CAPITOLO

9

L'apparato cardiovascolare e il sangue

«È necessario concludere che negli animali il sangue è spinto in un moto circolare e che è in perpetuo movimento.» — William Harvey, De motu cordis, 1628, cap. XIV (traduzione della redazione)

OBIETTIVI

1. Descrivere la circolazione doppia e completa e distinguere arterie e vene in base al verso del flusso.
2. Riconoscere cavità, valvole e grandi vasi del cuore e descrivere le fasi del ciclo cardiaco.
3. Calcolare la gittata cardiaca e la frequenza cardiaca da un elettrocardiogramma, collegando le onde dell'ECG al sistema di conduzione.
4. Collegare la struttura di arterie, capillari e vene alla loro funzione e spiegare come variano pressione e velocità del sangue lungo il circolo.
5. Descrivere la composizione del sangue, le fasi dell'emostasi e le regole di compatibilità dei gruppi AB0 e Rh.
6. Riconoscere i principali fattori di rischio cardiovascolare e i gesti essenziali davanti a un arresto cardiaco.

INDICE DEL CAPITOLO

9.1 Un sistema di trasporto a due circuiti 2
9.2 Il cuore 4
9.3 Il battito: conduzione ed elettrocardiogramma 8
9.4 I vasi sanguigni e la pressione 12
9.5 Il sangue 17
9.6 La salute del cuore e dei vasi 22

Scienze naturali 4 · Parte III · Il corpo umano: nutrizione, scambi e difesa · versione 1.0
Capitolo 9: L'apparato cardiovascolare e il sangue · pagine 253–280 del volume completo · estratto per lo studio

Mettiti due dita sul collo, appena sotto l'angolo della mandibola, e conta i battiti per un minuto. Saranno probabilmente fra sessanta e cento. A ogni battito il ventricolo sinistro spinge nell'aorta circa settanta millilitri di sangue: in un minuto fanno circa cinque litri, quasi tutto il sangue che hai in corpo. Il cuore lo fa da prima che tu nascessi e continuerà, senza pause, per tutta la vita: in ottant'anni sono circa tre miliardi di battiti.

In questo capitolo studierai l'apparato che distribuisce a ogni cellula l'ossigeno raccolto dai polmoni (cap. 8) e i nutrienti assorbiti dall'intestino (cap. 7) e porta via il diossido di carbonio e le scorie: com'è fatto il cuore e perché batte da solo, come scorre il sangue nei vasi, di che cosa è fatto, come si ferma un'emorragia, perché conta il gruppo sanguigno e che cosa può fare chiunque davanti a un arresto cardiaco.

9.1 Un sistema di trasporto a due circuiti

L'apparato cardiovascolare è formato da una pompa, il cuore, e da una rete chiusa di tubi, i vasi sanguigni, in cui scorre il sangue. I vasi che portano il sangue *dal* cuore verso gli organi si chiamano **arterie**; quelli che lo riportano *al* cuore si chiamano **vene**. Fra le une e le altre c'è una rete finissima di **capillari**, dove avvengono gli scambi con le cellule. La definizione dipende dunque dal verso del flusso, non dal contenuto di ossigeno: è una distinzione importante, come vedrai fra poco.

Una cellula del tuo alluce si trova a più di un metro dal polmone più vicino. Per diffusione, una molecola di ossigeno impiegherebbe anni a percorrere quella distanza; nell'acqua la diffusione è efficiente solo su distanze di pochi decimi di millimetro. Per questo gli animali più grandi di un piccolo verme hanno un sistema di trasporto per *flusso di massa*: un liquido spinto da una pompa porta le sostanze vicino a ogni cellula, e solo l'ultimo tratto, dal capillare alla cellula, si percorre per diffusione.

9.1.1 Piccola e grande circolazione

Nell'uomo, come in tutti i mammiferi e negli uccelli, la circolazione è **doppia** e *completa* (Figura 9.1). È doppia perché in un giro completo il sangue passa due volte per il cuore; è completa perché nel cuore il sangue ricco di ossigeno e quello povero di ossigeno non si mescolano mai: la metà destra del cuore contiene soltanto il secondo, la metà sinistra soltanto il primo.

- Nella **piccola circolazione** (o circolazione polmonare) il ventricolo destro spinge il sangue povero di ossigeno nell'arteria polmonare, verso i capillari degli alveoli; qui il sangue cede CO_2 e riceve O_2 (cap. 8), poi torna all'atrio sinistro attraverso le vene polmonari.

- Nella **grande circolazione** (o circolazione sistemica) il ventricolo sinistro spinge il sangue ossigenato nell'aorta e da qui, con arterie sempre più piccole, ai capillari di tutti gli organi; il sangue, ormai povero di O_2 e ricco di CO_2, torna all'atrio destro attraverso la vena cava superiore e la vena cava inferiore.

I due circuiti sono collegati in serie: tutto il sangue che passa nei polmoni passa poi negli organi, e viceversa. Per questo, in ogni minuto, il ventricolo destro e il sinistro pompano la stessa quantità di sangue; cambia invece la pressione, molto più bassa nel circuito polmonare. Nei pesci, invece, il cuore ha un solo atrio e un solo ventricolo e il sangue lo attraversa una volta per giro (circolazione semplice); negli anfibi i due tipi di sangue si mescolano in parte nell'unico ventricolo (circolazione doppia incompleta).

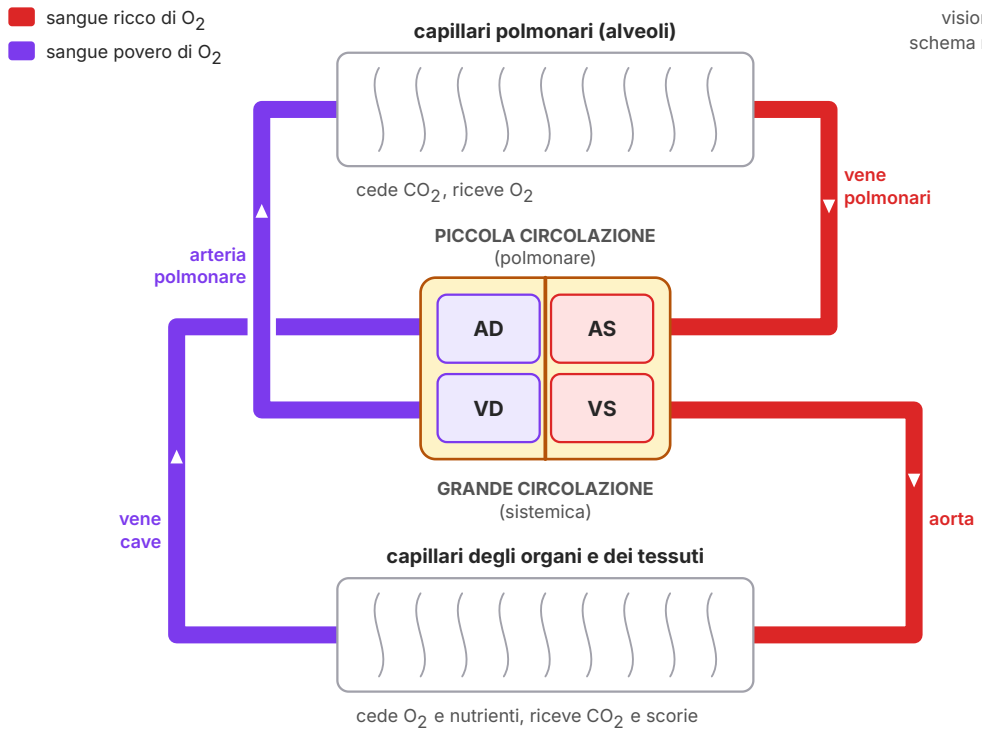


Figura 9.1 La circolazione doppia e completa (schema, visione anteriore: la destra del soggetto è alla sinistra di chi guarda). Il ventricolo destro spinge il sangue povero di ossigeno verso i polmoni (piccola circolazione); il ventricolo sinistro spinge il sangue ossigenato verso tutti gli organi (grande circolazione). I colori indicano il contenuto di ossigeno: il sangue venoso reale è rosso scuro, non blu.

ERRORE FREQUENTE

«Le arterie portano sangue ossigenato, le vene sangue venoso» e «il sangue delle vene è blu». Le arterie si definiscono per il verso del flusso: escono dal cuore. L'arteria polmonare esce dal ventricolo destro e porta sangue *povero* di ossigeno, mentre le vene polmonari portano al cuore il sangue più ossigenato del corpo. Quanto al colore, il sangue povero di ossigeno è rosso scuro: le vene sotto la pelle sembrano bluastre perché la pelle riflette e assorbe in modo diverso le varie lunghezze d'onda della luce. Il blu e il viola degli schemi sono solo una convenzione grafica.

APPROFONDIMENTO

Approfondimento · Harvey, Malpighi e il cerchio che si chiude

Per quasi quindici secoli la medicina europea seguì il medico greco Galeno: il sangue si formava di continuo nel fegato a partire dal cibo, raggiungeva gli organi attraverso le vene e lì veniva consumato; una parte passava dal ventricolo destro al sinistro attraverso minuscoli pori del setto, che nessuno però aveva mai visto.

Nel 1628 il medico inglese William Harvey, che si era formato a Padova, pubblicò il *De motu cordis*. Il suo argomento più forte fu un calcolo, lo stesso spirito quantitativo della rivoluzione scientifica di Galileo: se a ogni battito il cuore spinge fuori anche una piccola quantità di sangue, in un'ora ne spinge una massa molto maggiore di quella dell'intero corpo. Nessun fegato può produrre tanto sangue: deve essere sempre lo stesso, che torna indietro. Harvey mostrò anche, con una semplice legatura del braccio, che le valvole delle vene lasciano scorrere il sangue solo verso il cuore.

Mancava un pezzo: come passava il sangue dalle arterie alle vene? Harvey non poteva vederlo. Nel 1661 il medico bolognese Marcello Malpighi, osservando al microscopio il polmone di una rana, vide i capillari che collegano le due reti. Il cerchio si era chiuso. Puoi rifare tu il calcolo di Harvey con i numeri di oggi negli esercizi.

9.2 Il cuore

Il cuore è un organo muscolare cavo grande circa come un pugno chiuso, con una massa di circa 250–350 g in un adulto. Si trova nel torace, fra i due polmoni, in uno spazio chiamato mediastino, appoggiato sul diaframma e dietro lo sterno. Non è al centro esatto: circa due terzi della sua massa stanno a sinistra della linea mediana, e la sua punta, l'*apice*, è rivolta in basso, in avanti e a sinistra.

DA RICORDARE

Richiamo · Il muscolo cardiaco. In *Scienze naturali 3*, cap. 16, hai studiato il tessuto muscolare cardiaco: cellule striate, ramificate, con un solo nucleo centrale, unite fra loro dai dischi intercalari. Nei dischi le giunzioni comunicanti lasciano passare gli ioni da una cellula all'altra, così l'eccitazione si propaga rapidamente e il miocardio si contrae come un tutt'uno. La contrazione è involontaria: nessuno può fermare il cuore con la volontà.

9.2.1 Pareti, cavità e valvole

Il cuore è avvolto dal **pericardio**, un sacco a due strati: quello esterno, fibroso, lo ancora alle strutture vicine; quello interno, sieroso, è formato da due sottili foglietti, e fra i due un velo di liquido riduce l'attrito a ogni battito. La parete del cuore ha tre strati: l'*epicardio* all'esterno, che è il foglietto del pericardio sieroso aderente al cuore, il **miocardio**, lo spesso strato di muscolo cardiaco che compie il lavoro, e l'*endocardio*, un sottile endotelio che riveste le cavità e le valvole e continua in quello dei vasi.

