

INDICE**1 PRINCIPI TEORICI PER LA TRATTAZIONE DELLE CORRENTI A PELO LIBERO** **2****2 CALCOLO DELLE CONDIZIONI DI MOTO PER ALVEI CILINDRICI** **3****3 CALCOLO DELLE CONDIZIONI DI MOTO IN ALCUNE SEZIONI PARTICOLARI** **5**

3.1	ATTRAVERSAMENTO DEI PONTI MASSICCI	5
3.2	ATTRAVERSAMENTI STRADALI MINORI	7
3.3	BRIGLIE E TRAVERSE	8
3.4	TRATTI TOMBINATI	8

BIBLIOGRAFIA **9**

1 Principi teorici per la trattazione delle correnti a pelo libero

Le altezze di corrente vengono stimate sulla base delle teorie che illustrano i principi del moto a pelo libero della corrente, secondo le quali le principali grandezze che caratterizzano le condizioni di moto (altezza e velocità di corrente) possono essere desunte da considerazioni relative all'energia complessiva posseduta dalla corrente in transito nell'alveo, composta dalla somma dei termini di energia potenziale (correlata alla quota assoluta del fondo alveo), energia di pressione (legata all'altezza del pelo libero sul fondo) ed energia cinetica (legata alla velocità di transito della corrente nella sezione).

Per una migliore comprensione dei termini successivamente utilizzati, si illustrano brevemente i principi basilari della teoria, senza ovviamente pretendere di esaurire la materia né di addentrarsi nella discussione puntuale delle formulazioni matematiche che la compendiano.

Fissati un valore di portata, un valore dell'energia totale della corrente (indicata con H) ed una sezione (e fissata, di conseguenza, una quota assoluta del fondo), il termine legato all'energia cinetica della corrente deve decrescere al crescere dell'altezza del pelo libero (poiché all'aumentare dell'altezza cresce la sezione attraverso cui passa la corrente, e ciò comporta una diminuzione della velocità di transito). Viceversa, il termine legato alla pressione cresce, come è ovvio, con l'aumentare del livello del pelo libero.

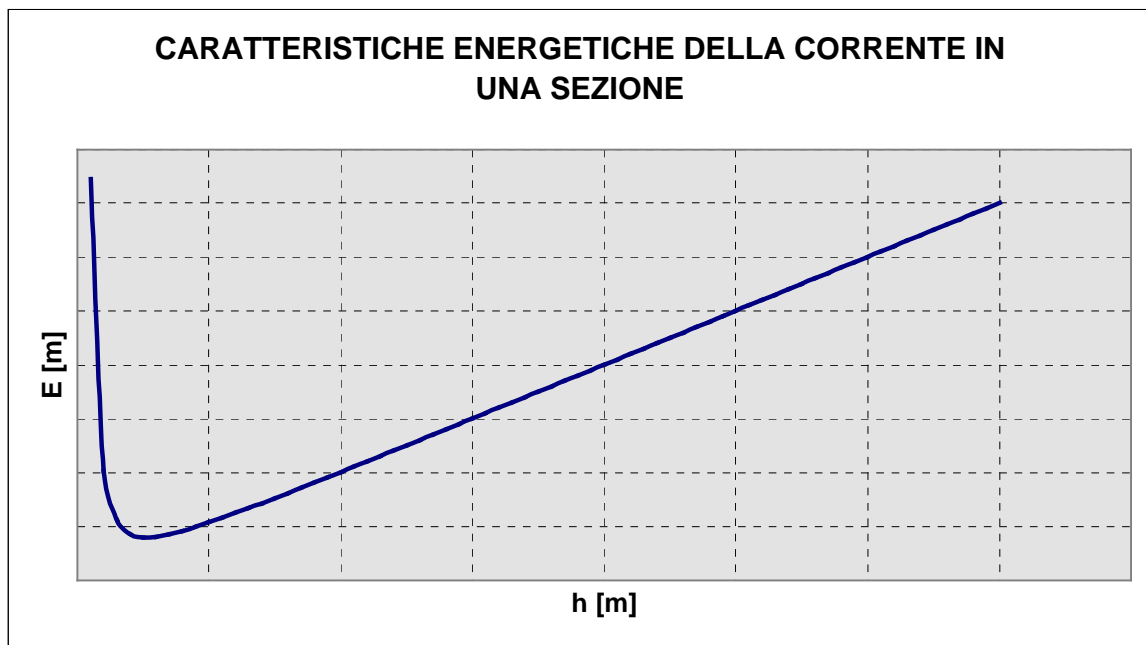


Figura 1: grafico per l'illustrazione del rapporto fra energia specifica ed altezza di corrente, a portata costante

