

Fisica degli Sport Lezione 13:

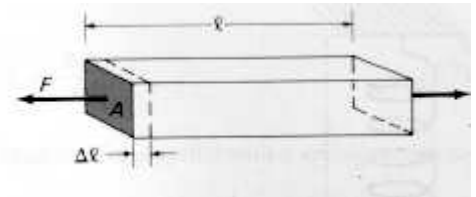
Fatica

Aggiornata al 30/4/1999

Resistenza meccanica delle ossa

Uno dei limiti fondamentali posti alle prestazioni umane consiste nella resistenza limitata delle ossa. Esistono dei limiti alla quantità di forza ed energia che le ossa sono in grado di assorbire senza rompersi. Per studiare questo fenomeno dobbiamo introdurre alcuni termini usati nella scienza dei materiali.

Consideriamo una barra di un certo materiale di lunghezza l e sezione trasversale di area A , come mostrato a destra. Qualsiasi forza longitudinale F tenderà ad allungare la barra di una lunghezza Δl . La sollecitazione unitaria sul materiale è data dalla forza interna per unità di superficie, cioè



stress.jpg

$$\text{sollecitazione unitaria} = s = F/A \text{ (N/m}^2\text{)}$$

L'allungamento unitario del materiale è la variazione relativa (adimensionale) di lunghezza, ovvero una misura di quanto si allunga la barra,

$$\text{allungamento unitario} = S = \Delta l/l$$

Il rapporto tra la sollecitazione unitaria e l'allungamento unitario viene chiamato modulo di Young, oppure modulo di elasticità:

$$\text{Modulo di Young} = Y = s/S \text{ (N/m}^2\text{)}$$

Il modulo di Young definisce l'elasticità di un materiale e quanta energia elastica può immagazzinare. I materiali con valori elevati del modulo di Young sono rigidi e difficili da allungare o piegare. La quantità di energia elastica immagazzinata in un materiale allungato o compresso è data da

$$E = 1/2 (YA/l) D l^2$$

Questa formula è molto simile a quella per l'energia immagazzinata in una molla: $E = 1/2 k D l^2$, dove k è la costante elastica della molla. Quindi potete notare che un materiale sottoposto a pressione si comporta come una molla di costante elastica YA/l . La Legge di

Hooke definisce la forza esercitata da una molla in termini di costante elastica:

$$\mathbf{F} = -k\mathbf{x}$$

Questa relazione si applica anche ai materiali sottoposti a pressione.

La pressione massima che un materiale può sostenere senza rompersi è chiamata modulo di rottura o carico di rottura, s_b .

I valori di Y e s_b per alcuni materiali (incluso il tessuto osseo umano) sono riportati nella tabella qui sotto.

Materiale	Modulo di Young (10^8 N/m^2)	Modulo di Rottura (10^6 N/m^2)
Osso	180	160-210 (compressione) 80-120 (tensione) 30-40 (torsione)
Cemento	28	4,5
Acciaio	2000	450
Legno	1,4	3,6

Consideriamo quanta energia sono in grado di assorbire le ossa delle gambe (senza rompersi) quando si atterra da una caduta. Si tratta di una compressione, quindi il modulo di rottura per l'osso sarà $s_b \sim 2 \times 10^8 \text{ N/m}^2$. La forza totale sarà semplicemente s_b moltiplicato per la superficie della sezione trasversale dell'osso. Inserendo questa relazione nella Legge di Hooke si ottiene:

$$F_{\text{totale}} = s_b A = YA/l \Delta l$$

Risolviendo per Δl si ricava il valore massimo di compressione raggiungibile prima di una frattura:

$$\Delta l = s_b l / Y$$

Possiamo inserire questo valore nell'equazione dell'energia data sopra per trovare l'energia massima che può venire assorbita:

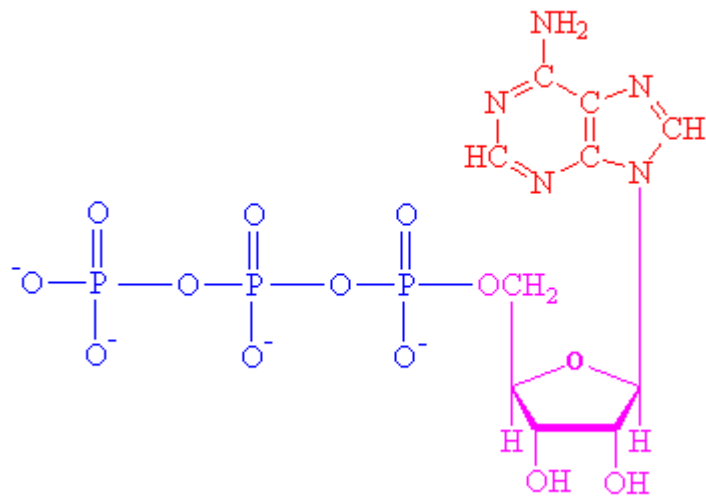
$$E_{\text{max}} = 1/(2Y) A l s_b^2$$

Se consideriamo un osso con una lunghezza di $\sim 45 \text{ cm}$, un diametro di $\sim 3 \text{ cm}$, ed i valori di

s_b e Y dati sopra, il risultato è ~ 350 J. Questa è la quantità di energia che assorbirebbe una persona di 70 kg dopo una caduta da ~ 50 cm, ovvero ~ 20 pollici (meno di 2 piedi). Questo genere di “caduta” è molto comune negli sport, mentre le gambe rotte non lo sono. Abbiamo già parlato di com'è possibile attutire la caduta piegando le ginocchia ed aumentando il tempo di collisione, ma vedremo presto che, oltre a questo, i muscoli proteggono costantemente le ossa da pericolosi traumi... tranne quando sono affaticati.

Effetti della fatica sui muscoli

La molecola principalmente responsabile nel fornire l'energia che fa muovere i muscoli è chiamata adenosintrifosfato, o ATP. E' mostrata nella figura a destra; potete vedere i tre fosfati che sporgono (ciascuno di essi ha una P al centro). I minuscoli motori molecolari nelle fibre muscolari utilizzano l'ATP rompendo uno dei legami fosfato, un processo che rilascia energia e si lascia dietro – avete indovinato – adenosindifosfato (ADP). Se si aggiunge di nuovo un fosfato all'ADP, torna ad essere ATP e può essere riciclato. Comunque questo richiede energia.



I muscoli conservano molto poco ATP; circa 10-20 secondi di attività intensa sono sufficienti ad esaurirne la riserva. Quando ciò si verifica l'ATP deve essere rigenerato o il corpo smetterà di funzionare. Ci sono due processi primari attraverso i quali l'ATP viene reintegrato: il ciclo anaerobico ed il ciclo aerobico.

Il ciclo anaerobico (chiamato anche glicolisi) utilizza gli zuccheri come fonte di energia per ricostruire l'ATP. Il glicogeno viene immagazzinato principalmente nel fegato, ma una piccola quantità si trova anche nel tessuto muscolare. Il glucosio è presente nel sangue. Questi sono gli zuccheri impiegati nella glicolisi.

L'acido lattico è un sottoprodotto della glicolisi. Viene spesso considerato un prodotto di scarto del processo di rigenerazione dell'ATP. Comunque l'acido lattico stesso può essere convertito in ATP in presenza di ossigeno, quindi questo prodotto di scarto si può considerare anche un “combustibile”. Quando il corpo lavora in modo anaerobico (usando le fibre muscolari a spasmo rapido per ottenere il massimo dell'attività) l'acido lattico viene prodotto più velocemente di quanto non si possa convertire in ATP. Ciò viene definito

limite anaerobico. Dopo circa due minuti oltre il limite anaerobico, l'acido lattico comincerà ad accumularsi.

La prima e più ovvia conseguenza di una quantità eccessiva di acido lattico nei muscoli è un dolore intenso e pungente. È il modo in cui il corpo avvisa di rallentare l'attività entro il limite anaerobico, in maniera tale che l'acido lattico possa essere convertito in ATP. Tuttavia, non è detto che le prestazioni dei muscoli calino fino a questo punto. Gli atleti professionisti possono allenare i muscoli a funzionare efficacemente con livelli elevati di acido lattico.

