	56,6-60,0 (8,2-8,7)	56,6-60,0 (8,2-8,7)	50-300
Polycarbonato (PC)	62,1 (9)	62,8-72,4 (9,1-10,5)	110-150
Policéster (termofixo)	—	41,4-89,7 (6,0-13,0)	<2,6
Poliestireno (PS)	—	35,9-51,7 (5,2-7,5)	1,2-2,5
Poliéter-éter-cetona (PEEK)	91 (13,2)	70,3-103 (10,2-15,00)	30-150
Poliétileno			
• Alta densidade (HDPE)	26,2-33,1 (3,8-4,8)	22,1-31,0 (3,2-4,5)	10-1200
• Baixa densidade (LDPE)	9,0-14,5 (1,3-2,1)	8,3-31,4 (1,2-4,55)	100-650
• Peso molecular ultra-alto (UHMWPE)	21,4-27,6 (3,1-4,0)	38,6-48,3 (5,6-7,0)	350-525
Poliétileno tereftalato (PET)	59,3 (8,6)	48,3-72,4 (7,0-10,5)	30-300
Polimetil metacrilato (PMMA)	53,8-73,1 (7,8-10,6)	48,3-72,4 (7,0-10,5)	2,0-5,5
Polipropileno (PP)	31,0-37,2 (4,5-5,4)	31,0-41,4 (4,5-6,0)	100-600
Politetrafluoroetileno (PTFE)	—	20,7-34,5 (3,0-5,0)	200-400
<b>MATERIAIS FIBROSOS</b>			
Aramida (Kevlar 49)	—	3600-4100 (525-600)	2,8
Carbono (precursor PAN)			
• Módulo padrão (longitudinal)	—	3800-4200 (550-610)	2
• Módulo intermediário (longitudinal)	—	4650-6350 (675-920)	1,8
• Módulo alto (longitudinal)	—	2500-4500 (360-650)	0,6
Vidro E	—	3450 (500)	4,3
<b>MATERIAIS COMPÓSITOS</b>			
Fibras aramidas-matriz epóxi (alinhadas, $V_f = 0,60$ )			
• Direção longitudinal	—	1380 (200)	1,8
• Direção transversal	—	30 (4,3)	0,5
Fibras de carbono de módulo alto-matriz epóxi (alinhadas, $V_f = 0,60$ )			
• Direção longitudinal	—	760 (110)	0,3
• Direção transversal	—	28 (4)	0,4
Fibras de vidro E-matriz epóxi (alinhadas, $V_f = 0,60$ )			
• Direção longitudinal	—	1020 (150)	2,3
• Direção transversal	—	40 (5,8)	0,4
Madeira			
• Carvalho vermelho (12% umidade)			
Paralelo ao grão	—	112 (16,3)	—
Perpendicular ao grão	—	7,2 (1,05)	—
• Pinheiro de Douglas (12% umidade)			
Paralelo ao grão	—	108 (15,6)	—
Perpendicular ao grão	—	2,4 (0,35)	—

