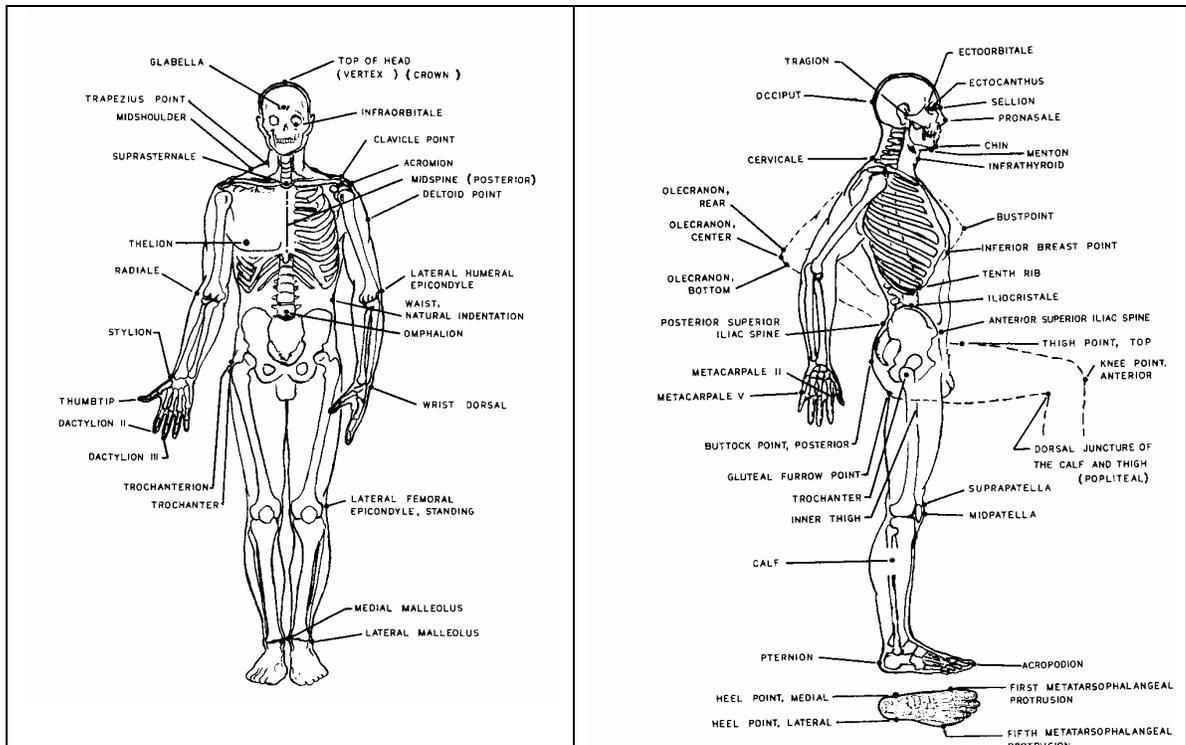


**ANÁLISE DOS FATORES  
ANTROPOMÉTRICOS EM BIOMECÂNICA**

### **Parâmetros antropométricos em Biomecânica**

Antropometria é a ciência que estuda quantitativamente tamanho, massa, forma e as propriedades inerciais do corpo humano ao longo de seu desenvolvimento. Esta ciência é de fundamental importância para a biomecânica, pois fornece vários parâmetros essenciais para a determinação quantitativa de variáveis importantes na análise da performance de atividades físicas desempenhadas em contextos laborais e esportivos. No contexto da ergonomia, a antropometria auxilia (a) na avaliação de posturas e distâncias de alcance dos controles, como pode ocorrer no planejamento de uma estação de trabalho; (b) na determinação dos espaços livres (clearance) nos locais e estações de trabalho (máquinas e obstáculos) que permitem mobilidade e reduzem os riscos de acidente e; (c) na identificação de parâmetros corporais (ex. inércia, centro de massa) necessários na determinação das forças que atuam sobre o corpo. A figura 1 mostra, esquematicamente, uma série de pontos utilizados na determinação dos referenciais dos comprimentos corporais nos planos sagital e frontal.



**Figura 1** – Pontos anatômicos referenciais para a determinação de comprimentos corporais (Adaptado de Gordon et al., 1989).

### As propriedades físicas dos do corpo humano e de seus segmentos

O corpo humano é considerado como um sistema de ligações mecânicas, as quais possuem propriedades de forma e tamanho determinadas. O conhecimento de vários parâmetros (ex., massa, centro de massa, inércia, origem e inserção, comprimento muscular, ângulo de tração, secção transversal muscular) são importantes na análise do movimento humano. Dentre estas, o **comprimento dos segmentos corporais** é a dimensão mais básica do corpo humano e pode variar de acordo com vários fatores, tais como sexo, etnia e faixa etária. Em alguns casos o comprimento de certos segmentos corporais é determinado a partir de pontos anatômicos determinados a partir de certos pontos referenciais corporais (Vide figura 1), como é o caso do comprimento do membro inferior na posição sentada (distância entre a planta do pé e

a região posterior do glúteo). Em outros casos, existe a necessidade de utilizar indicadores que permitam determinar o comprimento de um segmento a partir de suas articulações, como é o caso dos modelos empregados para o cálculo de forças e momentos (vide figura 2). Neste caso, as análises antropométricas partem da premissa de que os segmentos corporais são conectados entre si através de articulações. A dissecação de cadáveres tem colaborado na identificação de vários pontos de rotação articular (Braune & Fischer, 1889; Chandler et al., 1975; Contini & Drillis, 1966; Dempster, 1955), enquanto que a determinação dos centros articulares em articulações mais simples (ex. cotovelo) podem ser determinados através de sequências de raios X. A identificação dos centros de rotação articular (vide tabela 1) propicia uma estimação dos comprimentos dos segmentos corporais, o qual é determinado pela intersecção das linhas que cruzam os centros articulares proximal e distal dos segmentos (vide tabela 2).

Ainda que os estudos antropométricos forneçam uma melhor determinação acerca dos centros de rotação articulares, sua identificação pode ser difícil. Os centros de rotação articulares são, na sua maioria, identificados externamente, mas nem sempre correspondem aos acidentes ósseos internos devido a alguns fatores. Por exemplo, a quantidade de músculos, gordura e a natureza do próprio movimento podem interferir. No caso específico do joelho, os movimentos da articulação não são exclusivamente rotacionais, mas ocorrem através de uma combinação de rotação e deslizamento, que constituem uma centróide. Em outros casos, como acontece na coluna vertebral, a identificação das vértebras é uma tarefa que requer uma certa experiência, pois sua determinação se faz através de palpação. Neste caso, os movimentos da pele em relação aos processos vertebrais podem facilmente influenciar as medidas.

Uma vez que os centros de rotação são conhecidos, os segmentos corporais podem ser definidos como a distância entre os centros rotacionais das extremidades proximal e distal. A correlação entre o comprimento dos segmentos e as estruturas ósseas palpáveis tem alta correlação ( $R^2 > 0.90$ ; Dempster, 1955) e são frequentemente empregados em modelos corporais em estudos biomecânicos. A tabela 1 indica uma série de acidentes ósseos utilizados para determinar os centros rotacionais articulares.

