

### 3 - IL FLUIDO ACQUA

L'acqua è un liquido e, come tale, con alcune distinzioni, assoggettabile alle leggi naturali della meccanica idraulica. La conoscenza di tali leggi, anche se approssimativa, permette una migliore interpretazione di alcuni fenomeni naturali negli ambienti acquatici. Un litro d'acqua contenuto in una bottiglia occupa esattamente un contenitore di forma cubica di lato pari a un decimetro, ma può cambiare di forma. Lo stesso volume, all'interno di una borsa di plastica, può essere deformato a piacere. Un litro d'acqua, una tanica di benzina o una goccia di mercurio possiedono un volume ben definito assumendo una forma qualunque: quella del recipiente che li contiene. Le frasi "tagliare l'acqua con il coltello" o "fare un buco nell'acqua" significano imprese impossibili. I liquidi, non possedendo forma propria, non oppongono resistenza a forze di taglio o di torsione, che tendono ad alterare la forma senza modificare il volume. L'esperienza inoltre dimostra che i liquidi non sono ugualmente.... liquidi: l'acqua è meno liquida, cioè più vischiosa dell'alcool, ma più fluida del latte, del miele, della cera e del bitume, quest'ultimo tanto vischioso da sembrare solido.

#### 3.1 - La pressione dell'acqua

L'acqua ed un solido tra loro in contatto esercitano l'una sull'altro, su tutta la superficie di contatto, forze sottoposte al principio di azione e reazione. Se il solido e l'acqua sono fermi l'uno rispetto all'altra, le **forze di contatto** sono dirette perpendicolarmente agli elementi di superficie (S) di contatto (fig. 3.1). Un corpo fermo in acqua calma è soggetto, su ogni elemento piano S della sua superficie, ad una forza **F** perpendicolare all'elemento stesso e volta verso l'interno del corpo. Il rapporto fra le due grandezze definisce la **pressione (P)**:

$$P = \frac{F}{S}$$

Se consideriamo una superficie pari alla metà di S, la forza F che agisce su di essa si riduce pure della metà; riducendo ulteriormente l'elemento di superficie, si riduce proporzionalmente anche la forza (fig. 3.2). Di conseguenza il valore della pressione rimane costante anche per porzioni infinitesimali della superficie.

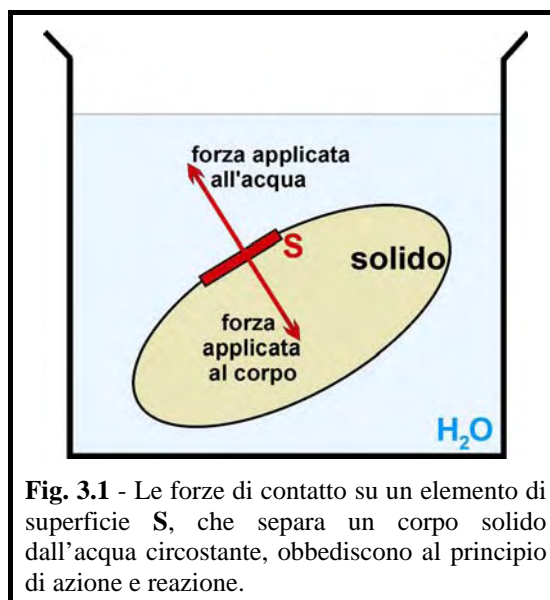


Fig. 3.1 - Le forze di contatto su un elemento di superficie S, che separa un corpo solido dall'acqua circostante, obbediscono al principio di azione e reazione.

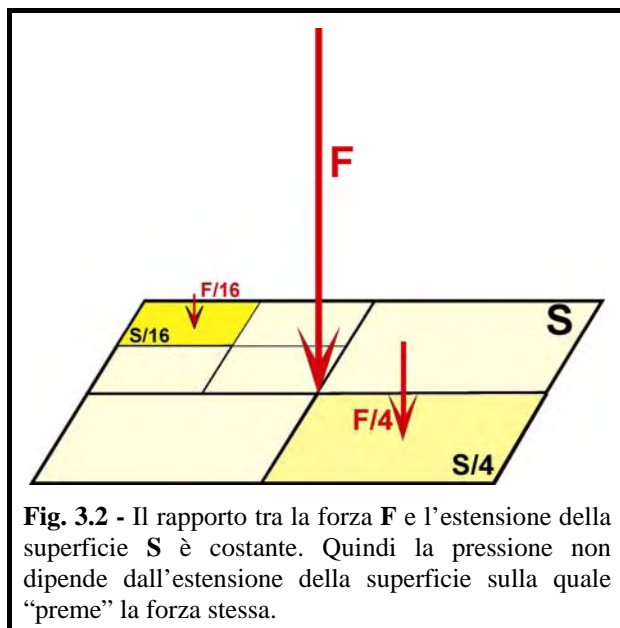


Fig. 3.2 - Il rapporto tra la forza F e l'estensione della superficie S è costante. Quindi la pressione non dipende dall'estensione della superficie sulla quale "preme" la forza stessa.

Dal punto di vista dimensionale, la pressione è definita come **forza per unità di superficie [N/m<sup>2</sup>]**. Il Newton [N] è l'unità di misura fondamentale della forza; essa è quella che, applicata ad un corpo di massa m = 1 kg, ottiene una accelerazione a = 1 m/s<sup>2</sup>. Un corpo di massa pari ad 1 kg precipita, sulla superficie della Terra, con una accelerazione g = 9,81 m/s<sup>2</sup>; quindi il suo peso è P = 9,81 N (quello di un litro d'acqua, cioè di un decimetro cubo). L'azione di una forza (F) pari ad un Newton su una superficie (S) di un metro quadrato è l'unità di misura fondamentale della pressione, detta **Pascal [Pa]**. È una unità di pressione piuttosto piccola; per tale ragione si utilizza frequentemente un suo multiplo e precisamente cento volte più grande [hPa].

La pressione atmosferica varia a seconda del tempo meteorologico (diminuisce con il brutto tempo e viceversa) e con l'altitudine (salendo di quota diminuisce il peso dell'aria sovrastante e quindi la

pressione). Si definisce **atmosfera standard (atm)** la pressione pari a **10,13 N/cm<sup>2</sup>** alla temperatura di 0° e al livello del mare, pari a poco più del peso di un decimetro cubo (litro) di acqua sulla superficie di un centimetro quadrato. Un'altra unità di misura è il **bar**. Senza entrare in maggiore dettaglio, una atmosfera standard corrisponde a circa 1,013 bar o più comunemente 1.013 mbar. Merita ricordare che 1 mbar = 1 Pa. Infine la pressione di una atmosfera corrisponde all'altezza di una colonna di mercurio pari 760 mm secondo l'esperienza di TORRICELLI. Vi sono dunque diverse misure per la pressione "P"; esse vengono usate indifferentemente in diversi campi di applicazione (per esempio in meteorologia ed in subacquea). Lo schema di equivalenze sotto riportato le riassume tutte:

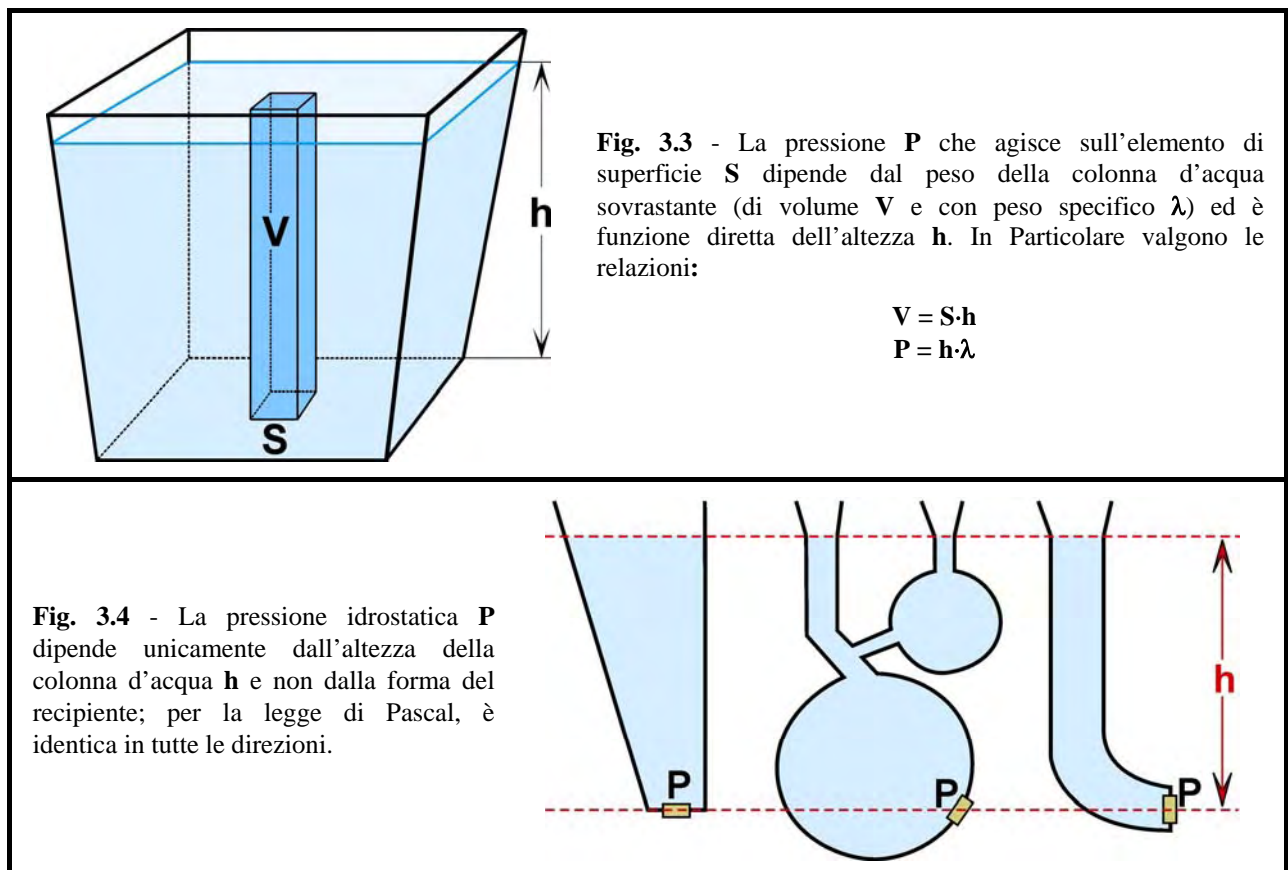
$$P_{\text{standard}} = 10,13 \text{ N/cm}^2 = 1 \text{ atm} = 1,013 \text{ bar} (1.013 \text{ mbar}) = 1.013 \text{ Pa} (1.013 \text{ hPa}) = 760 \text{ mm (Hg)}$$

La pressione in un dato punto è la stessa in tutte le direzioni. Ad una certa profondità la pressione esercitata su un sommozzatore, indipendentemente dalla direzione (verso il basso o l'alto, lateralmente), è sempre la stessa (legge di PASCAL, 1650). Essa aumenta con la profondità in conseguenza dell'incremento di peso dell'acqua. Il sommozzatore "sopporta" il peso della colonna d'acqua che lo sovrasta.

