

AIFIMM Formazione srl
Provider CPD 21418 (UK)
CE Broker ID 50-54885 (Florida USA)
Provider ECM 1701 (IT)
www.mskbiomechanics.com



AIFIMM Formazione srl
Instituto Superior
de Biomecánica
Neuro-Miofascial



Dr. Mauro Lastrico – Dra. Laura Manni

Equilibrio de los cuerpos

1 La naturaleza de la gravedad y sus implicaciones biomecánicas

Para comprender cómo el sistema muscular mantiene el equilibrio corporal es necesario examinar la naturaleza misma de la gravedad y sus implicaciones sobre la distribución de las fuerzas a través de las estructuras corporales.

La física newtoniana describe la gravedad como una atracción recíproca entre masas: dos cuerpos se atraen con una fuerza proporcional al producto de sus masas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que los separa.

En este modelo, el peso que percibimos resulta de la interacción entre nuestra masa y la terrestre.

La relatividad general de Einstein ha demostrado sucesivamente que la gravedad no es una fuerza en el sentido clásico, sino una deformación del espacio-tiempo causada por la masa.

En esta visión, los objetos en caída libre siguen el recorrido más directo en un espacio-tiempo curvado.

Para el análisis biomecánico de las fuerzas que actúan sobre el cuerpo humano, sin embargo, el modelo newtoniano mantiene suficiente precisión y mayor practicidad aplicativa.

Tal comprensión física determina como consecuencia que el sistema muscular no debe "oponerse" a la gravedad, siendo ésta una interacción intrínseca entre masas.

El objetivo del sistema muscular para el mantenimiento del equilibrio no es vencer la Fuerza Peso global G , sino asegurar su verticalización con el contratiempo R ejercido por el sólido de apoyo.

Su papel es por tanto el de gestionar la distribución de la fuerza peso a través de las estructuras corporales, manteniendo la alineación de los segmentos a fin de que las fuerzas se distribuyan de modo óptimo a través de las articulaciones, minimizando las concentraciones de carga potencialmente dañinas.

Veremos cómo esta perspectiva permite comprender el papel del sistema muscular en el mantenimiento del equilibrio.

En el lenguaje común se tiende a interpretar la gravedad como una fuerza que "aplasta" el cuerpo hacia abajo y a la cual el sistema muscular debería oponerse.

Desde el punto de vista biomecánico esta representación es engañosa: la gravedad actúa constantemente y de modo uniforme sobre todo el cuerpo, mientras que lo que varía realmente es cómo sus componentes son distribuidos a través de las estructuras corporales.

No es por tanto la gravedad la que determina las concentraciones de carga, sino la alineación — o la desalineación — de los segmentos y de los relativos baricentros.

2 Los principios del equilibrio según Newton

El tercer principio de la dinámica enunciado por Newton establece que "a cada acción corresponde una reacción igual y contraria".

Además de definir la fuerza de inercia, este principio explica que un cuerpo apoyado sobre un sólido no se hunde hacia el centro de la tierra porque el sólido mismo aplica al cuerpo una fuerza igual y contraria a la de su peso.

Cada cuerpo que reposa sobre un sólido está constantemente sometido a dos fuerzas: la Fuerza Peso (dada por masa por aceleración de gravedad) y el contratiro, igual y contrario, aplicado por el sólido R.

La Fuerza Peso corresponde al valor medido por una balanza sobre la cual el cuerpo está posicionado.

Ambas fuerzas están aplicadas y distribuidas sobre toda la superficie de apoyo.

3 Análisis del equilibrio: de lo general a lo particular

El análisis del equilibrio de un cuerpo es posible considerando dos niveles de detalle:

Nivel general: La fuerza global G aplicada al baricentro, a la cual reacciona un contratiro igual y contrario R ($R = -G$)

Nivel de detalle: Para cada centímetro cuadrado la componente g (parte de G) que actúa sobre el sólido de apoyo, el cual reacciona con una componente r igual y contraria a g ($r = -g$)

Donde G es igual a la suma de todas las g ($G = \Sigma g$) y R es igual a la suma de todas las r ($R = \Sigma r$).