**Tabela 1 - Localização dos centros articulares**

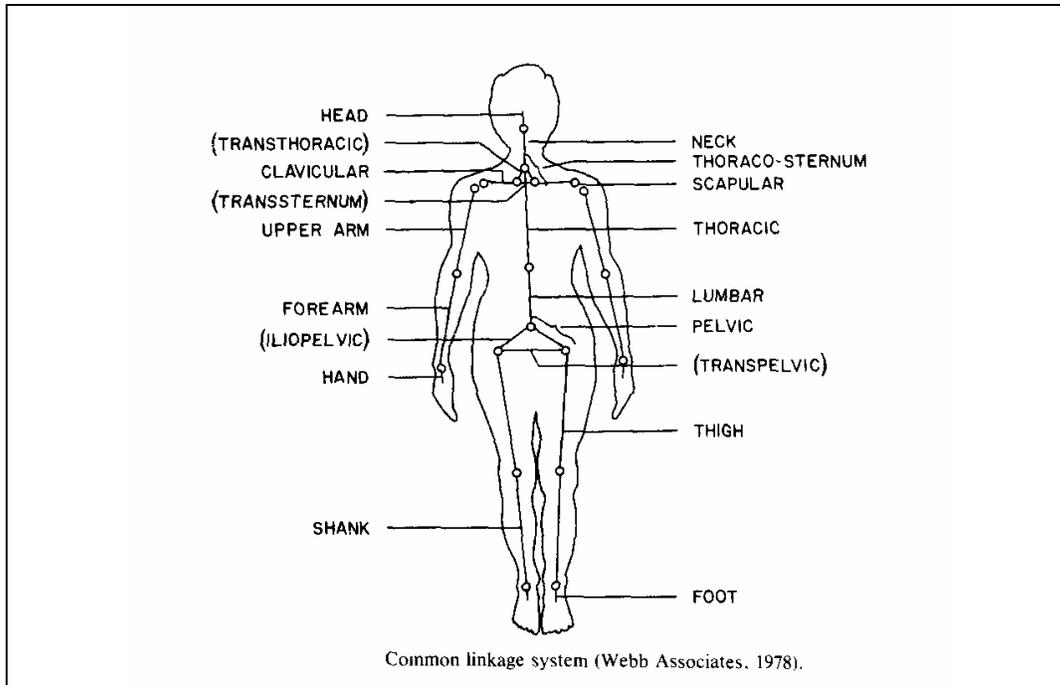
Cabeça – Pescoço	Ponto médio entre os côndilos occipitais e a primeira vértebra cervical
Pescoço – Tórax	Ponto médio entre a sétima vértebra cervical e a primeira vértebra torácica
Tórax – Lombar	Ponto médio entre e a décima segunda vértebra torácica e a primeira vértebra lombar
Lombar – Sacral	Ponto médio entre e a quinta vértebra lombar e a primeira vértebra sacral
Esterno – Clavicular	Posição médio da junção palpável entre a extremidade proximal da clavícula e do esterno, na borda superior do esterno.
Claviculo - Escapular	Ponto médio de uma linha entre a tuberosidade coracóide da clavícula (na borda posterior do osso) e a articulação acrômio-clavicular (no tubérculo da terminação lateral da clavícula); o ponto deve ser o ponto inferior da clavícula.
Glenoumeral	Região média da massa óssea palpável da cabeça e da tuberosidade do úmero; com o braço abduzido 45°, relativo a margem vertebral da escápula. Uma linha perpendicular ao eixo longitudinal do braço, a partir da margem superior do acrômio cruza o centro articular.
Cotovelo	Ponto médio da linha entre o ponto palpável mais baixo no epicôndilo medial do úmero e um ponto 8 mm acima do rádio (junção rádio-umeral)
Punho	No lado palmar da mão: na crista distal do punho no tendão palmar longo, no ponto médio da linha entre o processo estilóide e o centro do osso pisiforme. No lado dorsal da mão: na ranhura palpável entre os ossos lunar e capitato, na linha com o terceiro metacarpo.
Quadril	Aspecto lateral do quadril; no ponto mais proeminente do trocânter femoral, aproximadamente 1 cm anterior da projeção mais lateral do trocânter femoral
Joelho	Ponto médio da linha entre os centros das convexidades posteriores dos côndilos femorais.
Tornozelo	Na linha entre o maléolo lateral da fíbula e um ponto 5 mm distal do maléolo tibial.

A definição dos segmentos corporais e sua representação gráfica encontram-se na tabela 2 e na figura 1, respectivamente.

**Tabela 2 - Definição dos segmentos corporais**

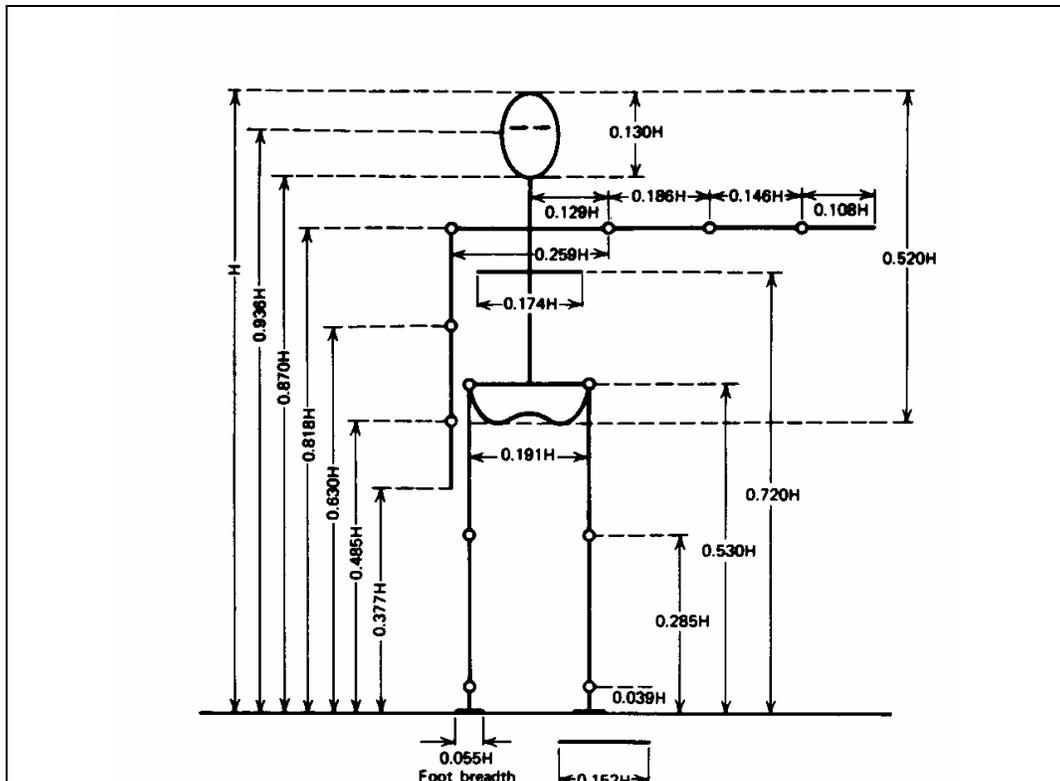
Cabeça	Linha reta entre o côndilo occipital/C1 e o centro de massa da cabeça
Pescoço	Linha reta entre o côndilo occipital/C1 e as vértebras C7/T1.
Dorso	No ponto médio da linha reta entre o côndilo occipital/C1 e o ponto medio da linha que passa através do centro do quadril.
Tórax	Tóraco-esterno: Um sistema de ligação fechada composta por três ligações. A ligação trans-tórax (direita e esquerda) são uma linha reta entre C7/T1 para a esquerda e direita do centro articular esterno-clavicular. A ligação trans-esterno é uma linha reta entre os centros articulares esterno-clavicular direito e esquerdo. Clavicular: É uma linha reta entre os centros articulares glenoumeral e claviculo-escapular. Torácica Linha reta entre as vertebrae C7/T1 e T12/L1.
Lombar	Linha reta entre as vertebrae T12/L1 e L5/S1

