

# ESTUDO DO DIMENSIONAMENTO DO COXIM DO MOTOR DE UM CAMINHÃO

André da Silva Araújo<sup>1</sup>  
Evandro Virgolino Gonçalves<sup>2</sup>  
Geraldo Soares de Azevedo Júnior<sup>3</sup>  
Jordana Rezende Leme<sup>4</sup>

## RESUMO

O presente estudo tem o objetivo de apresentar a revisão bibliográfica e a metodologia para a modelagem física e matemática do sistema vibratório de um trem de força de um caminhão com motor 4 cilindros e tração 4x2. Apresenta desta forma, pontos importantes para o dimensionamento do sistema de coxins para o sistema vibratório modelado. O artigo busca estabelecer parâmetros e procedimentos para otimização do processo de escolha das propriedades mecânicas dos coxins em projetos futuros.

**Palavras-chaves:** Coxim. Vibração. Motor. Caminhão.

## ABSTRACT

The present essay proposes to present the bibliography review and the methodology used for modeling physical and mathematical vibratory system represented by the powertrain of a truck with 4 cylinder engine and 4x2 system drive. The article also presents important points in order to design ideal engine mountings for the system which had been analyzed. The essay seeks to establish parameters and procedures in order to optimize the choice process of mechanical properties of engine mounting in future projects.

**Keywords:** Engine Mounting. Vibration. Engine. Truck.

---

<sup>1</sup> Aluno da Associação Educacional Dom Bosco - FER  
e-mail: andre-silvaaraujo@hotmail.com

<sup>2</sup> Aluno da Associação Educacional Dom Bosco - FER  
e-mail: ev.goncalves@hotmail.com

<sup>3</sup> Professor Orientador da Associação Educacional Dom Bosco - FER  
e-mail: geraldo.azevedo@volkswagen.com.br

<sup>4</sup> Aluna da Associação Educacional Dom Bosco - FER  
e-mail: jordana.rezende@yahoo.com.br

## **1 INTRODUÇÃO**

O transporte de carga é um serviço essencial na cadeia de produção e distribuição de bens, tanto industriais quanto agrícolas. Segundo artigo publicado pelo BNDES (Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social) (2008, p.36) “o Ministério dos Transportes estima que 58% desse transporte seja realizado através de rodovias, o que faz do transporte rodoviário no país um fator determinante da eficiência e da produtividade sistêmica da economia”, e dos caminhões ferramenta fundamental para o andamento do fluxo de mercadorias pelo país.

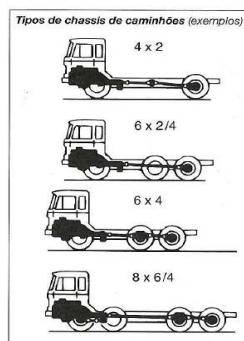
Na compra de um veículo, principalmente em se tratando de veículos de alto valor agregado, como os caminhões, o conforto é uma variável fundamental. E conforto é um fator ligado diretamente à vibração veicular. Em um veículo uma das principais fontes de vibração e ruído é o motor. “O motor é uma fonte primária de vibração, produzindo magnitudes de acelerações principalmente na alta frequência, no entanto, a massa do motor, além de estrutural, funciona como absorvedor dessas magnitudes” (PINHO, 2012 p.52). De acordo com Oliveira (2011) a transmissibilidade da vibração do motor se dá através dos coxins, logo esses elementos são de grande importância no isolamento vibracional. O coxim pode ser considerado um sistema mola e amortecedor (OLIVEIRA, 2011). É dimensionado para suportar o peso dos componentes do trem de força do veículo, fazer a fixação do polo mecânico ao chassi, e, principalmente, prover amortecimento às vibrações do motor.

## **2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

### **2.1 VEÍCULO ESTUDADO: CAMINHÃO**

Os caminhões são veículos com chassi independente ou carroçaria parcialmente integrada. O motor está posicionado na parte frontal do veículo, sendo a tração feita através dos eixos traseiros.

Os caminhões rígidos são veículos simples e podem apresentar-se de acordo com a tração. Ele pode ser: 4x2, conta com 4 pontos de apoio no solo, sendo dois tratores; 6x2, 6 pontos de apoio do solo, sendo dois tratores; e assim por diante conforme a figura 1.