Alla fine, però, la quantità di acido lattico arriverà ad un punto tale che il sangue diverrà più acido. Ciò interferisce con le reazioni chimiche che causano le contrazioni muscolari, per cui le prestazioni si abbasseranno rapidamente finché il corpo inizierà a lavorare in modo aerobico.

Nel ciclo aerobico l'energia viene ancora fornita dal glicogeno e dal glucosio, così come l'acido lattico prodotto in modo anaerobico, ma adesso entra in gioco una nuova fonte di energia: il grasso. Il glicogeno domina per i primi 30 minuti di esercizio aerobico e poi è la volta del grasso.

Il corpo umano contiene delle riserve di glicogeno che durano abbastanza per circa 1 ora e 3/4 - 2 ore di corsa intensa. In genere le riserve di grasso sono assai maggiori. Una libbra di grasso contiene abbastanza energia per correre oltre 30 miglia. Tuttavia il grasso non può essere utilizzato in modo efficiente in assenza di glicogeno. Ciò da' origine al "muro" di cui parlano i maratoneti: se iniziano troppo velocemente, consumeranno tutto il glicogeno in meno di due ore (che è meno di quanto ci voglia a finire una maratona) ed i loro muscoli non saranno in grado di convertire il grasso in modo produttivo, quindi perderanno energia e non riusciranno a correre bene.

Dopo circa quattro ore di attività intensa, i muscoli iniziano ad utilizzare come "combustibile" le loro stesse proteine, praticamente cominciano a consumarsi. Studi hanno dimostrato che, dopo un'attività del genere, (per es. un lungo percorso di maratona) i muscoli tendono a ricostruire le fibre muscolari a spasmo lento. Questa è una reazione comprensibile: il corpo sta cercando di adattarsi a periodi di attività molto lunghi. In generale, la proporzione tra le fibre a spasmo rapido e le fibre a spasmo lento è fissata dalla nascita. Ma la reazione di cui sopra è un modo (anche se estremo) di cambiare tale proporzione nel corso della vita... anche se non è molto consigliato.

L'attività aerobica, dunque, è l'unica a bruciare grasso. Ma riesce a farlo in un modo che potrebbe apparire contro intuitivo. Più è intensa l'attività, più i muscoli tendono ad utilizzare il "combustibile" che è a portata di mano: il glicogeno. Solo a livelli di attività inferiori il grasso viene bruciato efficacemente. Correndo, il grasso viene bruciato in quantità maggiore se si tiene un'andatura inferiore del 30% a quella massima sostenibile (non considerando lo scatto). Per cui c'è una notizia buona ed una cattiva se si vuole fare esercizio per perdere peso. La buona notizia è che non ci si deve ammazzare di fatica:

livelli di attività moderati bruciano effettivamente più grasso. La cattiva notizia è che non c'è nessun espediente rapido; non si inizia a bruciare grasso prima di aver fatto esercizio per 30 minuti.

Le fasi progressive in cui si trovano i muscoli durante l'attività sono indicate nella tabella sotto.