Pelvis	A pelvis é tratada como como uma ligação triangular, composta de três ligações. A ligação ilio-pélvica são linhas retas entre o centro articular das vertebrae L5/S1 e o centro do quadril. A ligação transpélvica é uma linha reta entre os centros articulares direito e esquerdo do quadril.
Braço	Linha reta entre os centros articulares glenoumeral e do cotovelo
Ante-braço	Linha reta entre os centros articulares do cotovelo e do punho
Mão	Linha reta entre o centro articular do punho e o centro de massa da mão
Coxa	Linha reta entre os centros articulares do quadril e do joelho
Perna	Linha reta entre os centros articulares do joelho e do tornozelo
Pé	Linha reta entre os centros articulares do tornozelo e o centro de massa do pé



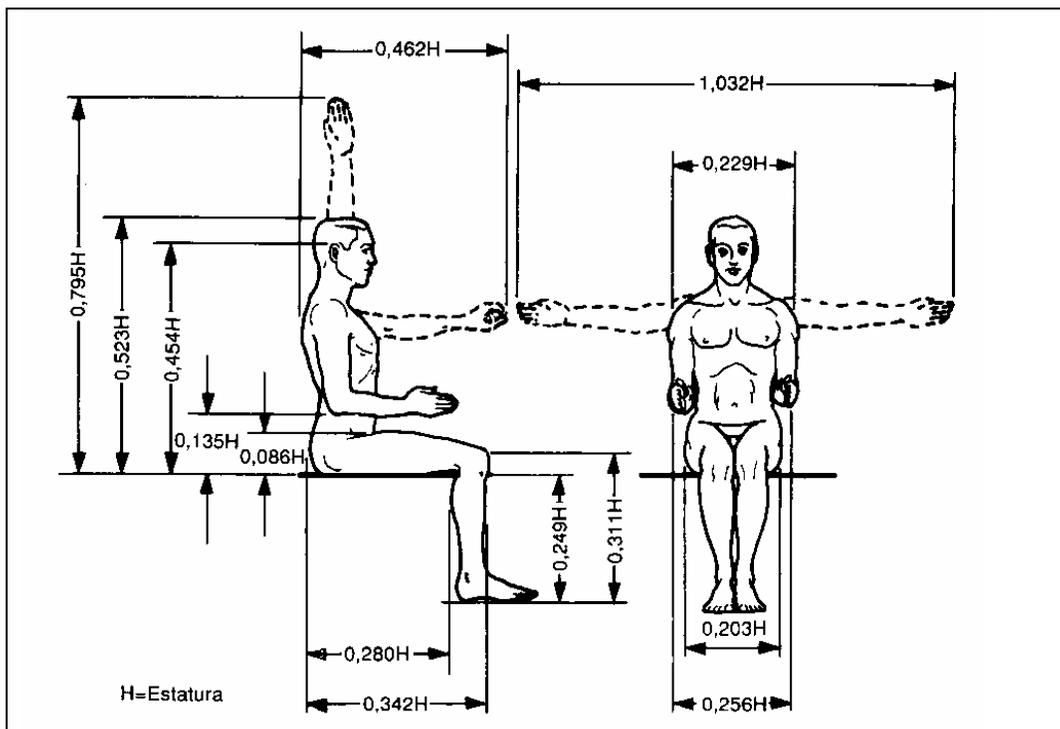
**Figura 2 – Representação do sistema de ligações dos segmentos corporais**

Alguns estudos (Drillis & Continni, 1966) buscaram determinar os comprimentos dos segmentos corporais em função da estatura. Este tipo de predição pode ser utilizada quando não houverem melhores dados, isto é, quando não for possível medir os comprimentos dos segmentos corporais dos próprios sujeitos. Os dados estão sumarizados na figura 3.



**Figura 3** – Comprimentos dos segmentos corporais expressos como fração da estatura

As frações corporais também podem ser aplicadas em outras posições, como é o caso da posição sentada. Vide figura 4 para detalhes



**Figura 4** – Esquema de dimensões corporais relativas a estatura.

Em vários aspectos, é importante quantificar as relações antropométricas dos segmentos corporais para que as estações de trabalho possam ser adequadas aos fatores individuais dos sujeitos, como é o caso das estações de trabalho em que o operário executa suas funções na posição sentada (vide figuras 5 e 6).

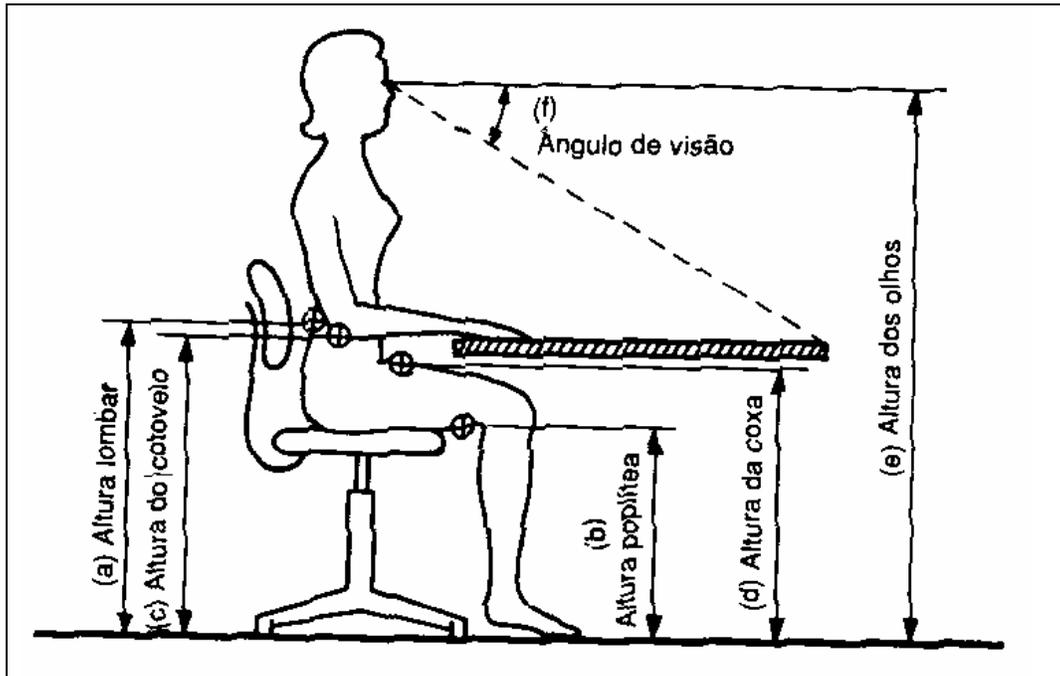


Figura 5 – Dimensões esquemáticas para a posição sentada.

