

Capítol 3. La respiració

(Està aspirant més profundament
–està emocionada, està emocionat!)

Dum spiro, spero²⁷

- 3.1 La vida és combustió
- 3.2 Els pulmons
- 3.3 Consum energètic: treball en alenar
- 3.4 Respiració i bombolles de sabó
- 3.5 Tensió superficial
 - 3.5.1 Mesura de la tensió superficial
 - 3.5.2 Tensió superficial i esferes
 - 3.5.3 Depèn α de l'àrea?
 - 3.5.4 L'experiment dels globus inflats
 - 3.5.5 Mesura de la dependència $\alpha(S)$
 - 3.5.6 α i concentració d'impureses
 - 3.5.7 Histèresi
- 3.6 Excepcions: pulmons sense substàncies tensoactives
 - 3.6.1 Els animals de sang freda
 - 3.6.2 Els pardals
 - 3.6.3 Zona morta dels pulmons dels mamífers
 - 3.6.4 Circulació de l'aire i respiració dels mamífers
 - 3.6.5 Circulació de l'aire i respiració: els pardals
 - 3.6.6 Contracorrent: mètode barat i còmode per als pardals (i els peixos)
- 3.7 Respiració i òrgans vitals
 - 3.7.1 Alenar sota l'aigua: els animals
 - 3.7.2 A fer el bus
 - 3.7.3 Alenar mesclades de gasos
 - 3.7.4 Bombolles d'aire en els teixits
 - 3.7.5 Formació de bombolles
 - 3.7.6 Bombolles... de nitrogen...
 - 3.7.7 Cruixits d'ossos dels dits...
 - 3.7.8 Respirar aigua
 - 3.7.9 Pulmons que bombegen aire o aigua?
- 3.8 Física (conceptes)

²⁷ Mentre visc, espere.

3.1 La vida és combustió

Aquestes paraules, "La vida és combustió", pertanyen als famosos científics francesos del segle XVIII, A. Lavoisier i P. Laplace.

...en general, la respiració no és més que una combustió lenta de carboni i hidrogen, que és totalment similar a allò que ocorre en una làmpada o candela enceses; des d'aquest punt de vista, els animals que respiren són vertaders cossos combustibles que es cremen i es consumeixen... Un podria dir que aquesta analogia entre combustió i respiració no ha escapat a l'observació dels poetes o, millor, dels filòsofs de l'antiguitat, els quals la van comentar i la van interpretar. Aquest foc robat al cel, aquesta torxa de Prometeu, no representa solament una idea enginyosa i poètica, és una imatge fidel de les operacions de la Natura, almenys pel que fa als animals que respiren; un pot dir, doncs, amb els antics, que la torxa de la vida s'il·lumina en el moment que un nouat respira per primera vegada i no s'extingeix sinó amb la mort.²⁸

En efecte, quin factor, sinó la incessant combustió, pot explicar el fet que la temperatura del nostre cos siga constant i supere quasi sempre la temperatura del medi ambient? Lavoisier i Laplace consideraven que el "forn" escalfador de l'organisme es trobava en el pulmó, en què el carboni del teixit viu, igual que en una estufa ordinària, entrava en reacció química amb l'oxigen de l'aire, formava gas carbònic i, com a resultat d'aquesta reacció, s'alliberava la calor necessària. En realitat, la reacció en què participa l'oxigen es desenvolupa no sols en les cèl·lules del pulmó, sinó també en totes les cèl·lules de l'organisme als quals arriba l'oxigen que subministra la sang. A més a més, el procés que es desenvolupa en l'organisme amb la participació de l'oxigen, i que ens abasteix d'energia (en particular, de calor), no té res en comú amb la reacció de combustió directa del carboni, sinó que representa una llarga cadena de reaccions químiques en les quals, precisament, el CO_2 és un dels productes finals.

Tanmateix, algunes vegades, per a simplificar, és possible considerar el nostre organisme com un forn que consumeix diàriament prop de 0.5 kg d'oxigen, i allibera durant aquest temps quasi la mateixa quantitat de diòxid de carboni.

Q1) Quin volum ocupa l'oxigen que consumim cada dia?

Si prosseguim l'analogia proposada per Lavoisier i Laplace, resulta que en aquest "forn" el pulmó fa el paper de "respirador" a través del qual entra l'oxigen i de xemeneia per a l'eixida del gas carbònic. És interessant recordar que, ja en el segle XVII, el físic anglès R. Boyle, que va descobrir una de les lleis dels gasos, afirmava que la sang, quan passa a través dels pulmons, "s'allibera de bafos nocius". De quina manera els pulmons, que ocupen tan sols un 5% del volum del cos, assolixen aquesta tasca?

Q2) Quin volum aproximat tenen, doncs, els pulmons? (Cubica el teu cos, fig. 1).²⁹

(Física/química) La combustió és...

(Física) Relació massa-volum en un gas...



Fig. 1. Volum d'un cos humà (cubicat).

²⁸ Biografia d'Armand Seguin i Antoine Lavoisier, Oeuvres de Lavoisier, 1789.

²⁹ Més endavant donem una xifra més exacta, quan parlem de zona morta dels pulmons.

3.2 Els pulmons

En la fig. 2 es representa esquemàticament el pulmó d'una persona i les vies transportadores d'aire, o vies respiratòries, per les quals l'espai interior del pulmó manté la comunicació amb l'atmosfera. Les vies que asseguren l'entrada de l'aire consten de les fosses nasals, en les quals l'aire aspirat s'escalfa i s'humiteja, de la laringe, la tràquea i dos bronquis que condueixen l'aire al pulmó dret i esquerre. Cada bronqui pot presentar més de quinze ramificacions que es fraccionen en bronquis més petits, bronquíols, abans d'acabar en bossetes microscòpiques, alvèols, rodejades d'una espessa xarxa de vasos sanguinis.

Els alvèols: una persona adulta n'arriba a tenir uns 300 milions; representen uns saquets plens d'aire (fig. 3). El diàmetre mitjà dels alvèols és d'uns 0.1 mm, i el gruix de les parets és de 0.4 μm . La superfície total dels alvèols dels pulmons d'una persona és de prop de 90 m^2 .

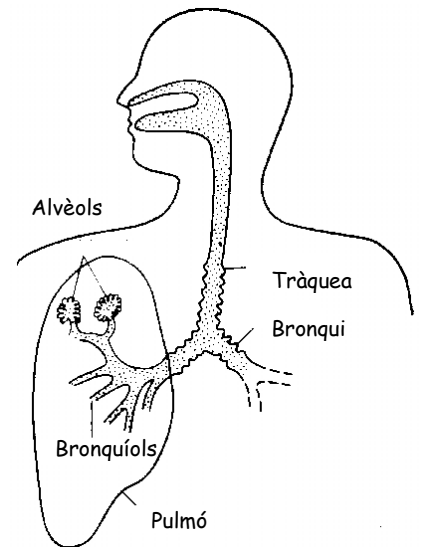


Fig. 2. Representació esquemàtica dels pulmons i de les vies respiratòries d'una persona.

Q3) Fes un esquema a escala dels alvèols i les parets, i de la capa de sang que els envolta (veges el paràgraf següent).

Q4) Explica com pot ser tan gran aquesta àrea (suposa que els alvèols són esfèrics i compara el resultat amb els 90 m^2).

Q5) (Relació àrea/volum) Fem una excursió en el terreny dels fractals: estudia les propietats matemàtiques de figures "monstre" (com ara la corba de Koch o l'estoreta de Sierpinsky).

En cada instant, en els vasos sanguinis que entrellacen els alvèols hi ha uns 70 ml de sang; el gas carbònic es difon d'aquesta sang als alvèols, mentre que l'oxigen entra en direcció oposada. L'enorme superfície dels alvèols dóna la possibilitat de reduir a 1 μm el gruix de la capa de sang que intercanvia els gasos amb l'aire intraalveolar, cosa que permet, en menys d'1 s, saturar aquesta capa de sang amb oxigen, i així es purifica de l'excés de diòxid de carboni.

(Física) Relació àrea/volum o dimensions...

Q6) Quants àtoms caben en una micra?

Hem d'assenyalar que en la respiració participen no sols els pulmons, sinó també tota la superfície del cos humà: la pell, des dels talons fins al cap. La pell respira amb més intensitat en el pit, en l'esquena i en l'abdomen i aquestes parts superen en intensitat de respiració els pulmons. Així, per exemple, una unitat de superfície d'aquesta pell pot absorbir un 28% més d'oxigen i desprendre un 54% més de CO_2 que en els pulmons. Aquesta superioritat es deu que la pell "respira" aire pur, mentre que el pulmó el ventilem malament (veges més endavant l'apartat Excepcions: pulmons...). Així i tot, la contribució de la pell a la respiració d'una persona és ínfima en comparació amb els pulmons, ja que la superfície total del cos és menor de 2 m^2 i no supera el 3% de la superfície total dels alvèols pulmonars.

