

CAPITOLO 1

LE CASSE DI ESPANSIONE

1. Premessa

La difesa idraulica dei territori soggetti a rischio di inondazioni, si attua generalmente adottando i seguenti criteri:

1. Operare in maniera diffusa sul bacino, attraverso l'impiego di sistemazioni tese a ridurre i coefficienti di afflusso;
2. aumentare la capacità di portata del fiume mediante il rizezionamento e la rettifica di alcuni tratti dell'alveo, il sopraelevamento degli argini, la riduzione della scabrezza;
3. ridurre la portata deviandone parte in altro corpo idrico mediante scolmatori o diversivi;
4. ridurre la portata tramite l'immagazzinamento temporaneo di parte del volume dell'onda di piena in *serbatoi di laminazione* o in *casse di espansione*¹. Queste ultime, come si vedrà, si distinguono in *casse in linea* e *casse in derivazione*: nelle prime tutta l'onda di piena attraversa l'opera e fuoriesce deformata attraverso manufatti di scarico; nelle seconde solo una parte dell'onda (quella che sovrasta una portata preassegnata) viene derivata nella cassa, mentre la parte rimanente prosegue indisturbata nel corso d'acqua.

Poiché, nel caso di piene particolarmente intense, il primo, il secondo ed il terzo di questi criteri non sempre risultano essere risolutivi e inoltre possono peggiorare la situazione idraulica nei territori vallivi e sollevare gravi problemi di impatto ambientale e di inserimento nel territorio, ci si sta sempre di più orientando verso interventi appartenenti alla sfera del quarto criterio.

Serbatoi di laminazione e casse di espansione sono opere di accumulo dei volumi idrici comprendenti manufatti idraulici di imbocco e di sbocco che consentono di ottenere la riduzione della portata di colmo di un'onda di piena attraverso il temporaneo invaso di parte del suo volume. I fattori che influiscono su questo fenomeno sono la capacità del serbatoio o della cassa, le caratteristiche geometriche e quelle idrauliche dei manufatti di alimentazione e di scarico.

La forma dell'onda di piena in uscita dal serbatoio o da una cassa di espansione in linea ha l'andamento di figura 1-a, e risulta dalla risoluzione dell'equazione di continuità scritta nella forma:

$$Q_i(t) - Q_u(t) = \frac{dW}{dt}, \quad (1)$$

¹ Questo termine compare per la prima volta in ambito giuridico nella legge n° 183 del 1989 "Norme per il riassetto organizzativo e funzionale della difesa del suolo" all'articolo 3:

"Le attività di programmazione, di pianificazione e di attuazione degli interventi destinati a realizzare le finalità indicate all'articolo 1 curano in particolare: (omissis)

c) la moderazione delle piene, anche mediante serbatoi di invaso, vasche di laminazione, casse di espansione, scaricatori, scolmatori, diversivi o altro per la difesa dalle inondazioni e dagli allagamenti".

e nella $Q_i(t)$ e $Q_u(t)$ rappresentano rispettivamente le portate in entrata e in uscita al tempo t e W il volume invasato nell'opera allo stesso tempo.

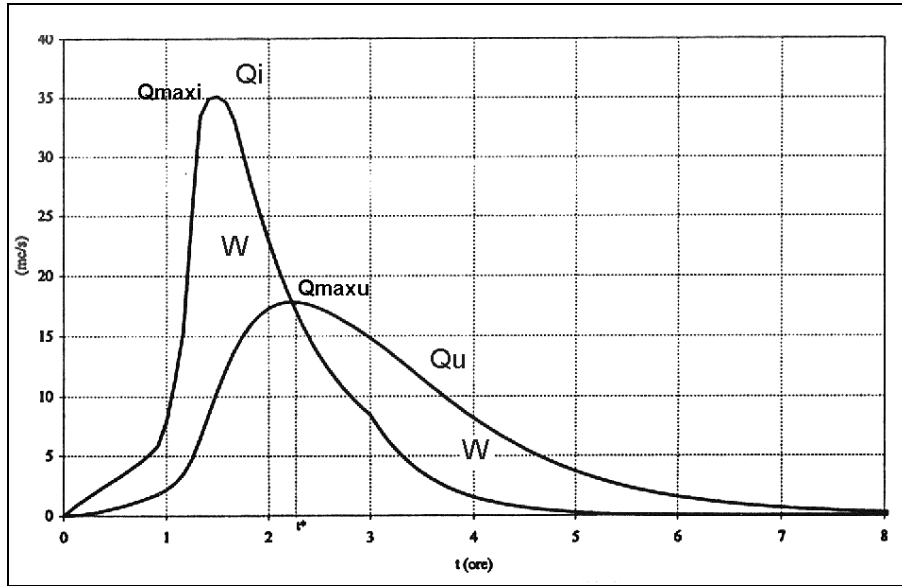


Figura 1-a Idrogrammi in ingresso e in uscita dal serbatoio di laminazione o da una cassa di espansione in linea.

Come si vede dalla figura, fino al tempo t^* la portata uscente è inferiore a quella entrante e la cassa si riempie progressivamente. Dopo t^* l'andamento si inverte e la cassa inizia a svuotarsi. L'area compresa tra i due idrogrammi nell'intervallo di tempo t_0 e t^* è pari al volume totale invasato

$$W = \int_{t_0}^{t^*} (Q_i(t) - Q_u(t)) \cdot dt \quad (2)$$

e quindi anche a quello necessario a realizzare la riduzione della portata di colmo dal valore Q_{maxi} al valore Q_{maxu} .

Se a valle dell'opera non è consentito il deflusso di portata superiore ad un valore di soglia prefissato Q_v , il volume della cassa deve essere tale da consentire l'abbattimento del colmo dell'onda di piena entrante fino al valore $Q_v = Q_{maxu}$.

Il rapporto tra i valori di colmo delle portate uscente ed entrante:

$$e = \frac{Q_{maxu}}{Q_{maxi}} \quad (3)$$

si definisce *rapporto di laminazione*, mentre per *efficienza di laminazione* ε si intende la grandezza:

$$\varepsilon = 1 - \frac{Q_{maxu}}{Q_{maxi}} \quad (4)$$

Quale che sia la forma dell'onda di piena entrante, purché definita da un solo colmo, il rendimento massimo si ottiene decapitando l'idrogramma al valore Q_{maxu} . Questo risultato è perseguibile solo mediante regolazione dei manufatti di alimentazione e

scarico con organi mobili (nel caso delle casse in linea tali opere risultano essere situate sullo stesso manufatto).

In figura 1-b è rappresentato l'andamento di un idrogramma di piena a valle di una cassa in derivazione nel caso in cui lo scarico di fondo della stessa sia chiuso durante l'evento di piena.

L'utilizzo di organi mobili nei manufatti di scarico delle casse di espansione in derivazione non pone problemi sotto il profilo della sicurezza in quanto la sola conseguenza negativa che potrebbe derivare da un loro cattivo funzionamento dopo il riempimento della cassa è quella di non consentire il rapido svuotamento della stessa, senza con ciò determinare gravi pericoli ai territori circostanti.

Anche in questo caso la regolazione degli organi di alimentazione della cassa permette un utilizzo ottimale del volume della cassa.

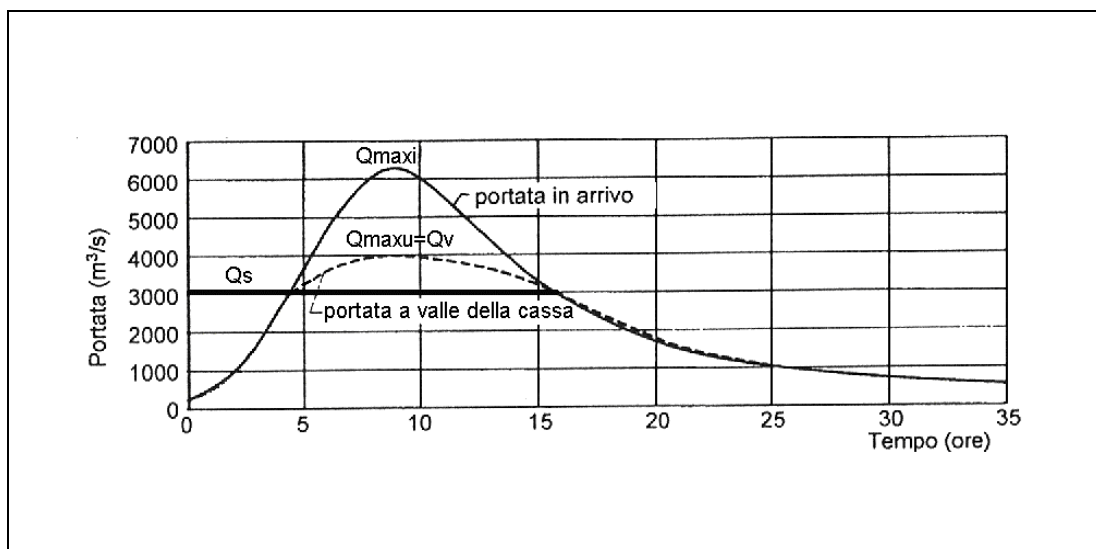


Figura 1-b Onde di piena in sezioni di un corso d'acqua situate subito a monte e a valle di una cassa di espansione in derivazione con sfioratore laterale non regolato ed organo di scarico chiuso.

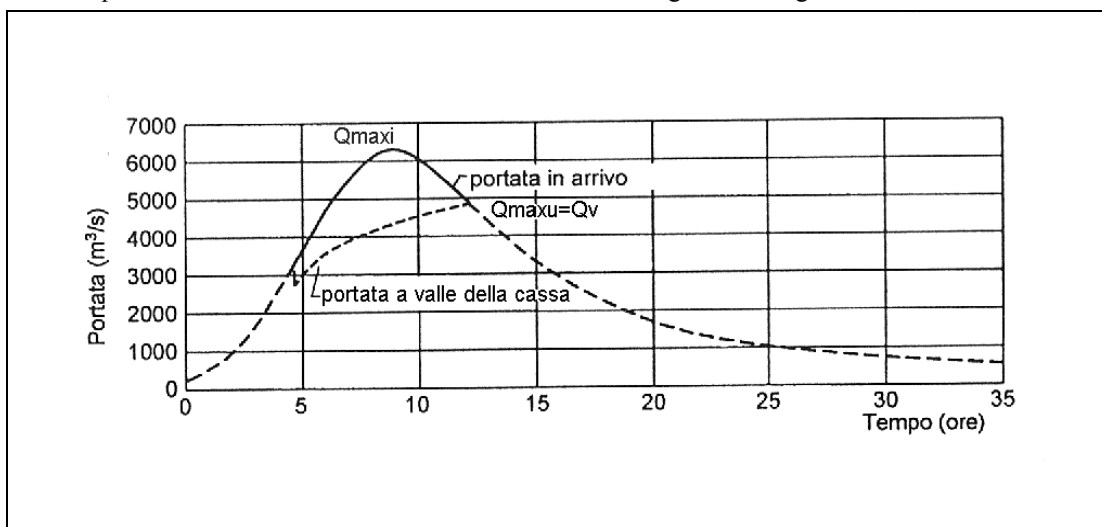


Figura 1-c Onde di piena in sezioni di un corso d'acqua situate subito a monte e a valle di una cassa di espansione in derivazione con sfioratore laterale e argine fusibile.

Il miglioramento del funzionamento della cassa può ottenersi oltre che con l'adozione di organi mobili di regolazione anche realizzando parte degli argini con ridotta resistenza meccanica (argini fusibili), così da poter essere demolita o automaticamente, in caso di sormonto da parte della corrente fluviale, o, con l'utilizzo delle tecniche del caso, dai sorveglianti idraulici preposti a questa funzione. Questa soluzione è stata utilizzata nelle golene del Po.

E' da notare che l'apertura improvvisa di una luce di rilevanti dimensioni (a cui è assimilabile il funzionamento idraulico di un cedimento arginale) provoca inizialmente una brusca diminuzione di portata nell'alveo (figura 1-c).

Altri due parametri importanti ai fini della definizione del funzionamento della cassa sono il rapporto tra il volume invasato ed il volume massimo invasabile, detto *rapporto di riempimento*:

$$\eta = \frac{W_{inv}}{W} ; \quad (5)$$

indicante la percentuale di utilizzo effettivo della cassa, e lo *sfasamento* tra il picco dell'onda in uscita e quello in ingresso, detto *tempo di sfasamento*:

$$\tau = \tau_u - \tau_i . \quad (6)$$

Il funzionamento idraulico delle casse di espansione in funzione del tempo di ritorno delle onde di piena è evidenziato chiaramente nella figura 2 nella quale è riportato l'esempio di una cassa in linea con organi di scarico a bocca tarata progettata per un'onda di piena con tempo di ritorno 100 anni. Si può notare immediatamente come l'ottimizzazione della cassa dal punto di vista del volume invasato non comporta l'automatica ottimizzazione nei riguardi dell'efficienza.

