

Equilibrio del corpo umano: principi fisici e implicazioni biomeccaniche

dott. Mauro Lastrico – dott.ssa Laura Manni

Equilibrio dei corpi

1 La natura della gravità e le sue implicazioni biomeccaniche

Per comprendere come il sistema muscolare mantiene l'equilibrio corporeo è necessario esaminare la natura stessa della gravità e le sue implicazioni sulla distribuzione delle forze attraverso le strutture corporee.

La fisica newtoniana descrive la gravità come un'attrazione reciproca tra masse: due corpi si attraggono con una forza proporzionale al prodotto delle loro masse e inversamente proporzionale al quadrato della distanza che li separa.

In questo modello, il peso che percepiamo risulta dall'interazione tra la nostra massa e quella terrestre.

La relatività generale di Einstein ha successivamente dimostrato che la gravità non è una forza nel senso classico, ma una deformazione dello spazio-tempo causata dalla massa.

In questa visione, gli oggetti in caduta libera seguono il percorso più diretto in uno spazio-tempo curvato.

Per l'analisi biomeccanica delle forze agenti sul corpo umano, tuttavia, il modello newtoniano mantiene sufficiente precisione e maggiore praticità applicativa.

Tale comprensione fisica determina come conseguenza che il sistema muscolare non deve "opporsi" alla gravità, essendo questa un'interazione intrinseca tra masse.

L'obiettivo del sistema muscolare per il mantenimento dell'equilibrio, non è vincere la Forza Peso complessiva G, ma assicurare la sua verticalizzazione con la contropinta R esercitata dal solido di appoggio.

Il suo ruolo è quindi quello di gestire la distribuzione della forza peso attraverso le strutture corporee, mantenendo l'allineamento dei segmenti affinché le forze si distribuiscano in modo ottimale attraverso le articolazioni, minimizzando le concentrazioni di carico potenzialmente dannose.

Vedremo come questa prospettiva permetta di comprendere il ruolo del sistema muscolare nel mantenimento dell'equilibrio.

2 I principi dell'equilibrio secondo Newton

Il terzo principio della dinamica enunciato da Newton stabilisce che "ad ogni azione corrisponde una reazione uguale e contraria".

Oltre a definire la forza d'inerzia, questo principio spiega che un corpo appoggiato a un solido non sprofonda verso il centro della terra perché il solido stesso applica al corpo una forza uguale e contraria a quella del suo peso.

Ogni corpo che poggia su un solido è costantemente sottoposto a due forze: la Forza Peso (data da massa per accelerazione di gravità) e la controspinta, uguale e contraria, applicata dal solido R.

La Forza Peso corrisponde al valore misurato da una bilancia su cui il corpo è posizionato.

Entrambe le forze sono applicate e distribuite su tutta la superficie di appoggio.

3.3 Analisi dell'equilibrio: dal generale al particolare

L'analisi dell'equilibrio di un corpo è possibile considerando due livelli di dettaglio:

Livello generale: La forza complessiva G applicata al baricentro, a cui reagisce una controspinta uguale e contraria R ($R = -G$)

Livello di dettaglio: Per ogni centimetro quadrato la componente g (parte di G) che agisce sul solido di appoggio, il quale reagisce con una componente r uguale e contraria a g ($r = -g$)

Dove G è uguale alla somma di tutti i g ($G = \Sigma g$) ed R è uguale alla somma di tutte le r ($R = \Sigma r$).

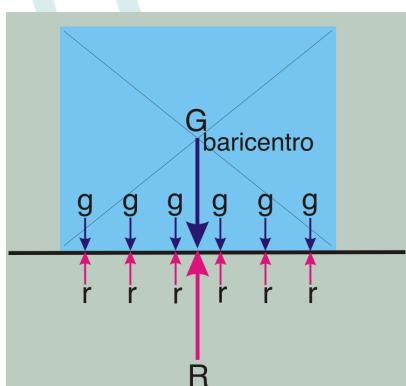


fig. 1

- $G = \Sigma g$
- $R = \Sigma r$
- $g = G / \text{area del poligono di sostegno}$
- $r = -g$
- $R = -G$

La forza complessiva G, applicata al baricentro del corpo, è data dalla sommatoria di tutte le componenti g applicate per ogni centimetro quadrato della base di appoggio. La forza complessiva R, uguale e contraria a G, è data dalla sommatoria di tutte le componenti r. Le componenti g ed r hanno forza uguale e contraria ($r = -g$, $R = -G$).