**Figura 1 - Tipos de chassis de caminhões (Bosch, 2005)**

Para um melhor entendimento o caminhão foi dividido em módulos, que são eles: carroceria, eixo, armação do chassi, transmissão, motor, cabine do motorista, conforme ilustrado pela figura 2.



**Figura 2 – Módulos do caminhão (Bosch, 2005)**

A tração nos caminhões é feita pelo trem de força do veículo, conjunto formado pelo motor, caixa de transmissão e eixo diferencial.

Em sua maioria, no Brasil, os caminhões são equipados com motores a diesel. “O motor diesel é um motor com pistões alternativos com formação interna de mistura e auto-ignição” Bosch (2005, p. 487).

Os motores diesel utilizados em caminhões são motores quatro tempos, ou seja, realizam trabalho em cada cilindro a cada duas voltas do eixo. Os quatro tempos são sucessivamente: admissão, compressão, combustão e escape. De modo simplificado acontecem da seguinte maneira: o motor admite uma quantidade de ar que é comprimido, sendo o combustível injetado no interior do cilindro, quando a compressão do ar está próxima do máximo. A elevação da temperatura que ocorre no interior do cilindro inflama o óleo diesel na câmara de combustão. Essa energia empurra os pistões que através das bielas fazem girar o virabrequim, ao final os gases queimados são expelidos pelo escapamento e o ciclo recomeça. Então a energia proveniente da combustão é transformada em energia mecânica.

A transmissão tem a função de transformar a potência gerada no motor nas forças de impulsão necessárias para induzir o movimento do veículo. Os motores trabalham em uma determinada faixa de rotações, limitada pela rotação de marcha lenta e pela rotação de máxima potência. As relações da transmissão transformam a potência disponível no torque necessário para a força de tração requerida no momento. É preciso essa adaptação, pois os valores de potência e torque não são oferecidos uniformemente; os valores necessários só estão disponíveis em faixas específicas.

O eixo diferencial compensa as diferentes rotações das rodas de tração entre as rodas internas e externas durante uma curva. As engrenagens diferenciais atuam como uma balança, estabelecendo o equilíbrio de velocidades entre as rodas direita e esquerda em uma curva, assim como fornece mais um estágio de redução.

O trem de força do caminhão está apoiado sobre o chassi, seu quadro tem como principal função sustentar e fornecer rigidez ao veículo. Os chassis dos caminhões, normalmente, possuem eixos rígidos na dianteira e na traseira, suspensos por molas pneumáticas ou feixe de lâminas.

## 2.2 VIBRAÇÃO E AMORTECIMENTO EM CAMINHÕES

A vibração está presente em qualquer sistema mecânico que se mova e/ou produza movimento. Assim sendo a vibração além de produzir efeitos diretos sobre o condutor pode também reduzir a vida útil dos componentes do trem de força do veículo. A esses fatores se deve a importância do estudo do amortecimento das vibrações geradas pelo motor.

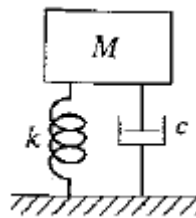
As propriedades mais importantes dos sistemas mecânicos sob o aspecto da vibração são a elasticidade, a inércia e o amortecimento. Isso porque a vibração é, em essência, um processo de troca de energia mecânica, nas formas de energia cinética (associada à velocidade) e energia potencial (associada à deformação e a gravidade). As massas ou inércias armazenam energia potencial gravitacional e energia cinética, em alguns casos a energia potencial gravitacional pode ser desprezada em comparação com a energia cinética. Já as molas armazenam energia potencial elástica, associada à deformação elástica sofrida pelo corpo. Os amortecedores dissipam energia mecânica sob a forma de calor ou som.

## 2.3 CONCEITOS BÁSICOS DE VIBRAÇÃO

Vibração é qualquer movimento que se repete depois de um intervalo de tempo. Como exemplos tem-se o balançar de um pêndulo e o movimento da corda do violão. O primeiro passo para o entendimento da teoria de vibração é o estudo do movimento de oscilação de um corpo em torno de uma posição de equilíbrio, bem como das forças a ele associadas.