All'interno ci sono quattro cavità (Figura 9.2). I due *atri*, in alto, ricevono il sangue dalle vene; i due *ventricoli*, in basso, lo spingono nelle arterie. Un setto muscolare separa del tutto la metà destra dalla sinistra. Le pareti dei ventricoli sono molto più spesse di quelle degli atri, e quella del ventricolo sinistro è circa tre volte più spessa di quella del destro: il sinistro deve spingere il sangue in tutto il corpo e sviluppa una pressione di circa 120 mmHg, il destro solo nei vicini polmoni, con circa 25 mmHg.

Il flusso a senso unico è garantito da quattro valvole, lamine di tessuto connettivo rivestite di endocardio che si aprono e si chiudono passivamente, spinte dalla differenza di pressione fra le due parti.

- Le **valvole atrioventricolari** separano ogni atrio dal proprio ventricolo: la *tricuspide*, con tre lembi, a destra; la *bicuspide* o *mitrale*, con due lembi, a sinistra. I loro lembi sono collegati da sottili cordoni fibrosi, le *corde tendinee*, a sporgenze della parete ventricolare, i *muscoli papillari*. Quando il ventricolo si contrae, i muscoli papillari si contraggono con lui e le corde tese impediscono ai lembi di rovesciarsi nell'atrio, come un ombrello che il vento non riesce a girare.
- Le **valvole semilunari** si trovano all'uscita dei ventricoli: la *polmonare* fra ventricolo destro e tronco polmonare, l'*aortica* fra ventricolo sinistro e aorta. Ciascuna ha tre tasche a forma di mezzaluna: quando il ventricolo si rilassa, il sangue che tenderebbe a tornare indietro riempie le tasche e le chiude.

Ai due atri arrivano i grandi vasi venosi: all'atrio destro le vene cave superiore e inferiore, all'atrio sinistro le quattro vene polmonari. Dal ventricolo destro parte il tronco polmonare, che si divide in arteria polmonare destra e sinistra; dal ventricolo sinistro parte l'aorta, che sale,

forma un arco da cui nascono le arterie per la testa e le braccia e poi scende dietro il cuore lungo la colonna vertebrale.

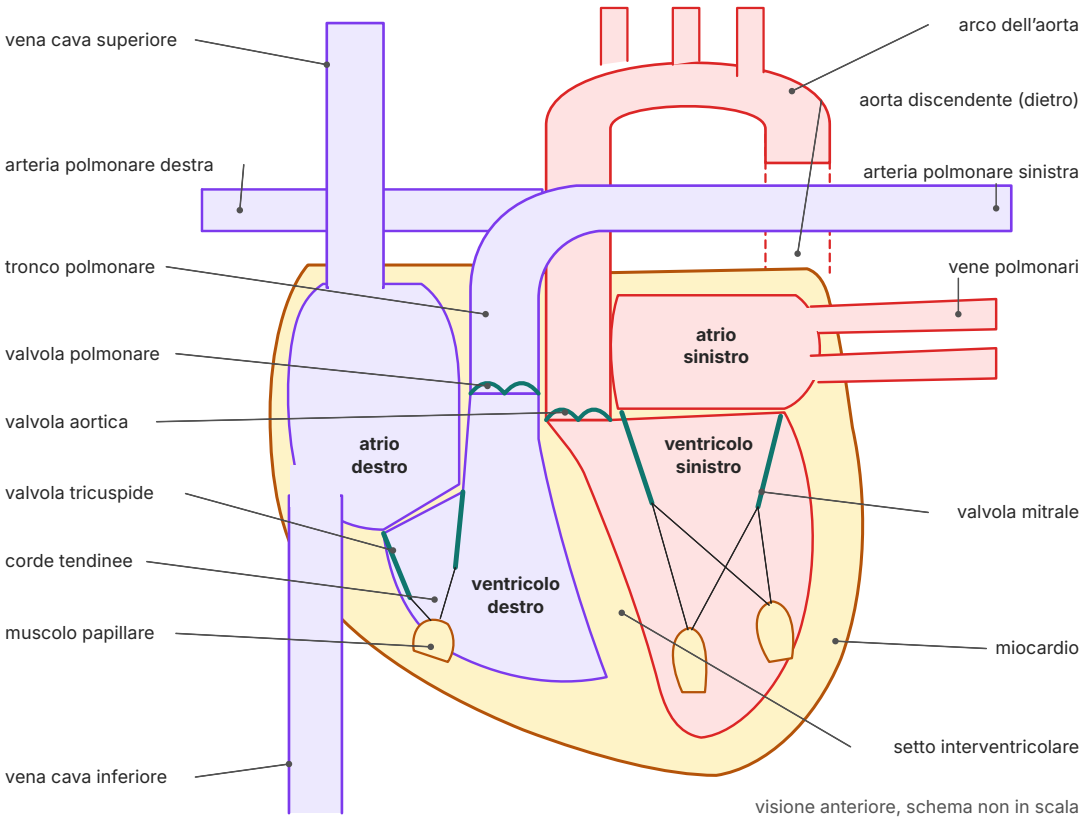


Figura 9.2 Sezione frontale del cuore in visione anteriore (schema non in scala): la destra del paziente è alla sinistra di chi guarda. In viola le cavità e i vasi con sangue povero di ossigeno, in rosso quelli con sangue ossigenato; in verde le valvole. Il tronco polmonare passa davanti all'aorta; l'arteria polmonare destra passa dietro l'aorta e la vena cava superiore. Nota lo spessore della parete del ventricolo sinistro.

Il miocardio lavora senza sosta e ha bisogno di molto ossigeno, ma non lo ricava dal sangue che passa nelle cavità: la parete è troppo spessa. Lo nutre una rete propria, la **circolazione coronarica**. Le due arterie coronarie, destra e sinistra, nascono dall'aorta subito sopra la valvola aortica e decorrono sulla superficie del cuore, ramificandosi nel muscolo; il sangue venoso del cuore si raccoglie nel seno coronarico, che si apre nell'atrio destro. Se una coronaria si chiude, la parte di miocardio che essa nutre resta senza ossigeno: è l'infarto, di cui parleremo alla fine del capitolo.

9.2.2 Il ciclo cardiaco

La sequenza di eventi di un battito si chiama **ciclo cardiaco**. La fase di contrazione di una cavità si chiama *sistole*, quella di rilassamento e riempimento *diastole*. A una frequenza di 75 battiti al minuto un ciclo dura 0,8 s, così suddivisi (valori indicativi):

- **sistole atriale**, circa 0,1 s: gli atri si contraggono e completano il riempimento dei ventricoli, che però erano già pieni per circa quattro quinti, perché il sangue era passato dagli atri ai ventricoli durante la diastole;
- **sistole ventricolare**, circa 0,3 s: i ventricoli si contraggono; la pressione sale, le valvole atrioventricolari si chiudono e, appena la pressione supera quella delle arterie, le semilunari si aprono e il sangue esce;
- **diastole**, circa 0,4 s: tutte le cavità sono rilassate; le semilunari si chiudono, le atrioventricolari si aprono e i ventricoli si riempiono di nuovo.

Il cuore passa dunque in diastole circa metà del tempo, ed è allora che le coronarie, non più strizzate dal muscolo, ricevono la maggior parte del loro flusso. Quando la frequenza aumenta, si accorcia soprattutto la diastole.

Con uno stetoscopio appoggiato sul torace si sentono due *toni cardiaci* per ogni battito. Il primo, più lungo e grave, è prodotto dalla chiusura delle valvole atrioventricolari all'inizio della sistole ventricolare; il secondo, più breve e acuto, dalla chiusura delle semilunari all'inizio della diastole. Una valvola che non si chiude bene o che si apre a fatica produce un rumore aggiuntivo, il *soffio*, che il medico sa riconoscere.

9.2.3 Gittata sistolica e gittata cardiaca

La quantità di sangue che un ventricolo espelle a ogni battito è la **gittata sistolica** (GS). In un adulto a riposo il ventricolo sinistro contiene, alla fine della diastole, circa 120–130 mL di sangue e ne espelle circa 70: non si svuota mai del tutto. La frazione espulsa, detta *frazione di eiezione*, è dunque poco più della metà, ed è uno dei parametri che il cardiologo misura con l'ecocardiografia. La quantità di sangue pompata da un ventricolo in un minuto è la **gittata cardiaca** (GC):

$$GC = FC \times GS$$

dove FC è la frequenza cardiaca. Con 70 battiti al minuto e 70 mL per battito si ottengono circa 4,9 L/min, cioè circa 5 L/min: in un minuto passa per il cuore una quantità di sangue pari a quella che il corpo contiene. La *frequenza cardiaca* di un adulto a riposo è in genere fra 60 e 100 battiti al minuto; è più alta nei bambini e può essere più bassa negli atleti allenati, il cui cuore espelle più sangue a ogni battito.

IN SINTESI

La gittata cardiaca.

$$GC = FC \times GS$$

$$GS = VTD - VTS$$

$$\text{frazione di eiezione} = \frac{GS}{VTD}$$

VTD e VTS sono i volumi del ventricolo alla fine della diastole e alla fine della sistole. Con FC in battiti/min e GS in mL, GC risulta in mL/min: dividi per 1000 per averla in L/min. Valori tipici a riposo: FC ≈ 70 battiti/min, GS ≈ 70 mL, GC ≈ 5 L/min.

ESEMPIO SVOLTO

La gittata cardiaca durante uno sforzo

Problema. A riposo una studentessa ha una frequenza di 70 battiti/min e una gittata sistolica di 70 mL. Durante una corsa la frequenza sale a 150 battiti/min e la gittata sistolica a 110 mL. Calcola la gittata cardiaca nei due casi e di quante volte aumenta. Quanto dura un ciclo cardiaco a riposo?

Soluzione. A riposo: GC = 70 /min × 70 mL = 4900 mL/min ≈ 4,9 L/min. Durante la corsa: GC = 150 /min × 110 mL = 16 500 mL/min = 16,5 L/min. Il rapporto è 16,5 / 4,9 ≈ 3,4. La durata di un ciclo a riposo è 60 s / 70 ≈ 0,86 s.

Risultato. La gittata cardiaca passa da circa 4,9 a 16,5 L/min, più di tre volte tanto. Il cuore ottiene questo risultato in due modi: batte più spesso e si svuota di più a ogni battito, perché il sistema nervoso simpatico e l'adrenalina aumentano anche la forza della contrazione.

9.3 Il battito: conduzione ed elettrocardiogramma

Un cuore isolato dal corpo e irrorato con una soluzione salina ossigenata continua a battere per ore, pur non avendo più alcun nervo collegato: lo si osserva da più di un secolo negli esperimenti di fisiologia. Il segnale che fa contrarre il cuore nasce dentro il cuore stesso: il battito è *miogeno*. Lo producono cellule muscolari cardiache speciali, che si contraggono poco ma generano e conducono impulsi elettrici. Insieme formano il *tessuto di conduzione*, che si trova tutto all'interno delle pareti del cuore (Figura 9.3A).