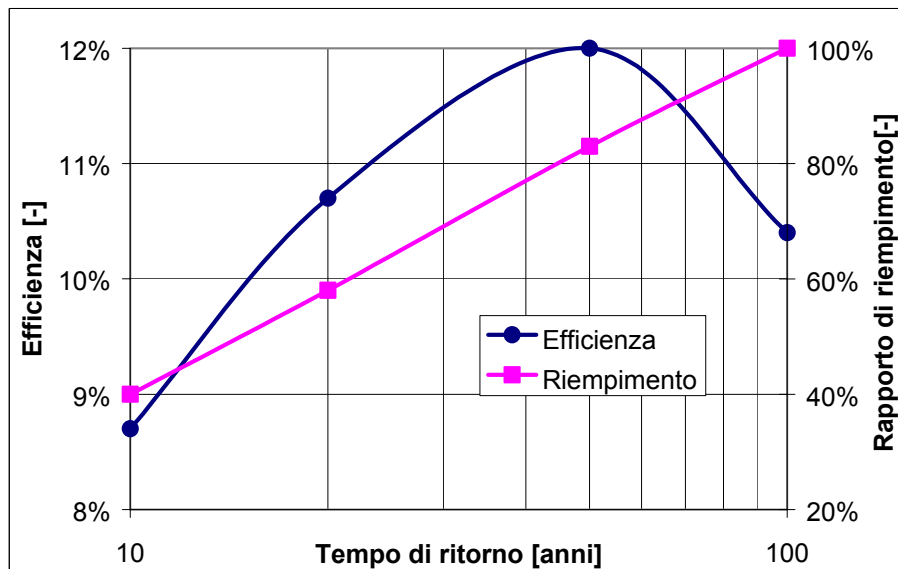


Figura 2 Andamento di ϵ e di η in funzione dei tempi di ritorno

Risulta infatti, che il massimo dell'efficienza si raggiunge per eventi di piena cinquantennali e risulta del 12%; al presentarsi di un evento centennale l'efficienza scende al 10,4%, mentre per un evento poco intenso, caratterizzato da un tempo di ritorno di 10 anni, esso si riduce all'8,7% circa.

Dallo stesso grafico si vede anche che la cassa viene impegnata per l'83% del suo volume nel caso di evento cinquantennale e, naturalmente, interamente per l'evento centennale.

Da questo esempio si ha la prevedibile conferma che l'efficienza massima di una cassa si ha per eventi di tempo di ritorno inferiore a quello di progetto e, inoltre, che l'utilizzo di una cassa è tanto più parziale quanto meno gravoso è il fenomeno di piena, ossia quanto più piccolo è il tempo di ritorno che lo caratterizza.

Discende da ciò la necessità di analizzare in sede di progetto il comportamento di una cassa di espansione considerando più eventi di piena aventi differenti probabilità di accadimento delle portate di colmo e dei volumi.

2. I serbatoi di laminazione

I serbatoi di laminazione, ubicati generalmente nella parte alta o media del reticolo idrografico ove con più facilità è possibile reperire terreni con conformazione morfologica adatta alla realizzazione di queste opere, sono invasi artificiali, in genere poco estesi ma profondi, ottenuti mediante lo sbarramento con dighe di valli più o meno strette. Queste opere comportano in genere costi di realizzazione elevati (vengono ritenuti accettabili costi non superiori a 10000 L/mc o poco più elevati) ma non sempre superiori a quelli delle casse di espansione. L'impatto sull'ambiente determinato dalle dighe è molto elevato, anche per il fatto che il serbatoio, qualora sia destinato esclusivamente alla laminazione, rimane vuoto per la gran parte della propria vita. Ciò risulta chiaramente dai dati di Tabella 1 la quale riporta la probabilità che l'evento con tempo di ritorno di 10, 20, 50, 100 e 200 anni possa verificarsi almeno una volta nell'arco della vita tecnica e/o economica dell'opera di cui sono stati considerati i valori di 20, 30 e 50 anni.

Tabella 1

Orizzonte di progetto			
T	20	30	50
10	88%	96%	99%
20	64%	79%	92%
50	33%	45%	64%
100	18%	26%	39%
200	10%	14%	22%

Da questi dati si vede, ad esempio, che per una di queste opere la cui vita tecnica ed economica è stabilita in 50 anni, la probabilità che venga interessata nel corso della sua vita almeno una volta da un evento a ricorrenza duecentennale è di appena il 22%.

Solitamente oggi i progetti delle dighe prevedono utilizzi molteplici del serbatoio: la produzione di energia idroelettrica, l'irrigazione, l'approvvigionamento idropotabile, ecc. Sotto questo riguardo significativa, nel Piano di Bacino dell'Arno, è la previsione del sovrizzo e sfangamento della diga di Levane e l'adeguamento degli scarichi di fondo con sfangamento della diga di La Penna, progettate originariamente per l'uso idroelettrico e delle quali oggi se ne esamina la possibilità di utilizzo anche per la laminazione delle piene nell'asta principale dell'Arno. In questi casi, dovendo la regolazione soddisfare più esigenze, la politica di gestione del sistema diventa assai complessa e deve essere studiata con analisi *a molti obiettivi*.

3. Le casse di espansione

Al contrario dei serbatoi di laminazione, le casse di espansione occupano un'area in genere molto più estesa, conseguentemente esse sono meno alte. Per questa ultima ragione, a parità di volume, il loro costo dovrebbe essere inferiore a quello delle dighe. Ciò però non è sempre verificato in quanto l'ampio sviluppo degli argini di contenimento delle casse e la necessità di dover ricorrere frequentemente alla realizzazione di diaframmi al piede degli stessi, per scongiurare il rischio di collasso per sifonamento, possono comportare costi molto elevati che si vanno ad aggiungere a quelli da sostenere per l'esproprio di estese superfici e per i necessari movimenti di terra.²

Quanto all'impatto ambientale, il confronto con le dighe di laminazione è in genere a favore delle casse di espansione, anche se a causa della loro estensione areale e collocazione territoriale, i problemi che esse pongono possono essere rilevanti.

Le *casse* vengono generalmente posizionate nella parte bassa del reticolo idrografico ove il territorio è pianeggiante e non è difficile individuare alvei molto estesi longitudinalmente e trasversalmente.

Come si è già accennato, le casse possono essere classificate in due categorie: *in linea* e *in derivazione*. Le prime (figure 3 e 4) sfruttano il volume ottenuto dal rigurgito provocato da un'opera trasversale realizzata in alveo, in genere una briglia o una traversa munita di luci a stramazzo o a battente che controllano la portata effluente in funzione del livello nella cassa. Questo tipo di opera, specie quando si rinuncia all'utilizzo di organi meccanici di regolazione, garantisce un funzionamento semplice ed affidabile.

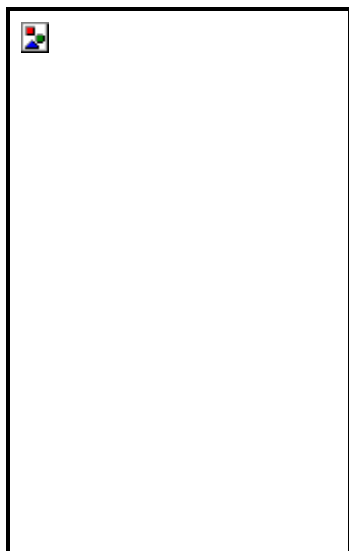


Figura 3 Schema di cassa in linea (Adami, 1998)

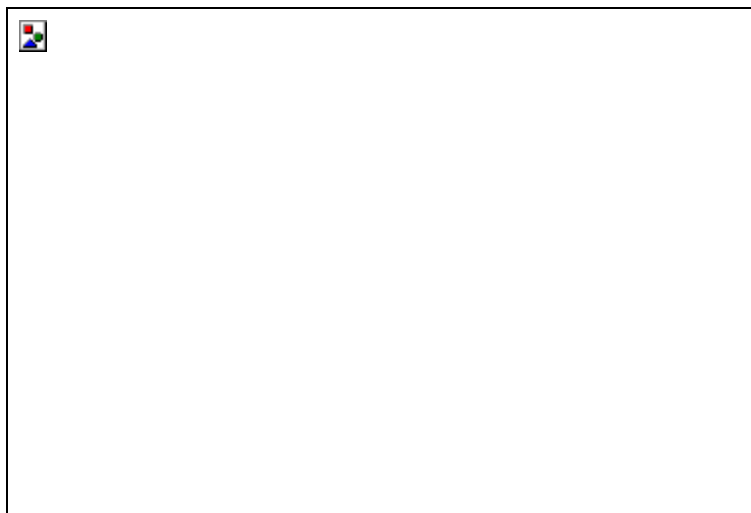


Figura 4 Esempio di cassa in linea: nella parte bassa della foto si può osservare l'invaso creato dalla traversa (South Tobacco Creek)

A quest'ultimo riguardo è da osservare che l'impiego di organi meccanici può determinare problemi nei casi non infrequenti di onde di piena in cui si susseguono più picchi in rapida successione; in casi del genere, infatti, la regolazione degli organi di scarico, specialmente nei bacini di modesta estensione, rischierebbe di essere

² La commercializzazione dei materiali proveniente dagli scavi eseguiti per aumentare la capacità della vasca potrebbe ridurre i costi di realizzazione dell'opera.

intempestiva. Questi rischi potrebbero essere ridotti utilizzando un efficiente sistema di previsione in tempo reale delle piene.

Le casse *in derivazione* (figure 5 e 6) consentono di ottenere una più efficace decapitazione dell'idrogramma di piena a parità di volume invasato. Esse sfruttano porzioni di territorio che si sviluppano parallelamente all'alveo, in generale aree di pertinenza fluviale, alle quali sono idraulicamente connesse attraverso soglie tracimabili, sifoni od altri sistemi idraulici collocati nel corpo dell'argine fluviale. Tali manufatti vengono progettati in modo da garantire da un lato un valore accettabile della frequenza in corrispondenza della quale la cassa viene interessata dalle piene e dall'altro che la portata massima che defluisce a valle dell'opera non superi quella ritenuta accettabile per l'alveo. Con questa disposizione la cassa viene allagata soltanto quando nel corso di una piena la portata supera il prefissato valore di soglia.

Chiaramente il funzionamento delle casse in derivazione è possibile solo se il fiume nel quale ne è prevista l'adozione è pensile. Solo in questi casi, infatti, parte dell'onda di piena può sversarsi nella cassa e ritornare in alveo attraverso un manufatto idraulico diverso dallo sfioratore laterale.

Quando questa situazione non può essere creata si deve optare per le casse in linea, nelle quali la connessione idraulica tra il fiume e l'area circostante è prodotta dal ribassamento dell'argine.

Se l'area in cui ubicare la cassa, pur non ricadendo nella pertinenza fluviale, non è molto lontana dal fiume, la connessione idraulica può essere realizzata con un canale scolmatore.

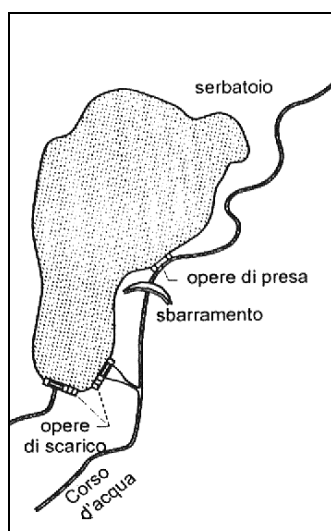


Figura 5 Schema di cassa in derivazione (Adami, 1998)



Figura 6 Esempio di cassa in derivazione: 1 traversa principale, 2 traversa secondaria, 3 sfioratore laterale 4 scaricatore (fiume Secchia)

Se la pendenza dell'alveo è elevata o se l'area che ospita la cassa è molto estesa, sia per ragioni costruttive che di ottimizzazione del funzionamento idraulico, si consiglia di suddividere la cassa in più *settori* (figure 7 e 8), ognuno munito di scarico di fondo e soglia sfiorante. La luce di fondo ha la duplice funzione di consentire lo svuotamento

delle singole vasche durante la fase calante dell'onda di piena e contemporaneamente di assicurare un certo cuscino d'acqua per facilitare la dissipazione dell'energia sovrabbondante posseduta dalla corrente proveniente dalla vasca posta immediatamente a monte di ciascuna di esse.

Questo tipo di soluzione consente di costruire la cassa in più fasi e di verificare il funzionamento della stessa prima di passare alla realizzazione delle fasi successive.

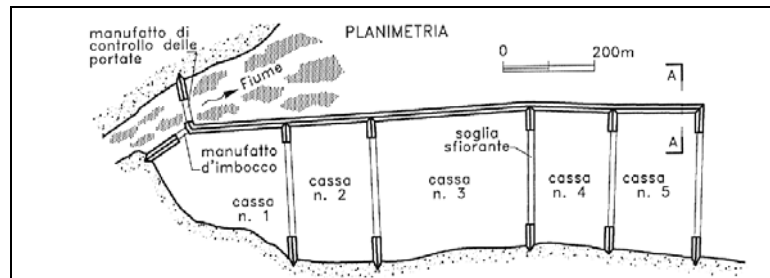


Figura 7 Schema di cassa a più settori (Da Deppo, 1998)

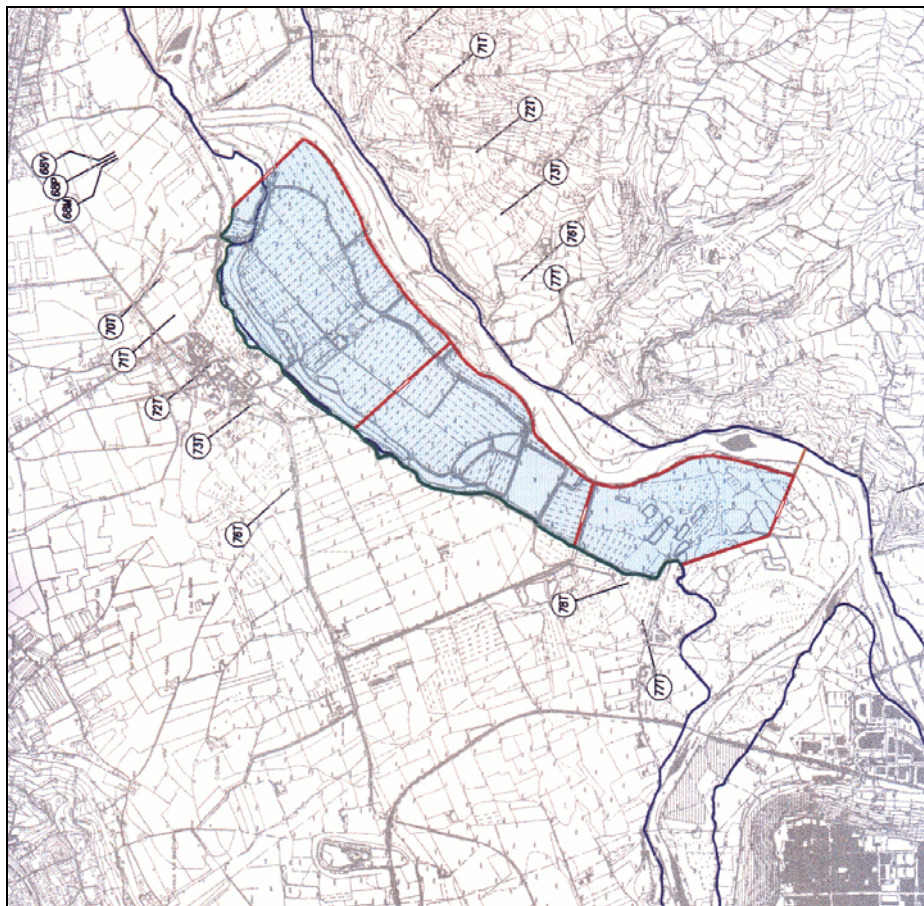


Figura 8 Esempio di cassa a più settori: le linee in rosso rappresentano le arginature di delimitazione delle aree golenali, le discontinuità in bianco sono gli sfioratori di superficie, la linea in verde è il limite dell'area di allagamento, la linea blu è la fascia di pertinenza fluviale, la linea in giallo è la sezione di controllo del deflusso in alveo (fiume Tanaro, Di Zeta Ingegneria).