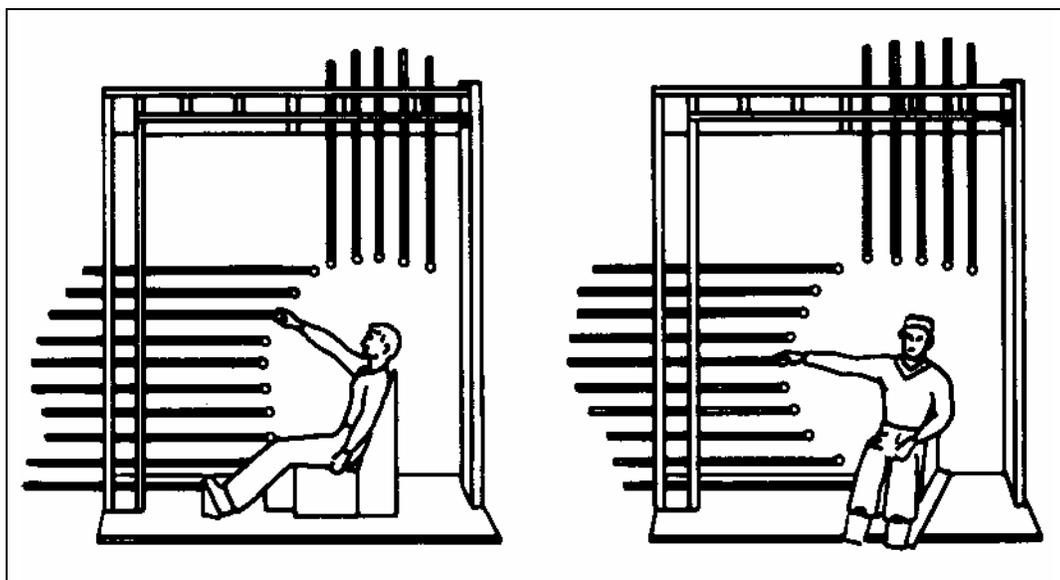


Figura 6 – Esquema de determinação do alcance de segmentos superiores na posição sentada

### Peso e volume dos segmentos corporais

O efeito da gravidade também é um dos fatores de carga aplicados sobre as estruturas anatômicas, os quais podem ser considerados como importantes em certas tarefas ou posturas. Um exemplo são as posturas estáticas ou semi-estáticas assumidas por prolongados períodos. Portanto, o conhecimento da distribuição das massas corporais é de importância na determinação dos efeitos da gravidade sobre o corpo humano.

A massa e o volume dos segmentos corporais são relacionados pela densidade. Isto é determinado pelo volume de água ocupado durante a imersão de segmentos corporais de massa conhecida. A equação para este cálculo é:

$$D = \frac{M}{V}$$
$$D = \frac{P/g}{V}$$

onde,

D é a densidade média, ou a massa por unidade de volume (g/cm<sup>3</sup>) com água sendo 1.0;

M é a massa do segmento corporal (g ou kg);

V é o volume de água deslocado;

P é o peso do segmento (N);

G é a constante gravitacional.

A densidade média dos segmentos corporais é dada na tabela 3.

<b>Tabela 3 – Densidade média dos segmentos corporais</b>		
Segmento	Harless (n = 5)	Dempster (n = 8)
Cabeça e pescoço	1.11	1.11
Tronco	-	1.03
Braço	1.08	1.07
Antebraço	1.10	1.13
Mão	1.11	1.16
Coxa	1.07	1.05
Perna	1.10	1.09
Pé	1.09	1.10

A similaridade encontrada na **densidade dos segmentos** permite que os segmentos corporais sejam expressos com uma proporção da massa corporal total.

Webb et al. (1978) propôs uma relação de porcentagem de distribuição de massa corporal em função da massa corporal total (Tabela 4).

**Tabela 4 – Massa relativa dos segmentos corporais**

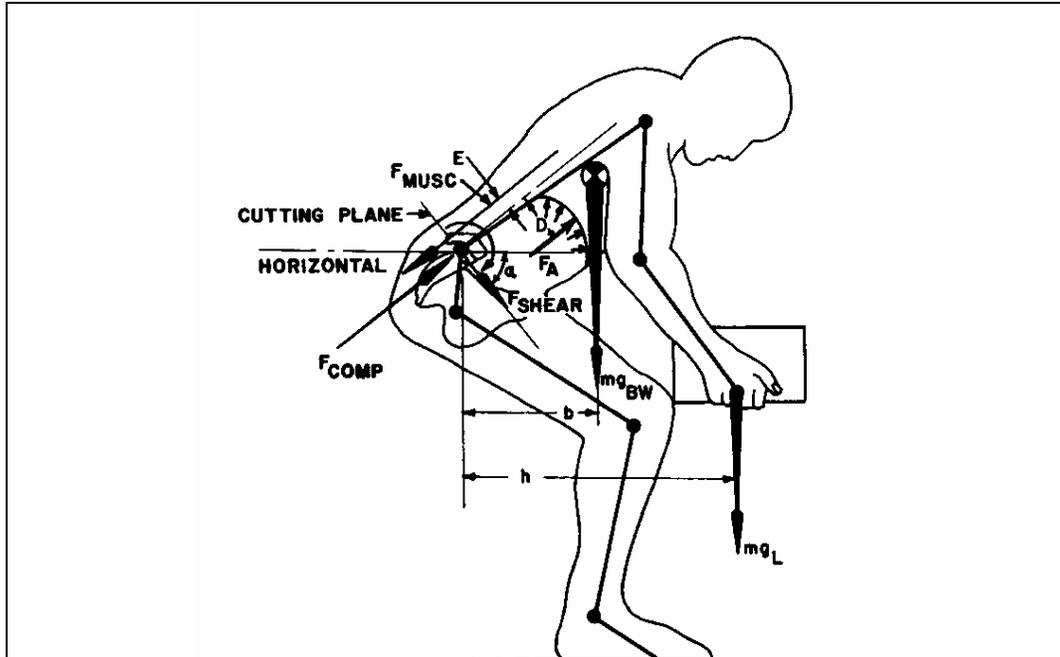
Segmento corporal	Massa relativa				
	Fischer (1906)	Clouser (1969)	Vários	Jensen * (1969)	Jensen ** (1986)
Mão		0.0070	0.0060 <sup>1</sup>	0.0900	0.0800
Antebraço		0.0160	0.0160 <sup>1</sup>	0.0170	0.0170
Braço	0.0280	0.0260	0.0280 <sup>1</sup>	0.0320	0.0350
Antebraço e mão	0.0260	0.0230	0.0220 <sup>1</sup>		
Membro superior	0.0540	0.0490	0.0500 <sup>1</sup>		
Pé	0.0210	0.0150	0.0145 <sup>1</sup>	0.0210	0.0210
Perna	0.0450	0.0440	0.0465 <sup>1</sup>	0.0530	0.0560
Coxa	0.1100	0.1050	0.1000 <sup>1</sup>	0.1100	0.1210
Pé e perna	0.0660	0.0580	0.0610 <sup>1</sup>		
Membro inferior	0.1760	0.1610	0.1610 <sup>1</sup>		
Cabeça e percoço			0.0810 <sup>1</sup>		
Tórax			0.2160 <sup>2</sup>		
Abdomem			0.1390 <sup>3</sup>		
Pelve			0.1420 <sup>3</sup>		
Tórax e abdomem			0.3550 <sup>3</sup>		
Abdomem e pelve			0.2810 <sup>2</sup>		
Tronco	0.4520	0.5070	0.4970 <sup>1</sup>	0.4170	0.4160
Tronco, cabeça e pescoço			0.5780 <sup>1</sup>		
Cabeça, braços e tronco			0.6780 <sup>1</sup>		

<sup>1</sup> Dempster via Miller & Nelson; <sup>2</sup> Dempster via Plagenhoef; <sup>3</sup> Dempster via Plagenhoef from living subjects; \* Crianças de 12 anos \*\* Crianças de 15 anos.