La somma dei due termini, che esprime il legame tra altezza e velocità, assume pertanto valori estremamente grandi sia per altezze molto basse, prossime allo zero, sia per altezze molto alte. La

forma della relazione esistente tra questa somma (di norma indicata con il simbolo E - energia specifica rispetto al fondo dell'alveo) ed h (altezza di corrente) deve essere del tipo di quella indicata nella figura che segue (fig. 1), con due rami ascendenti ed un punto di minimo. Al punto di minimo corrisponde quello che in idraulica è definito come “stato critico”, che può essere definito come la situazione di minima energia totale necessaria ad una corrente per transitare attraverso una certa sezione. Se l'energia totale a disposizione della corrente è inferiore al valore E, è necessario che a monte della sezione la corrente recuperi energia, tramite un meccanismo denominato “risalto”, che verrà più oltre sommariamente illustrato, fino a raggiungere il valore minimo richiesto per il passaggio in condizioni “critiche”. In tale stato, tanto la velocità quanto l'altezza di corrente assumono la denominazione di “critica”.

I due rami ascendenti verso sinistra e verso destra della curva rappresentata in fig. A.2.1 rappresentano rispettivamente le correnti “veloci” (quelle nelle quali l'altezza del pelo libero è inferiore all'altezza critica, e nelle quali di conseguenza l'energia cinetica prevale rispetto a quella legata alla pressione) e le correnti “lente” (nelle quali, al contrario, il termine cinetico è secondario).

La differenza fondamentale fra i due tipi di corrente sta nelle modalità con cui esse reagiscono di fronte ad ostacoli che perturbino il deflusso regolare verso valle della corrente stessa. In caso di corrente “veloce”, la velocità di corrente è maggiore della velocità di propagazione verso monte delle onde prodotte dall'ostacolo, per cui gli effetti della perturbazione possono essere avvertiti soltanto a valle dell'ostacolo. Viceversa, in caso di correnti “lente”, la velocità è minore della velocità di propagazione verso monte delle onde, e l'effetto della presenza di un ostacolo può essere avvertito sia verso monte che verso valle. In altre parole, una corrente “veloce” è condizionata soltanto da ciò che avviene nelle sezioni di monte; una corrente “lenta” è condizionata anche da ciò che accade a valle. Questa importante differenza verrà ripresa in seguito, per illustrare le modalità di calcolo seguite nello studio.

2 Calcolo delle condizioni di moto per alvei cilindrici

Chiarite le condizioni energetiche di una corrente in una sezione, il calcolo delle condizioni di moto in una sezione successiva viene operato con applicazione del principio di conservazione dell'energia, considerando l'energia potenziale ceduta dalla corrente nel moto verso il basso (e trasformata in energia cinetica o di pressione) e l'energia persa per attrito contro le pareti dell'alveo.

L'espressione matematica dell'energia totale della corrente è la seguente:

$$H = z + h + \alpha \frac{V^2}{2g}$$

nella quale tutti gli addendi hanno le dimensioni di una lunghezza, ed α indica il cosiddetto “coefficiente di ragguglio dell'energia cinetica”, introdotto per tenere conto delle differenze esistenti fra la velocità massima della corrente, in centro all'alveo, e la velocità media della stessa..