## ANEXO D: Considerações do custo relativo

**Tabela D. 1: Preço relativo dos Materiais.**

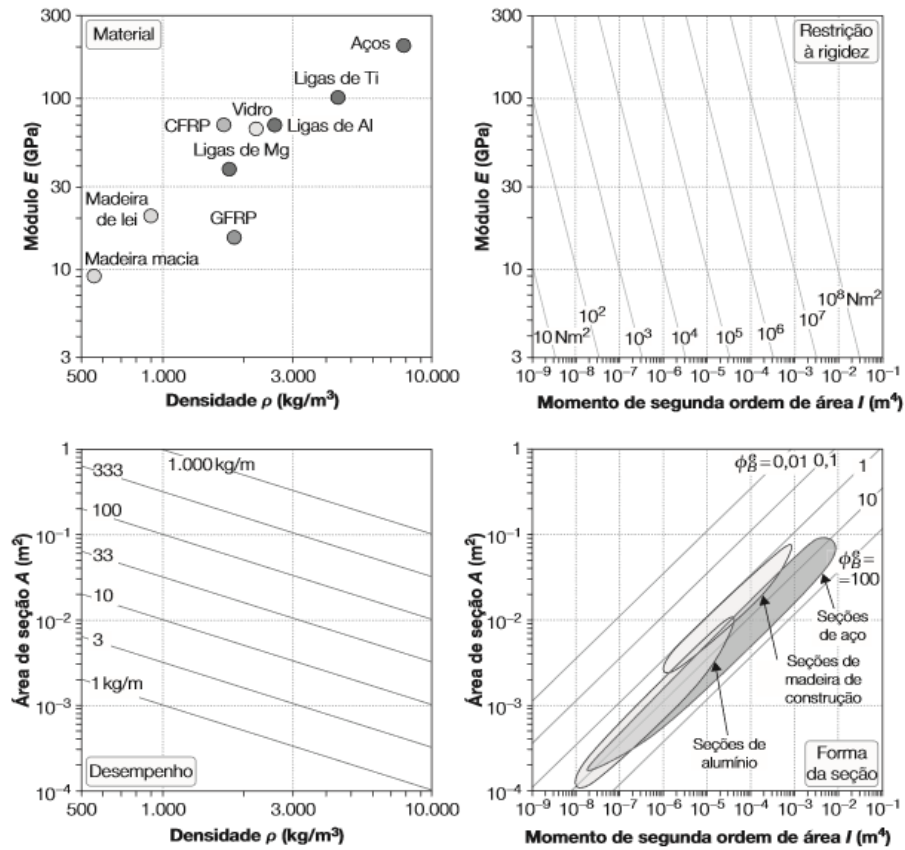
<i>Material/Condition</i>	<i>Cost (\$US/kg)</i>	<i>Relative Cost</i>
<b>PLAIN CARBON AND LOW-ALLOY STEELS</b>		
Steel alloy A36		
• Plate, hot rolled	0.90-1.50	1.00
• Angle bar, hot rolled	1.00-1.65	1.0
Steel alloy 1020		
• Plate, hot rolled	0.90-1.65	1.0
• Plate, cold rolled	0.85-1.40	0.9
Steel alloy 1040		
• Plate, hot rolled	0.90-0.95	0.7
• Plate, cold rolled	2.20	1.7
<i>Material/Condition</i>	<i>Cost (\$US/kg)</i>	<i>Relative Cost</i>
<b>PLAIN CARBON AND LOW-ALLOY STEELS</b>		
Steel alloy 4140		
• Bar, normalized	1.50-2.60	1.6
• H grade (round), normalized	5.00	3.9
Steel alloy 4340		
• Bar, annealed	2.55	2.0
• Bar, normalized	3.60	2.8
<b>STAINLESS STEELS</b>		
Stainless alloy 304	6.20-9.20	6.0
Stainless alloy 316	6.20-11.70	7.3
Stainless alloy 17-7PH	9.20	7.1
<b>CAST IRONS</b>		
Gray irons (all grades)	1.75-2.40	1.7
Ductile irons (all grades)	2.00-3.20	2.0
<b>ALUMINUM ALLOYS</b>		
Aluminum (unalloyed)	2.65-2.75	2.1
Alloy 1100		
• Sheet, annealed	5.30-5.50	4.2
Alloy 2024		
• Sheet, T3 temper	12.50-19.50	12.9
• Bar, T351 temper	11.00-21.00	13.4
Alloy 5052		
• Sheet, H32 temper	4.85-5.10	3.9
Alloy 6061		
• Sheet, T6 temper	6.60-8.50	5.7
• Bar, T651 temper	5.10-7.50	5.0
Alloy 7075		
• Sheet, T6 temper	11.30-14.70	10.0
Alloy 356.0		
• As cast, high production	2.70-3.35	2.4
• As cast, custom pieces	17.50	13.6
• T6 temper, custom pieces	18.90	14.7
<b>COPPER ALLOYS</b>		
Copper (unalloyed)	5.60-7.00	4.8
Alloy C11000 (electrolytic tough pitch), sheet	7.60-11.60	7.4
Alloy C17200 (beryllium-copper), sheet	9.00-36.00	17.5
Alloy C26000 (cartridge brass), sheet	7.10-12.80	7.5
Alloy C36000 (free-cutting brass), sheet, rod	7.20-10.90	7.0
Alloy C71500 (copper-nickel, 30%), sheet	27.00	21.0
Alloy C93200 (bearing bronze)		
• Bar	9.70	7.5
• As cast, custom piece	23.00	17.9
<b>MAGNESIUM ALLOYS</b>		
Magnesium (unalloyed)	3.00-3.30	2.4
Alloy AZ31B		
• Sheet (rolled)	17.60-46.00	23.4
• Extruded	9.90-14.30	9.4
Alloy AZ91D (as cast)	3.40	2.6