### 2.3.1 Partes elementares de sistemas vibratórios

Em um sistema vibratório de parâmetros concentrados podemos classificar os elementos que o compõem segundo a forma com que manipulam a energia mecânica, na qual inclui um meio para armazenar energia potencial (mola ou elasticidade), um meio para armazenar energia cinética (massa ou inércia) e um meio de perda gradual de energia (amortecedor), ilustrados na figura 3.



**Figura 3** – Sistema massa ( $M$ ), mola ( $k$ ) e amortecedor ( $c$ ) (Rao, 2009)

A vibração de um sistema envolve a conversão da energia potencial em energia cinética e vice-versa. Se o sistema for amortecido, um valor de energia é dissipado em cada período de vibração, que através de uma fonte externa a energia perdida é reposta, caso ocorra necessária permanência de um regime de vibração.

Como exemplo, considere a vibração do pêndulo simples mostrando na figura 4. O pêndulo de massa  $m$  da posição 1 com sua energia cinética igual a zero possui uma energia potencial de valor dado pela eq.(1) em relação a posição 2.

$$U = m \times g \times l \times (\cos \theta) \quad (1)$$

Onde:

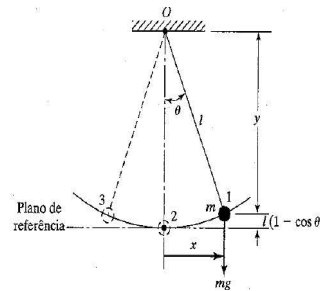
$U$  = energia potencial [J]

$m$  = massa [kg]

$g$  = aceleração da gravidade [ $\text{m/s}^2$ ]

$l$  = comprimento [m]

Quando liberado da posição 1, toda energia potencial se transforma em energia cinética no instante em que atinge a posição 2. Devido ao peso, pêndulo continuará o movimento até a posição 3, onde a energia cinética será convertida em energia potencial. Com a gravidade, o pêndulo atingirá a posição média e novamente a posição 1. O processo se repete caracterizando o movimento oscilatório. Com o tempo o valor de vibração ( $\theta$ ) diminui até o pêndulo atingir a posição de equilíbrio devido à resistência do ar. O amortecimento desempenhado pelo ar faz com que a energia seja dissipada a cada ciclo de vibração.



**Figura 4 - Pêndulo simples (Rao, 2009)**

### 2.3.2 Classificação da vibração

A vibração pode ser classificada de acordo com sua excitação, ela pode ser: livre ou forçada.

Vibração livre é produzida por uma perturbação inicial que não persiste durante o movimento oscilatório, se o sistema continua a vibrar, essa vibração é denominada livre. Forças externas não agem sobre o sistema. Como exemplo: a oscilação de um pêndulo.

Vibração Forçada é produzida por efeitos externos, que continuam durante a existência do movimento vibratório, uma vez encerrado esse efeito, o sistema entra em vibração livre. Um exemplo de vibração forçada é a oscilação que surge em máquinas, como motores a diesel.

Se a frequência da força externa for próxima a uma das frequências naturais do sistema, ocorre uma condição conhecida como ressonância, e o sistema pode sofrer oscilações perigosamente grandes. Falhas de estruturas como edifícios, pontes, turbinas e asas de aviões foram associadas à ocorrência de ressonância. (RAO, 2009).

### 2.3.3 Elementos de mola

Mola é uma peça que possui flexibilidade elástica e deformações quando solicitado. A força aplicada que a mola exerce sobre um corpo é conhecida como força elástica, pois a mola tende a esticar quando é solta e o corpo tende a voltar ao seu estado inicial. A relação entre força e deslocamento é dada pela lei de Hooke, eq.(2):

$$F = kx \quad (2)$$

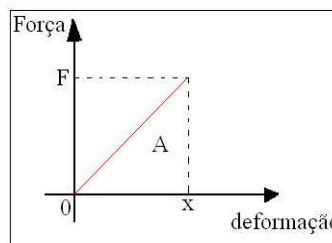
Onde:

F = força [N]

k = constante elástica da mola [N.m]

x = deslocamento [m]

A figura 5 representa a intensidade da força em função da deformação para uma mola linear.



