

# Capítol 1. Dimensions, massa, moviment i respiració (del gosset a l'elefant)

Hi ha un enorme tret...

A.S. Griboiédov, *La desgràcia de tenir massa enginy*

## 1.1 Introducció

## 1.2 Massa del cos i mode de vida

### 1.2.1 Estímul, resposta i massa: temps de reacció

### 1.2.2 Freqüència dels passos...

#### 1.2.2.1 ... i treball dels músculs...

### 1.2.3 Animals semblants

## 1.3 Qui salta més alt i nada més ràpid

### 1.3.1 Tots salten igual...

### 1.3.2 El peix gran nada més ràpidament...

## 1.4 Caminar, córrer i rodar

### 1.4.1 Adults i xiquets de passeig

### 1.4.2 La roda

## 1.5 Massa i energia

### 1.5.1 Metabolisme

### 1.5.2 Consum energètic i massa

### 1.5.3 Refredament d'un cos (llei de Newton)

### 1.5.4 Voracitat dels animals...

### 1.5.5 Efectes de les medicines:

variació temporal de la concentració

## 1.6 La manera de respirar determina la massa de l'animal

### 1.6.1 Respiració via la superfície del cos

### 1.6.2 Llei de la difusió

### 1.6.3 Organismes rudimentaris: anàlisi dimensional

## 1.1 Introducció

El regne animal és ric i variat. Ens deixa esbalaïts no solament pel nombre d'espècies diferents sinó, també, per les envergadures i les grandàries dels animals. En efecte, en comparar entre si els animals que pertanyen a una mateixa classe, per exemple els mamífers terrestres, resulta que les masses varien des dels 3 g de la musaranya fins a les 3 tones ( $3 \times 10^6$  g) de l'elefant. En el regne dels pardals les diferències són un poc menors, però també impressionants: des del colibrí —pardal mosca—, la massa del qual és d'1 g, fins a l'estruç africà, amb una massa de 100 kg ( $= 10^5$  g).

És evident que dimensions i massa del cos guarden una estreta relació amb el mode de vida de l'animal. Quines lleis físiques generals determinen aquesta relació?

(Física) Magnitud és...

(Física) Ordre de magnitud és...

(Física) Massa és...

i es mesura en...

Q1) Quantes ordres de magnitud<sup>2</sup> hi ha entre la massa dels mamífers? I la dels ocells<sup>3</sup>

Q2) Quantes ordres de magnitud hi ha entre la distància de la teua casa a la UA i als antípodes?

Q3) Contesta el full "Lleis d'escala" (cap. 11, Practicing Physics, Hewitt)

## 1.2 Massa del cos i mode de vida

### Dades biològiques<sup>4</sup>

Quan observem el comportament de l'elefant en el parc zoològic pareix com si tots els moviments estiguessen retardats artificialment, com en una pel·lícula alentida. Tenim una impressió diametralment oposada si observem un ratolí: els seus moviments són ràpids i àgils.

Aquests exemples suggereixen que el ritme de vida i el rellotge biològic depenen de la massa de l'animal. En efecte, l'elefant pot arribar a superar els 70 anys, mentre que el ratolí només en viu 2 o 3. L'embaràs de l'elefanta és de 18 a 22 mesos; en el cas del ratolí, aquest període és de 23 dies.

La velocitat del rellotge biològic és diferent no sols per a les diverses espècies d'animals, sinó que també pot variar en un mateix organisme durant el seu creixement. Els xiquets de pit, per exemple, dormen diverses vegades al dia; els xiquets de 2 a 5 anys ho fan dues vegades, i nosaltres, una sola vegada. Així, quan el xiquet creix, el període de la marxa del seu rellotge biològic augmenta fins a 24 hores.

(Física) Velocitat és...

i es mesura en...

<sup>2</sup> Sobre el formatat i l'estructura del text...:

Les caixes que apareixen a la dreta del text, tipus "(Física) Magnitud és...", pretenen reforçar el fet que aquest és un llibre de física per a estudiants/tes de biologia i, per tant, hi remarcarem els conceptes físics que es van fent servir per explicar dades biològiques.

<sup>3</sup> Les qüestions numerades, Q1, Q2, que s'intercalen al llarg del text pretenen ajudar a fer una lectura pausada i entenedora del text.

<sup>4</sup> Els paràgrafs que continguin, bàsicament, informació biològica i no física, es marcaran amb una ratlla vertical a l'esquerra i s'escriuran amb lletra més menuda.

Com podem explicar la dependència que hi ha entre el desenvolupament de diferents activitats biològiques o físiques (caminar, alenar, dormir, nadar, etc.) i la massa de l'animal?

### 1.2.1 Estímul, resposta i massa: temps de reacció

Deduirem ací la relació que enllaça la massa de l'animal i el temps de reacció d'un animal als estímuls externs. És evident que el temps de reacció depèn de les dimensions del cos de l'animal i de la velocitat de propagació de l'excitació pels seus nervis (capítol 7è). La velocitat de propagació de l'impuls nerviós per als diferents mamífers és aproximadament la mateixa, per això el temps de reacció de l'animal ha de ser directament proporcional a les dimensions lineals.

*Q4) Explica l'afirmació anterior.*

Investigacions diverses han demostrat que la longitud dels animals augmenta amb la massa  $M$  del cos de manera directament proporcional a  $M^{1/4}$  ( $= M^{0.25}$ ). Per tant, si l'impuls nerviós es propaga a una velocitat constant en tots els mamífers, el temps necessari per a la reacció als estímuls és proporcional a la longitud del cos i, per tant, proporcional a  $M^{0.25}$ .

$$t_{\text{reacció}} \propto M^{1/4} \quad (1)$$

*Q5) Segons aquesta relació, quant de temps més tarda a reaccionar una serp que un ratolí, si els estímulen en l'extrem oposat al cap? Repeteix el càlcul suposant que el temps de reacció és proporcional a la longitud del cos. (Quina relació entre  $t_{\text{reacció}}$  i  $M$  hi hauria en aquest darrer cas, en lloc de la (1)?)*

*Q6) Experiment senzill: atrapada d'un bitllet i temps de reacció humana.*

S'ha mesurat que la freqüència de les contraccions cardíaques i de la respiració dels diferents mamífers també varia proporcionalment a  $1/M^{1/4}$  ( $= M^{-0.25}$ ),

$$\text{freqüència (cardíaca i respiratòria)} \propto M^{-1/4} \quad (2)$$

Fins ara no s'ha aconseguit explicar aquesta relació tan simple.

*Q7) Fes una gràfica qualitativa de com varia el temps de resposta d'un animal i el ritme cardíac amb la massa a la vista de les relacions (1) i (2).*

### 1.2.2 Freqüència dels passos...

Per què el ratolí quan corre fa un nombre molt major de passos per minut que l'elefant? Aquestes diferències en els ritmes d'animals grans i petits no sols són característiques dels mamífers. En la taula 1 es representa com varia la freqüència d'aleteig per a ocells de massa diferent. S'hi veu que l'aleteig dels ocells grans és molt menys freqüent que el dels petits.

