

6.3. Dimensionamento dei manufatti d'attraversamento idraulico

6.3.1. Generalità

Il comportamento idraulico dei manufatti d'attraversamento è di relativamente facile descrizione. Le dimensioni sono imposte, ovviamente, da considerazioni idrauliche, ma anche - e, talvolta, in modo determinante - da necessità diverse: quali, come s'è detto, la possibilità d'accesso per ispezioni e manutenzione e quelle di consentire il transito di eventuali corpi trasportati dalla corrente di piena; oppure, quando questo non risulti possibile, dotando il manufatto di un dispositivo protettivo a monte.

I casi trattati nelle pagine seguenti sono quelli più frequenti e di maggiore interesse.

6.3.2. Attraversamento con botte a sifone

L'incrocio di una strada (o di una ferrovia, ma anche di un canale) con un canale (di bonifica, irriguo o industriale) comporta, in genere, come s'è visto, la costruzione di uno speciale manufatto: ponte, ponticello o tombino, a seconda della luce.

La necessità di assicurare un franco adeguato tra la quota di massima piena del canale e quella di sottotrave del ponte impone, talvolta, una sua traslazione verso l'alto e, quindi, la realizzazione di rampe d'accesso in rilevato.

In qualche circostanza (attraversamenti ferroviari o di strade esistenti, ma anche, per esempio, volendo porre la strada in trincea) può essere necessario o conveniente realizzare un manufatto nel quale la corrente defluisca a pressione. Il manufatto, detto *botte a sifone*, è costituito da: un imbocco raccordato al canale di monte; un tratto di condotta inclinata (o da un pozzetto nei casi di minore importanza) fino alla quota alla quale si vuole sottopassare la strada; un tratto orizzontale per tutta la larghezza della strada; un tratto di risalita (oppure un pozzetto) fino al raccordo col canale di valle (figura 6.24).

Per consentire la manutenzione della botte a sifone è opportuno, per quanto possibile, che la sua sezione sia praticabile; e che sia costituita, di norma, da più di una canna, ognuna delle quali panconabile, per permettere l'accesso per manutenzione, ma anche l'esercizio parziale durante la manutenzione stessa.

La velocità entro la botte deve essere di poco superiore a quella nel canale di monte: in modo che le particelle solide che non sedimentano nel canale non possano sedimentare nella botte; raramente si supera nella botte la velocità di $2 \div 2,5$ m/s.

Una griglia è talvolta disposta a monte dell'imbocco della botte quando si tema che eventuali materiali trasportati (le erbe per lo sfalcio delle sponde, per esempio) possano arrestarsi nelle canne e ridurne l'efficienza; in questi casi, per l'ostruzione parziale o totale della griglia stessa, si deve provvedere ad assicurare, oltre che la sorveglianza, il deflusso con adeguati provvedimenti.

L'opportunità (o meglio, la necessità) della griglia è da vedersi anche in rapporto ai problemi di sicurezza che possono riguardare le persone: un incidente automobilistico, per esempio.

I raccordi di monte e di valle della botte col canale esistente vanno opportunamente sagomati per limitare al massimo le perdite di imbocco e sbocco. La lunghezza ottimale del raccordo deve essere tale che l'angolo tra l'asse del canale e il muro di raccordo sia non superiore a circa $12^\circ \div 15^\circ$; la lunghezza del raccordo può essere diminuita realizzando nel tratto stesso una serie di setti come mostrato nella figura 6.22; nella figura 6.23 sono riportate alcune possibili configurazioni del raccordo.

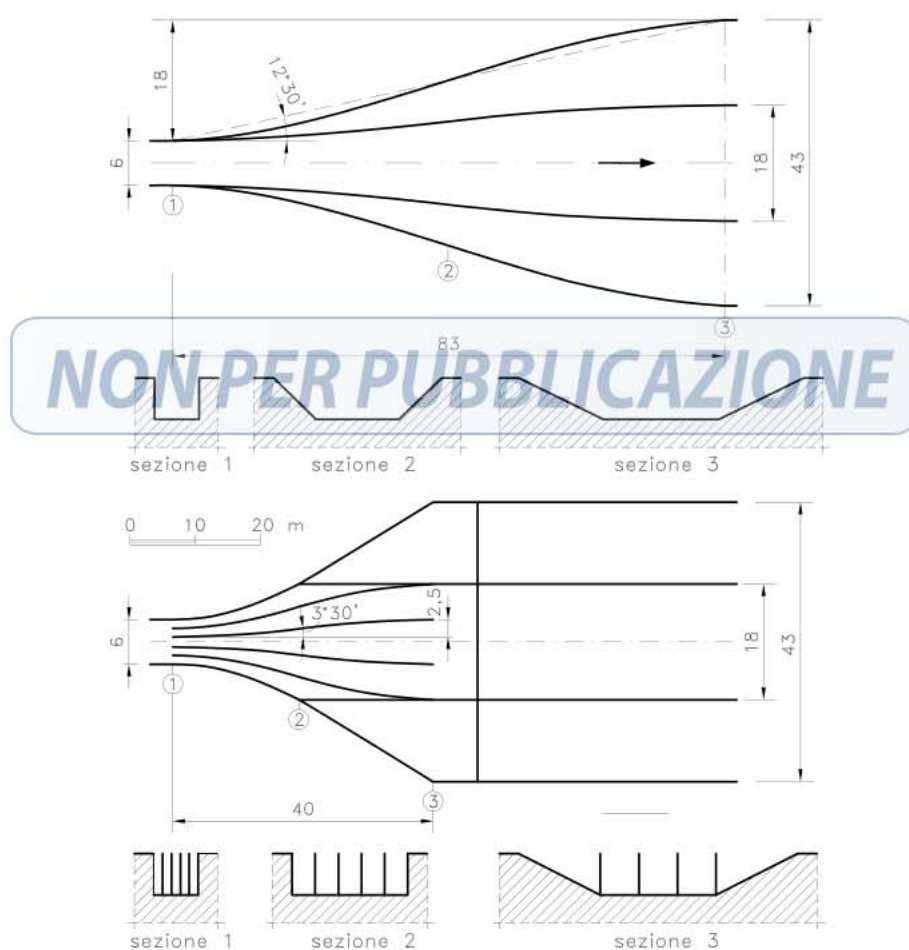


Fig. 6.22 - Raccordo tra due differenti sezioni di un canale con dispositivo per ridurre la lunghezza del tronco di raccordo.