Ulteriore vantaggio offrono le casse formate da più settori allorché si verificano le piene più frequenti; ad esempio decennali: in questa situazione è possibile occupare solo alcuni dei settori a disposizione, con notevoli vantaggi gestionali. Chiaramente al

verificarsi dei fenomeni di piena più intensi e meno frequenti (ad esempio centennali) vengono allagati tutti i settori della cassa messi in reciproca comunicazione idraulica.

E' da tenere presente che a fronte di una maggiore flessibilità le casse di espansione a settori presentano efficienza di laminazione inferiore.

La condizione che accentua questa caratteristica negativa si ha quando i singoli settori sono completamente indipendenti l'uno dall'altro, ossia quando si hanno più casse di espansione in linea disposte in serie lungo l'alveo.

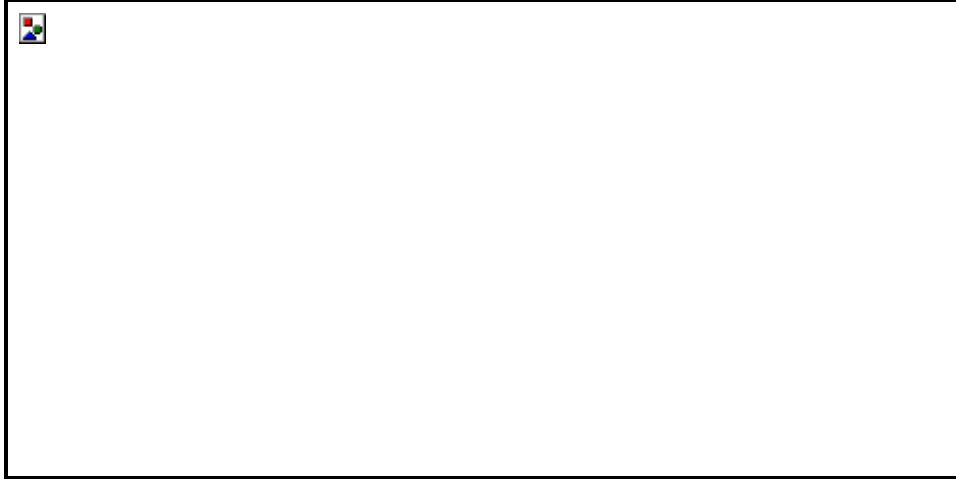


Figura 9 Schema di casse in serie in linea (Paoletti, 1997)

3.1 Criteri di dimensionamento

Il proporzionamento di una cassa di espansione viene generalmente condotto in due fasi: si procede inizialmente al dimensionamento di massima del volume necessario per ottenere l'abbattimento del colmo di piena desiderato; in seguito si procede a valutazioni idrauliche più precise mediante l'uso di modelli che simulano i fenomeni idraulici attraverso cui si attua il processo di laminazione.

Una prima valutazione del volume di invaso necessario per ottenere una assegnata riduzione della portata di colmo può essere condotta attraverso l'utilizzo di procedimenti semi empirici che tengono conto delle principali variabili che governano il processo di laminazione. Nel caso di casse in linea, una formula molto semplice è quella proposta da Marone (1971):

$$\frac{Q_{\max u}}{Q_{\max i}} = 1 - \frac{W}{W_i}, \quad (7)$$

dove W_i è il volume complessivo dell'onda di piena entrante, W è il volume della cassa, $Q_{\max i}$ è la portata al colmo dell'onda di piena entrante e $Q_{\max u}$ è la portata al colmo dell'onda di piena uscente. La precedente è stata ricavata nell'ipotesi che il dispositivo di sbocco sia a stramazzo e che l'onda in ingresso sia definibile mediante l'espressione:

$$Q_i = Q_{\max i} \left(\frac{t}{tc} \right) \cdot e^{\frac{1-t}{tc}}, \quad (8)$$

dove tc è il tempo di corrivazione del bacino; essa tuttavia fornisce risultati sufficientemente approssimati anche per onde di piena di forma differente, ad esempio triangolare.

In via di prima approssimazione la (7) può essere scritta nella forma:

$$\frac{Q_{\max u}}{Q_{\max i}} = 1 - \left(\frac{S_s h_{\max}}{\phi S r p} \right), \quad (9)$$

dove S_s è l'estensione media dello specchio liquido della cassa, h_{\max} è il tirante idrico medio nella cassa in corrispondenza del livello idrico massimo, S è la superficie del bacino idrografico sotteso dalla sezione fluviale in cui è situata la cassa, ϕ un coefficiente <1 che tiene conto delle perdite idrologiche che si verificano nel bacino durante la formazione delle piene, r è il coefficiente di ragguaglio delle piogge all'area, ed p è l'altezza di pioggia puntuale media sul bacino di tempo di ritorno T di progetto e di durata pari a quella che dà luogo all'evento più critico nei riguardi della laminazione; ϕ , r ed p possono essere calcolati con i metodi esposti nel capitolo 2 paragrafi 1.3 (tabella 1), 2.5 (figura 5), 2.3, 2.4 (tabella 2 e figure 2 e 3).

Un altro metodo di tipo globale più soddisfacente di quello appena descritto si basa sulla determinazione del volume W^* dell'onda di piena sovrastante la portata di soglia Q_v (figura 10) che rappresenta, come visto in precedenza, il valore minimo del volume della cassa necessario a ridurre la portata da $Q_{\max i}$ al valore Q_v . Come si vedrà il volume effettivo della cassa è superiore, anche di molto, a W^* . Tale grandezza può essere calcolata nel modo di seguito indicato:

1. si determinano le distribuzioni di probabilità dei massimi annuali delle portate al colmo di piena $Q_{\max i}(T)$ e delle portate medie giornaliere $Q_m(T)$ mediante metodi diretti o modelli di regionalizzazione (v. Capitolo 2 paragrafo 1).
2. Nell'ipotesi che la curva di durata, a scansione oraria, delle portate di piena³ per un assegnato tempo di ritorno T nel campo delle brevi durate (tra 0 e 24 ore) possa essere rappresentata analiticamente con l'espressione (figura 11):

$$Q(\vartheta, T) = Q_{\max i}(T) e^{-\frac{\vartheta}{k}}, \quad (10)$$

nella quale $Q(\vartheta, T)$ rappresenta la portata relativa al tempo di ritorno T che viene uguagliata o superata per un tempo (durata) pari a ϑ ore, $Q_{\max i}(T)$ è la portata al colmo di tempo di ritorno T e k è un parametro che può essere valutato con la seguente relazione di evidente significato:

$$\int_0^{24} Q(\vartheta, T) d\vartheta = Q_m(T) 24, \quad (11)$$

si ricava:

$$k(1 - e^{-\frac{24}{k}}) = \frac{Q_m(T)}{Q_{\max i}(T)} 24 = \frac{24}{C_p(T)}, \quad (12)$$

³ ossia la distribuzione delle portate nell'arco delle 24 ore

dove con $C_p = Q_{\max i}(T)/Q_m(T)$ è un coefficiente, definibile come coefficiente di punta, e k è espresso in ore.

3. Fissato il valore di portata Q_v compatibile con la capacità di portata dell'alveo, tramite la (10) è possibile determinare la corrispondente durata \mathcal{Q}_v , ed in definitiva il volume W^* dell'onda di piena sovrastante la portata di soglia Q_v (figura 10). Risulta, dopo alcuni semplici passaggi:

$$\mathcal{Q}_v = -k \ln e \quad (13)$$

$$W^* = kQ_{\max i} [1 - e(1 - \ln e)] \quad (14)$$

avendo indicato con

$$e = \frac{Q_v}{Q_{\max i}} \quad (15)$$

il rapporto di laminazione.

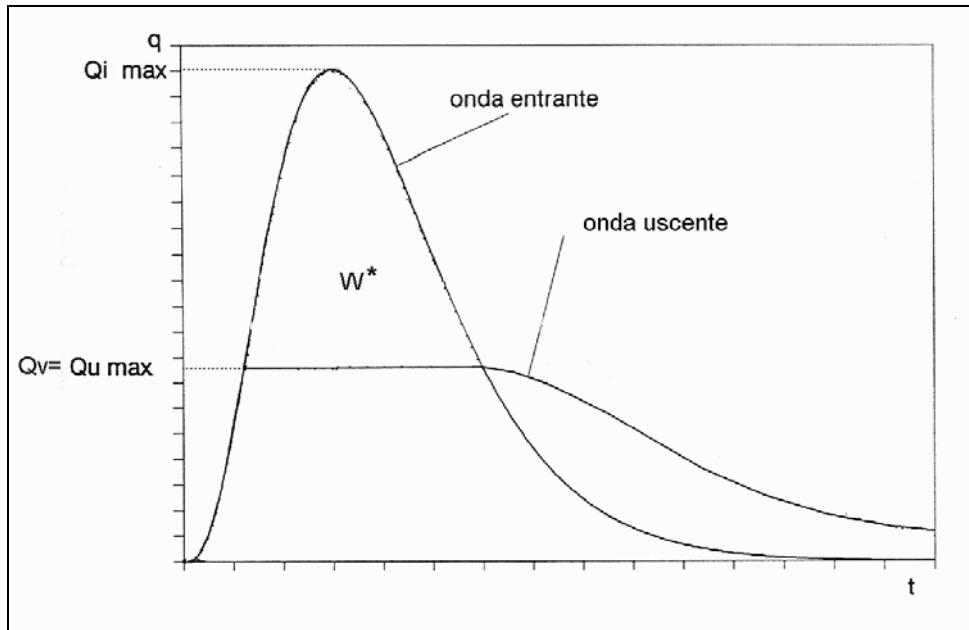


Figura 10 Funzionamento ideale di una cassa di espansione.

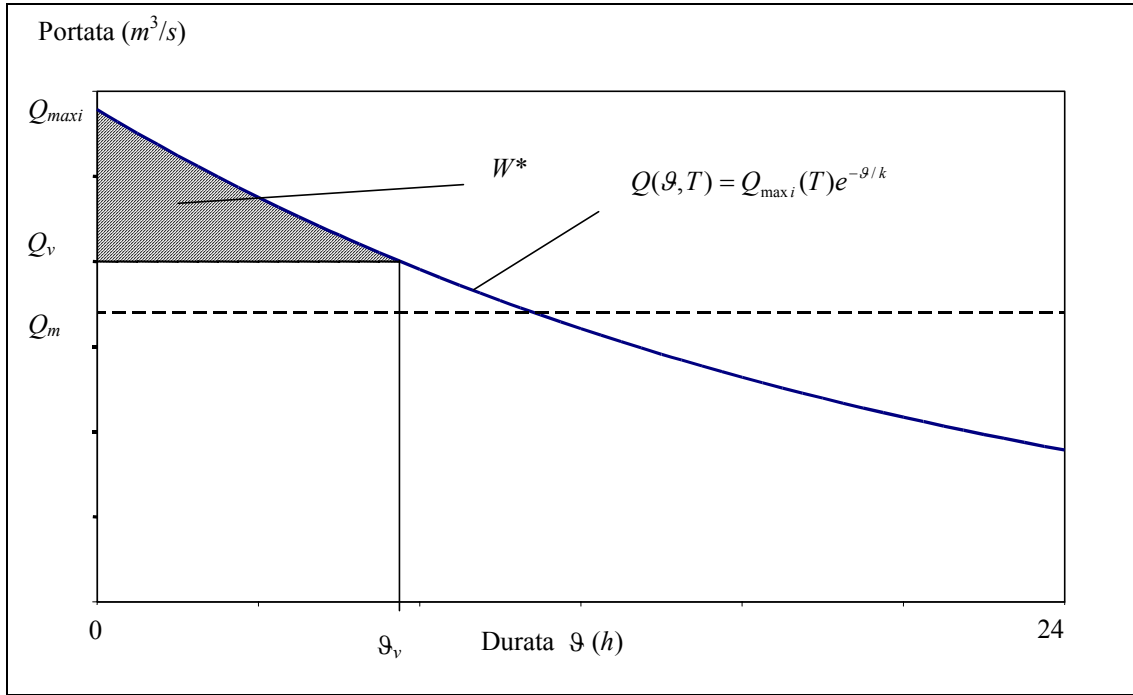


Figura 11

Come si è già detto in precedenza, il volume W della cassa necessario al raggiungimento del valore prefissato del rapporto di laminazione e è maggiore di W^* e dipende oltre che dalla forma dell'onda di piena anche dalla scala di efflusso degli organi di scarico. Nel caso delle casse munite delle usuali tipologie degli organi di scarico e se si ipotizza che gli idrogrammi in ingresso ed in uscita siano triangolari, con buona approssimazione si può maggiorare il volume W^* nella misura data dalla formula:

$$W = W^* \left(1 + \frac{e}{1-e} \right) \quad (16)$$

Per le casse in derivazione l'incremento di volume rispetto a W^* può essere valutato in base alla seguente considerazione: con riferimento alla figura 1-b, detta Q_s la portata in corrispondenza della quale inizia ad essere alimentata la cassa, il volume W necessario alla laminazione è compreso tra:

$$W^* < W < W_s, \quad (17)$$

dove W_s è il volume della parte dell'onda di piena che sovrasta la portata Q_s .