<i>Material/Condition</i>	<i>Cost (\$US/kg)</i>	<i>Relative Cost</i>
<b>TITANIUM ALLOYS</b>		
Commercially pure		
• ASTM grade 1, annealed	100.00–120.00	85.6
• ASTM grade 2, annealed	90.00–160.00	95.9
Alloy Ti–5Al–2.5Sn	110.00–120.00	89.3
Alloy Ti–6Al–4V	66.00–154.00	94.2
<b>PRECIOUS METALS</b>		
Gold, bullion	18,600–20,900	15,300
Platinum, bullion	32,100–40,000	28,400
Silver, bullion	350–450	313
<b>REFRACTORY METALS</b>		
Molybdenum, commercial purity	180–300	161
Tantalum, commercial purity	400–420	318
Tungsten, commercial purity	225	175
<b>MISCELLANEOUS NONFERROUS ALLOYS</b>		
Nickel, commercial purity	25.00–34.50	23.7
Nickel 200	35.00–74.00	46.8
Inconel 625	59.00–88.00	55.5
Monel 400	15.00–33.00	16.8
Haynes alloy 25	143.00–165.00	120
Invar	44.00–54.00	37.2
Super invar	44.00	34.2
Kovar	50.00–66.00	44.3
Chemical lead		
• Ingot	1.50–2.00	1.4
• Plate	2.15–4.40	2.5
Antimonial lead (6%)		
• Ingot	2.30–3.90	2.4
• Plate	3.10–6.10	3.4
Tin, commercial purity	9.75–10.75	8.0
Solder (60Sn–40Pb), bar	8.10–16.50	9.4
Zinc, commercial purity, ingot or anode	2.00–4.65	2.8
Zirconium, reactor grade 702, plate	46.00–88.00	52.2
<b>GRAPHITE, CERAMICS, AND SEMICONDUCTING MATERIALS</b>		
Aluminum oxide		
• Calcined powder, 99.8% pure, particle size between 0.4 and 5 $\mu\text{m}$	1.85–2.80	1.8
• Ball grinding media, 99% pure, $\frac{1}{8}$ in. dia.	39.00–52.00	35.1
• Ball grinding media, 96% pure, $\frac{1}{8}$ in. dia.	33.00	25.6
• Ball grinding media, 90% pure, $\frac{1}{8}$ in. dia.	16.00	12.4
Concrete, mixed	0.05	0.04
Diamond		
• Synthetic, 30–40 mesh, industrial grade	7700	6000
• Natural, powder, 45 $\mu\text{m}$ , polishing abrasive	2300	1800
• Natural, industrial, $\frac{1}{8}$ carat	50,000–85,000	52,400
Gallium arsenide		
• Mechanical grade, 75-mm-dia. wafers, $\sim 625$ $\mu\text{m}$ thick	3900	3000
• Prime grade, 75-mm-dia. Wafers, $\sim 625$ $\mu\text{m}$ thick	6500	5000
<b>PLASTICS</b>		
<i>Material/Condition</i>	<i>Cost (\$US/kg)</i>	<i>Relative Cost</i>
Poly(ethylene terephthalate) (PET)		
• Raw form	1.50–1.75	1.3
• Sheet	3.30–5.40	3.4
Poly(methyl methacrylate) (PMMA)		
• Raw form	2.60–5.40	3.1
• Extruded sheet ( $\frac{1}{8}$ in. thick)	4.65–6.05	4.1
Polypropylene (PP), raw form	1.05–1.70	1.2
Polystyrene (PS), raw form	1.55–1.95	1.4
Polytetrafluoroethylene (PTFE)		
• Raw form	14.80–16.90	11.9
• Rod	21.00	16.3
Poly(vinyl chloride) (PVC), raw form	1.10–1.85	1.2
<b>FIBER MATERIALS</b>		
Aramid (Kevlar 49), continuous	35.00–100.00	38.8
Carbon (PAN precursor), continuous		
• Standard modulus	40.00–80.00	48.1
• Intermediate modulus	60.00–130.00	69.1
• High modulus	220.00–275.00	193
E-glass, continuous	1.55–2.65	1.6
<b>COMPOSITE MATERIALS</b>		
Aramid (Kevlar 49) continuous-fiber, epoxy prepreg	75.00–100.00	66.8
Carbon continuous-fiber, epoxy prepreg		
• Standard modulus	49.00–66.00	43.1
• Intermediate modulus	75.00–240.00	123
• High modulus	120.00–725.00	330
E-glass continuous-fiber, epoxy prepreg	24.00–50.00	28.3
Woods		
• Douglas fir	0.61–0.97	0.6
• Ponderosa pine	1.15–1.50	1.0
• Red oak	3.35–3.75	2.8