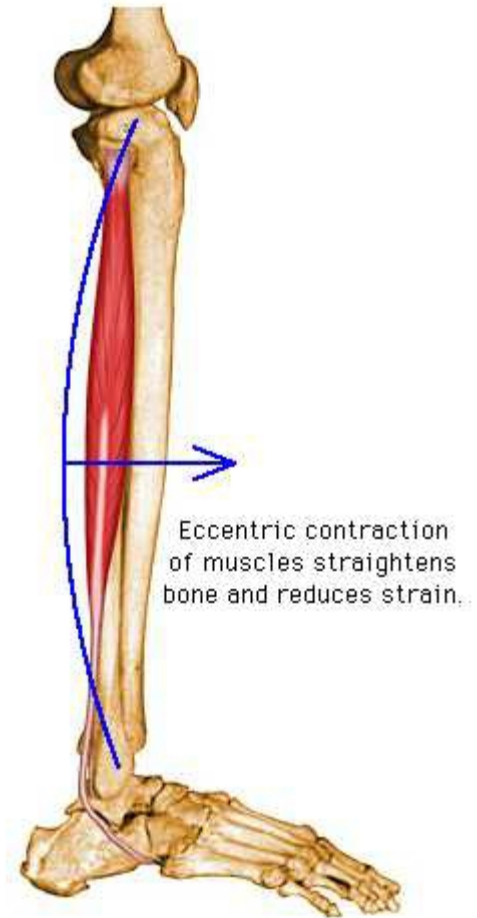
Tempo dall'inizio dell'attività	Processo	Combustibile
0 - 20 s	Anaerobico	ATP
20 s - 2 m	Anaerobico	glicogeno, glucosio
2 m - 30 m	Aerobico	glicogeno, glucosio, acido lattico
30 m - 4 ore	Aerobico	glicogeno, glucosio, acido lattico, grasso
>4 ore	Aerobico	grasso, proteina muscolare

Fratture da stress

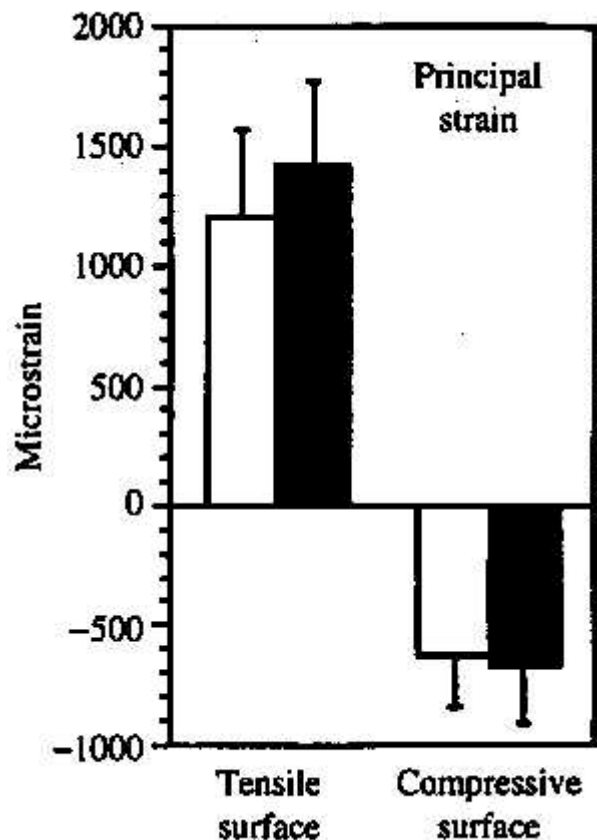
A prima vista i due argomenti di cui abbiamo trattato, resistenza delle ossa e affaticamento muscolare, sembrerebbero del tutto estranei tra di loro. Ma non è così, c'è un certo collegamento. In realtà si scopre che i muscoli sono importantissimi per proteggere le ossa dalle fratture da stress, che sono traumi causati da troppe sollecitazioni alle ossa. Lo si vede esaminando la figura a destra. Immaginate cosa succederebbe se l'osso fosse piegato come indicato dall'arco in blu. La parte destra dell'osso subirebbe una compressione, e abbiamo già visto che l'osso è piuttosto resistente in questa situazione. Ma la parte sinistra dell'osso è in tensione ed esso è resistente solo la metà (o meno) contro questo tipo di stress. Una flessione di questo tipo tenderebbe a causare una contrazione eccentrica (la forma più intensa di contrazione) del muscolo del polpaccio, cosicché una qualsiasi forza esercitata dai muscoli del polpaccio tenderebbe a raddrizzare l'osso, come indicato dalla freccia blu. Per cui i muscoli non solo [rendono stabili le articolazioni](#), ma anche le ossa, permettendogli di resistere a ripetuti stress.