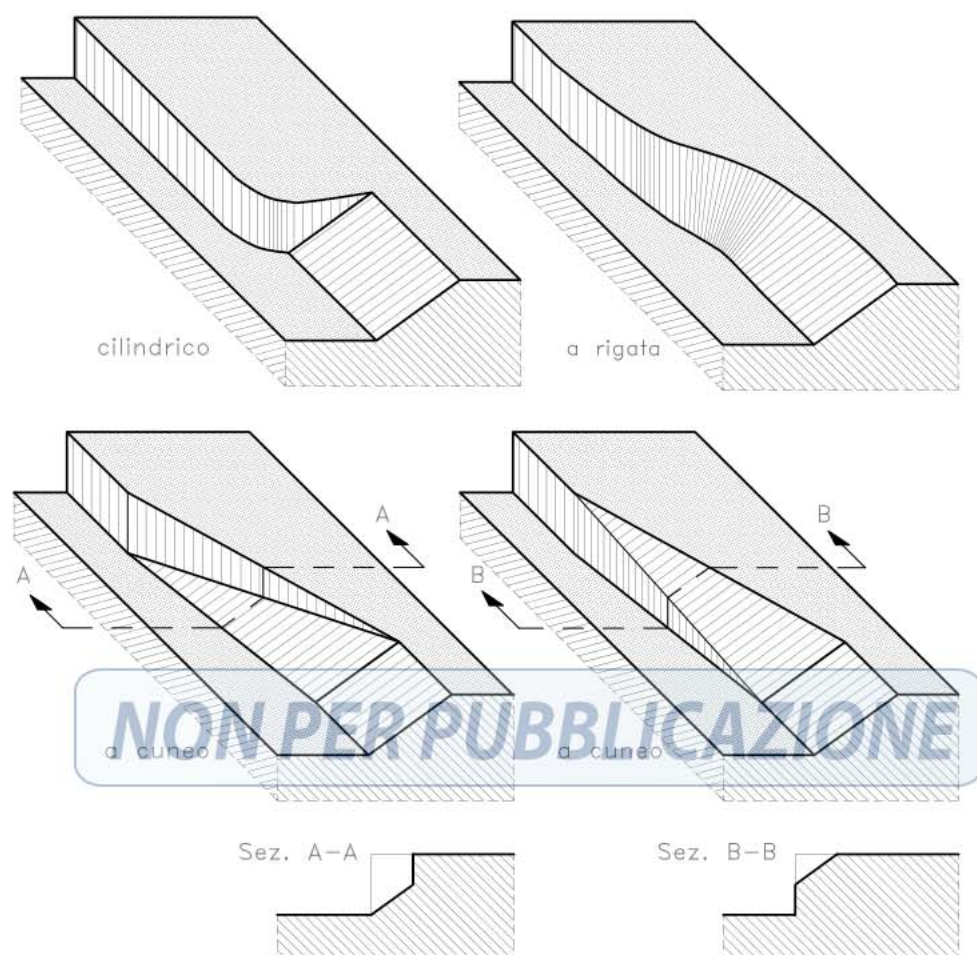


Fig. 6.23 - Esempi di raccordo di un canale da sezione rettangolare a sezione trapezia (da adottare in corrente lenta).

Un raccordo ben sagomato dà luogo a perdite di carico che sono dell'ordine di $0,1 \div 0,3$ della differenza dei carichi cinetici: il coefficiente è, a parità di disegno, più elevato per lo sbocco (corrente decelerata) che per l'imbocco (corrente accelerata).

La perdita di carico complessiva in una botte è la somma di varie perdite: continue, d'imbocco e sbocco, per curve. L'ordine di grandezza delle perdite al quale, di regola, si fa riferimento è di $0,05 \div 0,15$ m.

Indicati con:

v_m, v e v_v	rispettivamente le velocità nel canale a monte, nella botte e nel canale a valle;
k_i, k_c e k_s	i coefficienti di perdita all'imbocco, in curva ed allo sbocco;
K_s	il coefficiente di resistenza secondo <i>Gauckler-Strickler</i> ;
L	la lunghezza di una canna;
R_H	il raggio idraulico della sezione corrente d'una canna;
n	il numero delle curve;
N	il numero delle canne;

la perdita di carico Δh è data da:

$$\Delta h = k_i \frac{v^2 - v_m^2}{2g} + nk_c \frac{v^2}{2g} + \frac{2gL}{K_s^2 R_H^{4/3}} \cdot \frac{v^2}{2g} + k_s \frac{v^2 - v_v^2}{2g} . \quad (6.2)$$

Indicate con A_m e A_v le aree delle sezioni rispettivamente di monte e di valle e con A l'area d'una canna, la precedente, posto:

$$\frac{1}{C^2} = k_i + nk_c + \frac{2gL}{K_s^2 R_H^{4/3}} + k_s - \left(\frac{NA}{A_m} \right)^2 \left(k_i + k_s \frac{A_m^2}{A_v^2} \right) , \quad (6.3)$$

assume la semplice forma:

$$\frac{1}{C^2} \cdot \frac{v^2}{2g} = \Delta h ; \quad (6.4)$$

oppure

$$v = C \sqrt{2g\Delta h} . \quad (6.5)$$

Noti, oltre a Q e Δh , A_m , A_v e i coefficienti k , si può procedere, con qualche tentativo, al calcolo dell'area A di una canna per vari valori del numero N delle canne e assumere la soluzione più conveniente.

Oltre alle normali verifiche statiche proprie della struttura - massimo carico esterno con botte vuota e piena (per la verifica del terreno di fondazione); minimo carico esterno e deflusso a pressione - si deve fare anche la verifica al galleggiamento, con botte vuota ovviamente. Questa verifica potrebbe anche comportare spessori maggiori - non inferiori, però, a valori dell'ordine di 0,50 m - di quelli necessari per assicurare la stabilità convenzionale oppure speciali provvedimenti di ancoraggio per particolari, anche se improbabili, situazioni.

