

---

Corso di Laurea in Ingegneria Biomedica

# Corso di Biomeccanica

Esercitazioni: Parte 2

APPLICAZIONI DELLA STATICA  
ALLA BIOMECCANICA

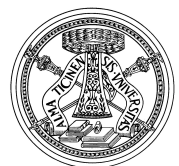
Ing. Petrini

[petrini@unipv.it](mailto:petrini@unipv.it)

---

Università degli Studi di Pavia  
Dipartimento di Meccanica Strutturale

---



---

# Introduzione

---

**SCOPO:** conoscere le forze che si esercitano nelle varie parti del corpo umano per diverse posture, in condizioni statiche.

Cioè saper rispondere a domande del tipo:

- qual' è la forza che i muscoli estensori del collo devono esercitare sulla testa per sostenerla in una certa posizione?
- Quando una persona si flette, qual' è la forza esercitata sulle vertebre?
- Come varia la forza esercitata sulla testa del femore al variare dei carichi portati in una mano?
- Come varia la forza esercitata sull'articolazione del gomito (del ginocchio) al variare della posizione del braccio (delle gambe) e delle forze applicate?

→ **studiare le forze che nascono nella zona articolare (reazioni dell'articolazione e forze muscolari) per assicurare l'equilibrio di una parte del corpo**

---

# Outline

---

- Articolazioni e muscoli
- Ipotesi e limitazioni
- Meccanica del gomito
- Meccanica della spalla
- Meccanica della colonna vertebrale
- Meccanica dell'anca
- Meccanica del ginocchio
- Meccanica della caviglia

---

## Alcune definizioni

---

**ARTICOLAZIONI:** assicurano mobilità e stabilità a diversi livelli (es. spalla/gomito).

Classificazione in base a struttura - funzione  
(<http://www.dematel.it>):

- *sinartrosi*: ogni tipo di articolazione che si realizza per continuità dei segmenti ossei, tipicamente con l'interposizione di connettivo fibroso (suture e sindesmosi), con la presenza di cartilagine ialina (sincondrosi) o di tessuto osseo (sinostosi). Si tratta di una categoria di articolazioni che non consentono apprezzabili movimenti (es. cranio).
- *anfiartrosi*: articolazione nella quale le superfici o i margini ossei adiacenti sono uniti da cartilagine fibrosa, in modo tale che i movimenti siano limitati e non vi sia contatto tra le ossa (es. vertebre).

---

## Articolazioni diartrodiali

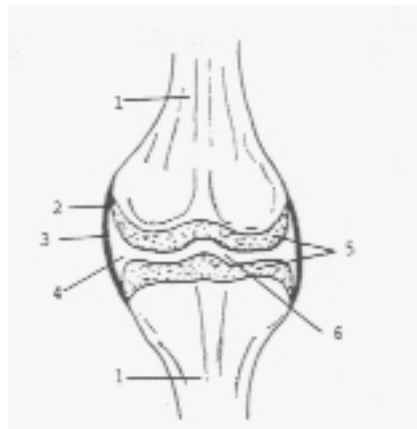
---

- *diartrosi*: tipo di articolazione in cui i capi ossei sono separati da una *cavità articolare* (6). Gli estremi scheletrici, che hanno una forma non rigorosamente complementare, sono rivestiti di *cartilagine articolare* (5) (di regola cartilagine ialina). I capi articolari sono avvolti e tenuti insieme da una *capsula fibrosa* (2). Questa si inserisce lungo il perimetro della cartilagine a guisa di manicotto, e presenta la superficie interna rivestita da una *membrana sinoviale* (3), la quale secreta il liquido omonimo (4), adatto a lubrificare le superfici a contatto e a nutrire la cartilagine articolare, che è priva di vasi. La guaina è esternamente rinforzata da *legamenti periarticolari*, inseriti sulle superfici ossee contigue. In alcune localizzazioni questo complesso articolare è totalmente o parzialmente segmentato dalla presenza di un disco articolare fibrocartilagineo o menisco, inserito perifericamente alla parete della capsula. La diartrosi corrisponde al tipo di articolazione descritto più frequentemente in anatomia umana, pur mostrando una grande varietà di adattamenti morfo-funzionali.

---

## Articolazioni diartrodiali

---



Suddivisione in tipologie:

- cerniera bidimensionale (gomito, caviglia)
- cerniera tridimensionali (anca, spalla)
- perno (radiulnare prossimale)
- condilo: estremità articolare di forma all'incirca emisferica (articolazione radiocarpale)
- articolazioni a sella (carpo-metacarpo).

Movimento e stabilità dipendono dalla struttura.

---

## Alcune definizioni

---

**MUSCOLI SCHELETRICI:** agiscono sul corpo umano determinandone il movimento.

Controllano il movimento relativo fra almeno 2 ossa a cui sono collegati.

Possono solo contrarsi: esercitano solo una *trazione*, mai compressione.

- **Contrazione concentrica:** avviene con accorciamento del muscolo (causa di movimento-muscolo agonista)
- **Contrazione eccentrica:** avviene con allungamento del muscolo (controllo del movimento-muscolo antagonista)
- **Contrazione isometrica:** avviene senza variazione di lunghezza del muscolo (bilancio di una forza)

---

## Complessità del problema

---

Vogliamo risolvere con gli strumenti della statica del corpo rigido un problema di equilibrio le cui incognite sono la trazione nei muscoli e le forze di reazione sulle articolazioni (*forze interne*), mentre sono note la forza di gravità, i carichi applicati durante esercizi, i carichi applicati da protesi (*forze esterne*).