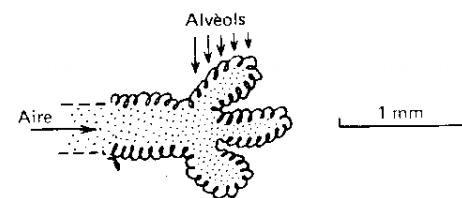


Fig. 3. Ramificacions en els extrems del pulmó, els alvèols.

Q7) Fes una estimació de la superfície de la pell del teu cos.

Q8) Explica el 3% que acabem d'esmentar al text.

(Física) Fractals són...

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

(Física) Treball de les forces elàstiques és...
Posa exemples de forces elàstiques...

(Física) Fluids en règim laminar o turbulent...

(Física) Pas de règim laminar a turbulent...

(Física) La centrifugadora es basa en...

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

(Física) Pressió i esfera elàstica: de què depèn...

(Física) Mòdul de Young és...
i es mesura en...

3.3 Consum energètic: treball en alenar

Quan aspirem, el volum dels pulmons augmenta perquè entra aire de l'atmosfera. En la pràctica, com que els alvèols són la part més elàstica del pulmó, tots els canvis de volum dels pulmons durant l'aspiració i l'exhalació es produeixen a costa dels canvis corresponents del volum dels alvèols. Durant l'aspiració, els alvèols s'eixamplen i durant l'exhalació es contrauen. Cada dia fem eixamplar els alvèols dels nostres pulmons unes 15000 vegades, i fem un treball mecànic que representa del 2% al 25% del total de despeses energètiques. Què determina la magnitud d'aquest treball?

Q9) Dedueix la xifra de 15000...

El treball que fem durant la respiració es consumeix en superar diversos tipus de forces de resistència. La part més considerable del treball s'inverteix a eixamplar els pulmons. En segon lloc ve el treball consumit per desplaçar l'aire cap als alvèols per les vies conductores. El flux d'aire pot tenir caràcter laminar o turbulent i les despeses energètiques són diferents en cada cas. L'estructura de les fosses nasals és tal que s'hi generen fluxos turbulents d'aire aspirat. Això és necessari per a escalfar amb major eficàcia l'aire i per separar les partícules estranyes que conté, igual que fa una centrifugadora. La turbulència en el flux d'aire aspirat apareix també en els nombrosos punts de ramificació de l'arbre bronquial. Com que el corrent laminar de gas es transforma en turbulent quan augmenta la velocitat, és evident que la significació relativa de les forces de resistència durant la respiració depèn de la freqüència amb què respirem normalment. Es pot demostrar que aquesta freqüència, unes 15 aspiracions per minut, implica despeses energètiques mínimes durant la respiració (és a dir, que la natura fa bé les coses).

Q10) Expressa la freqüència de respiració en Hz.

3.4 Respiració i bombolles de sabó

El 1929, el suís Nihirgard va demostrar, fig. 4, que la pressió necessària per inflar els pulmons pot reduir-se considerablement si els pulmons s'omplin de dissolució fisiològica; és a dir, de dissolució salina pròxima per la seua composició al líquid intercel·lular. Si es considera que cada alvèol és una esfera buida rodejada de membrana elàstica, ens diu la física que la pressió de l'aire requerida per a mantenir aquesta esfera en estat inflat està totalment determinada pel diàmetre de l'esfera, pel gruix de la membrana i per un coeficient elàstic (el mòdul de Young), sense dependre del tipus de gas que conté l'esfera.

Però l'experiment de la fig. 4 mostra que la pressió de l'aire i la de l'aigua fan dilatacions diferents dels pulmons. La contradicció entre les dades experimentals obtingudes per Nihirgard i la teoria física de dilatació de les esferes elàstiques es va resoldre en descobrir que la superfície interior dels alvèols està recoberta d'una capa fina de líquid, la qual modifica substancialment les propietats mecàniques dels alvèols. Vegem per què.

Q11) Analitza les dades de la fig. 4. Fes una taula que continga unes 3 o 4 files i que represente les dades de la figura. En quin factor augmenta la dilatació en passar d'aire a aigua? En quin percentatge augmenta la pressió del pulmó respecte de la pressió atmosfèrica?

3.5 Tensió superficial

Considerem un líquid exposat a l'aire. Examinem la capa de líquid que es troba en la superfície límit amb l'aire (fig. 5) i que conté molècules com la M_2 . Sobre la molècula M_1 , que es troba dins el líquid, actuen forces d'atracció per part de les molècules veïnes disposades simètricament al voltant de la primera. Per consegüent, la resultant de totes aquestes forces que actuen sobre M_1 és igual a zero. En canvi, la resultant de les forces de les molècules de líquid que actuen sobre la molècula M_2 no és igual a zero, i està dirigida cap a l'interior del líquid, perpendicularment a la superfície, ja que les forces d'atracció de les molècules que hi ha per baix de M_2 no estan compensades. Per aquesta causa, per a desplaçar les molècules des del si del líquid cap a la superfície és necessari fer un treball, per superar les forces de cohesió entre les molècules.

D'aquesta manera, les molècules que formen la capa superficial de líquid tenen, en comparació amb altres molècules disposades a major profunditat, energia potencial. És evident que el valor d'aquesta energia potencial U_{pot} , per al cas de contacte entre un líquid determinat i un gas a través de la superfície S , ha de ser proporcional a la magnitud d'aquesta superfície:

$$U_{pot} = \alpha \cdot S \tag{1}$$

en què α és el coeficient de proporcionalitat, la seua dimensió és N/m o J/m^2 , i que duu el nom de *coeficient de tensió superficial*.

(Física) Un manòmetre és...

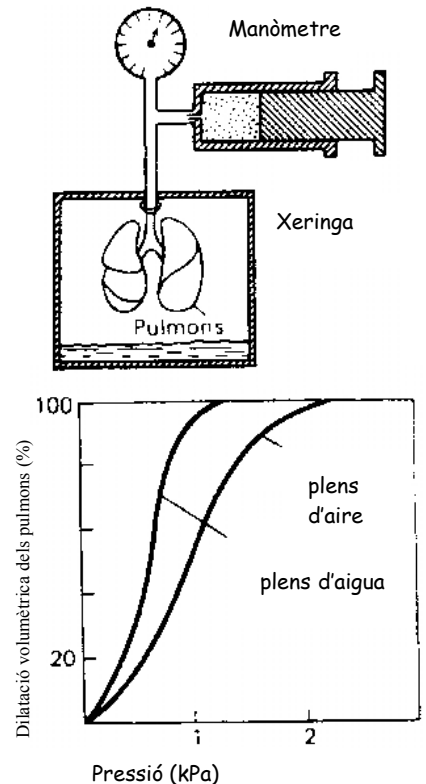


Fig. 4. a) Muntatge experimental per a determinar la dilatabilitat del pulmó; b) característiques pressió-volum obtingudes.

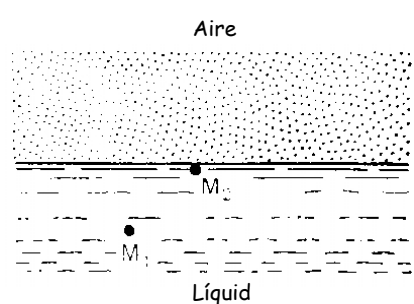


Fig. 5. (a) Superfície de separació entre un líquid i l'aire.

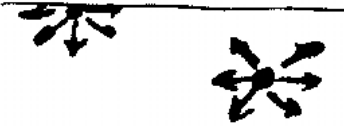


Fig. 5. (b) Forces sobre una molècula superficial i sobre una molècula profunda en un líquid.

(Física) Forces i resultant d'un conjunt de forces...

Una força es mesura en...
i té dimensions de...

(Física) Forces de cohesió són...

i es mesuren en...

(Física) Energia potencial és...

i es mesura en...

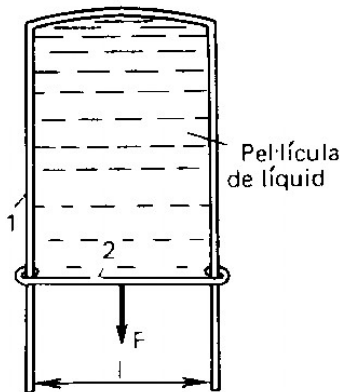


Fig. 6. Dispositiu per a la determinació del coeficient de tensió superficial: 1, fil d'aram en forma de Π ; 2, envà lliscador.

Q12) Comprova que les dimensions anteriors són correctes.

El coeficient de tensió superficial està determinat, simultàniament, per les propietats del líquid mateix i del gas que es troba a sobre d'aquest, i també per la temperatura del medi ambient.