4 Le condizioni di equilibrio

Un corpo si definisce in equilibrio stabile quando le due forze si trovano sulla stessa verticale e al centro del poligono di appoggio.

Quando G ed R sono sulla stessa verticale ma ai limiti del poligono di appoggio, l'equilibrio è possibile ma le forze g ed r, anziché distribuirsi, convergono in un punto.

Quando le due forze non si trovano sulla stessa verticale si crea un momento di forza M che rende l'equilibrio instabile.

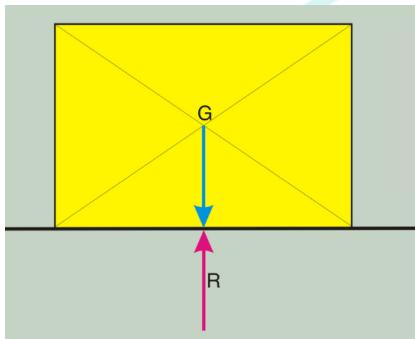


fig. 2: Le forze G ed R sono sulla stessa verticale e al centro del poligono di sostegno: l'equilibrio è stabile. Le componenti g ed r sono uniformemente distribuite sulla superficie di appoggio.

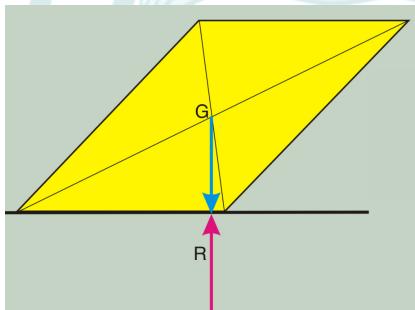


fig. 3: Le forze G ed R sono sulla stessa verticale ma ai limiti del poligono di sostegno. L'equilibrio è possibile ma le componenti g ed r saranno maggiormente concentrate sull'intersezione di G ed R.

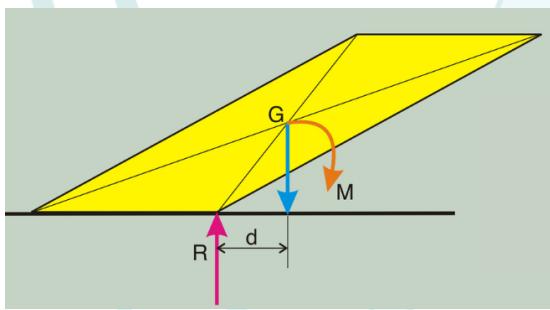


fig. 4: La proiezione di G è oltre il poligono di sostegno. Le forze di G ed R determinano un momento di forza M dato dalla somma dei momenti generati dalle singole forze G ed R moltiplicate la emi-distanza:

- $M_1 = G \times \frac{1}{2}d$
- $M_2 = R \times \frac{1}{2}d$
- $M = M_1 + M_2$

5 Il sistema a più elementi: l'analogia delle scatole impilate

Quando più scatole sono impilate, ogni scatola interagisce con la sottostante.

L'equilibrio complessivo sarà determinato dalla modalità di allineamento.

Ogni singola scatola avrà applicate le forze G ed R, e le forze complessive saranno date dalla loro sommatoria.

Le componenti g ed r saranno applicate e distribuite su tutte le superfici di appoggio.

Se l'allineamento delle scatole non è sulla stessa verticale ma è comunque tale da permettere l'equilibrio, le forze g ed r saranno concentrate in alcuni punti, creando fenomeni strutturali di tipo compressivo.