La risoluzione di questo problema è generalmente molto complicata, devono essere note:

- le direzioni di azione delle forze muscolari coinvolte
- i punti di applicazione dei gruppi muscolari coinvolti
- il peso delle parti di corpo interessate
- la posizione del baricentro delle parti di corpo interessate
- gli assi di rotazione delle articolazioni



---

## Ipotesi e limitazioni

---

- si scelgono muscoli principali responsabili del controllo sull'articolazione
- si suppongono noti i punti di applicazione dei muscoli
- si suppongono note le direzioni di applicazione delle forze muscolari
- si suppongono noti gli assi di rotazione delle articolazioni
- si suppongono noti i pesi e i baricentri delle parti di corpo in studio
- si trascura l'attrito nelle articolazioni
- si trascura l'aspetto dinamico del problema
- si considerano problemi bidimensionali

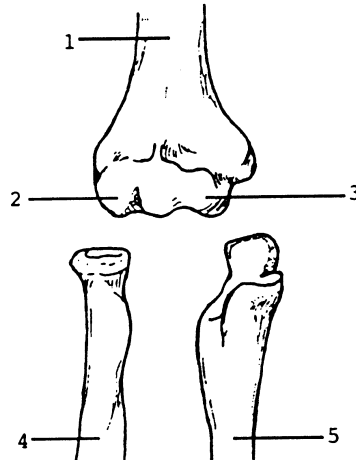
### **Applicazione della statica:**

- Modello meccanico del sistema biologico in considerazione
- Applicazione delle equazioni cardinali della statica

---

# Meccanica del gomito

---



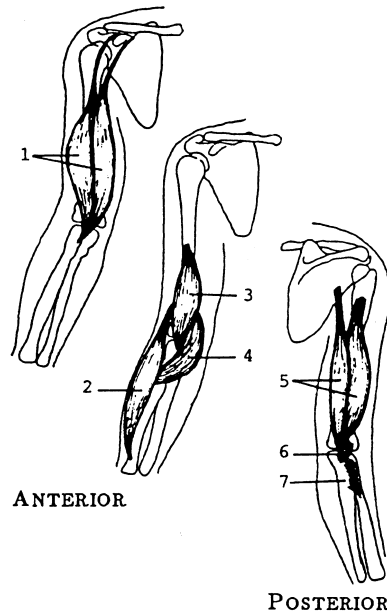
L'articolazione del gomito è composta dalle tre articolazioni:

- omero-ulnare: cerniera fra *la troclea* (3) dell'epifisi distale dell'*omero* (1) e la superficie semilunare dell'*ulna* (5). Permette solo rotazioni attorno ad un solo asse → solo flessione ed estensione dell'avambraccio attorno al gomito
- omero-radiale: cerniera fra il capitello radiale prossimale e il condilo dell'epifisi distale dell'omero (2)
- radio-ulnare: perno formato dalla testa del radio e dall'incisura radiale dell'ulna; permette la rotazione relativa fra radio e ulna attorno all'asse longitudinale di uno dei due ossi (pronazione e supinazione)

---

# Meccanica del gomito

---



I muscoli che controllano il movimento del gomito sono: il muscolo bicipite (1); il muscolo brachioradiale (2); il muscolo brachiale (3); il muscolo pronatore rotondo (4); il muscolo tricipite brachiale (5); il muscolo anconeo (6); il muscolo supinatore (7).

- Il più potente flessore è il muscolo bicipite brachiale.
- L'estensione è principalmente controllata dal muscolo tricipite brachiale.
- La pronazione e supinazione sono controllate dai muscoli pronatore e supinatore.

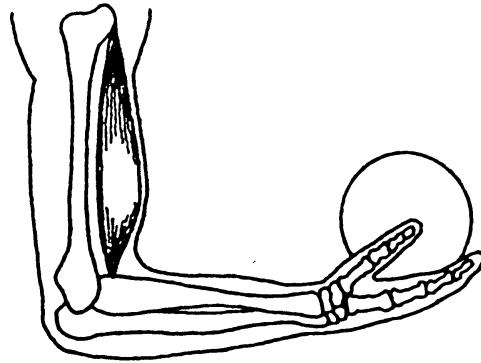
---

## Esempio: meccanica del gomito

---

Da lezione (Parte 2):

- **Problema di biomeccanica:**  
gomito flesso ad angolo retto + oggetto posto sulla mano



**Figure 5.4** *Example 5.1.*

- Meccanica: forze in gioco
- Biomeccanica: applicazione ad un sistema biologico

**Quale modello per descrivere il sistema?**

---

## Esempio: meccanica del gomito

---

Da lezione (Parte 2): scelta di un modello in base ad ipotesi

- **Forze in gioco:**

- Peso oggetto  $W_0$
- Peso braccio  $W$
- Azioni dei muscoli  $F_M$
- Reazione vincolare  $F_J$

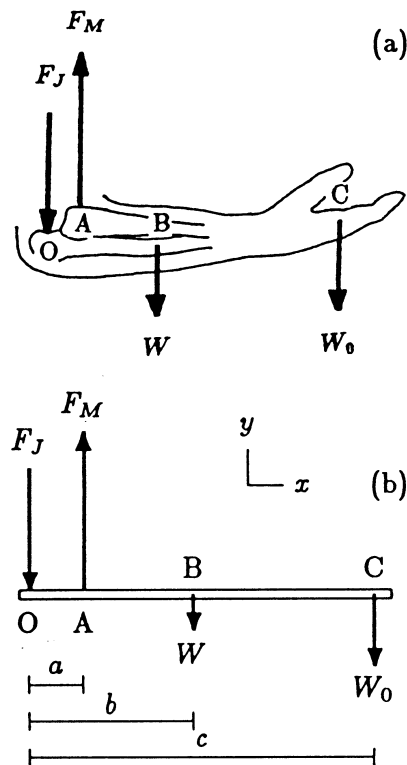


Figure 5.5 Forces acting on the lower arm.

- **Dati:**  $a = 4$  cm,  $b = 15$  cm,  $c = 35$  cm  
 $W = 20$  N,  $W_0 = 80$  N

---

## Esempio: meccanica del gomito

---

Quale altro modello nell'ipotesi di considerare anche l'omero?

- **Esercizio:**

- studiare possibili modelli
- calcolare forze muscolari e reazioni articolari nei diversi casi
- calcolare caratteristiche di sollecitazione e discutere come cambiano al variare modello
- qual'è l'effetto della forza muscolare sul braccio se si varia l'angolo del gomito?