W può essere approssimativamente calcolato aggiungendo al valore di W^* una stima del volume compreso tra Q_s e Q_v . Se si ipotizza che gli idrogrammi in ingresso ed in uscita siano triangolari, W può essere valutato con l'espressione:

$$W = W^* \left[1 + (1-\alpha) \frac{e}{1-e} \right], \quad (18)$$

dove il coefficiente α rappresenta il rapporto Q_s/Q_v .

Noto l'idrogramma effettivo di piena in ingresso ed approssimando con un triangolo il volume da sottrarre a W_s , la grandezza W può essere anche valutata con l'espressione:

$$W = W_s - \frac{(Q_v - Q_s)(t_1 - t_2)}{2}, \quad (18')$$

dove t_2 e t_1 sono i tempi di fine e inizio dello sfioro.

Le approssimazioni adottate possono comportare sovrastime del W che sono tanto più grandi quanto più grande è il volume aggiuntivo rispetto a W^* . Per questo motivo le formule danno le migliori prestazioni quando W^* rappresenta una quota significativa del volume totale W .

L'applicazione della procedura illustrata è assai semplice, come risulta dall'esempio che segue e che si riferisce alla Sieve a Fornacina.

Si vuole ridurre la portata di colmo centennale del 30%, si vuole cioè che sia $e=0,70$.

Con i dati di piena osservati nella stazione idrometrografica installata in tale sezione si sono ricavati, con l'applicazione del modello M.G. (v. Capitolo 2 paragrafo 1), i seguenti valori della portata di colmo e di quella media giornaliera di tempo di ritorno $T=100$ anni e del corrispondente coefficiente di punta C_p .

Tabella 2

Dati in ingresso	
$Q_{maxi}(T=100)$	1211 mc/s
$Q_m(T=100)$	712 mc/s
$Q_v(T=100)$	848 mc/s
$C_p(T=100)$	1,7

Tabella 3

Risultati	
k	20,4 h
\mathcal{G}_v	7,5 h
W^*	$4,48 \cdot 10^6$ mc

Supposto che l'opera di alimentazione inizi a funzionare quando $Q_s=700$ mc/s, si ha a norma della (18): $W = 4,48 \cdot 10^6 \left[1 + \left(\frac{700}{848} \right) \frac{0,7}{1-0,7} \right] = 6,31 \cdot 10^6$ mc.

L'opera di alimentazione della cassa deve essere progettata in modo che si verifichi il funzionamento ora indicato; ciò comporta che la scala delle portate dell'opera sia tale per cui al presentarsi del picco dell'onda di piena defluisca attraverso di essa la portata $Q_{maxi}-Q_v$.

Per ottenere la stessa laminazione, una cassa in linea dovrebbe invece avere un volume, calcolabile con la (16), pari a: $W = 4,48 \cdot 10^6 \left[1 + \frac{0,7}{1-0,7} \right] = 14,9 \cdot 10^6$ m³.

Per lo stesso caso e nell'ipotesi di cassa in linea si esegue ora il calcolo di W con il metodo di Marone. L'estensione del bacino della Sieve a Fornacina è di 831 Km². Assumendo una durata dell'evento meteoerico pari al tempo di corrivazione del bacino, stimato in circa 10 ore, e utilizzando le curve di possibilità pluviometrica ottenute dal modello di regionalizzazione delle piogge intense esposto nel Capitolo 2 si ottiene per il tempo di ritorno $T=100$ anni nel centro di scroscio un'altezza di precipitazione pari a

127 mm. Dal diagramma di figura 5 del Capitolo 2 si ricava per $S=831 \text{ Km}^2$ $r=0,70$. Il coefficiente di afflusso ϕ per il bacino della Sieve a Fornacina, come risulta dalla tabella 1 del Capitolo 2 si può assumere pari a 0,67.

In definitiva il volume dell'onda di piena risulta pari a $W=831 \cdot 10^6 \cdot 0,127 \cdot 0,67 \cdot 0,70 = 49,4 \cdot 10^6 \text{ m}^3$. Il volume della cassa necessario ad abbattere la portata di colmo del 30% risulta pertanto pari a $49,4 \cdot (1-0,7) \approx 14,8 \cdot 10^6 \text{ m}^3$. Tale valore come si vede, coincide praticamente con quello calcolato con il metodo illustrato in precedenza. Corre l'obbligo di precisare che tale circostanza può essere stata determinata da fattori casuali in quanto i suddetti metodi non sono in grado di garantire approssimazioni così spinte.

3.2. Verifica del funzionamento idraulico della cassa

Una volta ottenuto il volume di prima approssimazione della cassa occorre verificare che esso si possa ricavare sul territorio interessato dall'opera. L'indagine da svolgere in proposito deve permettere di individuare gli elementi principali necessari alla progettazione della cassa: tipologia, possibilità di reperimento di volumi aggiuntivi attraverso lo scavo di materiali, condizioni geomorfologiche idonee alla realizzazione delle singole opere, ecc.

Le soluzioni individuate devono quindi essere verificate affinando e sviluppando i calcoli in modo più dettagliato.

Il funzionamento idraulico delle casse di espansione, indipendentemente dalla specifica tipologia e nel caso non abbiano eccessiva lunghezza nel senso del corso d'acqua, può essere studiato con modelli semplificati cosiddetti statici, che si basano sulla soluzione numerica dell'equazione di continuità:

$$Q_i(t) - Q_u(t) = \frac{dW(t)}{dt} \quad (19)$$

nella quale Q_i e Q_u rappresentano rispettivamente la portata entrante e quella uscente dalla cassa al tempo t e $W(t)$ è il volume invasato nella cassa allo stesso tempo. La prima di tali portate deve ritenersi fissata come condizione al contorno di monte e può derivare da uno specifico idrogramma osservato, ad esempio misurato nel corso di un evento di riferimento, ovvero, da un idrogramma sintetico costruito con l'ausilio di modelli afflussi-deflussi (vedi capitolo 2) assumendo un evento meteorico associabile in qualche modo al tempo di ritorno T di progetto. Nelle casse in linea l'onda di piena in ingresso alla cassa coincide con quelle del corso d'acqua naturale indisturbato. Nelle casse in derivazione invece le portate in ingresso $Q_i(t)$ dipendono della scala delle portate dell'opera di alimentazione che connette la cassa al fiume. La portata effluente Q_u dipende invece dalla scala di efflusso $Q_u(h)$ dell'opera (o delle opere) di scarico. Il volume invasato W è, a sua volta, funzione del livello idrico nella cassa e quindi del carico h sull'opera di scarico.

In definitiva le variabili dipendenti $Q_u(t)$ e $W(t)$ possono esprimersi nella forma:

$$Q_u(t) = Q_u(t, h(t)) \quad (20)$$

$$W(t) = W(h(t)) \quad (21)$$

Nel caso in cui i manufatti di scarico siano fissi, ossia non regolati da organi mobili, la $Q_u(t)$ è funzione del tempo t attraverso il solo livello idrico h . Nei casi in cui i manufatti

di scarico siano muniti di organi mobili come paratoie, valvole e saracinesche non si può più parlare di una scala delle portate in quanto le caratteristiche geometriche dello scarico variano nel tempo.

La (21) è detta *curva di invaso* e dipende dalle caratteristiche morfologiche dell'area in cui viene realizzata la cassa. Essendo:

$$W(h) = \int_{h_{\inf}}^{h_{\sup}} S(h) dh, \quad (22)$$

con h quota generica del pelo libero nella cassa, è possibile calcolare la curva di invaso avendo a disposizione una carta a curve di livello in scala adeguata (in genere 1:10000 o 1:5000).

La superficie S racchiusa all'interno di una curva di livello può essere misurata graficamente, tramite planimetro, oppure, numericamente, attraverso la formula di Gauss:

$$S = abs\left(\frac{1}{2} \sum_{i=0}^{N-1} (x_{i+1} - x_i) \cdot (y_{i+1} + y_i)\right) \quad (23)$$

ove x_i e y_i sono le coordinate dei vertici delle curve derivate, ad esempio, dalla cartografia numerica, oppure, in presenza di un rilievo topografico di dettaglio, dalla elaborazione dello stesso. L'operazione, lavorando in ambiente *CAD* è del tutto automatica ove si sia assicurata, di solito manualmente, la continuità e la chiusura di tutte le curve.

Si può quindi calcolare la curva di invaso, considerando una sequenza discreta di valori di h , nella forma:

$$W_i = \sum_{i=1}^{n-1} \left(\frac{S(h_i) + S(h_{i+1})}{2} \right) \cdot (h_{i+1} - h_i) \quad (24)$$

Se necessario, si può valutare l'opportunità di esprimere in forma analitica la curva di invaso. In questo caso si utilizza in genere un polinomio di secondo o terzo grado per operare una regressione tra i volumi W_i ottenuti e i corrispondenti valori h_i , nella forma:

$$W(h(t)) = \sum_{k=0}^n a_k \cdot h^k \quad (25)$$

Per il calcolo della curva di invaso non sembra inutile fare alcune precisazioni. Innanzi tutto, per ciò che concerne la regressione dei dati noti, è necessario che volumi e quote non differiscano più di un ordine di grandezza; i volumi devono quindi essere espressi in migliaia, centinaia o milioni di metri cubi a seconda dei casi. Per controllare l'affidabilità della curva è inoltre utile verificare che gli scostamenti tra punti reali e punti calcolati siano accettabili.

La curva deve passare per il punto $W=0$, $h=h_{\inf}$, dove h_{\inf} è il punto a quota minima, ed infine se la rappresentazione della curva di invaso mediante una unica equazione non risulta soddisfacente, è necessario suddividerla in più tratti esprimibili da differenti equazioni.

Sostituendo le equazioni (20) e (25) nella (19) si ottiene un legame differenziale tra due sole funzioni del tempo, $Q_i(t)$ e $h(t)$, che può essere risolta rispetto ad una delle due, qualora si conosca l'altra e si specifichino le condizioni iniziali, cioè il valore della funzione incognita all'istante $t=0$. Nelle situazioni più frequenti la variabile nota è la portata in ingresso $Q_i(t)$ e quella incognita da calcolare è il livello idrico $h(t)$. Ricavati i valori di quest'ultima nel modo detto si ottiene la portata in uscita $Q_u(t)$.

La soluzione di tale equazione differenziale in forma chiusa è possibile solo nel caso in cui le espressioni della (20), della (21) e l'onda di piena in ingresso siano definite analiticamente e in forma semplice.

In genere la risoluzione delle equazioni dette avviene invece per via numerica trattando l'equazione (19) per differenze finite scrivendola nella forma:

$$\frac{Q_i(t + \Delta t) + Q_i(t)}{2} - \frac{Q_u(t + \Delta t) + Q_u(t)}{2} = \frac{W(h(t + \Delta t)) - W(h(t))}{\Delta t} \quad (26)$$

L'espressione che ne risulta è in forma implicita. Di conseguenza non è possibile calcolare direttamente il valore di $h(t + \Delta t)$. Per questa ragione è necessario procedere iterativamente adottando, ad esempio, lo schema che segue:

1. nota la condizione iniziale ($h(t=0)=h_o$), si avvia la procedura con un primo valore di tentativo per $h(t + \Delta t)$;
2. si esplicita la $Q_u(t + \Delta t)$ dalla (25):

$$Q_u(t + \Delta t) = 2 \cdot \left(\frac{Q_i(t + \Delta t) + Q_i(t)}{2} - \frac{W(h(t + \Delta t)) - W(h(t))}{\Delta t} \right) - Q_u(t) \quad (27)$$

3. si cercano due valori iniziali $h(t + \Delta t)_{inf}$, $h(t + \Delta t)_{sup}$ tali per cui la differenza tra la (27) e la (20) dia due risultati di segno discorde;
4. si calcola una nuova altezza $h''(t + \Delta t)$ con l'espressione:

$$h''(t + \Delta t) = \frac{h(t + \Delta t)_{inf} + h(t + \Delta t)_{sup}}{2} \quad (28)$$

5. Si ritorna al punto 3 sviluppando sempre i calcoli nell'intervallo di altezze i cui estremi forniscono una differenza tra la (27) e la (20) di segno discorde.
6. Le iterazioni vengono ripetute fino a quando la differenza tra la (27) e la (20) risulta inferiore ad un valore ε scelto a priori.

Nei riguardi del significato delle grandezze $Q_i(t)$ e $Q_u(t)$ si osserva che:

come già detto, nel caso di casse in linea, $Q_i(t)$ e $Q_u(t)$ rappresentano rispettivamente l'onda di piena proveniente da monte e la portata effluente dalle luci ricavate nell'opera trasversale che sbarra il corso d'acqua; nel caso di casse in derivazione la $Q_i(t)$ è la portata convogliata dall'opera di alimentazione della cassa (sfioratori, sifoni, ecc.) e la $Q_u(t)$ è quella totale uscente dallo scarico di fondo e dallo sfioratore di sicurezza. L'onda di piena laminata $Q_{u''}(t)$ viene calcolata con l'espressione:

$$Q_{u''}(t) = Q_{i''}(t) - Q_{sf}(t) + Q_u(t) \quad (29)$$

dove $Q_{sf}(t)$ è la portata sfiorata e $Q_{i''}(t)$ è la portata proveniente dal bacino di monte.