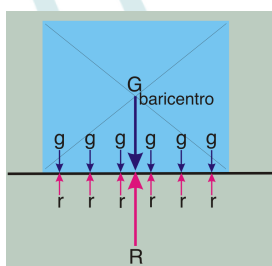


fig. 1

$$G = \Sigma g \quad R = \Sigma r \quad g = G / \text{área del polígono de sustentación} \quad r = -g \quad R = -G$$

La fuerza global G , aplicada al baricentro del cuerpo, está dada por la sumatoria de todos los componentes g aplicados por cada centímetro cuadrado de la base de apoyo. La fuerza global R , igual y contraria a G , está dada por la sumatoria de todos los componentes r . Los componentes g y r tienen fuerza igual y contraria ($r = -g$, $R = -G$).

4 Las condiciones de equilibrio

Un cuerpo se define en equilibrio estable cuando las dos fuerzas se encuentran sobre la misma vertical y en el centro del polígono de apoyo.

Cuando G y R están sobre la misma vertical pero en los límites del polígono de apoyo, el equilibrio es posible pero las fuerzas g y r , en lugar de distribuirse, convergen en un punto.

Cuando las dos fuerzas no se encuentran sobre la misma vertical se crea un momento de fuerza M que hace el equilibrio inestable.

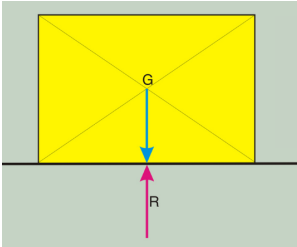


fig. 2: Las fuerzas G y R están sobre la misma vertical y en el centro del polígono de sustentación: el equilibrio es estable. Los componentes g y r están uniformemente distribuidos sobre la superficie de apoyo.

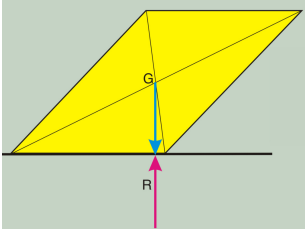


fig. 3: Las fuerzas G y R están sobre la misma vertical pero en los límites del polígono de sustentación. El equilibrio es posible pero los componentes g y r estarán mayormente concentrados sobre la intersección de G y R.

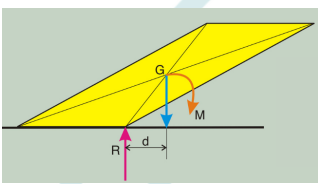


fig. 4: La proyección de G está más allá del polígono de sustentación. Las fuerzas de G y R determinan un momento de fuerza M dado por la suma de los momentos generados por las fuerzas individuales G y R multiplicadas por la semi-distancia:

$$M1 = G \times \frac{1}{2}d \quad M2 = R \times \frac{1}{2}d \quad M = M1 + M2$$

5 El sistema de múltiples elementos: la analogía de las cajas apiladas

Cuando múltiples cajas están apiladas, cada caja interactúa con la subyacente.

El equilibrio global será determinado por la modalidad de alineación.

Cada caja individual tendrá aplicadas las fuerzas G y R, y las fuerzas globales estarán dadas por su sumatoria.

Los componentes g y r estarán aplicados y distribuidos sobre todas las superficies de apoyo.

Si la alineación de las cajas no está sobre la misma vertical pero es de todos modos tal como para permitir el equilibrio, las fuerzas g y r estarán concentradas en algunos puntos, creando fenómenos estructurales de tipo compresivo.

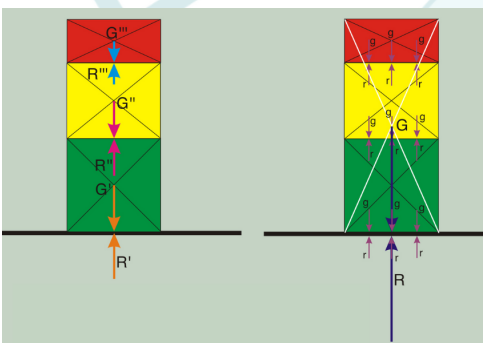


fig. 5: Todas las cajas están alineadas sobre la misma vertical. Cada baricentro tiene su fuerza G con la relativa reacción R en equilibrio estable. Los componentes g y r están uniformemente distribuidos sobre todas las superficies de apoyo. El sistema sufre compresiones estructurales distribuidas del modo óptimo.