*Dada experimental:*  
 longitud del cos  $\propto$   
 (massa del cos)<sup>1/4</sup>

*Dada experimental:*  
 velocitat de propagació de  
 l'impuls nerviós  $\approx$  constant

*(Física) Temps de caiguda lliure és...*  
 es mesura en...  
 i es calcula així:  
 $t = \sqrt{2h/g}$        $g = 10 \text{ m s}^{-2}$

*(Física) Freqüència és...*  
 i es mesura en...

Taula 1. Massa del cos i freqüència d'aleteig dels ocells.

Ocell	Massa del cos (kg)	Freqüència d'aleteig (Hz)
Grifó	8	2
Cornella	0.6	4
Teuladí	0.03	10
Colibrí	0.003	50

(Física) Acceleració és...  
i es mesura en...

Investigacions més minucioses han demostrat que, en disminuir la massa del cos de l'ocell, aquesta freqüència augmenta proporcionalment a  $M^{-0.25}$ ,

$$\text{freqüència del moviment (aleteig, caminar)} \propto M^{-1/4} \quad (3)$$

Q8) Representa en paper mil·limetrat (o, simplement, quadriculat) les dades de la taula 1 i verifica la relació (3), de dues maneres: a) representant directament la freqüència en funció de la massa, b) representant el logaritme de la freqüència en funció del logaritme de la massa.

Q9) Representa en paper log-log (doblement logarítmic) les dades de la taula 1 i verifica la relació (3).

### 1.2.3 ... i treball dels músculs...

La regla general que assenyalava que els animals grans requereixen més temps que els petits per a fer un moviment del mateix tipus es pot explicar si analitzem el treball fet pel múscul durant la contracció.

#### Els músculs

L'estructura d'un múscul de l'esquelet es representa en la fig. 1. El múscul consta d'una multitud de cèl·lules musculars (fibres): el seu diàmetre és de 0.01 mm a 0.1

mm; la longitud pot arribar a alguns centímetres. Aquestes fibres inclouen fibril·les musculars fines que tenen un estriat característic, determinat per la periodicitat de l'estructura longitudinal.

La fibril·la consta de segments repetits, anomenats sarcòmers, separats per les línies (discos). La longitud del sarcòmer en el múscul relaxat és d'uns 2.5  $\mu\text{m}$ . Cap als dos costats del disc Z s'estenen filaments molt fins (d'uns 0.005  $\mu\text{m}$  de diàmetre) i en els espais entre aquests entren filaments més grossos (el seu diàmetre és de vora 0.01  $\mu\text{m}$ ). La longitud dels filaments grossos (de miosina) és d'uns 1.5  $\mu\text{m}$ , i la dels fins (d'actina) va d'1 a 1.3  $\mu\text{m}$ .

Els filaments fins i grossos estan units entre si per enllaços transversals intermoleculars. Quan el múscul es contrau, per exemple, aquests enllaços s'estructuren de forma que els filaments grossos s'esmunyen entre els fins, introduint-se a major profunditat en els espais entre aquests, de manera que la distància entre els discos Z disminueix.

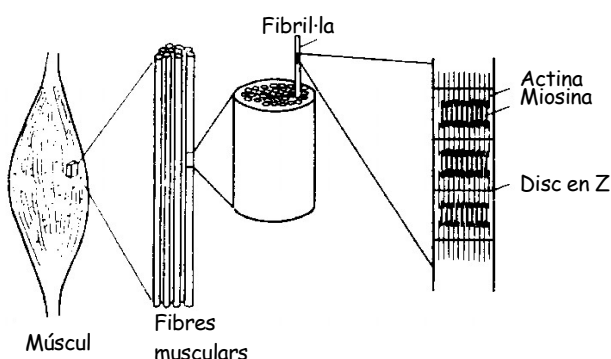


Fig. 1. Estructura d'un múscul de l'esquelet

La força desenvolupada pel múscul depèn de l'àrea de la secció transversal (per això les maromes d'un vaixell són gruixudes) i, per tant, la força màxima depèn del nombre de fibril·les que caben en l'àrea donada. La relació de la força màxima desenvolupada pel múscul a l'àrea de la secció transversal varia entre límits molt petits i, per regla general, va de 40 a 60 N/cm<sup>2</sup>. Durant la contracció del múscul la longitud de cada sarcòmer no pot disminuir més que 1 μm i, per tant, el valor màxim d'escurçament de tot el múscul ha de ser proporcional a la longitud del múscul. Per aquesta raó, el treball fet pel múscul, que és igual al producte de la força pel valor de l'escurçament, ha de ser proporcional al volum (o, el que és equivalent, a la massa) del múscul. De la relació

$$\text{treball (del múscul)} \propto \text{volum} \propto \text{massa (del múscul)} \quad (3')$$

es dedueix que el quocient treball/massa, (que es llegeix: "treball per unitat de massa") és una constant, que anomenarem *W*,

$$W = \frac{\text{treball que fa el múscul}}{\text{massa del múscul}} = \text{constant} \quad (4)$$

*Q10) Fes una estimació de la força màxima que pot fer el teu braç per unitat d'àrea dels músculs del braç. Compara el resultat amb el valor 40-60 N/cm<sup>2</sup> que dona el text.*

(Física) Força és...  
i es mesura en...

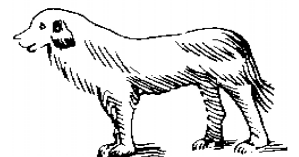
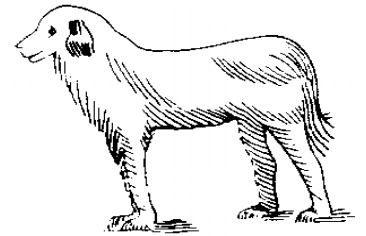


Fig. 2. Animals semblants

### 1.2.4 Animals semblants

Suposem ara que disposem d'un grup d'animals semblants en tots els aspectes i que es diferencien els uns dels altres tan sols per la massa (veges la fig. 2). La massa d'un d'aquests animals és *M* i la massa del múscul, la contracció del qual fa moure el cos, és *CM*, en què *C* és una constant sense dimensions per a tot aquest grup d'animals (òbviament, *C* < 1). Si, segons l'eq. (4), una unitat de massa del múscul és capaç de fer el treball *W*, resulta que el treball fet per tot el múscul és igual a *WCM*. Suposem que aquest treball s'inverteix a comunicar la velocitat *v* a la part del cos<sup>5</sup> que té la massa *C<sub>1</sub>M*, en què *C<sub>1</sub>* és una altra constant adimensional per al mateix grup d'animals. Per a donar la velocitat *v* a la massa *C<sub>1</sub>M* és necessari consumir l'energia  $\frac{1}{2} C_1 M v^2$  (perquè aquesta és l'energia cinètica que té la massa *C<sub>1</sub>M* movent-se a la velocitat *v*). Si igulem aquesta energia a la feta pel múscul, n'obtenim

$$\frac{1}{2} C_1 M v^2 = WCM$$

per tant

$$v = \sqrt{\frac{2WC}{C_1}} \quad (5)$$

*Q11) Comprova que les dimensions de l'eq. (5) són correctes.*

(Física) Dimensions d'una magnitud són...