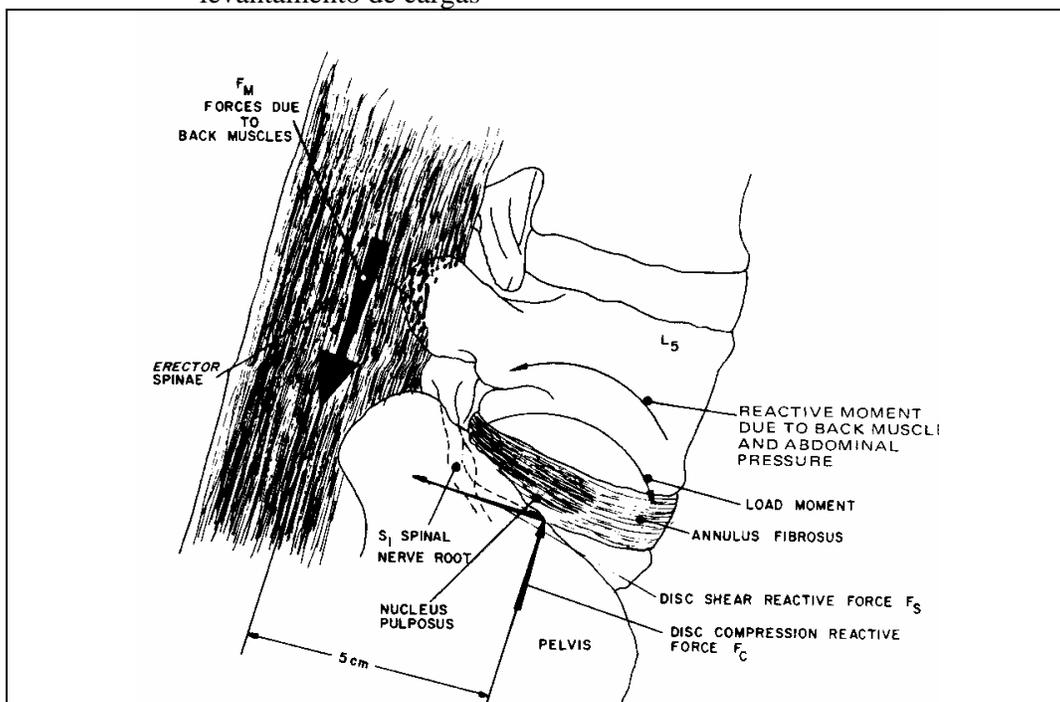
### Localização dos centros de massa dos segmentos corporais

O conhecimento do peso ou da massa são elementos fundamentais para a análise biomecânica, todavia, a análise biomecânica necessita a determinação do **centro de massa dos segmentos**. O conhecimento do centro de massa dos segmentos possibilita conhecer qual o efeito da ação das forças gravitacionais sobre as extremidades (articulações), independentemente da orientação do segmento no espaço. Isto permite a análise das forças e momentos exercidos em cada articulação em uma dada posição

estática (Elftman, 1939). A necessidade de se quantificar tais parâmetros pode ser exemplificada no cálculo dos momentos que atuam na coluna vertebral durante o levantamento de carga (Figuras 7 e 8).



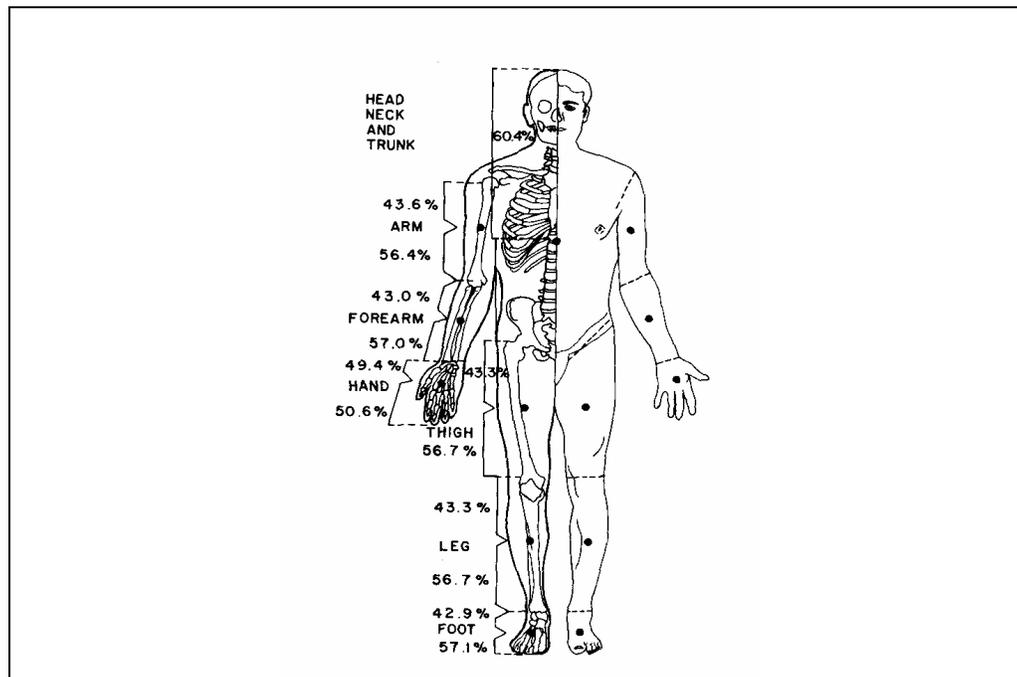
**Figura 7** – Modelo esquemático das forças que atuam em L5/S1 durante o levantamento de cargas



**Figura 8** – Modelo esquemático dos momentos que atuam em L5/S1 durante o levantamento de cargas.

A determinação dos centros de massa dos segmentos corporais foi efetuada em cadáveres (Roebuck et al., 1975) através da suspensão dos segmentos congelados em várias posições. Van de Bogert (1989) também utilizou métodos similares, porém a identificação dos centros de massa foi feita através de fotografia. O método de balanças também é empregado na determinação do centro de massa dos segmentos (Depster, 1955). Em sujeitos vivos, tal determinação pode ser efetuada em sistemas de balanças (pranchas de madeira apoiadas sobre balancas ou plataformas de força). Métodos de imersão também tem sido utilizados (Le Veau, 1977).

A localização dos centros de massa em sujeitos vivos é rara e os valores obtidos a partir de cadáveres ainda é predominante. Os dados de Dempster (1955) e Continni & Drillis (1966) ainda são os mais usuais e facilitam a determinação dos centros de massa, pois os mesmos podem ser estimados a partir do comprimento dos segmentos corporais. A localização dos centros de massa, expressos em função do comprimento dos segmentos corporais, estão representados na figura 9 e tabela 5, respectivamente.



**Figura 9** – Centros de massa relativos ao comprimento dos segmentos corporais.

**Tabela 5** – Localização dos centros de massa em função do comprimento dos segmentos corporais em relação as extremidades proximais e distais.

