

Biomeccanica

Corso di Fisica
A.A. 2024-2025



Sommario

- Introduzione
- Equilibrio delle articolazioni
 - Esempio: articolazione dell'anca
- Le leve meccaniche del corpo umano (1° , 2° e 3° tipo)
- Legge di Hooke applicata alle fratture ossee
- Contrazione muscolare
- Meccanica della locomozione



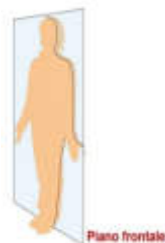
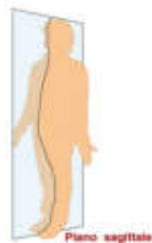
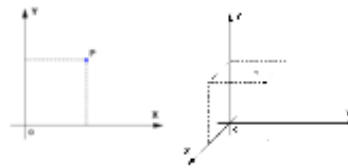
Introduzione

- La Biomeccanica è diventata sempre più importante
 - per i notevoli [risvolti terapeutici](#)
 - per il notevole interesse e sviluppo degli studi medici connessi con [l'attività sportiva](#).
- I concetti della Meccanica applicati alla fisiologia dell'apparato locomotore sono appunto le fondamenta su cui si sviluppano gli studi e le ricerche di Medicina sportiva.
- Le articolazioni nei sistemi biologici dotati di *eso-* od *endo-* scheletro sono costituite da strutture a snodo che ne permettono il movimento, il cui equilibrio è determinato dall'azione di forze peso, di reazioni vincolari e di forze di trazione muscolare.



Sistema di riferimento

- In anatomia il sistema utilizzato è quello che fa riferimento ad una terna di assi sui tre piani denominati:
 - Sagittale
 - Frontale
 - Orizzontale



Equilibrio delle articolazioni



Equilibrio delle articolazioni

- Le condizioni di equilibrio:

$$\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 + \dots + \vec{F}_N = \sum_1^N \vec{F}_i = \vec{F}_{NET} = \vec{R} = 0$$

$$\vec{M}_1 + \vec{M}_2 + \vec{M}_3 + \dots + \vec{M}_N = \sum_1^N \vec{M}_i = \vec{M}_T = 0$$

- corrispondono, in generale, a 6 relazioni scalari, relative alle componenti dei vettori \mathbf{R} e \mathbf{M}_T lungo i 3 assi coordinati x, y, z , che devono essere soddisfatte *contemporaneamente*:

$$\left\{ \begin{array}{l} \vec{F}_{1x} + \vec{F}_{2x} + \vec{F}_{3x} + \dots + \vec{F}_{Nx} = \vec{R}_x = 0 \end{array} \right. \quad (1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \vec{F}_{1y} + \vec{F}_{2y} + \vec{F}_{3y} + \dots + \vec{F}_{Ny} = \vec{R}_y = 0 \end{array} \right. \quad (2)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \vec{F}_{1z} + \vec{F}_{2z} + \vec{F}_{3z} + \dots + \vec{F}_{Nz} = \vec{R}_z = 0 \end{array} \right. \quad (3)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \vec{M}_{1x} + \vec{M}_{2x} + \vec{M}_{3x} + \dots + \vec{M}_{Nx} = \vec{M}_{Tx} = 0 \end{array} \right. \quad (4)$$

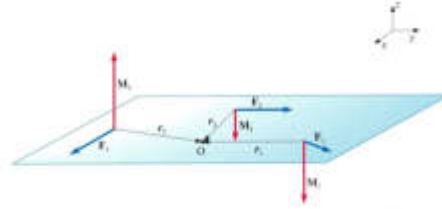
$$\left\{ \begin{array}{l} \vec{M}_{1y} + \vec{M}_{2y} + \vec{M}_{3y} + \dots + \vec{M}_{Ny} = \vec{M}_{Ty} = 0 \end{array} \right. \quad (5)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \vec{M}_{1z} + \vec{M}_{2z} + \vec{M}_{3z} + \dots + \vec{M}_{Nz} = \vec{M}_{Tz} = 0 \end{array} \right. \quad (6)$$



Equilibrio delle articolazioni

- **Semplificazione:**
 - considerare le forze giacenti tutte nello stesso piano
 - scegliere il punto O (rispetto a cui calcolare i momenti delle forze) appartenente al piano
- **Avremo, quindi:**
 - le condizioni (3), (4) e (5) soddisfatte
 - l'equilibrio determinato dalle sole (1), (2) e (6).

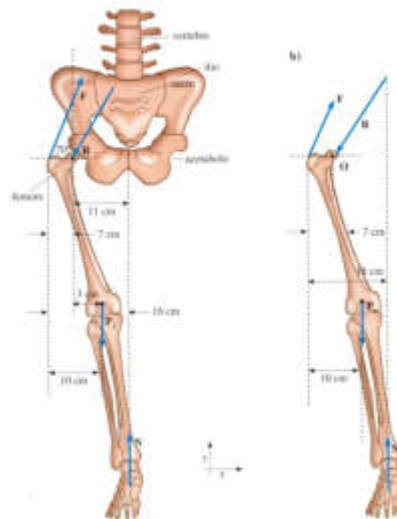


$$\begin{cases}
 \vec{F}_{1x} + \vec{F}_{2x} + \vec{F}_{3x} + \dots + \vec{F}_{Nx} = \vec{R}_x = 0 & (1) \\
 \vec{F}_{1y} + \vec{F}_{2y} + \vec{F}_{3y} + \dots + \vec{F}_{Ny} = \vec{R}_y = 0 & (2) \\
 \vec{F}_{1z} + \vec{F}_{2z} + \vec{F}_{3z} + \dots + \vec{F}_{Nz} = \vec{R}_z = 0 & (3) \\
 \dots & \dots \\
 \vec{M}_{1x} + \vec{M}_{2x} + \vec{M}_{3x} + \dots + \vec{M}_{Nx} = \vec{M}_{Tx} = 0 & (4) \\
 \vec{M}_{1y} + \vec{M}_{2y} + \vec{M}_{3y} + \dots + \vec{M}_{Ny} = \vec{M}_{Ty} = 0 & (5) \\
 \vec{M}_{1z} + \vec{M}_{2z} + \vec{M}_{3z} + \dots + \vec{M}_{Nz} = \vec{M}_{Tz} = 0 & (6)
 \end{cases}$$



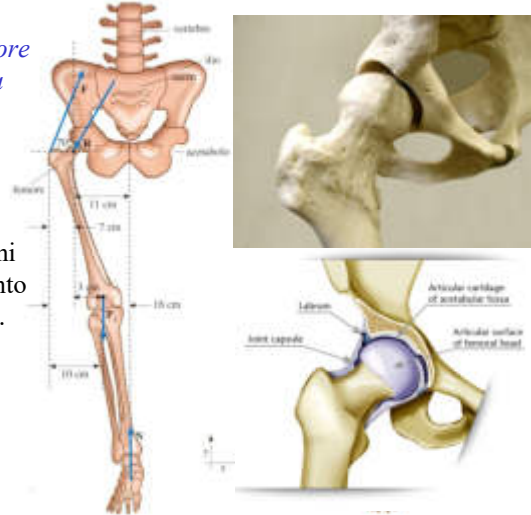
Esempio: articolazione dell'anca

- Si studia l'equilibrio di un'articolazione per capirne il funzionamento dettagliato e per conoscere l'azione di alcune forze, in parte o completamente incognite.
- A titolo di esempio studiamo l'equilibrio dell'articolazione dell'anca.



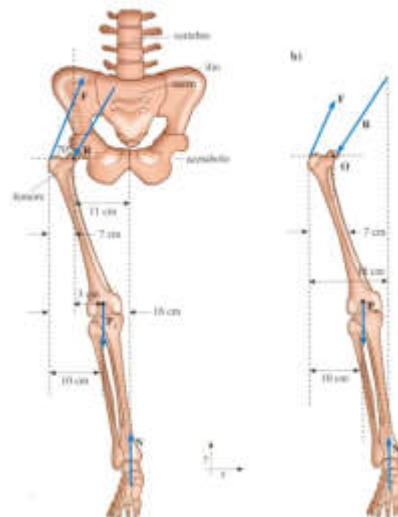
Esempio: articolazione dell'anca

- L'articolazione dell'anca è costituita dalla testa del *femore* che si inserisce *nella cintura pelvica* entro una cavità, chiamata *acetabolo*.
- Tra la testa del femore e l'acetabolo vi sono cartilagini che garantiscono il movimento reciproco quasi senza attrito.



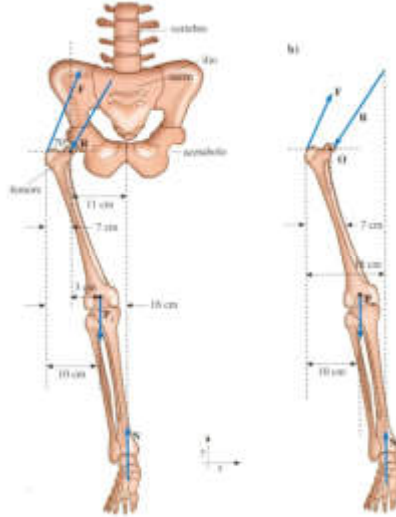
Esempio: articolazione dell'anca

- Consideriamo l'equilibrio quando il soggetto è in piedi su un piede solo e supponiamo che il sistema sia isolato e che le forze agiscano tutte nel piano verticale passante per l'articolazione.