(Física) Números adimensionals són: π, e, 1, 345, -ln2, etc.

(Física) Energia cinètica és...  
i es mesura en...

<sup>5</sup> Pensem en una vaca que remena la cua, o en un mico que mou només les extremitats, o en una gasela que corre, etc.

De l'expressió (4) es dedueix que els animals semblants poden accelerar les parts corresponents del cos fins a arribar a velocitats iguals, independentment de les masses respectives.

Apliquem ara aquesta conclusió als peus de l'animal: animals anàlegs poden accelerar les extremitats fins a arribar a velocitats iguals i, per consegüent, córrer amb la mateixa velocitat, independentment de la grandària de cada animal.

Tanmateix, la longitud del pas de cada individu pertanyent a aquest grup d'animals semblants és proporcional a les dimensions lineals de l'individu; és a dir, a  $M^{1/3}$ .

*Q12) Explica l'afirmació anterior.<sup>6</sup>*

Per això, la freqüència dels passos d'animals semblants que es mouen a la mateixa velocitat ha de ser directament proporcional a  $M^{-1/3}$ ,

$$\text{freqüència del moviment (aleteig, caminar)} \propto M^{-1/3} \quad (6)$$

*Q13) Explica l'afirmació anterior.<sup>7</sup> Fixa't que el temps que tarda un animal a fer un pas és directament proporcional a la longitud del pas i inversament proporcional a la velocitat que duu.*

Per tant, no hem obtingut exactament la relació freqüència  $\propto M^{-1/4}$  que havíem anunciat al principi del capítol, sinó freqüència  $\propto M^{-1/3}$ , però l'hem explicada qualitativament.<sup>8</sup>

Evidentment, aquestes avaluacions quantitatives no poden aplicar-se estrictament a l'anàlisi comparativa dels moviments de, per exemple, un ratolí i un elefant, si més no perquè les formes dels seus cossos disten molt de ser semblants. Tanmateix, els raonaments anteriors permeten explicar qualitativament la relació entre la massa i el mode de vida de l'animal.

En resum, hem explicat la relació freqüència  $\propto M^{-1/4}$  fent servir el treball que fan els músculs en comunicar una energia de moviment a l'animal, i en veure que la velocitat de moviment és constant per a tots els animals semblants. Per tant, la freqüència del moviment és proporcional a la velocitat del moviment dividida per les dimensions del pas, i el quocient resulta proporcional a  $M^{-1/3}$ .

<sup>6</sup> Solució: el pas és proporcional a la longitud de l'animal, i la longitud és proporcional a l'arrel cúbica del volum i, per tant, a l'arrel cúbica de la massa.

<sup>7</sup> Solució: el temps entre passos és el quocient de la longitud dels passos per la velocitat. La longitud va com l'arrel cúbica de la massa, i la velocitat és independent de la massa, segons l'eq. (32). La freqüència és la inversa del temps entre passos.

<sup>8</sup> La discrepància entre la teoria, eq. (6) i el resultat experimental, eq. (3), es deu, en general, al fet que els animals grans no són exactament semblants als petits, i les seues grandàries augmenten de manera directament proporcional a  $M^{1/4}$  i no a  $M^{1/3}$ .

### 1.3 Qui salta més alt i nada més ràpid

Farem ara anàlisis similars per veure de què depèn la capacitat de saltar i de nadar d'animals semblants.

*(Física) Energia potencial és...  
i es mesura en...*

#### 1.3.1 Tots salten igual...

El saltamartí, que mesura poc més d'1 cm, salta a la mateixa altura que la llagosta, que té unes dimensions cinc vegades majors. El cangur ratolí (hipsiprimno), animal de grandària semblant a la d'un conill, pot saltar a la mateixa altura que el conegut cangur. Per què animals de forma anàloga salten a la mateixa altura sense importar-ne les grandàries?

*(Física) El principi de conservació d'energia diu...*

La resposta a aquesta pregunta podem obtenir-la si recorrem una altra vegada a l'expressió (5), la velocitat que provoca en un animal el treball que fan els músculs. Recordem que en aquesta expressió no apareix la massa de l'animal.

Sabem que l'altura màxima a la qual munta un cos llançat verticalment, en contra de l'acció de la gravetat, és

$$h_{max} = \frac{v^2}{2g} \quad (7)$$

en què  $g = 10 \text{ m/s}^2$  és l'acceleració de la gravetat.

*Q14) Demuestra l'afirmació anterior aplicant el principi de conservació d'energia...*

*Q15) Per què diu altura màxima en l'eq. (7)?*

*Q16) Per què representem l'altura amb la lletra h?*

*(Física) Acceleració de la gravetat: és l'acceleració que adquiriria tots els cossos en caiguda lliure (si no hi hagués fregament per l'aire).*

Si substituïm en la fórmula (5)  $C_1 = 1$  (i així considerem tota la massa  $M$  de l'animal que es mou a la velocitat  $v$ ), obtenim que els animals anàlegs són capaços d'accelerar els seus cossos fins a velocitats iguals  $v$ , per tant, saltar a la mateixa altura,

$$h_{max} = \frac{WC}{g} \quad (8)$$

Aquesta altura depèn del treball que fan els músculs per unitat de massa del cos,  $W$ , i de la massa de múscul que tenen per unitat de massa del cos,  $C$ . Per a animals semblants, aquestes dues magnituds tenen valors pareguts  $v$ , per això, l'expressió anterior ens diu que els dos salten a la mateixa altura.

*(Física) Força de resistència o de fricció és...  
i es mesura en...*

(Física) Llei de Stokes del fregament...

### 1.3.2 El peix gran nada més ràpidament...

Un refrany rus diu: "Està el lluç en el riu perquè el carpí daurat mai s'adorma. Està clar que el lluç sempre "es farà" amb el carpí daurat si aquest no pot amagar-se a temps en algun lloc. Igual passarà amb qualsevol altre peix més petit. Per quina raó pot nadar a més velocitat un peix gran que un de petit?"