9.3.1 Dal nodo senoatriale alle fibre di Purkinje

- Il **nodo senoatriale** è un piccolo ammasso di queste cellule nella parete dell'atrio destro, vicino allo sbocco della vena cava superiore. Le sue cellule non hanno un potenziale di riposo stabile: lentamente e spontaneamente si depolarizzano finché raggiungono la soglia e scaricano un impulso. Il nodo senoatriale è il *pacemaker* naturale del cuore, perché è il più veloce di tutti a scaricare.
- L'impulso si propaga attraverso il miocardio dei due atri, che si contraggono insieme, e raggiunge il *nodo atrioventricolare*, nella parte bassa del setto fra gli atri. Qui la conduzione rallenta: il ritardo, di circa un decimo di secondo, dà agli atri il tempo di svuotarsi prima che i ventricoli si contraggano. Fra atri e ventricoli c'è uno scheletro di tessuto fibroso, isolante, e il nodo atrioventricolare è normalmente l'unica porta per cui l'impulso lo attraversa.
- Dal nodo l'impulso passa nel *fascio di His*, che scende nella parte alta del setto interventricolare e si divide nella *branca destra* e nella *branca sinistra*, una per lato del setto.
- Le branche proseguono verso l'apice e si continuano nelle **fibre di Purkinje**, che si diramano sotto l'endocardio delle pareti dei ventricoli. Conducono molto velocemente: la contrazione dei ventricoli comincia dall'apice e risale verso la base, e il sangue viene spremuto verso l'alto, verso le valvole semilunari, come il dentifricio da un tubetto premuto dal fondo.

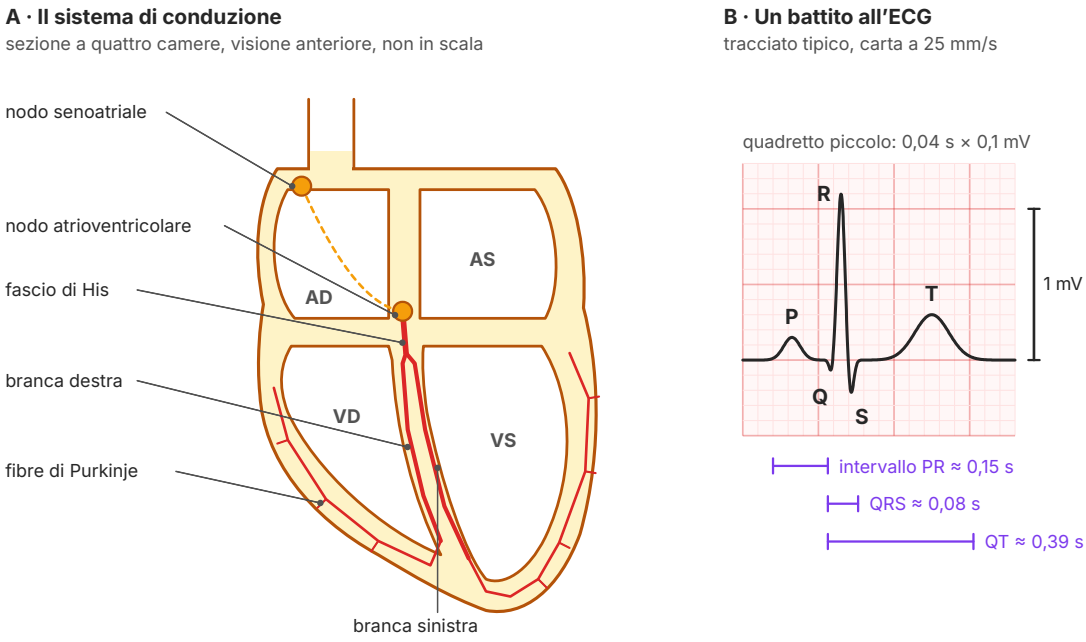


Figura 9.3 A) Il sistema di conduzione in una sezione schematica a quattro camere (visione anteriore, non in scala): il nodo senoatriale nella parete dell'atrio destro, il nodo atrioventricolare alla base del setto interatriale, il fascio di His e le sue branche nel setto interventricolare, le fibre di Purkinje sotto l'endocardio dei ventricoli, tutti dentro le pareti. Il tratteggio indica la propagazione dell'impulso nel miocardio degli atri. B) Un battito all'ECG, tracciato tipico calcolato su carta millimetrata a 25 mm/s: ogni quadretto piccolo vale 0,04 s in orizzontale e 0,1 mV in verticale.

Anche le altre parti del tessuto di conduzione sono capaci di scaricare da sole, ma più lentamente. Se il nodo senoatriale smette di funzionare, il nodo atrioventricolare può assumere il comando, ma con una frequenza di circa 40–60 battiti/min; le fibre dei ventricoli da sole arriverebbero a 20–40. Quando la conduzione si interrompe in modo grave si può impiantare sotto la pelle un pacemaker artificiale, un piccolo generatore che stimola il cuore con impulsi elettrici attraverso un elettrodo.

9.3.2 L'elettrocardiogramma

La depolarizzazione di milioni di cellule muscolari produce correnti elettriche che si diffondono nei tessuti fino alla pelle. Elettrodi appoggiati su torace, polsi e caviglie misurano le piccole differenze di potenziale elettrico fra punti del corpo, dell'ordine del millivolt. La loro registrazione nel tempo è l'**elettrocardiogramma** (ECG). Il primo elettrocardiografo pratico fu costruito nel 1903 dal fisiologo olandese Willem Einthoven, che diede alle onde i nomi che si usano ancora oggi (Figura 9.3B):

- l'**onda P**, piccola e arrotondata, corrisponde alla depolarizzazione degli atri, cioè all'impulso che parte dal nodo senoatriale e li attraversa;
- il **complesso QRS**, alto e appuntito, corrisponde alla depolarizzazione dei ventricoli; è grande perché grande è la massa muscolare dei ventricoli, e nasconde la ripolarizzazione degli atri, che avviene nello stesso momento;
- l'**onda T** corrisponde alla ripolarizzazione dei ventricoli, che precede il loro rilassamento.

Gli intervalli fra le onde sono informazioni preziose. L'intervallo PR, dall'inizio di P all'inizio di QRS, misura soprattutto il ritardo nel nodo atrioventricolare e in un adulto dura circa 0,12–0,20 s; il QRS dura meno di un decimo di secondo; l'intervallo fra due onde R successive è la durata di un ciclo, e da esso si calcola la frequenza. Attenzione a non confondere i fenomeni elettrici con quelli meccanici: l'ECG registra l'eccitazione, e la contrazione segue ciascuna onda con un breve ritardo; l'onda P precede la sistole atriale, il QRS precede la sistole ventricolare.

ESEMPIO SVOLTO

Calcolare la frequenza da un ECG

Problema. Su un tracciato registrato a 25 mm/s due onde R successive distano 20 quadretti piccoli. Qual è la frequenza cardiaca? Un altro tracciato mostra un intervallo PR di 4 quadretti piccoli: quanto dura?

Soluzione. A 25 mm/s un millimetro, cioè un quadretto piccolo, corrisponde a 1 s / 25 = 0,04 s. L'intervallo R–R vale 20 × 0,04 s = 0,80 s: è la durata di un ciclo. In un minuto i cicli sono

$$\text{FC} = \frac{60\ \text{s/min}}{0{,}80\ \text{s}} = 75\ \text{battiti/min}$$

L'intervallo PR vale 4 × 0,04 s = 0,16 s.

Risultato. La frequenza è 75 battiti/min e l'intervallo PR di 0,16 s rientra nei valori tipici. Nota la scorciatoia che usano i medici: la frequenza è 1500 diviso il numero di quadretti piccoli fra due R (1500 / 20 = 75), perché in un minuto la carta scorre di 1500 mm.

9.3.3 Il controllo della frequenza

Il nodo senoatriale, lasciato a sé, scaricherebbe circa cento volte al minuto. A riposo il cuore batte più lentamente perché il sistema nervoso lo frena di continuo. Il cuore riceve fibre di entrambe le divisioni del *sistema nervoso autonomo*, che studierai nel cap. 13: le fibre parasimpatiche del nervo vago liberano acetilcolina sul nodo senoatriale e su quello atrioventricolare e rallentano il ritmo; le fibre simpatiche liberano noradrenalina, che accelera il ritmo e aumenta la forza di contrazione. Lo stesso effetto ha l'*adrenalina*, l'ormone della midollare del surrene liberato nel sangue nelle situazioni di stress o di sforzo (cap. 12). I centri che coordinano questi segnali si trovano nel bulbo, accanto a quelli del respiro (cap. 8), e ricevono informazioni da re-

cettori di pressione nelle pareti dell'aorta e delle carotidi: se la pressione sale, il cuore rallenta; se scende, accelera. È un esempio di *feedback negativo*.

ESPERIENZA DI LABORATORIO

Frequenza cardiaca e pressione prima e dopo l'esercizio

Obiettivo. Misurare come cambiano frequenza cardiaca e pressione arteriosa durante uno sforzo moderato e quanto tempo servono per tornare ai valori di riposo; raccogliere e confrontare i dati della classe.

Materiali. Uno sfigmomanometro elettronico da braccio, a bracciale, con misura della frequenza; un gradino stabile alto circa 20–30 cm o lo spazio della palestra; un cronometro; una tabella per i dati.

Procedimento. 1) Lavorate a coppie. Il soggetto resta seduto e tranquillo per cinque minuti; il compagno misura pressione e frequenza a riposo, con il bracciale all'altezza del cuore e il braccio appoggiato, e annota i valori. 2) Il soggetto sale e scende dal gradino a ritmo regolare per due minuti, o corre sul posto. 3) Subito dopo si siede e si ripete la misura; poi la si ripete ogni minuto per cinque minuti. 4) Si scambiano i ruoli. 5) Con i dati della classe si calcolano le medie e si costruisce il grafico della frequenza in funzione del tempo. In alternativa, la frequenza si può misurare anche contando le pulsazioni dell'arteria radiale al polso per 30 s e moltiplicando per due.

Sicurezza. Lo sforzo deve essere moderato. Chi ha un esonero dall'educazione fisica o un problema di salute partecipa solo raccogliendo ed elaborando i dati. Chi durante l'esercizio avverte capogiri, dolore al petto o affanno insolito si ferma subito e lo dice all'insegnante. I dati personali restano anonimi: ogni studente compare in tabella con un codice.

Risultato atteso. Durante lo sforzo la frequenza cardiaca e la pressione sistolica aumentano, mentre la diastolica cambia poco; dopo lo sforzo i valori scendono, prima rapidamente e poi più lentamente. Chi è più allenato ha in genere una frequenza di riposo più bassa e recupera più in fretta. Le misure di un esperimento scolastico non hanno alcun valore diagnostico.

Domande. Perché la pressione sistolica aumenta più della diastolica? Perché si chiede di misurare sempre nella stessa posizione? Quali variabili, oltre all'allenamento, possono far differire i risultati di due compagni?

9.4 I vasi sanguigni e la pressione

Arterie e vene hanno una parete a tre strati, o *tonache* (Figura 9.4): la *tonaca intima*, l'endotelio che riveste il lume; la *tonaca media*, di muscolo liscio e fibre elastiche; la *tonaca esterna*, di tessuto connettivo. Lo spessore relativo delle tonache cambia con la funzione del vaso.

9.4.1 Arterie, arteriole, capillari, venule, vene

Le **arterie** più vicine al cuore, come l'aorta, sono *arterie elastiche*: la loro tonaca media è ricca di fibre elastiche. A ogni sistole si dilatano e immagazzinano parte dell'energia del sangue; in diastole ritornano al diametro di prima e continuano a spingerlo. Così il flusso, intermittente all'uscita del cuore, diventa sempre più continuo. Le arterie che portano il sangue ai singoli organi sono invece *arterie muscolari*, con molto muscolo liscio. L'onda di dilatazione che percorre le arterie a ogni battito è il *polso*, che senti al collo o al polso.