Il principio di conservazione dell'energia fra due sezioni successive poste a distanza reciproca ΔL

si esprime tramite la seguente relazione:

$$H_1 = H_2 + J_{\text{med}} \Delta L$$

ove si è introdotta la nuova grandezza J , denominata cadente piezometrica, che indica la perdita di energia per unità di lunghezza dell'alveo, dovuta all'attrito contro pareti dell'alveo stesso. La cadente piezometrica in ciascuna sezione viene espressa utilizzando la formula di Manning, definendo preventivamente la "capacità di portata dell'alveo", K , come

$$K = A \frac{R^{2/3}}{n}$$

ove A è l'area della sezione di passaggio della corrente, R il raggio idraulico della sezione (rapporto fra area e contorno bagnato) ed n un coefficiente di scabrezza, ed esprimendo successivamente la cadente come

$$J = \frac{Q^2}{K^2}$$

Tramite K , la cadente è quindi una funzione univoca dell'altezza h . La cadente media nel tratto compreso fra due sezioni successive è banalmente stimata come valore medio fra esse.

Tenuto presente tutto ciò, note che siano le condizioni di moto nella sezione 1, la precedente relazione che esprime il principio di conservazione dell'energia può scriversi come

$$z_1 + h_1 + \alpha \frac{V_1^2}{2g} - \frac{Q^2}{K(h_1)^2} \cdot \frac{\Delta L}{2} = z_2 + h_2 + \alpha \frac{V_2^2}{2g} - \frac{Q^2}{K(h_1)^2} \cdot \frac{\Delta L}{2}$$

Tutti i termini a sinistra dell'uguale sono noti, mentre tutti i termini a destra, incogniti, possono essere espressi in funzione dell'altezza di corrente nella sezione 2.

Applicando in modo iterativo questo metodo di calcolo, è sufficiente assegnare le condizioni di moto in una sezione, per poter calcolare per passi successivi le condizioni di moto della medesima portata in tutte le rimanenti sezioni.

Notiamo, inoltre, che il processo di calcolo può avvenire indifferentemente procedendo da monte verso valle (a partire dalla conoscenza delle condizioni di moto nella sezione 1) o, viceversa, da valle verso monte, supponendo note le condizioni nella sezione 2. Ricordando quanto detto a proposito delle diverse reazioni alle perturbazioni proprie ai due tipi di corrente, osserviamo che un calcolo rigoroso comporterebbe un procedimento da monte verso valle per il caso di correnti "veloci", e da valle verso monte per il caso di correnti "lente". Nella pratica, i calcoli vengono di norma eseguiti da valle verso monte, ipotizzando sempre condizioni di moto proprie delle correnti "lente". Oltre ad essere un processo appropriato nella maggior parte dei casi (poiché di norma nei

tratti pianeggianti, più facilmente interessati da esondazioni, le correnti di piena transitano con velocità inferiore alla velocità “critica”), ai fini del calcolo delle aree esondabili ciò corrisponde all’introduzione di un fattore di sicurezza, in quanto si è già illustrato come, a parità di portata, una corrente “lenta” abbia un’altezza di moto superiore ad una corrente “veloce”. Qualora il calcolo produca, in una sezione di monte, condizioni di moto caratteristiche di una corrente “veloce”, il livello viene automaticamente innalzato sino al valore “critico”, introducendo un errore trascurabile ed in favore di sicurezza.

3 Calcolo delle condizioni di moto in alcune sezioni particolari

Le modalità di calcolo illustrate nel paragrafo precedente possono essere ritenute nei tratti nei quali le perdite energetiche sono soprattutto dovute all’attrito della corrente contro le pareti, in quanto le traiettorie seguite dalle singole particelle d’acqua possono essere considerate parallele. La corrente, in questo caso, viene detta corrente “gradualmente variata”.

Tutti i casi nei quali le perdite energetiche sono prevalentemente dovute alla collisione tra le diverse particelle che seguono traiettorie sensibilmente differenti l’una dall’altra debbono essere individuate e trattate separatamente, con riferimento alle categorie indicate nei paragrafi seguenti.

3.1 Attraversamento dei ponti massicci

Sotto questa denominazione vengono designati tutti quegli attraversamenti, stradali e ferroviari, di dimensioni tali, in altezza, da rendere praticamente impossibile l’eventualità che la corrente possa completamente sommergerli, e nei quali le perdite energetiche sono dovute principalmente alla deviazione delle traiettorie delle singole particelle fluide per il passaggio attraverso le pile.