Suposem que un peix es desplaça una distància  $\Delta x$  durant un temps  $\Delta t$ ; és a dir, es mou a la velocitat

$$v = \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (9)$$

Per respondre aquesta pregunta, a més del treball de les aletes del peix, hem de tenir en compte la resistència que oposa l'aigua al moviment. La força de resistència que venç un peix quan es mou per l'aigua, per a una determinada forma del cos, és proporcional a l'àrea de la secció transversal del peix,  $S$ , i al quadrat de velocitat a què es mou,  $v^2$ ,

$$\text{força}_{\text{fricció}} = k_1 S v^2 \quad (10)$$

en què  $k_1$  és un coeficient constant. Aquesta expressió de la força de fregament s'anomena llei de Stokes.

(Física) Potència és...  
i es mesura en...

*Q16') Comprova que l'expressió anterior de la força és raonable: pensa (o, millor, fes l'experiment) en la teua mà que recorre una banyera plena d'aigua: mou la mà ràpidament i lentament, i mou-la de cantell i perpendicular al pla de la mà. Explica allò que observes, pel que fa a la dificultat relativa de cada moviment.*

La potència  $P$  que inverteix el peix durant el moviment es calcula a partir del treball que fa per vèncer la força de fregament (o de resistència, o de fricció); aquest treball és el producte de la força pel desplaçament,  $\Delta x$ ,

$$\text{treball} = \text{força} \times \Delta x \quad (11)$$

La potència  $P$  desenvolupada per aquesta força que actua durant el temps  $\Delta t$  és el treball fet per unitat de temps,

$$P = \text{potència} = \text{treball} / \Delta t$$

Si juntem les expressions (9-11), obtenim que

$$P = k_1 S v^3 \quad (12)$$

D'altra banda, com s'ha demostrat en l'eq. (3'), el treball o la potència màxima desenvolupada per cada múscul de l'animal ha de ser proporcional al volum del múscul. És obvi que aquesta conclusió és vàlida per a tots els músculs de l'organisme, i escriurem

$$P = k_2 V \quad (13)$$

en què  $V$  és el volum del cos del peix, i  $k_2$  una constant. Si igulem les expressions (12) i (13) (potència generada pels músculs = potència consumida en vèncer el fregament), obtenim

$$v = C \sqrt[3]{\frac{V}{S}} \quad (14)$$

en què el coeficient  $C = (k_2/k_1)^{1/3}$  no depèn de la grandària del peix. Suposem que  $v_1, v_2, V_1, V_2, S_1$  i  $S_2$  són velocitats, volums i àrees de la secció transversal d'un peix gran i d'un peix petit, respectivament. L'expressió (14) permet escriure

$$\frac{v_1}{v_2} = \sqrt[3]{\frac{V_1 S_2}{V_2 S_1}} \quad (15)$$

Si considerem semblants les formes del peix gran i del peix petit, i les longituds respectives iguals a  $L_1$  i  $L_2$ , podem afirmar que

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{L_1^3}{L_2^3} \quad \frac{S_1}{S_2} = \frac{L_1^2}{L_2^2} \quad (16)$$

Per consegüent, l'expressió (15) es pot escriure

$$\frac{v_1}{v_2} = \sqrt[3]{\frac{L_1}{L_2}} \quad (17)$$

És a dir, com major siga la longitud (o grandària) d'un peix, a major velocitat podrà nadar. Si tenim en compte que la longitud del cos del lluç és d'1 m, aproximadament, i la del carpí daurat de 0.1 m, les possibilitats de caure el carpí daurat en la gola del lluç, com diu el refrany rus, són ben grans.

*Q17) Calcula quantes vegades té més energia cinètica un lluç que un carpí daurat si naden a la mateixa velocitat (i, per tant, el lluç no nada a la velocitat màxima).*

*Q18) Calcula quantes vegades consumeix més energia un lluç que un peix daurat, en recórrer 100 m en una persecució a mort. Repeteix el càlcul, per unitat de massa del peix.*

## 1.4 Caminar, córrer i rodar

### 1.4.1 Adults i xiquets de passeig

Quan no tenim pressa, anem a peu. Però si veiem que fem tard, correm. Mentre caminem, almenys un peu està sempre, obligatòriament, en contacte amb el terra. A diferència del procés de caminar, durant una carrera hi ha intervals curts de temps en els quals la persona no està en contacte amb el terra. Per aquesta causa, aquest mode de desplaçar-se representa una successió de salts.

La velocitat màxima a la qual pot caminar una persona adulta és de prop de 2.5 m/s. La carrera permet accelerar considerablement la velocitat de desplaçament, i en un esportista pot arribar a 10 m/s.

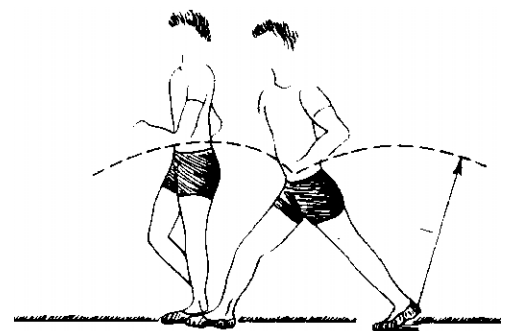


Fig. 3. El canvi en la posició del centre de gravetat al caminar es mostra amb una línia de traços.

Taula 2. Eficàcia del moviment de diferents animals i mitjans de transport  
 A) Espècie de l'animal o tipus de mitjà de transport B) Eficàcia del moviment  
 A) Espècie d'animal B) Eficàcia o mitjà de transport del moviment  
 ( $10^{-2}$  kg m/J)

Persona amb bicicleta 160

Salmó	60
Persona en una cadira de rodes	42
Cavall	40
Persona a peu	32
Automòbil	30
Colom	25
Ovella	24
Gos	16
Avió a propulsió	16
Helicòpter	7
Colibrí	6
Conill	5
Abella	2
Ratolí	0.6

Un quadre molt comú és el dels pares que, quan tenen pressa, estiren de la mà dels xiquets, i aquests, com que no poden seguir el ritme, es veuen obligats a córrer. Per quina raó han de córrer els xiquets per a assolir la mateixa velocitat que els adults que caminen?

Examinem com canvia la posició del centre de gravetat d'una persona que camina, fig. 3. El centre de gravetat ocupa la posició més baixa quan els dos peus es troben en contacte amb el terra. La posició més alta del centre de gravetat correspon al moment en què la cama que està en contacte amb el terra es troba en posició vertical. D'aquesta manera, quan caminem, el centre de gravetat, disposat en la part inferior del cos, un poc per avall del melic, es mou per l'arc d'una circumferència el radi de la qual pot considerar-se igual a la longitud de la cama.

Sabem que un cos que es mou a la velocitat  $v$  per una circumferència de radi  $l$  té una acceleració dirigida al centre d'aquesta circumferència i igual a  $v^2/l$ . Sobre la persona que camina actuen dues forces: la gravetat (allò que anomenem pes) i la reacció de suport que fa la Terra. La resultant d'aquestes dues forces és la força centrípeta.