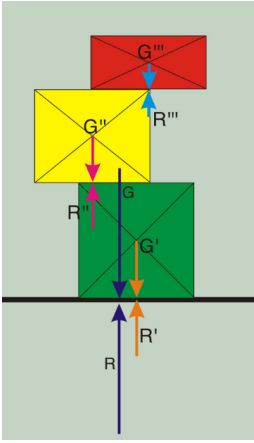


fig. 6: Las cajas están desalineadas pero el equilibrio es aún posible porque las resultantes G y R permanecen dentro del polígono de sustentación. Sin embargo, los componentes g y r se concentran sobre superficies restringidas, creando compresiones excesivas que con el tiempo pueden dañar las estructuras.

6 Aplicación al cuerpo humano: el papel del sistema muscular en el equilibrio

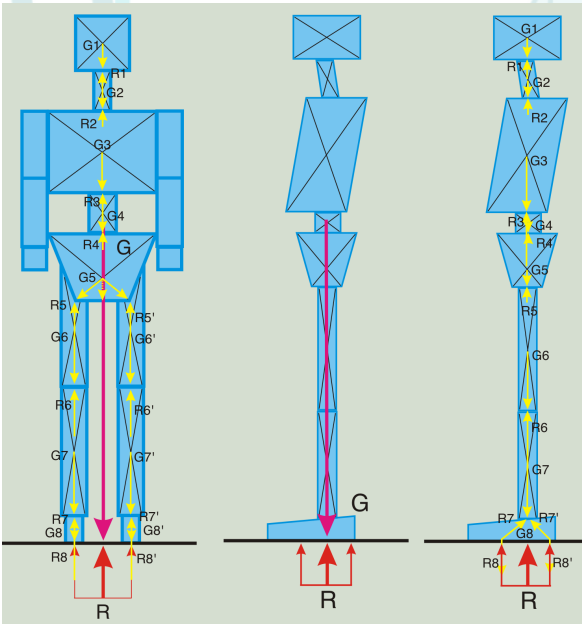
Cada parte del cuerpo humano posee un propio baricentro y el baricentro corporal global es la resultante de la suma de cada uno de ellos.

A cada baricentro individual está aplicada la fuerza G y el contratiempo R .

Si los baricentros individuales están desalineados se comportan como las cajas del ejemplo precedente: los componentes g y r , en lugar de distribuirse uniformemente, se concentran en puntos específicos creando fenómenos compresivos en las estructuras articulares.

El objetivo del sistema muscular es por tanto mantener sobre la misma vertical la fuerza global G y el contratiempo R a través de la alineación óptima de los baricentros segmentarios, minimizando así las concentraciones de carga sobre las articulaciones.

Fig. 7 - Con los elementos esqueléticos alineados, las fuerzas globales G y R y las fuerzas individuales aplicadas a cada baricentro corporal resultan correctamente posicionadas sobre la misma vertical. Los componentes g y r se distribuyen uniformemente sobre las estructuras articulares. En esta condición el sistema de control tónico-muscular trabaja a baja intensidad, con la capacidad de Trabajo del sistema muscular que prevalece sobre la fuerza resistente.



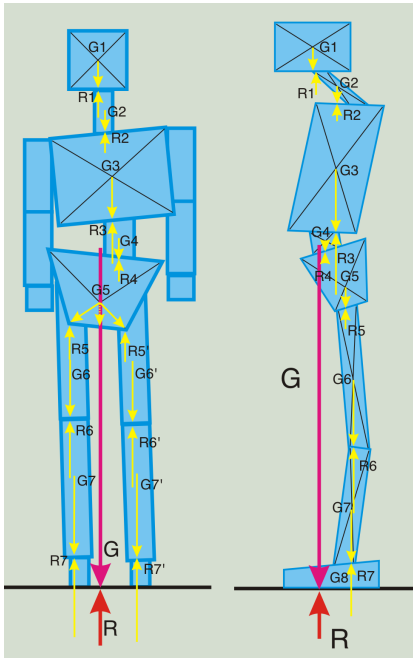


Fig. 8 - Con los elementos esqueléticos desalineados el equilibrio permanece posible pero las fuerzas individuales G y R ya no están sobre la misma vertical. Los componentes g y r se concentran sobre superficies articulares restringidas creando sollicitaciones asimétricas. Para mantener el equilibrio el sistema de control tónico-muscular debe activarse a alta intensidad, determinando el aumento de la fuerza resistente en detrimento de la capacidad de Trabajo.