3.5.1 Mesura de la tensió superficial

El terme *tensió superficial* deu l'origen al mètode més fàcil i antic de determinació del valor de α (veges la fig. 6). Submergim en el líquid investigat un fil d'aram amb forma de Π pel qual s'esmuny un envà fi i, després, extraiem del líquid el fil d'aram. En l'espai limitat per tots els costats pels fils d'aram, es forma una pel·lícula de líquid, la qual, quan s'esforça a disminuir la seua energia potencial (i, per consegüent, també la seua superfície) començarà a desplaçar l'envà mòbil de manera que l'àrea limitada pel fil d'aram es redueca. Amb la fi d'equilibrar la tensió de la pel·lícula i mantenir fixa la posició de l'envà, es necessita una força F la qual, com és possible demostrar, és igual a $2\alpha l$, en què l és la longitud de l'envà. D'aquesta manera, si F i l són coneguts (mesurats), es pot calcular α . Per a l'aigua, $\alpha_{H_2O} = 7 \cdot 10^{-2}$ N/m, i per al líquid intercel·lular, $\alpha = 5 \cdot 10^{-2}$ N/m.

Q13) Comprova que les dimensions de α en l'expressió $F = 2\alpha l$ són correctes.

3.5.2 Tensió superficial i esferes

Per a apreciar el paper de la tensió superficial en la mecànica de l'alvèol analitzem una pel·lícula de líquid que té forma d'esfera (una bombolla). Igual que en la pel·lícula plana, les forces de tensió superficial, en aquest cas, tendeixen a reduir la superfície de l'esfera i comprimeixen l'aire que s'hi troba a dins. Com a conseqüència, la pressió de l'aire dins l'esfera formada per una pel·lícula líquida sempre resulta un poc major que la pressió atmosfèrica. El valor d'aquest excés depèn del radi R de l'esfera, i pot determinar-se si utilitzem la fórmula de Laplace:

$$\Delta P = \frac{4\alpha}{R} \quad (2)$$

Q14) Fes un esquema de l'equilibri de forces que actuen sobre les parets elàstiques d'una bombolla de sabó o d'un globus inflat.

A partir de la fórmula de Laplace calcularem el valor de l'excés de pressió necessària per a inflar l'alvèol durant l'aspiració. Suposem que el valor de α per al líquid que cobreix la superfície interior de l'alvèol és igual a $5 \cdot 10^{-2}$ N/m, el que correspon al coeficient de tensió superficial del líquid intercel·lular. Si suposem que el radi és $R = 5 \cdot 10^{-5}$ m, obtenim que $\Delta P = 4 \cdot 10^3$ Pa.

Q15) Comprova el càlcul i compara aquest valor amb la pressió atmosfèrica. Quin % representa?

El valor de ΔP que ens dóna la fórmula de Laplace és doble que el vertader per al nostre problema, ja que la pel·lícula de líquid alveolar està en contacte amb l'aire tan sols per un costat, l'interior. Per això, el vertader valor de ΔP serà d'uns 2000 Pa. Quan comparem aquest valor amb el de la pressió necessària per a inflar el pulmó (veges la fig. 4), resulta clar que, sinó tota, almenys una part considerable d'aquesta pressió es gasta a superar les forces de tensió superficial. Per consegüent, precisament la diferència entre les dues corbes de la fig. 4 representa l'aportació de les forces de tensió superficial a l'elasticitat del pulmó. Per a una aspiració ordinària, el volum dels pulmons d'una persona augmenta, aproximadament, fins a un 40% o 50% del seu volum màxim. Com deduem de la fig. 4, l'aportació de les forces de tensió superficial, en aquest interval de la variació del volum dels pulmons, és de més del 30%.

Q16) Explica l'afirmació anterior. D'on ve el 30%?

3.5.3 Depèn α de l'àrea?

Però la cosa no és tan simple. Com hem dit, l'elasticitat del pulmó depèn, en un grau important, de les forces de tensió superficial. Tanmateix, encara no hem explicat per què l'aportació de la tensió superficial augmenta amb l'increment del volum del pulmó (veges la fig. 4), tot i que, com es desprèn de la fórmula de Laplace, el valor de ΔP ha de disminuir quan creix R . A més a més, la utilització de les forces de tensió superficial per a explicar les propietats mecàniques del pulmó crea algunes dificultats en la interpretació de la interacció entre els alvèols veïns. Vegem aquesta dificultat, en primer lloc.

3.5.4 L'experiment dels globus inflats

En la fig. 7 es dóna una representació esquemàtica de dos alvèols veïns de grandària diferent. Suposem, primerament, que les cavitats aèries dels alvèols no tenen comunicació entre si (veges la fig. 7a). En aquest cas, d'acord amb la llei de Laplace, la pressió P_1 de l'aire en l'alvèol esquerre serà major que la pressió P_2 en l'alvèol dret. Per aquesta causa, tot just deixem oberta la clau que uneix les cavitats aèries dels alvèols, l'aire des de l'alvèol esquerre començarà a passar al dret, fins que la pressió en els dos s'iguali (veges la fig. 7b). D'aquesta manera, quan les cavitats aèries dels alvèols desiguals s'uneixen, el de radi major sempre s'inflarà, mentre que el de menor radi es reduirà. És evident que tal interacció entre alvèols veïns conduiria a la reducció de tots els alvèols de menor grandària del pulmó i a la dilatació excessiva (i a la ruptura) d'alvèols més grans i, com a conseqüència, el pulmó ja no podria complir les seues funcions. Bé, i aleshores, com respirem nosaltres?

En aquesta anàlisi de la interacció entre alvèols veïns hem considerat a priori que el coeficient de tensió superficial de distints alvèols és idèntic i no depèn de l'estat —inflat o reduït— en què es troben. En efecte, per als líquids comuns el coeficient de tensió superficial no depèn de les dimensions de la superfície. Tanmateix, per a un líquid que conté impureses, α depèn de l'àrea de la superfície divisòria amb el gas.

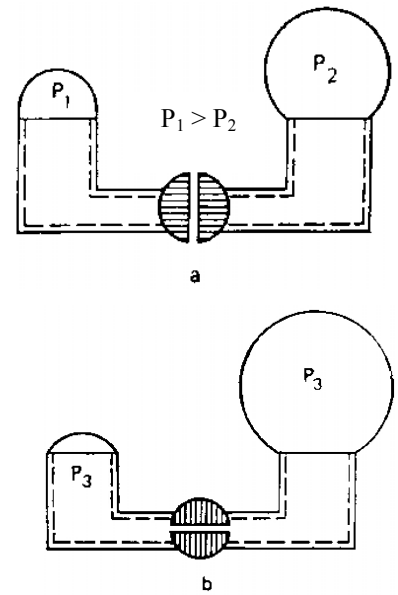
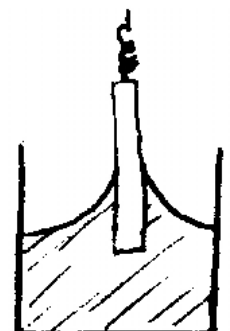
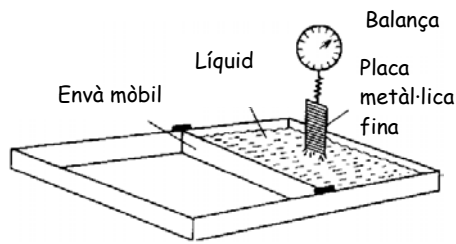


Fig. 7. Representació esquemàtica de dos alvèols veïns que tenen radis diferents: a) cavitats aèries dels alvèols quan estan aïllades les unes de les altres; b) quan estan unides.

(Física) Fes l'experiment dels dos globus iguals inflats a un radi diferent i units per un tub que els posa en comunicació com en la fig. 7.



3.5.5 Mesura de la dependència $\alpha(S)$



En la fig. 8 s'il·lustra un muntatge per mesurar la dependència de la tensió superficial respecte de l'àrea de la superfície del líquid. S'hi veu un cubell dividit en dos compartiments mitjançant un envàs mòbil, i un dispositiu que permet mesurar ininterrompudament el coeficient α del líquid que omple el compartiment dret del cubell.

La mesura del coeficient de tensió superficial es fa de la manera següent. Submergim verticalment en el líquid una vora d'una placa metàl·lica fina (veges la fig. 8). Si el líquid humiteja³⁰ el material del qual està feta la placa, el líquid comença a ascendir al llarg de la placa i es forma un menisc còncau. Com a resultat, la superfície del líquid augmenta i les forces de tensió superficial, en el seu afany de tornar l'àrea de la superfície a les dimensions inicials, actuen sobre la placa amb una força resultant dirigida cap avall i proporcional a α , com es representa en la fig. 5. D'aquesta manera, el pes de la placa humitejada pel líquid s'incrementa en una magnitud proporcional al coeficient de tensió superficial.