*Q19) Fes un esquema de les dues forces esmentades i de la força resultant.*

(Física) Centre de gravetat és...  
i es mesura en...

(Física) Acceleració centrípeta és...  
i es mesura en ...

(Física) Pes és ...  
i es mesura en...

Evidentment, el valor de la força resultant no pot superar el valor de la força de la gravetat (perquè és la resta de dues forces). Per això, en caminar, ha d'observar-se la desigualtat  $mv^2/l < mg$ , en què  $m$  és la massa de la persona que camina; és a dir, que

$$v < \sqrt{gl} \quad (18)$$

Com que la cama d'una persona adulta mesura prop de 0.9 m, l'expressió (18) dóna una velocitat màxima del moviment de 3 m/s, cosa que concorda amb el valor esmentat abans.

*Q20) Quina relació hi ha entre les velocitats màximes del caminar d'una persona adulta i d'un/a xiquet/a?*

Els xiquets tenen les cames més curtes que els adults i, per tant, la velocitat màxima del seu caminar és menor. Per això, per a no retardar-se quan passen amb els adults, els xiquets amb freqüència han de córrer (és interessant fer notar que també entre els animals quadrúpedes es pot deduir una relació com la (18) entre la velocitat màxima del caminar i la longitud de les extremitats).

## 1.4.2 La roda

Moltes de les coses que ha inventat la humanitat es troben en la natura (vol en l'aire, natació subaquàtica, vol a reacció, paracaigudes, etc.). Aleshores, per què no trobem la roda en la natura? Per què els cavalls galopen en lloc de lliscar en patins de rodes? Per què no hi ha peixos amb hèlices en lloc d'aletes?

Els sistemes rotatoris presenten dos avantatges principals: 1) permeten substituir el fregament de lliscada pel de rodament, que normalment és menor; 2) l'energia cinètica no fluctua en el moviment, s'hi manté constant.

*Q21) Compara les forces de fricció amb el terra que actuen sobre un cotxe parat, sobre un que té les rodes bloquejades i que empentem, sobre un que circula, i sobre un que derrapa.*

Si avaluem l'eficàcia d'un mitjà de transport com la relació entre la massa que té i l'energia invertida per a recórrer una unitat de distància (quocient de la massa moguda a l'energia que es gasta per unitat de camí recorregut), resulta que per a un/a ciclista l'eficàcia del moviment és d'uns 1.6 kg m/J. Per a una persona caminant, l'eficàcia és de 0.32 kg m/J. Fins i tot, una persona que té els cos paralitzat i que es mou en una cadira de rodes té major eficàcia de moviment (0.42 kg m/J) que la que passeja a peu.

*Q22) Avaluu l'eficàcia d'una persona caminant (pensa, per exemple, en l'energia que es necessita per passar del repòs a la velocitat  $v$ ), i compara el resultat amb el de la taula 2.*

De les dades de la taula 2 per a anar amb bicicleta, cadira de rodes, automòbil i avió, es dedueix que l'eficàcia del moviment, definida de la manera anterior, disminueix amb l'augment de la massa del mitjà de transport (per altra banda, l'eficàcia per a la natació, que no es mostra en la taula 2, és més alta que per al vol). Si comparem els vehicles amb rodes amb les persones que caminen o amb el cavall, ens podem preguntar: per quina raó no utilitzen rodes els animals? La causa és la impossibilitat de tenir una roda viva, que necessita una afluència constant de sang des de fora.<sup>9</sup>

I per què no utilitzen els animals per al seu desplaçament rodes o hèlices fetes de materials biològics que no requeresquen una afluència constant de substàncies nutritives, per exemple, l'os? Aquesta difícil qüestió no la contestarem ací. Però, així i tot, es podria moure el llop pel bosc amb major rapidesa en patins de rodes?

Evidentment, no. Els avantatges relacionats amb el desplaçament sobre rodes desapareixen immediatament quan abandonem l'asfalt i passem a un terreny sense camins petjats. La raó és que, en primer lloc, el fregament de rodament comença a créixer (per exemple, per a la sorra aquest fregament és 10 vegades major que per al formigó) i, en segon lloc, els sortints que apareixen al llarg del camí posen limitacions a les dimensions mínimes de la roda, perquè l'altura màxima de l'obstacle no ha de superar la meitat del radi de la roda.

*(Física) Fregament o fricció és...*

*i es mesura en...*

*i n'hi ha de tres tipus: fricció estàtica, dinàmica i de rodadura..*

*(Física) Fluctuacions d'una magnitud són...*

<sup>9</sup> Tanmateix, hi ha excepcions, com ara els flagells giratoris dels bacteris, que són filaments proteics, de 0.2 µm de diàmetre, que no necessiten l'abastiment d'oxigen ni de substàncies nutritives.

Q23) Explica l'afirmació anterior.

El que hem exposat permet comprendre la raó per la qual els animals no tenen rodes —simplement, no les necessiten!

## 1.5 Massa i energia

Tots hem vist alguna vegada un hàmbster, i amb quina voracitat menja. Durant un dia, aquest petit rosegador pot menjar una quantitat d'aliments igual al seu pes, mentre que la ració diària de l'elefant constitueix tan sols 1/10 de la seua massa, encara que la component calòrica dels aliments de l'elefant quasi no es diferencia de la del rosegador, ja que els dos mengen exclusivament vegetals. Aleshores, de què depèn la quantitat d'aliments que necessita un animal per mantenir l'activitat vital normal?

### 1.5.1 Metabolisme

(Física) L'energia d'enllaç d'una molècula és...  
i es mesura en...

Les reserves d'energia que obtenim amb els productes alimentaris s'emmagatzemen en forma d'energia dels enllaços químics de les molècules. Els processos amb l'ajut dels quals alliberem aquesta energia s'anomenen metabolisme, i la velocitat amb la qual lliurem l'energia es denomina intensitat del metabolisme. El metabolisme pot ser aeròbic, és a dir, desenvolupar-se únicament amb un subministrament ininterromput d'oxigen a l'organisme; per contra, el metabolisme anaeròbic no necessita la presència d'oxigen. El metabolisme aeròbic, en comparació amb l'anaeròbic, proporciona a l'organisme major quantitat d'energia a partir de la mateixa quantitat d'aliments i subministra la major part de les nostres despeses energètiques. Quan un animal canvia de l'estat de repòs al de moviment, augmenta la necessitat d'oxigen. Els animals de sang calenta consumeixen més oxigen que els animals de sang freda perquè els primers, en trobar-se en un medi ambient relativament fred, perden sense interrupció la calor del cos per convecció i radiació.