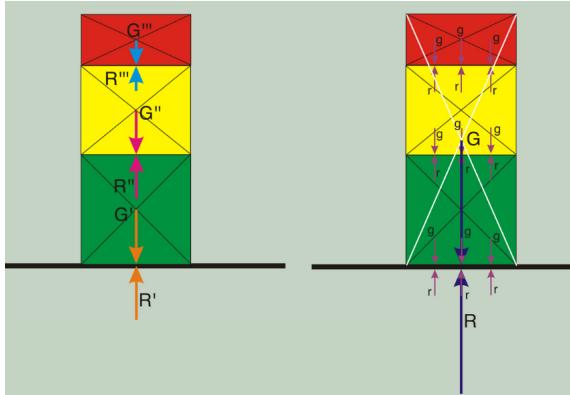


fig. 5: Tutte le scatole sono allineate sulla stessa verticale. Ogni baricentro ha la sua forza G con la relativa reazione R in equilibrio stabile. Le componenti g ed r sono uniformemente distribuite su tutte le superfici di appoggio. Il sistema subisce compressioni strutturali distribuite nel modo ottimale.

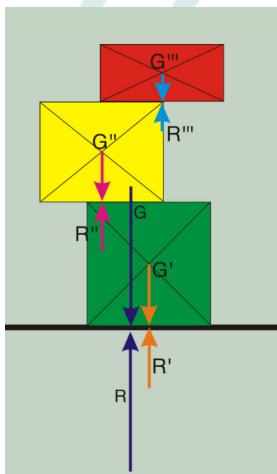


fig. 6: Le scatole sono disallineate ma l'equilibrio è ancora possibile perché le risultanti G ed R rimangono dentro il poligono di sostegno. Tuttavia, le componenti g ed r si concentrano su superfici ristrette, creando compressioni eccessive che nel tempo possono danneggiare le strutture.

fig. 6: Le scatole sono disallineate ma l'equilibrio è ancora possibile perché le risultanti G ed R rimangono dentro il poligono di sostegno. Tuttavia, le componenti g ed r si concentrano su superfici ristrette, creando compressioni eccessive che nel tempo possono danneggiare le strutture.

6 Applicazione al corpo umano: il ruolo del sistema muscolare nell'equilibrio

Ogni parte del corpo umano possiede un proprio baricentro e il baricentro corporeo complessivo è la risultante della somma di ognuno di essi.

A ogni singolo baricentro è applicata la forza G e la controspinta R .

Se i singoli baricentri sono disallineati si comportano come le scatole dell'esempio precedente: le componenti g ed r , anziché distribuirsi uniformemente, si concentrano in punti specifici creando fenomeni compressivi alle strutture articolari.

L'obiettivo del sistema muscolare è quindi mantenere sulla stessa verticale la forza complessiva G e la controspinta R attraverso l'allineamento ottimale dei baricentri segmentari, minimizzando così le concentrazioni di carico sulle articolazioni.

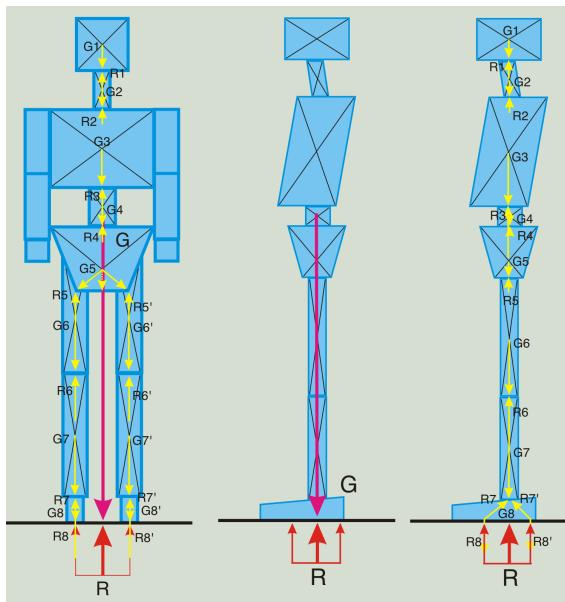


Fig. 7 - Con gli elementi scheletrici allineati, le forze complessive G ed R e le singole forze applicate a ogni baricentro corporeo risultano correttamente posizionate sulla stessa verticale. Le componenti g ed r si distribuiscono uniformemente sulle strutture articolari. In questa condizione il sistema di controllo tonico-muscolare lavora a bassa intensità, con la capacità di Lavoro del sistema muscolare che prevale sulla forza resistente.