<b>Segmento corporal</b>	<b>Proximal</b>	<b>Distal</b>
Mão	0.560	0.494
Antebraço	0.430	0.570
Braço	0.436	0.564
Antebraço e mão	0.682	0.318
Membro superior	0.530	0.470
Pé	0.500	0.500
Perna	0.433	0.567
Coxa	0.433	0.567
Pé e perna	0.606	0.394
Membro inferior	0.447	0.553
Cabeça e pescoço	1.000	-
Tórax	0.820	0.180
Abdomem	0.440	0.560
Pelve	0.105	0.895
Tórax e abdome	0.630	0.370
Abdomem e pelve	0.270	0.730
Tronco	0.500	0.500
Tronco, cabeça e pescoço	0.660	0.340
Cabeça, braços e tronco	0.626	0.374

Exemplo de como estes parâmetros corporais podem ser usados. Considere que voce tem interesse em quantificar o centro de massa da coxa de um homem. Se a pessoa tem uma massa de 80 kg, a massa da coxa pode ser determinada através do cálculo percentual da massa;  $10.5\%$  de 80 kg = 8.4 kg. A localização do centro de massa pode ser determinada a partir das coordenadas proximais e distais do segmento. Se o centro de massa da coxa está localizada a aproximadamente 43.3% do comprimento da coxa, em relação a terminação proximal, as coordenadas podem ser calculadas. Veja a ilustração da Figura 10, que representa a coxa do sujeito e o respectivo sistema de coordenadas.

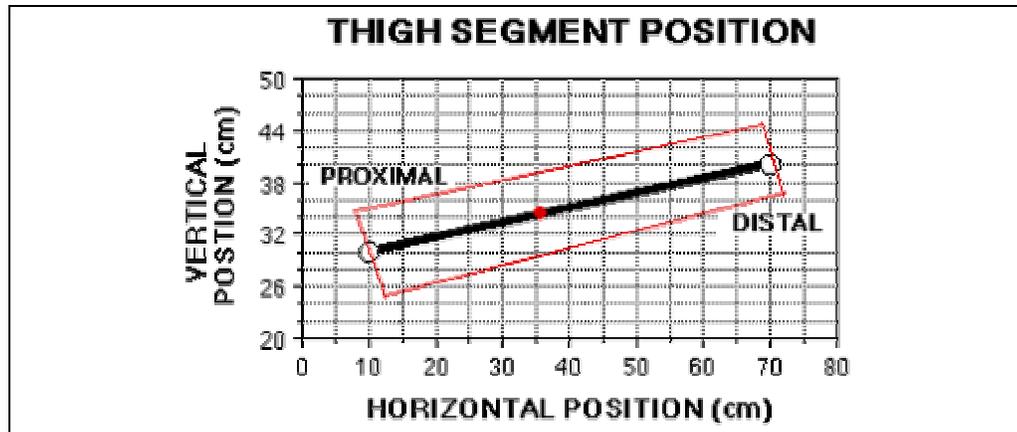


Figura 10 – Representação da determinação do centro de massa de um segmento corporal (coxa).

$$\text{CM do segmento} = X_{\text{proximal}} + (\text{Comprimento}\%) (X_{\text{distal}} - X_{\text{proximal}})$$

$$X_{\text{coxa}} = 10 + (.433)(70 - 10) = 35.98$$

$$Y_{\text{coxa}} = 30 + (.433)(40 - 30) = 34.33$$

A partir deste exemplo, torna-se fácil visualizar o cálculo do centro de massa de um corpo mais complexo (Figura 11). Portanto, é possível calcular a localização do centro de massa de um objeto complexo (sistema), tal como o corpo humano a partir das coordenadas dos centros seus constituintes (segmentos corporais):

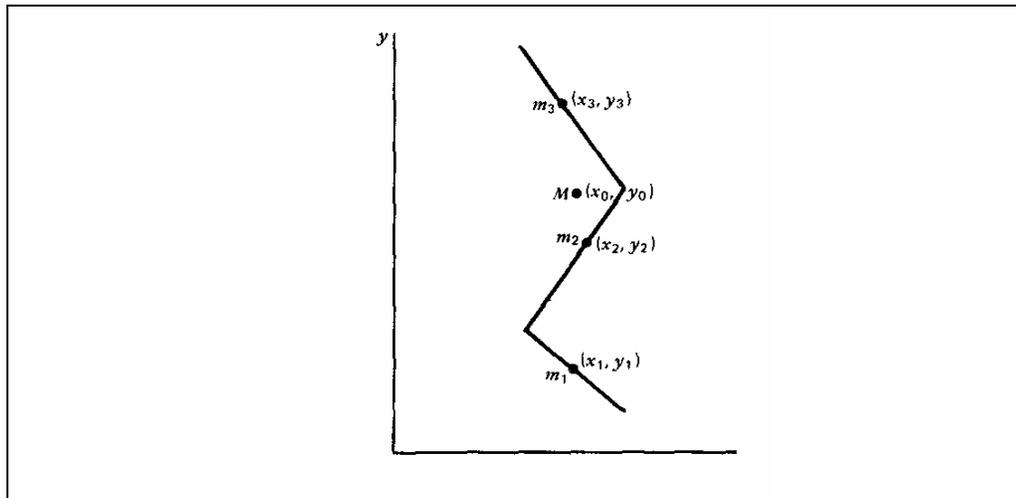
$$X_{\text{cm}} = \frac{\sum_{i=1}^n (M_{\text{seg } i} * X_{\text{seg cm } i})}{M_{\text{body}}}$$

$$Mx_o = m_1x_1 + m_2x_2 + m_3x_3$$

$$x_o = \frac{m_1x_1 + m_2x_2 + m_3x_3}{M}$$

$$My_o = m_1y_1 + m_2y_2 + m_3y_3$$

$$y_o = \frac{m_1y_1 + m_2y_2 + m_3y_3}{M}$$

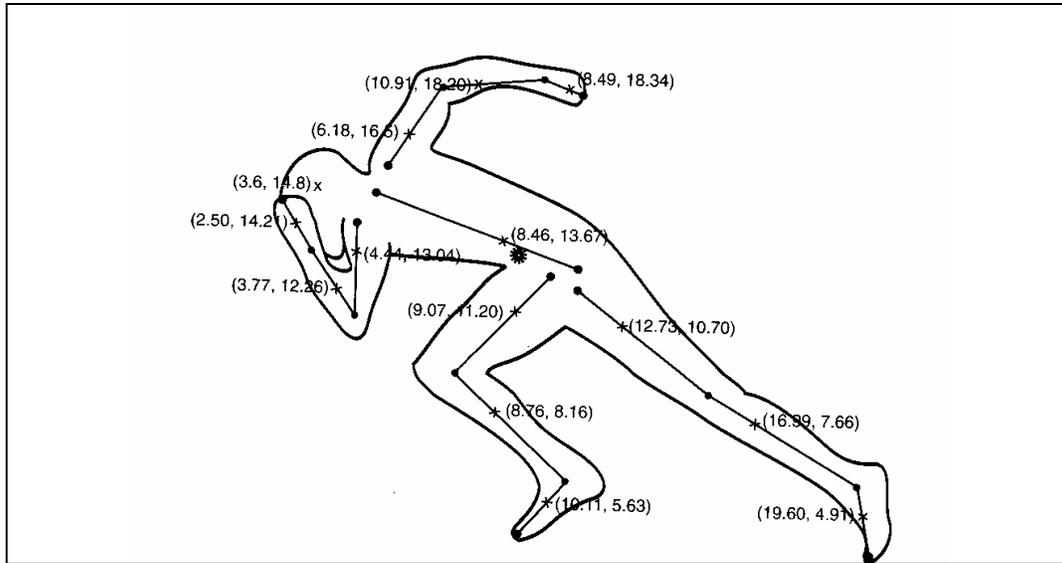


**Figura 11** – Determinação do centro de massa de um sistema complexo

O centro de massa de todo o sistema pode ser calculado se a localização do centro de massa dos segmentos for conhecida:

- Primeiro determine as terminações (proximal e distal) de cada segmento;
- Então, use as coordenadas para determinar o centro de massa de cada segmento;
- Combine a coordenada dos segmentos com os segmentos de massa para determinar o torque do segmento acerca de algum ponto de referência (a origem);
- Finalmente, use o torque total para determinar a localização do centro de massa do corpo.