Se le modalità costruttive e l'ancoraggio e il collegamento tra i vari conci della botte sono previsti e realizzati in modo appropriato, la verifica al galleggiamento può eventualmente essere fatta con riferimento all'intero manufatto pensato come corpo rigido, con indubbi vantaggi per essere sovente le testate più pesanti delle canne e, per lo più, non del tutto immerse.

Se il coefficiente di sicurezza risultasse insufficiente durante la sola fase di costruzione, può convenire lasciare aperte, fino a termine della costruzione, alcune finestre sui muri laterali delle canne in modo che la crescita del livello nella trincea dia luogo all'allagamento della botte prima del suo sollevamento.

Un problema costruttivo notevole potrebbe sorgere se non fosse possibile mettere all'asciutto il canale per tutto il tempo di costruzione della botte: problema costruttivo notevole, principalmente per assicurare, con le opere provvisorie, la piena disponibilità del cantiere.

6.3.3. Applicazione. Progetto d'una botte a sifone

Il progetto di una nuova strada interseca ortogonalmente un canale industriale a sezione trapezia avente le seguenti caratteristiche:

- rivestimento in conglomerato cementizio;
- base larga 6 m;
- condizioni di moto prossime al moto uniforme;
- sponde con scarpa 3/2;
- pendenza del fondo 0,0001;
- franco sulla sommità delle sponde (coincidente col piano campagna) 1,00 m;
- portata massima 35 m³/s.

Il piano stradale è stato progettato incassato 3,00 m al di sotto del piano campagna: ciò comporta lo scavo di una trincea larga alla base 12 m con scarpe 3/2.

Il canale è in esercizio da tempo: può assumersi, secondo *Gauckler-Strickler*, la scabrezza $K_s = 70 \text{ m}^{1/3}\text{s}^{-1}$. Detto y il tirante d'acqua, l'area A_m della sezione a monte e il contorno bagnato P sono:

$$A_m = (6 + 1,5y)y; \quad P = 6 + 3,606 y.$$

Dalla relazione

$$v = 70 R_H^{2/3} \sqrt{10^{-4}},$$

con qualche tentativo si ha:

$$\begin{array}{lll} h = 3,07 \text{ m}; & A_m = 32,56 \text{ m}^2; & P = 17,07 \text{ m}; \\ R_H = A_m/P = 1,91 \text{ m}; & v = 1,08 \text{ m/s}; & Q = 35,05 \text{ m}^3/\text{s}. \end{array}$$

Se si realizza la botte con due canne affiancate ($N = 2$) aventi area $A = b h = 2,75 \cdot 3,25 = 8,94 \text{ m}^2$ ciascuna (figura 6.23), la velocità risulta $v = 35 / (2 \cdot 8,94) = 1,96 \text{ m/s}$, quasi doppia di quella nel canale. La larghezza delle due canne è stata assunta in modo che, tenuto conto della presenza del setto centrale, non sia necessario eseguire un raccordo con la base del canale. Si ha:

$$\begin{array}{l} Q = 35 \text{ m}^3/\text{s}; \\ A_m = A_v = 32,56 \text{ m}^2; \\ A = 8,94 \text{ m}^2; R_H = 0,745 \text{ m}; N = 2; L = 34,80 \text{ m}; v = 1,96 \text{ m/s}; \\ k_i = 0,20; k_s = 0,40; k_c = 0,05 \text{ per } n = 2; \\ K_s = 75 \text{ m}^{1/3}/\text{s}. \end{array}$$

Dalla equazione (6.3) si ottiene:

$$\frac{1}{C^2} = 0,699; \quad \Delta h = \frac{1}{C^2} \frac{v^2}{2g} = 0,137 \text{ m.}$$

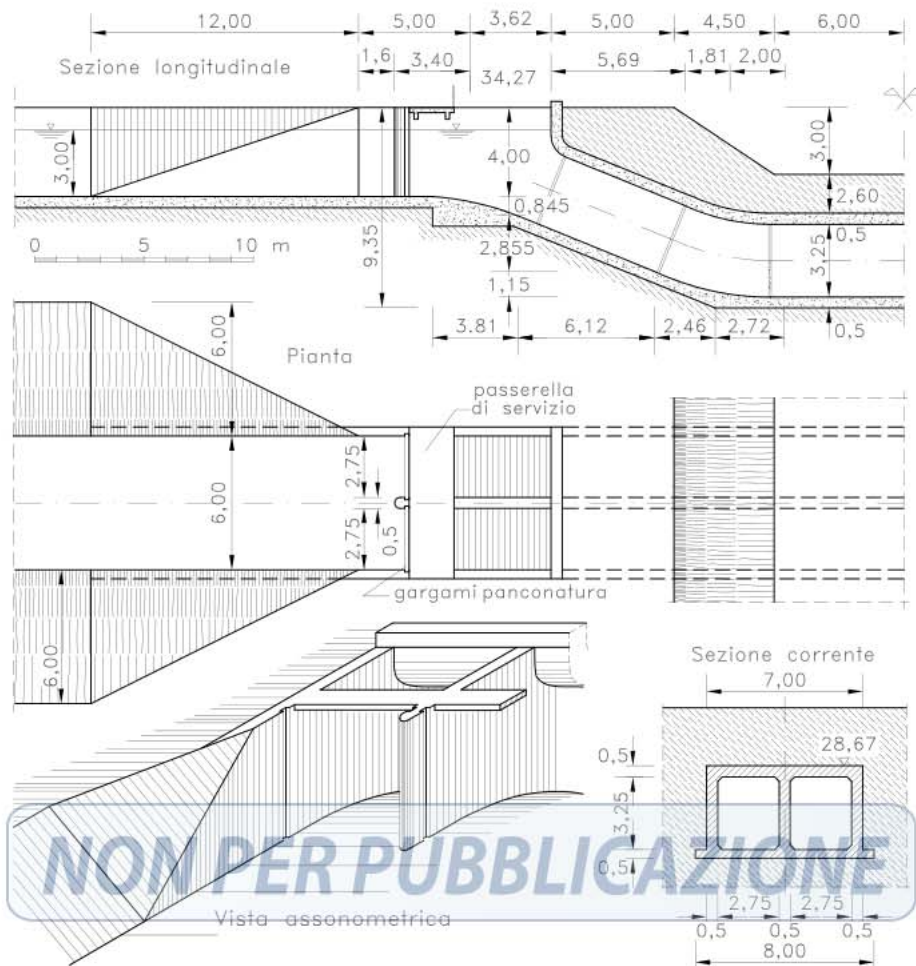


Fig. 6.24 - Botte a sifone.