Le **arteriole** sono le arterie più piccole, con una parete fatta soprattutto di muscolo liscio. Contraendosi (vasocostrizione) o rilasciandosi (vasodilatazione) regolano quanta resistenza incontra il sangue e quanto ne arriva a ogni tessuto: quando corri, le arteriole dei muscoli si dilatano e quelle dell'intestino si restringono. Sono il rubinetto della circolazione.

I **capillari** hanno un diametro di circa 5–10 μm, appena sufficiente per il passaggio dei globuli rossi in fila indiana, e una parete fatta di un solo strato di cellule endoteliali. Quasi nessuna cellula del corpo dista da un capillare più di qualche centesimo di millimetro. Attraverso la loro parete sottilissima avvengono gli scambi: ossigeno, glucosio e altre piccole molecole passano per *diffusione* secondo il loro gradiente di concentrazione, e così, in senso inverso, CO_2 e scorie.

Oltre alla diffusione, attraverso le pareti dei capillari si muove anche il liquido. All'estremità arteriosa di un capillare la pressione del sangue è più alta della tendenza del plasma, ricco di proteine, a richiamare acqua per osmosi: il liquido esce verso gli spazi fra le cellule, è la *filtrazione*. All'estremità venosa la pressione è scesa, prevale il richiamo osmotico delle proteine plasmatiche e la maggior parte del liquido rientra. Ciò che non rientra, circa tre litri al giorno, viene raccolto dai capillari linfatici e torna al sangue con la linfa (cap. 10). Se l'equilibrio si altera, per esempio quando nel plasma ci sono poche proteine, il liquido si accumula nei tessuti: è l'*edema*.

Le **venule** raccolgono il sangue dai capillari e confluiscono nelle **vene**, che hanno le stesse tonache delle arterie ma una parete più sottile, con poco muscolo, e un lume più ampio. Le vene sono un serbatoio: a riposo contengono circa due terzi del sangue del corpo. Nelle vene la pressione è bassa, e per far risalire il sangue dalle gambe al cuore servono due aiuti. Il primo sono le *valvole venose*, pieghe dell'endotelio a forma di tasca che lasciano passare il sangue solo verso il cuore. Il secondo è la *pompa muscolare*: quando i muscoli delle gambe si contraggono, schiacciano le vene profonde e spingono il sangue verso l'alto, l'unico verso consentito dalle valvole. Anche i movimenti del respiro aiutano: in inspirazione la pressione nel torace diminuisce e richiama il sangue verso il cuore. Se le valvole cedono, le vene superficiali delle gambe si dilatano: sono le *vene varicose*.

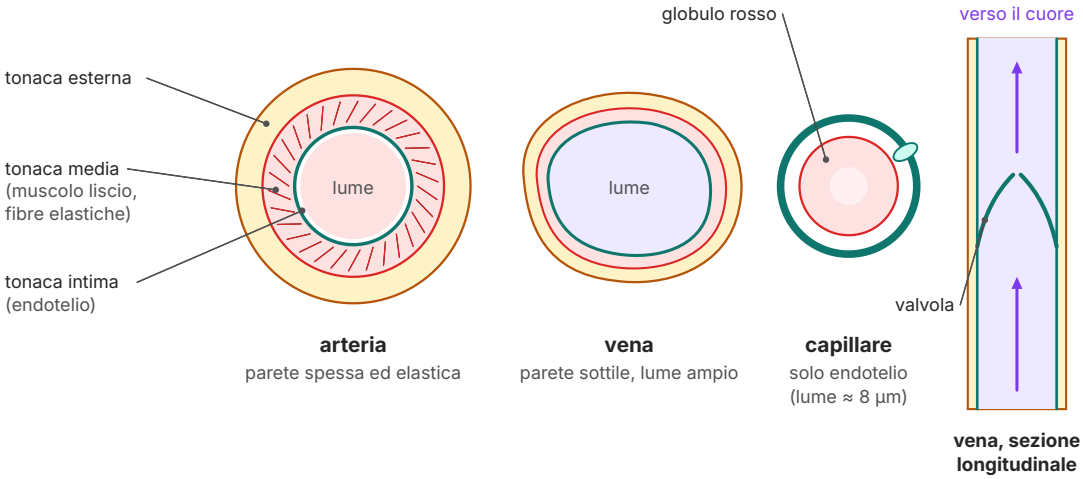


Figura 9.4 La parete dei vasi (schemi non in scala). L'arteria ha una tonaca media spessa, di muscolo liscio e fibre elastiche; la vena ha la stessa struttura ma una parete più sottile e un lume più ampio; il capillare, molto più ingrandito degli altri, è fatto di un solo strato di cellule endoteliali (il rigonfiamento è il nucleo di una di esse) e lascia passare un globulo rosso alla volta. A destra, una vena in sezione longitudinale: le tasche della valvola si riempiono e si chiudono se il sangue tenta di tornare indietro.

9.4.2 La pressione arteriosa

La **pressione arteriosa** è la pressione che il sangue esercita sulle pareti delle arterie. In fisiologia si misura in millimetri di mercurio (1 mmHg = 133,3 Pa) e si indica come pressione relativa, cioè in più rispetto a quella atmosferica. Varia a ogni battito: il valore massimo, durante la sistole, è la pressione *sistolica*; quello minimo, alla fine della diastole, è la pressione *diastolica*. In un giovane adulto a riposo un valore tipico è 120/80 mmHg. È un valore indicativo, non un obiettivo da raggiungere: la pressione cambia con l'età, con la posizione, con l'attività e perfino con l'emozione di farsela misurare.

Lo strumento per misurarla senza entrare nei vasi, lo *sfigmomanometro* a bracciale, fu messo a punto nel 1896 a Torino da Scipione Riva-Rocci. Un bracciale gonfiabile stringe il braccio finché schiaccia l'arteria e ferma il flusso; poi lo si sgonfia lentamente. Quando la pressione del bracciale scende sotto la sistolica, il sangue ricomincia a passare a fiotti, con un rumore che si ascolta con lo stetoscopio (Riva-Rocci rilevava invece con le dita il ritorno del battito nell'arteria del polso; il metodo dell'ascolto fu introdotto pochi anni dopo); quando scende sotto la diastolica, il flusso torna continuo e il rumore scompare. Gli apparecchi elettronici di oggi rilevano invece le piccole oscillazioni di pressione nel bracciale.

Lungo la grande circolazione la pressione scende di continuo (Figura 9.5): il sangue scorre sempre da dove la pressione è più alta a dove è più bassa, e la differenza è ciò che lo fa muove-

re. La caduta più grande avviene nelle arteriole, dove la resistenza è massima; nei capillari la pressione è di circa 35 mmHg all'inizio e di circa 15 mmHg alla fine, e nelle vene cave, vicino al cuore, è quasi zero. Anche le oscillazioni dovute ai battiti si smorzano: nei capillari il flusso è continuo.

9.4.3 Perché nei capillari il sangue rallenta

Un singolo capillare è molto più stretto dell'aorta, eppure il sangue vi scorre più lentamente. Sembra un paradosso, ma conta la *sezione totale*: i capillari sono miliardi, e la somma delle loro sezioni, circa 2500 cm^2, è circa mille volte quella dell'aorta. Poiché in ogni minuto attraverso tutti i capillari passa la stessa quantità di sangue che passa nell'aorta, la velocità media deve essere mille volte minore. È proprio quello che serve: il sangue resta in un capillare per circa un secondo, abbastanza perché gli scambi si completino.

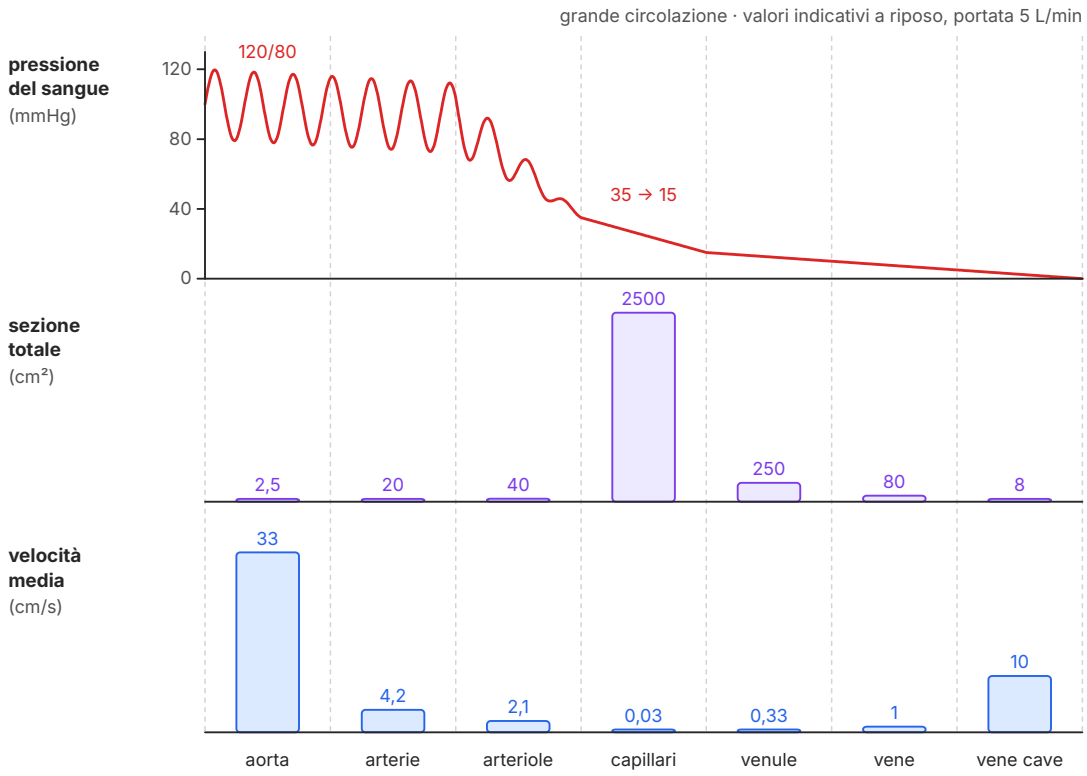


Figura 9.5 Pressione, sezione totale e velocità media del sangue nei tratti della grande circolazione, a riposo (valori indicativi). La pressione oscilla con i battiti nelle arterie e cala soprattutto nelle arteriole; la sezione totale è massima nei capillari; la velocità media è calcolata come $v = Q/A$ con una portata Q = 5 L/min ≈ 83 cm^3/s ed è minima proprio nei capillari.

COLLEGAMENTI

Fisica · Portata, sezione e velocità. La *portata* Q di un condotto è il volume di liquido che attraversa una sua sezione in un secondo: per un liquido che scorre con velocità media v in un condotto di sezione A, $Q = A \cdot v$. Se il liquido non si comprime e non ci sono perdite, la portata è la stessa in ogni tratto (*equazione di continuità*), quindi dove la sezione è grande la velocità è piccola. È per questo che un fiume rallenta dove si allarga, e che stringendo con il dito la bocca di un tubo da giardino l'acqua schizza più lontano. La pressione è invece una forza per unità di superficie: 120 mmHg equivalgono a 120 × 133,3 Pa ≈ 16 000 Pa, circa un sesto della pressione atmosferica, che si aggiunge a quella che l'aria esercita su tutto il corpo.

ESEMPIO SVOLTO

La velocità del sangue nell'aorta e nei capillari

Problema. La gittata cardiaca di una persona a riposo è 5,0 L/min. La sezione dell'aorta è 2,5 cm^2 e la sezione totale dei capillari della grande circolazione è circa 2500 cm^2. Calcola la velocità media del sangue nei due tratti.