Analise o centro de massa da figura abaixo referente aos eixos x e y e calcule o centro de massa, sabendo que a massa corporal do sujeito é de 68.2 kg.



**Figura 4 – Cálculo do centro de massa de um sujeito.**

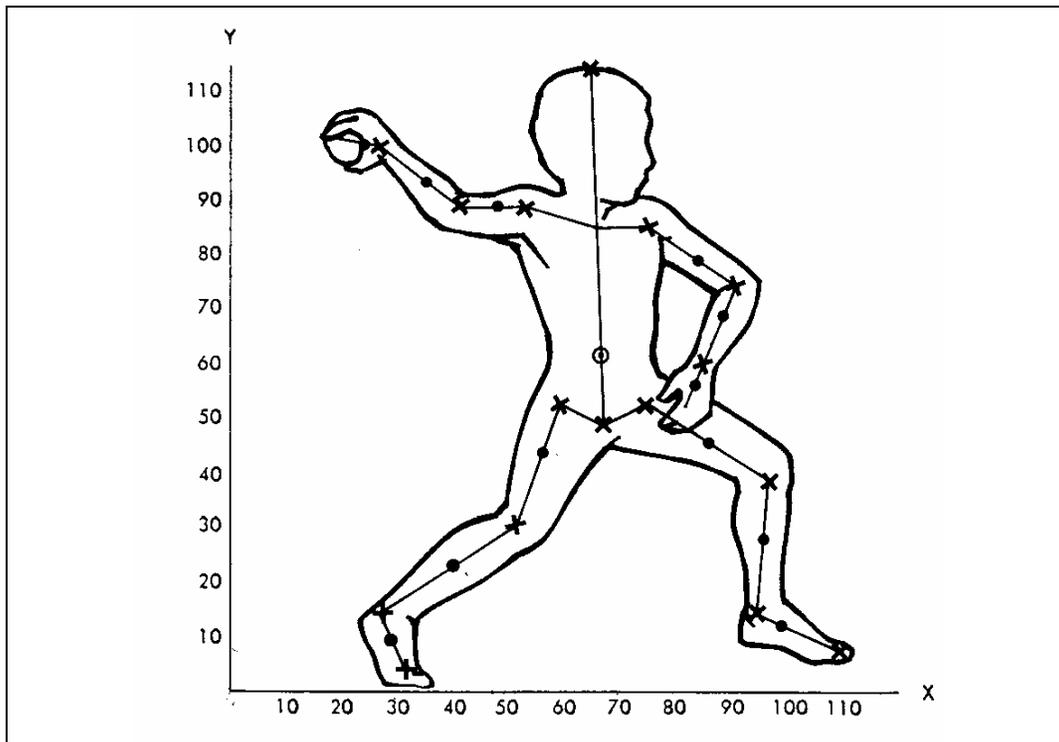
Segmento	Massa segmento x distância (CM)	Resultado
Cabeça		
Tronco		
Braço esquerdo		
Braço direito		
Antebraço esquerdo		
Antebraço direito		
Mão esquerda		
Mão direita		
Coxa Esquerda		
Coxa Direita		
Perna Esquerda		
Perna Direita		
Pe Esquerdo		
Pe Direito		

**Tabela 6.1 – Valores do centro de massa dos segmentos corporais (X)**

Segmento	Massa segmento x distância (CM)	Resultado
Cabeça		
Tronco		
Braço esquerdo		
Braço direito		
Antebraço esquerdo		
Antebraço direito		
Mão esquerda		
Mão direita		
Coxa Esquerda		
Coxa Direita		
Perna Esquerda		
Perna Direita		
Pe Esquerdo		
Pe Direito		

**Tabela 6.2 – Valores do centro de massa dos segmentos corporais (Y)**

Agora, calcule o centro de massa da figura abaixo, sabendo que a criança tem 40 kg de massa. Neste exemplo, você precisa determinar a posição do centro de massa corporal antes de usar os procedimentos aplicados no exemplo anterior.



Calculos:

## Momento de inércia e raio de giro dos segmentos corporais

### Momento de inércia

A inércia é a propriedade de um corpo em resistir a mudança de estado. Em movimentos rotacionais, duas variáveis são importantes na compreensão desta propriedade. A **massa**, que é a quantidade de matéria e o **raio de giro**, que é uma medida de distribuição de massa relativa a um eixo de rotação no qual o corpo está girando. A maior parte dos segmentos corporais não gira sobre seu centros de massa, mas ao redor de uma de suas articulações (proximal ou distal). Esta resistência, é calculada pela seguinte fórmula:

$$I = mk^2$$

O raio de giro é uma medida que é sempre um pouco maior do que o centro de massa do segmento, em relação ao centro de giro do segmento. Felizmente, o raio de giro dos segmentos corporais podem ser estimados a partir de estudos realizados em cadáveres e em sujeitos vivos. Os raios de giro estão descritos na tabela 7.

**Tabela 7** – Raios de giro dos segmentos corporais

Segmento corporal	Centro de massa	Proximal	Distal
Mão	0.297	0.587	0.577
Antebraço	0.303	0.526	0.647
Braço	0.322	0.542	0.645
Antebraço e mão	0.468	0.827	0.565
Membro superior	0.368	0.645	0.596
Pé	0.475	0.690	0.690
Perna	0.302	0.528	0.643
Coxa	0.323	0.540	0.653
Pé e perna	0.416	0.735	0.572
Membro inferior	0.326	0.560	0.650
Tronco (grande trocanter à glenohumeral)	0.496	0.798	0.621

Um exemplo de cálculo do momento de inércia: é dado: Calcule o momento de inércia da perna sobre seu centro de massa ( $I_o$ ), articulação proximal ( $I_p$ ) e distal ( $I_d$ ) de um sujeito de 80 kg:

Massa da perna =  $0.465 \times 80 = 3.72$  kg; O comprimento da perna é de 0.435 m e o raio de giro é de 0.528 para a articulação proximal e 0.643 para a articulação distal.