El muntatge de la fig. 8 ha permès demostrar que el coeficient de tensió superficial del líquid que humiteja per dins els alvèols depèn substancialment de l'àrea de contacte d'aquest líquid amb l'aire (fig. 9). Com s'observa en la fig. 9, durant el creixement cíclic (amb una freqüència de 0.2 Hz) i la subsegüent disminució de l'àrea de la superfície del líquid, que reproduïx la variació de l'àrea dels alvèols durant l'aspiració i l'exhalació, respectivament, el coeficient α del líquid alveolar no roman constant, i canvia d'uns $3 \cdot 10^{-3}$ a uns $5 \cdot 10^{-2}$ N/m. A títol de comparació, en el mateix gràfic es mostra que el valor de α de l'aigua pura, per a les mateixes variacions de l'àrea de la superfície, és constant.

Q17) Quantes vegades ocorre el cicle de la fig. 9 per minut?

Q18) Què significa la paraula respectivament del paràgraf anterior?

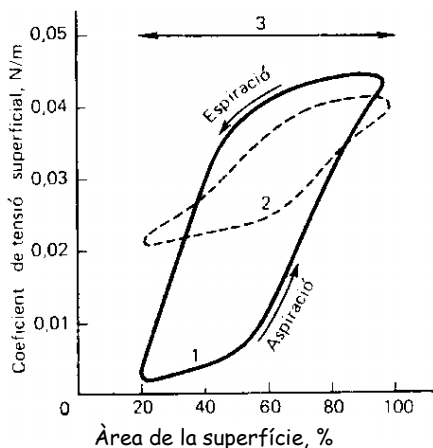


Fig. 9. Coeficient de tensió superficial en funció de l'àrea de contacte del líquid amb l'aire (les mesures s'han fet amb el muntatge de la fig. 8). 1, líquid alveolar d'una persona sana; 2, líquid alveolar obtingut dels nounats incapaçs de respirar per ells mateixos; 3, aigua pura. Les fletxes indiquen la variació en el temps de les magnituds obtingudes durant l'aspiració i l'exhalació.

3.5.6 α i concentració d'impureses

Però la natura, una altra vegada, ho preveu tot. La substància continguda en forma d'impuresa, en el líquid que humiteja per dins la superfície dels alvèols, regula de tal manera la magnitud de la tensió superficial que el coeficient α és mínim al principi de l'aspiració i màxim al final. Per això, tot i que el diàmetre dels alvèols al principi de l'aspiració és molt petit, l'aportació de les forces de tensió superficial no és gran. Aquest fet permet inflar els alvèols reduïts amb una pressió relativament petita. Al mateix temps, l'augment de α a mesura creix el radi de l'alvèol impedeix que aquest s'infla desmesuradament al final de l'aspiració, i prevé d'aquesta manera la ruptura de l'alvèol. A més a

³⁰ Que un líquid humitegi o no un material determinat depèn de les relacions entre els coeficients de tensió superficial en les superfícies límit: 1) líquid-aire, 2) líquid-material, 3) material-aire.

més, aquesta dependència de α respecte a la grandària de l'alvèol estabilitza les relacions entre els alvèols veïns i impedeix que entre en acció el mecanisme de decreixement/creixement il·limitat mostrat en la fig. 7.

Com fan disminuir les impureses el coeficient de tensió superficial del líquid i el converteixen en una funció de l'àrea de la superfície?

Q19) Si poses una agulla, amb compte, sobre la superfície de l'aigua, ocorren coses diferents segons l'aigua siga clara i neta o continga sabó. Què té a veure amb la tensió superficial?

Per regla general, l'estructura química d'aquestes impureses és molt pròxima al sabó ordinari, i formen una pel·lícula fina en la superfície de l'aigua. Si la concentració de la impuresa és alta, aquesta pot cobrir tota la superfície de l'aigua amb una capa contínua i, aleshores, $\alpha_{\text{líquid}} = \alpha_{\text{impuresa}}$. En el cas que la concentració de la impuresa siga insuficient per a cobrir tota la superfície, el coeficient de tensió superficial del líquid tindrà un valor entre el corresponent a l'aigua i a la impuresa, $\alpha_{\text{H}_2\text{O}} > \alpha_{\text{líquid}} > \alpha_{\text{impuresa}}$. En aquestes condicions, el creixement de la superfície del líquid conduirà a la disminució de la concentració superficial de la impuresa i a l'augment de α , que s'aproparà a $\alpha_{\text{H}_2\text{O}}$. És evident que amb la disminució de la superfície del líquid la tensió superficial canviarà en sentit contrari, cap a α_{impuresa} .

3.5.7 Histèresi

L'anàlisi de les variacions de α amb l'àrea durant l'aspiració i l'exhalació (veges la fig. 9) demostra que el valor de α , tot i que coincideix en els punts finals, té valors diferents en els punts intermedis. La dependència desfasada (retardada) del coeficient de tensió superficial respecte a l'àrea s'anomena *histèresi*³¹. I quan més alta és la freqüència de les variacions cícliques de la superfície del líquid, major és el fenomen d'histèresi.

(Física) Histèresi és ...

Origen biològic

Quina és la causa del fet que, per a la mateixa superfície del líquid, el valor de α durant l'aspiració sempre siga major que durant l'exhalació? Aquest fenomen està relacionat amb el fet que una part de la impuresa que disminueix la tensió superficial es troba dissolta en les capes més profundes de líquid. Aquesta quantitat d'impuresa dissolta en l'interior del líquid es troba en equilibri dinàmic amb les molècules d'impuresa de la superfície; de manera que, quan augmenta la concentració de la impuresa en la superfície (per disminuir la superfície, en reduir-se el volum de l'alvèol), una part d'aquesta se'n "va" cap a l'interior del líquid, i viceversa. Tanmateix, aquest equilibri no s'estableix instantàniament. En conseqüència, al principi de l'aspiració, per exemple, un augment ràpid de la superfície està acompanyat d'un increment brusc de α perquè les impureses dissoltes en el volum no tenen temps d'eixir a la superfície. L'equilibri entre les molècules d'impuresa s'estableix tan sols al final de l'aspiració (o l'exhalació), cosa que explica l'existència de la histèresi en la dependència de la tensió superficial respecte de l'àrea de la superfície.

(Física) Substàncies tensoactives són...

³¹ La paraula *histèresi*, provinent del grec, significa 'quedar-se endarrerit'.

D'on apareixen en el pulmó les substàncies que disminueixen la tensió superficial i fan més fàcil la respiració? Aquestes substàncies les sintetitzen cèl·lules especials que es troben en les parets dels alvèols. La síntesi d'aquestes substàncies, anomenades *tensoactives*, es produeix durant tota la vida d'una persona, del naixement a la mort.

Nounats amb problemes

En les ocasions, poc freqüents, en què els pulmons del nounat estan privats (totalment o parcial) de les cèl·lules que produeixen substàncies tensoactives, el bebè és incapaç de fer la primera aspiració, i mor. Malauradament, prop de mig milió de nounats moren en el món cada any per aquesta causa. En la fig. 9 es mostra la dependència entre el coeficient de tensió superficial del líquid dels pulmons d'aquests nounats i l'àrea de la superfície. El valor mínim de α quan hi ha síntesi deficient de substàncies tensoactives és quasi 8 vegades major que el normal, cosa que fa impossible la respiració pròpia.

Q20) D'on ve el factor 8?

3.6 Excepcions: pulmons sense substàncies tensoactives

De qualsevol manera, molts animals que respiren amb pulmons no es veuen afectats, en absolut, pel fet que els seus alvèols no contenen substàncies tensoactives.

3.6.1 Els animals de sang freda

En primer lloc, ens estem referint als animals de sang freda (les granotes, els fardatxos, les serps i els cocodrils). Com que aquests animals no han de gastar energia per a l'escalfament del cos, la demanda d'oxigen es redueix en un ordre de magnitud, aproximadament, en comparació amb els animals de sang calenta. Per aquesta causa, també l'àrea dels pulmons, a través de la qual es fa l'intercanvi dels gasos entre la sang i l'aire, és menor en els animals de sang freda que en els de sang calenta. Així, per exemple, en els pulmons de la granota, 1 cm^3 d'aire té una superfície de contacte amb els vasos sanguinis de tan sols 20 cm^2 , mentre que en una persona el mateix volum d'aire intercanvia els gasos amb la sang a través d'una superfície de prop de 300 cm^2 .

Q21) En quants ordres de magnitud és menor la relació àrea/volum del pulmó per a un animal de sang freda que per a una persona?