Esempio: articolazione dell'anca

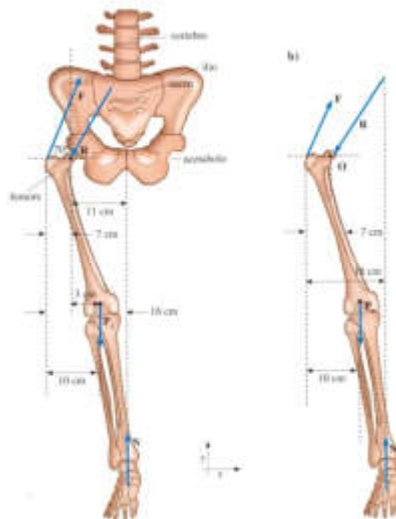
- Le forze che agiscono sul sistema sono:
 - la **forza F** di trazione dei muscoli **abduuttori** (glutei) che agiscono sul **trocantere maggiore**, di modulo incognito, ma diretta a circa 70° rispetto all'orizzontale,
 - la **forza peso** della gamba P_g diretta verticalmente, applicata nel baricentro della gamba e avente modulo pari a circa $1/7$ della forza peso P del corpo,
 - la **reazione vincolare N** del suolo, dovuta alla forza peso P , uguale ad essa in modulo e direzione ma con verso opposto,
 - la **forza R** che agisce sulla testa del femore, totalmente incognita, la quale tiene conto della forza peso del corpo (senza la gamba sottostante) che si scarica sull'articolazione.
- Vogliamo appunto determinare questa forza in condizioni di equilibrio del sistema.



Esempio: articolazione dell'anca

- Scegliamo il punto O, rispetto a cui calcolare i momenti delle forze suddette, coincidente con la testa del femore.
- In questo modo il momento della forza R sarà nullo (*il braccio è zero*) $M_R = 0$.
- nel solo piano verticale x,y le condizioni di equilibrio si riducono alle:

$$\begin{cases} \vec{F}_x + \vec{P}_{gx} + \vec{N}_x + \vec{R}_x = 0 \\ \vec{F}_y + \vec{P}_{gy} + \vec{N}_y + \vec{R}_y = 0 \\ \vec{M}_{Fz} + \vec{M}_{Pgz} + \vec{M}_{Nz} + \vec{M}_{Rz} = 0 \end{cases}$$



Esempio: articolazione dell'anca

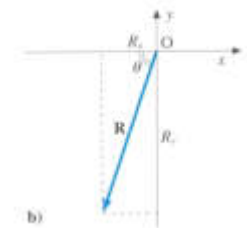
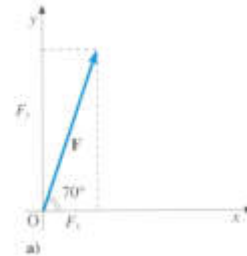
$$\begin{cases} \vec{F}_x + \vec{P}_{gx} + \vec{N}_x + \vec{R}_x = 0 \\ \vec{F}_y + \vec{P}_{gy} + \vec{N}_y + \vec{R}_y = 0 \\ \vec{M}_{Fz} + \vec{M}_{Pgz} + \vec{M}_{Nz} + \vec{M}_{Rz} = 0 \end{cases}$$

$$\begin{cases} F \cdot \cos(70^\circ) - R_x = 0 \\ F \cdot \sin(70^\circ) - R_y - \frac{1}{7} \cdot P + P = 0 \\ F \cdot (7\text{cm}) \cdot \sin(70^\circ) + \frac{1}{7} \cdot P \cdot (3\text{cm}) - P \cdot (11\text{cm}) = 0 \end{cases}$$

- Dall'ultima relazione si ottiene $F=1.61 \times P$, che inserita nelle precedenti fornisce:

$$R = 2.43 \cdot P$$

$$\theta = 77^\circ$$



Esempio: articolazione dell'anca

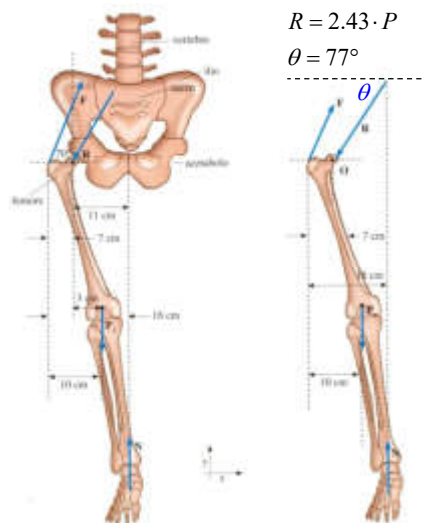
Considerazioni:

- lo stato di equilibrio su un solo piede è quello in cui si passa alternativamente dall'equilibrio su un piede alla condizione normale nella deambulazione, l'equilibrio sull'altro piede.
- Il risultato dell'equilibrio fornisce una forza R che agisce sulla testa del femore, dal modulo assai rilevante, pari circa due volte e mezzo la forza peso P del corpo:

$$R = 2.43 \cdot P$$

$$\theta = 77^\circ$$

- ciò significa che lo sforzo sulle cartilagini di questa articolazione è notevole e che ci si può aspettare una loro consistente usura nel tempo, fatto che spesso si verifica negli anziani, con la necessità di sostituire l'articolazione con protesi.

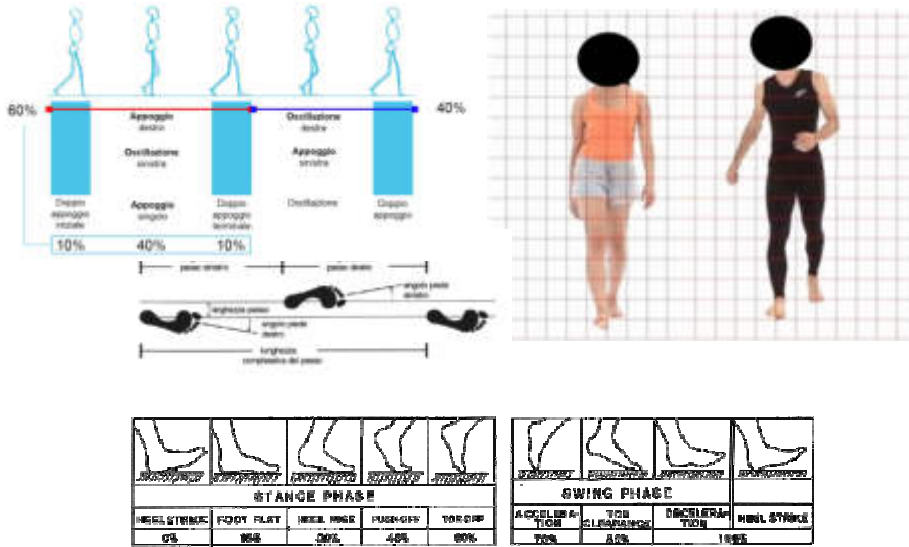


$$R = 2.43 \cdot P$$

$$\theta = 77^\circ$$



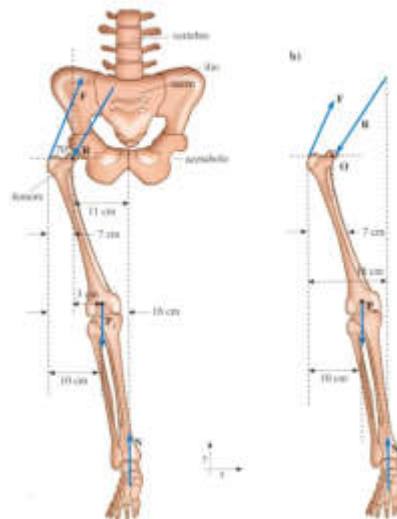
Deambulazione



Esempio: articolazione dell'anca

Considerazioni:

- L'angolo d'azione e della forza R (poiché il tessuto osseo tende a crescere nella stessa direzione dello sforzo a esso applicato) costituisce il motivo della deviazione della testa del femore, rispetto al resto del femore.

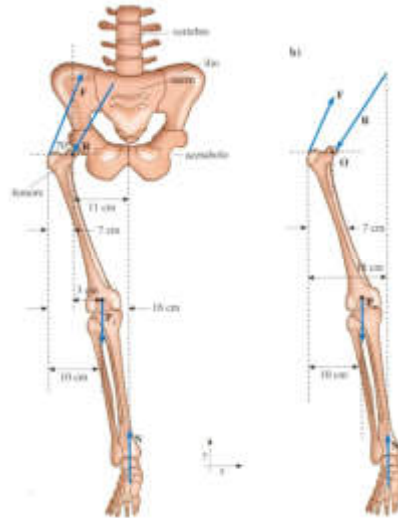


Esempio: articolazione dell'anca

Considerazioni:

- Se, a causa di una frattura del femore, il soggetto è costretto ad un riposo prolungato, la forza dei muscoli abduttori F si indebolisce.
- Ciò ha come conseguenza che l'equilibrio, nella deambulazione, viene garantito da una forza R diretta più verticalmente (al limite se fosse $F=0$, R sarebbe verticale, come si può verificare dalla relazione