---

## Osservazioni: meccanica del gomito

---

- $F_M$  circa 10 volte maggiore peso oggetto
- $F_j$  è risultante pressioni liquido sinoviale
- Angolo fra  $F_M$  e asse longitudinale osso:
  - =  $90^\circ$ : trazione muscolo effetto rotazionale;
  - >  $90^\circ$ : trazione muscolo effetto rotazionale e traslazionale **stabilizzante**;
  - <  $90^\circ$  trazione muscolo effetto rotazionale e traslazionale **instabilizzante**

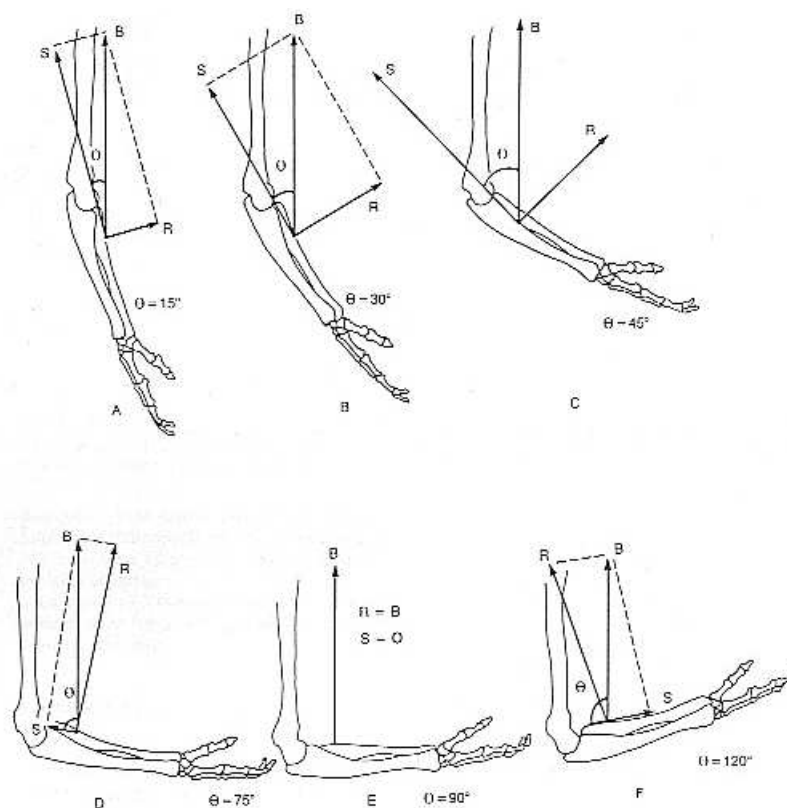


FIGURA 4-29

La componente rotatoria (R) della forza B aumenta quando il segmento corporeo si muove intorno al suo asse anatomico, ma il suo aumento non è lineare. Flessione dell'avambraccio: A =  $15^\circ$ , B =  $30^\circ$ , C =  $45^\circ$ , D =  $75^\circ$ , E =  $90^\circ$ , F =  $120^\circ$ .

---

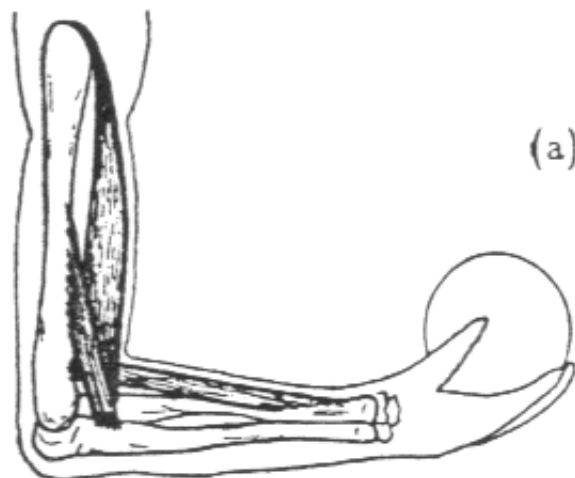
## Osservazioni: meccanica del gomito

---

- Semplificazione più forte: considerare il bicipite come unico gruppo muscolare responsabile del mantenimento della posizione flessa dell'avambraccio. Con questa ipotesi si è reso il problema staticamente determinato.
- Il bicipite, il brachiale ed il brachioradiale sono tutti muscoli flessori primari.

### **Come modellare il braccio con il bicipite, il muscolo brachiale, il muscolo brachioradiale?**

Si suppongono noti: punti di collegamento dei muscoli con le ossa, angoli tra muscoli e l'asse longitudinale dell'avambraccio, distanze gomito-baricentro e gomito-peso.





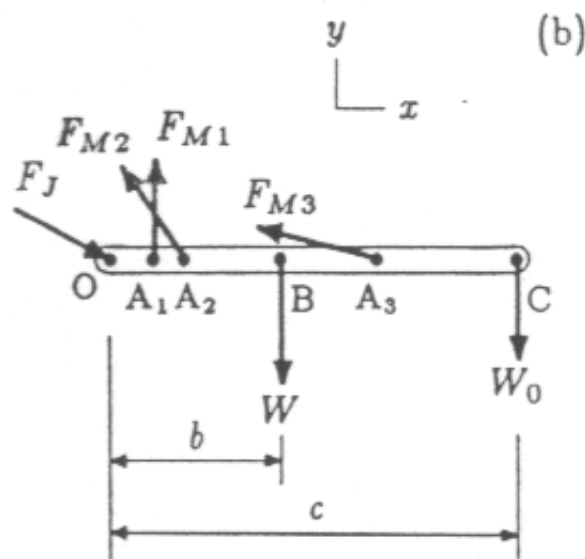
---

## Osservazioni: meccanica del gomito

---

Il problema è staticamente indeterminato:

5 incognite ( $F_{M1}$ ,  $F_{M2}$ ,  $F_{M3}$ ,  $F_{Jx}$ ,  $F_{Jy}$ ) e tre equazioni cardinali della statica.



Come risolvere il problema?

Possibile modo: assumiamo che ciascun muscolo eserciti una forza proporzionale alla sua sezione trasversale.

$$F_{M2} = k_{21} F_{M1} \quad \text{con} \quad k_{21} = \frac{A_2}{A_1}$$
$$F_{M3} = k_{31} F_{M1} \quad \text{con} \quad k_{31} = \frac{A_3}{A_1}$$

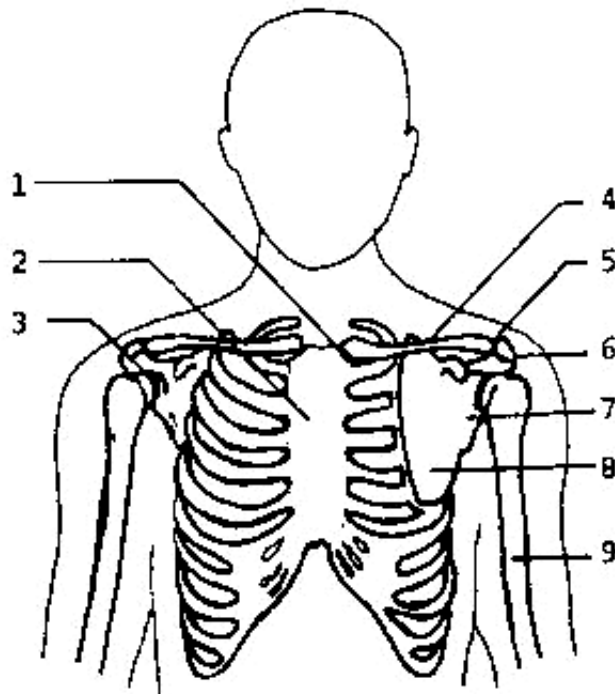
Le equazioni ora sono 5: sistema determinato.