Naturalmente, ciò è possibile finché i muscoli non si

affaticano. La fatica, oltre a diminuire la capacità dei muscoli di produrre forza, influisce anche sui tempi di reazione. Ciò avviene perché gli impulsi nervosi che ordinano alle fibre muscolari di contrarsi fanno affidamento sugli elettroliti che si esauriscono quando ci si sottopone ad un'attività intensa. Questo riduce l'efficacia dei muscoli nel rendere stabili le ossa, perché non sono in grado di reagire abbastanza velocemente da fornire il sostegno necessario; come conseguenza si possono verificare delle fratture. Questo è anche il motivo perché molti incidenti sulle piste da sci avvengono sul tardi quando gli sciatori sono stanchi: trovano un dosso inaspettato, reagiscono troppo lentamente (e troppo debolmente) e sapete quello che avviene dopo: bisogna scrostarli via da un albero.



Alcuni dati a sinistra mostrano questo effetto. L'allungamento delle ossa nelle zampe dei segugi utilizzati nella caccia alla volpe è stato misurato prima (barre bianche) e dopo (barre nere) 20 minuti di attività intensa. Notate che gli allungamenti sono assai maggiori dopo che la fatica muscolare si è fatta sentire. Notate anche che l'effetto è maggiore nella tensione, in cui l'osso è più vulnerabile.



Raffreddamento

La necessità di raffreddare il corpo rappresenta uno dei limiti fondamentali nelle gare di resistenza. Il fatto che i muscoli sono efficienti solo al 20% circa significa che, mentre si fa esercizio fisico, si produce molto calore in eccesso. Questo calore deve essere dissipato per far sì che il corpo possa continuare a funzionare in modo appropriato.

Il corpo umano utilizza diversi meccanismi per raffreddarsi. Uno di questi consiste nel dilatare i vasi sanguigni che si trovano in prossimità della superficie cutanea; così il sangue affluisce in quantità maggiore verso la superficie dove può trasmettere il calore all'ambiente circostante. Misurazioni della temperatura cutanea vicino ad un muscolo sottoposto ad esercizio registrano un innalzamento di circa 5°. Il lato negativo sta nel fatto che questo devia il flusso sanguigno dai muscoli, facendoli affaticare prima.

Il metodo di raffreddamento più efficace per il corpo umano è l'evaporazione del sudore. Comunque, ci vuole un buon flusso d'aria per ottenere il massimo del suo effetto. In questo caso i ciclisti sono estremamente avvantaggiati. Hanno sempre un "vento" che soffia loro addosso a 20-30 miglia orarie, permettendogli di disperdere calore attraverso

l'evaporazione in modo migliore rispetto a chi corre. Prendete ad esempio la quantità di liquidi assunta dagli atleti durante il Tour de France rispetto a quella assunta dagli atleti in una maratona: i ciclisti bevono molto di più perché sfruttano la sudorazione più degli altri.

Quando il sudore incomincia a scivolare sul corpo formando delle goccioline è segno che il sistema di raffreddamento corporeo ha cominciato a funzionare male. La presenza di sudore liquido indica che esso viene prodotto più velocemente di quanto riesca ad evaporare e quindi non si otterrà un raffreddamento ottimale.

Un eccessivo riscaldamento dovuto ad un esercizio particolarmente pesante può essere molto pericoloso. In casi estremi, il tessuto muscolare inizia a cedere per colpa del calore e la circolazione del sangue si riempie di prodotti di scarto. Questo può causare un sovraccarico ai reni e farli smettere di funzionare. Le conseguenze possono essere fatali: molti lottatori universitari si sono allenati fino a morire usando, durante gli allenamenti, delle tute di plastica progettate per far sudare molto e quindi perdere peso. Anche se questo è, ovviamente, un esempio estremo, bisognerebbe fare attenzione quando ci si allena esponendosi ad un calore eccessivo.

Lezione 13 PUNTI PRINCIPALI:	<u>Lezione 14</u> ANTEPRIMA:
<ul style="list-style-type: none"> • Le ossa sono più resistenti se sottoposte a compressione piuttosto che a tensione. • Il grasso viene bruciato solo in modo aerobico e solamente dopo circa 30 minuti di attività fisica. • I muscoli aiutano a stabilizzare le ossa contro le fratture da stress. 	<p>Introduzione al moto rotazionale.</p>