Comune di S. Donato Milanese

VALUTAZIONE DELLE CONDIZIONI DEL RISCHIO IDRAULICO DEL FIUME LAMBRO IN COMUNE DI SAN DONATO MILANESE

Studio di compatibilità idraulica delle previsioni del Piano di Governo del Territorio per la perimetrazione e valutazione delle condizioni di rischio delle aree soggette ad esondazione del fiume Lambro.

D.G.R.IX/2616/2011, All.4 e D.G.R.X/6738/2017

Dirigente Area Gestione Territorio, Urbanistica e Opere Pubbliche: Arch. Giampaolo Porta

Responsabile Servizio Urbanistica ed Edilizia: Arch. Angelo Gualandi

ALLEGATO 2: MODELLO DI SIMULAZIONE IDRAULICA

R1. Aprile 2021

STANTEC S.p.A.
Centro Direzionale Milano 2
Palazzo Canova
20090 Segrate (Mi)

Dott. Ing. Roberto Keffer
Ordine degli Ingegneri della Provincia di Milano n° 10669

1. IL MODELLO DI CALCOLO IDRAULICO

1.1 Inquadramento territoriale

Per il tracciamento dei profili di corrente si è utilizzato il codice di calcolo Hec-Ras, sviluppato dall'Hydrologic Engineering Center dell'U.S. Army Corps of Engineers, USA; il calcolo è stato svolto in condizioni di moto permanente.

2. DESCRIZIONE DELLE METODOLOGIE DI CALCOLO

2.1 Calcolo del profilo di corrente

L'equazione fondamentale per il tracciamento dei profili di corrente in moto permanente è rappresentata dall'equazione di bilancio dell'energia.

L'equazione di bilancio dell'energia (equazione 1) mette in relazione l'energia totale posseduta da una corrente in una generica sezione 2 disposta lungo l'alveo con l'energia totale di una sezione 1 disposta ad una distanza Δs:

$$z_2 + y_2 + \alpha_2 \frac{v_2^2}{2g} = z_1 + y_1 + \alpha_1 \frac{v_1^2}{2g} + h_f + perdite\ localizzate \quad (1)$$

dove:
z = quota di fondo (m);
y = altezza idrica (m);
$\alpha =$ coefficiente di ragguaglio dell'energia cinetica;
v = velocità media di portata (m/s);
h_f = perdite di carico continue (m);
g = accelerazione di gravità = 9.81 m/s^2.

Le perdite di carico continue possono essere valutate mediante la classica formula di resistenza di Manning:

$$h_f = n^2 \cdot R^{-4/3} \cdot v^2 \cdot \Delta s \quad (2)$$

in cui R è il raggio idraulico e n è il coefficiente di resistenza Manning.

La linea del carico totale è la linea che unisce le quote del carico totale associate nelle diverse sezioni alla relativa altezza idrica.

I termini contenuti nell'equazione dell'energia sono esplicitati nella Figura 1.

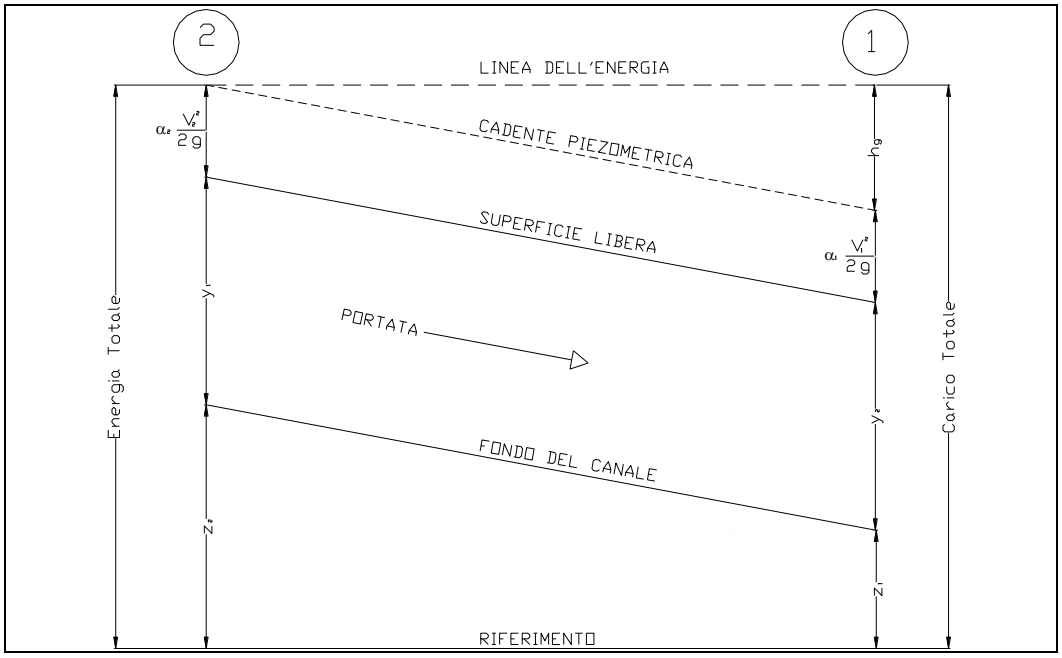

Figura 1 - Elementi caratteristici dell'equazione dell'energia

In sintesi, i dati necessari per l'effettuazione dei calcoli richiedono, oltre alla conoscenza delle sezioni trasversali, le seguenti informazioni:

- distanza della sezione considerata da quella immediatamente a valle, misurata lungo l'asse dell'alveo ordinario;
- indicazione delle sponde nella sezione trasversale;
- eventuale presenza di argini, intesi a individuare la parte attiva del corso d'acqua;
- coefficiente di scabrezza di Manning "n" (tale valore può risultare variabile all'interno della sezione);
- coefficienti di contrazione e di espansione della vena liquida per il calcolo delle perdite di carico localizzate.