La disminució relativa de l'àrea del pulmó per unitat de volum en els animals de sang freda està relacionada amb el fet que el diàmetre dels alvèols és, aproximadament, 10 vegades major que en els animals de sang calenta. Però de la llei de Laplace, eq. (2), es desprèn que l'aportació de les forces de tensió superficial és inversament proporcional al radi de l'alvèol. Per aquesta causa, el gran radi dels alvèols dels animals de sang freda dona la possibilitat d'inflar-los fàcilment, fins i tot quan en les superfícies interiors no estan presents les substàncies tensoactives.

Q22) Explica l'afirmació anterior.

Q23) Quin radi aproximat té, doncs, l'alvèol d'un animal de sang freda?

3.6.2 Els pardals

El segon grup d'animals, amb pulmons sense substàncies tensoactives, són els pardals. Els pardals són animals de sang calenta i estil de vida ben animat. Les despeses energètiques dels pardals i dels mamífers d'igual massa són semblants. També és gran, doncs, la quantitat d'oxigen requerida pels pardals. Els pulmons d'aquests tenen la capacitat, única en el seu gènere, de saturar la sang amb oxigen durant un vol a gran altura (de prop de 6000 m) en què la concentració d'oxigen és 2 vegades menor que al nivell de la mar.

Q24) Comprova amb l'equació baromètrica

(concentració a l'altura h) = (concentració a l'altura zero) · e^{-h/8 km}

que la concentració d'oxigen es redueix en un 50% a 6 km d'altura sobre el nivell del mar.

Qualsevol mamífer, també els humans, quan va a parar a aquesta altura, comença a experimentar l'escassetat d'oxigen i limita bruscament l'activitat, el moviment i, de vegades, fins i tot se sumeix en un estat de sopor profund (comatós). Aleshores, com aconsegueixen els pulmons dels pardals respirar i saturar la sang amb oxigen, sense utilitzar-hi les substàncies tensoactives, millor que ho podem fer nosaltres, els mamífers?

Autocrítica

Ha arribat el moment de l'autocrítica. Què hi ha de dolent en els nostres pulmons? En primer lloc, no tot l'aire aspirat participa en l'intercanvi dels gasos amb la sang. L'aire que, al final de l'aspiració, es troba en la tràquea i els bronquis no podrà lliurar l'oxigen a la sang i prendre d'aquesta el diòxid de carboni, perquè aquests òrgans estan quasi exempts de vasos sanguinis. Per aquesta causa, el volum dels pulmons ocupat per la tràquea i els bronquis, (junt amb el volum de les vies respiratòries superiors, se sol denominar *zona morta*).

3.6.3 Zona morta dels pulmons dels mamífers

Habitualment, la zona morta en els pulmons d'una persona té un volum de prop de 150 cm³. Hem d'assenyalar que l'existència d'aquesta zona no solament impedeix que la quantitat corresponent d'aire fresc arribi a la superfície interior dels alvèols, rica en vasos sanguinis, sinó que també disminueix la concentració mitjana de l'oxigen que arriba als alvèols. Això ocorre perquè al principi de cada aspiració en els alvèols entra l'aire que ve de la zona morta, i aquesta és precisament l'última porció d'aire que s'acaba d'exhalar. Per aquesta causa, la concentració d'oxigen en l'aire que entra en els alvèols al principi de l'aspiració és baixa, i no es diferencia de la concentració que té l'aire exhalat.

Q25) Quin % del volum dels pulmons és zona morta?

El volum de la zona morta es pot augmentar artificialment si respirem a través d'un tub llarg. Si fem la prova, podem comprovar que s'hi fa necessari augmentar la profunditat (el volum) de les alenades. És obvi que, en el límit, en el cas de fer el volum de la zona morta igual a l'aspiració màxima possible (és a dir, de prop de 4.5 dm³), resulta que després d'unes quantes aspiracions la persona començarà a asfixiar-se, perquè deixarà d'entrar aire fresc en els alvèols. Així que l'existència de zona morta en el sistema respiratori dels mamífers és un "descuit" evident per part de la natura.

Q26) Per què es parla abans de probabilitat i de volum de les alenades com a sinònims?

Q27) Quin és el volum dels pulmons, a la vista d'allò que hem assenyalat més amunt?

3.6.4 Circulació de l'aire i respiració dels mamífers

Quan la natura va crear els pulmons dels mamífers va cometre també una segona errada, perquè el moviment de l'aire en els pulmons canvia de direcció quan passa de l'aspiració a l'exhalació. Per aquesta causa, els pulmons pràcticament no actuen quasi la meitat del temps, ja que l'aire fresc no entra en els alvèols durant la fase d'exhalació. Com a resultat, cap al final de l'exhalació la concentració de l'oxigen en l'aire alveolar disminueix una vegada i mitja en comparació amb la concentració en l'atmosfera. Com que, durant l'aspiració, l'aire aspirat ric en oxigen es mescla en els alvèols amb l'aire que s'hi trobava anteriorment, la mescla obtinguda —la qual, precisament, és la que intercanvia els gasos amb la sang— conté oxigen en concentració menor que l'atmosfèrica. Per aquesta causa, per als mamífers, la saturació de la sang amb oxigen sempre serà menor que en el cas hipotètic que l'aire haguera passat a través dels pulmons només en una sola direcció, independentment de la fase de respiració.

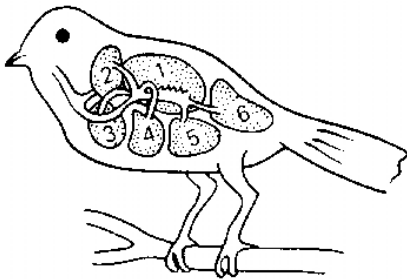
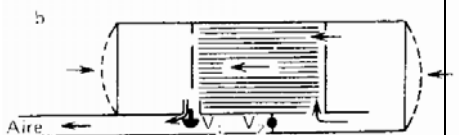
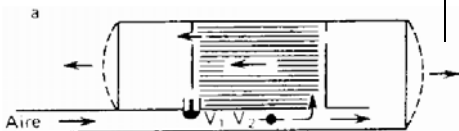


Fig. 10. Sistema respiratori del pardal: a) pulmons; b) 6 bosses aèries.

3.6.5 Circulació de l'aire i respiració: els pardals

Per descomptat, en els pulmons dels mamífers, la tràquea dels quals serveix simultàniament per a l'entrada i per a l'eixida de l'aire, és impossible fer aquest moviment unidireccional de la mescla respiratòria. En els pardals, en canvi, la natura va assolir la perfecció, una altra vegada. A més dels pulmons ordinaris, els pardals tenen un sistema complementari que consta de cinc o més parelles de bosses d'aire comunicades amb els pulmons. Les cavitats d'aquestes bosses es ramifiquen profusament en el cos i penetren en alguns ossos; de vegades, fins i tot en els ossets petits de les falanges dels dits. Com a resultat, el sistema respiratori de l'ànec ocupa prop del 20% del volum del cos (el 2% correspon als pulmons i el 18%, a les bosses d'aire), mentre que en una persona representa tan sols un 5%. Les bosses aèries no solament disminueixen la densitat del cos, sinó també contribueixen a insuflar l'aire en una sola direcció a través dels pulmons.



Q28) Quins són els 4 trets característics del sistema respiratori dels pardals?

En la fig. 10 es representa el sistema respiratori dels pardals, que consta dels pulmons i de diverses bosses aèries comunicades amb els pulmons. El pulmó del pardal, a diferència del d'un mamífer, té una estructura de tubs fins oberts pels dos costats i connectats paral·lelament; aquests tubs estan rodejats de vasos sanguinis. Durant l'aspiració, els volums de les bosses d'aire davanteres i posteriors augmenten. Les bosses davanteres no es comuniquen amb el bronqui principal durant l'aspiració i es plenen d'aire que ix dels pulmons (fig. 11a). Durant l'exhalació, el volum de totes les bosses disminueix, es restableix la comunicació de les bosses davanteres amb el bronqui principal, mentre que per a les bosses posteriors aquesta comunicació es tanca. Com a resultat, l'aire a través del pulmó del pardal flueix, durant l'exhalació, en la mateixa direcció que durant l'aspiració (fig. 11b). Aquesta circumstància permet als pardals enriquir millor la sang d'oxigen.

Fig. 11. Moviment de l'aire en el sistema respiratori del pardal: a), aspiració; b) exhalació. (V1 i V2 són les vàlvules que canvien el moviment de l'aire).

Q29) Explica la fig. 10.

Durant la respiració dels pardals, varien tan sols els volums de les bosses d'aire, mentre que el volum del pulmó és pràcticament constant. I com que no hi ha necessitat d'inflar el pulmó, s'entèn per què els pulmons dels pardals no tenen substàncies tensoactives: ací, aquestes no serveixen per a res.