L’esecuzione del calcolo è ripartita in due fasi. In una prima fase, semplificando, si suppone che il passaggio fra le pile avvenga senza dissipazione di energia. Fissato il livello a monte (o a valle) delle pile, si calcolano la velocità di deflusso e l’energia specifica della corrente (che dipendono unicamente dalla portata in transito, dall’altezza e dalla forma della sezione).

Ciò fatto, si passa a considerare la sezione dell’alveo in corrispondenza delle pile del ponte, e, per questa sezione, si traccia il grafico che rappresenta l’energia specifica (E) in funzione dell’altezza di corrente, a portata costante, come già illustrato in precedenza (si veda par. 1 e grafico di fig. 1).

Come già diffusamente indicato, questo grafico presenta un punto di minimo, che corrisponde allo stato critico. Se l’energia corrispondente allo stato critico nella sezione tra le pile del ponte è inferiore a quella a disposizione della corrente, l’altezza di moto sotto il ponte è quella cui corrisponde, nel grafico, il valore di energia in precedenza calcolato (tenuto conto che per correnti “veloci” deve essere preso in considerazione il ramo sinistro della curva, e per correnti “lente” il lato destro). Se, viceversa, l’energia a disposizione della corrente è inferiore a quella minima richiesta per il passaggio tra le pile, il passaggio sotto al ponte avviene allo stato critico, e la corrente, a monte dell’attraversamento, deve subire un “risalto” per innalzare bruscamente il livello del proprio pelo libero, acquistando così quella quota di energia che le è necessaria per attraversare il ponte.

I due casi sono schematicamente illustrati in fig. 2: la linea rossa indica l’energia a disposizione della corrente, e la linea nera esprime la relazione tra altezza di corrente ed energia specifica in

corrispondenza dell'attraversamento del ponte. Nel primo caso, il livello della corrente corrisponde ad uno dei due livelli nei quali le due linee si intersecano (quello minore, se la corrente è “veloce”, e quello maggiore, se la corrente è “lenta”). Nel secondo caso, l'energia a disposizione della corrente è insufficiente per conseguire il restringimento della vena imposto dalle dimensioni del ponte: l'energia mancante alla corrente verrà da questa recuperata con “risalto” a monte dell'attraversamento, con rallentamento della velocità ed innalzamento del livello, e l'attraversamento avverrà esattamente allo stato critico.