La procedura di integrazione numerica per passi successivi dell'equazione (1) consente, una volta che sia nota l'altezza idrica in una sezione, di determinare l'altezza idrica in una sezione posta a valle, nel caso di correnti veloci, o di una sezione posta a monte, nel caso delle correnti lente.

La procedura è sinteticamente descritta nella tabella che segue.

Passo	Azione
1	Selezionare la portata da utilizzare
2	Determinare la sezione di partenza e stabilire l'altezza idrica iniziale y_1 e calcolare tutte le variabili relative alla sezione
3	Assumere un'altezza idrica y_2 nella sezione 2 ed utilizzare questo valore per calcolare le variabili relative alla sezione 2
4	Calcolare le perdite di carico continue (h_f) tra le due sezioni
5	Calcolare i coefficienti di ragguaglio α_1 e α_2 dell'energia cinetica
6	Calcolare le perdite concentrate dovute ad eventuali espansioni e/o contrazioni
7	Controllare il bilancio nell'equazione dell'energia
8	Calcolare l'altezza critica e l'altezza di moto uniforme
9	Assegnare l'altezza calcolata e procedere con la sezione successiva 3, in maniera simile a quanto fatto per la sezione 2
10	Ripetere i passi da 2 a 9 passi fino a che tutte le sezioni siano state calcolate

Tabella 1 - Descrizione schematica della procedura di integrazione numerica dell'equazione dell'energia (1)

Si procede di seguito alla descrizione dei singoli passi:

Passo 1: sulla base dello studio idrologico si seleziona la portata (o le portate) da utilizzare;

Passo 2: con riferimento alla Figura 1 si determina l'altezza idrica iniziale. Nel caso di corrente lenta si parte dall'ultima sezione disposta a valle, nel caso di corrente veloce si parte dalla prima sezione a monte. Al fine di stabilire l'altezza idrica iniziale si utilizza una delle seguenti condizioni:

- altezza idrica misurata;
- scala di deflusso nota;
- condizione di moto uniforme;
- condizione di stato critico.

Una volta assegnata l'altezza idrica nella sezione 1 si calcolano le seguenti variabili:

$$V_1 = \frac{Q_1}{A_1} \qquad h_1 = \frac{V_1^2}{2g}$$

dove:
Q = portata di calcolo (m^3/s).
A_1 = area della sezione (m^2);
V_1 = velocità media nella sezione (m/s);
g = accelerazione di gravità = 9.81 m/s^2.

Passo 3: si assume un'altezza idrica y2 nella sezione 2 e utilizzando y2 si calcolano le seguenti variabili:

$$V_2 = \frac{Q_2}{A_2} \qquad h_2 = \frac{V_2^2}{2g}$$

Passo 4: si calcolano le perdite di carico continue tra le due sezioni utilizzando le seguenti equazioni:

$$h_f = L\left(\frac{Q}{k_m}\right)^2 \tag{3}$$

$$k_m = \frac{k_1 + k_2}{2};\ k_1 = \frac{A_1 R_1^{2/3}}{n}; k_2 = \frac{A_2 R_2^{2/3}}{n} \tag{4}$$

dove:
R = raggio idraulico (m);
L = distanza tra le sezioni (m).

Passo 5: si calcolano i coefficienti di ragguaglio dell'energia cinetica (eq. 1 e 2)

Passo 6: quando presenti, si calcolano le perdite di carico per espansione e per contrazione utilizzando le equazioni 5 e 6.

$$h_e = K_e \frac{\Delta V^2}{29} \tag{5}$$

dove:
- Ke = 0.3 per espansione graduale;
- Ke = 0.5 per espansione brusca;

$$h_c = K_c \frac{\Delta V^2}{29} \tag{6}$$

dove:
- Kc = 0.1 per contrazione graduale;
- Kc = 0.3 per contrazione brusca.

Passo 7: si verifica che sia soddisfatta l'equazione di bilancio dell'energia mediante le equazioni 7 e 8.

$$L = z_2 + y_2 + \alpha_2 \frac{v_2^2}{2g} \tag{7}$$

$$R = z_1 + y_1 + \alpha_1 \frac{v_1^2}{2g} + h_f + h_e + h_c \qquad (8)$$

- se $L = R \pm \delta$, dove δ indica un prefissato valore di tolleranza accettabile, si può assumere che l'altezza idrica assunta per il calcolo sia corretta e si può procedere al passo successivo 8;
- se invece L≠R, si ritorna al passo (3) assumendo un nuovo valore dell'altezza idrica y2 .

Passo 8: si calcolano l'altezza critica yc e l'altezza di moto uniforme yu. L'altezza critica rappresenta il valore dell'altezza idrica in corrispondenza del minimo valore assunto dall'energia specifica per un assegnato valore della portata. Nel caso di una sezione di forma semplice l'altezza idrica è unica, nel caso di sezioni di forma geometrica più complessa, ad esempio a banchina, l'equazione del carico totale può presentare più minimi relativi.
Operativamente l'altezza critica viene determinata risolvendo iterativamente l'equazione 9:

$$\frac{Q^2}{g} = \frac{A_c^3}{L_c} \qquad (9)$$

dove:
Lc = larghezza in superficie (m);
Ac = area della sezione (m^2).

L'altezza di moto uniforme viene calcolata risolvendo iterativamente la formula di resistenza di Manning.

- Se nel corso del calcolo di una corrente lenta (governata da valle) non viene determinata l'altezza y_2 o essa risulta inferiore a quella critica alla sezione 2 viene assegnata il valore dell'altezza critica y_c;
- Se nel corso del calcolo di una corrente veloce (governata da monte) non viene determinata l'altezza y_2 o essa risulta superiore a quella critica alla sezione 2 viene assegnata il valore dall'altezza critica y_c.

Passo 9: una volta assegnata l'altezza idrica calcolata ai passi 7 o 8 si ripetono i passi da 2 a 8.

Passo 10: si ripetono tutti i passi da 1 a 9 fino a completare il calcolo in tutte le sezioni.