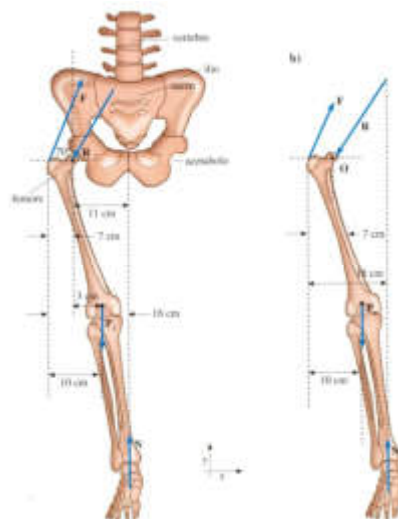
$$F \cdot \cos(70^\circ) - R_x = 0$$



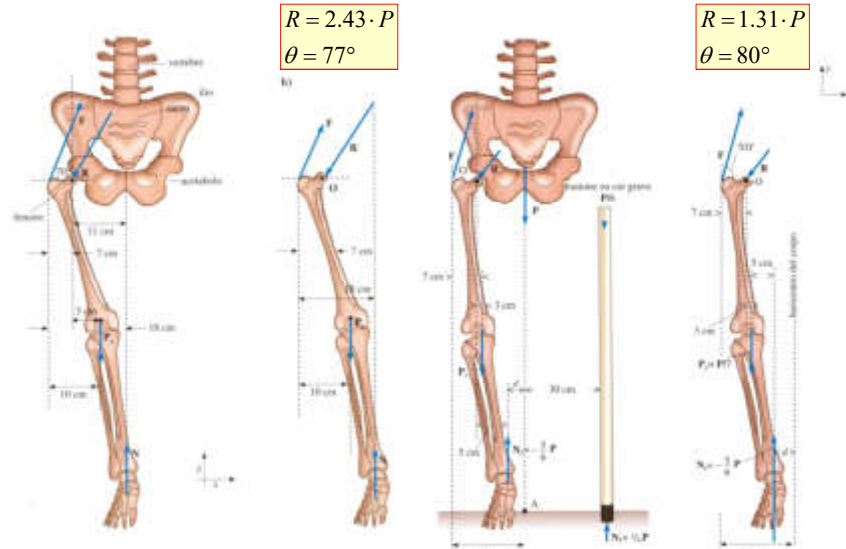
Esempio: articolazione dell'anca

Considerazioni:

- La testa del femore tende allora a crescere ad un angolo maggiore del normale provocando un allungamento dell'arto
- Quest'ultimo, per compensare lo sbilanciamento tra gli arti, produce una rotazione della cintura pelvica e quindi una curvatura della colonna vertebrale (*scoliosi*).
- Per ovviare a ciò, è necessario utilizzare un **bastone**, su cui si scarica una parte del peso del corpo, per cui l'equilibrio viene permesso con valori di F inferiori al normale, pur mantenendo la direzione di R quasi inalterata.



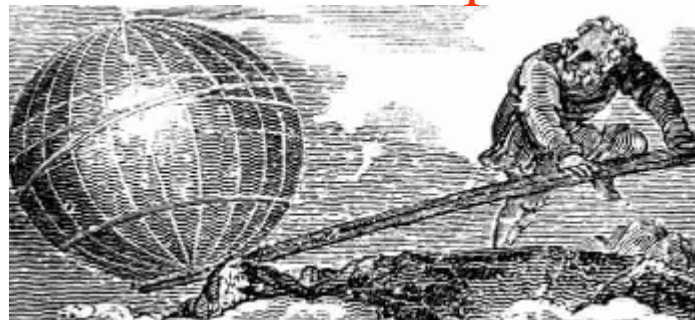
Esempio: articolazione dell'anca con bastone



Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

33

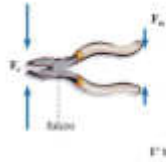
Leve meccaniche del corpo umano



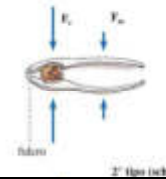
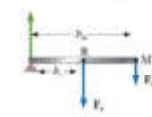
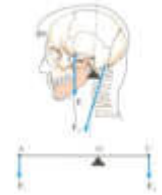
Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

34

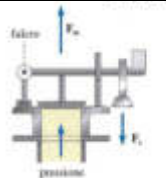
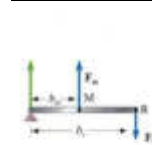
Leve meccaniche



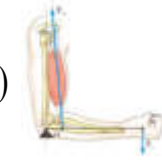
- Leva del 1° tipo
 $G < 1, G > 1$



- Leva del 2° tipo
 $G > 1$ (*vantaggiosa*)



- Leva del 3° tipo:
 $G < 1$ (*svantaggiosa*)



Leve meccaniche del corpo umano

- Nel corpo umano tutte le **articolazioni**, ossia i punti di “*snodo*” tra le parti fisse, realizzano delle leve meccaniche:
 - Quando esse sono in condizioni di equilibrio, consentono il blocco delle articolazioni
 - Quando “non” sono in condizioni di equilibrio, consentono il movimento delle articolazioni
- componenti
 - *muscoli*: si inseriscono nelle ossa (tramite i tendini) e rappresentano l’elemento “attivo” del movimento (*la loro contrazione determina il movimento*)
 - *ossa*: rappresentano l’elemento “passivo” del movimento
 - *articolazioni*: rappresentano l’elemento di congiunzione e snodo delle ossa



Leve meccaniche del corpo umano

- L'intero apparato locomotore è basato su un sistema di leve meccaniche.
- Quando si attua un movimento, si attiva una leva meccanica (di 1°, 2° o 3° tipo) nella quale:

- **Fulcro:** asse di rotazione

- Articolazione

- Punto di appoggio

- Punto di presa

- **Potenza:** punto nel quale è applicata la forza motrice

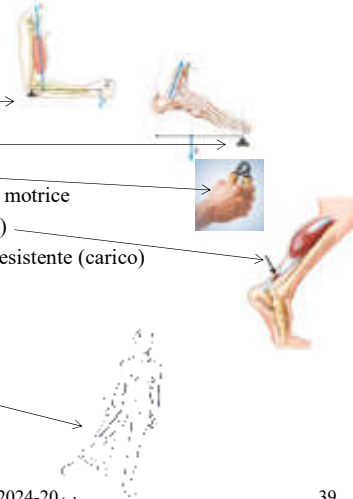
- Inserzione muscolare sull'osso (tendine)

- **Resistenza:** punto nel quale risiede la forza resistente (carico)

- Gravità

- Peso

- Spostamento di un segmento corporeo



Leva di 1° tipo



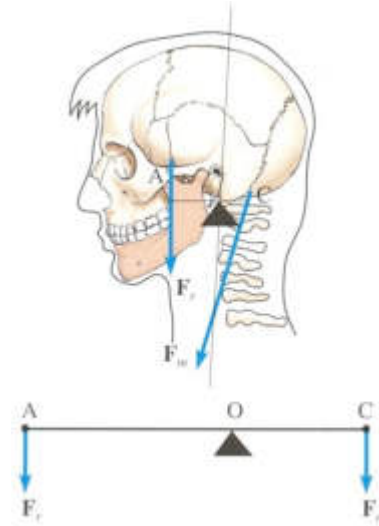
Leva di 1° tipo

- L'articolazione su cui poggia la testa è una leva di 1° tipo (la forza resistente è rappresentata dal peso della testa e la forza motrice è data dalla muscolatura estensoria tra la nuca e la base del collo - *muscoli splenici*)

F è circa 300 N (notevole)

- I muscoli splenici esercitano quindi uno sforzo notevole (pari al peso di un corpo di 32 kg) per poter mantenere la testa in posizione eretta.

- La leva è svantaggiosa (guadagno $G < I$).



Leva di 1° tipo: testa

- la struttura è *labile*, cioè dotata di un grado di libertà.
- Per questo motivo è necessario per l'equilibrio che il momento della forza muscolare e quello del peso siano eguali in ogni istante.

$$F_m b_m - F_r b_r = 0$$

$$F_m = F_r \frac{b_r}{b_m}$$

- Questa eguaglianza è ottenuta con reazioni muscolari, del tutto inconscie, che intervengono continuamente per esercitare il controllo della posizione della testa.

- La reazione vincolare in corrispondenza del vincolo vale

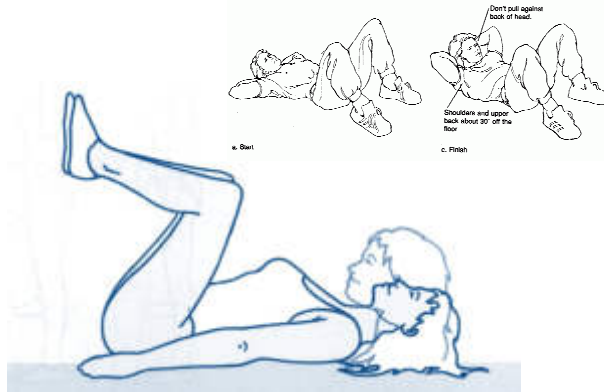
$$F_r + F_m = F_r + F_r \frac{b_r}{b_m} = F_r \left(1 + \frac{b_r}{b_m}\right)$$

- E' evidente che quindi il carico sulla vertebra non è molto lontano da 1,5 volte il peso del capo. Questo ragionamento riguarda naturalmente le sole azioni statiche, potendo le azioni dinamiche arrivare a raggiungere livelli anche 10 volte superiori.