Si può osservare che l'espressione (29) contiene in sé un'ipotesi implicita. Si suppone infatti che il tempo necessario all'onda di piena per percorrere il tratto compreso tra l'opera di alimentazione della cassa e lo scarico di fondo sia inferiore al passo di calcolo Δt e, più in generale, che sia trascurabile rispetto a quest'ultimo.

Se ciò non fosse l'equazione (29) andrebbe riscritta nel seguente modo:

$$Q_{u''}(t) = Q_{i''}(t - \tau_r) - Q_{sf}(t - \tau_r) + Q_u(t), \quad (30)$$

dove τ_r è il tempo necessario a percorrere il suddetto tratto.

Considerando che durante un evento di piena le velocità in alveo possono essere valutate in 4-5 m/s ed ipotizzando che le distanze tra organi di alimentazione e organi di scarico sono al massimo dell'ordine di qualche centinaio di metri, τ_r risulta essere pari al massimo a poco più di un minuto.

In alcuni casi la somma tra la portata laminata e la portata uscente dagli organi di scarico possono produrre un idrogramma risultante a 2 picchi.

Infine nel caso di casse a più settori, per i settori intermedi vale l'espressione:

$$Q_{i\sup}(t) - Q_u(t) = \frac{dW(t)_{\text{settore}}}{dt} \quad (31)$$

dove $Q_{i\sup}(t)$ è la portata proveniente dallo sfioratore di superficie del settore a monte, $Q_u(t)$ è la portata uscente dal settore e convogliata al settore di valle tramite lo sfioratore e/o direttamente al fiume tramite lo scarico di fondo.

Se il livello del singolo settore intermedio durante la simulazione si trova sempre al di sotto della quota dello sfioratore del settore immediatamente a monte, i singoli settori possono essere simulati separatamente. Quando il livello idrico del settore di valle rigurgita (vedi capitolo 6 formula 21), i settori sono idraulicamente indipendenti l'uno dall'altro.

In queste condizioni la simulazione idraulica diventa alquanto complessa. Prendendo come esempio una cassa con due settori, e chiamando con h_1 ed h_2 rispettivamente il livello del settore di monte e quello di valle, la procedura da adottare è la seguente:

- 1) ad ogni passo temporale si calcola dapprima il livello h_1 e poi (nota la portata uscente dal settore di monte Qu_1 uguale a quella entrante nel settore di valle Qe_2) il livello h_2 ;
- 2) Se h_2 verifica la condizione (21) del capitolo 6, la portata Qu_1 dipende anche da h_2 ;
- 3) Si tenta quindi un valore di h_2 ;
- 4) Si calcola la Qu_2 e quindi il livello idrico h_1 tenendo conto che la formula della portata uscente Qu_1 è ora quella dello stramazzo rigurgitato, e poi di nuovo si calcola h_2 ';
- 5) Se $h_2 = h_2'$ si passa al passo temporale successivo, altrimenti si tenta un nuovo valore di h_2 .

Per il calcolo delle scale di efflusso degli organi di ingresso e di uscita dalla casse vedi il capitolo 6.

Nel caso in cui le vasche abbiano lunghezza di qualche rilievo sicché non è più accettabile l'ipotesi di funzionamento statico della cassa ,o dei singoli settori di essa (superficie liquida nella cassa in ogni istante orizzontale), occorre passare all'utilizzo di modelli basati sulle equazioni di de Saint Venant monodimensionali (capitolo 3) e, solo in qualche caso, bidimensionali.

3.2.1 Svuotamento della cassa

Il tempo di svuotamento della cassa ha notevole importanza per diverse ragioni. In particolare esso stabilisce dopo quanto tempo la cassa è nuovamente in grado di ripristinare le condizioni preesistenti, e quando è in grado di fronteggiare più eventi di piena consecutivi.

Se da una parte è auspicabile che la cassa non abbia tempi di svuotamento eccessivi per non aggravare i problemi di sifonamento degli argini (vedi capitolo 5), dall'altra il mantenimento del volume all'interno della cassa per qualche tempo potrebbe permettere di raggiungere il massimo dell'efficienza.

Il tempo di svuotamento viene calcolato direttamente studiando il funzionamento idraulico della cassa con i procedimenti descritti. E' da osservare in proposito che lo svuotamento della cassa avviene in un tempo inferiore rispetto a quello fornito dal calcolo, in quanto quando il livello idraulico nella cassa diventa esiguo, gli effetti della pendenza della cassa e della presenza dei canali di scolo non sono più trascurabili. L'ipotesi statica viene quindi a mancare in quanto non sono in questo caso trascurabili i moti orizzontali in direzione degli organi di scarico.

3.3 Analisi delle prestazioni delle diverse tipologie di cassa.

Come si è già detto nel paragrafo 3.1 il rapporto di laminazione e di una cassa in linea munita all'estremità di valle da una luce a stramazzo, in via di prima approssimazione, può essere calcolata con la formula di Marone.

La generalizzazione della (7) al caso di n casse in serie disposte in linea ciascuna di volume W/n , conduce alla seguente espressione:

$$e = \frac{Q_{\max u}}{Q_{\max i}} = \left(1 - \frac{W}{n \cdot W_i} \right)^n \quad (32)$$

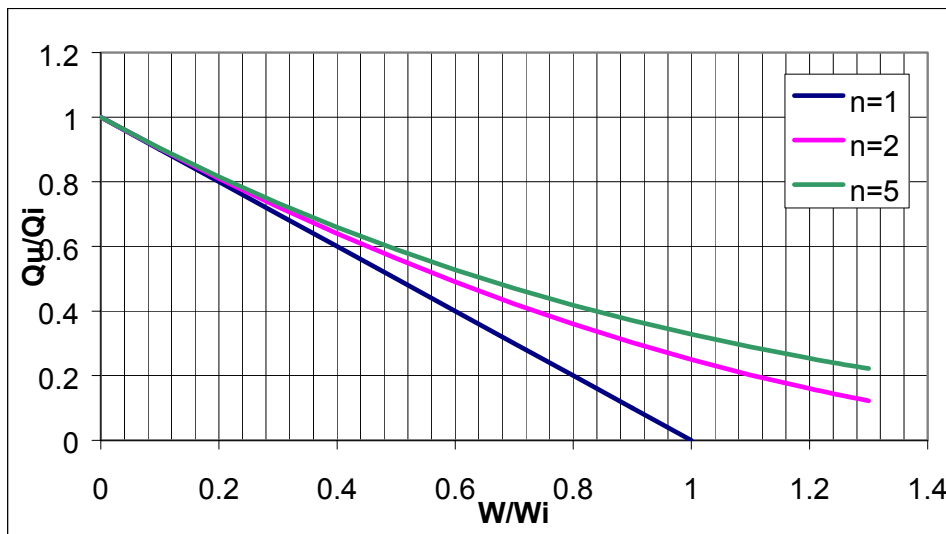


Figura 12 Andamento del rapporto di laminazione al variare del numero n di casse di espansione

E' necessario segnalare che questa relazione è valida solo se le singole onde in ingresso alle casse in linea rispettano le ipotesi su cui si basa la (7).

Dal grafico di figura 12 si può osservare come per raggiungere la stessa riduzione del colmo di piena il sistema di casse di espansione in serie richiede un volume più grande e tanto più grande quanto maggiore è la riduzione del colmo che si vuole ottenere e quanto maggiore è il numero di casse in linea⁴.

La relazione (32) cade in difetto quando le casse sono distanti tra loro e diventa tanto più imprecisa quanto maggiore è tale distanza.

⁴ A parità di volume di invaso, all'aumentare del numero di casse o settori la portata di picco uscente tende ad aumentare a scapito dell'efficienza di laminazione (figura 12-a)



Figura 12-a Funzionamento idraulico di casse in serie o a più settori (Paoletti, 1997)

In questa situazione si ricade nel caso cui si è accennato al termine del paragrafo precedente; inoltre potrebbe non essere trascurabile il contributo di portata e volume aggiuntivi dato dagli affluenti che si incontrano nel tratto fluviale in cui sono situate le diverse casse.

Se le casse in linea disposte in serie possiedono organi di alimentazione e scarico funzionanti a battente e non a stramazzo e/o l'onda di piena ha forma diversa da quella ipotizzata da Marone, la relazione (32) fornisce risultati meno precisi pur rimanendo sostanzialmente valido il concetto che all'aumentare del numero di casse in linea, aumenta il volume complessivamente necessario per ottenere un assegnato rendimento di laminazione.

Il calcolo dell'efficienza viene svolto come segue:

$$e = \frac{Q_{\max u}}{Q_{\max i}} = \prod_{j=1}^n e_j = \frac{Q_{\max u_1}}{Q_{\max i}} \frac{Q_{\max u_2}}{Q_{\max u_1}} \dots \frac{Q_{\max u}}{Q_{\max u_{n-1}}} \quad (33)$$

$$\varepsilon = 1 - e = 1 - \prod_{j=1}^n e_j \quad (34)$$

Dove $Q_{\max u}$ è la portata massima in uscita dall'ultima cassa, $Q_{\max i}$ è quella in entrata dalla prima, $Q_{\max u_j}$ è la portata in uscita dalla j-esima cassa.

A parità di volume per un'unica cassa in linea risulta:

$$e' = \frac{Q_{\max u'}}{Q_{\max i}} \quad (35)$$

Poiché $Q_{\max u'} < Q_{\max u}$ risulta:

$$\varepsilon' = 1 - e' > \varepsilon \quad (36)$$

Se si utilizza la formula (16), l'espressione del rapporto di laminazione per una serie di n casse in linea, ciascuna di volume pari a W/n , assume la seguente forma:

$$e = \prod_j^n \left(1 - \frac{W_j^*}{\frac{W}{n}} \right) \quad (37)$$

Per ciò che concerne l'efficienza di una cassa di espansione in derivazione è necessario fare le seguenti puntualizzazioni.

Mentre nella soluzione in linea, la cassa coincide con l'alveo, in una cassa in derivazione, alveo e cassa sono entità fisicamente ed idraulicamente ben distinte. E' quindi possibile parlare di efficienza facendo riferimento separatamente alla cassa e al fiume. Delle due efficienze quella che interessa maggiormente riguarda il fiume anche se il grado di efficienza della cassa potrebbe avere ripercussioni importanti sulla portata complessivamente defluente nel fiume a valle della stessa.

Riguardo al fiume, l'efficienza è sempre data dalla (4) nella quale $Q_{\max u}$ è la portata immediatamente a valle degli organi di scarico.

Va da sé che all'aumentare delle dimensioni degli organi di scarico ed in assenza di organi meccanici di regolazione, la cassa si svuota più rapidamente. In questo caso, a fronte di un più ridotto volume della cassa corrisponde una minore efficienza di laminazione in quanto le maggiori portate restituite in alveo vanno a sommarsi a quelle defluenti in alveo a valle dell'organo di alimentazione.

L'efficienza massima si ottiene quindi mantenendo chiusi gli organi di scarico durante il passaggio dell'onda di piena; ciò richiede però maggiori volumi di invaso.

L'efficienza delle casse in derivazione può essere valutata in maniera analoga al caso delle casse in linea: la cassa in derivazione può essere considerata infatti come una cassa in linea per la quale l'idrogramma in ingresso è dato dall'andamento nel tempo della portata in essa immessa tramite l'opera di sfioro.

Quanto al caso di più casse in derivazione poste in serie, nell'ipotesi che gli organi di scarico rimangano chiusi durante l'evento di piena, occorre tenere presente quanto segue.

Confrontando i risultati dei calcoli svolti ottenuti con una unica cassa in derivazione e con più casse in serie si è osservato che, a parità di rapporto di laminazione, la lunghezza complessiva delle soglie sfioranti nel caso di più casse risulta minore rispetto a quella della cassa unica.

Ciò è essenzialmente dovuto al fatto che i livelli idrici sugli sfioratori sono mediamente più alti. Questo consente di scaricare complessivamente la stessa portata a fronte di una lunghezza totale inferiore.

Per ciò che concerne il volume necessario alla laminazione, un sistema di casse in derivazione poste in serie necessita complessivamente dello stesso volume rispetto al caso di una unica cassa (vedi esempi #3 e #5).

Infine le casse in derivazione suddivise in settori, a parità di volume e di medesimi organi di alimentazione e scarico di una cassa in derivazione semplice, rispetto a quest'ultima presentano una minore efficienza di laminazione. Infatti la cassa a settori è idraulicamente equivalente a più casse in linea poste in serie. Il peggioramento quindi è tanto più significativo quanto maggiore è il numero di settori.

Se, durante il passaggio dell'onda di piena, gli organi di scarico non sono chiusi, il peggioramento dell'efficienza della cassa si traduce anche in un peggioramento dell'efficienza dell'alveo (anche se quest'ultimo risulta meno significativo).

3.4 Scelta della tipologia di cassa in relazione alle caratteristiche del territorio

La scelta della tipologia di una cassa di espansione più idonea al raggiungimento di determinati obiettivi dipende da molteplici fattori che possono così sintetizzarsi:

1) condizioni topografiche

Nei terreni con caratteristiche morfologiche che favoriscono lo sviluppo di corsi d'acqua pensili, risulta possibile il ricorso a casse in derivazione che, come si è visto, forniscono il miglior rendimento a parità di volume disponibile.

Se queste condizioni non sono verificate occorre ricorrere alle casse in linea, salvo che non sia dimostrata la convenienza di riportarsi al caso precedente attraverso il rimodellamento morfologico del terreno;

2) Recupero di manufatti idraulici esistenti

I manufatti idraulici già esistenti possono fornire un'utile guida verso le scelte tecniche.

Il riutilizzo di questi manufatti può comportare sia vantaggi di carattere ambientale (recupero e restauro di briglie, traverse, arginature, ecc.) sia, in alcuni casi, di carattere economico. Questi ultimi sono però di regola alquanto incerti: potrebbe accadere infatti che il recupero di manufatti esistenti comporti scelte tecniche economicamente più svantaggiose. Ad esempio, il recupero di una briglia troppo lontana dallo sfioratore laterale potrebbe provocare un rigurgito insufficiente a creare un carico adeguato sullo stesso; conseguentemente si renderebbe necessario progettare l'opera di sfioro con lunghezze eccessive. Da ciò potrebbero derivare sia rischi per il buon funzionamento idraulico (possibilità di formazione del risalto di fronte all'opera stessa) sia costi complessivi maggiori.