<i>Material/Condition</i>	<i>Cost (\$US/kg)</i>	<i>Relative Cost</i>
Glass, borosilicate (Pyrex), plate	9.20–11.30	7.9
Glass, soda-lime, plate	0.56–1.35	0.7
Glass-ceramic (Pyroceram), plate	12.65–16.55	11.3
Graphite		
• Powder, synthetic, 99+ % pure, particle size, ~10 $\mu\text{m}$	1.80–7.00	3.1
• Isostatically pressed parts, high purity, ~20- $\mu\text{m}$ particle size	50.00–125.00	65.3
Silica, fused, plate	1200–1700	1100
Silicon		
• Test grade, undoped, 100-mm-dia. wafers, ~425 $\mu\text{m}$ thick	5100–9000	5500
• Prime grade, undoped, 100-mm-dia. wafers, ~425 $\mu\text{m}$ thick	8000–14,000	8800
Silicon carbide		
• $\alpha$ -phase ball grinding media, $\frac{1}{8}$ in. dia., sintered	250.00	194
Silicon nitride		
• Powder, submicron particle size	100–200	100
• Balls, finished ground, 0.25 in. to 0.50 in. diameter, hot isostatically pressed	1000–4000	1600
Zirconia (5 mol% $\text{Y}_2\text{O}_3$ ), 15-mm-dia. ball grinding media	50–200	97.1
<b>POLYMERS</b>		
Butadiene-acrylonitrile (nitrile) rubber		
• Raw and unprocessed	4.00	3.1
• Extruded sheet ( $\frac{1}{8}$ – $\frac{1}{4}$ in. thick)	8.25	6.4
• Calendered sheet ( $\frac{1}{8}$ – $\frac{1}{4}$ in. thick)	5.25–7.40	4.9
Styrene-butadiene (SBR) rubber		
• Raw and unprocessed	1.70	1.3
• Extruded sheet ( $\frac{1}{8}$ – $\frac{1}{4}$ in. thick)	5.05	3.9
• Calendered sheet ( $\frac{1}{8}$ – $\frac{1}{4}$ in. thick)	3.25–3.75	2.7
Silicone rubber		
• Raw and unprocessed	9.90–14.00	9.5
• Extruded sheet ( $\frac{1}{8}$ – $\frac{1}{4}$ in. thick)	28.00–29.50	22.4
• Calendered sheet ( $\frac{1}{8}$ – $\frac{1}{4}$ in. thick)	7.75–12.00	7.7
Epoxy resin, raw form	2.20–2.80	1.9
Nylon 6,6		
• Raw form	3.20–4.00	2.8
• Extruded	12.80	9.9
Phenolic resin, raw form	1.65–1.90	1.4
Poly(butylene terephthalate) (PBT)		
• Raw form	4.00–7.00	4.3
• Sheet	40.00–100.00	54.3
Polycarbonate (PC)		
• Raw form	3.00–4.70	2.9
• Sheet	10.50	8.2
Polyester (thermoset), raw form	3.10–4.30	2.7
Polyetheretherketone (PEEK), raw form	90.00–105.00	76.0
Polyethylene		
• Low density (LDPE), raw form	1.60–1.85	1.3
• High density (HDPE), raw form	1.20–1.75	1.2
• Ultrahigh molecular weight (UHMWPE), raw form	2.20–3.00	2.1