La presenza di eventuali sezioni nelle quali siano state assegnate condizioni di stato critico (passo 8) indicano la possibilità che siano presenti dei risalti idraulici. In tale caso il calcolo del profilo di corrente risulta più complesso. È ben noto,

infatti, che per la risoluzione del risalto idraulico non si può utilizzare l'equazione dell'energia, bensì bisogna fare ricorso all'equazione globale ed in particolare alla determinazione della spinta totale. In tale condizione i passi della procedura di calcolo risultano i seguenti:

Passo 1: calcolo, a partire dalla sezione di valle, del profilo di corrente lenta come riportato nella descrizione della procedura standard. Nel corso del calcolo vengono determinate le spinte relative a tutte le sezioni e vengono evidenziate tutte le sezioni in cui si riparte da condizioni di stato critico.

Passo 2: calcolo, a partire dalla sezione di monte, del profilo di corrente veloce con conseguente determinazione del valore della spinta:

- se la spinta della corrente veloce, governata da monte, risulta maggiore della spinta della corrispondente corrente lenta (passo 1), si assume che la corrente sia veloce ed il calcolo prosegue passando alla successiva sezione di valle;
- se la spinta della corrente lenta, governata da valle (passo 1), risulta maggiore della spinta della corrente veloce di monte si assume il valore della altezza idrica corrispondente alla corrente lenta e la procedura di calcolo prevede che si inizi un nuovo calcolo in corrente veloce a partire dalla prima sezione di valle nella quale, nel corso della calcolo in corrente lenta (passo 1), era stata fissata altezza critica.

Passo 3: a partire dalla nuova sezione in stato critico il calcolo procede verso valle fintanto che in ogni sezione la spinta della corrente veloce di monte risulta maggiore della spinta in corrente lenta. Quando il calcolo raggiunge una sezione in cui la spinta della corrente lenta risulta maggiore della spinta in corrente veloce si presume che tra la sezione data e la precedente si verifichi un risalto idraulico.

Passo 4: il calcolo procede verso valle passando alla successiva sezione di valle nella quale si è stabilita, nel corso del passo 1, una condizione di stato critico, e ripetendo la procedura indicata al passo 2.

Passo 5: si reitera il passo 4 fino al completamento di tutte le sezioni nelle quali è stato riportata una condizione di stato critico.

2.2 Calcolo del profilo di corrente in presenza di un attraversamento

La presenza di un attraversamento comporta in generale la riduzione della sezione idrica disponibile per il deflusso della portata. L'influenza di un restringimento della sezione sul profilo di corrente nel corso d'acqua dipende delle caratteristiche geometriche dell'attraversamento stesso ed in particolare

dalla larghezza e dall'altezza della sezione lasciata libera per il deflusso della portata.

Nel seguito vengono brevemente illustrati gli aspetti relativi alla valutazione degli effetti della presenza di un ponte sul profilo di corrente. La Figura 2 mostra una vista planimetrica dell'area di inserimento di un ponte. Si possono riconoscere tre zone:

- zona 1 (a valle);
- zona 2 (in corrispondenza del ponte);
- zona 3 (a monte).

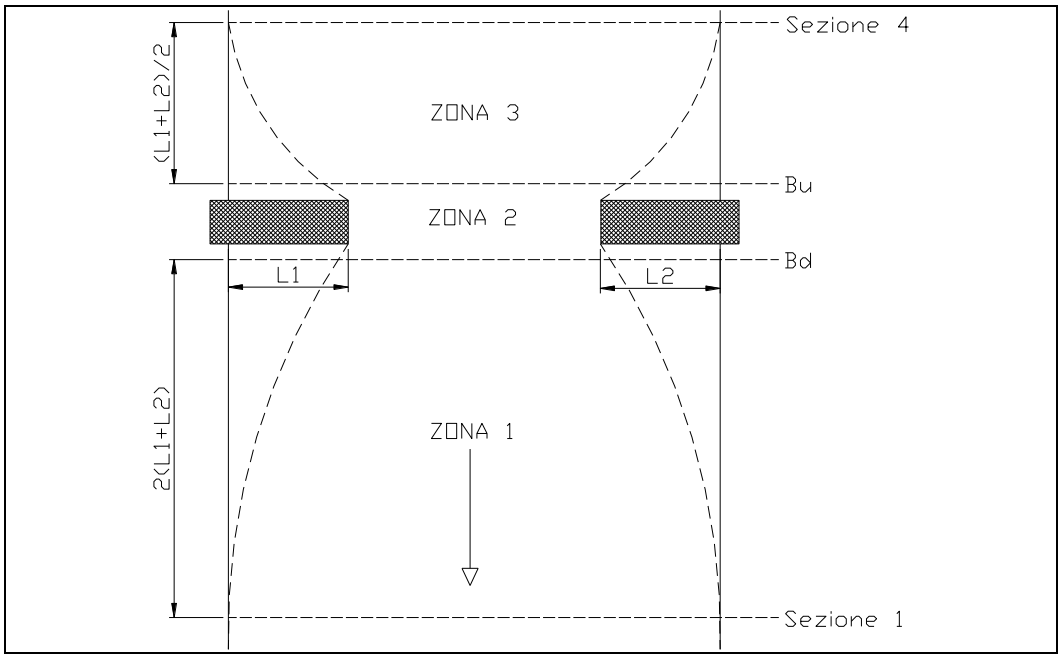

Figura 2 - Diverse zone di flusso in corrispondenza di un ponte

La sezione 4 in Figura 2 (talvolta indicata come sezione di approccio) rappresenta la geometria della sezione nella quale inizia il fenomeno di contrazione.
Le sezioni Bu e Bd, disposte immediatamente a monte ed a valle del ponte, rappresentano le sezioni geometriche che approssimano l'andamento della sezione ristretta in prossimità del ponte stesso.

La sezione 1 (talvolta indicata come sezione di uscita) rappresenta la geometria della corrente al termine della zona di espansione.

La zona 3 rappresenta la zona, posta a monte del ponte, all'interno della quale avviene il fenomeno di contrazione. In assenza di altre indicazioni si può assumere una distanza pari alla larghezza della sezione indisturbata diminuita della larghezza del ponte.