Se si mantengono invariate le condizioni di contorno a valle tra lo stato precedente e successivo alla costruzione della botte, a monte il franco si riduce di circa 0,14 m. Se si volesse mantenere il franco pari a quello precedente la costruzione della nuova opera, sarebbe necessario sovralzare, di un valore via via decrescente, la sommità del canale per la lunghezza corrispondente a quella alla quale il rigurgito sia praticamente annullato (l'estensione è dell'ordine delle centinaia di metri).

La verifica al galleggiamento può farsi, prudenzialmente, per il tratto centrale della botte.

La spinta di galleggiamento di 1 m di canna completamente immersa vale $(7,00 \cdot 4,25 + 2 \cdot 0,5 \cdot 0,50) 9,810 = 296,752 \text{ kN/m}$.

Il peso della canna vale

$$(7,00 \cdot 0,50 + 8,00 \cdot 0,50 + 3,25 \cdot 0,50 \cdot 3) 24,525 = 303,497 \text{ kN/m}.$$

Come può vedersi dal rapporto tra peso e spinta, durante la fase di costruzione il coefficiente di sicurezza è di poco maggiore di 1. Dopo la costruzione, a botte interrata, va computato il peso della terra e con qualche cautela, l'attrito che s'esercita sulle parti laterali dovuto alla spinta della stessa. Il coefficiente raggiunge allora il valore di 1,5.

6.3.4. Dimensionamento dei tombini

Il comportamento idraulico di un tombino può essere schematizzato nei sei casi illustrati nella figura 6.25. Le caratteristiche del moto dipendono principalmente: dalla forma dell'imbocco e dal tipo di sezione; dalla scabrezza; dalla pendenza e dalle condizioni idrometriche di monte e di valle; oppure di valle.

Sia H^* un'altezza di riferimento (sostanzialmente un contenuto energetico) compresa tra 1,2 e 1,5 volte l'altezza D del tombino $H^* = 1,2 \div 1,5D$, variabile in funzione del tipo di sezione del tombino stesso, della forma d'imbocco e delle condizioni della corrente a monte.

Si possono definire diversi casi con riferimento allo stato idrometrico dello sbocco (se sommerso o non sommerso), al rapporto tra il carico H^* e il carico H esistente all'imbocco ($H > H^*$ oppure $H < H^*$) e alle caratteristiche del deflusso all'interno del tombino.

Analiticamente: indicate con y_c e y_o le altezze corrispondenti rispettivamente allo stato di deflusso critico e di sbocco; con i_c ed i le pendenze, rispettivamente, critica e del fondo del tombino, i casi possibili sono i seguenti:

A: luce di sbocco sommersa;

B: luce di sbocco non sommersa;

B.1: $H > H^* = 1,2 \div 1,5D$;

B.1.1: tombino idraulicamente lungo;

B.1.2: tombino idraulicamente corto;

B.2: $H < H^*$;

B.2.1: $y_o > y_c$;

B.2.2: $y_o < y_c$;

B.2.2.1: $i < i_c$;

B.2.2.2: $i > i_c$.

I risultati di numerose e sistematiche ricerche sperimentali danno modo di fare le seguenti osservazioni.

Il caso A non pone particolari problemi essendo sia l'imbocco che lo sbocco sottobattente, con l'accortezza però di verificare che, per elevate differenze di livello tra monte e valle, la condizione di sbocco sommerso sia assicurata.

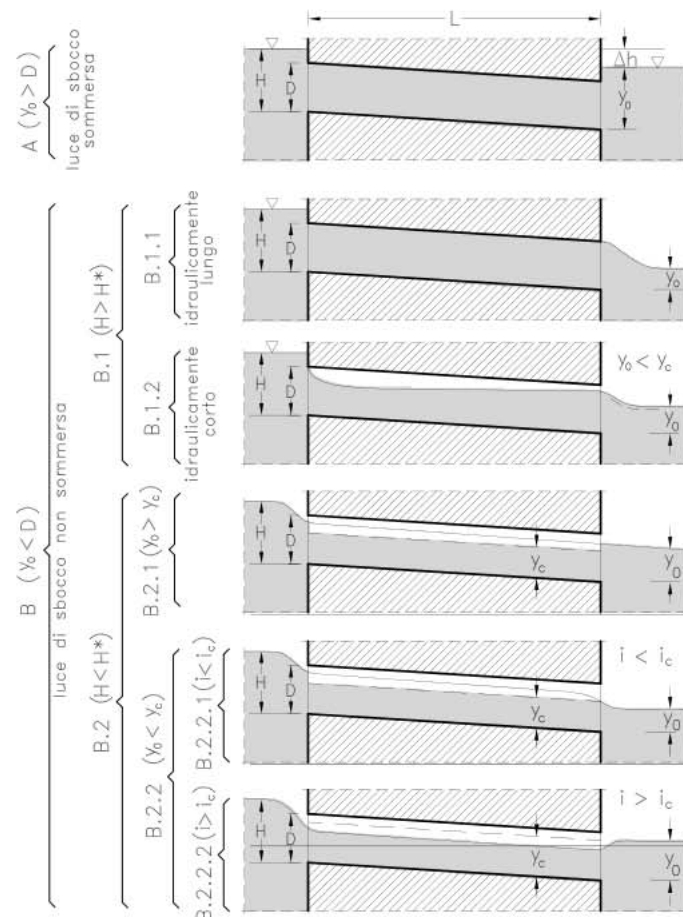


Fig. 6.25 - Possibili andamenti dei profili liquidi in un tombino ($H^* = 1,2 + 1,5D$)

L'imbocco è a superficie libera (casi B.2) – cioè la vena non tocca il cielo d'imbocco del tombino – se, essendo libero lo sbocco di valle, il carico a monte, riferito al punto più depresso della sezione d'ingresso, è inferiore ad H^* . Nei campi di valori $H/D > 1,5$ o $H/D < 1,2$ si hanno quindi, rispettivamente, condizioni di imbocco con deflusso a battente o a superficie libera.