## ANEXO E: Considerações da forma do componente

Tabela E. 1: Forma do componente.



## ANEXO F: Considerações do processo de fabricação

Tabela F. 1: Processo de fabricação dos Materiais.

Approximate production energies and CO<sub>2</sub> burden

	Energy (MJ/kg)	CO <sub>2</sub> (kg/kg)
<b>Metals</b>		
<b>Ferrous</b>		
Cast irons	16.4–18.2	1.0–1.1
High carbon steels	24.3–26.9	2.1–2.1
Medium carbon steels	23.4–25.8	2.0–2.2
Low carbon steels	22.4–24.8	1.9–2.1
Low alloy steels	31.0–34.3	1.9–2.2
Stainless steels	77.2–85.3	4.8–5.4
<b>Non-ferrous</b>		
Aluminum alloys	184–203	11.6–12.8
Copper alloys	63.0–69.7	3.9–4.4
Lead alloys	46.6–51.5	2.6–3.8
Magnesium alloys	356–394	22.4–24.8
Nickel alloys	127–140	7.9–8.8
Titanium alloys	885–945	41.7–59.5
Tungsten alloys	313–346	19.7–21.8
Zinc alloys	46.8–51.7	2.5–2.8
<b>Ceramics</b>		
<b>Glasses</b>		
Borosilicate glass	23.8–26.3	1.3–1.4
Glass ceramic	36.2–40.0	1.9–2.2
Silica glass	29.9–33.0	1.6–1.8
Soda-lime glass	13.0–14.4	0.7–0.8
<b>Porous</b>		
Brick	1.9–2.1	0.14–0.16
Concrete, typical	1.1–1.2	0.16–0.18
Stone	0.18–0.2	0.01–0.02
<b>Technical</b>		
Alumina	49.5–54.7	2.7–3.0
Aluminum nitride	209–231	11.3–12.5
Boron carbide	153–169	8.3–9.1
Silicon	56.9–62.9	3.1–3.4
Silicon carbide	70.2–77.6	3.8–4.2
Silicon nitride	70.2–77.6	3.79–4.18
Tungsten carbide	82.4–91.1	4.4–4.9
<b>Composites</b>		
<b>Metal</b>		
Aluminum/silicon carbide	250–300	14–16
<b>Polymer</b>		
CFRP	259–286	21–23
GFRP	107–118	7.5–8.3