La zona 2 rappresenta l'area in prossimità del ponte, in questa sezione si generano notevoli perdite di carico concentrate.

La zona 1 rappresenta la zona posta a valle del ponte nella quale avviene il fenomeno di espansione della corrente. L'estensione di tale zona dipende dalla portata e dal rapporto relativo tra sezione ristretta del ponte e sezione dell'alveo, in assenza di altre indicazioni si può fare riferimento ad un valore di massima pari a 4 volte la larghezza della sezione indisturbata diminuita della larghezza del ponte.

Quando presente, il sopralzo del livello idrico, indotto dalla presenza di un ponte, risulta massimo nella sezione 4. È in ogni caso consigliabile proseguire il tracciamento del profilo di corrente a monte del ponte stesso fino a che la superficie idrica risulta praticamente coincidente con quella ottenuta in condizione di assenza del ponte.

Per quanto riguarda le condizioni idrauliche nella sezione di inserimento del ponte, in via del tutto generale, si possono individuare due condizioni di deflusso:

- deflusso libero;
- deflusso sommerso.

Il temine deflusso libero descrive la condizione idraulica per la quale la superficie idrica nelle zone 1, 2 e 3 è sempre in contatto con l'atmosfera, in altri termini il profilo idrico si trova tutto al di sotto dell'intradosso del ponte.

I possibili profili di corrente in condizioni di deflusso libero sono riportati nella tabella seguente:

Tipo di profilo	Descrizione
I	Corrente lenta in tutte le zone 1, 2 e 3
II A	Corrente lenta nelle zone 1 e 3, condizioni di stato critico nella zona 2
II B	Corrente lenta nella zona 3, condizioni di stato critico nella zona 2, risalto idraulico nella zona 1
III	Corrente veloce in tutte le zone 1, 2 e 3

La condizione di deflusso sommerso si riferisce al caso in cui la corrente interagisce con la sovrastruttura del ponte, in tale condizione, all'aumentare del livello idrico, possono identificarsi i seguenti casi:

- livello idrico a monte del ponte più elevato della quota di intradosso del ponte, ma nel contempo l'intradosso del ponte stesso non risulta completamente a contatto con la superficie idrica. In tale condizione l'efflusso è schematizzabile come un efflusso al di sotto di una paratoia;
- livello idrico a monte del ponte più elevato della quota di intradosso del ponte ed intradosso del ponte completamente a contatto con la superficie idrica, in

tale condizione il deflusso può assimilarsi a quello di un efflusso da una luce a battente;

- livello idrico a monte del ponte più elevato della quota di estradosso del ponte stesso con acqua che defluisce attraverso la luce del ponte ed al di sopra del piano stradale, in tale caso:
  1. se il tirante idrico al di sopra del piano stradale è limitato, l'altezza idrica a monte del ponte può essere valutata sommando i contributi relativi all'efflusso sotto battente, attraverso la luce del ponte, ed alla condizione di efflusso su una soglia al di sopra del piano stradale;
  2. se l'altezza idrica sul piano stradale eccede l'altezza critica la simulazione come luce a battente risulta inadeguata ed il calcolo può essere effettuato utilizzando l'equazione dell'energia o l'equazione globale all'interno delle quali la presenza del ponte è introdotta attraverso una semplice riduzione della sezione geometrica effettiva ed un incremento del perimetro bagnato.

Per quanto riguarda la procedura da utilizzare per il calcolo del profilo di corrente in prossimità di un ponte sono applicabili 2 approcci:

- equazione di bilancio dell'energia (procedura standard) da applicarsi se il ponte rappresenta un'effettiva contrazione rispetto alla sezione naturale e l'effetto delle pile è inesistente o trascurabile;
- equazione di bilancio della quantità di moto (equazione globale), da applicarsi se la corrente è veloce e la resistenza esercitata dalle pile è significativa.

Il ricorso all'equazione dell'energia richiama gli aspetti già descritti della procedura standard illustrata precedentemente; alcuni aspetti specifici vengono sommariamente descritti di seguito.

DEFLUSSO LIBERO

La Figura 3 mostra la posizione delle sezioni prossime al ponte da considerare per il calcolo del profilo di corrente; Bd e Bu si riferiscono alla geometria del ponte rispettivamente nella parte a valle ed a monte del ponte.

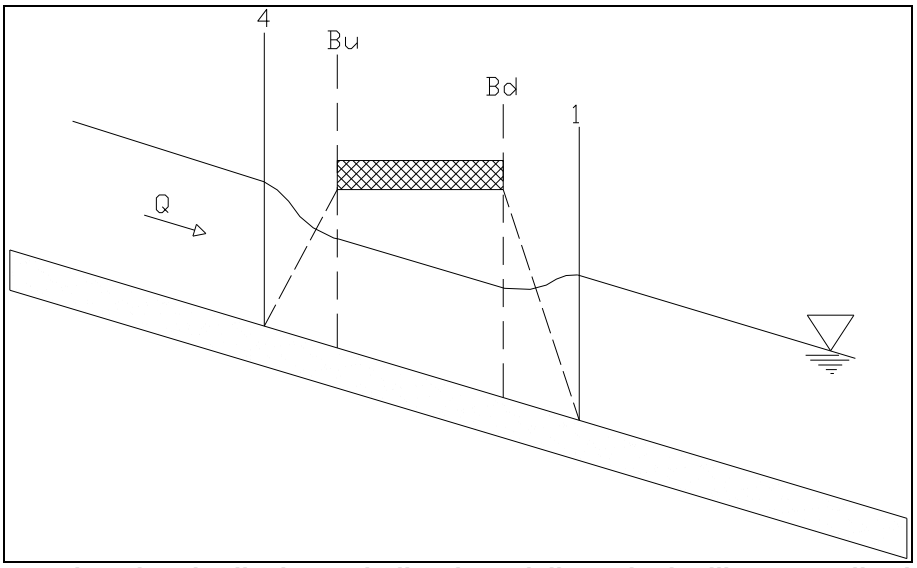

Figura 3 - sezione longitudinale con indicazione delle sezioni utilizzate per il calcolo del profilo di corrente in corrispondenza di un ponte

	Procedura standard
Passo	**Azione**
1	Risolvere l'equazione dell'energia tra la sezione 1 e la sezione Bd immediatamente a valle del ponte.
2	Procedere nel calcolo passando alla sezione Bu disposta a monte del ponte.
3	Includere, in maniera approssimata l'effetto delle pile e dell'interazione con le spalle.
4	Proseguire con il calcolo valutando l'altezza idrica nella sezione 4.
5	Continuare il tracciamento del profilo di corrente verso monte a partire dalla sezione 4.