7 La dinámica del equilibrio humano

Excepto en clinostasis, el equilibrio del hombre es inestable en cuanto el baricentro corporal está en continuo movimiento a causa del acto respiratorio y de otras variables fisiológicas.

La actividad tónico-postural de los músculos, bajo el control del sistema nervioso, está constantemente en variación de tono a fin de:

- Mantener sobre la misma vertical G y R para el mantenimiento de la estación erguida
- Crear el momento M cuando el objetivo es el movimiento



fig. 9: Vista posterior - El contratiempo R (flecha roja) está aplicado al centro del polígono de sustentación. El equilibrio es posible si la fuerza global G (flecha azul) está sobre la misma vertical. Las dos pacientes, teniendo los baricentros corporales individuales desalineados, deben aumentar el tono basal muscular, determinando el aumento de la Fuerza Resistente en detrimento de la Fuerza Trabajo.

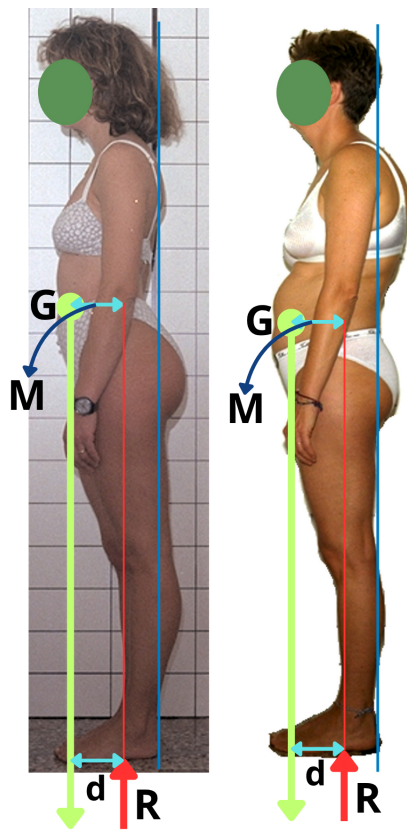


fig. 10: Vista lateral - El contratiempo R (flecha roja) está aplicado al centro del polígono de sustentación. La fuerza peso G (flecha verde) de las pacientes está anterior a la vertical de R, creando una distancia d . Se genera un momento de fuerza M que, sin adecuado incremento del tono basal, haría caer el cuerpo hacia adelante. La activación muscular que neutraliza M eleva la Fuerza Resistente (FR) y reduce la Fuerza Trabajo (FL). La línea celeste representa la alineación ideal de los volúmenes esqueléticos: sobre esta línea deberían encontrarse en roce el tercio superior de la pantorrilla, el sacro, la espina de D5 y el occipucio.

8 Conexión con el concepto de fuerza resistente y capacidad de Trabajo

Cuando los baricentros segmentarios están desalineados, determinados grupos musculares deben aumentar constantemente su tono para mantener el equilibrio.

Este incremento crónico del tono aumenta la fuerza resistente en detrimento de la capacidad de Trabajo, como se analizó en el capítulo precedente.

La fatiga muscular no deriva por tanto de la acción de la gravedad en sí, sino de la ineficiencia energética determinada por el hecho de tener que mantener alineaciones no óptimas.

Un sistema con baricentros correctamente alineados requiere el mínimo compromiso muscular para el mantenimiento de la posición.

La comprensión de estos conceptos tiene implicaciones directas sobre el enfoque evaluativo: el análisis debe individualizar los acortamientos que alteran la alineación de los baricentros y mapear las consiguientes estrategias compensatorias que el sistema adopta para mantener el equilibrio.

9 Las consecuencias de los acortamientos musculares sobre el equilibrio

Los músculos acortados, como se analizó en el capítulo precedente, alteran la posición de los baricentros segmentarios.

Tal alteración obliga al sistema de control neuromuscular a poner en acto estrategias compensatorias a través de la modulación del tono muscular, a fin de mantener el baricentro corporal global G sobre la vertical del contratiro R.

La desalineación de los baricentros segmentarios determina, como consecuencia mecánica inevitable, la concentración de los componentes g y r sobre superficies articulares restringidas.