Leva di 1° tipo: testa

- Le azioni di cui abbiamo mostrato il metodo di calcolo variano fortemente nel caso in cui la testa non sia in posizione verticale ma il corpo sia piegato. In questo caso la forza peso cambia direzione e la forza muscolare cambia valore.
 - Supino
 - Prono
 - Panca
 - Crunch

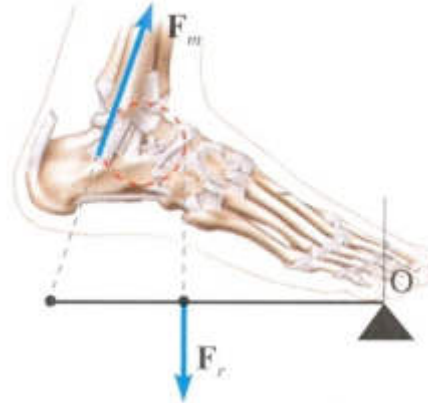


Leva di 2° tipo



Leva di 2° tipo

- Un piede in elevazione sulle punte delle dita è una leva del 2° tipo:
 - il *fulcro* è costituito dalle dita,
 - la *forza resistente* F_r , dal peso che grava sulla caviglia
 - la *forza motrice* F_m , dai muscoli del polpaccio, che esercitano una trazione sul tendine d'Achille



- $b_m > b_r$ sempre
- La leva è sempre **vantaggiosa** ($G > I$).



Leva di 2° tipo

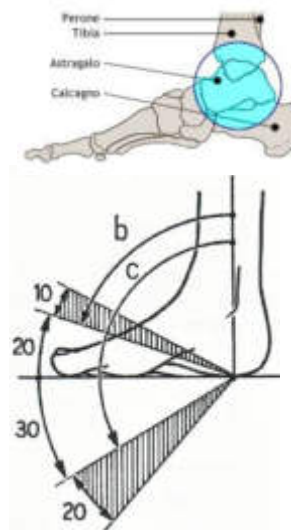
Esempio:

- sollevamento sull'avampiede ad opera del polpaccio:
 - il *fulcro* è rappresentato dal punto d'appoggio dell'avampiede al suolo (*e non dall'articolazione tibio tarsica, dato che questa si muove rispetto all'avampiede fermo durante il movimento*).
 - La *forza motrice* è situata sull'inserzione del tricipite surale sul calcagno,
 - la *forza resistente* è costituita dal peso di tutto il corpo, che si scarica sul dorso del piede.
- La vantaggiosità di questa leva fa sì che i polpacci possano vincere grosse resistenze con relativamente piccolo sforzo, come quando ci si solleva sull'avampiede anche con elevati carichi sulle spalle.



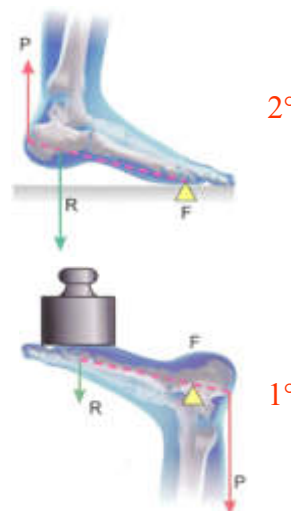
Caviglia o articolazione tibio-tarsica

- La caviglia è l'articolazione distale dell'arto inferiore.
- Ha un solo grado di libertà, la flessione-estensione.
 - La flessione (o flessione dorsale) della caviglia è il movimento che avvicina il dorso del piede alla faccia anteriore della gamba, l'ampiezza è di 20-30°
 - L'estensione (o flessione plantare) della caviglia significa allontanare il dorso del piede dalla faccia anteriore della gamba, ed è di 30-50°
- (*La prono-supinazione dipende solo da un diverso accorciamento dei legamenti mediali e laterali*)



Trasformazione delle leve

- Le leve possono trasformarsi di genere a seconda del tipo di movimento.
- Nel caso superiore, il movimento del piede in appoggio al suolo (come già visto) è rappresentato da una leva di 2° genere.
- Se, invece, il movimento di estensione dell'avampiede venisse effettuato non in appoggio al suolo, ma in sospensione (l'avampiede risulta così libero di spostare la forza resistiva) il sistema verrebbe rappresentato da una leva diventerebbe di 1° genere
 - Il **fulcro** è rappresentato dall'articolazione tibia tarsica, posta tra i due punti di applicazione delle forze
 - La **forza motrice** è sempre compiuta dal tricipite surale, inserito sul calcagno
 - la **forza resistiva** non è costituita dal peso del corpo, bensì dal carico posto sull'avampiede



Leva di 3° tipo

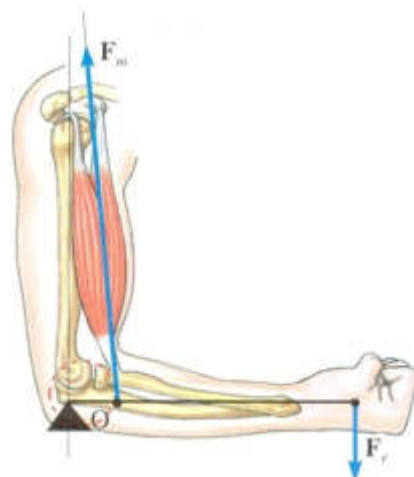


Leva di 3° tipo

- La coppia braccio e avambraccio costituisce una leva del 3° tipo
 - il fulcro è situato nell'articolazione del gomito
 - la forza resistente F_r è data dalla somma delle forze peso dell'avambraccio e del peso sostenuto dalla mano
 - la forza motrice è fornita dal bicipite brachiale
- All'equilibrio il braccio della forza motrice è minore di quello della forza resistente

$$b_m < b_r$$

- La leva è, quindi, **svantaggiosa**



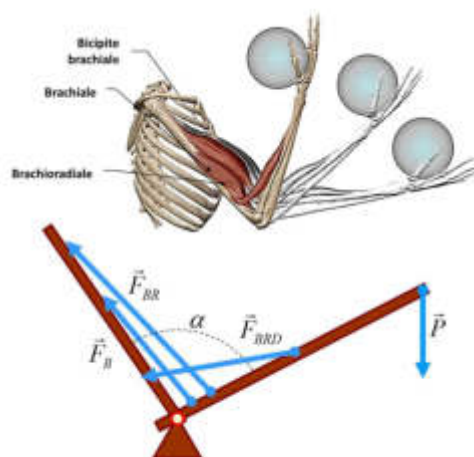
Leva di 3° tipo



Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

70

Leva di 3° tipo



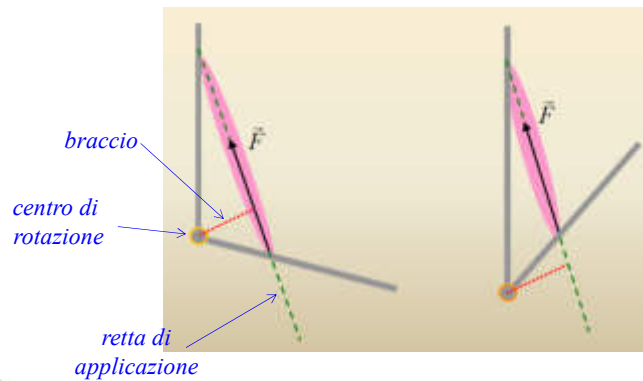
Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

71

Braccio della forza muscolare

- DEF:

- Il *braccio* della forza muscolare è la minima distanza fra la *retta di applicazione* della forza muscolare ed il *centro di rotazione articolare*

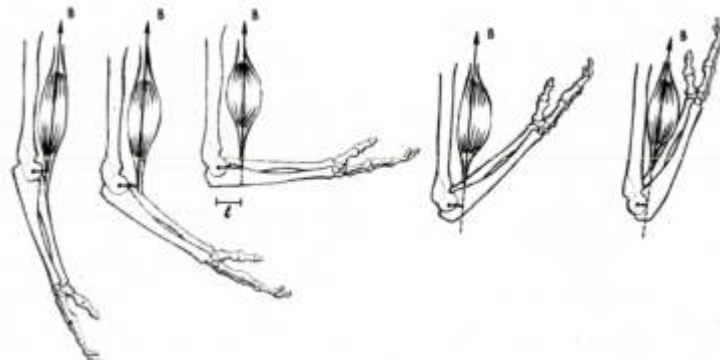


Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

74

Variazione del braccio della forza muscolare

- Il braccio della forza muscolare varia al variare dell'angolo articolare



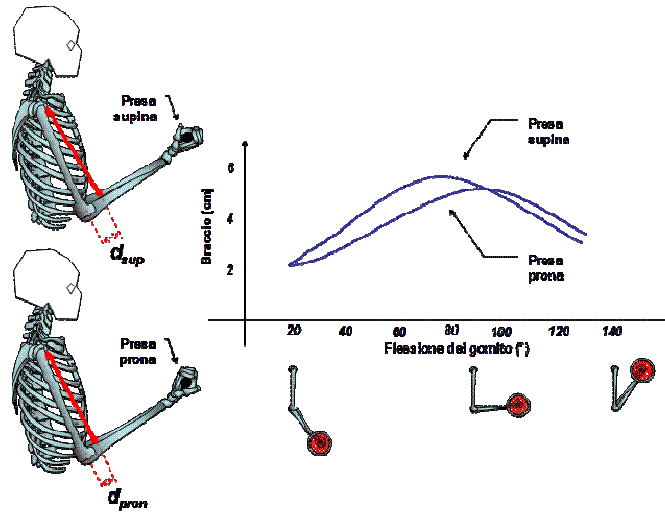
Il bicipite in varie posizioni di flessione del gomito, che mostrano le variazioni del braccio del momento



Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

75

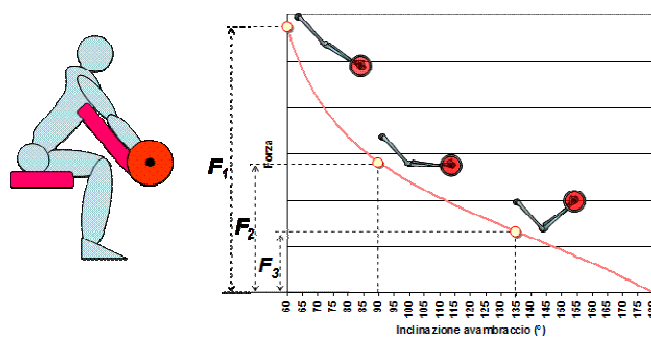
Flessione (presa supina e prona)



Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

76

Panca Scott



Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

78

Flessione ed estensione del gomito

- La **flessione** porta l'avambraccio in avanti

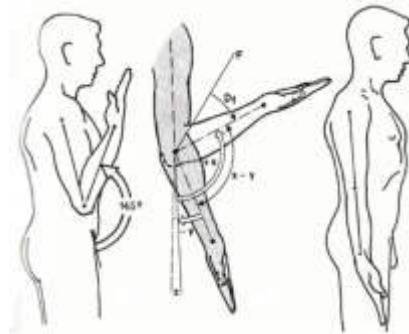
- La flessione attiva è di 145°
- La flessione passiva è di 160°

- Muscoli motori della flessione Principali:

- Bicipite brachiale formato dal CAPO LUNGO e dal CAPO BREVE
- Brachiale anteriore, è un muscolo monoarticolare e contraendosi provoca solo la flessione del gomito
- Brachioradiale

- L'**estensione** porta indietro l'avambraccio

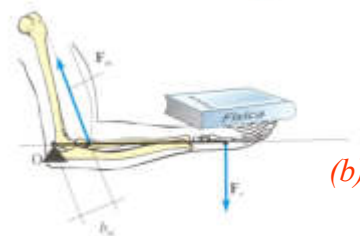
- La posizione di riferimento corrisponde all'estensione completa
- Nelle donne e nei bambini può arrivare fino a -5° - 10°



Leva di 3° tipo

- Dalla figura si può notare quanto sia più faticoso tenere sollevati dei pesi quando il braccio è disteso di quanto non lo sia quando il braccio è raccolto vicino al tronco.

- Gli sforzi muscolari sono inversamente proporzionali ai rispettivi bracci, e poiché il braccio b_m nel caso superiore (a) è molto più piccolo del braccio b_m del caso inferiore (b), ne consegue che lo sforzo muscolare richiesto per sollevare un peso nella posizione superiore è maggiore dello sforzo necessario nella posizione raccolta sottostante.



Leva di 3° tipo

- la forza motrice è fornita dal bicipite brachiale

$$\vec{M}_r^{est} = \vec{M}_1 + \vec{M}_2 = 0$$

$$F_{m(a)}b_{m(a)} - F_r b_r = 0$$

$$F_{m(b)}b_{m(b)} - F_r b_r = 0$$

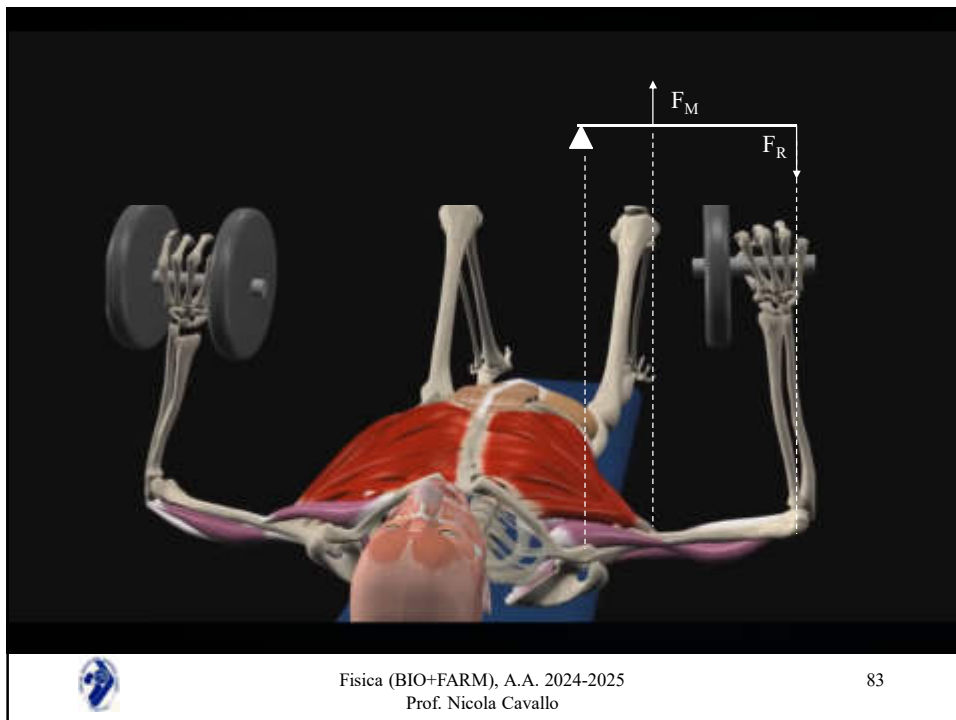
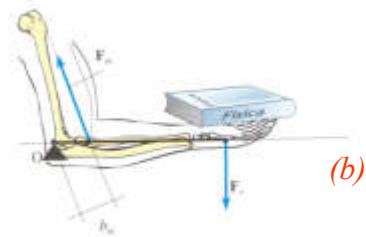
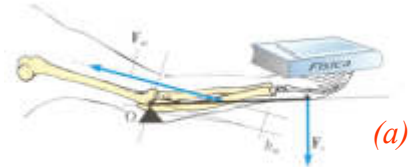
- da cui

$$\frac{F_{m(a)}}{F_{m(b)}} = \frac{b_{m(b)}}{b_{m(a)}}$$

$$F_{m(a)} = \frac{b_{m(b)}}{b_{m(a)}} F_{m(b)}$$

- dove

$$b_{m(b)} > b_{m(a)}$$

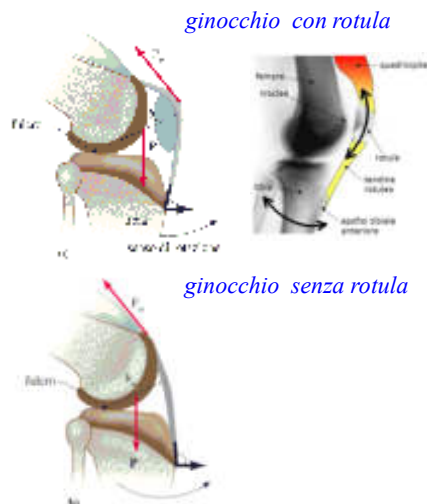
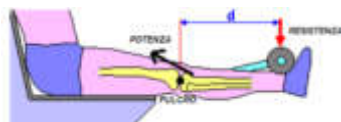


Leva di 3° tipo - ginocchio



Leva di 3° tipo: ginocchio

- L'articolazione del ginocchio può essere rappresentata da una leva del 3° tipo.
- La rotula distanzia il punto di applicazione della forza del muscolo quadricipite F_m dal fulcro aumentando il braccio b_m .
- La presenza della rotula comporta un maggiore guadagno e quindi la forza espressa dal muscolo quadricipite per sollevare il piede risulta minore.



Leva di 3° tipo - mandibola

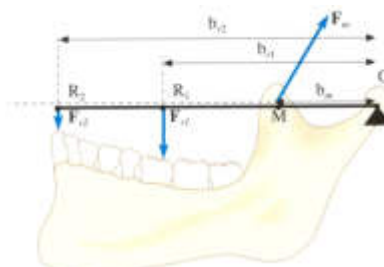


Articolazione della mandibola (3° tipo)

- A parità di forza motrice, il guadagno di questa leva è maggiore in corrispondenza dei denti posteriori rispetto a quelli anteriori, essendo $b_{r2} > b_{r1}$.
- forza esercitata in corrispondenza dei molari è maggiore rispetto a quella esercitata dagli incisivi e dai canini:

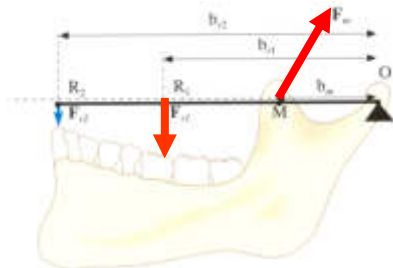
$$F_{r1} > F_{r2}$$

- Ciò è funzionale alla masticazione e comporta un diverso uso dei denti nella masticazione stessa.
 - Infatti, la forza necessaria ai canini ed agli incisivi per afferrare, lacerare o tagliare i cibi è inferiore a quella che i molari devono esercitare per rompere e tritare.

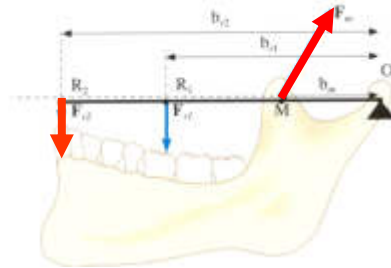


Articolazione della mandibola (3° tipo)

Azione dei molari



Azione degli incisivi



$$F_m b_m = F_{r1} b_{r1} \rightarrow F_m = F_{r1} \frac{b_{r1}}{b_m}$$

$$F_m b_m = F_{r2} b_{r2} \rightarrow F_m^* = F_{r2} \frac{b_{r2}}{b_m}$$

$$G_1 = \frac{b_m}{b_{r1}} > \frac{b_m}{b_{r2}} = G_2$$



Esempi di equilibrio



Equilibrio del piede in sollevamento

- Consideriamo un soggetto in equilibrio su un singolo piede quando sta alzando il calcagno.
- Vogliamo calcolare la forza applicata dal tendine d'Achille sul calcagno quando il peso del corpo grava sulla pianta del piede.
- Ipotesi: il piede si comporta come un corpo rigido.