**Figura 5** – Força em função da deformação (Rao, 2009)

Um sistema massa-mola-amortecedor quando deslocado de sua posição inicial transforma energia potencial acumulada em energia cinética. A energia inicial total do sistema é dada pela eq.(3):

$$U = \frac{1}{2} kx^2 \quad (3)$$

Onde:

U = energia potêncial [J]

k = constante elástica da mola [N.m]

x = deslocamento [m]

### 2.3.4 Elementos de massa ou inércia

Segundo Rao (2009. P.37) “O elemento de massa ou inércia é um corpo rígido; pode ganhar ou perder energia cinética sempre que a velocidade do corpo mudar.” A segunda lei de Newton define que a somatória de forças que atuam em determinado ponto é igual à derivada no tempo da quantidade de movimento, conforme eq.(4).

$$\sum F = \frac{dmV}{dt} = \frac{dm}{dt}V + m\frac{dV}{dt} = ma \quad (4)$$

Onde:

F = força [N]

m = massa [kg]

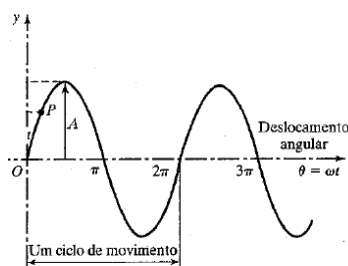
V = velocidade [m/s]

a = aceleração [ $\text{m/s}^2$ ]

t = tempo [s]

### 2.3.5 Movimento harmônico

O modelo matemático mais simples é o de movimento harmônico simples onde o movimento se repete em intervalos iguais. A figura 6 representa o movimento harmônico.



**Figura 6 – Movimento harmônico**

Rao (2009) quando se trata de movimento harmônico, enumera as seguintes definições:

- Ciclo representa o movimento de um corpo vibratório de sua posição de equilíbrio até a sua posição extrema em um sentido, voltando a sua posição de equilíbrio e

daí até a sua posição extrema no outro sentido, fechando o ciclo na volta para sua posição de equilíbrio, conforme ilustrado na figura 6.

- Amplitude é o máximo valor atingido de deslocamento de um corpo vibratório a partir de sua posição de equilíbrio, como indicado na figura 6 pela magnitude “A”.
- Período de oscilação é tempo transcorrido para concluir um ciclo de movimento.
- Frequência de oscilação é a quantidade de ciclos que ocorrem por unidade de tempo.
- Ângulo de fase é uma constante determinada pela condição inicial do movimento. O ângulo de fase compara dois movimentos harmônicos não coincidentes no tempo e sem a mesma amplitude.
- Frequência Natural é a frequência com que o sistema oscila por si próprio após uma perturbação inicial.

#### 2.3.5.1 Vibração excitada harmonicamente

A excitação é causada por uma força aplicada ou excitação de deslocamento imposta. Essas forças atuam sobre o sistema, sendo denominada determinística ou aleatória, determinando uma característica do movimento vibratório.

#### 2.3.6 Equação diferencial do movimento

A figura 7 mostra o modelo de um sistema massa mola de um grau de liberdade, amortecido e seu diagrama de corpo livre. A equação de movimento é obtida aplicando a segunda lei de Newton, eq.(5).

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F(t) \quad (5)$$

Onde:

m = massa [kg]

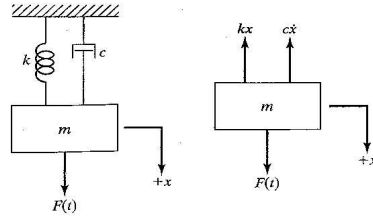
x = deslocamento [m]

c = constante de amortecimento [N.s/m]

k = constante de elasticidade [N/m]

F = força [N]

t = tempo [s]



**Figura 7 - Sistema massa mola de um grau de liberdade (Rao, 2009)**

### 2.3.7 Sistemas vibratórios e a série de Fourier

Segundo Rao (2009) “qualquer função periódica de tempo pode ser representada por série de Fourier como uma soma infinita de termos em seno e co-seno. O movimento de muitos sistemas vibratórios não é harmônico, porém existem casos em que a vibração do sistema é periódica, logo pode ser representada por uma série de Fourier.