Soluzione. Esprimi la portata in cm^3/s: Q = 5,0 L/min = 5000 cm^3 / 60 s ≈ 83 cm^3/s. Dall'equazione di continuità $v = Q/A$:

$$v_{\text{aorta}} = \frac{83\ \text{cm}^3/\text{s}}{2{,}5\ \text{cm}^2} \approx 33\ \text{cm/s}$$

$$v_{\text{capillari}} = \frac{83\ \text{cm}^3/\text{s}}{2500\ \text{cm}^2} \approx 0{,}033\ \text{cm/s}$$

Risultato. Nell'aorta il sangue scorre in media a circa 33 cm/s, nei capillari a circa 0,3 mm/s, mille volte più lentamente: lo stesso rapporto delle sezioni. Un capillare lungo mezzo millimetro viene percorso in circa un secondo e mezzo.

APPROFONDIMENTO

Approfondimento · Perché le arteriole sono il rubinetto della circolazione

Per un liquido che scorre in modo ordinato in un tubo rigido, il medico e fisico francese Jean-Léonard-Marie Poiseuille ricavò dagli esperimenti, nell'Ottocento, una legge che oggi porta il suo nome: a parità di differenza di pressione fra le estremità, la portata è proporzionale alla *quarta potenza* del raggio del tubo e inversamente proporzionale alla sua lunghezza e alla viscosità del liquido. In altre parole la resistenza al flusso è proporzionale a $1/r^4$.

Le conseguenze sono notevoli. Se un'arteriola dimezza il suo raggio, la sua resistenza diventa $2^4 = 16$ volte più grande e, a parità di pressione, vi passa un sedicesimo del sangue. Bastano dunque piccole contrazioni del muscolo liscio delle arteriole per dirottare grandi quantità di sangue da un organo all'altro, ed è soprattutto lì che si genera la resistenza contro cui il cuore lavora. Il sangue non è un liquido semplice e i vasi non sono tubi rigidi, quindi la legge vale solo in modo approssimato, ma spiega bene perché il diametro dei vasi conta tanto.

9.5 Il sangue

Il sangue è un tessuto connettivo con una matrice extracellulare liquida (vedi *Scienze naturali 3*, cap. 16). Un adulto ne ha circa 5 litri, circa il 7–8 % della massa corporea. Se un campione di sangue reso incoagulabile viene centrifugato, si separa in due parti: in basso le cellule, più dense, in alto un liquido giallo paglierino, il **plasma**. La frazione del volume occupata dalle cellule si chiama **ematocrito**: è di circa il 45 % e corrisponde quasi tutta ai globuli rossi; il plasma è il restante 55 % circa. Fra i due strati c'è un velo sottile e biancastro di globuli bianchi e piastrine.

9.5.1 Il plasma

Il plasma è acqua per circa il 91 %. Contiene in soluzione ioni (Na^+, Cl^-, K^+, Ca^{2+}, HCO_3^-, che è anche il principale tampone del sangue, cap. 4), nutrienti come glucosio, amminoacidi e lipidi, gas disciolti, scorie come l'urea, ormoni e soprattutto proteine, circa il 7 %. Le principali proteine plasmatiche, prodotte per lo più dal fegato (cap. 7), sono tre:

- le **albumine**, le più abbondanti, che richiamano acqua nel sangue per osmosi e trasportano molte sostanze poco solubili, come gli acidi grassi e alcuni farmaci;
- le **globuline**, fra cui gli anticorpi, che studierai nel cap. 10, e varie proteine di trasporto;
- il **fibrinogeno**, una delle proteine della coagulazione.

Il liquido che resta dopo che il sangue si è coagulato, privo di fibrinogeno e degli altri fattori della coagulazione, si chiama *siero*: è quello che si usa per molte analisi di laboratorio.

9.5.2 Gli elementi figurati

Le cellule del sangue e i frammenti di cellule che vi circolano si chiamano, nel loro insieme, *elementi figurati* (Figura 9.6 e Tabella 9.1).

I **globuli rossi**, o *eritrociti*, sono di gran lunga i più numerosi: circa 5 milioni per microlitro di sangue. Sono dischi biconcavi del diametro di circa 7,5 µm, una forma che offre molta superficie per gli scambi gassosi e permette loro di piegarsi per passare nei capillari più stretti. Nei mammiferi, durante la maturazione, perdono il nucleo e gli organuli, mitocondri compresi: sono sacchetti di emoglobina che producono energia solo con la glicolisi e non consumano l'ossigeno che trasportano. Vivono circa 120 giorni; i globuli rossi invecchiati, meno flessibili, vengono demoliti soprattutto nella milza e nel fegato, che recuperano il ferro e trasformano il gruppo eme in bilirubina, eliminata con la bile.

I *globuli bianchi*, o *leucociti*, sono cellule complete, con il nucleo, e sono molto meno numerosi: 5000–10 000 per microlitro. Si distinguono i *granulociti*, con granuli nel citoplasma e nucleo diviso in lobi (neutrofili, eosinofili, basofili), e gli *agranulociti* (linfociti e monociti). Sono le cellule della difesa dell'organismo: il sangue li trasporta, ma molti lavorano fuori dai vasi, nei tessuti, dove escono passando fra le cellule endoteliali. I loro ruoli sono l'argomento del cap. 10.

Le *piastrine*, o *trombociti*, non sono cellule ma frammenti di citoplasma di 2–4 µm, staccati da cellule giganti del midollo osseo, i *megacariociti*. Sono 150 000–400 000 per microlitro, vivono una settimana circa e servono a fermare le emorragie.

Tabella 9.1 Gli elementi figurati del sangue di un adulto: valori indicativi [TOR].

Elemento	Numero per µL	Diametro	Vita media	Funzione principale
globuli rossi	4,5–5,5 milioni	≈ 7,5 µm	≈ 120 giorni	trasporto di O_2 e in parte di CO_2
neutrofili	60–70 % dei leucociti	10–12 µm	ore o pochi giorni	fagocitosi dei batteri
eosinofili	2–4 % dei leucociti	10–12 µm	giorni	difesa dai parassiti, allergie
basofili	< 1 % dei leucociti	8–10 µm	giorni	liberano istamina nell'infiammazione
linfociti	20–25 % dei leucociti	7–10 µm	da giorni ad anni	immunità specifica
monociti	3–8 % dei leucociti	15–20 µm	giorni nel sangue	diventano macrofagi nei tessuti
piastrine	150 000–400 000	2–4 µm	5–9 giorni	emostasi

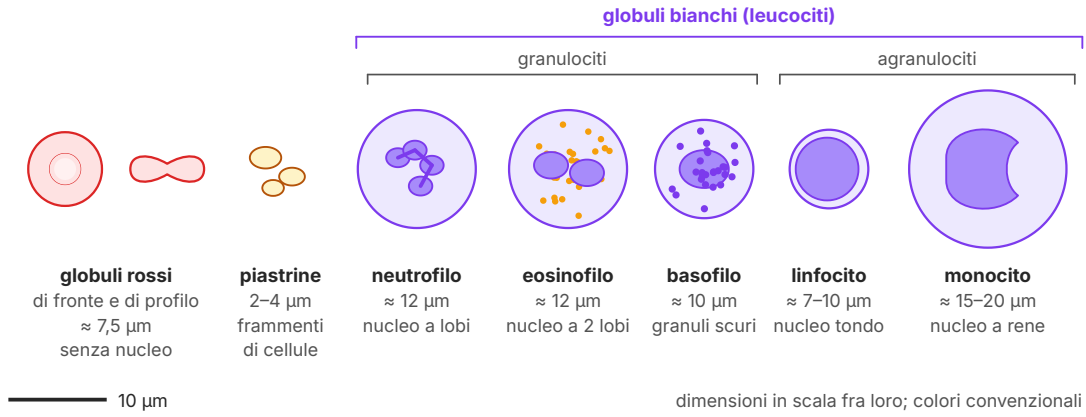


Figura 9.6 Gli elementi figurati del sangue disegnati in scala fra loro, con i colori convenzionali delle colorazioni di laboratorio. Il globulo rosso è mostrato di fronte e di profilo, per far vedere la forma biconcava; i globuli bianchi si riconoscono dalla forma del nucleo e dai granuli.

Tutti gli elementi figurati nascono nel *midollo osseo rosso*, che nell'adulto si trova soprattutto nelle ossa piatte e nelle vertebre, da un'unica popolazione di *cellule staminali emopoietiche*; il processo si chiama *emopoiesi*. Ogni secondo il midollo produce milioni di globuli rossi. Il ritmo è regolato da un ormone, l'**eritropoietina** (EPO), che il rene libera quando il sangue che lo attraversa porta poco ossigeno: dopo un'emorragia o in alta quota (cap. 8) l'EPO aumenta, il midollo accelera e l'ematocrito cresce. È un altro feedback negativo, e mostra quanto gli apparati siano collegati: il rene sorveglia il sangue per conto del midollo, e il midollo lavora per i polmoni e per i tessuti.

9.5.3 L'emostasi: come si ferma un'emorragia

Quando un vaso si rompe, l'organismo risponde con l'**emostasi**, una sequenza di tre fasi che si sovrappongono (Figura 9.7).

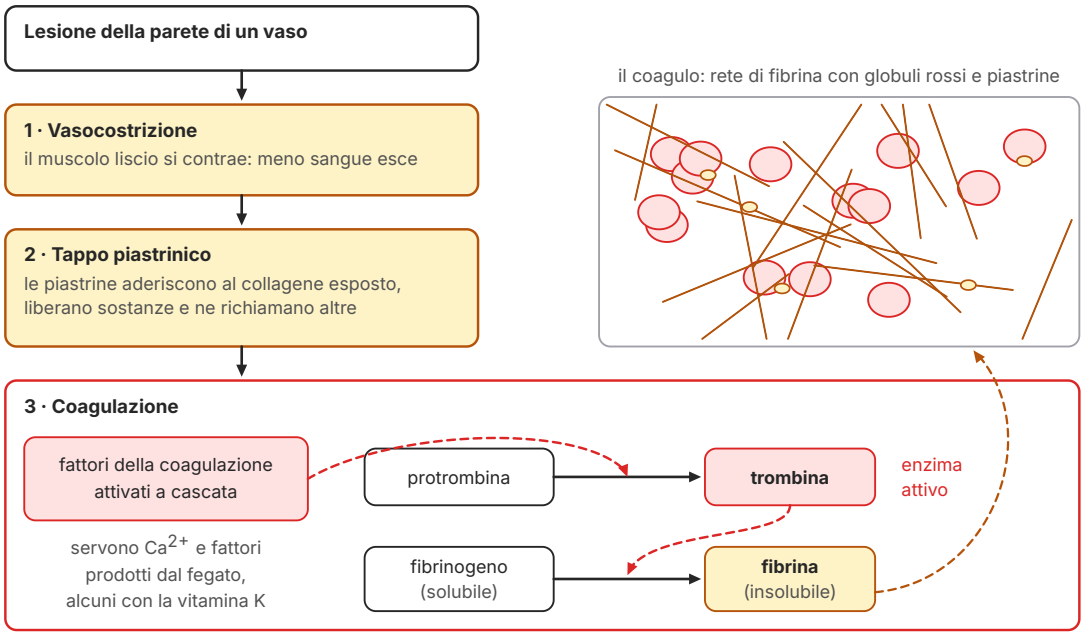


Figura 9.7 Le tre fasi dell'emostasi (schema). Nella coagulazione le frecce tratteggiate rosse indicano un enzima che catalizza una trasformazione: i fattori attivati convertono la protrombina in trombina, e la trombina converte il fibrinogeno in fibrina. Il riquadro mostra il risultato: una rete di filamenti di fibrina che trattiene globuli rossi e piastrine.