Nell'ipotesi che lo sbocco non sia sommerso (casi B), certamente il tombino non va in pressione finché il carico a monte non superi l'altezza H^* . Aumentando il carico di monte ($H > H^*$), il moto nella sezione d'imbocco può assimilarsi al deflusso sotto una paratoia a battente: in dipendenza dalla sagomatura dell'imbocco, si può formare una sezione contratta e di conseguenza un profilo ritardato (o accelerato a seconda della pendenza del tombino). Se l'eventuale profilo ritardato in corrente veloce riesce a mantenersi tale fino allo sbocco, il tombino viene definito *idraulicamente corto* (caso B.1.2) e il deflusso avviene a su-

perficie libera; in caso contrario il deflusso è in pressione - tutto o in parte - e il tombino viene definito *idraulicamente lungo* (caso B.1.1).

Il caso B.1.1 può, come s'è visto, dare luogo anche a un deflusso parzialmente a pressione: cioè tale che, in una sezione intermedia, la corrente, staccatasi dal cielo del tombino, passi a superficie libera fino allo sbocco, dando luogo a una maggiore portata.

In queste condizioni appare più cautelativo fare riferimento al primo modo di defluire (tombino tutto in pressione), salvo nel caso di importanti e lunghi tombini.

L'imbocco e la sua forma possono caratterizzarsi (figura 6.26), in modo semplice, con due parametri - r/D e w/D , essendo r il raggio di curvatura del raccordo e w l'altezza dello smusso - e il tombino col rapporto L/D tra la sua lunghezza e la sua altezza. La figura 6.26 mostra come, a parità di r/D e w/D , il tombino possa appartenere all'una o all'altra categoria (corto o lungo) al variare di L/D e della pendenza i .

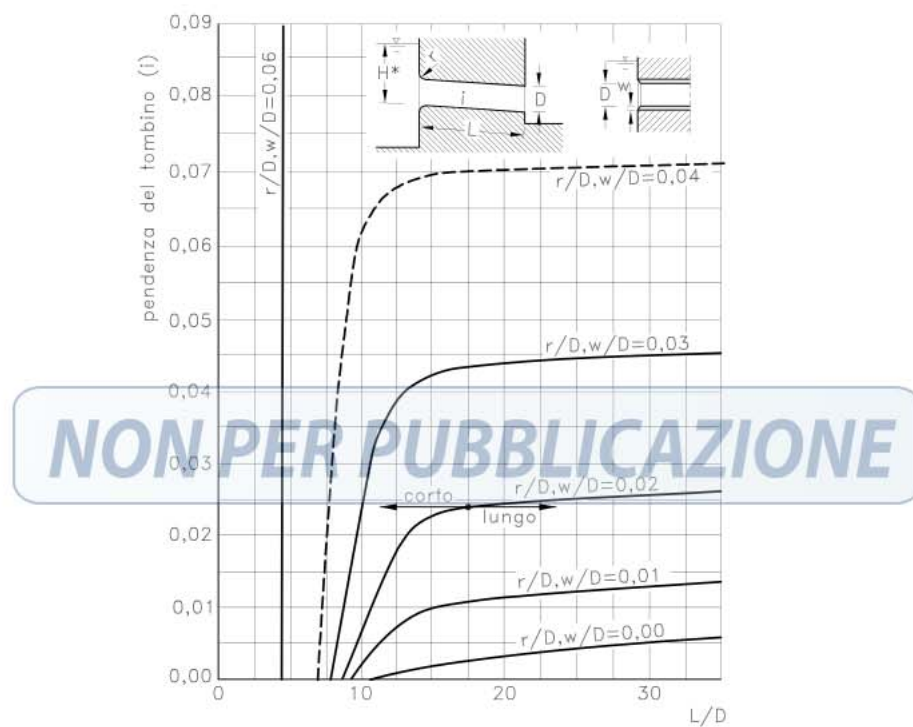


Fig. 6.26 - Criterio per stabilire se un tombino a sezione rettangolare o circolare con imbocco a spigolo vivo o smussato sia idraulicamente lungo o corto.

I tombini dei casi A e B.1.1 della figura 6.25 si trattano come condotta in pressione. Il dislivello Δh tra il carico di monte e di valle, trascurando cautelativamente la velocità nel canale all'imbocco e allo sbocco, è dato dalla consueta

equazione:

$$\Delta h = k_i \frac{v^2}{2g} + \frac{2gL}{k_s^2 R_H^{4/3}} \cdot \frac{v^2}{2g} + k_s \frac{v^2}{2g}; \quad (6.6)$$

posto

$$\frac{1}{C^2} = 2gL / (K_s^2 R_H^{4/3}) + k_i + k_s, \quad (6.7)$$

la precedente assume la semplice forma:

$$\Delta h = \frac{1}{C^2} \cdot \frac{v^2}{2g}; \quad (6.8)$$

nota l'area A , la portata Q diventa:

$$Q = CA\sqrt{2g\Delta h}. \quad (6.9)$$

Il valore del coefficiente di imbocco vale, per imbocchi a spigolo vivo, $k_i = 0,5$; per un imbocco ben raccordato è $k_i = 0,10 \div 0,15$. Il coefficiente k_s per uno sbocco ben raccordato è $k_s = 0,15 \div 0,20$; oppure 1 nel peggiore dei casi.

La portata nel caso B.1.2, considerato come luce sotto battente, può essere calcolata con la consueta formula:

$$Q = CA\sqrt{2gH}. \quad (6.10)$$

assegnando a C valori compresi tra 0,45 e 0,75 in funzione del tipo di sagomatura dell'imbocco e del rapporto H/D .

È raccomandabile, nel caso in cui si sia incerti sulle modalità di comportamento del tombino (idraulicamente lungo o corto), ripetere il calcolo con entrambe le formule descritte, assumendo per Q , a favore della sicurezza, il minore dei due valori di portata. Infatti il comportamento schematizzato nella figura 6.25 ipotizza che il tombino sia molto corto o che la vena in corrente veloce sia adeguatamente aerata.

Nel caso in cui l'opera sia di qualche importanza e di non trascurabile lunghezza può essere opportuno provvedere all'installazione di un aeroforo, che sbocchi sul cielo del tombino poco più a valle della sezione d'imbocco; nei casi pratici, una condotta con diametro non inferiore a 20 cm può essere sufficiente.