	Energy (MJ/kg)	CO <sub>2</sub> (kg/kg)
Natural		
Bamboo	14.4–15.9	– 1.2– – 1.0
Cork	28.5–31.5	0.19–0.21
Leather	102–113	2.6–2.8
Wood, typical (longitudinal)	14.4–15.9	– 1.2– – 1.0
Wood, typical (transverse)	14.4–15.9	– 1.2– – 1.0
Polymers		
Elastomer		
Butyl rubber	76.5–84.6	2.1–2.4
Eva	86.7–95.8	2.9–3.2
Isoprene (IR)	76.5–84.6	2.2–2.4
Natural rubber (NR)	38.0–42.0	– 0.5– – 0.4
Neoprene (CR)	95.9–106	3.5–3.9
Polyurethane Elastomers (elPU)	109–120	4.5–4.9
Silicone elastomers	152–168	8.2–9.0
Thermoplastic		
ABS	91–102	3.27–3.62
Cellulose polymers (CA)	108–119	4.4–4.87
Ionomer (I)	102–112	3.96–4.38
Nylons (PA)	102–113	4.0–4.41
Polycarbonate (PC)	105–116	3.8–4.2
PEEK	223–246	12.7–14
Polyethylene (PE)	76.9–85	1.95–2.16
PET	79.6–88	2.21–2.45
Acrylic (PMMA)	93.8–104	3.4–3.76
Acetal (POM)	99.5–110	3.8–4.2
Polypropylene (PP)	75.4–83.3	2.07–2.09
Polystyrene (PS)	96–106	2.85–3.13
Polyurethane thermoplastics (tpPU)	113–125	4.77–5.28
PVC	63.5–70.2	1.85–2.04
Teflon (PTFE)	145–160	7.07–7.81
Thermoset		
Epoxies	90–100	3.2–3.6
Phenolics	86–95	2.8–3.2
Polyester	84–90	2.7–3.0
Polymer foams		
Flexible polymer foam (VLD)	113–125	4.78–5.28
Flexible polymer foam (LD)	113–125	4.78–5.28
Flexible polymer foam (MD)	113–125	4.78–5.28
Rigid polymer foam (LD)	138–153	6.59–7.28
Rigid polymer foam (MD)	155–171	7.78–8.8
Rigid polymer foam (HD)	150–165	7.42–8.19

## ANEXO G: Considerações de reciclagem

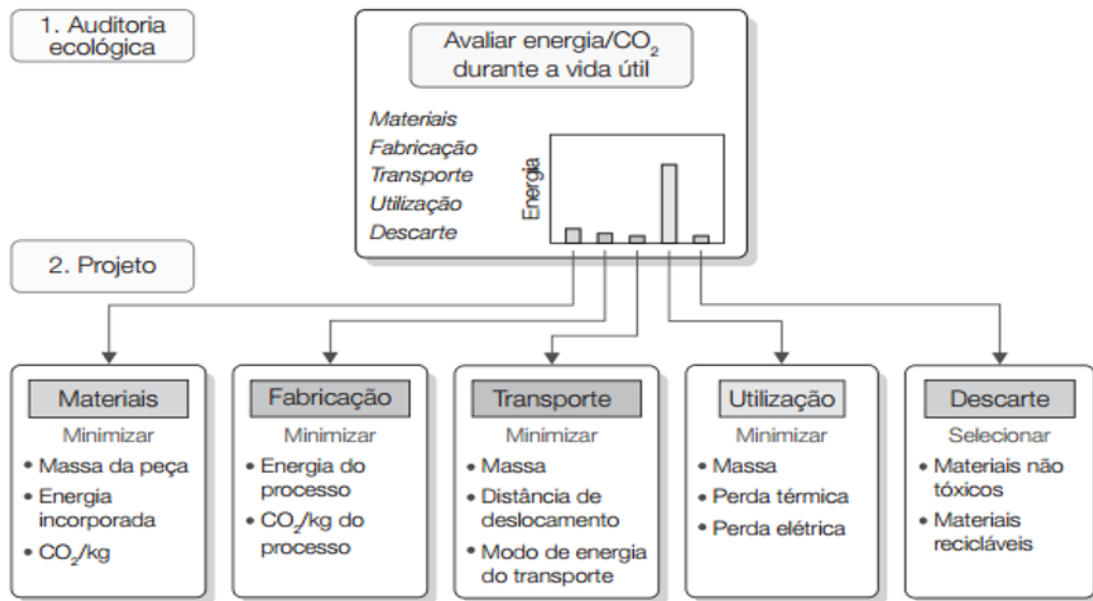


Figura A. 1: Reciclagem dos Materiais.