---

## Meccanica della spalla

---

L'articolazione della spalla si divide in *articolazione scapolo-omeroale* (3) che rappresenta la connessione tra la cavità glenoidea (7) della scapola e la testa dell'omero (9), e *cintura scapolare* che comprende lo sterno (2), l'articolazione sternoclavicolare (1), la clavicola(4), l'articolazione acromio-clavicolare (5), il processo acromiale (6), la scapola (8).



---

# Meccanica della spalla

---

Nell'articolazione scapolo-omerale la testa dell'omero può muoversi con notevole libertà nella cavità glenoidea leggermente concava: cerniera sferica.

Movimenti permessi dall'articolazione scapolo-omerale:

- flessione ed estensione
- abduzione ed adduzione
- rotazione avanti ed indietro

La configurazione dell'articolazione la rende soggetta instabilizzazioni e dislocazioni.

Nella cintura scapolare la scapola può:

- alzarsi ed abbassarsi
- ruotare in avanti ed indietro
- protrarsi e ritrarsi

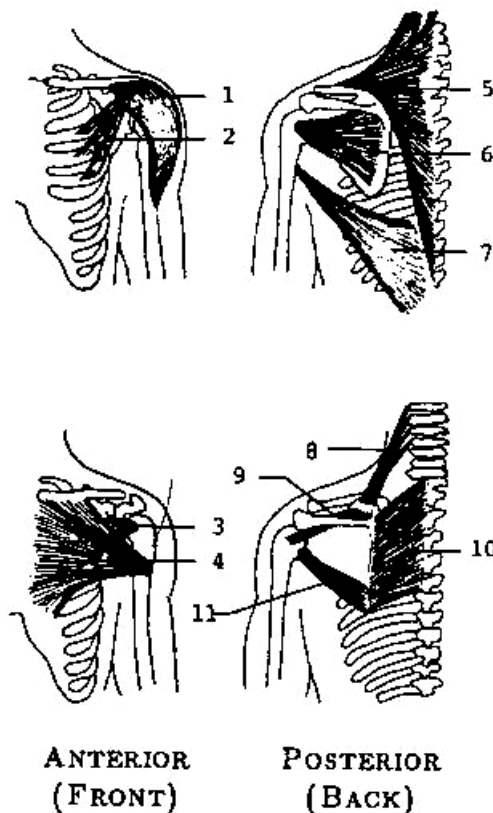
---

# Meccanica della spalla

---

Principali muscoli dell'articolazione scapolo-omerale:  
deltoidi (1) , soprascapolato (9), pettorale maggiore (4), latissimo del dorso (7), grande rotondo (11), piccolo rotondo e infrascapolato (6), sottoscapolare (3).

Principali muscoli della cintura scapolare:  
trapezio (5), elevatore della scapola (8), romboide (10), pettorale minore (2).



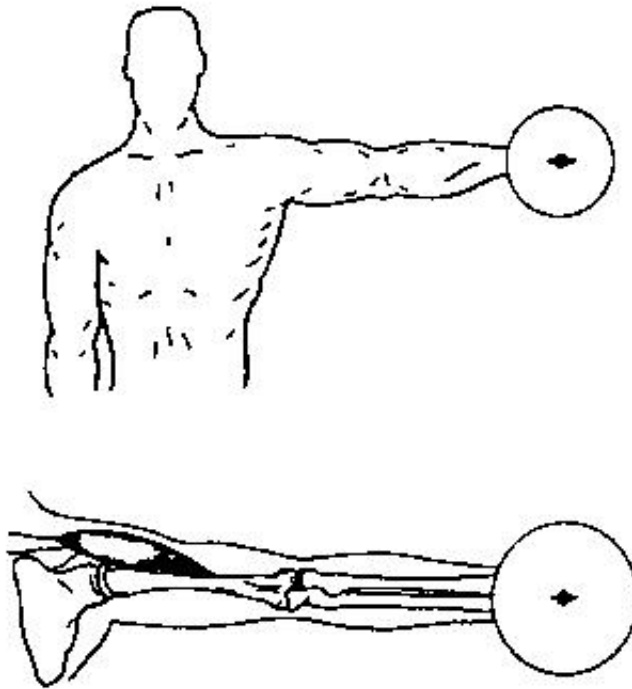
---

## Esempio: meccanica della spalla

---

- **Forze in gioco:**

- Peso oggetto  $W_0$  in C
- Peso braccio  $W$  in B
- Azioni muscolo  $F_M$  in A
- Reazione  $F_J$  in O



- **Dati:**  $OA = 4$  cm,  $OB = 15$  cm,  $OC = 35$  cm  
 $W = 40$  N,  $W_0 = 60$  N,  $\theta = 10^\circ$  angolo  $F_M$
- **Domande:**  $F_M$ ,  $F_J$ , caratteristiche di sollecitazione

**Scelta di un modello in base ad ipotesi**

---

# Meccanica della colonna vertebrale

---

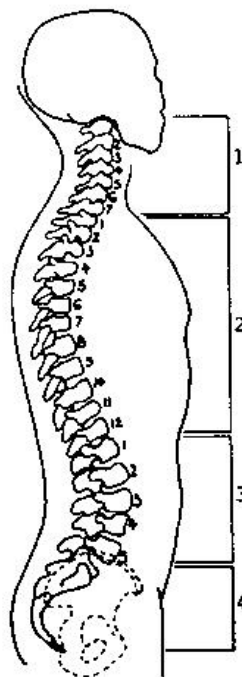
Si divide nelle regioni: cervicale (1), toracica (2), lombare (3), sacrale e coccigea (4).

E' costituita da 33 vertebre collegate da articolazioni anfi-artrodiali: ciascun segmento ha possibilità di escursione nei tre piani limitate rispetto al segmento adiacente.