Nel caso B.2.2.2 ($H < H^*$; $y_o > y_c$ e $i > i_c$) può imporsi che in una sezione iniziale si formi l'altezza critica y_c : per una sezione rettangolare larga b , nota la portata Q , è notoriamente:

$$Q = by_c \sqrt{gy_c} \quad (6.11)$$

cioè:

$$y_c = \sqrt[3]{\frac{Q^2}{b^2 g}}. \quad (6.12)$$

A parità di sezione la massima portata si ottiene quando l'altezza critica y_c sia pari all'altezza D della sezione (o di poco superiore per un imbocco raccordato) garantendo l'areazione. Trascurando la perdita di carico, posto $y_c = D$, nel caso di un tombino scatolare largo b e quindi $A = bD$, la precedente dà:

$$Q = bD\sqrt{gD} = 0,707bD\sqrt{2gD} . \quad (6.13)$$

La portata nei casi B.2.1 e B.2.2.1 è di più difficile determinazione, risultando funzione delle condizioni di valle.

Il valore della portata Q può ottenersi applicando la relazione dello stramazzo rigurgitato (figura 6.27). Immaginato, com'è usuale, la luce divisa in due parti, sia y_1 la parte superiore funzionante come stramazzo libero ed y_2 la parte inferiore considerata come luce battente, si ha:

$$Q = \left(C_1 y_2 + \frac{2}{3} C_2 y_1 \right) b \sqrt{2 g y_1} ; \quad (6.14)$$

oppure, posto $C_1 = 0,59$ e $C_2 = 0,66$:

$$Q = (0,59 y_2 + 0,44 y_1) b \sqrt{2 g y_1} . \quad (6.15)$$

Avendo imposto $H = (y_1 + y_2) < 1,2 \div 1,5 D$, ed essendo al massimo $y_2 = D$, si ha:

$$Q = C A \sqrt{2 g H} , \quad (6.16)$$

con C compreso tra 0,30 e 0,57.

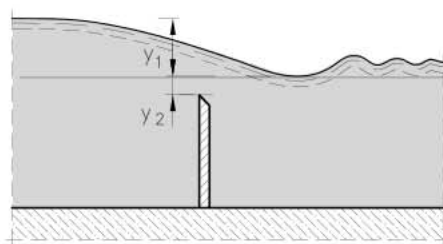


Fig. 6.27 - Schema dello stramazzo rigurgitato.

6.3.5. Criteri di progettazione dei tombini

Il gruppo di lavoro "Design of Culverts" dell' *American Society of Civil Engineers* (ASCE) ha predisposto, nel 1961, le seguenti raccomandazioni per le caratteristiche che deve possedere un tombino stradale ben progettato .

1. *Il tombino ed i relativi imbocco e sbocco devono tener conto, per ogni stato idrometrico, delle azioni dell'acqua, dei carichi sul terreno e dei corpi galleggianti.*
2. *Non deve causare eccessivi o non necessari danni alle proprietà.*
3. *Deve consentire, in condizioni normali, il trasporto di materiale senza introdurre dannosi cambi di percorso al corso d'acqua a monte ed a valle del manufatto.*
4. *Deve essere progettato in modo che i futuri miglioramenti al corso d'acqua o alla strada possano essere realizzati senza eccessive spese o difficoltà.*
5. *Deve essere progettato per funzionare correttamente dopo gli assestamenti conseguenti alla costruzione del rilevato.*
6. *Non deve dar luogo a ristagni d'acqua ove possono proliferare insetti.*
7. *Deve essere progettato per consentire il deflusso delle portate che tengono conto dei previsti sviluppi di utilizzo del bacino.*
8. *Deve essere economico da costruire, idraulicamente adeguato per la portata di progetto, strutturalmente durabile e facile da mantenere.*
9. *Deve essere progettato per evitare eccessivi invasi a monte dell'imbocco che potrebbero causare danni alle proprietà, accumuli di materiale, intasamenti del tombino, saturazione del rilevato o dannosi depositi di detriti a monte.*
10. *Le strutture d'imbocco devono essere progettate per: non lasciar entrare il materiale che non può transitare attraverso il tombino; ridurre al minimo le perdite d'imbocco; dar luogo a velocità lungo il canale d'avvicinamento quanto più uniformi possibile; facilitare l'ingresso dell'acqua nel tombino con l'uso, se necessario, di raccordi di transizione e aumento della pendenza.*
11. *Il progetto del tombino e dello sbocco deve garantire il reinstaurarsi di velocità tollerabili, con riferimento a fenomeni erosivi, all'interno della zona di pertinenza della strada o in un tratto ragionevolmente breve a valle del tombino.*
12. *Lo sbocco deve essere progettato per resistere allo scalzamento ed all'erosione.*
13. *I dissipatori allo sbocco, se impiegati, devono essere facili da costruire, economici e autopulenti nel periodo di morbida.*

6.3.6. Applicazioni

6.3.6.1. Calcolo della portata di un tombino

Determinare, per verifica, la portata di un tombino scatolare realizzato in conglomerato cementizio avente dimensioni $b \cdot D = 1,40 \cdot 2,15 \text{ m}^2$ e operante come nel caso A.

Gli elementi geometrici sono:

$$L = 30 \text{ m}; H = 3,50 \text{ m}; D = 2,15 \text{ m}; y_o = 2,60 \text{ m}; i = 0,02,$$

quindi:

$$\Delta z = iL = 0,02 \cdot 30 = 0,60 \text{ m}; \text{ dislivello di fondo,}$$

$$A = 3,01 \text{ m}^2; P = 2(1,40 + 2,15) = 7,10 \text{ m}; R_H = 3,01/7,10 = 0,424 \text{ m.}$$

Assunti i valori:

$$K_s = 70 \text{ m}^{1/3}/\text{s}; k_i = 0,30; k_s = 0,50;$$

dalla equazione (6.7) si ottiene $C = 0,921$.