Sobre o centro de gravidade:

$$I_o = 3.72 (0.435 \times 0.302)^2 = 0.064 \text{ kg.m}^2$$

Sobre a articulação proximal

$$I_p = 3.72 (0.435 \times 0.528)^2 = 0.196 \text{ kg.m}^2$$

Sobre a articulação distal

$$I_d = 3.72 (0.435 \times 0.643)^2 = 0.291 \text{ kg.m}^2$$

O cálculo dos momentos de inércia ao redor do centro de massa do segmento corporais é fundamental para a determinação dos momentos uma vez que:

$$\sum M = I\alpha$$

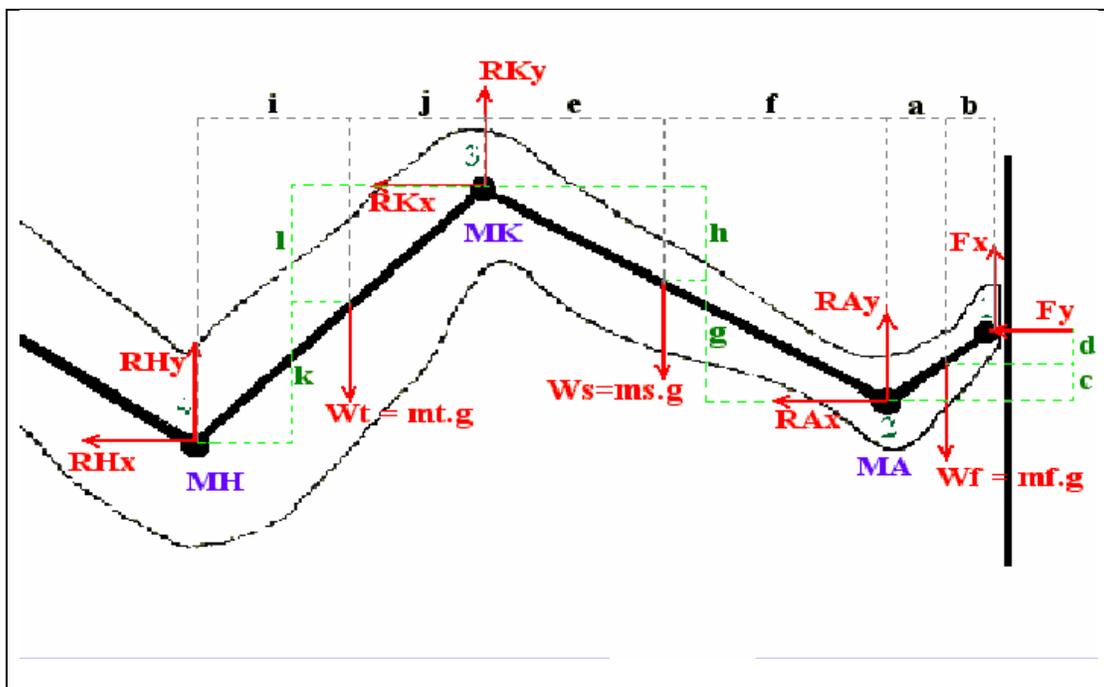
onde  $M$  corresponde ao momento gerado na articulação distal do segmento;  $I$  é o momento de inércia e  $\alpha$  é a aceleração do segmento no plano do movimento. Portanto,

$$M1 - (Rx1 * Dcmx) - (Ry1 * Dcmx) = I\alpha$$

onde  $M1$  é o momento na articulação distal;  $Rx1$  e  $Ry1$  são as forças de reação verticais e horizontais que atuam na articulação e  $Dcmx$  e  $Dcmx$  são as respectivas distâncias do centro de massa do segmento em relação a articulação. Os valores referentes as forças de reação vertical e horizontal na articulação pode ser calculada por;

$$\sum Fx = ma_x \quad e \quad \sum Fy = ma_y$$

onde,  $Fx$  e  $Fy$  são as forças articulares (muitas vezes as forças de reação do solo);  $m$  é a massa do segmento e  $a_x$  e  $a_y$  são as acelerações lineares do segmento. A figura abaixo (Figura 12 e 13) mostra graficamente cada um dos componentes da fórmulas acima:



**Figura 12** – Representação esquemática dos componentes utilizados para o cálculo das forças de reação articular e dos momentos.

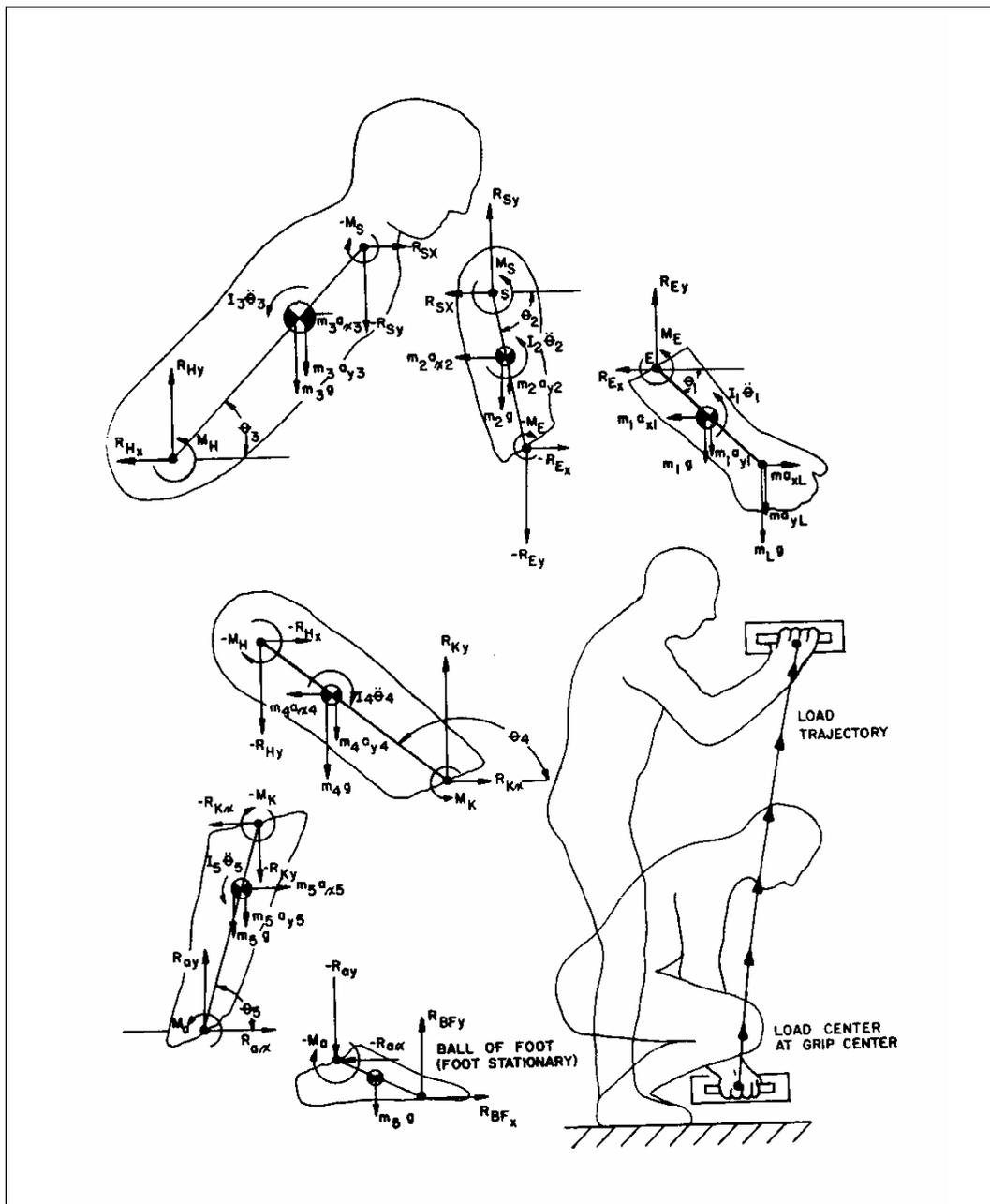


Figura 13 - Representação esquemática dos componentes utilizados para o cálculo das forças de reação articular durante o levantamento de uma carga.