Passo 1: si risolve l'equazione dell'energia tra la sezione 1 e la sezione disposta a valle del ponte (Bd). Si utilizza l'altezza idrica nella sezione 1 calcolata dal calcolo generale del profilo di corrente.

Passo 2: si procede verso monte sovrapponendo la sezione del ponte sulle sezioni naturali.

Passo 3: si include l'effetto di eventuali pile riducendo l'area della sezione ed incrementando il perimetro bagnato.

Passo 4: si include l'eventuale flusso al di sopra del ponte e si procede al calcolo dell'altezza idrica nella sezione a monte del ponte (Bu) e da questa alla sezione 4.

Passo 5: come descritto precedentemente si prosegue il calcolo verso monte.

L'approccio basato sull'equazione globale calcola il profilo di corrente nella zona 2 della Figura 2 bilanciando le forze agenti su tre tronchi di corrente:

- tra la sezione 1 e la sezione a valle del ponte (Bd);
- tra la sezione a valle del ponte (Bd) e la sezione a monte del ponte Bu;

- tra la sezione a monte del ponte (Bu) e la sezione 4.

Nell'ipotesi di distribuzione idrostatica della pressione le forze agenti su un volume di controllo compreso tra due sezioni 1 e 2 sono espresse dalla relazione (10):

$$F_{p1} + F_{m1} = F_{p2} + F_{m2} + F_f + F_d - F_w \qquad (10)$$

dove:

- F_{P1}, F_{P2} = forze dovute alla pressione idrostatica;
- F_m= quantità di moto;
- F_f = forze dovute all'attrito sulle pareti;
- F_d = forze resistenti dovute alla presenza di ostacoli;
- F_w = componente della forza peso nella direzione del moto.

La procedura numerica di bilanciamento dell'equazione globale avviene attraverso i seguenti passi:

Passo	Azione
1	Determinare i valori di velocità ed altezza idrica nella sezione 1.
2	Determinare i valori di velocità ed altezza idrica nella sezione Bd.
3	Determinare il coefficiente di ragguaglio della quantità di moto
4	Determinare i valori di velocità ed altezza idrica nella sezione Bu.
5	Determinare la quantità di moto tra la sezione di monte e la sezione 4.
6	Completare il calcolo del profilo a partire dalla sezione 4.

Di seguito i passi vengono meglio illustrati:

Passo 1: nel caso di corrente lenta si determinano, dalla risoluzione dell'equazione del profilo idrico, l'altezza idrica e la velocità nella sezione 1;

Passo 2: si calcolano, attraverso successive iterazioni dell'equazione (11), l'altezza idrica e la velocità nella sezione Bd:

$$A_{Bd}\,\bar{y}_{Bd} + \beta_{Bd}\frac{Q^2}{g\,A_{Bd}} = A_1\,\bar{y}_1 - A_{pd}\,\bar{y}_{pd} + \frac{Q^2}{g\,A_{Bd}} + \left(\frac{A_1 + A_{Bd}}{2}\right)L\,S_f - + \left(\frac{A_1 + A_{Bd}}{2}\right)L\,S_0 \qquad (11)$$

dove:

- il pedice 1 si rifersisce alla sezione 1 ed il pedice d alla sezione immediatamente a valle del ponte;
- Q = portata (m^3/s);
- A_1 = area della sezione 1 (m^2);
- A_{pd} = area ostruita dalle pile (m^2);
- S_f= cadente piezometrica (m/m);
- g= accelerazione di gravità (m/s^2);

- S_o= pendenza dell'alveo (m/m);
- β= coefficiente di ragguaglio della quantità di moto.

Passo 3: si determina il coefficiente di ragguaglio delle quantità di moto.

Passo 4: a partire dall'altezza idrica nella sezione Bd si ripete la procedura del passo 2 per calcolare l'altezza idrica e la velocità nella sezione Bu utilizzando l'equazione:

$$A_{Bu}\,\bar{y}_{Bu} + \beta_{Bu}\frac{Q^2}{g\,A_{Bu}} = A_{Bd}\,\bar{y}_{Bd} + \frac{Q^2}{g\,A_{Bd}} + \left(\frac{A_{Bd}+A_{Bu}}{2}\right)L\,S_f - + \left(\frac{A_{Bd}+A_{Bu}}{2}\right)L\,S_0 \qquad (12)$$

Passo 5: si applica l'equazione (13) di bilancio della quantità di moto tra la sezione Bu e la sezione 4. Valori di riferimento per il calcolo della forza di drag esercitata dalla pile sono riportati nella tabella seguente

$$A_4\,\bar{y}_4 + \beta_3\frac{Q^2}{g\,A_3} = A_{Bu}\,\bar{y}_{Bu} - A_{pu}\,\bar{y}_{pu} + \frac{Q^2}{g\,A_{Bu}} + \left(\frac{A_{Bu}+A_3}{2}\right)L\,S_f - + \left(\frac{A_{Bu}+A_3}{2}\right)L\,S_0 + \frac{C_d + A_{pu}}{2g\,A_3} \qquad (13)$$

dove:

- il pedice *4* si riferisce alla sezione 4;
- A_{pu}= area ostruita dalle pile;
- C_d= coefficiente di drag delle pile.