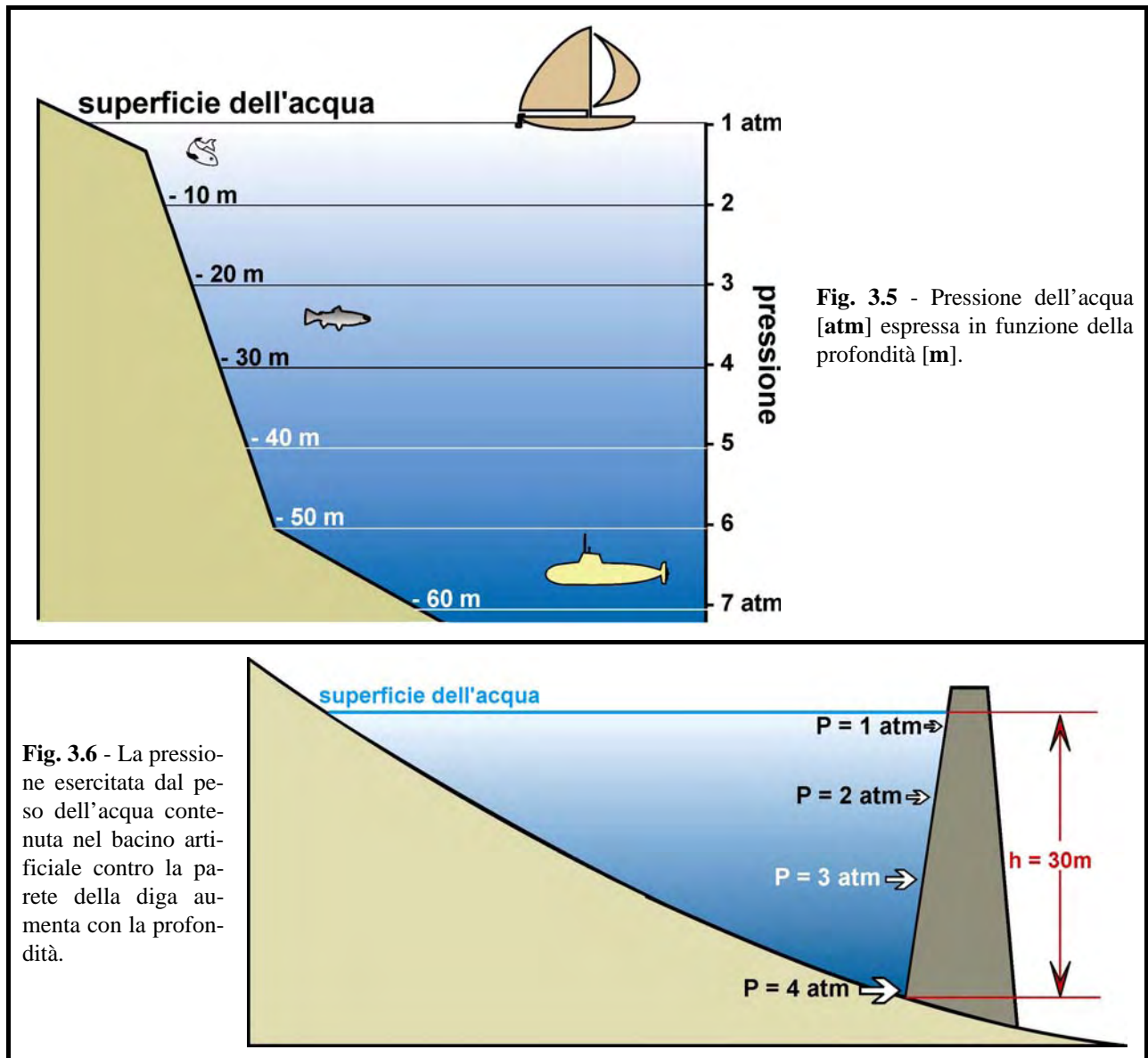
Il fondo e le pareti di un recipiente contenente acqua sopportano una forza premente dovuta al peso del liquido, cioè alla forza di gravità sulla massa del liquido stesso. Sull'unità di superficie si esercita una **pressione idrostatica**, diretta dall'alto verso il basso e trasmessa, per il principio di Pascal, in tutte le direzioni e quindi anche perpendicolarmente alla superficie premea dal liquido, sia sul fondo, sia sulle pareti verticali. Consideriamo un elemento di superficie **S** del fondo di un contenitore contenente acqua per una altezza pari ad **h** (**fig. 3.3**). Sull'elemento di superficie agisce una forza dovuta al peso **P** della colonna d'acqua sovrastante con volume **V = S·h**. Il peso è il prodotto del volume **V** per il peso specifico (**λ**). Pertanto la pressione **P** sul fondo del contenitore è la seguente:

$$P = \frac{P}{S} = \frac{V \cdot \lambda}{S} = \frac{S \cdot h \cdot \lambda}{S} = h \cdot \lambda$$

La pressione dipende dall'altezza della colonna sovrastante e dal peso specifico del liquido e non dalla superficie dell'elemento. Inoltre se il liquido è acqua, vale  $\lambda = 1 \text{ g/cm}^3$  (**par. 2.2**). Quindi risulta semplicemente  $P = h$ , cioè la pressione idrostatica è pari al valore numerico che esprime l'altezza della colonna d'acqua sovrastante e ciò indipendentemente dalla forma e dimensioni del recipiente (**fig. 3.4**).



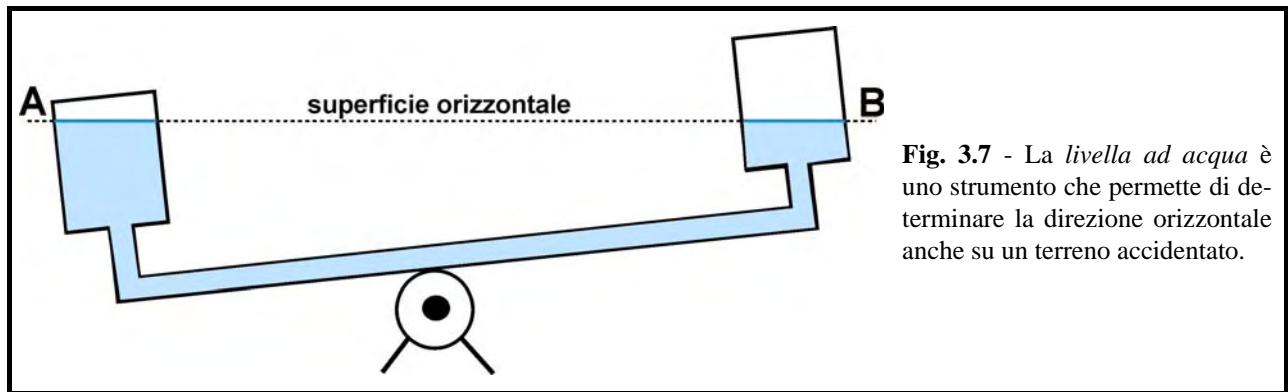
Una colonna d'acqua alta 1 metro (100 cm) che sovrasta un elemento di superficie pari a  $1 \text{ cm}^2$ , ha un volume pari a  $100 \text{ cm}^3$ , con massa di 100 g e con peso 0,981 N. Occorre una colonna d'acqua alta 10 metri per ottenere un peso di 9,81 N su  $1 \text{ cm}^2$ , cioè una pressione di una atmosfera. Alla pressione idrostatica occorre aggiungere quella atmosferica, quella dell'aria sulla superficie dell'acqua di un qualunque ambiente acquatico. Negli strati d'acqua più superficiali di un lago o del mare la pressione è intorno a quella dell'aria; in quelli più profondi aumenta in ragione di una atmosfera ogni 10 metri in più di profondità (**fig. 3.5**). Alla profondità di 50 cm la pressione è pari a 1,05 atm, cioè quella dell'aria a cui si aggiunge il peso dell'acqua a quella profondità; tale pressione è quella che effettivamente "stringe" gli stivali contro i piedi nell'alveo di un fiume. Alla base di una diga alta 30 m (**fig. 3.6**) la pressione esercitata dall'acqua accumulata nel bacino artificiale è di circa 4 atm, cioè quasi  $40 \text{ N/cm}^2$ , una forza-peso esercitata da una massa di 40 tonnellate per  $\text{m}^2$ . Questo ragionamento vale per altitudini prossime a quella del mare; infatti occorre tenere conto che salendo di quota diminuisce la pressione dell'aria (in ragione di circa 0,01 atm ogni 100 m di quota in più).