Un disco fibrocartilagineo si interpone fra ciascuna coppia di vertebre.

L'intera colonna può essere schematizzata come una cerniera sferica .

Funzioni: proteggere il midollo spinale; sorreggere la testa, il collo e le estremità superiori; trasferire i carichi della testa e del tronco sul bacino; permettere vari movimenti.



---

# Meccanica della colonna vertebrale

---

Due importanti articolazioni della colonna vertebrale con la testa:

- *l'articolazione atlantooccipitale*: l'atlante articola con un duplice condilo occipitale permettendo il movimento saggitale e frontale della testa.
- *l'articolazione atlantoassiale*: il processo odontoide (epistrofeo) articola con l'atlante, consentendo la rotazione del cranio nel piano trasversale.

---

# Meccanica della colonna vertebrale

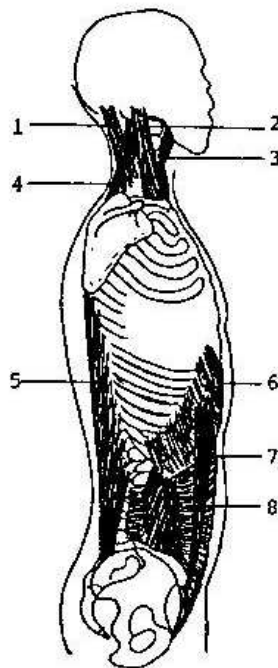
---

I principali muscoli della testa e del collo sono:

- muscoli posteriori: suboccipitale, splenio (1)
- muscoli laterali: sollevatore della scapola (4), scaleno
- muscoli anteriori: sternocleidomastoideo (2), sopraioideo (3)

I principali muscoli del tronco sono:

- muscoli anteriori: retto dell'addome (7), trasverso dello addome (8), addominali obliqui esterni ed interni (6)
- muscoli posteriori: erettore della colonna (sacrospinale), semispinale, spinale (5)





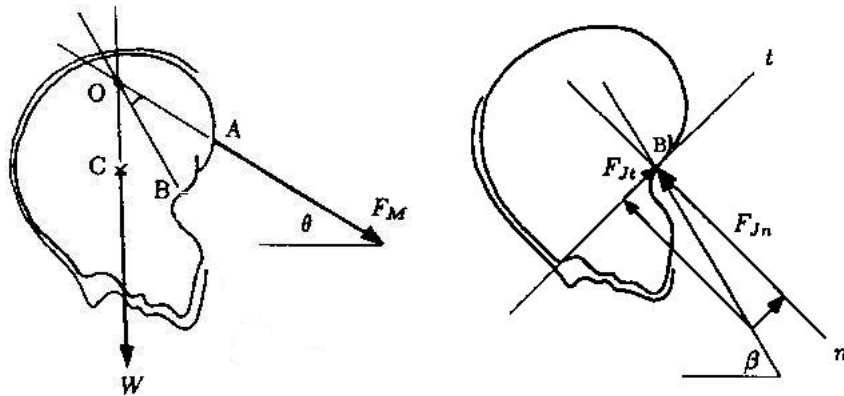
---

## Esempio: meccanica della colonna

---

- **Forze in gioco:**

- Peso testa  $W$  in C
- Reazione articolazione atlantooccipitale  $F_J$  in B
- Azione muscoli estensori collo  $F_M$  in A



- **Dati:**  $W = 50 \text{ N}$ ,  $\theta = 30^\circ$ ,  $B\hat{O}A = 30^\circ$

- **Domande:**  $F_J$  e sua inclinazione,  $F_M$

- **Discutere:** effetto di componenti normale e trasversale  $F_J$

---

# Meccanica della colonna vertebrale

---

Nella colonna vertebrale i dischi intervertebrali e i legamenti forniscono una stabilità intrinseca, i muscoli forniscono un supporto estrinseco.

- L'azione simultanea dei muscoli anteriori e posteriori controlla i movimenti flessionale e rotazionale del tronco.
- I muscoli posteriori controllano l'estensione del tronco.
- I muscoli addominali mantengono gli organi interni in posizione.
- Il muscolo quadrato dei lombi controlla la flessione laterale del tronco, stabilizza il bacino e la colonna lombare.

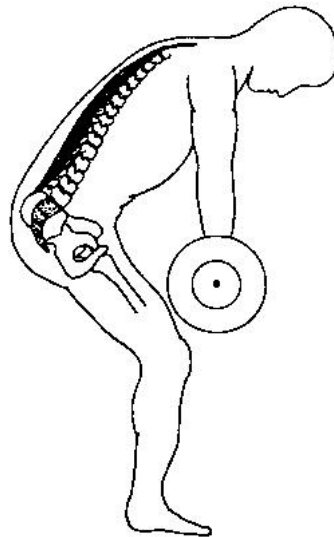
---

## Esempio: meccanica della colonna

---

- **Forze in gioco:**

- Peso oggetto  $W_0$  in C ,Peso atleta  $W$
- Azione muscoli erettori spina dorsale  $F_M$  in A
- Reazione articolare  $F_J$  in O (punto tra sacro e V vertebra lombare)



- **Dati:**
  - $h$  altezza uomo
  - $W_0 = W$  peso sollevato
  - $W_1 = 0.4W$  peso gambe e bacino in B
  - $\theta = 45^\circ$  angolo  $F_M$ -verticale
  - $a = 0.02h$  distanza  $OA$
  - $b = 0.08h$  distanza  $OB$
  - $c = 0.12h$  distanza reazione del terreno da  $O$
- **Domande:**  $F_J$ ,  $F_M$ , caratteristiche di sollecitazione, variazione forze al variare di  $\theta$

---

## Meccanica dell'anca

---

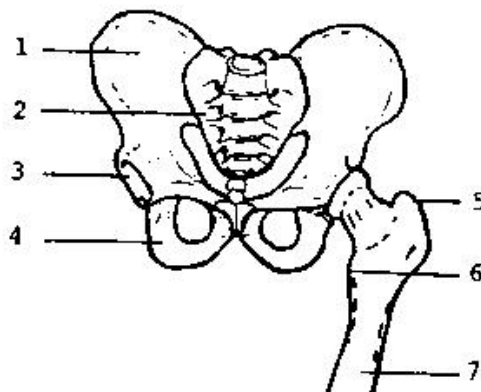
L'articolazione dell'anca, tra la testa del femore (5) e l'acetabolo (3) del bacino, è un'articolazione diartrodiale.