3.6.6 Contracorrent: mètode barat i còmode per als pardals (i els peixos)

La natura, en l'intent d'augmentar al màxim la concentració d'oxigen en la sang dels pardals durant els vols a altures grans, va recórrer a un artifici nou: la direcció del moviment de la sang en els vasos del pulmó és oposada a la del flux d'aire a través del pulmó. Aquest mètode de contracorrent per a saturar la sang amb oxigen és molt més eficaç que quan la sang i l'aire es mouen a través dels pulmons en una sola direcció.

Considerem l'exemple següent. Suposem que dos tubets, que imiten el vas sanguini i el tub conductor d'aire del pulmó del pardal —disposats l'un al costat de l'altre— entren en contacte (fig. 12). A través de la superfície de contacte entre el vas sanguini i el tubet conductor d'aire, es pot difondre l'oxigen a la sang a partir de l'aire i, en direcció oposada, el diòxid de carboni. La sang que està a punt d'abandonar el pulmó (la part dreta de la fig. 12) està en contacte amb l'aire que acaba d'entrar en el pulmó i en el qual la concentració d'oxigen encara no ha disminuït. A mesura que l'aire passa a través dels pulmons perd oxigen i se satura amb diòxid de carboni. Per aquesta causa, quan la sang es mou pel vas, entra en contacte amb els volums d'aire fresc cada vegada més rics en oxigen, circumstància que dóna a la sang l'oportunitat de saturar-se amb oxigen fins al valor màxim possible. El mateix mecanisme permet a la sang alliberar l'excés de gas carbònic de forma més ràpida que en el cas dels mamífers.³²

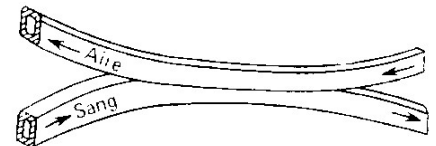


Fig. 12. Representació esquemàtica del sistema a contracorrent de saturació de la sang amb oxigen, en els pulmons del pardal.

3.7 Respiració i òrgans vitals

Per a les persones i altres animals superiors la respiració i el batec del cor són sinònims de vida. El cor i els pulmons proveeixen l'animal de la quantitat necessària d'energia, subministren oxigen als teixits i evacuen el diòxid de carboni. Per aquesta causa, l'aturada de la respiració o de la circulació sanguínia representen un perill gran per a la vida d'un animal. Tanmateix, no tots els teixits requereixen en igual mesura l'alimentació ininterrompuda d'oxigen. Si, amb l'ajuda d'un torniquet, s'interromp la circulació de la sang en un braç o en una cama durant un hora o més temps, no es provocaran lesions en els teixits d'aquests òrgans. Els ronyons també poden suportar interrupcions en l'abastiment de sang. Desafortunadament, tant el cor com el cervell són summament sensibles a l'escassetat d'oxigen. Per aquesta raó, l'asfíxia o l'aturament del cor durant uns quants minuts condueixen a canvis en els seus teixits.

(Física) Concentració de saturació és...

³² És interessant saber que la natura va aplicar el sistema anterior, a contracorrent, no sols als pardals que estan obligats a afrontar l'escassetat d'oxigen durant els vols a altures grans, sinó també en les agalles dels peixos que utilitzen l'oxigen dissolt en aigua, en què la concentració és unes 30 vegades menor que en l'atmosfera.

3.7.1 Alenar sota l'aigua: els animals

Sabem que el gat, el gos, la llebre i altres mamífers que viuen en la superfície de la Terra, expiren uns quants minuts després d'haver-los submergit per complet en l'aigua. Tanmateix, l'ànec pot suportar una capbussada sota l'aigua de 10 a 20 minuts de durada; la foca, de 20 minuts o més, i algunes espècies de balenes estan en la profunditat de l'oceà per més d'una hora. Com poden fer-ho?

Experiments fets amb foques han demostrat que quan "bussegen" se'ls retarda bruscament el ritme cardíac (fins a 1/10 de la freqüència habitual). Això passa immediatament després de submergir les fosses nasals sota l'aigua. El mateix fenomen ocorre en els pingüins, cocodrils, tortugues, ànecs i tots els altres animals que respiren aire però que passen un cert temps sota l'aigua. És interessant notar que en els peixos voladors, les agalles dels quals deixen de funcionar quan salten de l'aigua o se'ls hi trau per força, les contraccions del cor també es retarden considerablement. Aquest retard brusc del ritme cardíac en condicions d'anòxia (manca d'oxigen) permet a tots aquests animals reduir considerablement el consum d'oxigen pel cor, el qual és el consumidor principal d'aquest gas en l'organisme.

Per a evitar que durant la capbussada l'abastiment de sang en el cor i el cervell caiga per davall el nivell admissible, el diàmetre dels vasos dels altres òrgans (excepte el cor i el cervell) disminueix considerablement. Per aquesta causa, fins i tot per a la petita freqüència de les contraccions del cor, l'abastiment de sang al cor i al cervell dels animals bussejadors és encara insuficient. El mateix mecanisme de regulació de la circulació de la sang durant la capbussada es genera, com a resultat d'un entrenament, en l'organisme dels pescaters de perles els quals poden estar sota l'aigua durant diversos minuts, fins i tot a 30 m.

3.7.2 A fer el bus

I què podem fer nosaltres, els que no tenim les aptituds dels pescaters de perles? Com pot una persona comuna penetrar en els enigmes de les profunditats de la mar? El primer aparell que es va utilitzar per a romandre sota l'aigua va ser un tub que comunicava la boca de la persona amb l'atmosfera. El tub respiratori l'utilitzaven ja els antics grecs i romans, i Leonardo da Vinci el va perfeccionar tot proveint-lo d'un disc de suro situat de tal manera que l'extrem superior del tub sempre sobreïsquera de l'aigua, per a assegurar la respiració lliure de la persona. La longitud del tub era d'un metre. El tub de Leonardo da Vinci no estava destinat per a la natació subaquàtica, sinó per a *caminar sota l'aigua*. El gran savi considerava que aquest aparell es podia utilitzar en la mar de les Índies per a *pescar perles*. Hem de dir que les larves d'alguns insectes, que habiten en el fons de tolls o petits dipòsits d'aigua, tenen una espècie de tub respiratori. Quan trauen el tubet a la superfície, poden respirar sense abandonar el llot.

Aquest recurs del tub l'utilitzaven sovint els indis³³ per amagar-se del enemics sota la superfície de l'aigua i respirar a través d'una tija buida de jonc. Tanmateix, aquest mètode és possible solament quan la profunditat d'immersió no supera 1.5 m. Si la profunditat d'immersió és major, la diferència entre la pressió de l'aigua que comprimeix el tòrax, i la de l'aire dins d'aquest, s'incrementa fins a tal punt que ja no podem augmentar el volum del tòrax durant l'aspiració i emplenar els pulmons d'aire fresc. Per aquesta causa, quan ens trobem a una profunditat major que 1.5 m, solament és possible respirar aire que s'haja comprimit a la pressió de l'aigua que està a la profunditat donada. Precisament amb aquest fi, els submarinistes porten botelles

³³ Com apareix en les novel·les de Fenimore Cooper.

d'aire comprimit. Tanmateix, la immersió a profunditats diferents requereix que siga distinta la pressió de l'aire aspirat. Així, per exemple, a la profunditat de 10 m la pressió ha de ser de 200 kPa, i a la profunditat de 40 m, de 500 kPa.

Q30) A quantes atmosferes equival la pressió de l'aire aspirat a 10 m i a 40 m de profunditat d'immersió?

Q31) Quina pressió hi ha sobre el cos d'un submarinista que estiga a 10 m o a 40 m de profunditat?

3.7.3 Alenar mescles de gasos

Desafortunadament, l'experiència en l'ús d'escafandres autònoms ha demostrat que no és possible submergir-se a més de 40 m. A major profunditat la/el submarinista es veu obligat a respirar aire comprimit a una pressió superior a 5 atm, a la qual la concentració d'oxigen supera en més de 5 vegades la concentració en l'atmosfera, cosa que provoca la intoxicació amb l'oxigen.

A pressió atmosfèrica, una persona pot respirar oxigen pur tan sols durant unes 24 hores. Si la inhalació de l'oxigen és més prolongada, es produeix una pulmonia que acaba amb la mort. Si es respira oxigen pur comprimit a 2 o 3 atm durant unes 2 hores, es produeixen trastorns de coordinació de moviments, de l'atenció i de la memòria.