### 3.2 - Superficie libera dei liquidi

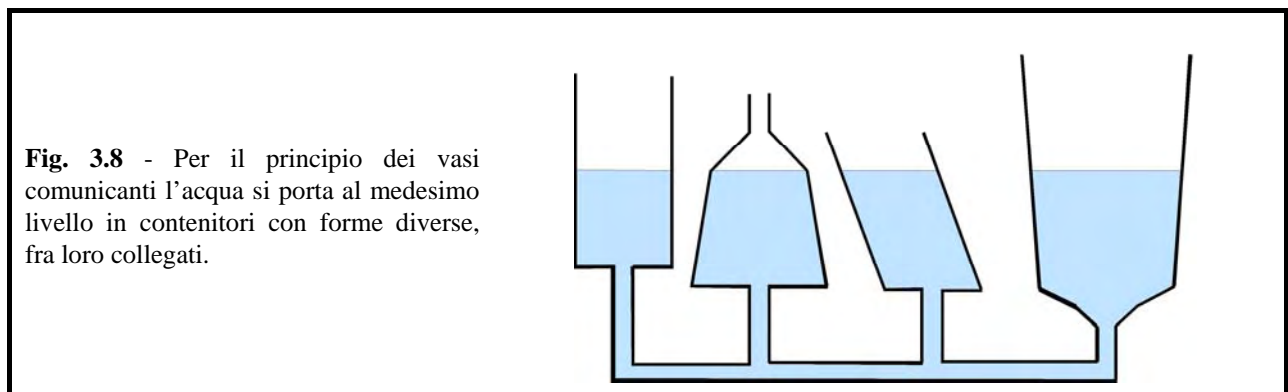
Abbiamo già esaminato il fenomeno della tensione superficiale dell'acqua (**par. 2.3**), ma rimangono ancora alcuni altri aspetti importanti. La superficie libera dell'acqua in un bicchiere è perfettamente orizzontale e conserva la stessa posizione anche inclinando il bicchiere stesso. La superficie d'acqua in una pozzanghera è un ottimo esempio di piano orizzontale, normale alla direzione del filo a piombo. La superficie non è più perfettamente orizzontale in estensioni di liquido molto ampie (grandi laghi e mare), nelle quali segue la

curvatura della superficie terrestre. La tendenza della superficie dell'acqua ad assumere le caratteristiche di piano tangente alla superficie terrestre è sfruttata come meccanismo della *livella ad acqua* (fig. 3.7).

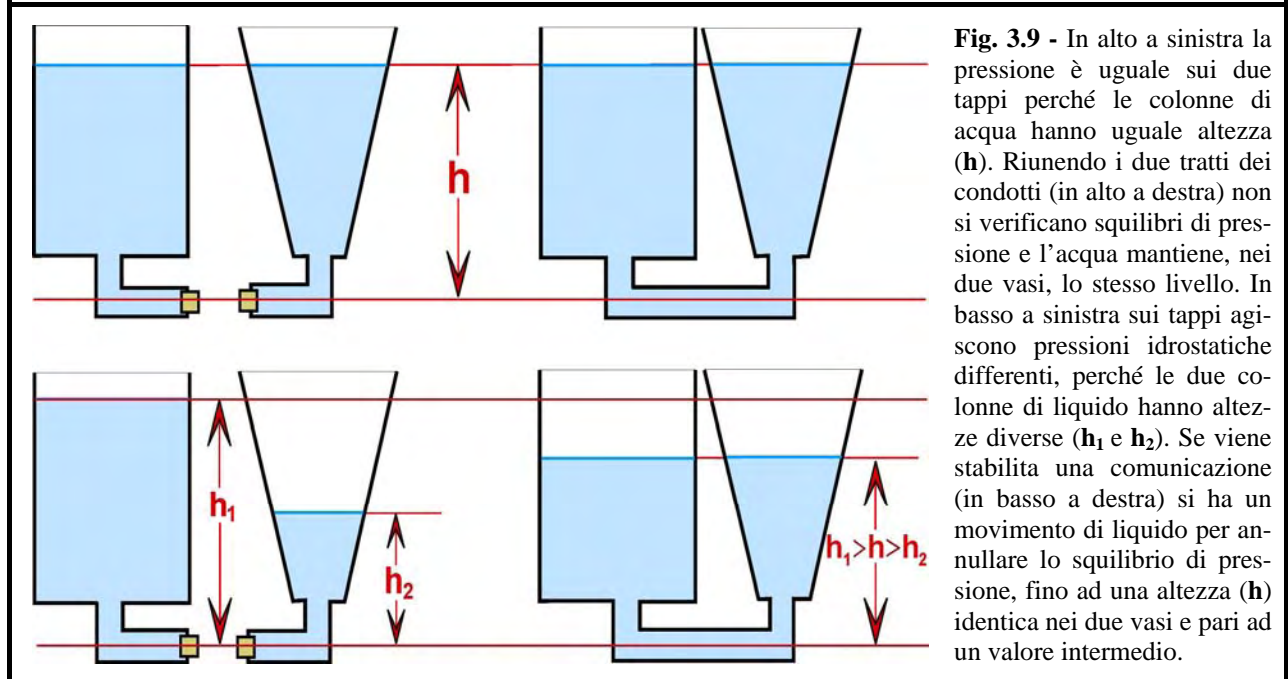


**Fig. 3.7** - La *livella ad acqua* è uno strumento che permette di determinare la direzione orizzontale anche su un terreno accidentato.

Dalla succitata legge di Pascal segue il principio dei vasi comunicanti (fig. 3.8), nei quali l'acqua tende a raggiungere lo stesso livello (fig. 3.9). In questo modo l'acqua sale ai rubinetti dei piani superiori delle abitazioni perché tende a raggiungere il livello del serbatoio da cui proviene. Nei pozzi artesiani, che giungono fino ad una falda acquifera, in comunicazione con serbatoi sotterranei posti a quote superiori, zampilla da sola dal terreno. Il principio dei vasi comunicanti, inoltre, è ben sfruttato nelle situazioni in cui diventa necessario l'attraversamento di canali, mediante sifoni, sotto strade, ferrovie ed anche fiumi.



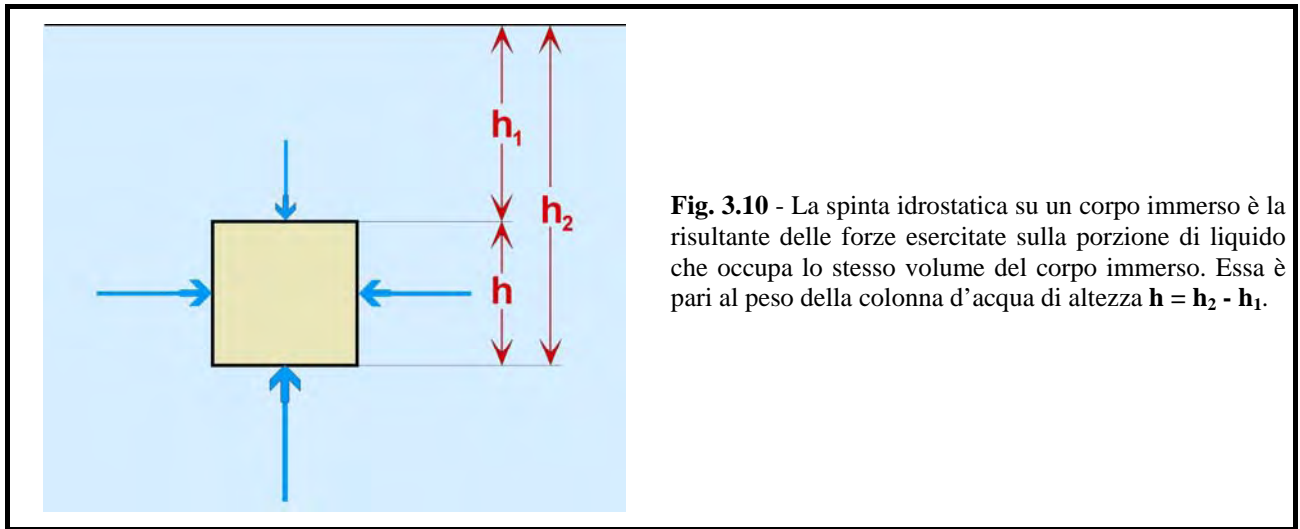
**Fig. 3.8** - Per il principio dei vasi comunicanti l'acqua si porta al medesimo livello in contenitori con forme diverse, fra loro collegati.



**Fig. 3.9** - In alto a sinistra la pressione è uguale sui due tappi perché le colonne di acqua hanno uguale altezza ( $h$ ). Riunendo i due tratti dei condotti (in alto a destra) non si verificano squilibri di pressione e l'acqua mantiene, nei due vasi, lo stesso livello. In basso a sinistra sui tappi agiscono pressioni idrostatiche differenti, perché le due colonne di liquido hanno altezze diverse ( $h_1$  e  $h_2$ ). Se viene stabilita una comunicazione (in basso a destra) si ha un movimento di liquido per annullare lo squilibrio di pressione, fino ad una altezza ( $h$ ) identica nei due vasi e pari ad un valore intermedio.

### 3.3 - Spinta idrostatica

I popoli primitivi avevano scoperto la possibilità del *galleggiamento* del legno, usato per zattere e barche e dello stesso corpo umano, che può sostenersi nell'acqua. La forza antagonista del peso, diretta verso l'alto, è la **spinta idrostatica** del liquido sul corpo immerso (**fig. 3.10**). Essa si esercita su qualunque corpo immerso, sottoposto a tutte le forze che prima agivano sul liquido che si trovava al suo posto e tali da mantenere ferma quella porzione di liquido ora sostituita dal corpo, cioè facevano equilibrio al suo peso. Le forze che agiscono ora sul corpo immerso hanno, per risultante, quella (idrostatica) diretta verso l'alto di uguale intensità del peso del liquido sostituito dal corpo (*principio di Archimede*). La spinta idrostatica (**fig. 3.10**) è dovuta alla differenza fra la pressione che agisce sulla parte superiore del corpo (colonna sovrastante  $h_1$ ) e quella che agisce sulla sua parte inferiore (di maggiore intensità per la più alta colonna  $h_2$ ). Tale differenza dipende dal peso della colonna liquida delimitata dal dislivello  $h = h_2 - h_1$  che rappresenta appunto la spinta idrostatica verso l'alto.



**Fig. 3.10** - La spinta idrostatica su un corpo immerso è la risultante delle forze esercitate sulla porzione di liquido che occupa lo stesso volume del corpo immerso. Essa è pari al peso della colonna d'acqua di altezza  $h = h_2 - h_1$ .