Investigacions realitzades amb els animals de sang calenta (mamífers i pardals) han demostrat que hi ha una relació entre la massa  $M$  d'aquests animals i el consum  $Q$  d'oxigen que fan en una unitat de temps:

$$Q \propto M^{3/4} \quad (19)$$

Per tant, el consum d'oxigen per unitat de massa del cos i per unitat de temps,  $q$ , té aquesta dependència en  $M$ ,

$$q = \frac{Q}{M} \propto M^{-1/4} \quad (20)$$

Per a una persona,  $q$  va de 0.06 a 0.6 mm<sup>3</sup> O<sub>2</sub>/(g s).

Q23') Quants grams d'oxigen consumeixes en una hora? I quants mols d'aire?

(Física) Convecció és...

(Física) Radiació és...

### 1.5.2 Consum energètic i massa

Tractem ara d'explicar la dependència (20) que hi ha entre el consum d'oxigen i la massa de un animal. La temperatura en els animals de sang calenta es manté constant a costa de l'alliberament de calor en els processos del metabolisme. El consum per l'organisme d'1 cm<sup>3</sup> d'oxigen ve acompanyat del despreniment de 20 J d'energia tèrmica, amb la particularitat que la quantitat de calor lliurat no depèn del tipus d'aliments. Si suposem que l'animal té forma d'esfera<sup>10</sup> de radi R, la quantitat de calor lliurat a l'organisme com a resultat dels processos metabòlics serà, per unitat de temps,

$$20 \rho \frac{4}{3} \pi R^3 q \quad (\text{en joules}) \quad (21)$$

en què  $\rho$  és la densitat de l'animal.

*Q24) Comprova que l'expressió anterior té les dimensions correctes.*

### 1.5.3 Refredament d'un cos (Llei de Newton)

Com que la temperatura del cos es manté constant, la quantitat d'energia tèrmica que produeixen els processos metabòlics en l'organisme ha de ser igual a la quantitat de calor transferida des de l'animal cap al medi ambient. La quantitat de calor J que passa en una unitat de temps des del cos més calent cap al més fred, quan aquests entren en contacte (com ara el cos humà i l'ambient) és directament proporcional a l'àrea de contacte S, a la diferència de temperatures  $\Delta T_x$  i a la conductibilitat tèrmica del medi que els uneix,  $\kappa$ , i és inversament proporcional al gruix de la capa d'aquest medi,  $\Delta x$ , de manera que:

$$J = S \kappa \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (22)$$

Aquesta expressió s'anomena Llei de Newton del refredament.

*Q25) Explica què significa l'expressió anterior quan poses, per exemple, un peix en l'aigua.*

*Q26) Quines dimensions té la conductibilitat tèrmica, a la vista de l'eq. (22)?*

*Q26') Un amic, professor d'institut, diu que una classe de 40 alumnes és com una estufa d'1 kW. Quanta potència i quanta energia emets tu en una hora?*

1 cm<sup>3</sup> O<sub>2</sub> → 20 J

(Física) Densitat és...  
i es mesura en...

(Física) Llei de Newton del refredament...

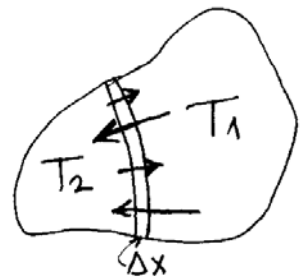


Fig. 4. El cos que està a major temperatura, T<sub>1</sub>, cedeix energia en forma de calor al cos que està més fred, a temperatura T<sub>2</sub>, a través de la paret de gruix Δx.

<sup>10</sup> Biòloga/biòleg, no et rigues i llig el pròleg del llibre El cavall esfèric, citat en la bibliografia. És més fàcil calcular el volum d'una esfera que el d'una persona o animal real. I el resultat que obtindrem és qualitativament suficient.

Es pot considerar que, en canviar la grandària de l'animal esfèric, les magnituds  $\kappa$  i  $\Delta T/\Delta x$  resten constants. En aquest cas  $J = 4\pi R^2 k$ , en què  $k = \kappa \Delta T/\Delta x$  és una constant. Si igualem la quantitat de calor que es lliura en l'organisme durant els processos metabòlics a la calor que perd el cos a través de la superfície, eq. (21) i eq. (22), obtenim:

$$\rho \frac{80}{3} \pi R^3 q = 4\pi R^2 k$$

d'on resulta que

$$q = \frac{3k}{20} \frac{1}{R\rho} \quad (23)$$

Com que la massa de l'animal és

$$M = \frac{4\pi}{3} \rho R^3 \quad (24)$$

eliminem  $R$  de la eq. (23) i obtenim, finalment, que el consum d'oxigen per unitat de massa i de temps és

$$q = \frac{3k}{20} \left( \frac{4\pi}{3\rho^2} \right)^{1/3} M^{-1/3} \propto M^{-1/3} \quad (25)$$

D'aquesta manera, l'anàlisi del balanç de l'energia tèrmica produïda i eliminada en animals semblants duu a la conclusió que la quantitat d'oxigen consumida per una unitat de temps i de massa d'aquests animals ha de disminuir en forma inversament proporcional a la massa elevada a  $1/3$ . Així expliquem qualitativament el fet experimental esmentat en l'apartat sobre el metabolisme.

La discrepància entre la teoria, eq. (25), i el resultat experimental (20), es deu, en general, al fet que els animals grans no són semblants als petits i les seues grandàries augmenten de manera directament proporcional a  $M^{1/4}$  i no a  $M^{1/3}$  (Veges la nota<sup>11</sup> a peu de pàgina).

### 1.5.4 Voracitat dels animals...

Després d'haver donat la interpretació de la relació (20), podem interpretar la voracitat del hàmmster i altres animals de la manera següent. Com que  $q \propto M^{-1/4}$ , una unitat de massa del hàmmster requereix molt més oxigen que la mateixa unitat de massa de l'elefant. Com que tot l'oxigen que consumeix l'animal és per a l'oxidació de les substàncies nutritives, la quantitat d'aliments necessària per al hàmmster, si comptem respecte a la unitat de massa del cos, ha de ser molt major que la magnitud corresponent per a l'elefant.

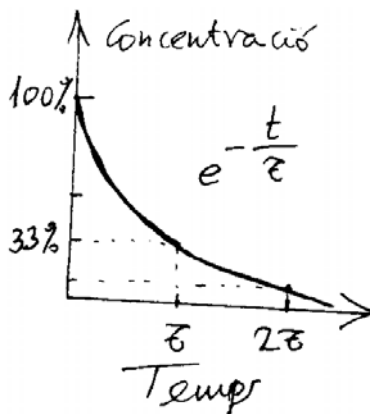


Fig. 5. Variació de la concentració del medicament en la sang després d'administrarlo.