- **Vasocostrizione.** Il muscolo liscio della parete lesa si contrae e riduce subito il flusso.
- **Tappo piastrinico.** Le piastrine aderiscono alle fibre di collagene del connettivo esposto dalla lesione, cambiano forma e liberano sostanze che ne richiamano e attivano altre: in pochi minuti si forma un tappo che chiude le piccole lesioni.
- **Coagulazione.** Una serie di proteine del plasma, i *fattori della coagulazione*, si attivano a cascata: ogni fattore attivato è un enzima che attiva il successivo, e a ogni passaggio il segnale si amplifica. Il risultato è la conversione della *protrombina* in *trombina*, un enzima che trasforma il fibrinogeno solubile in filamenti insolubili di **fibrina**. La rete di fibrina imprigiona globuli rossi e piastrine e forma il coagulo, che poi si contrae e si consolida.

La coagulazione richiede ioni calcio, ed è per questo che le provette per gli esami del sangue contengono sostanze che legano il Ca^{2+}. Il fegato produce molti dei fattori della coagulazione, e per sintetizzarne alcuni ha bisogno della *vitamina K*, che assumiamo con le verdure a foglia verde ed è prodotta in parte dai batteri dell'intestino (cap. 7). Il coagulo deve restare dove serve: l'endotelio sano libera sostanze che impediscono l'adesione delle piastrine, e quando la lesione è riparata un altro enzima, la *plasmina*, scioglie la fibrina. Un coagulo che si forma dentro un vaso intatto si chiama *trombo*: se blocca un vaso importante, può essere pericoloso.

Nell'*emofilia* manca un fattore della coagulazione, di solito il fattore VIII; le persone con emofilia hanno emorragie prolungate anche per piccoli traumi. Come hai visto in *Scienze naturali 2*, il gene responsabile si trova sul cromosoma X e l'allele è recessivo: per questo la malattia colpisce quasi solo i maschi, che hanno un solo cromosoma X. Oggi si cura somministrando il fattore mancante.

9.5.4 I gruppi sanguigni

Fino all'inizio del Novecento le trasfusioni erano una scommessa: a volte salvavano il paziente, a volte lo uccidevano. Il medico austriaco Karl Landsteiner capì il perché mescolando i globuli rossi di una persona con il siero di un'altra: in alcune combinazioni i globuli rossi si ammassavano, si *agglutinavano*. Per la scoperta dei gruppi sanguigni ricevette il premio Nobel per la medicina nel 1930.

Sulla membrana dei globuli rossi ci sono molecole di riconoscimento, gli *antigeni* (cap. 10), diversi da una persona all'altra. Nel sistema **AB0** gli antigeni sono due, A e B. Chi ha l'antigene A è di gruppo A, chi ha il B di gruppo B, chi li ha entrambi di gruppo AB, chi non ne ha nessuno di gruppo 0. Fin dai primi mesi di vita, nel plasma di ciascuno compaiono anticorpi contro l'antigene A o B che *non* possiede: chi è di gruppo A ha anticorpi anti-B, chi è di gruppo B ha anti-A, chi è di gruppo 0 li ha entrambi, chi è di gruppo AB nessuno. Se i globuli rossi di un donatore portano un antigene contro cui il ricevente ha gli anticorpi, vengono agglutinati e distrutti nei vasi del ricevente: è una reazione grave, che può essere mortale.

Come hai visto in *Scienze naturali 2*, il gruppo AB0 è determinato da un gene con tre alleli: I^A e I^B, codominanti, e i, recessivo. Un genitore di gruppo A può dunque essere I^AI^A o I^Ai, e due genitori di gruppo A e B possono avere figli di tutti e quattro i gruppi.

Il secondo sistema importante è il **fattore Rh**, che prende il nome dalle scimmie *Rhesus* (macachi) i cui globuli rossi furono usati negli esperimenti che portarono a scoprirlo. Chi ha sui globuli rossi l'antigene D è Rh positivo (Rh^+), chi non lo ha è Rh negativo (Rh^-). A differenza del sistema AB0, una persona Rh^- non ha anticorpi anti-D finché non viene a contatto con globuli rossi Rh^+, per una trasfusione o in gravidanza. Le regole per una trasfusione di globuli rossi sono riassunte nella Tabella 9.2.

Tabella 9.2 Compatibilità per le trasfusioni di globuli rossi nei sistemi AB0 e Rh (✓ = compatibile). Nella pratica si trasfonde, quando possibile, sangue dello stesso gruppo, dopo una prova di compatibilità.

Ricevente	Antigeni sui globuli rossi	Anticorpi nel plasma	Gruppo del donatore			
			0	A	B	AB
0	nessuno	anti-A e anti-B	✓	—	—	—
A	A	anti-B	✓	✓	—	—
B	B	anti-A	✓	—	✓	—
AB	A e B	nessuno	✓	✓	✓	✓

Rh: un ricevente Rh^- deve ricevere globuli rossi Rh^-; un ricevente Rh^+ può ricevere Rh^+ o Rh^-.

Il gruppo 0 Rh^- si dice *donatore universale* di globuli rossi, perché essi non portano né A né B né D; il gruppo AB Rh^+ si dice *ricevente universale*. In un'emergenza, quando non c'è tempo di determinare il gruppo, si trasfondono globuli rossi 0 Rh^-.

L'Rh conta anche in gravidanza. Se una donna Rh^- aspetta un figlio Rh^+, durante il parto un po' di sangue del feto può entrare nella circolazione materna, e la madre produce anticorpi anti-D. Nella gravidanza successiva, se il feto è di nuovo Rh^+, questi anticorpi possono attraversare la placenta e distruggere i suoi globuli rossi: è la *malattia emolitica del neonato*. Oggi la si previene somministrando alla madre, in gravidanza e dopo il parto, anticorpi anti-D già pronti, che eliminano i globuli rossi fetali prima che il suo sistema immunitario impari a riconoscerli.

ERRORE FREQUENTE

«Chi è di gruppo 0 può dare il sangue a tutti, e chi è AB può riceverlo da tutti, senza condizioni». La regola vale per i *globuli rossi*, quelli che si trasfondono più spesso, e tenendo conto dell'Rh. Per il *plasma* vale il contrario: il plasma di gruppo 0 contiene anticorpi anti-A e anti-B, quindi è adatto solo a riceventi di gruppo 0, mentre il plasma di gruppo AB, privo di anticorpi, è quello che si può dare a tutti. Inoltre esistono molti altri sistemi di gruppi sanguigni: prima di ogni trasfusione si fa comunque una prova di compatibilità fra il sangue del donatore e quello del ricevente.

9.6 La salute del cuore e dei vasi

Secondo i dati dell'Istituto Superiore di Sanità e dell'ISTAT, nei primi anni Venti del Duemila le malattie cardiovascolari erano ancora la principale causa di morte in Italia. Molte di esse hanno un'origine comune, che comincia a formarsi presto, spesso già da giovani, e progredisce in silenzio per decenni.

9.6.1 Aterosclerosi, infarto e ictus

L'**aterosclerosi** è un processo in cui nella parete delle arterie si accumulano lipidi, soprattutto il colesterolo trasportato dalle lipoproteine LDL, insieme a cellule dell'infiammazione, a muscolo liscio e a tessuto fibroso. Si forma così una *placca* che sporge nel lume e lo restringe, mentre la parete diventa rigida. Il pericolo maggiore è che una placca si rompa: sulla sua superficie lesa le piastrine aderiscono come in una ferita, la coagulazione si attiva e si forma un trombo che può chiudere l'arteria.

Se l'arteria chiusa è una coronaria, una parte del miocardio resta senza ossigeno e, se il flusso non torna in poco tempo, muore: è l'**infarto del miocardio**. Il sintomo tipico è un dolore oppressivo al centro del petto, che può irradiarsi al braccio sinistro, al collo o alla mandibola, spesso con sudorazione e affanno; ma i sintomi possono essere diversi, soprattutto nelle donne e negli anziani. Il tessuto morto non si rigenera e viene sostituito da una cicatrice; ogni minuto conta, perché in ospedale si può riaprire l'arteria. Se l'arteria chiusa porta sangue al cervello, o se un vaso cerebrale si rompe, si ha l'*ictus*, di cui riparlerai nel cap. 13.

L'**ipertensione** è una condizione in cui la pressione arteriosa resta stabilmente alta; per le linee guida della Società europea di cardiologia (2024) la soglia è di 140/90 mmHg in misure ripetute. Di solito non dà sintomi, per questo va misurata; ma costringe il cuore a lavorare di più e danneggia nel tempo le arterie, il cuore, il cervello e i reni. I principali fattori di rischio cardiovascolare sono noti: fumo di tabacco, ipertensione, colesterolo LDL elevato, diabete, sedentarietà, obesità, consumo eccessivo di alcol; a questi si aggiungono fattori che non si possono modificare, come l'età, il sesso e la familiarità. Gran parte di quelli modificabili dipende dallo stile di vita.

COLLEGAMENTI

Educazione alla salute · Un cuore sano, e mani pronte. Un'alimentazione di tipo mediterraneo (cap. 7), l'attività fisica regolare e il non fumare sono le scelte più efficaci per proteggere il cuore e i vasi; il fumo, fra l'altro, danneggia l'endotelio e il suo monossido di carbonio sottrae ossigeno all'emoglobina (cap. 8). Se una persona crolla a terra, non risponde e non respira normalmente, può essere in *arresto cardiaco*: il cuore non pompa più, spesso perché il suo ritmo è degenerato in una contrazione caotica, la fibrillazione ventricolare. La prima cosa da fare è chiamare il **112**, il numero unico per le emergenze. Il massaggio cardiaco, che mantiene un minimo di circolazione al cervello, e l'uso del *defibrillatore automatico esterno* (DAE), che analizza il ritmo e, se serve, eroga una scarica che può farlo ripartire, si imparano nei corsi BLSD (supporto di base alle funzioni vitali e defibrillazione) per i cittadini. In Italia la legge n. 116 del 2021 promuove la diffusione dei DAE nei luoghi pubblici e nelle scuole e consente a chiunque di usarli in un'emergenza. Infine, un gesto che salva vite ogni giorno: donare il sangue. In Italia la donazione è volontaria e non retribuita; le associazioni di donatori, come AVIS e FIDAS, spiegano chi può donare e come.