Sul corpo immerso in acqua agiscono dunque due forze: il peso  $P$  che lo attrae verso il basso e la spinta idrostatica  $F$  che lo spinge verso l'alto. In condizioni di equilibrio le due forze, di verso opposto, avendo pari intensità, si equivalgono. Quando ciò non avviene il corpo scende in profondità o sale in superficie. Il comportamento del corpo (di volume  $V$ ) dipende dal prevalere del peso (prodotto del suo volume  $V$  per il peso specifico  $\lambda_c$  del materia che lo compone;  $P = V \cdot \lambda_c$ ) o della spinta idrostatica; questa è uguale al peso del liquido spostato ed anch'essa pari al prodotto del volume per il peso specifico del liquido ( $\lambda_l$ ). La risultante  $R$  sul corpo è data dalla somma vettoriale delle due forze; avendo queste verso contrario si può assegnare, per convenzione, segno negativo alla spinta idrostatica, per cui risulta:

$$R = P - F = V \cdot \lambda_c - V \cdot \lambda_l = V \cdot (\lambda_c - \lambda_l)$$

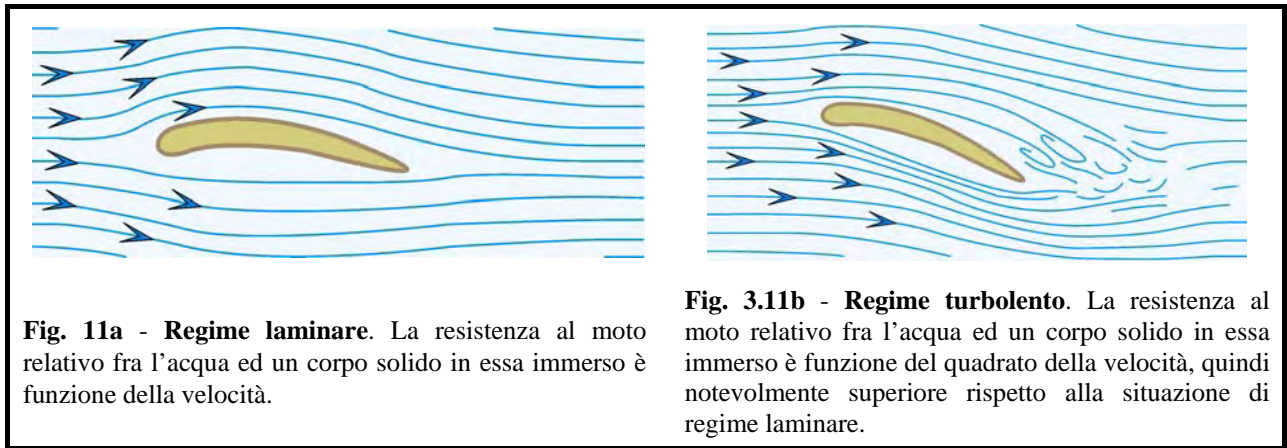
Da cui risulta che il segno della risultante è funzione diretta del confronto fra i pesi specifici del corpo e del liquido (**fig. 2.3**). Il principio di Archimede spiega anche il fenomeno del galleggiamento che rappresenta uno stato di equilibrio di un corpo immerso parzialmente in un liquido. La parte immersa di un galleggiante sposta un peso di liquido uguale al peso di tutto il galleggiante. Sull'acqua galleggiano le sostanze di peso specifico inferiore a uno (legno, sughero, benzina, alcool, olio,...) e affondano i corpi con peso specifico superiore a uno (metalli, rocce, glicerina,...).

I corpi sono costituiti da materiali vari e non sono sempre completamente "massicci", cioè contengono vani pieni d'aria. Un caso eclatante è la pomice che, pur essendo "roccia", galleggia sull'acqua perché ricca, al suo interno, di spazi vuoti, anche delle dimensioni di alcuni millimetri. Per lo stesso motivo il ghiaccio ha peso specifico inferiore a quello dell'acqua anche se, in questo caso, gli spazi vuoti sono microscopici, quasi a livello molecolare. Le navi in ferro galleggiano sull'acqua perché contengono molti vani pieni d'aria, in modo che il loro peso specifico medio sia inferiore ad uno, anche con carichi di molte tonnellate di merci. I sottomarini sono scafi perfettamente chiusi, con doppiofondo diviso in compartimenti stagni; in emersione questi sono vuoti ed il peso specifico medio dello scafo è inferiore ad uno; per l'immersione vengono riempiti d'acqua mentre, per risalire a galla, l'acqua viene pompata fuori dal sottomarino.

### 3.4 - L'acqua in movimento

Abbiamo fino ad ora esaminato il comportamento dell'acqua come fluido in quiete. Se invece il fluido ed un corpo in esso sommerso sono in moto l'uno rispetto all'altro (pilastri di un ponte, pareti di un tubo percorso da una corrente fluida, albero squassato da una corrente di piena, nave che risale un fiume,...), le forze di contatto non si riducono a quelle normali (come quelle viste al **par 3.1**), ma possiedono anche una **componente tangenziale**, parallela cioè all'elemento di superficie a cui la forza è applicata in senso da ostacolare il movimento relativo tra le parti. È alle componenti tangenziali a cui è dovuta la *resistenza* (la forza di senso opposto al moto) che un corpo incontra a muoversi in seno all'acqua (come la forza che bisogna equilibrare perché un solido investito da una corrente non sia da esso trascinato). Tale resistenza dipende dalla forma (profilo) e dimensioni del corpo, rugosità della sua superficie, densità, viscosità e velocità relativa. Abbiamo già citato l'idronamicità dei pesci (**par. 2.2**) che permette ad essi, corpi solidi, di muoversi agevolmente in acqua.

*La resistenza è proporzionale alla velocità relativa se il fluido in moto lambisce la superficie del corpo e se lo scorrimento dell'acqua avviene per strati paralleli (regime laminare).* In tale situazione il fluido è diviso in tante lamine che scorrono l'una sull'altra, restando fra loro parallele e parallele alla superficie del corpo stesso (**fig. 11a**).



*La resistenza è proporzionale al quadrato della velocità relativa se lo scorrimento del fluido non avviene per strati paralleli alla superficie del corpo,* ma gli elementi di volume del fluido che vengono a contatto con il corpo stesso acquistano velocità dirette obliquamente alla sua superficie e con direzioni diverse, per cui gli elementi di volume dell'acqua urtandosi si rimescolano, dando luogo a moti vorticosi (**regime turbolento; fig. 3.11b**).

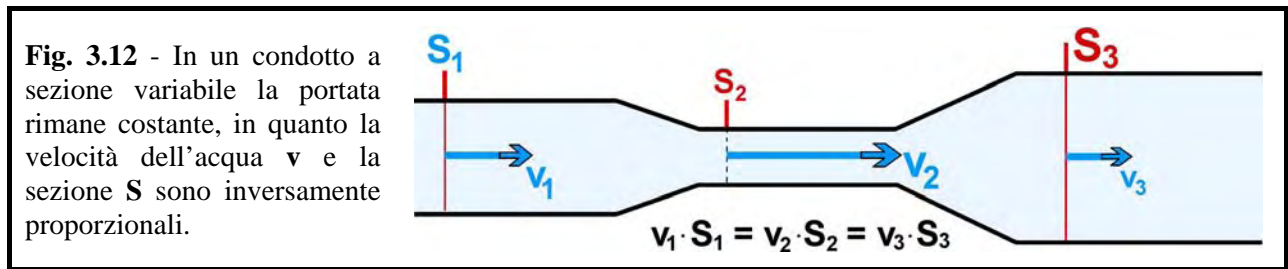
### 3.5 - Portata di un condotto

In un condotto, in un tubo all'interno del quale un fluido viene spinto da una pressione, oppure è in moto perché in pendenza; in un canale artificiale, nell'alveo di un fiume, può scorrere acqua in quantità più o meno abbondante. Si definisce **portata (Q)** di un condotto, pieno di acqua animata da un moto di insieme (con velocità **v**), il rapporto fra il volume **V** del liquido che attraversa una sezione **S** qualunque del condotto e il tempo **t** impiegato a passare:

$$Q = \frac{V}{t} = v \cdot S$$

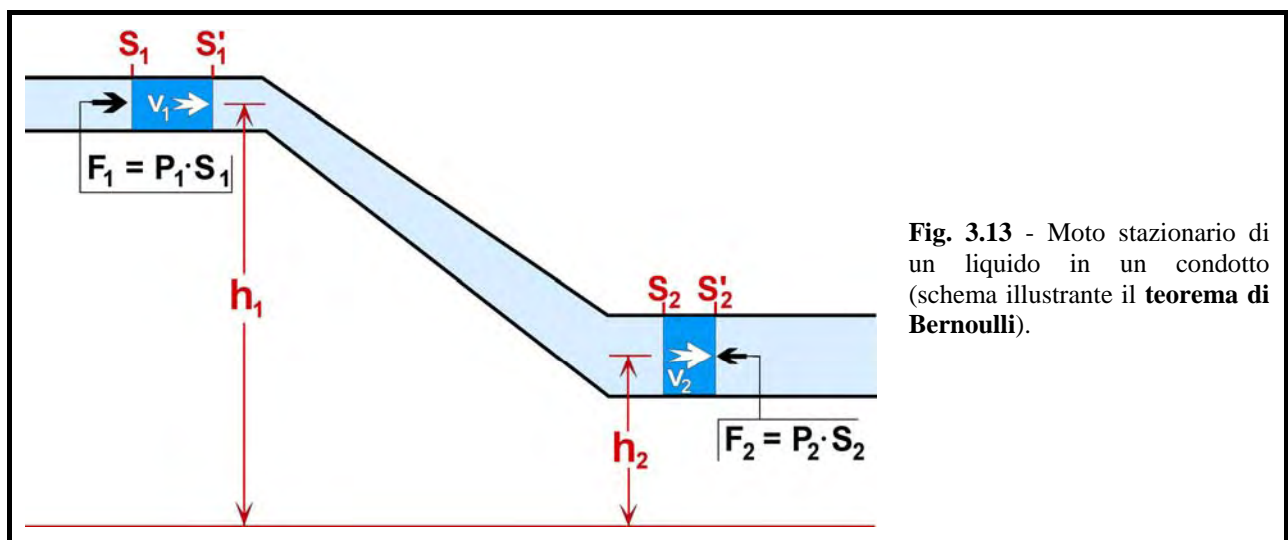
Se la velocità viene espressa in metri al secondo [m/s] e la sezione in metri quadrati [m<sup>2</sup>], la portata viene espressa in metri cubi al secondo [m<sup>3</sup>/sec]. Oppure in litri al secondo [l/sec = dm<sup>3</sup>/sec], con l'avvertenza di indicare la velocità della corrente nel condotto in dm/sec e la superficie in dm<sup>2</sup>. Poiché il liquido è incompressibile, la portata deve avere lo stesso valore in tutte le sezioni del condotto, indipendentemente dalle loro superfici; pertanto **v** ed **S** sono inversamente proporzionali (**fig. 3.12**). Questo fatto è importante e pur tenendo conto di numerosi fattori fisici che non sempre permettono una facile ed immediata applicazione di principi teorici, lo si può osservare anche in natura. La portata di un fiume, salvo contributi

di affluenti o da serbatoi sotterranei, oppure sottrazioni d'acqua per captazioni idriche per usi diversi, rimane costante. Infatti nei tratti con minori pendenze, la velocità della corrente è minore, ma l'alveo si presenta molto ampio e con acque profonde (maggiore superficie di sezione). Nei tratti con maggiore pendenza aumenta la velocità dell'acqua, ma diminuiscono la larghezza dell'alveo e la profondità delle acque.