La sua stabilità e mobilità sono assicurate dalla conformazione, dai legamenti e dai muscoli che l'attraversano.

L'articolazione dell'anca permette i movimenti del femore: flessione ed estensione, rotazione avanti ed indietro, adduzione ed abduzione.

Il bacino è costituito da: ilio(1), ischio (4), sacro (2) e ossa del pube.

Le ossa del bacino formano un'articolazione sinartrodiale. I movimenti della spina dorsale e del femore determinano quelli del bacino. Non ci sono muscoli primari che muovono il bacino.



---

## Meccanica dell'anca

---

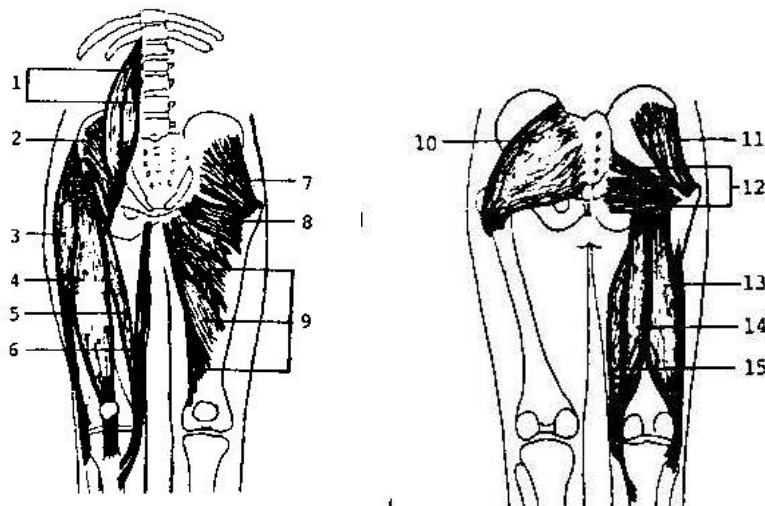
I muscoli dell'anca possono essere suddivisi in base alla loro funzione.

*Muscoli flessori primari:* psoas (1), iliaco (2), muscolo retto del femore (4), pettineo (8), tensore della fascia lata (3). Servono anche per calciare e correre.

*Muscoli estensori:* grande gluteo (10), bicipite femorale (13), semitendinoso (14) e semimembranoso (15). Questi ultimi servono anche come flessori del ginocchio.

*Muscoli abduttori:* sartorio (5), medio (11) e piccolo gluteo (7). Permettono la rotazione del femore. Il medio gluteo è anche il muscolo primario che stabilizza il bacino nel piano frontale.

*Muscoli adduttori:* adduttore lungo, breve, grande (9) e muscolo gracile (6).

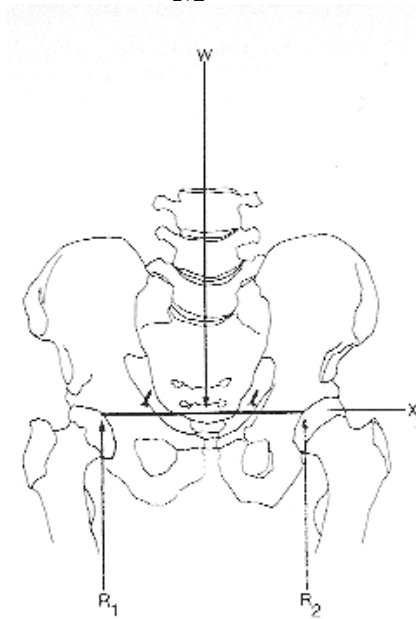


---

## Esempio: meccanica dell'anca

---

- Uomo posizione eretta appoggio bipodalico
- Forze in gioco:
  - Peso corpo  $W = 890 \text{ N}$
  - Peso gamba  $W_1 = .156W$
  - Azioni dei muscoli  $F_M$
  - Reazioni vincolari  $F_J$



- Geometria nota:
  - distanza teste femori da asse simmetria  $l = 15\text{cm}$
  - angolo asse anatomico femore rispetto verticale  $\beta=5^\circ$
  - angolo testa femore rispetto asse anatomico  $\theta=125^\circ$
- Domande:  $F_J$ ,  $F_M$ , caratteristiche di sollecitazione su femore, componenti di compressione e taglio di reazione articolare
- Discutere: componenti per  $\theta=90^\circ$  (coxa vara) e  $\theta=150^\circ$  (coxa valga).

---

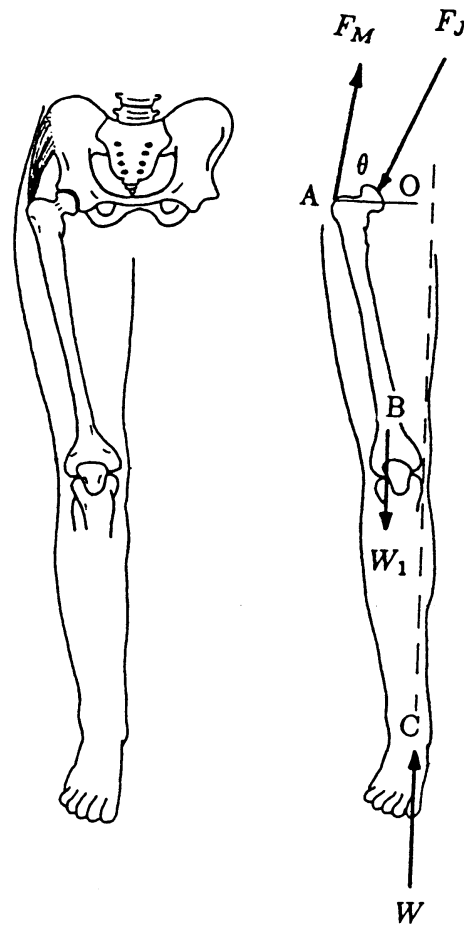
## Esempio: meccanica dell'anca

---

Da lezione: uomo in appoggio monopodalico

● Forze in gioco:

- Peso corpo  $W$
- Azioni dei muscoli  $F_M$
- Peso gamba  $W_1$
- Reazione vincolare  $F_J$



**Figure 5.24** Forces acting on the right leg carrying the entire weight of the body.

---

## Esempio: meccanica dell'anca

---

- **Come cambia il modello se considero l'equilibrio della parte superiore del corpo?**
- **Geometria nota:**
  - punto di applicazione  $D$  e angolo di inclinazione  $\theta$  di risultante muscoli abduttori  $F_M$
  - punto di applicazione  $E$  di reazione articolare  $F_J$  ( $0.1h$  da asse simmetria corpo)
  - direzione forza peso arto inferiore (15.6% peso totale) passante per  $E$
- **Domande:**  $F_J$ ,  $F_M$ , componenti di reazione articolare
- **Discutere:** come variano  $F_M$  e  $F_J$  nel caso in cui l'uomo porti
  - un carico  $W_0$  in ciascuna delle due mani
  - un carico  $W_0$  nella mano dalla parte dell'arto appoggiato
  - un carico  $W_0$  nella mano opposta all'arto appoggiato

Sia  $l = 0.2h$  distanza mano da asse simmetria corpo.