Tipo di pila	Coefficiente di drag, *Cd*
Circolare	1.20
Allungato con estremità semicircolare	1.33
Ellittica (2:1 rapporto di forma)	0.60
Ellittica (4:1 rapporto di forma)	0.32
Ellittica (8:1 rapporto di forma)	0.29
Forma squadrata	2.00
Triangolare (30 vertice)	1.00
Triangolare (60 vertice)	1.39
Triangolare (90 vertice)	1.60
Triangolare (120 vertice)	1.72

Tabella 2 - Valori tipici del coefficiente di drag

Passo 6: come già illustrato si procede al calcolo della restante parte di profilo a partire dalla sezione 4.

DEFLUSSO SOMMERSO

La Figura 4 mostra la condizioni di deflusso sommerso nella quale la superficie idrica tocca, nella sezione di monte, l'estradosso del ponte, ma l'intradosso del ponte non è completamente a contatto con la superficie idrica. Una condizione di flusso di questo tipo può essere simulata come un efflusso al di sotto di una paratoia utilizzando l'equazione (14).

$$Q = C\,A_b\left[2g\left(y_{Bu} - \frac{D_b}{2} + \frac{\alpha_{Bu}\,v_{Bu}^2}{2g}\right)\right]^{0.5} \qquad (14)$$

dove:
Q = portata (m^3/s);
C = coefficiente di efflusso (valore suggerito 0.5);
A_b = area netta al di sotto del ponte (m^2);
Y_{Bu} = altezza idrica nella sezione B_u (m);
D_b = altezza dell'intradosso del ponte valutata rispetto al fondo dell'alveo(m).

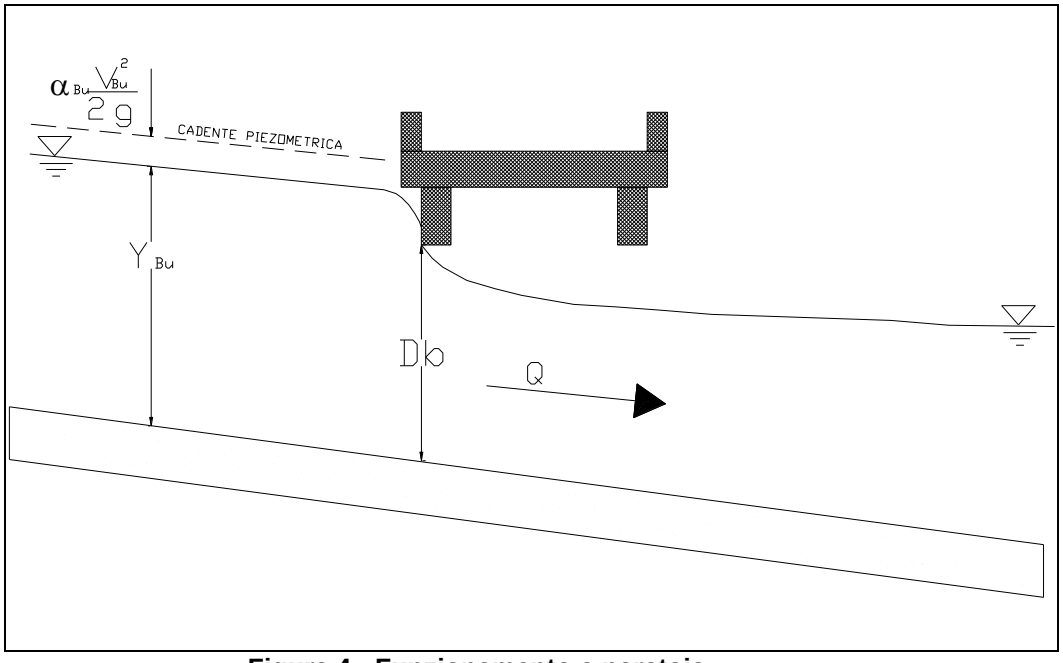

Figura 4 - Funzionamento a paratoia

La procedura iterativa consiste nell'assumere valori dell'altezza idrica nella sezione B_u (y_{Bu}) fino a che il valore della portata calcolata con la (14) non risulta uguale, con una ragionevole tolleranza, alla portata di calcolo.

La Figura 5 mostra il caso di un ponte nel quale l'altezza idrica a monte del ponte stesso risulta inferiore alla quota di estradosso. Una situazione del genere è schematizzabile come un efflusso attraverso una luce utilizzando l'equazione (15).

$$Q = C_\mu A_b \left[2gH\right]^{0.5} \quad (15)$$

dove:
$C\mu$ = coefficiente di efflusso (0.8 valore tipico);
H = differenza tra il carico totale nella sezione 3 e l'altezza idrica nella sezione

$$H = y_{Bu} + \alpha_{Bu} \frac{v_{Bu}^2}{2g} - y_{Bd} \quad (16)$$

α_3= coefficiente di ragguaglio dell'energia cinetica;
$C\mu$ = coefficiente di efflusso;

$C_d = 0.104 \frac{L_c}{b} + 0.7145$;

L_c = larghezza del ponte (m).