Il dislivello tra la superficie libera di monte e valle è

$$\Delta h = 3,50 + 0,60 - 2,60 = 1,50 \text{ m};$$

si ha allora dalla (6.9):

$$Q = 0,921 \cdot 3,01 \cdot \sqrt{2g \cdot 1,50} = 15,04 \text{ m}^3/\text{s}.$$

Con $k_i = 0,5$ (imbocco a spigolo vivo) e $k_s = 1$, sarebbe stato $C_q = 0,73$ e $Q = 11,92 \text{ m}^3/\text{s}$: con una riduzione del 21% circa: a significare, con questa non trascurabile riduzione, quale cura sia da usare per scegliere il coefficiente, quando non convenga, in alternativa, dare una forma sagomata all'imbocco.

6.3.6.2. Progetto di un tombino

Si vuole procedere al dimensionamento di un tombino per la portata $Q = 15 \text{ m}^3/\text{s}$. Si assumono gli stessi elementi del manufatto precedente, però con $L = 40 \text{ m}$ e $y_o = 1,80 \text{ m}$; si ha anche $i = 0,6/40 = 0,015$.

Si assuma, in prima approssimazione, $D = 2,15 \text{ m}$ e $b = 1,30 \text{ m}$. Si ha:

$$A = 2,795 \text{ m}^2; R_H = 0,405; C = 0,866.$$

Quindi, assumendo $\Delta h = 3,50 + 0,60 - 1,80 = 2,30 \text{ m}$, è $Q = 16,25 \text{ m}^3/\text{s} > 15 \text{ m}^3/\text{s}$.

Può, quindi, ridursi la dimensione D . Se fosse ancora $C = 0,86$, sarebbe $A = 15 / (0,866 \sqrt{2g \cdot 2,30}) = 2,59 \text{ m}^2$; cioè $b = 1,30 \text{ m}$ e $D = 2,00 \text{ m}$. Può assumersi $D = 2,05 \text{ m}$.

Si ottiene allora: $A = 2,665 \text{ m}^2$, $R_H = 0,398 \text{ m}$; $C = 0,861$; ed è $Q = 15,42 \text{ m}^3/\text{s} \approx 15,00 \text{ m}^3/\text{s}$.

Il rapporto $L/D = 19,5$, riportato nella figura 6.26, mostra che il tombino è idraulicamente lungo (caso B.1.1). Il dimensionamento è quindi da ritenere corretto.

6.3.6.3. Progetto di un tombino

Trattasi ancora di progettare un tombino per $Q = 15 \text{ m}^3/\text{s}$, eguale al precedente con la sola differenza che è $L = 30 \text{ m}$; e ancora $\Delta z = 0,60 \text{ m}$ e $y_o = 1,80 \text{ m}$. Poiché è $\Delta h = 2,30 \text{ m}$, l'area A è data da

$$A = Q / (C \sqrt{2g \cdot 2,30}).$$

Poiché C può variare da 0,45 a 0,75, in funzione alla forma dell'imbocco, la sezione A può variare, rispettivamente, tra $4,962 \text{ m}^2$ e $2,98 \text{ m}^2$. Così se fosse $b = 1,30 \text{ m}$, D varierebbe tra 3,82 e 2,29 m.

Nel primo caso sarebbe preferibile, anziché $1,30 \cdot 3,82 \text{ m}^2$, assumere $2,23 \cdot 2,23 \text{ m}^2$.

Nella migliore delle ipotesi sarebbe necessaria una sezione di $1,30 \cdot 2,30 \text{ m}^2$ maggiore

di quella indicata al §6.3.6.2. Il caso è quindi quello di un tombino *idraulicamente corto* (B.1.2), come mostra la figura 6.26 per $L/D = 13$.

L'applicazione mostra ancora l'opportunità di adottare imbocco e sbocco ben sagomati; e anche come, nei casi dubbi - deflusso a superficie libera o in pressione -, sia conveniente porre a confronto i valori delle portate calcolate nei due casi.

6.3.6.4. Progetto di un tombino

Progettare un tombino per $Q = 15 \text{ m}^3/\text{s}$. Gli elementi sono ora:

$$L = 40 \text{ m}, H = 2,50 \text{ m}; y_o = 2,00 \text{ m}; \Delta z = iL = 0,15 \text{ m};$$

è ancora $K_s = 70 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$; $k_i = 0,30$ e $k_s = 0,5$.

Il valore di H è tale da far pensare che possa verificarsi il caso B.2.1, con l'ovvia riserva di procedere alla verifica. Per essere $H^* > H = 2,50 \text{ m}$, l'altezza minima dello scatolare, necessaria per assicurare il deflusso con un franco opportuno, è $D = 2,60 \text{ m}$. Si deve determinare la larghezza b .

L'altezza critica (all'imbocco) corrispondente alla dotazione $H = 2,50 \text{ m}$ è $y_c = 2/3 H = 1,667 \text{ m}$; quindi $v = \sqrt{gy_c} = 4,04 \text{ m/s}$ e $v^2/2g = 0,83 \text{ m}$: cui corrisponde una perdita di imbocco (prudenzialmente riferita a v_c) di $0,3 \cdot 0,83 = 0,25 \text{ m}$. Si ha allora che ad $H - 0,25 = 2,25 \text{ m}$ corrisponde un'altezza critica $y_c = 1,50 \text{ m}$ e $v_c = 3,84 \text{ m/s}$; e $q = 5,754 \text{ m}^3/\text{s}, \text{ m}$: quindi è $b = Q/q = 15/5,754 = 2,60 \text{ m}$.

In queste condizioni, per $D = 2,60 \text{ m}$, si può correttamente assumere che lo stato critico venga mantenuto entro il tombino (il franco è $1,10 \text{ m}$) per tutta la sua estensione. La pendenza i_c necessaria perché questo stato possa verificarsi essendo:

$$A = 1,50 \cdot 2,60 = 3,90 \text{ m}^2; R_H = 0,70 \text{ m},$$

è allora

$$i_c = \left[3,84 / (70 \cdot 0,7^{1/3}) \right]^2 = 0,0048 > i = 0,15/40 = 0,00375.$$

È pertanto: $y_o > y_c$ e $i_c > i$; e si conferma l'ipotesi assunta al principio.