Le arginature possono essere facilmente recuperate e modificate *ad hoc* sia nel caso di casse in linea che in quelle in derivazione.

La presenza di argini trasversali permette di suddividere la cassa in settori a vantaggio di una gestione migliore del territorio. La soluzione con casse a settori è particolarmente indicata nel caso di grandi opere. Nelle casse minori potrebbe essere conveniente rimuovere l'argine traverso, se esso non ha altra funzione (ad esempio se non ospita una strada) ed il volume che occupa è rilevante producendo un sensibile calo dell'efficienza della cassa.

Altre opere idrauliche recuperabili sono i canali di scolo che possono essere risistemati per facilitare e rendere più rapida la fase finale dello svuotamento della cassa. Questi costituiscono anche un'ottima soluzione alternativa alla costruzione di settori nel caso in cui lo sfioratore inizia a sfiorare per portate modeste e che quindi interessano la cassa con frequenza eccessiva.

3) condizioni ambientali.

Dal punto di vista ambientale le casse di espansione in linea risultano essere in genere meno impattanti delle dighe i quanto i manufatti idraulici richiesti per il loro funzionamento sono in genere in minor numero e di dimensioni limitate per cui più facilmente si integrano nel contesto territoriale ed ambientale (vedi ad esempio la possibilità di provocare il rigurgito della corrente con delle barre in gabbioni e terra o con bocche tarate in gabbioni rinverditi). Le casse in linea sono quindi particolarmente idonee per le aree di grande valore naturalistico.

Le casse in linea interrompono però la continuità del corso d'acqua dove sono collocate, causando danni alla fauna ittica.

A questo problema si ovvia dotando le opere trasversali che sbarrano il corso d'acqua di dispositivi atti a favorire la risalita dei pesci.

Impatti sul territorio di una certa importanza sono procurati dai diversi manufatti idraulici necessari al funzionamento delle casse, tra i quali le opere di sfioro che, salvo casi di modesta importanza, vengono realizzate solitamente in calcestruzzo.

Aspetti positivi di carattere ambientale sono invece connessi alla possibilità di riqualificazione naturalistica di aree degradate, in quanto l'inondazione periodica

delle casse offre la possibilità di realizzare aree umide e/o boscate nelle quali si può favorire l'installazione di specie animali o vegetali autoctone di pregio. Sotto questo riguardo la possibilità nelle casse in derivazione di regolare con organi mobili le opere di alimentazione favorisce tali recuperi naturalistici (v. Capitolo 8).

4) condizioni idrauliche.

Dal punto di vista idraulico le casse in derivazione sono particolarmente convenienti in quanto a parità di volume disponibile consentono un abbattimento del colmo più efficace. Inoltre, sempre a parità di volume disponibile, più casse in serie, poste a non grande distanza tra loro, consentono sostanzialmente lo stesso abbattimento del colmo al contrario di quanto avviene nel caso di più casse in linea poste in serie. Ciò è strettamente vero nel caso in cui le casse siano sufficientemente vicine ovvero quando è trascurabile l'effetto di laminazione esercitato dal tronco d'alveo compreso tra una cassa e quella successiva.

Le casse in derivazione non producono uno sfasamento del picco dell'onda di piena, fenomeno che si verifica invece per le casse in linea. Mentre nel primo caso di fatto non si hanno conseguenze sulla sovrapposizione delle onde di piena alla confluenza dei fiumi, nel secondo la possibilità che si abbia lo sfasamento dei colmi deve essere attentamente studiata in quanto i relativi effetti potrebbero essere positivi (sfasamento di due colmi che in precedenza si sovrapponevano) o negativi (sovrapposizione di due colmi che erano in precedenza sfasati) rispetto alla situazione naturale cioè in assenza di casse.

Per ciò che concerne il trasporto solido, la cassa in linea si comporta analogamente ai serbatoi di laminazione, tende cioè ad interrirsi più frequentemente rispetto ad una cassa in derivazione, questo perché la soglia permette di selezionare del materiale in ingresso alla cassa, eliminando quello che si muove per trasporto al fondo.

5) condizioni economiche.

Le casse in derivazione sono in genere più costose di quelle in linea a causa del maggior numero di manufatti idraulici di cui necessitano.

Se l'area occupata dalla cassa ospita anche attività di un certo pregio, possono risultare eccessivamente onerosi i costi di espropri ed indennizzi. Per questo motivo l'alternativa di una cassa a settori potrebbe risultare economicamente più conveniente.

6) ubicazione dell'opera nel bacino.

A scala locale una cassa di espansione ha la funzione di proteggere le aree poste nelle sue vicinanze. Vista nell'ottica del piano di bacino essa ha anche la funzione di contribuire alla riduzione dei colmi di piena nel reticolo di valle, fino all'asta principale e anche oltre.

Ovviamente le casse che sottendono bacini piccoli possono avere una funzione esclusivamente locale. Via via che ci si avvicina all'asta principale la cassa può contribuire con efficacia crescente alla laminazione significativa delle portate anche per l'asta stessa.

Il parametro da prendere a riferimento nella progettazione di una cassa di laminazione nel bacino è la portata compatibile di valle Q_v . Questa può essere

pensata funzione non solo delle caratteristiche locali dell'alveo (area sezione bagnata A , pendenza i , coefficiente di scabrezza K_s , raggio idraulico R) ma anche dalla distanza d dall'asta principale.

In linea generale, e da un punto di vista meramente economico, l'individuazione di Q_v richiederebbe la soluzione di un problema a molti obiettivi⁵.

⁵ La collocazione ottimale di un sistema di casse di espansione nel bacino dell'Arno può avvenire attraverso un'analisi a molti obiettivi basata sulla scelta di due alternative progettuali:

- 1) sistemazione fluviale allo scopo di contenere le portate transitanti;
- 2) collocazione di una cassa.

Gli obiettivi dell'analisi sono essenzialmente due:

- 1) Minimizzazione del rischio idraulico;
- 2) Minimizzazione dei costi delle opere.

Poiché i suddetti obiettivi sono manifestamente in contraddizione tra loro, la finalità dell'analisi è quella di selezionare tra il set di scelte possibili l'insieme della combinazione di sistemazioni e casse pareto-ottimale. Si ricorda che una soluzione è pareto-ottimale quando non è dominata da nessun'altra soluzione ovvero quando nessuna altra soluzione comporta un miglioramento contemporaneo di entrambi gli obiettivi. Al fine di impostare il problema di ottimizzazione è cruciale la ricerca delle funzioni obiettivo che quantifichino i costi J_C ed il rischio J_R . Le variabili in gioco per entrambi gli obiettivi sono essenzialmente le seguenti:

- 1) volume complessivamente invasato (W);
- 2) numero di casse totale (n);
- 3) tipologia delle casse (t);
- 4) collocazione nel bacino (d);
- 5) lunghezza complessiva tratti da sistemare (L).
- 6) aspetti paesaggistico-ambientali (a)

La ricerca dell'indicatore costi per unità di volume $C(W,t)/W$ delle casse di espansione non presenta grosse difficoltà di carattere concettuale ma è alquanto difficoltoso esprimerlo con una funzione univoca. A parità di volume e tipologia, infatti, il costo di una cassa può essere molto differente. Queste variazioni di costo sono spiegabili con le differenti caratteristiche e dimensioni dei manufatti idraulici di corredo delle casse. Al crescere del volume della cassa il costo per unità di volume non solo cala sensibilmente ma tende a diventare una funzione fortemente univoca.

Il problema di maggiore importanza è dato dalla definizione funzione di rischio J_R . Di seguito vengono date le definizioni secondo l'UNDRO - UNESCO.

NATURAL HAZARD (PERICOLOSITA'): H

probabilità di evento di un fenomeno naturale potenzialmente dannoso, in un dato tempo e in una data area.

VULNERABILITY (VULNERABILITA'): V

grado di danneggiamento provocato ad un dato elemento o gruppo di elementi a rischio a causa del verificarsi di un fenomeno naturale di data grandezza.

SPECIFIC RISK (RISCHIO SPECIFICO): RS

grado di perdite che ci si attende da un particolare fenomeno naturale ($RS=H*V$).

ELEMENTS AT RISK (ELEMENTI A RISCHIO): E

popolazione, proprietà, servizi pubblici ed attività economiche soggetti a rischio in una data area.

In assenza di tali analisi la scelta più conveniente da adottare è quella di asservire le casse sugli affluenti esclusivamente agli affluenti e quelli sull'asta principale esclusivamente all'asta principale.

3.5 Esempi di applicazione.

Di seguito vengono illustrati alcuni esempi di calcolo di diverse tipologie di cassa.

Viene esaminato in particolare il comportamento di più tipi di casse di laminazione interessate dallo stesso fenomeno di piena generato da un modello di Nash i cui

TOTAL RISK (RISCHIO TOTALE): RT

perdite complessive (popolazione, proprietà, ecc.) che ci si attende da un particolare fenomeno naturale ($RT=E*H*V$).

ZONIZZAZIONE:

suddivisione della superficie di un territorio in aree omogenee in relazione al rischio od al grado di vulnerabilità.

Si può osservare che dove la pericolosità è relativamente bassa, la presenza di elementi vulnerabili nella loro struttura o nella loro funzionalità eleva il livello di rischio; viceversa, in zone di elevata pericolosità, ma disabitate e di limitato interesse economico e sociale, il rischio è limitato.

La combinazione tra pericolosità e vulnerabilità determina già di per sé una stima del rischio; quando però si vuole arrivare alla stima del danno atteso di un'area è necessario calcolare quanto del patrimonio esposto è effettivamente vulnerabile. La letteratura non ha però sempre rigorosamente distinto tra vulnerabilità così come è stata definita, ovvero come grado di debolezza a sopportare un evento, e vulnerabilità intesa come esposizione, ovvero come numero di persone coinvolgibili dallo stesso o come entità del patrimonio minacciate. In alcune ricerche, specialmente californiane, l'esposizione sostituisce totalmente la vulnerabilità.

Bisogna sottolineare che questi due aspetti hanno alcuni elementi in comune, di cui è necessario tenere conto per evitare di commettere errori metodologici (consistenti ad esempio nel considerare la stessa variabile due volte nelle stesse valutazioni del rischio).

Per evitare questo inconveniente viene proposta da Scira Menoni nel suo libro "Pianificazione e incertezza" una definizione alternativa:

$RT=Hazard\ principale*Hazard\ indotto*E$

ovvero il rischio è dato dalla combinazione di una fonte di pericolo presente in un territorio, dai pericoli indotti da quest'ultima e dalla quota di beni e persone esposte vulnerabili.

La quantificazione del rischio è però tutt'oggi al quanto incerta soprattutto quando si devono fare delle valutazioni sulla vita umana.

Per questo motivo è meglio far riferimento ad eventi noti e sulla base di questi operare delle scelte in modo da ottenere differenti scenari in relazione a tali eventi.

Nel caso della Pianificazione nel bacino dell'Arno si può prendere come evento di riferimento l'evento di piena del 1966 con tutti i danni che ha comportato in termini economici e di vite umane. Se a tale evento si associa alla funzione obiettivo J_R un valore pari a 100, e alla situazione di esondazioni nulle un valore pari a 0, J_R può essere espressa in funzione degli indicatori di danno atteso in relazione all'entità di esondazione avvenuta.

Al variare del set di variabili sopra descritte e del set di combinazioni delle due alternative si ottengono differenti valori del rischio J_R e dei costi J_C .

La scelta della soluzione ottimale è sostanzialmente una scelta politica in quanto i due obiettivi devono essere in qualche modo pesati per poter essere inglobati in un'unica funzione la quale sia minima per la soluzione ottimale.

parametri sono indicati in tabella 5 e sollecitato da una precipitazione di tempo di ritorno di 200 anni (v. tabella 4).

Tabella 4 Parametri curva possibilità pluviometrica per T=200 anni

n'	0,55
a	61,62

Tabella 5 Parametri idrogramma di Nash

k	13
n	3

L'idrogramma in ingresso è stato ottenuto considerando una pioggia distribuita uniformemente e costante nel tempo su un bacino di 11,85 kmq, di durata complessiva di un'ora, pari al tempo di corrivazione, considerando un coefficiente di afflusso per il calcolo della pioggia netta pari a 0,54.

3.5.1 Esempio #1: cassa in linea

La curva di invaso della cassa è rappresentata analiticamente dalla seguente espressione (figura 14):

$$W = (0,052h^3 - 0,5h^2 + 7,53h)10^4 \quad (38)$$

Il manufatto di alimentazione e scarico della cassa è costituito da un restringimento dell'alveo di forma rettangolare larga 5 metri.

Risolvendo l'equazione (19) nel modo precedentemente illustrato si ottengono i seguenti risultati:

Tabella 6

Volume di invaso	217000 mc
Portata massima in ingresso	100 mc/s
Portata massima in uscita	54,7 mc/s
Rapporto di laminazione	0,547
Efficienza di laminazione	0,453

Nella tabella 7 viene rappresentato l'andamento del processo di laminazione quale risulta dallo sviluppo dei calcoli. I simboli hanno il seguente significato: t tempo, Q_i portata in ingresso Q_u' portata in uscita come risulta dalla scala di efflusso prefissata, Q_u'' portata uscente data dall'espressione (27), h livello idrico nella cassa $W(t)$ volume invasato, ΔW volume invasato nell'intervallo Δt . Si ricorda che h deve essere calcolato per tentativi successivi fino a quando la differenza tra Q_u' e Q_u'' risulta trascurabile.

L'andamento nel tempo delle portate Q_i e Q_u è mostrato in figura (13).