### 3.6 - Teorema di Bernoulli

Consideriamo il moto stazionario di acqua lungo un condotto (fig. 3.13).  $S_1$  ed  $S_2$  sono due sezioni qualsiasi poste alle altezze  $h_1$  ed  $h_2$  rispetto ad un piano orizzontale di riferimento. Sulle superfici di tali sezioni agiscono le pressioni  $P_1$  (se l'acqua viene immessa con forza  $F_1$  nel condotto) e  $P_2$  (la resistenza dovuta alla forza  $F_2$  opposta dall'acqua che si trova più a valle). Il fluido infine si muove, in corrispondenza delle due sezioni, con velocità  $v_1$  e  $v_2$ .



Applichiamo il teorema dell'energia cinetica all'acqua inizialmente compresa tra le sezioni  $S_1$  ed  $S_1'$ . Dopo un intervallo di tempo  $t$  tale porzione di fluido si sarà spostato lungo il condotto fino ad occupare il tratto compreso tra  $S_2$  ed  $S_2'$ . Lo stesso volume d'acqua  $V$ , di massa  $m$ , che si muoveva inizialmente con velocità  $v_1$  nel tratto  $S_1$ - $S_1'$  passa nel tratto  $S_2$ - $S_2'$  con velocità  $v_2$ . Pertanto la variazione di energia cinetica  $\Delta E_c$  vale:

$$\Delta E_c = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_2^2 - \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_1^2$$

Per il teorema dell'energia cinetica  $\Delta E_c$  è uguale al lavoro compiuto da tutte le forze agenti sull'acqua, cioè la forza di gravità ( $m \cdot g$ ; dove  $g$  è l'accelerazione gravitazionale terrestre) e le forze di pressione ( $F_1 = P_1 \cdot S_1$  e  $F_2 = P_2 \cdot S_2$ ). L'energia potenziale del liquido nel tratto  $S_1$ - $S_1'$  è  $mgh_1$ , mentre nel tratto  $S_2$ - $S_2'$  vale  $mgh_2$ . Pertanto il lavoro compiuto dalla forza peso sulla porzione di liquido (di volume  $V$  e di massa  $m$ ) è pari alla variazione di energia potenziale  $\Delta E_p$ :

$$\Delta E_p = m \cdot g \cdot (h_1 - h_2)$$

Il lavoro  $L$  svolto dalle forze di pressione è il seguente:

$$L = P_1 \cdot V - P_2 \cdot V$$

Pertanto, richiamando quanto affermato precedentemente, dovendo essere  $\Delta E_c = \Delta E_p + L$ , e sostituendo le precedenti espressioni, si ottiene:

$$\frac{1}{2} \cdot m \cdot v_2^2 - \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_1^2 = m \cdot g \cdot (h_1 - h_2) + P_1 \cdot V - P_2 \cdot V$$

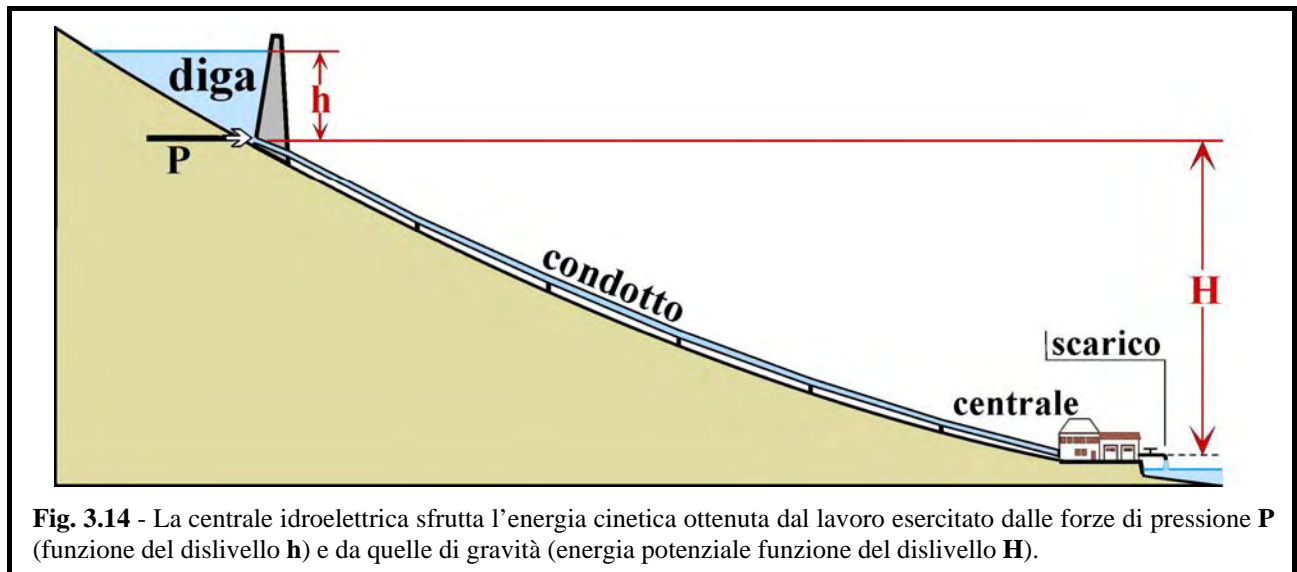
Raccogliendo al primo membro le grandezze con indice 1 ed al secondo membro le grandezze con indice 2, la relazione precedente può essere scritta anche nella seguente forma:

$$\frac{1}{2} \cdot m \cdot v_1^2 + m \cdot g \cdot h_1 + P_1 \cdot V = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_2^2 + m \cdot g \cdot h_2 + P_2 \cdot V$$

Poiché le due sezioni considerate sono generiche, possiamo esprimere il risultato ottenuto in una forma generale:

$$\frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 + m \cdot g \cdot h + P \cdot V = \text{costante}$$

Il che significa che il teorema di Bernoulli non esprime altro che il principio di conservazione dell'energia applicato ad un fluido ideale (incomprimibile come l'acqua e privo di attrito interno) in moto stazionario lungo un condotto. Esso permette di comprendere meglio numerosi fenomeni di meccanica idraulica. Un esempio può essere rappresentato dal caso illustrato dalla **fig. 3.14**. La turbina di una centrale idroelettrica è alimentata da una condotta forzata che ha origine dalla base di una diga. Lo sbarramento accumula acqua che viene introdotta nella parte superiore del condotto con una forza che dipende dalla pressione  $P$ , a sua volta funzione diretta dell'altezza  $h$ . L'acqua accumulata, inoltre, possiede, alla base dello sbarramento, una energia potenziale che dipende dal dislivello  $H$  rispetto alla quota della centrale.



**Fig. 3.14** - La centrale idroelettrica sfrutta l'energia cinetica ottenuta dal lavoro esercitato dalle forze di pressione  $P$  (funzione del dislivello  $h$ ) e da quelle di gravità (energia potenziale funzione del dislivello  $H$ ).

L'energia cinetica dell'acqua (sfruttata per la produzione di energia elettrica), secondo il teorema di Bernoulli, è il lavoro svolto dalle forze di pressione e di gravità. In realtà occorre precisare che non si tratta di una situazione ideale, altrimenti significherebbe ammettere che l'acqua si muova lungo il condotto senza l'opposizione di alcuna forma di attrito ed in condizioni di perfetto moto laminare (senza turbolenze). Tuttavia l'intero sistema è realizzato per ridurre al minimo le possibili perdite di energia, tanto che si può sostenere che quasi tutta l'energia disponibile a monte viene trasformata in energia cinetica man mano che l'acqua scende lungo il condotto. In sintesi da monte a valle la somma delle energie di pressione e potenziale si trasforma in energia cinetica; l'entità di quest'ultima, salvo poche perdite, è funzione diretta del dislivello totale  $H + h$ , indipendentemente dalla pendenza o dalla lunghezza del condotto: *dallo sbarramento alla centrale, l'acqua, lungo il condotto, aumenta di velocità.*

Un fiume può essere paragonato al condotto, che ha origine alle sorgenti in montagna e che ha termine alla foce in pianura. L'acqua percorre un condotto che, diversamente da quello precedente, non è chiuso ed inoltre non viene alimentato dalla pressione di un bacino colmo d'acqua. Quindi una prima differenza sta nel fatto che l'energia cinetica dell'acqua, che si dovrebbe accumulare man mano che il fiume procede a valle,