Tales concentraciones de carga representan el efecto del intento del sistema de mantener el equilibrio en presencia de acortamientos musculares, no la causa primaria del problema.

Estos ajustes ocurren a través de procesos integrativos automáticos del sistema nervioso.

El acortamiento de un grupo muscular puede determinar por tanto una cadena de adaptaciones: si, por ejemplo, los isquiocrurales están acortados, el baricentro de la pelvis podría desplazarse posteriormente respecto a la vertical con el arco medial plantar donde está aplicado el contratiro R.

Para mantener el equilibrio global G-R, el sistema modula automáticamente el tono de otros grupos musculares, creando una secuencia de alteraciones que involucra a todo el sistema músculo-esquelético.

El modelo bidimensional utilizado en este capítulo representa una simplificación didáctica.

En la realidad clínica, el control del equilibrio involucra movimientos tridimensionales con rotaciones sobre todos los planos y oscilaciones fisiológicas continuas.

El principio fundamental sin embargo permanece: el sistema muscular persigue como objetivo primario el mantenimiento del equilibrio en el espacio y cuando están presentes acortamientos, este objetivo se alcanza a través de compensaciones que determinan concentraciones de los componentes g y r sobre superficies articulares restringidas.

10 Síntesis del capítulo

En este capítulo han sido analizados los principios físicos que regulan el equilibrio del cuerpo humano y el papel del sistema muscular en su mantenimiento.

Los conceptos fundamentales tratados son:

- La naturaleza de la gravedad como interacción entre masas y sus implicaciones biomecánicas: el sistema muscular no "se opone" a la gravedad sino que gestiona la distribución de las fuerzas a través de las estructuras corporales
- La aplicación del tercer principio de Newton al equilibrio corporal: cada cuerpo está sometido a la fuerza peso G y al contratiro R del suelo, con los relativos componentes g y r distribuidos sobre las superficies de apoyo
- Las condiciones de equilibrio: estable cuando G y R están sobre la misma vertical en el centro del polígono de apoyo; inestable cuando se genera un momento de fuerza M
- La analogía del sistema músculo-esquelético con cajas apiladas: la desalineación de los baricentros segmentarios determina concentraciones de los componentes g y r sobre superficies restringidas
- El papel del sistema muscular en mantener la alineación de los baricentros segmentarios para optimizar la distribución de las fuerzas articulares

- La relación entre desalineación de los baricentros y aumento de la fuerza resistente en detrimento de la capacidad de Trabajo
- Las consecuencias sistémicas de los acortamientos musculares: alteración de los baricentros segmentarios, compensaciones musculares en cadena y concentraciones de carga articular como efecto mecánico inevitable

Bibliografía

1. Gelenti A, Gettys WE. *Física con física moderna*. Milano: McGraw-Hill; 2007.
2. Halliday D, Resnick R, Walker J. *Fundamentals of Physics*. 10th ed. Hoboken: Wiley; 2013.
3. Tipler PA, Mosca G. *Physics for Scientists and Engineers*. 6th ed. New York: W. H. Freeman; 2008.
4. Fung YC. *Biomechanics: Mechanical Properties of Living Tissues*. 2nd ed. New York: Springer; 1993.
5. Zajac FE. Muscle and tendon: properties, models, scaling, and application to biomechanics and motor control. *Crit Rev Biomed Eng*. 1989;17(4):359–411.
6. Winter DA. *Biomechanics and Motor Control of Human Movement*. 4th ed. Hoboken: Wiley; 2009.
7. Shumway-Cook A, Woollacott M. *Motor Control: Translating Research into Clinical Practice*. 4th ed. Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins; 2012.
8. Kapandji IA. *Fisiologia articolare*. 6th ed. Milano: Marrapese; 2008.
9. Panjabi MM. The stabilizing system of the spine. Part I. Function, dysfunction, adaptation, and enhancement. *J Spinal Disord*. 1992;5(4):383–9.
10. Guyton AC, Hall JE. *Textbook of Medical Physiology*. 13th ed. Philadelphia: Elsevier; 2016.
11. Latash ML. *Fundamentals of Motor Control*. London: Academic Press; 2012.
12. Lastrico M. *Muscle Shortening and Joint Dysfunction: a Physical-Clinical Explanation*. The CPD Certification Service; 2025.