Amb la finalitat d'evitar l'acció tòxica de l'oxigen per als submarinistes que se submergeixen a profunditats grans es preparen mescles respiratòries especials amb un percentatge d'oxigen menor que en l'aire atmosfèric. Però a pressions tan altes el nitrogen que entra en la composició de la mescla respiratòria pot causar una acció narcòtica. A més a més, és molt difícil respirar les mescles que contenen nitrogen a profunditats de prop de 100 m, ja que la densitat del gas aspirat, comprimit a 10 atm, supera en 10 vegades la densitat de l'aire atmosfèric. Aquesta densitat tan alta del gas aspirat transforma l'acte de respiració, habitualment imperceptible i de fàcil execució, en un procés penós d'introducció forçada de l'aire en els pulmons. Per això, quan la profunditat supera 40 m els bussos solen respirar una mescla d'oxigen i heli. A pressions tan altes, l'heli no presenta propietats narcòtiques i té una densitat aproximadament 7 vegades menor que la del nitrogen.³⁴

Q32) Explica per què l'heli té una densitat 7 vegades menor que l'aire.

3.7.4 Bombolles d'aire en els teixits

Tanmateix, les dificultats (i perills) que aguaiten la/el submarinista que se submergeix a una gran profunditat no sols estan sota l'aigua, sinó també immediatament després de pujar a la superfície. Els bussos que pugen ràpidament d'una gran profunditat comencen a experimentar aviat un dolor fort de les articulacions. Aquesta malaltia d'ocupació dels bussos rep el nom de *malaltia de les cambres de submersió* o,

³⁴ Els bussos se submergeixen cada vegada a més profunditat. Han d'instal·lar i substituir, per exemple, torres petroleres en la mar, on el petroli és més barat ja que els jaciments es troben a poca profunditat. Els bussos que instal·len les torres en la mar del Nord han de treballar, de vegades, a una profunditat de prop de 300 m, i respiren mescles gasoses comprimides a 3000 kPa.

simplement, mal dels bussos, i es deu a la formació de bombolles de gas en els teixits, que són també causa d'oclusió de petits vasos sanguinis.

D'on provenen aquestes bombolles de gas? Sorgeixen, anàlogament a com es formen bombolles en una ampolla de soda que s'obri, quan disminueix la pressió sobre un líquid que s'ha saturat de gas a una pressió gran.³⁵

Q33) Comprova l'afirmació —feta en la nota a peu de pàgina— que una disminució de 50 kPa equival a 6 km d'altura.

3.7.5 Formació de bombolles

En la formació d'una bombolla, s'hi donen dues etapes successives:

- 1) formació d'una bombolla molt petita en un punt en què *no hi havia res*, i
- 2) creixement de la bombolla.

La segona etapa, el creixement de la bombolla de gas durant una disminució brusca de la pressió atmosfèrica, és fàcil d'explicar mitjançant la llei de Boyle-Mariotte.

Q34) Explica l'afirmació anterior.

La primera etapa, el mecanisme de formació d'una bombolla de gas molt petita a partir *de no res*, no està encara ben estudiada. És clar que és imprescindible la presència dels nuclis per al procés de formació de les bombolles, ja que en l'aigua pura les bombolles de gas, en general, no es formen, fins i tot en cas de reduir bruscament, fins a mil vegades, la pressió del gas sobre la superfície de l'aigua. Es considera que en els teixits de l'organisme, en condicions normals, sempre hi ha els anomenats *nuclis*, que poden convertir-se en punts de formació de bombolles molt petites de gas. És possible que com a nuclis puguin intervenir les bombolles de gas estables (que no canvien les seues dimensions) presents en els teixits.

La *malaltia de les cambres* de submersió es pot prevenir si la pujada del bus des de profunditats grans es fa a un ritme suficientment lent i amb les pauses necessàries. Aquestes pauses durant la pujada permeten que el gas dissolt es difonga a través del teixit als vasos sanguinis, pels quals el gas, juntament amb la sang, entra en els pulmons, i des d'aquests ix a l'atmosfera sense arribar a formar bombolles.³⁶

(Física) Nuclis de condensació a una tempesta són...

³⁵ La malaltia de les cambres de submersió és possible també durant una pujada ràpida (en avió a gran altura) i en una cambra no hermètica. En aquest cas, el perill de la malaltia de les cambres de submersió sorgeix durant una disminució brusca de la pressió igual a 50 kPa, aproximadament, cosa que correspon a una altitud major de 6000 m. Es van registrar diversos casos d'aquesta malaltia entre els pilots que volaven en una cabina que no era hermètica i a altures de 2500 m. Tanmateix, el dia anterior al vol totes aquestes persones es van dedicar a la pràctica del submarinisme i utilitzaven un escafandre autònom. És evident que, encara abans del vol, l'organisme dels pilots contenia petites bombolles d'aire que començaven a expandir-se, i revelaven la seua presència després d'una disminució significativa de la pressió atmosfèrica. Per aquesta causa, als pilots se'ls recomana no començar a pilotar l'avió fins que passen 24 hores de la natació subaquàtica.

³⁶ La malaltia de les cambres de submersió no es produeix durant la pujada brusca des d'una profunditat menor de 9 m. Una permanència a la profunditat de 30 m durant una hora requereix aturar-se dos minuts a la profunditat de 6 m, i durant 24 minuts a la profunditat de 3 m. En els casos en què els bussos treballen diàriament a una profunditat major que 100 m en el curs de tota la jornada de treball, no s'ha de disminuir la pressió de l'aire que aquests aspiren ni tan sols en les hores de descans després del retorn a la superfície, perquè aquest procés requeria diverses hores. Per aquesta causa, en els intervals entre les immersions els bussos descansen en cambres de pressió especials instal·lades en els vaixells.

3.7.6 Bombolles... de nitrogen...

La major part de les bombolles de gas són de nitrogen, ja que l'oxigen es consumeix energèticament per les cèl·lules de l'organisme. El perill de desenvolupament de la *malaltia de les cambres de submersió* es pot disminuir si, en lloc de nitrogen, utilitzem heli per a alenar, que és menys soluble en l'aigua i en les grasses, i que té una velocitat de difusió unes quantes vegades major que el nitrogen. La major velocitat de difusió de l'heli dóna la possibilitat de reduir el temps de pujada del bus a la superfície.³⁷

Q35) Per què té l'heli una velocitat de difusió major que el nitrogen?

3.7.7 Cruixits d'ossos dels dits...

La formació de les bombolles de gas en el líquid durant la disminució brusca de la pressió exterior està relacionada també amb un altre fenomen que observem en l'organisme. En la nostra *època de nervis* s'ha difós àmpliament l'hàbit de *cruixir amb els dits* en moments d'emoció. Durant molt de temps no es podia esbrinar quina era la causa del so de cruixit que fem quan estirem les articulacions. Molta gent creia que aquest so el produïen els ossos. Tanmateix, una detallada investigació ha establert que la causa d'aquests cruixits són les bombolles de gas que es formen i es trenquen en el líquid que omple la bossa articular. Quan estirem l'articulació, el volum de la bossa articular augmenta i, en conseqüència, disminueix la pressió, i el líquid *lubricant*—líquid que hi ha en l'articulació—comença a bullir. Les bombolles de gas que es formen conflueixen amb altres de majors i es trenquen fent el so de cruixit que sentim. Quan els ossos tornen a la posició normal, el gas és absorbit lentament pel líquid. Aquest procés transcorre durant uns 15 minuts i, en acabant, és possible tornar a fer cruixir les articulacions.

3.7.8 Respirar aigua

Totes les dificultats enumerades anteriorment i relacionades amb la permanència d'una persona sota l'aigua sorgeixen perquè s'hi respira aire comprimit. I què ocorrerà si fem que una persona "respire" utilitzant aigua, com els peixos? És clar que la concentració de l'oxigen en l'aigua que es troba en equilibri amb l'atmosfera és molt menor que en l'aire (més de 20 vegades menor).

Q36) Explica aquesta afirmació.

³⁷ Tanmateix, resulta que les mesclades d'heli i oxigen asseguren el treball normal dels bussos només fins a profunditats de 400 m. Amb el successiu augment de la pressió, la densitat de la mescla arriba a ser tan alta que fa impossible la respiració.

Des del 1983 comença a usar-se hidrogen, el gas més lleuger, en les mesclades gasoses per als bussos. La mescla conté un 49% d'H₂, 49% d'He i 2% d'O₂. Es recomana respirar aquesta mescla només a profunditats majors de 250 m. Per aquesta raó, quan s'assoleix la profunditat esmentada, la mescla gasosa que s'alena inicialment se sotmet a un canvi lent, i se substitueix l'heli per l'hidrogen. Naturalment, la mescla gasosa que inclou hidrogen i oxigen presenta perill d'explosió. La probabilitat, però, que la mescla explote és molt petita, ja que la relació entre els volums de l'oxigen i de l'hidrogen està lluny de la que representa perill d'explosió (1:2, respectivament). Al mateix temps, en la superfície—on aquests gasos estan emmagatzemats i es fa la mescla— la probabilitat d'explosió és molt major, fet que obliga a prendre mesures de precaució.