Equilibrio del piede in sollevamento

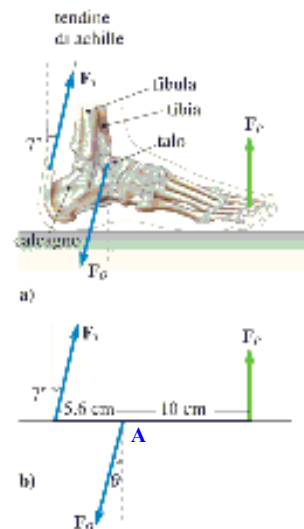
- Forze agenti:
 - F_T : forza motrice esercitata dal tendine sul calcagno
 - F_p : forza vincolare del suolo sulla pianta del piede (*Principio di Azione e Reazione*), causata dalla forza peso del corpo (mg)
 - F_0 : forza esercitata dalle ossa della gamba (tibia e fibula)

- Equilibrio per traslazione:

$$\begin{cases} [x] & F_T \sin(7^\circ) - F_0 \sin \theta = 0 \\ [y] & F_T \cos(7^\circ) + F_p - F_0 \cos \theta = 0 \end{cases}$$

- Equilibrio per rotazione (rispetto al punto A):

$$\begin{aligned} \vec{M}_T^{est} = 0 \rightarrow & F_p b_p - F_T \cos(7^\circ) b_T = 0 \\ & F_p (10\text{cm}) - F_T \cos(7^\circ) (5.6\text{cm}) = 0 \\ & F_T = 1.8 F_p \end{aligned}$$



Equilibrio del piede in sollevamento

- Introducendo il valore

$$F_T = 1.8F_p$$

- nelle relazioni per l'equilibrio traslazionale, si ottiene

$$F_0 = 2.8F_p$$

$$\operatorname{tg}\theta = 0.079 \rightarrow \theta = 4.5^\circ$$

- Conclusioni:

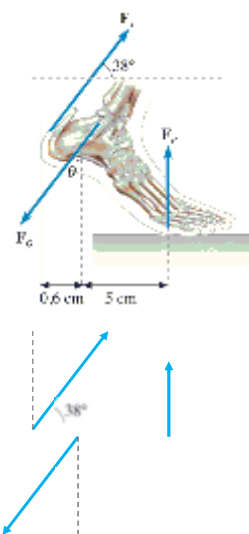
- la forza motrice F_T esercitata dal tendine sul calcagno è circa 2 volte la forza peso F_p ,
- la forza F_0 esercitata dalla gamba sul tallone è quasi 3 volte la forza peso F_p del corpo.

- Il tendine di Achille è, quindi, sottoposto a sforzi rilevanti.



Equilibrio del piede in posizione accovacciata

- Consideriamo un soggetto accovacciato.
- Vogliamo calcolare la forza applicata dal tendine d'Achille sul calcagno quando il peso del corpo grava sulla punta del piede.
- Ipotesi: il piede si comporta come un corpo rigido.



Equilibrio del piede in posizione accovacciata

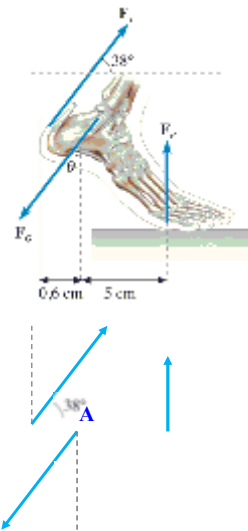
- Forze agenti:
 - F_T : forza motrice esercitata dal tendine sul calcagno
 - F_p : forza vincolare del suolo sulla pianta del piede (*Principio di Azione e Reazione*), causata dalla forza peso del corpo (mg)
 - F_0 : forza esercitata dalle ossa della gamba (tibia e fibula)

- Equilibrio per traslazione:

$$\begin{aligned} [x] \quad & F_T \cos(38^\circ) - F_0 \sin \theta = 0 \\ [y] \quad & F_T \sin(38^\circ) + F_p - F_0 \cos \theta = 0 \end{aligned}$$

- Equilibrio per rotazione (rispetto al punto A):

$$\begin{aligned} \vec{M}_T^{est} = 0 \rightarrow \quad & F_p b_p - F_T \sin(38^\circ) b_T = 0 \\ & F_p (5\text{cm}) - F_T \sin(38^\circ) (0.6\text{cm}) = 0 \\ & F_T = 13.54 F_p \end{aligned}$$



Equilibrio del piede in posizione accovacciata

- Introducendo il valore

$$F_T = 13.54 F_p$$

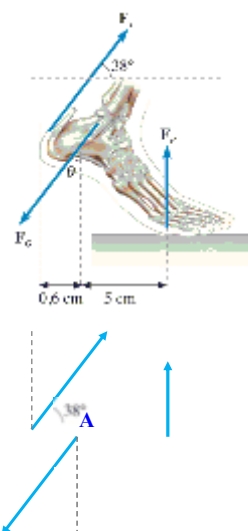
- nelle relazioni per l'equilibrio traslazionale, si ottiene

$$\begin{aligned} F_0 &= 14.17 F_p \\ \text{tg} \theta &= 1.14 \rightarrow \theta \approx 48^\circ \end{aligned}$$

- Conclusioni:

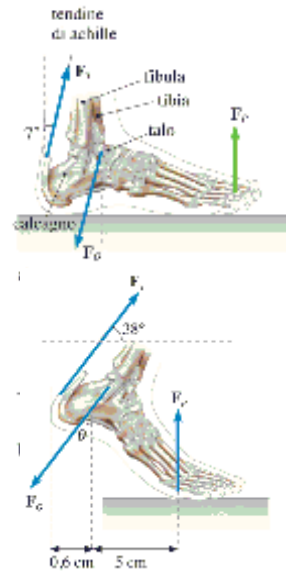
- la F_T : forza motrice esercitata dal tendine sul calcagno è circa 14 volte la forza peso F_p ,
- la forza esercitata dalla gamba sul tallone è quasi 14 volte la forza peso F_p del corpo.

- Il tendine di Achille è, quindi, sottoposto a sforzi rilevanti.



Equilibrio del piede in sollevamento

- Conclusioni:
 - la forza motrice F_T esercitata dal tendine sul calcagno è circa **2 volte** la forza peso F_p ,
 - la forza F_θ esercitata dalla gamba sul tallone è quasi **3 volte** la forza peso F_p del corpo.
- Il tendine di Achille è, quindi, sottoposto a sforzi rilevanti.
- Conclusioni:
 - la F_T : forza motrice esercitata dal tendine sul calcagno è circa **14 volte** la forza peso F_p ,
 - la forza esercitata dalla gamba sul tallone è quasi **14 volte** la forza peso F_p del corpo.
- Il tendine di Achille è, quindi, sottoposto a sforzi ancora maggiori di prima.



Esercizi per gastrocnemio



leva di 2° tipo



Attenzione all'inflammazione del tendine



Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

112

Push up

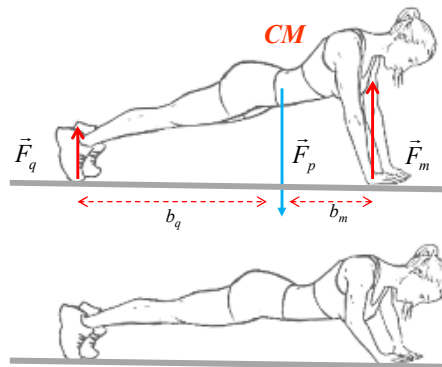


Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

113

Flessioni sulle braccia (push up)

- Una persona di 70 kg esegue delle flessioni sulle braccia. Valutare le forze esercitate sulle mani e sui piedi.



Flessioni sulle braccia (push up)

- Forze agenti:
 - F_m : forza motrice esercitata dai muscoli interessati (tricipite brachiale, bicipite, anconeo, pettorali, addominali)
 - F_p : forza peso del corpo (mg)
 - F_q : forza vincolare esercitata dalle punta dei piedi (Principio di azione e reazione)

$$F_p = mg = 70\text{kg} \times 9.8\text{m/s}^2 \approx 700\text{N}$$

- Equilibrio per traslazione:

$$\vec{F}_q + \vec{F}_m + \vec{F}_p = 0$$

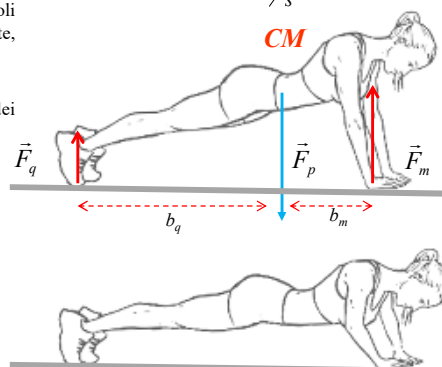
$$F_q + F_m = F_p = 700\text{N}$$

- Equilibrio per rotazione (rispetto al punto A):

$$\vec{M}_T^{est} = 0 \rightarrow \vec{M}_{F_q} + \vec{M}_{F_m} + \vec{M}_{F_p} = 0$$

$$F_q b_q - F_m b_m = 0$$

$$F_q (100\text{cm}) - F_m (60\text{cm}) = 0$$

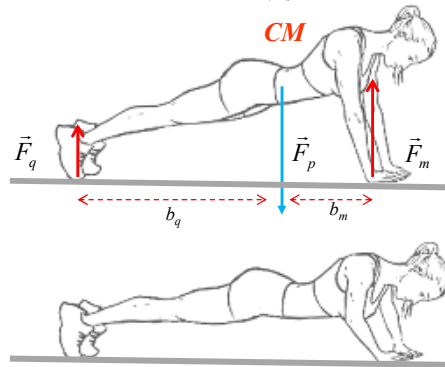


Flessioni sulle braccia (push up)

- Risolvendo numericamente

$$\vec{F}_m \approx 437N$$
$$F_q \approx 263N$$

$$F_p = mg = 70kg \times 9.8 \frac{m}{s^2} \approx 700N$$



Equilibrio tronco-vertebrale



Equilibrio tronco-vertebrale (leva 1° tipo)

- Consideriamo una persona di 60 Kg in posizione eretta.
- Il centro di massa è posto in genere al centro del ventre, in posizione leggermente anteriore rispetto alla spina dorsale.
- Il tronco, poggia sulla spina dorsale (perno sulla 7° vertebra).
- Si può pensare, quindi, ad una leva di 1° tipo.



Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

122

Equilibrio tronco-vertebrale (leva 1° tipo)

- Forze agenti:
 - F_m : forza motrice esercitata dai muscoli dorsali
 - F_p : forza peso del tronco (mg)
 - F_q : forza vincolare sul fulcro
- Equilibrio per traslazione:

$$\vec{R} = \vec{F}_m + \vec{F}_p$$

- Equilibrio per rotazione (rispetto al fulcro):

$$\vec{M}_T^{est} = 0 \rightarrow \vec{M}_{F_m} + \vec{M}_{F_p} = 0$$

$$F_m b_m - F_p b_p = 0$$

- numericamente

$$F_m = \frac{a}{b} F_p = 60 \frac{8}{4} kg = 120kg \approx 1200N$$

$$R = 120kg + 60kg = 180kg \approx 1800N$$



Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

123

Equilibrio tronco-vertebrale (leva 1° tipo)

$$F_p = 60\text{kg} \times 9.8\text{m/s}^2 \approx 600\text{N}$$

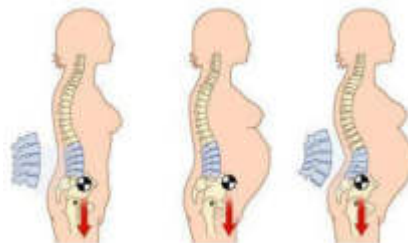
$$F_m = 1200\text{N}$$

$$R = 1800\text{N}$$

- Considerazioni:
 - La forza motrice dei muscoli dorsali è tanto minore quanto più il baricentro è allineato verticalmente con la spina dorsale
 - Lo sforzo R è tanto minore quanto più il baricentro è allineato verticalmente con la spina dorsale.
- In caso di obesità, il baricentro (centro di massa) è spostato in avanti e l'equilibrio è più difficile.



Equilibrio tronco-vertebrale (leva 1° tipo)



Legge di Hooke applicata alle fratture ossee



Elasticità e Legge empirica di Hooke

- Per i corpi elastici vale la Legge di Hooke che, nel caso di allungamento di un corpo, è:

$$\frac{|\vec{F}|}{A} = E \frac{\Delta l}{l}$$

sforzo (stress) *modulo di elasticità di Young* *stiramento*

- F : forza applicata
- A : area della sezione del corpo
- l : lunghezza del corpo
- Δl : allungamento del corpo
- E : modulo di elasticità di Young

$$\frac{|\vec{F}|}{A} = E \frac{\Delta l}{l} \rightarrow \sigma = E \varepsilon$$

sforzo (stress) *stiramento*



Elasticità e Legge di Hooke

$$\frac{|\vec{F}|}{A} = E \frac{\Delta l}{l}$$

\swarrow sforzo (stress) \searrow stiramento
 \downarrow modulo di elasticità di Young

TABELLA 3.3 Modulo di Young per diversi materiali

MATERIALE	E (N m^{-2})	MATERIALE	E (N m^{-2})
acciaio	$2 \cdot 10^{11}$	legno duro	$1 \cdot 10^{10}$
vetro	$7 \cdot 10^{10}$	tendine	$2 \cdot 10^7$
mattonc	$2 \cdot 10^{10}$	cartilagine (costole)	$1.2 \cdot 10^7$
ossa (lungo l'asse) trazione	$1.8 \cdot 10^{10}$	gomma	$1 \cdot 10^6$
ossa (lungo l'asse) compressione	$0.9 \cdot 10^{10}$	vasi sanguigni	$2 \cdot 10^5$



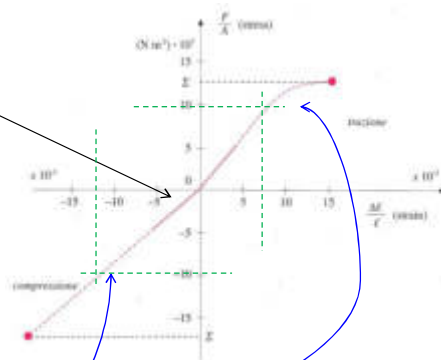
Legge di Hooke applicata a fratture ossee

- La legge di Hooke

Relazione tra Sforzo e Stiramento

$$\frac{|\vec{F}|}{A} = E \frac{\Delta l}{l}$$

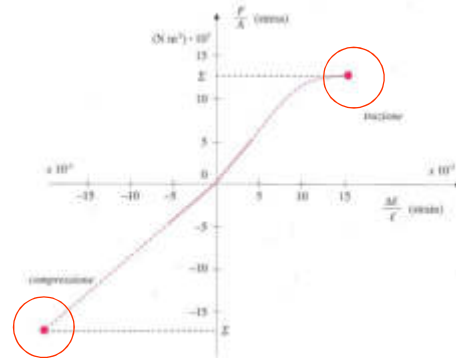
- è rappresentata nel piano sforzo-deformazioni per le ossa umane.
- Essa è valida solo per piccoli sforzi (linee rosse)
- Il modulo di Young in trazione è circa la metà di quello in compressione come si può notare dalla differente forma delle due linee tratteggiate.



Legge di Hooke applicata a fratture ossee

- Le ossa sono più deformabili elasticamente in compressione di quanto non lo siano in trazione, in accordo con le esigenze fisiologiche cui di norma sono sottoposte.
- I punti rossi rappresentano la rottura del materiale, che avviene per uno stiramento dell'1.5 %, cui corrisponde uno sforzo chiamato sforzo terminale Σ (tensile o compressivo).

Relazione tra Sforzo e Stiramento



Frattura delle ossa

- Sottoposte a sforzi eccessivi le ossa si fratturano per compressione o per trazione.
- La descrizione del fenomeno per le ossa in generale è assai complessa, dipendendo soprattutto dalla geometria dell'osso e dalla sua costituzione materiale. Nel caso delle ossa lunghe la geometria più semplice permette una descrizione semplificata del fenomeno poiché esso si verifica con la combinazione di due diverse modalità: la flessione e la torsione.
- In entrambi i casi l'allungamento effettivo della struttura è la causa della frattura, ma gli stati di equilibrio interno che si verificano con la flessione o con la torsione comportano diverse tipologie di frattura.
- Nei paragrafi successivi vengono trattate separatamente le due modalità di frattura: si tenga presente che le fratture reali sono sempre determinate da una loro combinazione.



Sforzo compressivo nella caduta

- Consideriamo una persona, con una massa corporea di 80 kg , che effettui un salto dall'altezza di 1 metro verso il suolo e cada rigidamente su una gamba. Al momento di toccare il suolo la velocità del corpo è di $4.4 \div 4.5 \text{ ms}^{-1}$ e se l'imbottitura della scarpa e il tessuto molle sotto il piede vengono schiacciati di 1 cm , il corpo si arresta in circa $\Delta t = 0.005 \text{ s}$.



Sforzo compressivo nella caduta

Valutiamo la forza che si esercita sulla gamba.

- La variazione della quantità di moto risulta essere:

$$\Delta p = \Delta(mv) = mv_i - mv_f = (80 \text{ kg})(4.5 \text{ ms}^{-1}) - (80 \text{ kg})(0.0 \text{ ms}^{-1})$$

$$\Delta p = 360 \text{ kgms}^{-1}$$

- La forza esercitata sulla gamba (supposta rigida) risulta essere data dalla relazione:

$$F = \frac{\Delta p}{\Delta t} = \frac{360 \text{ kgms}^{-1}}{0.005 \text{ s}} = 7.20 \times 10^4 \text{ N} \rightarrow m = \frac{F}{g} \approx 7200 \text{ kg}$$

- che è quasi 100 volte la forza peso del corpo!!