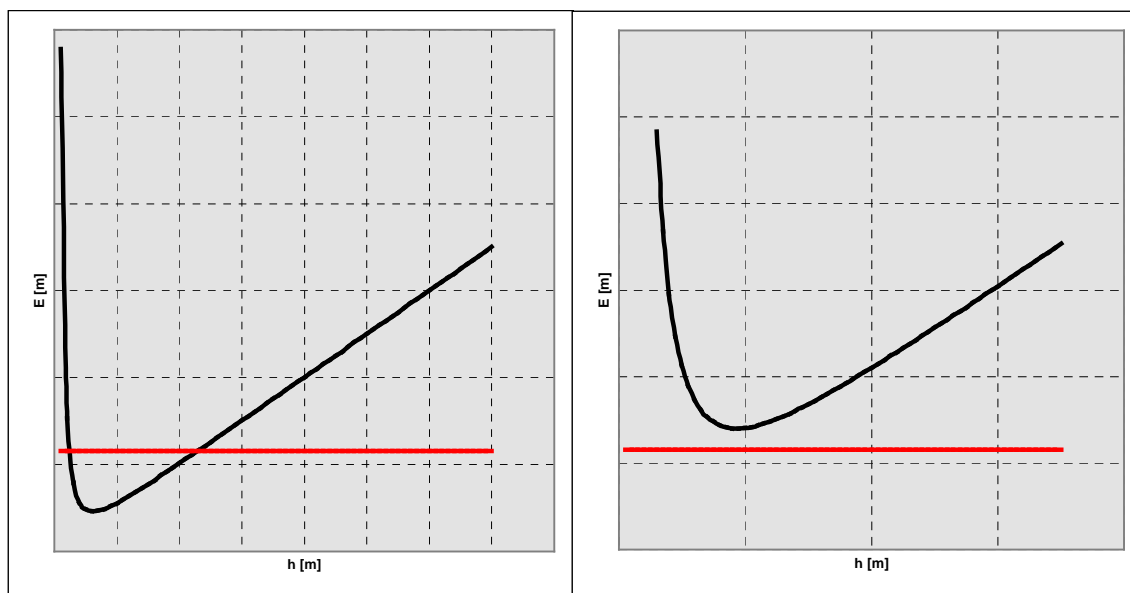


Figura 2: influenza dell'energia specifica posseduta dalla corrente nella determinazione delle condizioni di transito attraverso le pile di un ponte. La linea rossa indica l'energia a disposizione della corrente a monte del ponte; la linea nera rappresenta la relazione tra livello della corrente ed energia in corrispondenza del passaggio tra le pile del ponte. Nel caso a sinistra, l'energia disponibile è sufficiente a consentire il passaggio tra le pile, e la corrente si sposta lungo la linea rossa verso sinistra o verso destra per incrociare la curva nera, determinando così il livello in corrispondenza dell'attraversamento. Nel caso a destra, l'energia è insufficiente, e la corrente in arrivo da monte deve passare attraverso un risalto per acquisire quel tanto di energia che le manca per attraversare il ponte in condizioni di minima energia (stato critico).

Una volta individuate le modalità di transito della corrente, il calcolo delle perdite energetiche dovute all'attraversamento viene operato tramite l'impiego delle relazioni sperimentali di Yarnell. In assenza di risalto, queste esprimono il rigurgito complessivo tra monte e valle dell'attraversamento attraverso la relazione che segue:

$$z_m - z_v = h_v \cdot [K_f F_v^2 \cdot (K_f + 5 F_v^2 - 0,6) \cdot (z + 15 z^4)]$$

nella quale:

- h_v indica il livello del pelo libero di valle;
- F_v esprime la grandezza nota come “numero di Froude” della corrente, calcolata come $V/\sqrt{gA/B}$ (ove A è l'area della sezione e B la sua larghezza);
- K_f è un coefficiente di forma, che dipende dalla conformazione delle pile (con valori compresi tra 0,9 – per pile arrotondate – e 1,25 – per pile squadrate);

- ζ è il rapporto di ingombro delle pile (dato dalla relazione $1 - b/B$, ove b indica la larghezza della sezione disponibile tra le pile).

In presenza di risalto, invece, il rigurgito tra le sezioni di ingresso e di uscita dall'attraversamento è dato dalla seguente semplice espressione:

$$z_m - z_v = E_{K,p} / 3,$$

ove si è indicata con $E_{K,p}$ l'altezza cinetica in corrispondenza delle pile del ponte.

3.2 Attraversamenti stradali minori

A questa categoria verranno assimilati tutti quegli ostacoli orizzontali posti lungo il corso della roggia ad una quota tale da poter essere raggiunti e superati dall'onda di piena in transito. Tipicamente, questo è il caso degli attraversamenti stradali "minori" (passerelle pedonali, manufatti per l'accesso a proprietà private, etc.), ma può essere esteso, ad esempio, al caso non infrequente dell'attraversamento dell'alveo da parte di tubi di fognatura o da servizi a rete normalmente interrati.

Il calcolo è eseguito nell'ipotesi che la portata transiti in parte al di sotto dell'ostacolo (nel qual caso le perdite energetiche sono dovute essenzialmente alla contrazione della sezione della corrente), ed in parte al di sopra dell'ostacolo, secondo il meccanismo idraulico noto sotto il nome di "stramazzo a larga soglia".

Il contributo di portata in transito al di sotto dell'ostacolo viene calcolato come

$$Q_1 = \mu A [2g(z_m - z_v)]^{1/2}$$

ove:

- μ indica un coefficiente di efflusso (pari a 0,60, sperimentalmente determinato);
- A è l'area complessiva della sezione;
- g rappresenta l'accelerazione di gravità ($9,81 \text{ m/s}^2$);
- $(z_m - z_v)$ indica il rigurgito provocato dall'ostacolo.