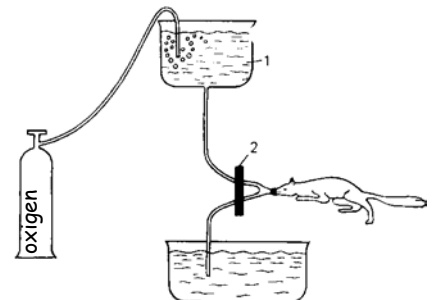


Fig. 13. Muntatge per a "respirar" amb aigua saturada d'oxigen: 1, dissolució aquosa salina de composició pròxima a la sang; 2, vàlvula que tanca el tub inferior, durant l'aspiració, i el superior, durant l'exhalació.

Tanmateix, també aquesta concentració serà suficient per a saturar d'oxigen la sang fins al nivell normal —durant el contacte de l'aigua amb la sang. A més a més, si es vol, és possible augmentar la concentració d'oxigen en l'aigua *aspirada* si deixem passar a través d'aquesta oxigen pur, i no aire.

És evident que quan un submarinista *aspira* aigua que conté oxigen dissolt ja no hi ha necessitat de compensar l'augment de la pressió exterior durant la immersió, perquè d'acord amb la llei de Pascal la pressió de l'aigua dins dels pulmons sempre serà igual a la pressió exterior. Per aquesta causa, els esforços necessaris per a l'aspiració no canviaran amb la profunditat d'immersió. La utilització de l'aigua com a portadora d'oxigen dissolt evita el perill d'intoxicació per oxigen, ja que és possible aconseguir que la concentració de l'oxigen en l'aigua *aspirada* siga constant i igual a la concentració en l'atmosfera. Per la mateixa causa, desapareix el perill d'aparició de la *malaltia de les cambres de submersió*.

En la fig. 13 s'il·lustra esquemàticament un muntatge que permet "respirar" aigua saturada amb oxigen. D'aquesta manera, gossos i ratolins podien viure durant unes quantes hores "respirant" aigua. Aquests animals finalment morien perquè augmentava la concentració de diòxid de carboni en la sang per damunt el límit admissible.

(Física/química) La viscositat és...

(Física) Solubilitat és...

(Física) Llei de Bernoulli...

(Física) Un fluid és...

3.7.9 Pulmons que bombegen aire o aigua?

El muntatge de la fig. 13, tot i que satisfà per complet la necessitat d'oxigen de l'animal, no assegura suficientment l'eliminació del diòxid de carboni format en l'organisme. En condicions normals (en estat de repòs), cada litre d'aire exhalat pels mamífers conté prop de 50 ml de CO_2 , i la solubilitat d'aquest gas en aigua és tal que cada litre, en les mateixes condicions, no pot contenir més de 30 ml de CO_2 . Per aquesta causa, per a evacuar tot el diòxid de carboni que es forma en l'organisme és necessari "bombejar" a través dels pulmons uns volums d'aigua quasi dues vegades majors que els volums necessaris d'aire. D'acord amb la llei de Bernoulli, la diferència de pressió requerida per al moviment, a velocitat determinada, d'un medi líquid (o gasós) —és a dir, d'un fluid— a través d'un tub de longitud i diàmetre coneguts, ha de ser proporcional a la viscositat d'aquest medi. I com que la viscositat de l'aigua és unes 30 vegades major que la de l'aire, resulta que la "respiració" amb aigua requerirà un consum d'energia aproximadament 60 vegades major.

Q37) D'on ix aquest valor, 60?

Q38) Explica breument quin significat té la magnitud viscositat i com la vas mesurar al laboratori de Física.

Així, la natura ens ha dotat de pulmons que són impossibles d'utilitzar en les profunditats marítimes, i per a la investigació d'aquestes profunditats hem d'utilitzar un batiscaf (embarcació submergible) o un submarí.

Per aquesta causa, l'oceà mundial, amb una profunditat mitjana de prop de 3 km i un àrea que ocupa un 70% de la superfície del planeta, no està pràcticament estudiat avui dia. I malgrat que en gener de 1960 J. Piccard i Walsh van assolir, en el batiscaf *Triestre*, el fons de la fosa de les Filipines (la profunditat de la qual supera els 11 km), els éssers humans han deixat menys petjades al fons dels mars, a 1 km de profunditat, que a la superfície de la Lluna.

3.8 Física (conceptes)

Concepte	Capítols	1r – 3r
Acceleració centrípeta		1r
Acceleració		1r
Acceleració de la gravetat		1r
Adimensional (magnitud)		1r
Agitació tèrmica		2n
Amplitud d'oscil·lació d'una ona		2n
Amplitud d'una ona		2n
Àrea/volum i dimensions		3r
Bernoulli (llei, fluids)		3r
Caiguda lliure (temps de)		1r
Canvi de fase en la reflexió		2n
Centre de gravetat		1r
Centrifugadora		3r
Centrípeta (acceleració)		1r
Coefficient de permeabilitat		1r
Coefficient de tensió superficial		3r
Cohesió (forces)		3r
Combustió		3r
Concentració de saturació		3r
Condensació, nuclis		3r
Conservació de l'energia (principi)		1r
Constant de temps (d'un procés)		1r
Convecció		1r
<i>Decibel</i>		2n
Densitat		1r
Densitat		2n
Difracció		2n
Difusió		1r
Dimensions d'una magnitud		1r
Eco		2n
Elàstic (mòdul de Young)		3r
Elàstica (esfera, pressió)		3r
Energia (principi de conservació)		1r
Energia cinètica		1r
Energia d'enllaç d'una molècula		1r
Energia d'una ona		2n
Energia mecànica		2n
Energia potencial		1r
Energia potencial		3r
Esfera elàstica (fórmula de Laplace, diferència de pressió)		3r
Esfera elàstica (pressió)		3r
Fase (canvi en la reflexió)		2n
Fluctuacions		1r
Fluids en règim laminar		3r
Fluids en règim turbulent		3r
Força		1r
Força (resultant)		3r
Força de la gravetat (pes)		1r
Força de reacció		1r
Força de resistència o fricció		1r
Força resultant		1r
Forces de cohesió		3r
Fórmula de Laplace (diferència de pressió en esfera elàstica)		3r
Fractals		3r
Fregament (força)		1r
Freqüència		1r
Freqüència d'una ona		2n
Fricció (força)		1r
Fricció (llei de Stokes)		1r
Gas (pressió parcial)		1r
Gradient de pressió		2n
Gravetat (acceleració)		1r
Histèresi		3r
Intensitat d'una ona		2n
Laminar (règim, fluids)		3r
Laplace (fórmula, diferència de pressió en esfera elàstica)		3r
Longitud d'ona		2n
Llei de Bernoulli (fluids)		3r
Llei de Newton del refredament		1r
Llei de Stokes del fregament		1r
Magnitud		1r
Magnitud (ordre)		1r
Massa		1r
Massa–volum d'un gas		3r
Mòdul elàstic de Young		3r
Moviment tèrmic aleatori		2n
Newton (llei del refredament)		1r
Nuclis de condensació		3r
Número adimensional		1r
Ones sonores		2n
Ordre de magnitud		1r
Parcial (pressió)		1r
Permeabilitat (coeficient)		1r
Pes		1r
Potència		1r
Potencial (energia)		3r
Pressió		2n
Pressió (gradient)		2n
Pressió atmosfèrica		1r
Pressió en una esfera elàstica		3r
Pressió parcial d'un gas		1r
Principi de conservació de l'energia		1r
Radiació		1r
Reacció (força)		1r
Reflexió d'una ona		2n
Reflexió i canvi de fase		2n
Refredament (llei de Newton)		1r
Règim laminar (fluids)		3r
Règim turbulent (fluids)		3r
Relació àrea–volum i dimensions		3r
Relació massa–volum d'un gas		3r
Resistència (força)		1r
Resultant (força)		1r
Resultant d'unes forces		3r
Saturació, concentració		3r
Sinusoidal (variació)		2n

So	2n	Transició de règim laminar a turbulent (fluids)	3r
Solubilitat	3r	Transmissió d'una ona	2n
Soroll blanc	2n	Treball	1r
Stokes (llei de fricció)	1r	Treball	3r
Substàncies tensoactives	3r	Turbulent (règim, fluids)	3r
Superficial (tensió)	3r	Variació sinusoidal	2n
Temps (constant de)	1r	Velocitat	1r
Temps de caiguda lliure	1r	Velocitat de propagació d'una ona	2n
Tensió superficial (coeficient)	3r	Velocitat mitjana	2n
Tensoactives, substàncies	3r	Young (mòdul elàstic)	3r
Tèrmic (moviment d'agitació)	2n		
Transductor	2n		