Sforzo compressivo nella caduta

- La tibia, che ha una sezione di circa 3.3 cm^2 , sarà sottoposta ad uno sforzo compressivo pari a:

$$\sigma = \frac{7.2 \times 10^4 \text{ N}}{3.3 \times 10^{-4} \text{ m}^2} = 2.18 \cdot 10^8 \text{ Nm}^{-2}$$

- vicino al valore terminale Σ_{TIBIA} che è di circa $2.13 \cdot 10^8 \text{ N m}^{-2}$, per cui è molto probabile che la tibia si rompa.
- *Se la caduta avviene su un [materassino da ginnastica](#), la decelerazione sarà più lenta e se la persona reagisce normalmente alla caduta, tocca il suolo prima con le punta dei piedi, poi piega le ginocchia e decelera in un tempo assai più lungo, diminuendo alquanto lo sforzo compressivo dovuto all'atterraggio.*



Contrazione muscolare

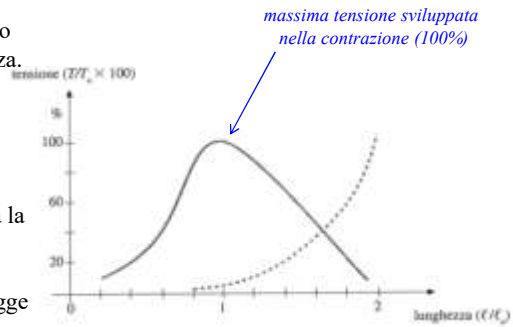
- Un muscolo può essere considerato una macchina che trasforma direttamente [energia potenziale chimica](#) in [lavoro meccanico](#). Parte dell'energia chimica tuttavia viene persa sotto forma di calore, per cui il rendimento del muscolo come macchina è inferiore al 100%.
- Il muscolo, quando viene stimolato, può dare luogo a due distinti tipi di contrazione:
 - **Contrazione isometrica ($L=0$)**
 - il muscolo sviluppa una forza (detta *tensione* T) che può equilibrare una forza esterna, ma non si accorcia o si allunga e quindi non compie lavoro esterno. Il dispendio di energia sotto forma di calore è prodotto dal tessuto muscolare.
 - **Contrazione isotonica ($L \neq 0$)**
 - il muscolo contraendosi si accorcia o si allunga contro una forza esterna, compiendo così lavoro.



Contrazione muscolare

Contrazione isometrica

- la contrattilità del muscolo può essere rappresentata da un grafico (sperimentale) tensione-lunghezza.
- La curva a tratto continuo rappresenta la *tensione attiva* sviluppata nella contrazione isometrica,
- La curva tratteggiata rappresenta la *tensione elastica* (o *passiva*) del muscolo, che per piccole deformazioni è descritta dalla legge di Hooke .

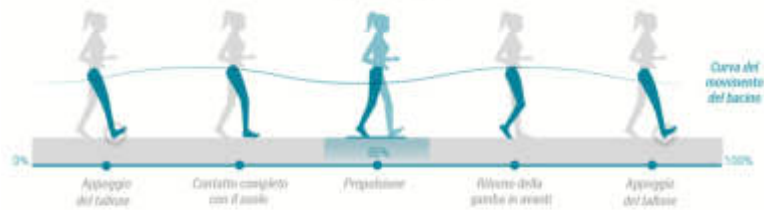


Meccanica della locomozione



Meccanica della locomozione

La camminata



La corsa

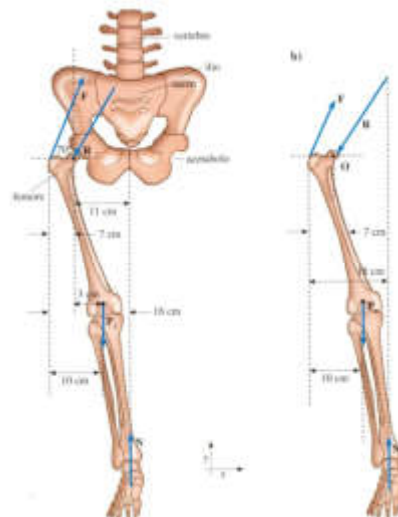


Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

159

Meccanica della locomozione

- La deambulazione in posizione eretta dell'uomo consiste nel trasferire alternativamente l'equilibrio da un piede all'altro.
- L'equilibrio su un solo piede si svolge nelle tre dimensioni e quindi, nell'applicare le condizioni di equilibrio, si dovrebbero considerare anche le componenti delle forze lungo la direzione di moto z , ortogonale al piano della figura.



Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

160

Meccanica della locomozione

- Occorre anche considerare:
 - 1) le forze d'attrito con il suolo,
 - 2) la spinta della flessione plantare prima che si sollevi la punta del piede
 - 3) la variazione della quantità di moto del corpo, quando si posa il tallone.



Meccanica della locomozione

- Si ricorderà che esistono due tipi di forze d'attrito.
 - *forza di attrito statico*

$$F = \mu_s |\vec{F}_N| \quad (\vec{F}_N = \vec{N} \text{ nelle figure})$$

- *forza di attrito dinamico* (o cinetico):

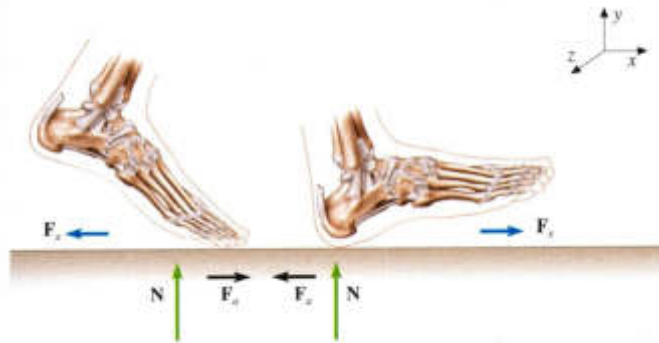
$$F = \mu_d |\vec{F}_N| \quad (\vec{F}_N = \vec{N} \text{ nelle figure})$$

- In entrambe i casi, per provocare il moto o per mantenerlo, è necessario che il modulo della forza agente F sia superiore alla forza d'attrito.



Deambulazione

Nel caso dell'appoggio del tallone, la forza orizzontale (agente sul piede nella direzione di moto), è circa il 15 % del peso corporeo: affinché il piede possa appoggiare e non scivolare, è indispensabile che la forza di attrito del suolo sia superiore alla forza agente.



Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

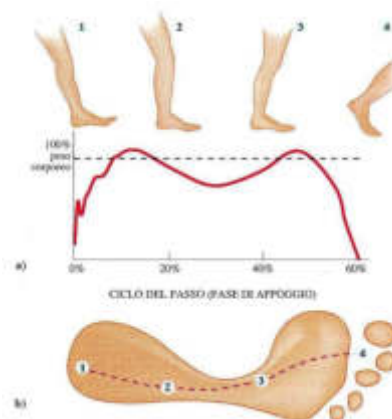
164

Deambulazione

- Il grafico riporta la reazione vincolare verticale (misurata sperimentalmente) del suolo in funzione del peso corporeo, in ordinate, e la fase del ciclo del passo (gait cycle)

 1. contatto iniziale,
 2. piede appoggiato completamente,
 3. periodo mediana di appoggio,
 4. distacco delle dita.

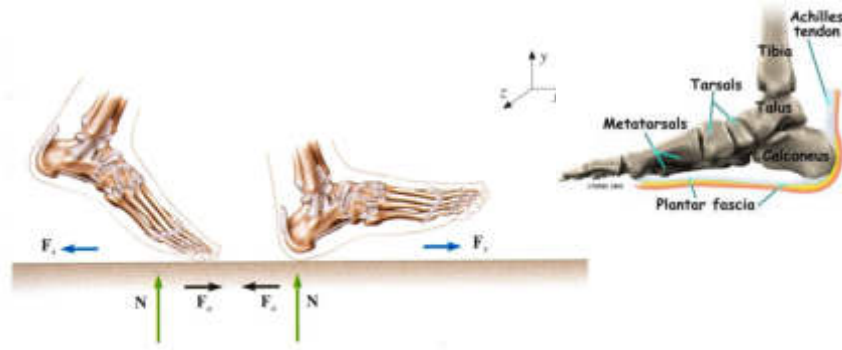
- Nella figura sottostante è mostrato il percorso del centro di pressione che rappresenta l'insieme dei centri di applicazione istantanei della reazione vincolare del suolo.



Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

165

Deambulazione



- Nella camminata è più facile scivolare in *fase di appoggio* (sul calcagno), poiché $F_x \sim 20\%$ della forza peso del corpo
- Nella *fase di sollevamento* (sull'avampiede), infatti, $F_x \sim 15\%$ della forza peso del corpo ed è inferiore.



Corsa



Deambulazione

- Un altro aspetto della deambulazione riguarda la *corsa*. In generale la deambulazione, riferendosi al moto di una gamba, consiste nella sua oscillazione avanti e indietro rispetto al punto di rotazione dell'articolazione dell'anca.
- Terminato il passo, la gamba arretrata viene portata in avanti, iniziando così il passo successivo.
- A questo scopo il moto all'indietro deve essere frenato dai muscoli e l'energia cinetica della gamba essere azzerata, per poi assumere valori crescenti con l'accelerazione della gamba in avanti. In questa fase l'arto viene nuovamente posto in moto rotatorio e il muscolo compie il lavoro che si trasforma in energia cinetica di rotazione accelerando l'arto.

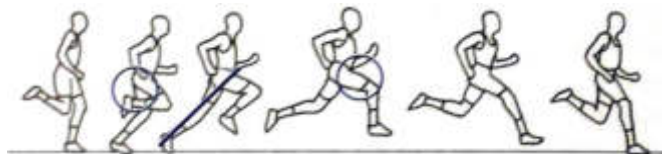


Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

168

Deambulazione

- Per ridurre al minimo questo lavoro, specialmente nella corsa, la gamba viene portata in avanti flessa, in modo che il momento d'inerzia sia minore (essendo minore la distanza dal punto di rotazione). Nel caso di animali che corrono veloci e per lunghi tratti (cavalli, antilopi, cervi), l'attaccatura della massa muscolare necessaria al movimento delle gambe si trova in prossimità del punto di rotazione, per ridurre così ulteriormente il momento d'inerzia e quindi il lavoro necessario per accelerare e frenare l'azione delle gambe.



Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

169

Esempi