SINTESI

- Le **arterie** portano il sangue dal cuore agli organi, le **vene** dagli organi al cuore; fra le due ci sono i **capillari**, dove avvengono gli scambi. La definizione dipende dal verso del flusso, non dal contenuto di ossigeno.
- La circolazione è **doppia e completa**: nella piccola circolazione il ventricolo destro manda il sangue ai polmoni, nella grande il ventricolo sinistro lo manda a tutti gli organi; i due tipi di sangue non si mescolano.
- Il cuore ha due atri e due ventricoli; le **valvole atrioventricolari** (tricuspide, mitrale), tenute dalle corde tendinee, e le **semilunari** (polmonare, aortica) garantiscono il flusso a senso unico. Il miocardio è nutrito dalle **coronarie**.
- Il **ciclo cardiaco** alterna sistole e diastole (circa 0,8 s a 75 battiti/min); i due toni cardiaci sono dovuti alla chiusura delle valvole atrioventricolari e poi delle semilunari.
- **GC = FC × GS**: a riposo circa 70 battiti/min × 70 mL ≈ 5 L/min; durante uno sforzo la gittata cardiaca può aumentare di più di tre volte.
- Il battito nasce nel **nodo senoatriale**; l'impulso attraversa gli atri, rallenta nel **nodo atrioventricolare** e scende con il fascio di His e le sue branche fino alle **fibre di Purkinje**, tutte dentro le pareti del cuore.
- Nell'**ECG** l'onda P corrisponde alla depolarizzazione degli atri, il complesso QRS a quella dei ventricoli, l'onda T alla ripolarizzazione dei ventricoli. Il sistema nervoso autonomo e l'adrenalina regolano frequenza e forza.
- Le arterie elastiche smorzano le pulsazioni, le **arteriole** regolano resistenza e distribuzione del sangue, i **capillari** (un solo strato di endotelio) scambiano per diffusione e filtrazione; le vene, con le loro **valvole** e la pompa muscolare, riportano il sangue al cuore.
- La **pressione arteriosa** tipica di un giovane adulto è 120/80 mmHg e si misura con lo sfigmomanometro di Riva-Rocci (1896); lungo il circolo la pressione cala, soprattutto nelle arteriole, e la velocità è minima nei capillari, dove la sezione totale è massima ($v = Q/A$).
- Il sangue è formato da **plasma** (circa 55 %: acqua, ioni, nutrienti, albumine, globuline, fibrinogeno) e da elementi figurati (**ematocrito** circa 45 %): globuli rossi senza nucleo che vivono circa 120 giorni, globuli bianchi e piastrine, tutti prodotti dal midollo rosso; l'EPO del rene regola la produzione di globuli rossi.
- L'**emostasi** comprende vasocostrizione, tappo piastrinico e coagulazione: una cascata di fattori, con Ca^{2+} e vitamina K, porta alla trombina, che trasforma il fibrinogeno in **fibrina**.
- Nel sistema **AB0** si hanno anticorpi contro gli antigeni che non si possiedono; il **fattore Rh** conta nelle trasfusioni e in gravidanza. Aterosclerosi, ipertensione, infarto e ictus si prevengono soprattutto con lo stile di vita; davanti a un arresto cardiaco si chiama il 112 e si usa il DAE.

ESERCIZI

Comprendere e ricordare

1. ● Quale vaso porta il sangue povero di ossigeno dal cuore ai polmoni?
   - **A.** l'aorta
   - **B.** le vene polmonari
   - **C.** il tronco polmonare
   - **D.** la vena cava superiore

2. ● La valvola fra l'atrio sinistro e il ventricolo sinistro è:
   - **A.** la mitrale
   - **B.** la tricuspide
   - **C.** la semilunare polmonare
   - **D.** la semilunare aortica

3. ● Il segnapassi naturale del cuore è:
   - **A.** il fascio di His
   - **B.** il nodo atrioventricolare
   - **C.** l'insieme delle fibre di Purkinje
   - **D.** il nodo senoatriale

4. ●● Nell'elettrocardiogramma il complesso QRS corrisponde:
   - **A.** alla depolarizzazione degli atri
   - **B.** alla depolarizzazione dei ventricoli
   - **C.** alla ripolarizzazione dei ventricoli
   - **D.** alla chiusura delle valvole semilunari

5. ●● Il primo tono cardiaco è prodotto:
   - **A.** dall'apertura delle valvole semilunari
   - **B.** dalla contrazione degli atri
   - **C.** dalla chiusura delle valvole atrioventricolari
   - **D.** dalla chiusura delle valvole semilunari

6. ●● Nei capillari il sangue scorre più lentamente che in ogni altro tratto perché:
   - **A.** la loro sezione totale è la più grande del circolo
   - **B.** la pressione è la più alta del circolo
   - **C.** ogni capillare ha un diametro maggiore di quello delle arteriole
   - **D.** le loro pareti sono ricche di fibre elastiche

7. ●● L'ematocrito è:
   A. la percentuale di proteine nel plasma
   B. il numero di globuli bianchi per microlitro
   C. la concentrazione di emoglobina nel sangue
   D. la frazione del volume del sangue occupata dagli elementi figurati

8. ●●● Un paziente di gruppo B Rh^- ha bisogno di una trasfusione di globuli rossi. Può riceverli da donatori:
   A. soltanto di gruppo B Rh^-
   B. di gruppo B Rh^- o 0 Rh^-
   C. di gruppo B o 0, sia Rh^+ sia Rh^-
   D. di gruppo AB Rh^- o B Rh^-

9. ●●● Quale sostanza trasforma direttamente il fibrinogeno in fibrina?
   A. la protrombina
   B. lo ione Ca^{2+}
   C. la trombina
   D. la vitamina K

Vero o falso

10. ● Tutte le arterie trasportano sangue ricco di ossigeno.

11. ● Nel cuore umano il sangue ricco di ossigeno e quello povero di ossigeno non si mescolano.

12. ●● Le fibre di Purkinje decorrono all'esterno del cuore, sulla superficie dei ventricoli.

13. ●● Il nodo atrioventricolare ritarda l'impulso di circa un decimo di secondo, così gli atri si svuotano prima che i ventricoli si contraggano.

14. ●● Nell'adulto i globuli rossi sono prodotti soprattutto nella milza.

15. ●●● Una persona di gruppo 0 ha nel plasma anticorpi anti-A e anti-B anche se non ha mai ricevuto una trasfusione.

Applicare

16. ● A riposo un ragazzo ha una frequenza cardiaca di 72 battiti/min e una gittata sistolica di 75 mL. Calcola la sua gittata cardiaca in L/min.

17. ●● Un ciclista allenato, a riposo, ha una gittata cardiaca di 5,0 L/min con una frequenza di 50 battiti/min. a) Qual è la sua gittata sistolica? b) Un compagno non allenato ha la stessa gittata cardiaca con 75 battiti/min: qual è la sua gittata sistolica?

18. ●● Alla fine della diastole il ventricolo sinistro di una persona contiene 130 mL di sangue e alla fine della sistole 55 mL. La frequenza cardiaca è 68 battiti/min. Calcola a) la gittata sistolica; b) la frazione di eiezione, in percentuale; c) la gittata cardiaca.

19. ●●● Rifai il ragionamento di Harvey con i numeri di oggi. Una persona di 60 kg ha una gittata sistolica di 65 mL e una frequenza di 72 battiti/min. a) Quanti litri di sangue pompa il ventricolo sinistro in un'ora? b) Che massa hanno, se la densità del sangue è 1,06 kg/L? c) Confronta il risultato con la massa della persona: perché questo calcolo dimostra che il sangue deve circolare?

20. ●● La pressione arteriosa di una persona è 130/85 mmHg. a) Esprimi i due valori in kilopascal (1 mmHg = 133,3 Pa). b) La pressione arteriosa media si stima spesso come diastolica + (sistolica − diastolica)/3: calcolala.

21. ●●● Un adulto ha 5,0 L di sangue, un ematocrito del 42 % e 4,8 milioni di globuli rossi per microlitro. a) Calcola il volume occupato dagli elementi figurati e quello del plasma. b) Quanti globuli rossi ci sono in tutto il sangue? (1 L = 10^6 µL) c) Se ogni globulo rosso vive 120 giorni e il numero resta costante, quanti globuli rossi produce il midollo ogni secondo?

22. ●●● La madre di Luca è di gruppo A e il padre di gruppo B; Luca è di gruppo 0. a) Quali sono i genotipi dei genitori? b) Con quale probabilità un altro figlio della coppia sarebbe di gruppo AB? c) Luca è Rh^-: in caso di trasfusione, da quali gruppi potrebbe ricevere globuli rossi?

Leggere dati e figure

23. ●● Osserva la Figura 9.3B. a) Quanto vale l'ampiezza dell'onda R in millivolt? b) Quanto durano l'intervallo PR e il complesso QRS, contando i quadretti? c) A quale evento elettrico corrisponde ciascuna onda, e perché nel tracciato non si vede la ripolarizzazione degli atri?

24. ●● Osserva la Figura 9.5. a) In quale tratto la pressione cala di più? b) Perché nelle vene la pressione oscilla appena? c) Verifica la velocità indicata per le vene cave calcolando $v = Q/A$ con i dati della figura.

25. ● Segui nella Figura 9.2 e nella Figura 9.1 il percorso di un globulo rosso che entra nel cuore dalla vena cava inferiore ed esce dall'aorta: elenca in ordine le cavità, le valvole e i vasi che attraversa e indica dove si arricchisce di ossigeno.

La tabella seguente riporta i dati (di esempio) di cinque studenti dell'esperienza di laboratorio: frequenza cardiaca a riposo, subito dopo due minuti di esercizio con il gradino e dopo tre minuti di recupero.

Studente	A riposo (battiti/min)	Dopo l'esercizio (battiti/min)	Dopo 3 min di recupero (battiti/min)
S1	68	112	80
S2	74	124	86
S3	80	130	95
S4	62	98	70
S5	71	118	82

26. ●●● Con i dati della tabella: a) calcola la frequenza media nelle tre condizioni e l'aumento percentuale medio dopo l'esercizio; b) quale studente ha la frequenza più vicina a quella di riposo dopo tre minuti? c) Lo studente S4 ha la frequenza di riposo più bassa: proponi una spiegazione e di' perché cinque dati non bastano per una conclusione generale.

Indagare e argomentare

27. ●● Progetta un esperimento per verificare se la frequenza cardiaca cambia passando dalla posizione sdraiata a quella in piedi. Indica la variabile indipendente, quella dipendente, quelle da tenere costanti, il numero di soggetti e di misure e le precauzioni di sicurezza.

28. ●● La parete del ventricolo sinistro è circa tre volte più spessa di quella del destro, anche se i due ventricoli pompano ogni minuto la stessa quantità di sangue. Spiega perché, collegando la struttura alla funzione.

29. ●●● Ricostruisci il ragionamento con cui Harvey dimostrò la circolazione del sangue e spiega perché la sua teoria rimase incompleta fino alle osservazioni di Malpighi. Che cosa insegna questa storia sul rapporto fra calcolo, esperimento e strumenti nella scienza?

30. ●●● Spiega come l'aterosclerosi di una coronaria può portare a un infarto, collegando la placca alla coagulazione. Elenca i fattori di rischio che dipendono dallo stile di vita e spiega perché, davanti a un arresto cardiaco, è decisivo che i presenti chiamino subito il 112 e usino un DAE.

Approfondimento

31. ●●● Secondo la legge di Poiseuille la resistenza di un vaso è proporzionale a $1/r^4$. a) Se un'arteriola riduce il suo raggio del 20 %, di quante volte aumenta la sua resistenza? b) A parità di differenza di pressione, quale percentuale del flusso iniziale vi passa ancora?

PER APPROFONDIRE

- [TOR] G. J. Tortora, B. Derrickson, *Principles of Anatomy and Physiology*: i capitoli sul sangue, sul cuore e sui vasi sanguigni, con l'anatomia dettagliata delle valvole e del tessuto di conduzione.
- [SIL] D. U. Silverthorn, *Human Physiology: An Integrated Approach*: i capitoli sulla fisiologia cardiovascolare e sul flusso del sangue, con la lettura dell'ECG e la regolazione della pressione.
- [CAM] L. A. Urry et al., *Campbell Biology*: il capitolo sulla circolazione negli animali, che confronta il cuore dei pesci, degli anfibi e dei mammiferi.

Glossario del capitolo

Arteria
Vaso che porta il sangue dal cuore agli organi, qualunque sia il suo contenuto di ossigeno.

Capillare
Vaso microscopico la cui parete è un solo strato di endotelio, sede degli scambi fra sangue e tessuti.