Tabella 7

t (min)	Q_i (mc/s)	h (m)	$Q_{u'}$ (mc/s)	Q_i media (mc/s)	$W(t)$ (mc)	ΔW (mc)	$Q_{u''}$ (mc/s)	$Q_{u'}-Q_{u''}$ (mc/s)
0	0	0	0		0		0	0
5	0.704459	0.001402	0.000464	0.35223	105.5991	105.5991	0.000465	-2.1E-10
10	5.020267	0.012786	0.012801	2.862363	962.3181	856.7190	0.012801	3.72E-09
15	13.18089	0.048961	0.095924	9.100579	3676.182	2713.864	0.095924	5.44E-07
20	24.06876	0.123017	0.382037	18.62483	9191.937	5515.754	0.382031	7.12E-06
25	36.32044	0.243229	1.062140	30.1946	18033.69	8841.753	1.062141	2.11E-09
...

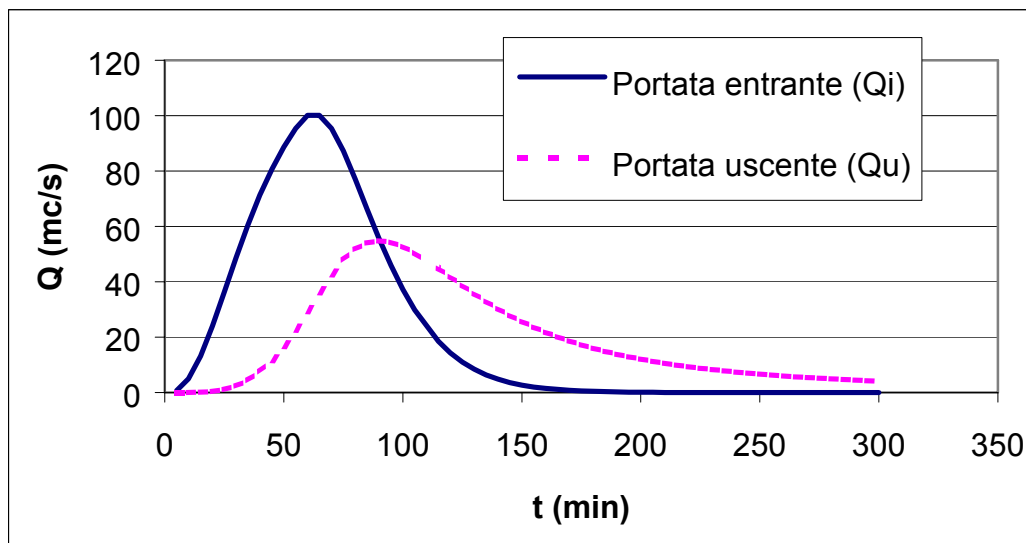


Figura 13

3.5.2 Esempio #2: casse in linea in serie

In questo esempio, le casse in linea sono due ed hanno lo stesso volume. Il volume complessivo della cassa è pari, come nell'esempio #1, a 217000 mc. La curva di invaso delle due casse è stata costruita in modo che ad ogni livello idrico corrisponda un volume pari alla metà del volume che si ottiene, per lo stesso livello, utilizzando la curva di invaso dell'esempio precedente.

Analiticamente la curva di invaso risultante ha la seguente espressione:

$$W = (0,026h^3 - 0,25h^2 + 3,766h)10^4 \quad (39)$$

Nella tabella 8 seguente sono riportati i risultati del calcolo:

Tabella 8

Volume di invaso cassa 1	108500 mc
Volume di invaso cassa 2	108500 mc
Volume di invaso totale	217000 mc
Portata massima in ingresso	100 mc/s

Portata massima in uscita cassa 1	88 mc/s
Portata massima in uscita cassa 2	73 mc/s
Rapporto di laminazione	0,73
Efficienza cassa 1	0,12
Efficienza cassa 2	0,17
Efficienza complessiva	0,27

Come si vede a parità di volume complessivo delle casse, il rapporto di laminazione passa da 0,55 circa a 0,73 e l'efficienza cala dal valore 0,45 al valore 0,27.

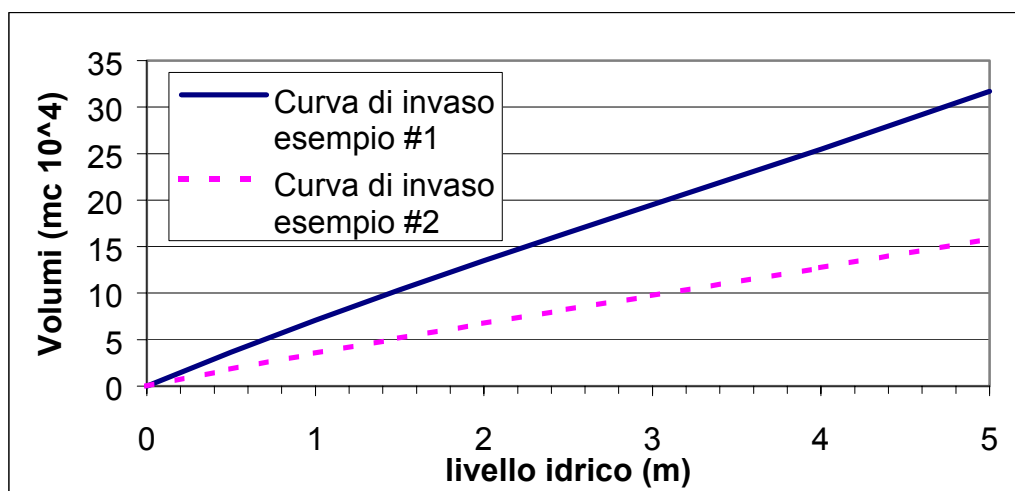


Figura 14

Nella figura (15) sono rappresentate l'onda di piena naturale e quelle uscenti dalla prima e dalla seconda cassa.

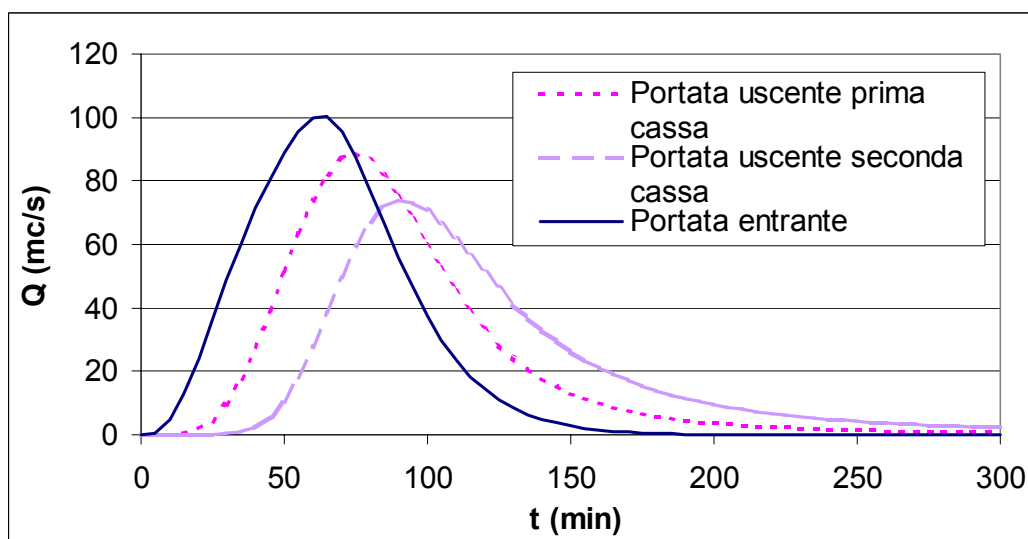


Figura 15

Ulteriori esempi sono stati svolti per studiare l'influenza della curva di invaso sulla portata massima uscente e quindi sull'efficienza di laminazione.

E' emerso che, sempre a parità di volume massimo invasabile, quanto più pianeggianti sono le aree dove sorgono le casse tanto migliore è l'effetto di laminazione. Tuttavia differenze apprezzabili si hanno solo se i parametri della curva di invaso sono molto diversi tra loro.

Occorre infine osservare che a pari volume massimo invasabile, più l'area diventa pianeggiante più è necessario aumentare la sezione complessiva degli organi di scarico, ciò a scapito dell'efficienza di laminazione.

3.5.3 Esempio #3: cassa in derivazione con organo di scarico chiuso

L'esempio si riferisce ad un alveo a debole pendenza di forma rettangolare con le seguenti caratteristiche geometriche ed idrauliche:

Tabella 9 Caratteristiche alveo

B	10 m
i	0,001
K_s	$35 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$

Il manufatto di alimentazione della cassa è costituito da uno sfioratore lungo 15 metri col petto di valle sagomato secondo il profilo Scimemi-Creager e col ciglio posto 2 metri al di sopra del fondo alveo; la portata Q_s di inizio sfioro risulta quindi di 28,1 mc/s.

Lo scarico di fondo della cassa si ipotizza chiuso durante l'evento di piena.

Dai calcoli svolti risulta:

Tabella 10

Volume invasato	106000 mc
Portata massima a monte della cassa	100 mc/s
Portata massima a valle dalle casse	61,6 mc/s
efficienza di laminazione	0,384

Il calcolo della lunghezza dello sfioratore laterale è stato svolto con lo schema #12.3 del capitolo 6. Il processo di riempimento della cassa è stato simulato sempre con lo schema di calcolo di tabella 7; in questo caso i simboli indicati hanno il seguente significato: Q_i portata sfiorata in ingresso alla cassa, Q_u portata in uscita dalla cassa, pari a 0 durante tutto l'evento di piena. Il grafico di figura 16 mostra gli idrogrammi a monte e a valle della cassa.

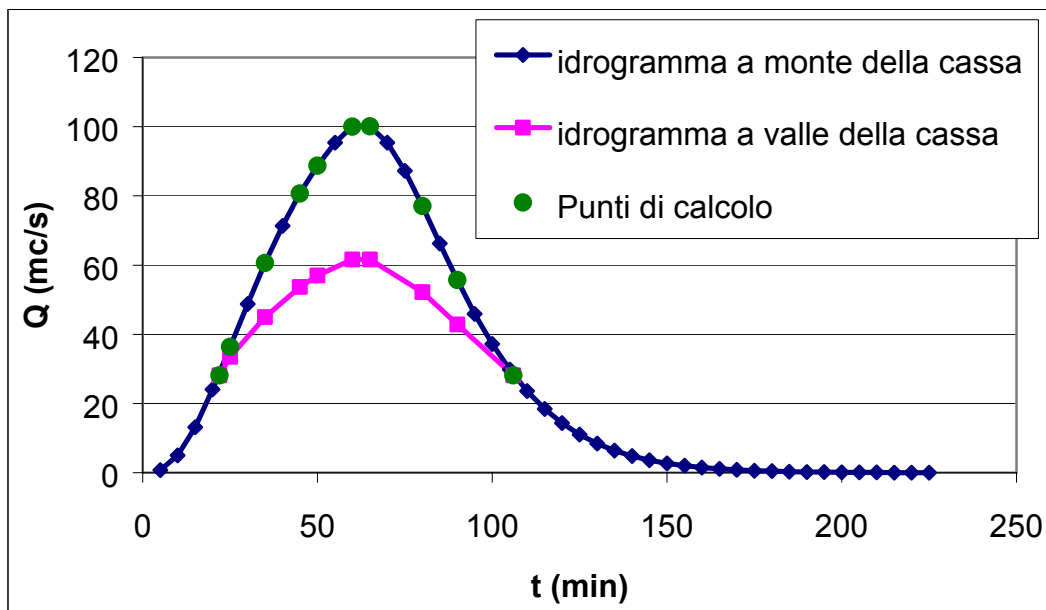


Figura 16

3.5.4 Esempio #4: cassa in derivazione con organo di scarico aperto

In questo caso, per conoscere il valore delle portate laminare in alveo a valle della cassa, è necessario simulare anche il riempimento e successivo svuotamento dell'opera. Si è ipotizzato per la curva di invaso la seguente espressione:

$$W = (-0,44h^3 + 1,23h^2 + 4,77h)10^4 \quad (40)$$

Si sono ottenuti i seguenti risultati:

Tabella 11

Volume di invaso	75700 mc
Portata massima a monte della cassa	100 mc/s
Portata massima a valle dalle casse	65,4 mc/s
efficienza di laminazione	0,345

Dal confronto con la tabella 10 si osserva che la portata massima a valle della cassa passa da 61,6 mc/s a 65,44 mc/s con un peggioramento quindi dell'efficienza di laminazione (0,384 contro 0,345). D'altro canto il volume occupato risulta essere inferiore: si passa infatti da un volume di invaso di 106000 mc ad un volume di invaso di 75700 mc. La figura 17 mostra le onde di piena in alveo nelle sezioni immediatamente a monte e a valle della cassa.

Nella figura 18 sono indicati invece gli idrogrammi in entrata ed in uscita dalla cassa.