Ancora con la sezione $bD = 2,60 \cdot 2,60 \text{ m}^2$, assegnato un franco di $0,60 \text{ m}$, si potrebbe ipotizzare, sempre per $Q = 15 \text{ m}^3/\text{s}$, che l'altezza di sbocco $y_o = 2,00 \text{ m}$ si mantenesse costante lungo il percorso $L = 40 \text{ m}$ dello scatolare. In queste condizioni si avrebbe:

$$A = 5,20 \text{ m}^2; R_H = 0,788 \text{ m}; v = 15/5,20 = 2,885 \text{ m/s} \text{ e } v^2/2g = 0,424 \text{ m};$$

e una perdita d'imbocco, prudenzialmente riferita alla velocità v , di $0,3 \cdot 0,424 = 0,127 \text{ m}$.

Si deve considerare, in questa ipotesi, il caso dell'imbocco rigurgitato: infatti è $2,00 > \frac{2}{3}(2,50 - 0,127) = 1,58 \text{ m}$; quindi, con $y_1 = 2,50 - (2,00 + 0,127) = 0,373 \text{ m}$ e $y_2 = 2,00 \text{ m}$, si ha:

$$Q = \left(0,59 \cdot 2,00 + \frac{2}{3} 0,66 \cdot 0,373 \right) 2,60 \sqrt{2g \cdot 0,373} = 9,454 < 15 \text{ m}^3/\text{s}.$$

Il risultato mostra che per ottenere la portata di $15 \text{ m}^3/\text{s}$, a parità di carico all'imbocco, si deve provvedere ad allargare l'imbocco stesso da 2,60 a $2,60 \cdot 15/9,454 = 4,125 \text{ m}$.

La portata di $15 \text{ m}^3/\text{s}$ può però ottenersi anche aumentando il carico all'imbocco. Risolvendo (per tentativi) la precedente equazione rispetto all'incognita y_1 , si ottiene $y_1 = 0,75 \text{ m}$; il carico diverrebbe $H = 2,00 + 0,75 + 0,127 = 2,88 \text{ m}$; 0,38 m maggiore di quello ipotizzato.

I calcoli svolti sono approssimati e valgono per circoscrivere in modo corretto il problema.

Il modo corretto - anche se il tratto è breve - è quello che, partendo da valle con $y_o = 2,00 \text{ m}$, provvede a calcolare il profilo di rigurgito, ricordando che a moto uniforme, con $i = 0,00375$, l'altezza d'acqua è 1,66 m.

È infine da ricordare che, nel caso che si dovesse provvedere all'allargamento dell'imbocco, l'altezza d'acqua aumenterebbe verso monte per la graduale riduzione del carico cinetico.

6.3.6.5. Progetto di un tombino

Trattasi di un tombino nel quale tutti gli elementi sono eguali a quelli dati al §6.3.6.4., con la sola differenza che è $y_o = y_c = 1,50 \text{ m}$.

La modestia di questa altezza induce a pensare a un funzionamento del tipo B.2.2.1 oppure B.2.2.2. Si ipotizza quest'ultimo caso, con la riserva di una verifica.

La pendenza necessaria per assicurare il moto uniforme con $y_c = 1,50 \text{ m}$ è, come s'è calcolato al §6.3.6.4., $i_c = 0,0048 > 0,00375$. Pertanto l'ipotesi di un moto del tipo B.2.2.2 cade; le condizioni di funzionamento sono allora quelle del caso B.2.2.1.

Si assuma, con un certo franco, $D = 2,20 \text{ m}$. La portata $Q = 15 \text{ m}^3/\text{s}$ defluisce a moto uniforme con:

$$y = 1,66 \text{ m}; v = 3,472 \text{ m/s}; v^2/2g = 0,615 \text{ m}.$$

La perdita d'imbocco è circa $0,3 \cdot 0,615 = 0,184 \text{ m}$.

Anche in questo caso, essendo $1,66 > \frac{2}{3}(2,50 - 0,184) = 1,54 \text{ m}$, è da considerarsi l'imbocco rigurgitato con $y_1 = 2,50 - (1,66 + 0,184) = 0,66 \text{ m}$ e $y_2 = 1,66 \text{ m}$.

In queste condizioni, con $b = 2,60 \text{ m}$, la portata che può defluire dall'imbocco è $11,86 \text{ m}^3/\text{s}$ che sta a $15 \text{ m}^3/\text{s}$ nel rapporto di 0,79: la larghezza dell'imbocco dovrebbe pertanto essere $2,60/0,79 \approx 3,30 \text{ m}$.

Si potrebbe, come nel caso precedente, mantenere $b = 2,60 \text{ m}$ e aumentare il carico all'imbocco. Si avrebbe allora, svolgendo i calcoli, $y_1 = 0,90 \text{ m}$ e $H = 1,66 + 0,90 + 0,184 = 2,75 \text{ m}$.

Valgono, anche per questo caso, le considerazioni svolte al termine del §6.3.6.4..

6.3.6.6. Progetto di un tombino

Il progetto riguarda un tombino che differisce dai precedenti per essere $y_o = 1,00 \text{ m}$; $\Delta z = iL = 0,60$; cioè $i = 0,015$.

È da presumere che possa trattarsi del caso classificato B.2.2.2.

All'imbocco si ha, come di consueto:

$$y_c = \frac{2}{3} 2,50 = 1,667 \text{ m}; \quad v = 4,043 \text{ m/s}; \quad v^2 / 2g = 0,833 \text{ m}.$$

Per una perdita di imbocco pari a $0,83 \cdot 0,3 = 0,25 \text{ m}$, essendo $2,50 - 0,25 = 2,25 \text{ m}$, i valori critici corrispondenti a un carico di $2,25$ sono:

$$y_c = 1,50 \text{ m}; \quad v = 3,836 \text{ m/s}; \quad q = y\sqrt{gy} = 5,754 \text{ m}^3/\text{s},$$

quindi è $b = 15/5,734 = 2,60 \text{ m}$.

A questo stato di moto corrisponde a moto uniforme, come s'è calcolato in precedenza, $i = 0,0048 < 0,015$. Pertanto, per essere la pendenza dello scatolare supercritica, ci si trova, come s'è ipotizzato, nel caso B.2.2.2.

Lo scatolare deve avere altezza D non inferiore a $2,00$: è infatti $H/D = 1,25$. In questi casi è da raccomandare un imbocco ben sagomato. Si nota, infine che, per il tipo di moto, la lunghezza del tombino non influisce sul dimensionamento, ovviamente a parità di pendenza.