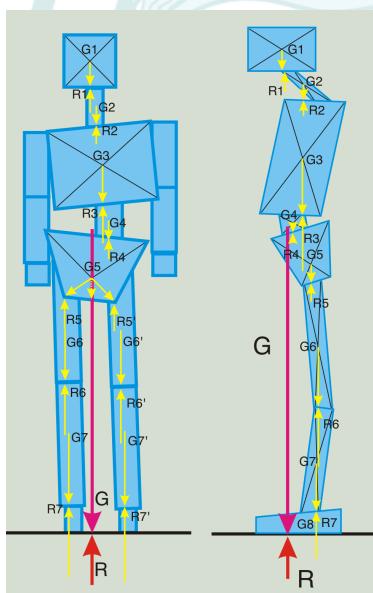


Fig. 8 - Con gli elementi scheletrici disallineati l'equilibrio rimane possibile ma le singole forze G ed R non sono più sulla stessa verticale. Le componenti g ed r si concentrano su superfici articolari ristrette creando sollecitazioni asimmetriche. Per mantenere l'equilibrio il sistema di controllo tonico-muscolare deve attivarsi ad alta intensità, determinando l'aumento della forza resistente a scapito della capacità di Lavoro.

7 La dinamica dell'equilibrio umano

Tranne che in clinostasi, l'equilibrio dell'uomo è instabile in quanto il baricentro corporeo è in continuo movimento a causa dell'atto respiratorio e di altre variabili fisiologiche.

L'attività tonico-posturale dei muscoli, sotto il controllo del sistema nervoso, è costantemente in variazione di tono al fine di:

- Mantenere sulla stessa verticale G ed R per il mantenimento della stazione eretta
- Creare il momento M quando l'obiettivo è il movimento



fig. 9: Vista posteriore - La controspinta R (freccia rossa) è applicata al centro del poligono di sostegno. L'equilibrio è possibile se la forza complessiva G (freccia blu) è sulla stessa verticale. Le due pazienti, avendo i singoli baricentri corporei disallineati, devono aumentare il tono basale muscolare, determinando l'aumento della Forza Resistente a scapito della Forza Lavoro.

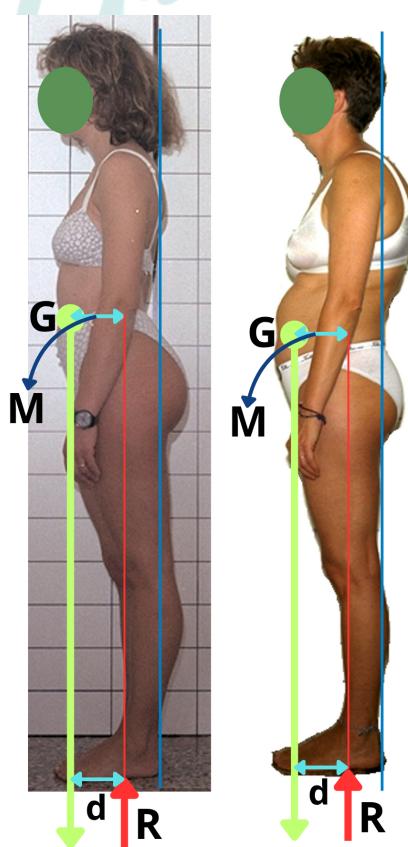


fig. 10: Vista laterale - La controspinta R (freccia rossa) è applicata al centro del poligono di sostegno. La forza peso G (freccia verde) delle pazienti è anteriore alla verticale di R, creando una distanza d. Si genera un momento di forza M che, senza adeguato incremento del tono basale, farebbe cadere il corpo in avanti. L'attivazione muscolare che neutralizza M innalza la Forza Resistente (FR) e riduce la Forza Lavoro (FL). La linea azzurra rappresenta l'allineamento ideale dei volumi scheletrici: su questa linea dovrebbero trovarsi in sfioramento il terzo superiore del polpaccio, il sacro, la spinosa di D5 e l'occipite.

8 Connessione con il concetto di forza resistente e capacità di Lavoro

Quando i baricentri segmentari sono disallineati, determinati gruppi muscolari devono aumentare costantemente il loro tono per mantenere l'equilibrio.