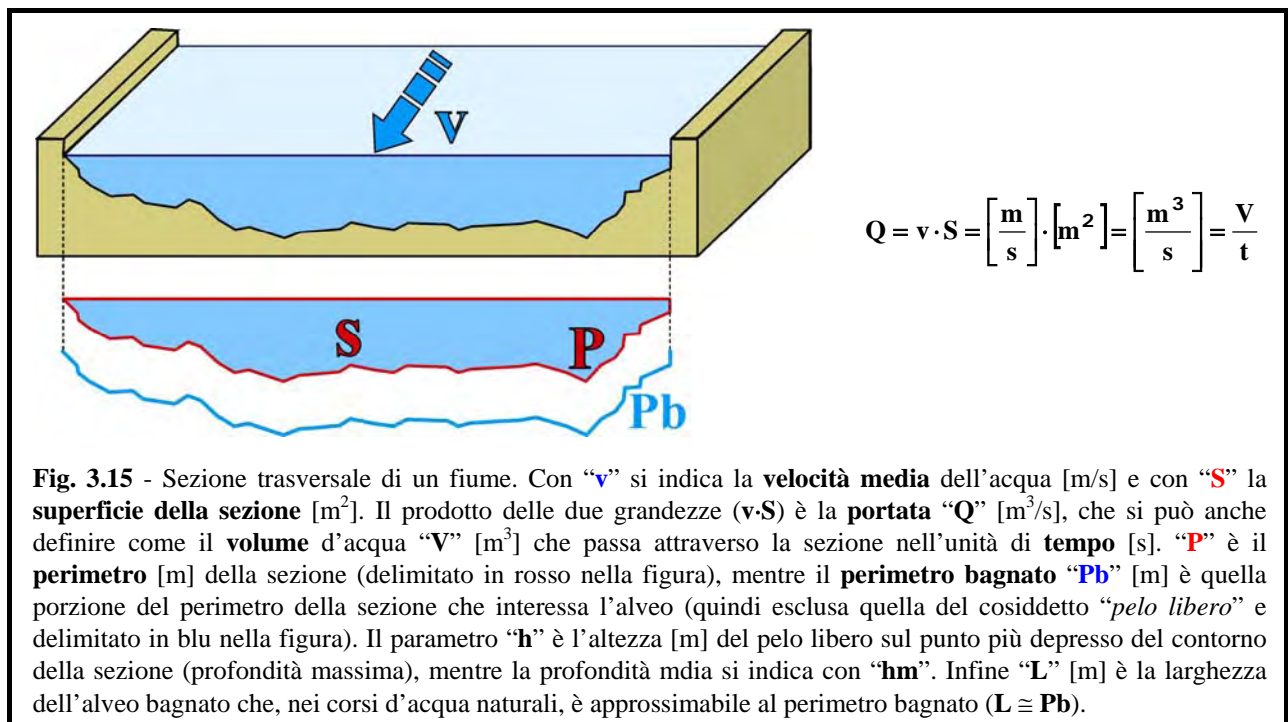


dipende unicamente dal lavoro svolto dalla gravità, essendo la pressione nulla. Ma la principale differenza sta nelle elevate perdite di energia. Mentre nel caso della condotta forzata si cerca di garantire un moto dell'acqua in condizioni più vicine possibile a quelle ideali, nel caso di un fiume le perdite di energia sono elevatissime. L'acqua scarica gran parte dell'energia cinetica esercitando soprattutto una grande quantità di *lavoro di erosione*, cioè quello necessario per mettere in movimento materiali detritici di varia natura (grani di argilla, sabbia, ghiaia e, in occasione delle piene, anche massi di grandi dimensioni) e per mantenerli in movimento, strappando così altri materiali dall'alveo e dalle sponde. Erodendo ed allagando il fiume disperde quasi interamente l'energia ottenuta dal lavoro esercitato dalla gravità: di conseguenza la velocità dell'acqua, procedendo verso valle non aumenta, oltre certi valori limite. Quindi dalla montagna alla pianura la velocità della corrente non diminuisce per la minore pendenza, ma per le perdite di energia dovute alla notevole irregolarità del profilo longitudinale e trasversale dell'alveo, alla sua scabrezza (resistenza per attrito al moto dell'acqua offerto dai fondali e dalle sponde) e all'andamento sinuoso del suo percorso.

Gli interventi di sistemazione idraulica dei corsi d'acqua comportano, in genere, la rettificazione dei loro corsi (eliminazione delle curve), la protezione delle sponde (primate, massicciate, gabbionate, muri,... per evitare l'erosione), la costruzione di argini (per diminuire il rischio di allagamenti), la rimozione di ostacoli (massi, alberi, detriti di varia natura,...). Ciò significa trasformare i corsi d'acqua in canali di aspetto regolare, privandoli di quelle caratteristiche che li distinguono dal condotto ideale. Tali interventi tendono a ridurre i fattori che comportano perdite di energia; enfatizzando il concetto, il risultato è la trasformazione dei fiumi in condotte, nelle quali la velocità dell'acqua tende ad aumentare verso il basso, accumulando energia che, prima o poi, scarica con effetti disastrosi verso valle.

### 3.7 - Portata di un corso d'acqua

Le definizioni espresse a proposito della portata in un condotto (**par. 3.5**) valgono, con opportuni accorgimenti, anche per un corso d'acqua naturale. Consideriamo un breve tratto di un fiume e quindi una sua sezione trasversale. Come già visto, si definisce portata il volume d'acqua "V" [m<sup>3</sup>/s o l/s], che attraversa la sezione nell'unità di tempo "t" [s]. Dalla didascalia della **fig. 3.15**, si comprende che la portata è tanto maggiore quanto più alta è la velocità dell'acqua e quanto più grande è la superficie della sezione. D'altra parte è intuitivo che tanto più veloce è il flusso idrico, tanto più ripide e alte sono le sponde e tanto più esse sono lontane tra loro, maggiore risulta la quantità d'acqua che può scorrere lungo il fiume.



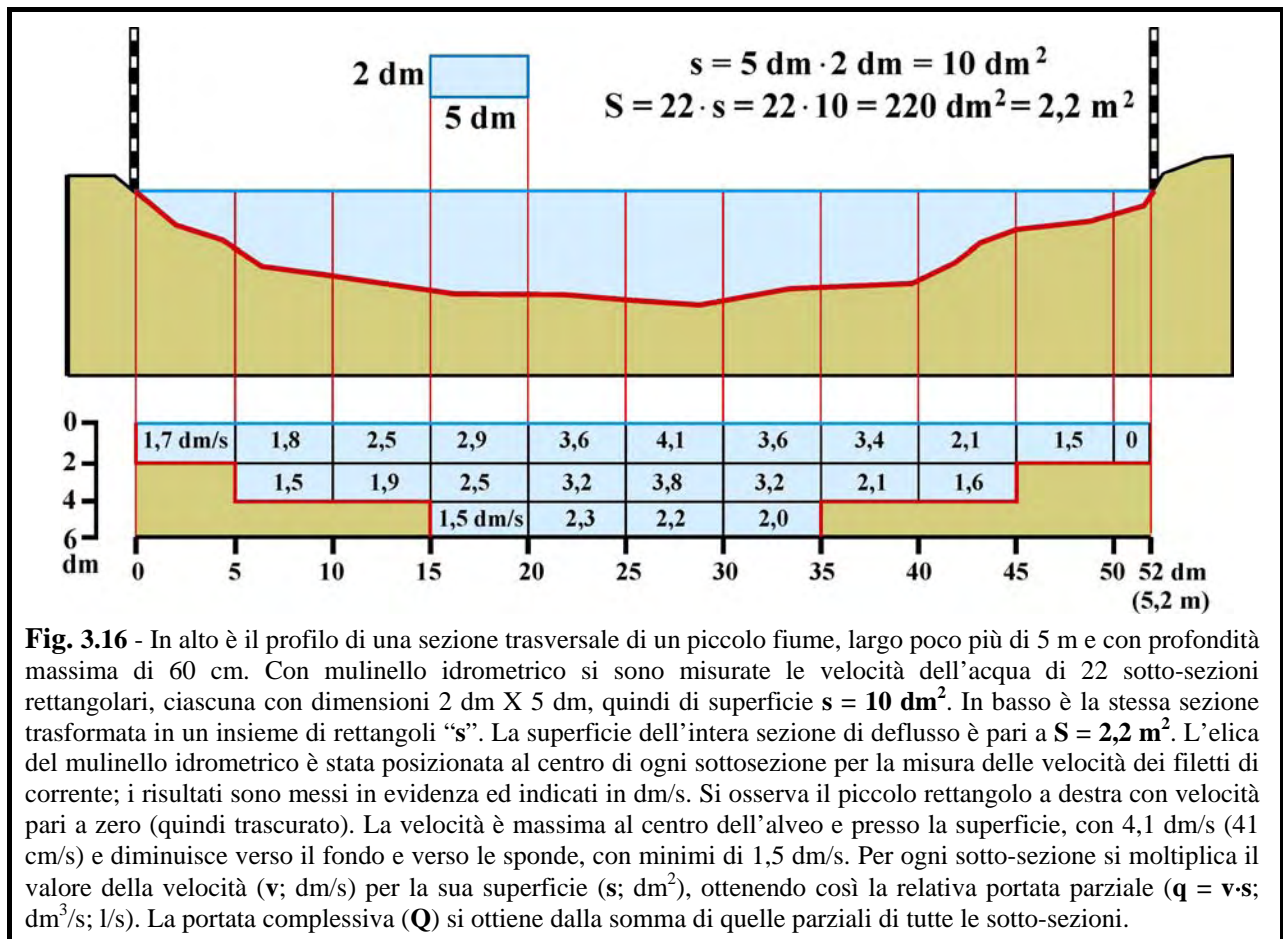
È interessante notare che le portate di un corso d'acqua di discrete dimensioni possono variare da valori molto bassi, intorno a pochi metri cubi al secondo nei periodi di magra, fino a valori centinaia di volte

più grandi in occasione dei più intensi fenomeni di piena. Ciò significa, per un qualunque organismo acquatico (un insetto, un verme, una larva di anfibio, un pesce,...) vivere, in un determinato momento, in condizioni idrologiche caratterizzate da acque relativamente calme e limpide, per passare, talora quasi improvvisamente, ad una nuova situazione, con velocità delle acque decine di volte superiore e soprattutto rese torbide dalla massiccia presenza di limo e talora di pietre e massi che sconvolgono il substrato.

Le precedenti considerazioni sono valide a **due condizioni**:

- 1) le velocità dei diversi filetti (linee di flusso) dell'acqua che attraversano la sezione in vari punti devono essere uguali;
- 2) le direzioni dei filetti devono essere fra loro parallele e perpendicolari alla sezione.