<sup>11</sup> Volum i massa són proporcionals, si la densitat és constant, i com podem dir que volum  $V$  i dimensions  $L$  (grandària) estan relacionats per  $V \propto L^3$ , per això  $L \propto V^{1/3}$ .

### 1.5.5 Efectes de les medicines: variació temporal de la concentració

La discussió anterior sobre el metabolisme, podem aprofitar-la per a un altre exemple. Tots sabem que, per a tenir efecte i curar-nos, les medicines s'han de prendre diverses vegades al dia. Així es manté la concentració constant en la sang, perquè la medicina es destrueix en l'organisme. En la fig. 5 es representa com varia la concentració dels preparats medicinals en la sang d'una persona o d'un animal, després d'administrar-los una sola vegada.

La disminució de la concentració del medicament es pot aproximar per una exponencial, d'exponent negatiu, i que conté el temps dividit per una constant de temps,  $\tau_{destr}$ , constant que també té dimensió de temps

$$\text{Concentració} \propto e^{-\frac{t}{\tau_{destr}}} \quad (26)$$

La constant de temps de destrucció del medicament en l'organisme,  $\tau_{destr}$ , determina la velocitat de disminució de la concentració després d'administrar-lo una sola vegada. Evidentment, la velocitat de destrucció del medicament en l'organisme ha de ser proporcional a la intensitat dels processos metabòlics. Per això<sup>12</sup>, es pot suposar que aquesta constant biològica ha de ser proporcional a  $M^{0.25}$ , eq. (20). Aquesta dependència,  $\tau_{destr} \propto M^{1/4}$ , s'ha descobert, efectivament, en investigacions realitzades amb animals que tenen masses milions de vegades diferents.

#### Anècdota (tràgica)

Podem esmentar un cas tràgic ocorregut pel desconeixement de la dependència entre  $\tau_{destr}$  i  $M$ . Des del punt de vista científic el preparat al·lucinogen LSD, dietilamida de l'àcid lisèrgic, és molt interessant per als psiquiatres i neurofisiòlegs, ja que provoca visions peculiars en persones normals. Alguns investigadors van decidir estudiar la reacció de l'elefant a aquest preparat i van agafar la quantitat de LSD que provoca ràbia en els gats, van multiplicar aquesta quantitat per les vegades que és major la massa de l'elefant que la del gat i van considerar que la dosi del preparat administrat hauria de ser directament proporcional a la massa de l'animal. L'administració d'aquesta dosi de LSD a un elefant li va causar la mort en 5 minuts. La conclusió que van trobar els autors fou que els elefants tenen una sensibilitat gran al preparat en qüestió, quan realment ells van cometre un "error d'elefant".

*Q27) Si la dependència fóra  $\tau_{destr} \propto M$ , l'elefant de la història hauria viscut més o menys temps?*

*(Física) La constant de temps d'un procés exponencial és...  
i es mesura en...*

<sup>12</sup> Com que el consum per unitat de temps és  $q \propto M^{-1/4}$ , el temps que tarda a consumir-se és  $1/q \propto M^{1/4}$ .

## 1.6 La manera de respirar determina la massa de l'animal

(Física) El procés de difusió és...

Fins ara hem examinat la massa del cos com una variable independent, i hem considerat que aquesta determina la freqüència dels ritmes biològics, el mode de vida, la velocitat de reacció de l'animal i la intensitat del metabolisme. És cert aquest plantejament? Sí, és cert si la quantitat d'oxigen que entra a l'organisme és suficient per a satisfer totes les necessitats. Tots els mamífers tenen un *dispositiu*, únic en el seu gènere, que succiona l'aire des del medi ambient: els pulmons. En l'organisme d'una persona, la superfície dels pulmons en què té lloc l'intercanvi dels gasos entre la sang i l'aire (l'oxigen passa de l'aire a la sang i el biòxid de carboni passa de la sang a l'aire) és de 80 a 90 m<sup>2</sup>. Aquest valor supera gairebé en 100 vegades la superfície del cos. Per això, la difusió de l'oxigen per la superfície dels pulmons, cap a la sang, és més que suficient per a cobrir les necessitats de l'organisme.

Q28) Fes una estimació de la superfície del teu cos.

### 1.6.1 Respiració via la superfície del cos

Amb tot, no tots els animals tenen, ni de ben lluny, òrgans respiratoris especials. Així, per exemple, els cucs no tenen òrgans de respiració i utilitzen l'oxigen que es difon de l'aire a l'organisme de l'animal a través de tota la superfície del cos. Quines són les restriccions que imposa la grandària de l'animal a aquest mode d'entrada d'oxigen en l'organisme?

Els cucs tenen un sistema sanguini. La sang circula per tot el cos i s'utilitza per a recol·lectar oxigen de la superfície del cuc, a través de la qual penetra des de l'atmosfera, i fer-lo arribar a tots els altres teixits. Quina és la grandària màxima d'un cuc?

Suposem (de nou, per a simplificar els càlculs) que el cuc té forma de cilindre de radi  $r$  i avaluem la quantitat d'oxigen que entra en el segment del cuc de longitud  $l$ . Si, com abans,  $q$  és la quantitat d'oxigen consumida per una unitat de massa del cuc i per unitat de temps, aleshores la necessitat d'oxigen, per segon,  $Z$ , d'aquest segment del cuc és:

$$Z = \pi r^2 l \rho q \quad (27)$$

(Física) Pressió parcial és...  
i es mesura en...

Q29) Comprova que les dimensions de l'equació anterior són correctes.

### 1.6.2 Llei de la difusió

El procés de difusió de l'oxigen, des de l'atmosfera cap a l'interior del cuc, està subjecte a la llei de la difusió. Aquesta llei assenyalava que el volum de gas,  $Y$ , que es difon d'un medi a l'altre en la unitat de temps a través de la superfície  $A$ , és proporcional a l'àrea d'aquesta superfície, al coeficient de permeabilitat  $B$  per a aquest gas i a  $\Delta P/\Delta h$ , en què  $\Delta P$  és la diferència de pressions parcials del gas en els dos medis i  $\Delta h$  és el gruix de la regió que separa els medis:

$$Y = AB \frac{\Delta P}{\Delta h} \quad (28)$$

*Q30) Quines dimensions té el coeficient de permeabilitat?*

Ja que  $A = 2\pi r l$ , en igualar (27) i (28), obtenim

$$r = \frac{2B \Delta P}{\rho q \Delta h} \quad (29)$$

Avaluem el radi màxim del cos del cuc per a  $q = 0.017 \text{ mm}^3/(\text{g s})$ . Si no tenim en compte el fet que el cuc està cobert per una capa fina de cutícula, llavors  $B$  és el coeficient de permeabilitat del teixit viu per a l'oxigen,  $B \approx 2.2 \times 10^{-10} \text{ mm}^2/(\text{Pa s})$ . En l'atmosfera, la pressió parcial de l'oxigen és aproximadament d'un 20%, i la pressió atmosfèrica és d'uns  $10^5 \text{ Pa}$ . Evidentment, el valor màxim de  $\Delta P$  per al cuc que es troba en l'atmosfera no pot ser major que  $2 \times 10^4 \text{ Pa}$  (suposant que el cuc no conté gens d'oxigen), i el valor mínim de  $\Delta h$  ha de ser pròxim al gruix d'una cèl·lula, és a dir, aproximadament  $0.05 \text{ mm}$ . En aquest cas, si suposem que  $\rho = 10^{-3} \text{ g/mm}^3$  (una densitat semblant a la del cos humà i a la de l'aigua), tenim, per al radi màxim del cos del cuc,  $r_{\text{màx}} = 10 \text{ mm}$ .