Questo incremento cronico del tono aumenta la forza resistente a scapito della capacità di Lavoro, come analizzato nel capitolo precedente.

L'affaticamento muscolare non deriva quindi dall'azione della gravità in sé, ma dall'inefficienza energetica determinata dal dover mantenere allineamenti non ottimali.

Un sistema con baricentri correttamente allineati richiede il minimo impegno muscolare per il mantenimento della posizione.

La comprensione di questi concetti ha implicazioni dirette sull'approccio valutativo: l'analisi deve individuare gli accorciamenti che alterano l'allineamento dei baricentri e mappare le conseguenti strategie compensatorie che il sistema adotta per mantenere l'equilibrio.

9 Le conseguenze degli accorciamenti muscolari sull'equilibrio

I muscoli accorciati, come analizzato nel capitolo precedente, alterano la posizione dei baricentri segmentari.

Tale alterazione costringe il sistema di controllo neuromuscolare a mettere in atto strategie compensatorie attraverso la modulazione del tono muscolare, al fine di mantenere il baricentro corporeo complessivo G sulla verticale della controspinta R.

Il disallineamento dei baricentri segmentari determina, come conseguenza meccanica inevitabile, la concentrazione delle componenti g ed r su superfici articolari ristrette.

Tali concentrazioni di carico rappresentano l'effetto del tentativo del sistema di mantenere l'equilibrio in presenza di accorciamenti muscolari, non la causa primaria del problema.

Questi aggiustamenti avvengono attraverso processi integrativi automatici del sistema nervoso.

L'accorciamento di un gruppo muscolare può determinare quindi una catena di adattamenti: se, ad esempio, gli ischio-crurali sono accorciati, il baricentro del bacino potrebbe spostarsi posteriormente rispetto alla verticale con l'arco mediale plantare ove è applicata la controspinta R.

Per mantenere l'equilibrio complessivo G-R, il sistema modula automaticamente il tono di altri gruppi muscolari, creando una sequenza di alterazioni che coinvolge l'intero sistema muscolo-scheletrico.

Il modello bidimensionale utilizzato in questo capitolo rappresenta una semplificazione didattica.

Nella realtà clinica, il controllo dell'equilibrio coinvolge movimenti tridimensionali con rotazioni su tutti i piani e oscillazioni fisiologiche continue.

Il principio fondamentale tuttavia rimane: il sistema muscolare persegue come obiettivo primario il mantenimento dell'equilibrio nello spazio e quando sono presenti accorciamenti, questo obiettivo viene raggiunto attraverso compensazioni che determinano concentrazioni delle componenti g ed r su superfici articolari ristrette.

10 Concetti chiave

In questo capitolo sono stati analizzati i principi fisici che regolano l'equilibrio del corpo umano e il ruolo del sistema muscolare nel suo mantenimento.

I concetti fondamentali trattati sono:

- La natura della gravità come interazione tra masse e le sue implicazioni biomeccaniche: il sistema muscolare non "si oppone" alla gravità ma gestisce la distribuzione delle forze attraverso le strutture corporee
- L'applicazione del terzo principio di Newton all'equilibrio corporeo: ogni corpo è sottoposto alla forza peso G e alla controspinta R del suolo, con le relative componenti g ed r distribuite sulle superfici di appoggio
- Le condizioni di equilibrio stabile quando G ed R sono sulla stessa verticale al centro del poligono di appoggio, e l'instabilità quando si genera un momento di forza M
- L'analogia del sistema muscolo-scheletrico con scatole impilate: il disallineamento dei baricentri segmentari determina concentrazioni delle componenti g ed r su superfici ristrette
- Il ruolo del sistema muscolare nel mantenere l'allineamento dei baricentri segmentari per ottimizzare la distribuzione delle forze articolari
- La relazione tra disallineamento dei baricentri e aumento della forza resistente a scapito della capacità di Lavoro
- Le conseguenze sistemiche degli accorciamenti muscolari: alterazione dei baricentri segmentari, compensazioni muscolari a catena e concentrazioni di carico articolare come effetto meccanico inevitabile