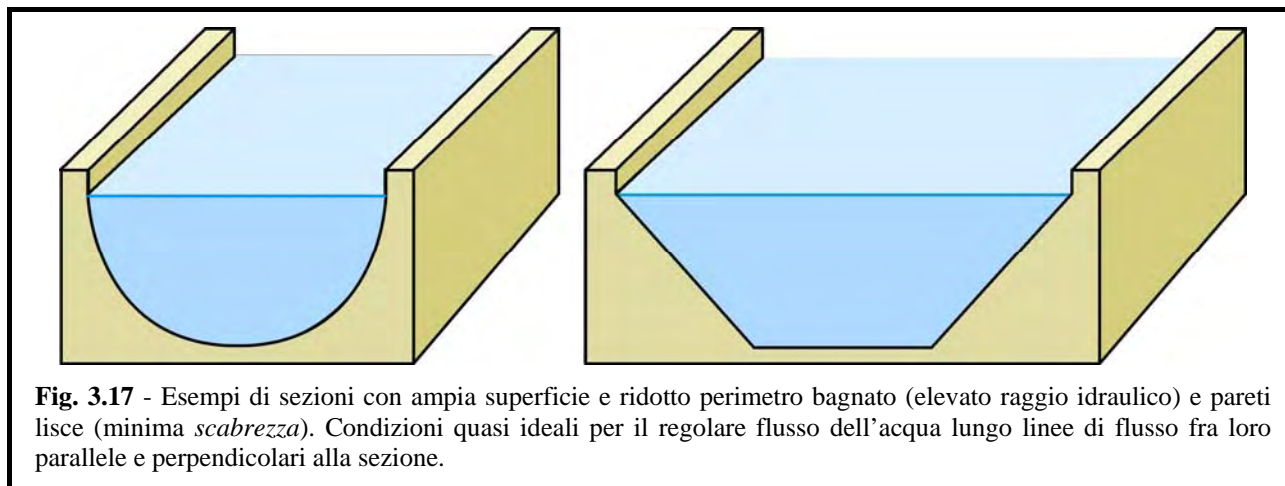
Per quanto riguarda la **prima condizione** si fa riferimento allo schema illustrante i risultati di misure delle velocità dell'acqua realmente effettuate in corrispondenza di una sezione trasversale di un piccolo fiume, in un tratto rettilineo, per la determinazione della portata (**fig. 3.16**). La misura di una portata sarebbe assai semplice se la condizione di uniformità della velocità della corrente fosse identica in ogni punto; sarebbe sufficiente una sola misura mediante un mulinello idrometrico. Il riscontro di quanto realmente accade è chiaro dall'esame dello schema succitato. Lungo un corso d'acqua naturale, la situazione normale è ben diversa dalla prima condizione. La velocità dell'acqua è massima lungo il filetto centrale presso la superficie e diminuisce verso le sponde ed in prossimità del fondo. Quindi il termine "v" va inteso come "velocità media" dell'insieme delle velocità dei diversi filetti di corrente che attraversano la sezione individuata.



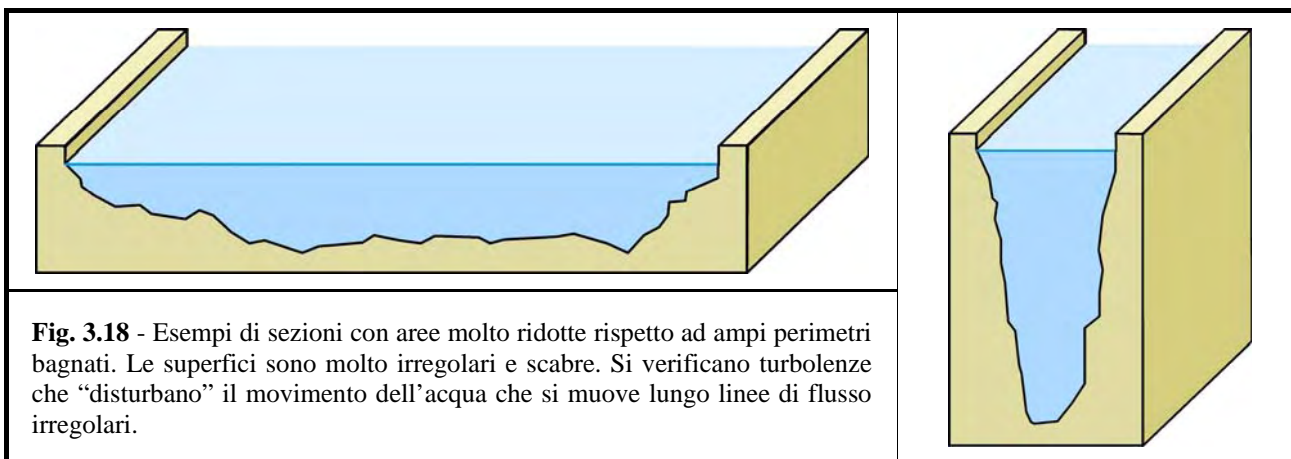
Per quanto riguarda la **seconda condizione** bisogna considerare che un corso d'acqua quasi mai assume l'aspetto di un canale con fondo e pareti perfettamente regolari, anche nei tratti rettilinei. Lungo un condotto rettilineo, in condizioni ideali, le varie linee di flusso dell'acqua sono fra loro parallele, allineate lungo la direzione del condotto stesso. Qualche lieve turbolenza si può manifestare in corrispondenza delle pareti; è tuttavia un aspetto tanto più trascurabile quanto maggiore è il cosiddetto "raggio idraulico" (ampia superficie della sezione rispetto al suo perimetro bagnato) e quanto più le pareti sono lisce e regolari (**fig. 3.17**). Esiste un preciso rapporto fra superficie della sezione (S) ed il perimetro bagnato (Pb); esso definisce il cosiddetto **raggio idraulico "R"**:

$$R = \frac{S}{P_b}$$

Il flusso dell'acqua in un condotto è tanto più facile quanto maggiore è il raggio idraulico. Con sezione a forma di semicerchio con raggio pari ad 1 m, la superficie varrebbe  $S = 1,57 \text{ m}^2$ , mentre il perimetro  $P_b = 3,14 \text{ m}$ ; quindi  $R = 1,57:3,14 = 0,5 \text{ m}$ . Con sezione rettangolare con la stessa superficie ( $1,57 \text{ m}^2$ ), ma con base pari a 5 volte l'altezza, sarebbe  $P_b = 3,92 \text{ m}$  e quindi  $R = 1,57:3,92 = 0,4 \text{ m}$ . Se la base fosse 10 volte l'altezza, a parità di superficie, risulterebbe  $P_b = 4,8 \text{ m}$  ed  $R = 1,57:4,8 = 0,33 \text{ m}$ . In una sezione con base molto ampia (come nella maggior parte dei fiumi) il raggio idraulico diventa approssimativamente pari all'altezza dell'acqua. La **fig. 3.17** illustra sezioni caratterizzate da un elevato raggio idraulico.



Se invece la sezione avesse una limitata superficie ed un ampio perimetro bagnato (ridotto raggio idraulico) e le pareti del condotto fossero caratterizzate da elevata *scabrezza* (cioè contrastassero, con maggiore attrito, il flusso dell'acqua), potrebbero verificarsi turbolenze notevoli (**Fig. 3.18**). In simili casi ben difficilmente i filetti d'acqua sono paralleli tra loro, perpendicolari alla sezione e caratterizzati dalla stessa velocità. Tali situazioni costituiscono la norma nei corsi d'acqua naturali. Ciò, tra l'altro, spiega il motivo per cui le misure di portata di un fiume devono essere effettuate mediante il maggior numero possibile di misure delle portate delle sottosezioni (come illustrato nella succitata **fig. 3.16**). Le cose cambiano nel caso dei canali artificiali, solitamente con profili più regolari e con pareti del fondo e delle sponde più lisce. D'altra parte essi sono realizzati allo scopo di trasportare acqua nel modo più efficace possibile, limitando al minimo le dispersioni dovute all'irregolarità dei moti d'acqua.



Vediamo ora, alla luce dei concetti sopra descritti, quali sono le tecniche tradizionali dell'ingegneria utilizzate negli interventi di sistemazione idraulica finalizzati alla limitazione del rischio idrogeologico. Se il fiume potesse essere "trattato" come un sistema fisico semplice, allora le formule prima citate potrebbero essere applicate con buoni risultati, ma la realtà è ben più complessa.

Uno dei problemi principali è l'esondazione: grandi volumi d'acqua che escono dall'alveo per invadere i terreni circostanti. Si vorrebbe che ciò non accadesse, che anche in occasione delle più intense manifestazioni di piena tutta l'acqua rimanesse in alveo senza produrre allagamenti; perché ciò sia possibile occorre che il fiume abbia capacità di sostenere grandi portate. Come abbiamo visto la portata dipende dalla sezione di deflusso e dalla velocità dell'acqua, ma abbiamo anche sottolineato che si tratta di una semplificazione rispetto ad una realtà più complessa, in relazione al tipo di movimento dell'acqua, all'attrito nei confronti delle superfici dell'alveo bagnato, alla forma della sezione,....

Uno degli interventi più frequenti è la "risagomatura" del profilo trasversale; essa consiste nel rimaneggiare l'alveo in modo che le sezioni di deflusso assumino la forma di un trapezio isoscele, analogo al modello illustrato a destra della **fig. 3.17**. Tale intervento ha lo scopo di aumentare il raggio idraulico ed è adottato soprattutto nei tratti fluviali rettilinei o debolmente sinuosi. Si pone anche particolare attenzione nel rendere regolari, prive di asperità e al limite piatte e lisce quelle pareti (fondo e sponde) le cui estensioni concorrono a definire il perimetro bagnato. In tal modo si riduce al minimo la scabrezza, al fine di ridurre le turbolenze, che comportano dispersione di energia. È evidente che tali interventi, più che modificare la superficie della sezione, agiscono sui fattori che limitano la velocità dell'acqua. D'altra parte, dalla lettura della formula illustrata in **figg. 3.12 e 3.15**, è chiaro che il deflusso dipende strettamente dalla velocità della corrente.

Lungo i tratti fluviali che attraversano aree urbanizzate, dove occorre intervenire per aumentare la capacità di sostenere grandi portate senza esondazioni, il fattore principale sui cui agire è la velocità. È un po' come se si tentasse di far defluire l'acqua di piena il più velocemente, senza produrre danni. Tuttavia, immediatamente a valle, il mantenimento (o addirittura l'incremento) di una più elevata velocità di deflusso deve in qualche modo essere "scaricata". In sintesi gli effetti positivi (in termini di sicurezza) di un motivato intervento di risagomatura lungo un determinato tratto a monte, viene "pagato" con la conseguente necessità di altri interventi "compensatori" a valle, di natura opposta, per favorire la dissipazione di energia. Normalmente accade il contrario; non si effettuano interventi compensatori e addirittura se ne effettuano altri di risagomatura, poco giustificati dal valore economico delle aree esondabili, che comportano un ulteriore accumulo di energia ed incremento dei rischi verso valle.