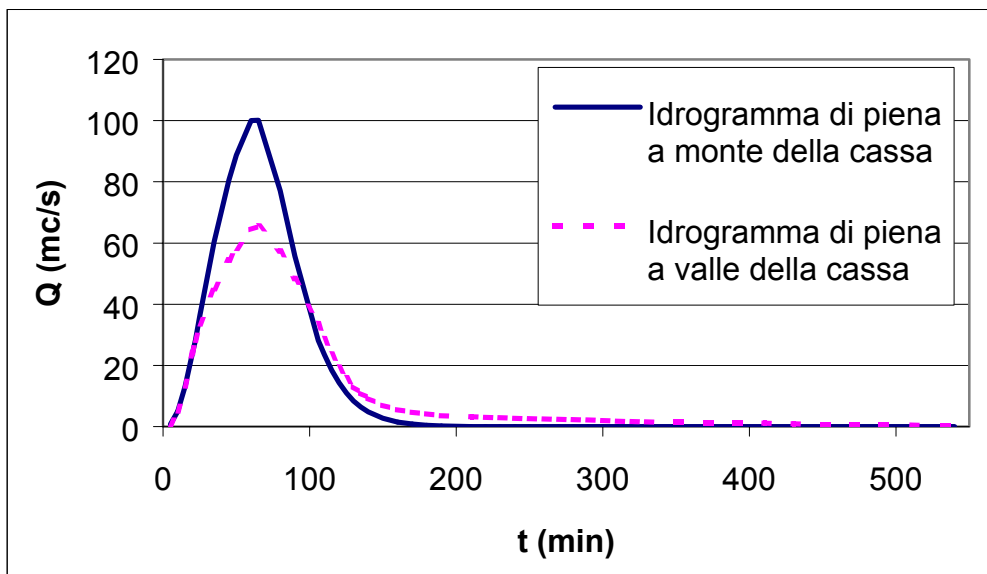


Figura 17

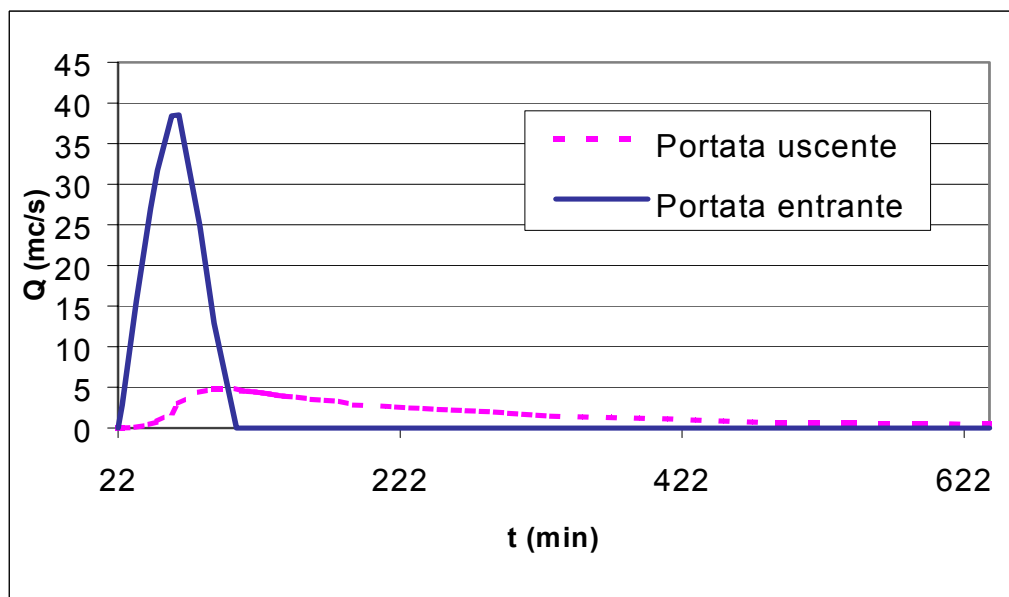


Figura 18

Va infine detto che in alcuni casi, la sovrapposizione dell'idrogramma laminato a valle dell'organo di alimentazione con quello uscente dagli organi di scarico può produrre un idrogramma risultante con due picchi.

3.5.5 Esempio #5: casse in derivazione disposte in serie con organo di scarico chiuso.

Di seguito viene presentato un caso nel quale si ottiene la stessa efficienza di laminazione dell'esempio #3 utilizzando però tre casse in derivazione poste in serie. Si ipotizza che le casse siano sufficientemente vicine in modo da poter trascurare l'effetto della propagazione dell'onda di piena e il contributo aggiuntivo di portata e volume da parte dell'interbacino compreso tra cassa e cassa.

Si ipotizza inoltre che i singoli sfioratori laterali non si influenzino reciprocamente.

Le caratteristiche dell'alveo e dei singoli sfioratori sono identiche a quelle dell'esempio #3.

Gli organi di scarico sono chiusi durante il passaggio dell'onda di piena.

I risultati ottenuti sono i seguenti:

Tabella 12

	Cassa 1	Cassa 2	Cassa 3
Volumi di invaso (mc)	40083	30045	33891
Portata a monte della cassa (mc/s)	100	85	74
Portata a valle della cassa (mc/s)	85	74	61,6
efficienza di laminazione	0,15	0,129	0,167
Lunghezza sfioratore (m)	2,5	2,5	4,2
Volume complessivo (mc)	104000		
Efficienza complessiva	0,74		

L'andamento delle portate nel tempo a monte e a valle di ogni singola cassa è mostrato in figura 19.

Come si vede rispetto al caso di una unica cassa, a parità di efficienza complessiva, il sistema di casse in serie necessita un volume totale complessivo praticamente uguale (104000 contro 106000 mc) mentre la lunghezza totale degli sfioratori risulta al quanto inferiore (9,2 m contro 15 m).

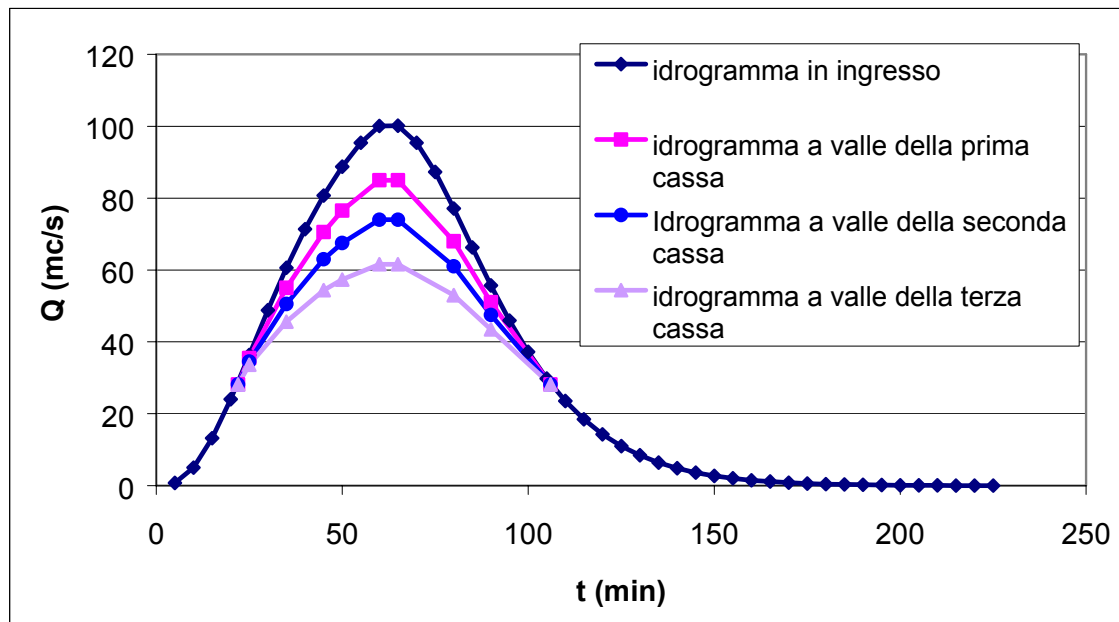


Figura 19

3.6 Considerazioni Conclusive

Il problema centrale della progettazione delle casse di espansione riguarda la scelta degli eventi di piena da considerare. La pericolosità di un'onda di piena, infatti, non è data solo dal valore della portata di picco ma anche dal suo volume complessivo. Può quindi accadere che a pari probabilità dell'evento meteorico che la produce, una piena con una portata di colmo relativamente modesta ma di lunga durata, e quindi di volume rilevante, sia più gravosa di una piena con una portata di colmo più elevata ma di durata più breve e quindi di volume inferiore.

Il problema va risolto considerando nella fase di dimensionamento del volume delle casse più onde di piena in ingresso caratterizzate da portate di colmo e volumi differenti tutte però prodotte da eventi pluviometrici di differenti durata ai quali possa essere associato ragionevolmente⁶ lo stesso tempo di ritorno.

Altra verifica da effettuarsi in sede progettuale riguarda il funzionamento idraulico di una cassa attraversata da un'onda di piena di moderato tempo di ritorno. Ciò permette di meglio valutare i vantaggi che complessivamente determina la cassa e, specie per le casse in linea, l'efficacia dell'effetto di laminazione.

La cassa infatti, progettata per un'onda di piena di tempo di ritorno elevato, potrebbe aver uno scarso effetto di laminazione e non proteggere quindi il territorio di valle da eventi meno gravosi di quello di progetto, ma più frequenti e comunque anch'essi pericolosi, anche se con minori effetti dannosi.

Si vuole infine ricordare come i procedimenti illustrati negli esempi precedenti ipotizzano il funzionamento statico della stessa, ossia che la superficie libera dell'acqua nella vasca trasli parallelamente a se stessa mantenendosi orizzontale in ogni istante. Se l'area di inondazione è molto vasta, il fenomeno di laminazione della piena può essere considerevolmente influenzato dalle resistenze al moto offerte dalla superficie del terreno sulla quale possono essere presenti irregolarità di varia natura, che ostacolano il fluire della corrente idrica. In questi casi, inoltre, possono non essere trascurabili i movimenti in direzione ortogonale a quella principale della corrente che avvengono nella cassa per l'esistenza di gradienti di livello trasversali.

Per effetto di tali fenomeni è possibile che la cassa non determini sensibili effetti di laminazione in un primo tempo; questi si potrebbero verificare però successivamente. Se ciò dovesse avvenire in corrispondenza del segmento di colmo della piena, i benefici che se ne trarrebbero potrebbero essere rilevanti.

Per lo studio di questi aspetti particolari è indispensabile l'utilizzo di schemi di calcolo più completi che, come già accennato, si appoggiano alle equazioni di De Saint Venant mono o bidimensionali a seconda dei casi. Questi schemi sono illustrati nel capitolo 3 con sufficiente estensione, limitatamente al caso dei moti monodimensionali.

⁶ Parlare di tempo di ritorno di un evento pluviometrico areale è cosa molto problematica e discutibile a causa della disuniforme distribuzione nello spazio e nel tempo che esso può assumere. Nella pratica progettuale, l'analisi statistica viene usualmente condotta ipotizzando scenari pluviometrici caratterizzati da valori costanti dell'intensità di pioggia nel tempo e nello spazio. La probabilità di accadimento di un tale evento di riferimento coincide pertanto con quella di una assegnata precipitazione puntuale riferita a determinati siti sperimentali e può essere stimata con le procedure indicate al capitolo 2; questa stessa probabilità viene associata l'onda di piena che l'evento indicato produce.

Riferimenti bibliografici

Adami A., *Casse d'espansione fluviali. Aspetti Idraulici*. In *La difesa idraulica dei territori fortemente antropizzati*. Maione U. e Brath A. editors. Atti del corso di aggiornamento 6-10 ottobre, 1997, Editoriale Bios, Cosenza (1998).

Baroncini E., *La progettazione, l'esecuzione e la gestione delle opere idrauliche dei fiumi padani*. In *Moderni criteri di sistemazione degli alvei fluviali*. Maione U., Brath A. Editors. Atti del corso di aggiornamento 10-14 Ottobre 1994., Editoriale Bios, Cosenza (1995).

Becciu G., Paoletti A., *Esercitazioni di costruzioni idrauliche*, Edizioni Cusl, Milano (1998).

Bresso M., Russo R., Zeppetella A. *Analisi dei progetti di valutazione di impatto ambientale. Aspetti economico-territoriali*. Franco Angeli Editore, Milano (1990).

Da Deppo L., *Casse d'espansione fluviali. Aspetti costruttivi*. In *La difesa idraulica dei territori fortemente antropizzati*. Maione U., Brath A. Editors. Atti del corso di aggiornamento 6-10 ottobre, 1997, Editoriale Bios, Cosenza (1998).

Da Deppo L., Datei C., Salandin P., *Sistemazione dei corsi d'acqua*, Edizioni Libreria Cortina, Padova (1997).

Maione U., *Le piene fluviali*, La Gogliardica Pavese, Pavia (1995).

Maione U., Tomirotti M. *Modelli di propagazione delle piene fluviali*. In *La sistemazione dei corsi d'acqua naturali*, Maione U., Brath A. Editors, Editoriale Bios, Cosenza (1996).

Manciola P., Castelli F., Piragino F., *Criteri di intervento distribuito per la difesa idraulica. Un caso di studio*. In *XXVI Convegno di idraulica e costruzioni idrauliche*. Catania, 9-12 settembre 1998, CUECM, Catania (1998).

Marone V., *Calcolo di massima di un serbatoio di laminazione*, L'energia elettrica n° 9 (1971).

Milano V., Venutelli M., *Sull'efficacia delle casse di espansione nella laminazione delle piene*. In *Atti del XXV Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche*, Torino 16-18 settembre 1996. Vol. I, Edizioni MAF servizi, Torino, (1997).

Milano V., Pagliara S., Venutelli M., *Sul funzionamento delle casse di espansione alimentate da soglie sfioranti rigurgitate*. In *XXVI Convegno di idraulica e costruzioni idrauliche*. Catania, 9-12 settembre 1998, CUECM, Catania (1998).

Modica C., *Il dimensionamento delle vasche volano in relazione alla loro ubicazione all'interno del bacino*. In *XXVI Convegno di idraulica e costruzioni idrauliche*. Catania, 9-12 settembre 1998, CUECM, Catania (1998).

Ostanello A. *Processi decisionali e modelli: appunti per un'analisi multicriteri*. Levrotto & Bella, Torino (1977).

Paoletti A., *Sistemi di drenaggio urbano*. VII Corso di Aggiornamento. Milano, giugno 1993, Milano (1993).

Paoletti A., *Lezioni di idraulica fluviale*. Politecnico di Milano - D.I.I.A.R. A. A. 1990/91.

Paoletti A., *Resistenze al moto e processi di laminazione nei corsi d'acqua*. In *la difesa idraulica del territorio*,. 7-11 ottobre 1996. U. Maione, A. Brath editors., Editoriale Bios, Cosenza (1997).

Segale A., Pareglio S. *L'analisi multicriteri nella valutazione di impatto ambientale*. Agricoltura 204/205. 119-128. (1990).