Il contributo di portata in transito al di sopra del piano stradale, posto a quota z_{ps} , risulta dall'applicazione della formula degli "stramazzi a larga soglia":

$$Q_2 = \mu_s B (z_m - z_{ps}) [2g(z_m - z_{ps})]^{1/2},$$

nella quale B rappresenta la larghezza di calcolo ed ove il coefficiente di efflusso μ_s assume il valore sperimentale 0,387. Qualora il piano stradale risulti inferiore al livello di valle, alla quota del piano stradale deve essere sostituita la quota della corrente di valle, z_v .

3.3 Briglie e traverse

Briglie e traverse sono opere di regimazione fluviale disposte trasversalmente alla corrente per ridurre localmente la velocità, o per consentire derivazioni di portata.

Di norma, le briglie vengono assimilate a “stramazzi a larga soglia”, ed il calcolo delle condizioni di moto generate dalla presenza di una briglia sono analoghe a quanto visto nel paragrafo precedente, con esclusione del contributo dato dal passaggio sotto al ponte.

Vi sono però, specie lungo i corsi d’acqua minori ed ove sia disponibile notevole pendenza, situazioni nelle quali la briglia assume nella direzione della corrente una lunghezza minima, ed è seguita a valle da un tratto di alveo notevolmente più ripido. In questi casi, lo sviluppo della briglia non è sufficiente a dare luogo alle condizioni teoriche caratteristiche dello “stramazzo a larga soglia”, e l’altezza in corrispondenza dello sbarramento, corrispondente al passaggio da condizioni di moto da corrente “lenta” (a monte) a corrente “veloce” (a valle) è direttamente equiparata all’altezza critica.

3.4 Tratti tombinati

Anche nel calcolo dei tratti tombinati si possono avere due distinte condizioni di funzionamento, a seconda che il moto avvenga a pelo libero o in pressione, con occupazione dell’intera sezione disponibile.

Il caso più semplice da affrontare è quello del moto a pelo libero, che viene trattato analogamente a quanto visto per le correnti gradualmente variate, avendo unicamente l’accortezza di fare uso di coefficienti di scabrezza adeguati (trattandosi di canalizzazioni artificiali, il fondo e le pareti sono normalmente molto più lisce che quelle degli alvei naturali).

Qualora il moto avvenga in pressione, l’espressione del bilancio energetico dovrà essere integrata considerando le perdite di imbocco, date dalla relazione che segue

$$\Delta H_{\text{imb}} = 1,50 [Q^2/(2gA^2)],$$

ove A indica l’area della sezione di imbocco, Q indica la portata in transito e g l’accelerazione di gravità. In condizioni di moto in pressione, la cadente J normalmente cresce in maniera considerevole rispetto a quanto si può calcolare in condizioni di moto a superficie libera, a causa della notevole diminuzione del raggio idraulico, a parità di area, collegata all’aumento repentino del contorno bagnato.

Varese, Aprile 2002

Il professionista
dott. ing. Giorgio Amolari

Bibliografia

Citrini, d.; Nosedà, G.: “Idraulica”, Milano, Casa Editrice Ambrosiana, 1982

Cunnane, C.: “Statistical Distributions for Flood Frequency Analysis”, Operational Hydrology Report n. 33, Ginevra, World Meteorological Organization, 1989

Maione, U.; Mignosa, P.: “Il funzionamento idraulico dell’incile del lago Maggiore: modello matematico del lago allo sbarramento di Porto della Torre e ricostruzione delle piene dell’autunno 1991 e 1993”, Pubblicazione n. 19, Milano, Consorzio del Ticino, giugno 1995

Maione, U.; Moisello, U.: “Elementi di statistica per l’idrologia”, Pavia, La Goliardica Pavese, 1993

Moisello, U. et al.: “Rischio idraulico e rischio dighe”, Piano Provinciale di Previsione e Prevenzione di Protezione Civile della Provincia di Varese, Dipartimento di Ingegneria Idraulica ed Ambientale dell’Università di Pavia, 1998