#### 2.3.7.1 Expansão por série de Fourier

Sendo  $x(t)$  uma função periódica com período  $\tau$  ela pode ser representada pela série de Fourier, eq.(6):

$$x(t) = \frac{a_0}{2} + a_1 \cos \omega t + a_2 \cos 2\omega t + \dots + b_1 \sin \omega t + b_2 \sin 2\omega t + \dots = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t) \quad (6)$$

Onde  $a_0, a_1, a_2, \dots, b_0, b_1, b_2, \dots$ , são coeficientes constantes que podem ser encontrados conforme bibliografia (RAO, 2009).

E a frequência fundamental ( $\omega$ ) é dada pela eq.(7):

$$\omega = \frac{2\pi}{\tau} \quad (7)$$

Onde:

$\omega$  = frequência fundamental [rad/s]

$\tau$  = período de oscilação [s]

Segundo Rao a equação 6 esclarece fisicamente que “qualquer função periódica pode ser representada como a soma de funções harmônicas”. A soma dos termos somente em seno

ou somente em co-seno também pode representar uma série de Fourier, conforme visto na eq.(8):

$$x(t) = d_0 + d_1 \cos(\omega t - \varphi_1) + d_2 \cos(2\omega t - \varphi_2) + \dots \quad (8)$$

Onde:

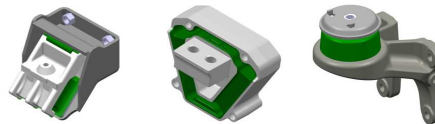
$$d_0 = \frac{a_0}{2}$$

$$d_n = (a_n^2 + b_n^2)^{\frac{1}{2}}$$

$$\varphi_n = \tan^{-1} \frac{b_n}{a_n}$$

## 2.4 COXIM: CONCEITOS BÁSICOS SOBRE DIMENSIONAMENTO

Em caminhões o amortecimento da vibração proveniente do trem de força para o chassi é feito por meio dos coxins, ilustrados na figura 8. Componente de metal-borracha que além de oferecer suporte, têm propriedades elásticas que o tornam capaz de isolar e dissipar as vibrações geradas pelo motor.

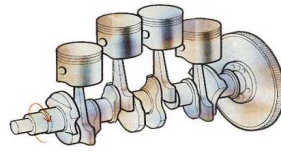


**Figura 8** – Coxins de motor

O dimensionamento de um coxim envolve diversas etapas, de modo simplificado tem-se: a determinação das coordenadas do centro de gravidade e do tensor de inércia do conjunto (trem de força); o tipo do motor (2 ou 4 tempos, 4 ou 6 cilindros) e a faixa de rotações de trabalho; as frequências e os modos de vibração a serem isolados; as limitações de posicionamento do coxim (furação na longarina, folgas críticas com outros componentes lado motor e lado veículo); a rigidez para cada ponto em que há necessidade de isolamento; além do torque de trabalho.

Segundo Racca (1981), dois tipos de distúrbios gerados pelo motor devem ser considerados ao se dimensionar e definir o posicionamento e as características do coxim. São eles: os distúrbios causados pela vibração torcional devido à variação de torque no motor e os

distúrbios causados pelo desbalanceamento das forças dentro do motor devido ao movimento alternativo dos cilindros e ao movimento rotativo do virabrequim, mostrado na figura 9.



**Figura 9 – Movimento do virabrequim**

Para os distúrbios causados pela vibração dinâmica torcional, a frequência de injeção de combustível é a frequência mais importante a ser isolada (RACCA, p. 1). Essa frequência, para motores 4 tempos, pode ser calculada de acordo com a eq. (9) abaixo:

$$f_d = \frac{RPM \times \text{número de cilindros}}{2} \quad (9)$$

Onde:

$f_d$  = frequência de injeção de combustível [rpm]

RPM = rotação de trabalho do motor [rpm]

As forças inerciais combinam-se ou anulam-se em vários graus, dependendo do arranjo do número de cilindros e das manivelas. Em motores com até 4 cilindros as forças inerciais encontram-se desbalanceadas devendo ser consideradas no dimensionamento do sistema de isolamento de vibrações.