Ciclo cardiaco
Sequenza di sistole e diastole di atri e ventricoli che costituisce un battito.

Circolazione doppia e completa
Circolazione in cui il sangue passa due volte per il cuore in un giro e il sangue ossigenato non si mescola con quello povero di ossigeno.

Elettrocardiogramma
Registrazione dell'attività elettrica del cuore dalla superficie del corpo; onde P, complesso QRS, onda T.

Ematocrito
Frazione del volume del sangue occupata dagli elementi figurati, circa il 45 %.

Emostasi
Insieme dei processi che arrestano un'emorragia: vasocostrizione, tappo piastrinico, coagulazione.

Eritropoietina
Ormone prodotto dal rene quando l'ossigeno scarseggia; stimola la produzione di globuli rossi nel midollo.

Fattore Rh
Antigene D dei globuli rossi: chi lo possiede è Rh positivo, chi non lo possiede Rh negativo.

Gittata cardiaca
Volume di sangue pompato da un ventricolo in un minuto: GC = FC × GS, circa 5 L/min a riposo.

Gittata sistolica
Volume di sangue espulso da un ventricolo a ogni battito, circa 70 mL a riposo.

Grande circolazione
Circuito dal ventricolo sinistro a tutti gli organi e da qui all'atrio destro.

Nodo senoatriale
Gruppo di cellule del tessuto di conduzione nella parete dell'atrio destro che genera spontaneamente il battito.

Pericardio
Sacco a due strati, fibroso all'esterno e sieroso all'interno, che avvolge il cuore.

Piccola circolazione
Circuito dal ventricolo destro ai polmoni e da qui all'atrio sinistro.

Plasma
Parte liquida del sangue: acqua, ioni, nutrienti, proteine (albumine, globuline, fibrinogeno), ormoni e scorie.

Pressione arteriosa
Pressione del sangue sulle pareti delle arterie, espressa come sistolica/diastolica in mmHg.

Valvole atrioventricolari
Valvole fra atri e ventricoli: tricuspide a destra, mitrale (bicuspide) a sinistra.

Valvole semilunari
Valvole a tasche all'uscita dei ventricoli: polmonare e aortica.

Vena
Vaso che riporta il sangue dagli organi al cuore; ha parete sottile e, negli arti, valvole.

Soluzioni

1. C. Il tronco polmonare esce dal ventricolo destro e porta sangue povero di ossigeno ai polmoni; le vene polmonari portano sangue ossigenato all'atrio sinistro.

2. A. A sinistra c'è la bicuspide o mitrale; la tricuspide è a destra.

3. D. Il nodo senoatriale scarica spontaneamente con la frequenza più alta e impone il ritmo a tutto il cuore.

4. B. Il QRS è la depolarizzazione dei ventricoli; la ripolarizzazione dei ventricoli è l'onda T; le valvole non producono segnali elettrici.

5. C. Il primo tono è la chiusura della tricuspide e della mitrale all'inizio della sistole ventricolare; il secondo è la chiusura delle semilunari.

6. A. A parità di portata, $v = Q/A$: la sezione totale dei capillari è circa mille volte quella dell'aorta. La pressione nei capillari è bassa e le loro pareti sono di solo endotelio.

7. D. L'ematocrito è la frazione del volume del sangue occupata dagli elementi figurati, in pratica dai globuli rossi (circa 45 %).

8. B. I globuli rossi B o 0 non portano l'antigene A, contro cui il paziente ha anticorpi; essendo Rh^-, il paziente deve ricevere globuli rossi Rh^-. AB è escluso perché porta l'antigene A.

9. C. La trombina è l'enzima che converte il fibrinogeno in fibrina; la protrombina è il suo precursore inattivo, Ca^{2+} e vitamina K servono a passaggi precedenti.

10. F. L'arteria polmonare (e il tronco polmonare) porta sangue povero di ossigeno: un'arteria si definisce per il verso del flusso, dal cuore agli organi.

11. V. La circolazione è completa: il setto separa del tutto la metà destra dalla sinistra.

12. F. Le fibre di Purkinje si trovano dentro la parete dei ventricoli, sotto l'endocardio.

13. V. Il ritardo nel nodo atrioventricolare consente agli atri di completare il riempimento dei ventricoli.

14. F. Nell'adulto tutti gli elementi figurati sono prodotti dal midollo osseo rosso; la milza demolisce i globuli rossi invecchiati.

15. V. Gli anticorpi del sistema AB0 contro gli antigeni che non si possiedono compaiono spontaneamente nei primi mesi di vita, a differenza degli anticorpi anti-D del sistema Rh.

16. GC = 72 /min × 75 mL = 5400 mL/min = 5,4 L/min.

17. a) GS = GC / FC = 5000 mL/min / 50 /min = $1{,}0 \times 10^2$ mL. b) GS = 5000 mL/min / 75 /min ≈ 67 mL. Il cuore allenato ottiene la stessa gittata cardiaca con meno battiti, perché espelle più sangue a ogni battito.

18. a) GS = 130 mL − 55 mL = 75 mL. b) Frazione di eiezione = 75 / 130 ≈ 0,58, cioè circa il 58 %. c) GC = 68 /min × 75 mL = 5100 mL/min ≈ 5,1 L/min.

19. a) 65 mL × 72 /min × 60 min = 280 800 mL ≈ $2{,}8 \times 10^2$ L. b) 281 L × 1,06 kg/L ≈ $3{,}0 \times 10^2$ kg. c) In un'ora il cuore pompa una massa di sangue circa cinque volte maggiore di quella dell'intero corpo: nessun organo potrebbe produrre e nessun tessuto consumare tanto sangue, quindi deve essere sempre lo stesso sangue che torna al cuore.

20. a) 130 × 133,3 Pa ≈ 17 300 Pa = 17,3 kPa; 85 × 133,3 Pa ≈ 11 300 Pa = 11,3 kPa. b) PAM ≈ 85 + (130 − 85)/3 = 85 + 15 = 100 mmHg.

21. a) Elementi figurati: 0,42 × 5,0 L = 2,1 L; plasma: 5,0 L − 2,1 L = 2,9 L. b) $4{,}8 \times 10^6$ /µL × $5{,}0 \times 10^6$ µL = $2{,}4 \times 10^{13}$ globuli rossi. c) Ogni giorno se ne rinnova 1/120: $2{,}4 \times 10^{13}$ / 120 = $2{,}0 \times 10^{11}$ al giorno; diviso per 86 400 s/giorno ≈ $2{,}3 \times 10^6$ globuli rossi al secondo.

22. a) Luca, di gruppo 0, è *ii* e ha ricevuto un allele *i* da ciascun genitore: la madre è I^Ai, il padre I^Bi. b) Il figlio è AB se riceve I^A dalla madre (1/2) e I^B dal padre (1/2): probabilità 1/4, cioè 25 %. c) Essendo 0, ha anticorpi anti-A e anti-B; essendo Rh^-, deve ricevere globuli rossi Rh^-: solo dal gruppo 0 Rh^-.

23. a) L'onda R arriva a circa 11 quadretti piccoli sopra la linea di base: circa 1,1 mV. b) PR: poco meno di 4 quadretti, circa 0,15 s; QRS: 2 quadretti, 0,08 s. c) P: depolarizzazione degli atri; QRS: depolarizzazione dei ventricoli; T: ripolarizzazione dei ventricoli. La ripolarizzazione degli atri avviene durante il QRS ed è coperta dal segnale molto più grande dei ventricoli.

24. a) Nelle arteriole, dove la pressione media scende da circa 90 a circa 35 mmHg, perché lì la resistenza è massima. b) Le oscillazioni prodotte dai battiti sono smorzate dalle arterie elastiche e soprattutto dalle arteriole: nei capillari e nelle vene il flusso è continuo. c) $Q = 5000\ cm^3/60\ s \approx 83\ cm^3/s$; $v = 83\ cm^3/s\ /\ 8\ cm^2 \approx 10\ cm/s$, il valore della figura.

25. Vena cava inferiore → atrio destro → valvola tricuspide → ventricolo destro → valvola polmonare → tronco polmonare → arterie polmonari → capillari degli alveoli, dove si arricchisce di ossigeno → vene polmonari → atrio sinistro → valvola mitrale → ventricolo sinistro → valvola aortica → aorta.

26. a) Medie: a riposo (68 + 74 + 80 + 62 + 71)/5 = 71,0 battiti/min; dopo l'esercizio 582/5 = 116,4 battiti/min; dopo il recupero 413/5 = 82,6 battiti/min. Aumento medio: (116,4 − 71,0)/71,0 ≈ 0,64, circa il 64 %. b) Le differenze dal riposo dopo tre minuti sono 12, 12, 15, 8 e 11 battiti/min: S4 è il più vicino al riposo (8). c) Traccia: una frequenza di riposo bassa e un recupero rapido sono tipici di chi è allenato, perché il suo cuore ha una gittata sistolica maggiore; ma conta anche la genetica, l'età, lo stato emotivo, la precisione della misura. Con cinque soggetti e una sola misura ciascuno il campione è troppo piccolo e non è casuale: servirebbero più soggetti e misure ripetute.

27. Traccia: variabile indipendente la posizione (sdraiato/in piedi); dipendente la frequenza cardiaca; costanti l'ora, il riposo prima della misura, il tempo trascorso dal cambio di posizione (per esempio un minuto), lo strumento, l'assenza di caffeina e di sforzo. Almeno una decina di soggetti, tre misure per condizione, ordine delle posizioni alternato. Sicurezza: alzarsi lentamente, un compagno accanto, sospendere se compaiono capogiri. Risultato atteso: in piedi la frequenza aumenta di qualche battito, perché il sangue tende a ristagnare nelle gambe, la pressione cala per un momento e i recettori di pressione fanno accelerare il cuore.

28. Traccia: la quantità di sangue è la stessa perché i circuiti sono in serie, ma il ventricolo sinistro deve spingerlo nella grande circolazione, lunga e con molta resistenza (le arteriole di tutto il corpo), e sviluppa circa 120 mmHg; il destro lo spinge nel vicino circuito polmonare, a bassa resistenza, con circa 25 mmHg. Una pressione maggiore richiede una forza e quindi una massa muscolare maggiori.

29. Traccia: Harvey calcolò che il sangue pompato in poco tempo supera di molto la massa del corpo, quindi non può essere prodotto e consumato di continuo ma deve tornare al cuore; con la legatura del braccio mostrò il ruolo delle valvole venose. Non poteva però vedere il collegamento fra arterie e vene, che Malpighi osservò nel 1661 con il microscopio. La storia mostra che un ragionamento quantitativo può imporre una conclusione, ma che la conferma completa può richiedere nuovi strumenti di osservazione.

30. Traccia: la placca restringe la coronaria; se si rompe, piastrine e coagulazione formano un trombo che chiude l'arteria; il miocardio a valle resta senza ossigeno e muore se il flusso non torna presto. Fattori modificabili: fumo, sedentarietà, alimentazione ricca di grassi saturi e sale, eccesso di peso, alcol, ipertensione e colesterolo non controllati. Nell'arresto cardiaco il cervello sopravvive solo pochi minuti senza circolazione: la chiamata al 112 attiva i soccorsi, il massaggio mantiene un minimo di flusso e il DAE può interrompere la fibrillazione ventricolare prima che arrivi l'ambulanza.

31. a) Il raggio diventa 0,8 *r*: la resistenza diventa $1/0{,}8^4 = 1/0{,}41 \approx 2{,}4$ volte quella iniziale. b) Il flusso

diventa $0{,}8^4 \approx 0{,}41$, cioè circa il 41 % di quello iniziale.