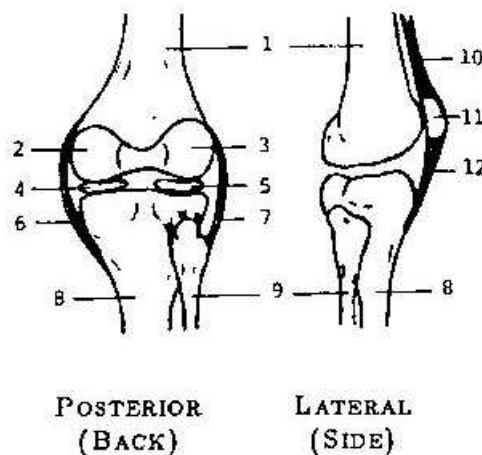
---

# Meccanica del ginocchio

---

Il ginocchio, la più grande articolazione del corpo, è composto da:

- *articolazione tibiofemorale*: presenta due articolazioni distinte fra i condili laterale (3) e mediale (2) del femore (1) e della tibia (8). Le articolazioni sono separate da menischi (4,5): eliminano il contatto fra ossa e assorbono gli urti. Legamenti laterali tibiali (6) e fibulari (7).
- *articolazione patellofemorale*: è l'articolazione fra la patella (11) e l'estremità anteriore del condilo femorale. La patella è un osso "mobile" tenuto in posizione dal quadricipite (10) e dal legamento patellare (12). Protegge il ginocchio da impatti e contribuisce alla trazione del quadricipite sulla tibia.



---

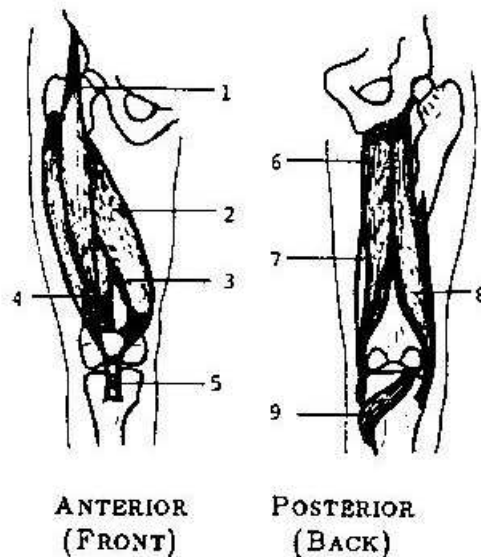
# Meccanica del ginocchio

---

Permette la flessione ed estensione dell'arto nel piano sagittale (cerniera) e una relativa rotazione interno-esterno; sostiene elevati carichi.

La stabilità del ginocchio è fornita dai legamenti, dai menischi e dai muscoli. Presenta un'elevata vulnerabilità: in particolare dei legamenti e dei menischi.

I muscoli che attraversano il ginocchio lo proteggono, ne determinano e controllano il movimento.



---

## Meccanica del ginocchio

---

- Il muscolo retto del femore (1) ha l'attacco prossimale sull'ileo anterio-inferiore e quello distale sulla patella; estende il ginocchio e flette l'anca.
- I muscoli vasto mediale (2), intermedio (3), laterale (4), hanno l'attacco prossimale sul femore e quello distale sulla tibia attraverso la patella ed il legamento patellare (5); controllano l'estensione del ginocchio.
- Il bicipite femorale (8) ha l'attacco prossimale sull'osso pelvico e sul femore, quello distale sulla tibia e sulla fibula. Il semitendinoso (6) e i muscoli semimembranosi (7) hanno l'attacco prossimale sull'osso pelvico e quello distale sulla tibia. Controllano l'estensione dell'anca, la flessione del ginocchio, le rotazioni interno-esterno della tibia.
- Il popliteo ha l'attacco prossimale sul femore e quello distale sulla tibia; controlla la flessione del ginocchio.
- Altri muscoli: sartorio, gracile, gastrocnemio (9) e plantare.

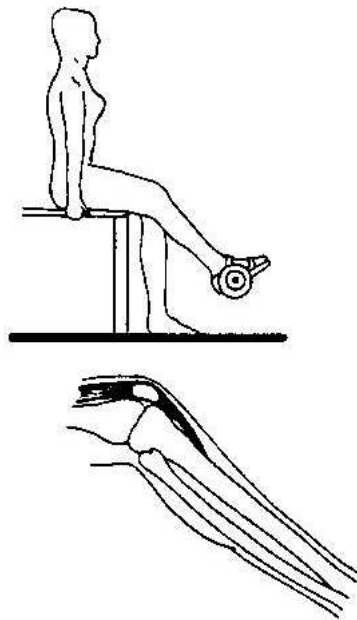
---

## Esempio: meccanica del ginocchio

---

- **Forze in gioco:**

- Peso scarpa  $W_0$  in C , Peso gamba  $W_1$  in B
- Azione quadricipiti  $F_M$  su tibia tramite patella in A
- Reazione articolazione tibiofemorale  $F_J$  in O



$W_0 = 100$  N peso scarpa

$W_1 = 150$  N peso gamba

$\beta = 45^\circ$  angolo tibia-orizzontale

● **Dati:**  $\theta = 15^\circ$  angolo  $F_M$ -tibia

$a = 12$  cm distanza  $OA$

$b = 22$  cm distanza  $OB$

$c = 50$  cm distanza  $OC$

● **Domande:**  $F_J$ ,  $F_M$ , caratteristiche di sollecitazione, variazione forze al variare di  $\theta$