*Q31) Comprova els càlculs anteriors: opera també amb les unitats de les magnituds.*

*Q32) Explica l'afirmació anterior sobre  $\Delta P_{\text{màx}}$  i el valor pres per a  $\rho$ .*

Així, doncs, podem esperar que el diàmetre del cos dels cucs arribi als 2 cm. En efecte, cucs d'aquesta grandària s'han descobert en les zones tropicals d'Amèrica del Sud. La massa d'aquests cucs pot arribar, fins i tot, a 1 kg.

*Q33) Quina longitud tenen els cucs sudamericans que s'acaben d'esmentar?*

#### Organismes sense sistema sanguini ni òrgans respiratoris

Però en la natura hi ha éssers més primitius encara que els cucs, com ara la majoria dels organismes que viuen en medi aquós. Aquests organismes estan mancats no sols d'òrgans respiratoris, sinó també de sistema sanguini. En aquest cas, l'organisme només pot assolir grandàries considerables si té forma filiforme aplanada.

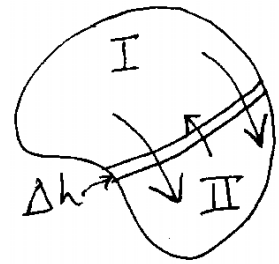


Fig. 6: Un gas es difon, a través de la paret de gruix  $\Delta h$ , de la regió I, on té major pressió parcial, a la regió II, on la pressió parcial d'aquest gas és menor.

*(Física) Pressió atmosfèrica és ...  
i es mesura en ...*

(Física) Utilitat de l'anàlisi dimensional per a...

### 1.6.3 Organismes rudimentaris: anàlisi dimensional

Utilitzem els mètodes de l'anàlisi dimensional i veiem com depèn de  $q$  el gruix  $d$  d'aquests éssers que no tenen sistema sanguini ni òrgans respiratoris. De què pot dependre el gruix d'éssers semblants? Es pot imaginar que com major siga la pressió parcial de l'oxigen  $P_o$  en el medi ambient i la permeabilitat  $B$  per a l'oxigen del teixit viu, major gruix pot tenir l'espècie analitzada (els organismes rudimentaris). El segon factor de què dependrà  $d$  està representat per la magnitud  $\rho q$ , que determina quina quantitat d'oxigen necessita l'animal per centímetre cúbic de teixit i per unitat de temps. Com major és  $\rho q$ , més prim ha de ser el cos de l'organisme. Així, podem escriure l'equació següent

$$d \propto \frac{P_o^\alpha B^\beta}{(\rho q)^\gamma} \quad (30)$$

en què les constants  $\alpha$ ,  $\beta$  i  $\gamma$  no estan encara determinades. Com que les dimensions de les magnituds de l'eq. (43) són  $[d] = m$ ,  $[P_o] = Pa$ ,  $[\rho q] = m^{-3} s^{-1}$  i  $[B] = m^2/(Pa s)$ , la condició que la dimensió del primer i del segon membres de l'expressió (30) siga la mateixa dona  $\alpha = \beta = \gamma = \frac{1}{2}$ .

*Q34) Comprova l'afirmació anterior.*

Així, es pot suposar que el gruix característic  $d$  dels organismes rudimentaris que no tenen sistema circulatori ni òrgans respiratoris especials ha de venir donat per

$$d \leq b \sqrt{\frac{BP_o}{\rho q}} \quad (31)$$

en què  $b$  és una constant que depèn de la forma de la secció transversal de l'animal. Es pot demostrar que per als organismes filiformes  $b = 4$ , i per als aplanats  $b = 2\sqrt{2}$ . La substitució en l'expressió (31) dels valors  $q = 0.03 \text{ mm}^3/(g s)$ ,  $B = 2.2 \times 10^{-10} \text{ mm}^2/(Pa s)$ ,  $P_o = 2 \times 10^4 \text{ Pa}$  i  $\rho = 10^{-3} \text{ g/mm}^3$ , ens dona  $d \approx 2 \text{ mm}$ , el que correspon al gruix màxim d'aquest tipus d'organismes rudimentaris que es troben en els rius, llacs i mars.

*Q35) Explica el valor de les magnituds usades i comprova el valor de  $d$ .*

*Q36) Per a què serveix l'anàlisi dimensional?*

## 1.7 Física (conceptes)

Concepte	Capítol		
Acceleració centrípeta	1r	Gas (pressió parcial)	1r
Acceleració	1r	Gravetat (acceleració)	1r
Acceleració de la gravetat	1r	Llei de Newton del refredament	1r
Adimensional (magnitud)	1r	Llei de Stokes del fregament	1r
Caiguda lliure (temps de)	1r	Magnitud	1r
Centre de gravetat	1r	Magnitud (ordre)	1r
Centrípeta (acceleració)	1r	Massa	1r
Coefficient de permeabilitat	1r	Newton (llei del refredament)	1r
Conservació de l'energia (principi)	1r	Número adimensional	1r
Constant de temps (d'un procés)	1r	Ordre de magnitud	1r
Convecció	1r	Parcial (pressió)	1r
Densitat	1r	Permeabilitat (coeficient)	1r
Difusió	1r	Pes	1r
Dimensions d'una magnitud	1r	Potència	1r
Energia (principi de conservació)	1r	Pressió atmosfèrica	1r
Energia cinètica	1r	Pressió parcial d'un gas	1r
Energia d'enllaç d'una molècula	1r	Principi de conservació de l'energia	1r
Energia potencial	1r	Radiació	1r
Fluctuacions	1r	Reacció (força)	1r
Força	1r	Refredament (llei de Newton)	1r
Força de la gravetat (pes)	1r	Resistència (força)	1r
Força de reacció	1r	Resultant (força)	1r
Força de resistència o fricció	1r	Stokes (llei de fricció)	1r
Força resultant	1r	Temps (constant de)	1r
Fregament (força)	1r	Temps de caiguda lliure	1r
Freqüència	1r	Treball	1r
Fricció (força)	1r	Velocitat	1r
Fricció (llei de Stokes)	1r		