#### **2.4.1 Eixo principal ou eixo de referência**

Os efeitos das cargas dinâmicas do motor influenciam diretamente no posicionamento do coxim. Quando o motor vibra livremente sob a influência dessas cargas ele tende a se mover ou rotacionar no eixo principal de inércia (RACCA, p. 2). Uma quantidade maior de energia é necessária para causar a aceleração através de outros eixos. O posicionamento desse componente deve ter como referência o eixo principal de inércia. Os coxins devem ser posicionados de forma que permitam a vibração livre através do eixo principal, nesse eixo que o trem de força tem menor momento de inércia. Os eixos de referência podem ser vistos na figura 10.



A modelagem física tem o objetivo de representar esquematicamente todas as características importantes do sistema, visando deduzir as equações que descrevem o comportamento. O modelo deve ser o mais simples possível de modo que seja possível a resolução de suas equações, porém mantendo as características principais do sistema.

Na modelagem matemática é feita a dedução do conjunto de equações diferenciais que constituem o modelo matemático do sistema mecânico.

Na etapa de solução do modelo matemático, o sistema de equações diferenciais que compõem o modelo matemático é resolvido.

Interpretação dos resultados: é nessa etapa que é feita a comparação das soluções obtidas teoricamente com os dados obtidos a partir da observação experimental. Tal interpretação é auxiliada pela simulação numérica em computador, possibilitando que os dados do sistema sejam alterados e que a solução do modelo matemático seja repetida diversas vezes até que um modelo mais próximo da realidade seja encontrado. Assim, se os resultados forem coerentes, pode-se aceitar o modelo. Se não se aproximarem da realidade, é preciso voltar à etapa de modelagem física e refazer o procedimento.

#### **4 COMENTÁRIOS FINAIS**

Os procedimentos de avaliação dinâmica de um sistema vibratório vão possibilitar a construção de um modelo matemático para a vibração gerada pelo trem de força do veículo. O modelo será validado a partir de medições feitas no veículo. A metodologia desenvolvida servirá como base para modificações em produtos correntes e definições para projetos futuros no que tange a seleção de propriedades mecânicas (rigidez e amortecimento) necessárias para o bom funcionamento do sistema.

#### **REFERÊNCIAS**

BOSCH, Robert. **Manual de tecnologia automotiva**. 25. ed. Blucher, 2005.

GAVIRAGHI, Dirceu Luiz. **Metodologia de desenvolvimento de um anteprojeto para veículos leves e médios**. 2005. 127p. Dissertação (Mestrado em engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2005.

LOPES, Simone Saisse; CARDOSO, Marcelo Porteiro; PICCININI, Maurício Serrão. O transporte rodoviário de carga e o papel do BNDES. **Revista do BNDES**, Rio de Janeiro, n. 29. p. 36, jun. 2008.

MANUAL técnico. Curso MAHLE metal leve: Motores de combustão interna. Metal Leve.

OLIVEIRA, Paulo Afonso Coppi Aquino de. **Modelagem da dinâmica vertical de coxins elastoméricos de motor através de método de redes neurais**. 2011. 192p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

PINHO, Marivan da Silva. **Vibrações em um trator agrícola cabinado: magnitude das acelerações no assento e transmissibilidade através do coxim**. 2012. 160p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2012.

RACCA, R. **Engine mounting design considerations**. Disponível em: <[http://www.bdproduct.ca/barry%20pdfs/engine\\_mounting.pdf](http://www.bdproduct.ca/barry%20pdfs/engine_mounting.pdf)>. Acesso em: 11 mai. 2013.

RAO, Singiresu. **Vibrações mecânicas**. 4. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2009.

SOEIRO, N. S. **Vibrações e o Corpo Humano: uma avaliação ocupacional**. Disponível em: <[http://www.ufpa.br/gva/Arquivos%20PDF/I\\_WORKSHOP\\_TUCURUI/Workshop\\_Tucurui/Palestras/03\\_P01\\_Vibracoes\\_e\\_o\\_Corpo\\_Humano\\_uma\\_avaliacao\\_ocupacional.pdf](http://www.ufpa.br/gva/Arquivos%20PDF/I_WORKSHOP_TUCURUI/Workshop_Tucurui/Palestras/03_P01_Vibracoes_e_o_Corpo_Humano_uma_avaliacao_ocupacional.pdf)>. Acesso em 11 mai. 2013.