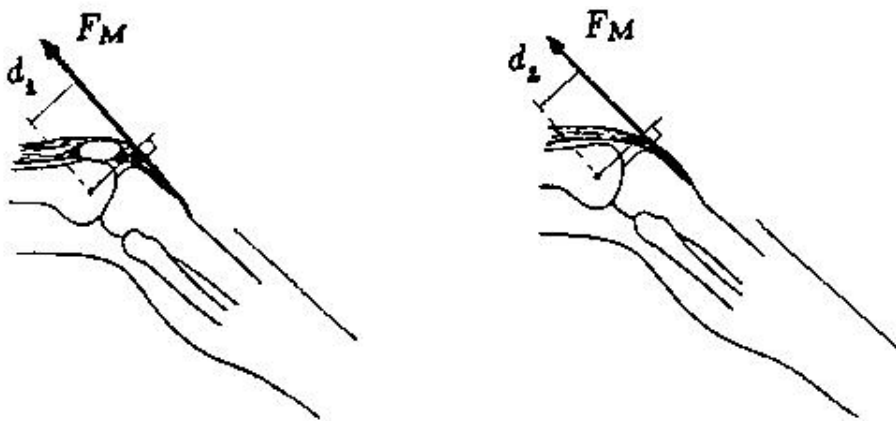
---

## Ossrvazioni: meccanica del ginocchio

---

Funzione biomeccanica della patella: causare uno spostamento in avanti del quadricipite e del tendine inserito sulla patella così da allungare il braccio di leva della forza del muscolo estensore del ginocchio rispetto al centro di rotazione dell'articolazione del ginocchio, aumentando l'angolo  $\theta$  tra la forza del muscolo e la tibia.

Un intervento chirurgico che rimuova la patella porta il tendine più vicino al centro di rotazione dell'articolazione del ginocchio facendo diminuire il braccio di leva della forza muscolare. Il quadricipite deve esercitare una forza maggiore per ruotare la gamba.



---

# Meccanica della caviglia

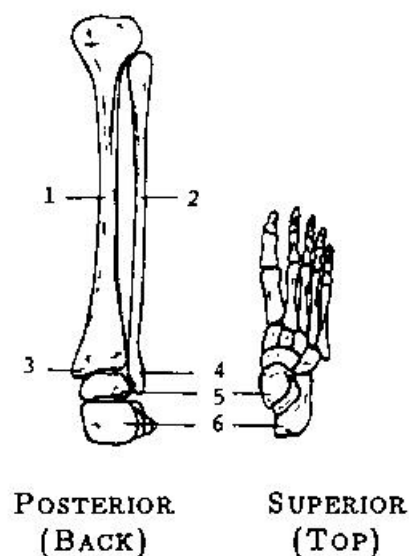
---

La caviglia è l'unione di tre ossa: la tibia (1), la fibula (2) e l'astragalo (5).

E' formata dalle articolazioni: tibiotalare, fibulotalare e tibiofibulare distale. Permette estensione e flessione del piede nel piano saggitale → cerniera.

Le articolazioni subtalare e trasversale tra astragalo e calcagno (6) permettono le rotazioni interno-esterno, la pronazione e la supinazione.

Funzioni: sorreggere i pesi, permettere movimenti. La stabilità della caviglia è dovuta alla forma delle articolazioni, ai legamenti e ai muscoli.



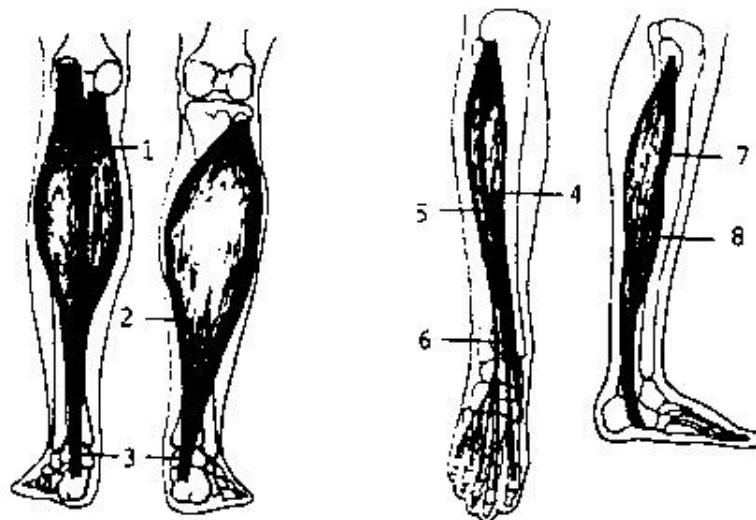
---

# Meccanica della caviglia

---

Suddivisione dei muscoli più importanti per funzione:

- *Flessione plantare del piede*: muscolo soleo (2) e gastrocnemio (1), posteriori. Si inseriscono sulla superficie posteriore del calcagno tramite il tendine calcaneare (tendine d'Achille) (3). Il gastrocnemio è efficace come flessore del ginocchio se il piede è sollevato, come flessore del piede se il ginocchio è in estensione.
- *Pronazione e supinazione, inversione ed eversione, rotazione*: tibiale anteriore (4), estensore lungo delle dita (5), estensore lungo dell'alluce (6), peroniero terzo (anteriori); peroniero lungo (7), peroniero breve (8) (lateral).



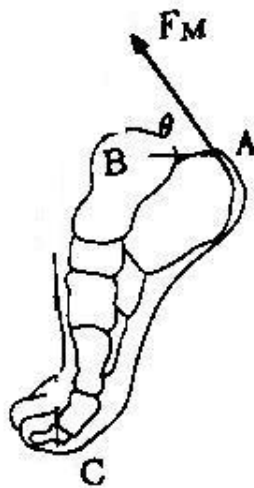
---

## Esempio: meccanica della caviglia

---

- **Forze in gioco:**

- Peso del corpo  $W$
- Azione gastrocnemio e soleo attraverso tendine di Achille  $F_M$  in A
- Reazione articolazione caviglia da tibia su astragalo  $F_J$  in B



- **Geometria nota:**

- $l$  lunghezza piede
- punto A e angolo  $\theta$  di  $F_M$
- punto B di  $F_J$  ( $0.35l$  da A)
- punto C di reazione terreno ( $0.5l$  da A)
- si trascura peso del piede

- **Domande:**  $F_J$  e sua direzione,  $F_M$  al variare di  $\theta$