Se tali interventi possono essere ritenuti idonei per contenere le erosioni in corrispondenza delle sezioni interessate dagli attraversamenti (ponti) e dei tratti di corsi d'acqua in ambiti antropizzati (e senza alternative per quanto attiene le ricollocazioni di edifici), risulta pericoloso procedere (come purtroppo sta avvenendo) all'artificializzazione massiva dei fiumi. In tal modo essi sono destinati ad essere trasformati in condotti lungo i quali la dissipazione di energia viene limitata; le acque conservano o addirittura acquisiscono ulteriore velocità, con possibili gravi conseguenze a valle.

Trasformare i corsi d'acqua del reticolo idrografico naturale in condotti artificiali (agendo sulla forma delle sezioni e riducendo la scabrezza), per favorire un più veloce smaltimento delle acque, riduce il rischio di esondazioni in aree limitate, ma favorisce un più veloce trasferimento verso valle (riduzione dei tempi di corrivazione). Ad una determinata sezione su un fiume, le acque giungono contemporaneamente da tutte le porzioni del bacino più rapidamente, con incremento delle portate e dei rischi di piene rovinose e dei processi erosivi determinati dalle maggiori velocità delle acque. Le irregolarità degli alvei naturali, la loro elevata scabrezza (presenza di ciottoli di varie dimensioni, massi, radici, alberi,...), l'erodibilità delle sponde, le esondazioni,... determinano la dissipazione di gran parte dell'energia delle acque, attenuano le velocità delle correnti e ad allungano i tempi per giungere a valle. È per tali ragioni che conviene evitare di intervenire lungo i tratti fluviali che attraversano aree poco utilizzate dall'uomo. Conviene tollerare piccoli danni in tali zone al fine di ridurre quelli ben più consistenti nelle fasce fluviali fortemente urbanizzate.

### 3.8 - Rapporti tra i principali parametri idraulici

La superficie di letto bagnato è funzione della larghezza dello stesso e dipende a sua volta dalla pendenza dell'alveo e dalla portata. Considerando costante la pendenza, la funzione che lega portata (**Q**) e larghezza di alveo bagnato (o perimetro bagnato **Pb**) e quindi superficie di fondo, è di tipo esponenziale:

$$Pb = K_1 \cdot Q^a \quad (1)$$

Dove "**K<sub>1</sub>**" ed "**a**" sono tipiche di ogni corso d'acqua. In assenza di misure specifiche per la determinazione dei due coefficienti, si ipotizza una variazione di **S** secondo la radice quadrata di **Q** ( $a = 0,5$ ):

$$Pb = K_1 \cdot \sqrt{Q} \quad (2)$$

Esistono relazioni analoghe tra la profondità media ( $hm \cong R$ ) e velocità media ( $v$ ) rispetto alla portata ( $Q$ ):

$$R \cong hm = K_2 \cdot Q^b \quad (3)$$

$$v = K_3 \cdot Q^c \quad (4)$$

Anche in tali casi i parametri “ $K_2$ ”, “ $K_3$ ”, “ $b$ ” e “ $c$ ” sono caratteristici di ogni corso d’acqua. In ogni caso devono essere soddisfatte le seguenti condizioni:

$$a + b + c = 1 \quad (5)$$

$$K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 = 1 \quad (6)$$

Effettuando una misura di portata sul corso d’acqua e determinando quindi i parametri morfometrici fondamentali della sezione di deflusso, fra i quali il perimetro bagnato ( $Pb$ ), è possibile determinare “ $K_1$ ” risolvendo rispetto alla (3). Quindi si procede al calcolo dei valori di “ $Pb$ ” in funzione di portate diverse. Inoltre se vale l’equazione (5) e avendo posto  $a = 0,5$  risulta  $b + c = 0,5$ . Pertanto, approssimando molto, si pone  $b = c = 0,25$ . Ciò permette il calcolo dei valori “ $K_2$ ” e “ $K_3$ ” e quindi di “ $R$ ” e “ $v$ ” in funzione di portate diverse. La verifica di tale ragionamento è affidata al prodotto dell’equazione (6) che deve risultare prossimo ad 1.

Può essere utile proporre un esempio concreto. La **fig. 3.19** illustra i risultati di una misura di portata in corrispondenza di una sezione di un piccolo corso d’acqua. La superficie della sezione ( $S = 101 \text{ dm}^2$ ) è risultata dal prodotto tra la larghezza dell’alveo bagnato ( $Pb = 44 \text{ dm}$ ) e la profondità media ( $hm = 2,3 \text{ dm}$ ). Il rapporto tra la portata misurata ( $Q = 253 \text{ l/s}$ ) e la superficie ( $S$ ) rappresenta la velocità media dell’acqua ( $v = 2,5 \text{ dm/s}$ ). Ponendo  $a = 0,5$  e  $b = c = 0,25$ , si sono ricavati, dalle formule 2), 3) e 4), i valori  $K_1 = 8,747$ ,  $K_2 = 0,327$ , e  $K_3 = 0,350$  (con prodotto  $K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 = 1,001$ ).

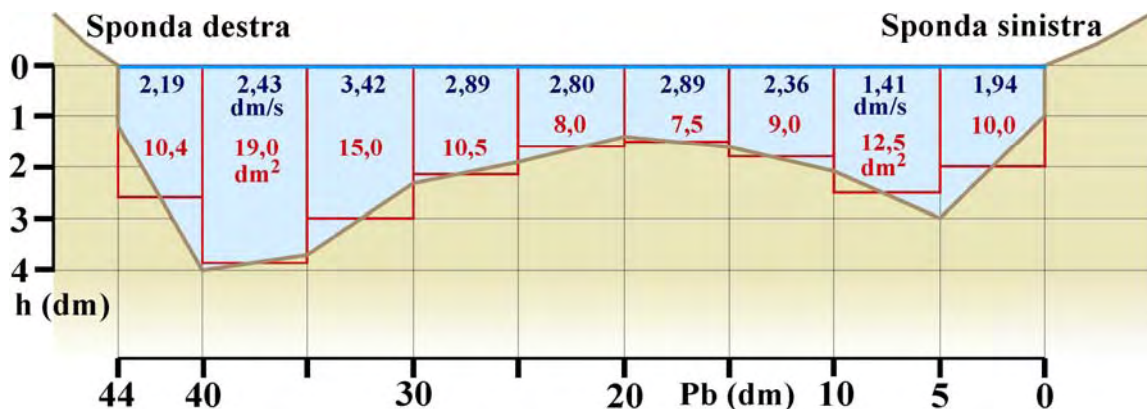


**Fig. 3.19** - Misura di portata.

**A sinistra** è illustrata una sezione di un piccolo corso d’acqua ove è stata effettuata una misura di portata, risultata  $Q = 253 \text{ l/s}$ , con  $Pb = 44 \text{ dm}$ ,  $v = 2,5 \text{ dm/s}$  e  $hm = 2,3 \text{ dm}$ .

**In basso:** in rosso sono indicate le sottosezioni di misura e le velocità medie di corrente per ciascuna).

Utilizzando le formule citate nel testo, si è constatato che, nel caso in cui la portata scenda al valore di  $105 \text{ l/s}$  (-60 %), diventerebbe  $Pb = 28 \text{ dm}$  (-36 %),  $v = 2,0 \text{ dm/s}$  (-20 %) e  $hm = 1,9 \text{ dm}$  (-17 %).



Noti pertanto tutti i coefficienti delle tre succitate formule è stato possibile ricavare i parametri idraulici ipotizzando una riduzione del 60 % della portata, cioè in condizioni di magra per quel corso d'acqua. Ad un approccio superficiale si potrebbe pensare ad una proporzionale riduzione di velocità dell'acqua, della profondità e della larghezza dell'alveo bagnato. In realtà tali parametri si riducono in modo decisamente meno evidente. Le riduzioni della velocità della corrente e della profondità media sono intorno al 20 % ed al 17 % rispettivamente. Abbiamo visto le relazioni che legano portata e superficie della sezione (**figg. 3.12 e 3.15**): la riduzione della portata ( $Q$ ) va ripartita tra velocità ( $v$ ) e superficie ( $S$ ) e questa a sua volta tra la larghezza ( $P_b$ ) e la profondità ( $h_m$ ).

Il caso sopra descritto è utile non solo per meglio illustrare i rapporti tra i principali parametri idraulici, ma anche per definire una possibile metodologia per descrivere le variazioni di tali parametri in funzione della portata. È una procedura che, basata su una sola misura di portata, fornisce indicazioni molto generali sugli ordini di grandezza in gioco. Sarebbe necessario caratterizzare in modo molto più preciso le caratteristiche morfometriche della sezione per procedere quindi alla misura di numerose portate in diverse situazioni idrometeorologiche. Si otterrebbe, in tal modo, una "scala di deflussi" opportunamente tarata, in grado quindi di fornire indicazioni attendibili. Si tratta tuttavia di un procedura lunga (almeno una decina di misure nell'arco di un anno), complessa e costosa. Soprattutto occorre riflettere sull'utilità dei dati che si ottengono.

Solitamente, negli studi di valutazione di impatto ambientale relativi a progetti che comportano captazioni d'acqua dai fiumi per usi diversi (prevalentemente agricolo e idroelettrico), viene richiesta una indagine riguardante la modificazione del regime idraulico conseguente alla riduzione delle portate, al fine di valutare i possibili effetti sulle cenosi acquatiche. Bisogna ammettere che tale richiesta viene normalmente effettuata da chi ha poca esperienza nel settore degli studi sugli ambienti fluviali. La ricostruzione del regime idraulico conseguente alla riduzione delle portate indotta da captazioni idriche (ad esclusione delle situazioni di morbida e di piena), nel caso in cui siano attesi risultati caratterizzati da una buona attendibilità, sono molto impegnativi, sotto il profilo dei tempi e dei costi, rispetto agli obiettivi che si vogliono conseguire. Inoltre le misure morfometriche ed idrauliche sono tecnicamente possibili solo sui piccoli corsi d'acqua, con portate non superiori a pochi metri cubi al secondo<sup>1</sup>. Infine, fatto più importante, anche disponendo di dati affidabili sulle variazioni dei parametri idraulici, alla luce delle conoscenze attuali, non è possibile prevedere, in termini quantitativi, come solitamente richiesto, le reazioni delle comunità acquatiche

---

<sup>1</sup> Le stazioni idrometriche fisse sono sistemi strutturali complessi ed ubicati in siti strategici del reticolo idrografico superficiale naturale e sono gli unici sistemi affidabili per la misura di portate nei più grandi fiumi.