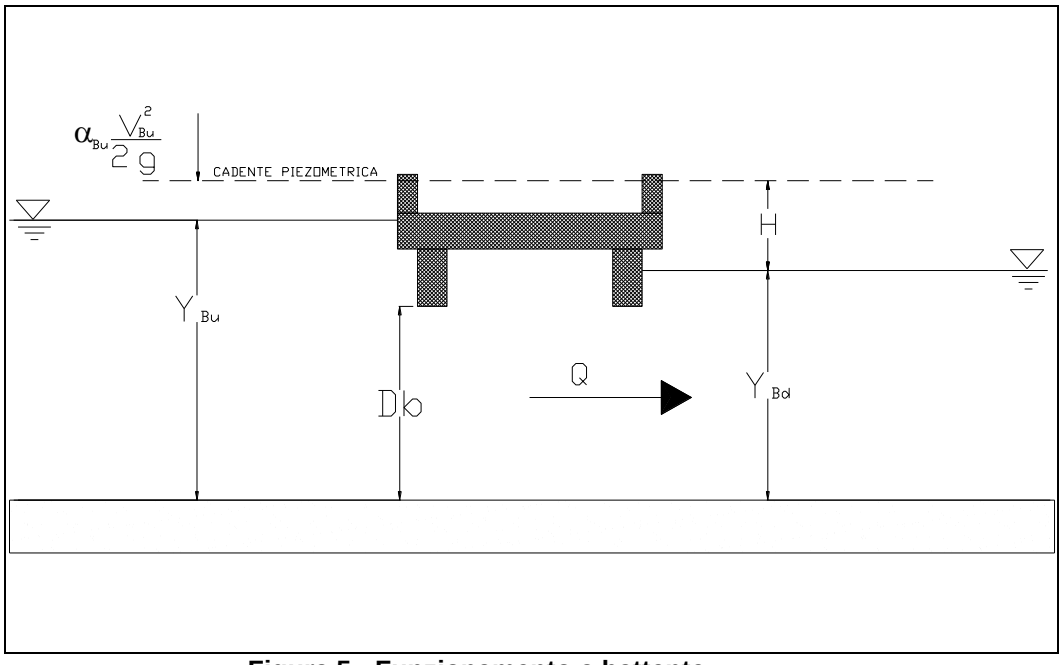

Figura 5 - Funzionamento a battente

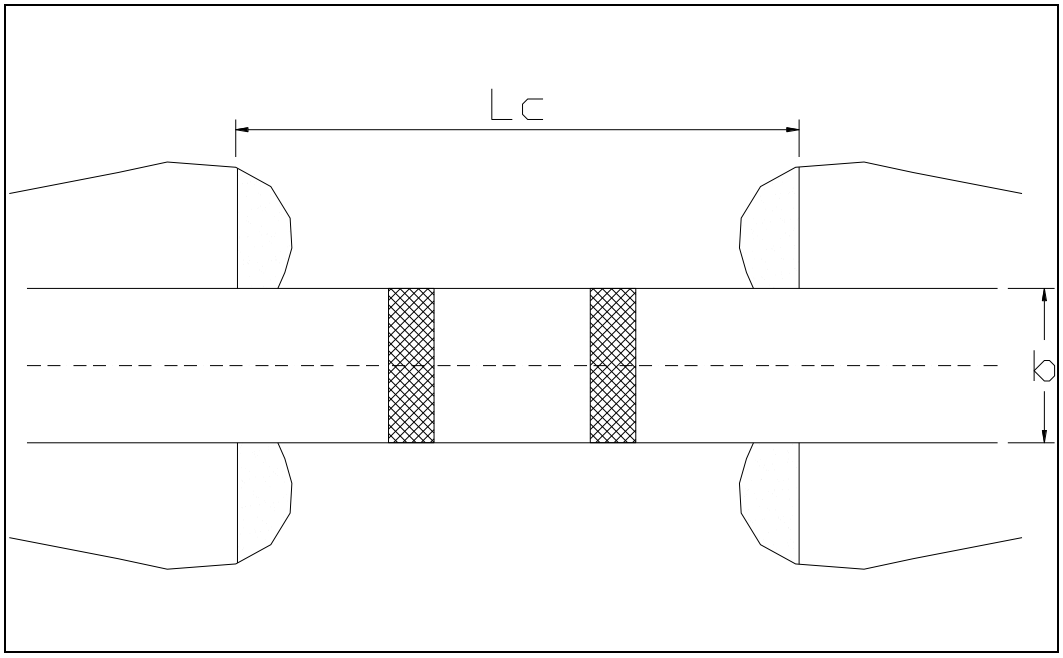

Figura 6 - Dimensioni del ponte per il calcolo in pressione

La procedura di calcolo richiede di assumere un'altezza idrica nella sezione B_u (y_{Bu}) fino a che la portata calcolata con la (15) non risulta uguale, con una ragionevole tolleranza, alla portata di calcolo.

Nel caso il ponte risulti sormontato (Figura 7) si possono verificare due condizioni di deflusso.

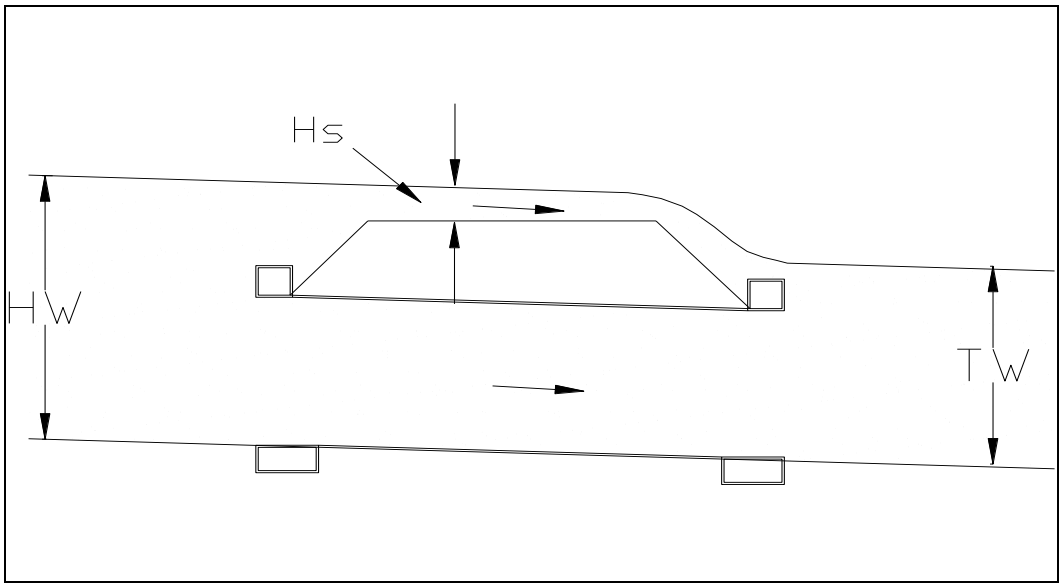

Figura 7 - Schema per il calcolo di ponte sormontato

A seconda dei livelli idrici a monte ed a valle valgono i seguenti schemi:

se altezza d'acqua sul ponte è inferiore all'altezza critica, l'altezza idrica a monte del ponte può essere calcolata considerando le due aliquote: una prima, relativa al flusso in pressione al disotto del ponte, calcolata con l'equazione (15), ed una seconda relativa al flusso al di sopra del piano stradale. La prima aliquota è calcolabile secondo gli schemi in pressione descritti precedentemente, mentre la porzione di portata che defluisce al di sopra del ponte può essere calcolata utilizzando l'equazione di Bazin (17):

$$Q = CL\left[H_h\right]^{1.5} \qquad (17)$$

dove:
Q = portata (m^3/s);
C = coefficiente di efflusso (valore suggerito 1.66);
L= larghezza della soglia (m);
H_h = tirante idrico sulla soglia valutato come differenza tra l'altezza idrica a monte del ponte e la quota del piano stradale;

a mano a mano che l'altezza idrica al di sopra del ponte aumenta, la percentuale della portata che defluisce al di sotto del ponte diminuisce progressivamente e le condizioni di deflusso tendono verso quelle di una corrente a superficie libera in cui la presenza del ponte e assimilabile ad una riduzione di sezione idrica ed una perdita di carico localizzata aggiuntiva. In tale caso la procedura di integrazione ritorna allo schema standard.

2.3 Calcolo del profilo di corrente in presenza di uno stramazzo

Il calcolo dell'altezza idrica al di sopra di uno stamazzo, o in generale in presenza di uno sbarramento, segue le medesime procedure nel caso di presenza di un ponte.
La Figura 8 mostra la posizione delle sezioni prossime allo sbarramento da considerare per il calcolo del profilo di corrente.
Nel caso in esame, non sono previste delle luci attraverso lo sbarramento, ma esso viene dimensionato per funzioare come uno stramazzo in parete sottile o grossa.
La formula che governa il calcolo del tirante idrico è la (17) dove:
H_h = tirante idrico sulla soglia di sfioro;
C = coefficiente di efflusso impostato pari a 1.83 in caso di parete sottile o pari a 1.7 in caso di parete grossa (quest'ultimo può essere abbassato fino a 1.4 in caso di presenza di interferenze in alveo).

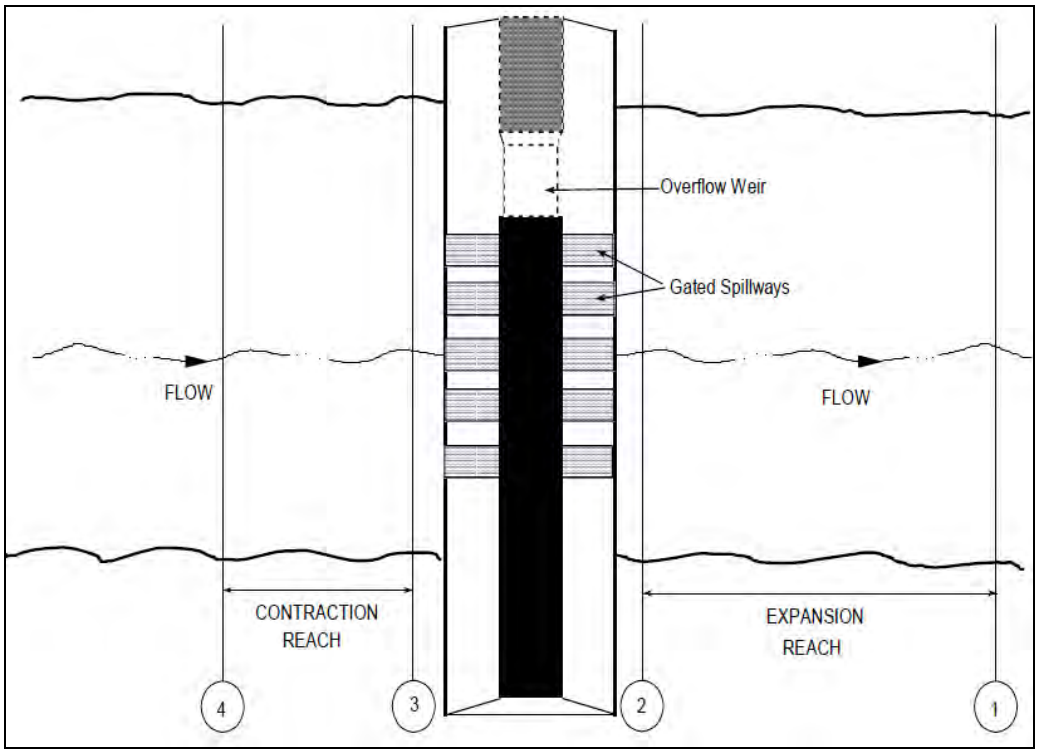

Figura 8 – Pianta con indicazione delle sezioni utilizzate per il calcolo del profilo di corrente in corrispondenza di una traversa

2.4 Coefficienti di scabrezza adottati

L'alveo del Fiume Lambro nel tratto esaminato è in gran parte rivestito in terra con presenza di vegetazione spondale; le aree golenali presentano principalmente vegetazione coltiva o arbustiva spontanea.

Nella simulazione effettuata la sezione è stata suddivisa in modo da attribuire ad ogni parte il coefficiente di scabrezza più rappresentativo; si è in particolare utilizzato un valore di scabrezza di Manning pari a 0.03 per l'alveo e 0.05 per le aree golenali.

2.5 Condizioni al contorno

Nel caso in esame è stata fissata come condizione al contorno solo quella di valle dal momento che il regime del Fiume Lambro è di tipo fluviale con corrente lenta. La condizione imposta consiste nel fissare il tirante a quota pari a 94.45 m s.l.m., valore ricavato dalle quote fissate da AdBPo.