

Dipartimento di Ingegneria Ambientale
Università di Genova

**“Studio degli effetti sull'idrodinamica e sulla dinamica
del trasporto solido di opere di laminazione da
realizzarsi nel bacino montano del fiume Vara”**

Relazione di sintesi
(Aprile 2006)

Committente: **Autorità di Bacino Interregionale del Fiume Magra**

Relatori:

Prof. Ing. Giovanni Seminarà

Prof. Ing. Marco Colombini

Rel. n. 8/06

Premessa

Il Dipartimento di Ingegneria Ambientale dell'Università di Genova ha stipulato in data 1 Gennaio 2003 una convenzione con l'Autorità di Bacino Interregionale del Fiume Magra dal titolo "Studio degli effetti sull'idrodinamica e sulla dinamica del trasporto solido di opere di laminazione da realizzarsi nel bacino montano del fiume Vara". In data 1 Ottobre 2005, allo scadere di tale convenzione è stata stipulata un'ulteriore convenzione dal titolo "Approfondimenti sullo studio degli effetti della realizzazione di opere di laminazione sull'idrodinamica e sulla dinamica del trasporto solido con applicazione alle opere previste nel bacino montano del Fiume Vara" che si è conclusa in data 30 Aprile 2006.

La presente relazione ha lo scopo di sintetizzare i risultati presentati nelle varie relazioni intermedie e finali previste nell'ambito delle suddette convenzioni e di svolgere alcune riflessioni utili per la valutazione, in sede di pianificazione, di interventi relativi alle tipologie di opere di laminazione qui analizzate. Ciò con riferimento sia agli aspetti prettamente idrodinamici sia agli effetti che tali opere inducono sulla dinamica del trasporto solido.

Tali considerazioni sono il frutto di una serie di prove sperimentali effettuate sul modello fisico in scala ridotta di una particolare opera di laminazione (Cassa VARA1) situata nel tratto montano del Fiume Vara e di una serie di simulazioni numeriche del funzionamento della stessa opera e di altre (Cassa VARA2a e VARA2b) poste nel tratto immediatamente a valle di quest'ultima.

1 Introduzione

Le opere di laminazione analizzate nell'ambito del presente studio sono costituite da uno sbarramento trasversale, con stramazzo e bocca tarata che genera, al passaggio di un'onda di piena, un invaso temporaneo in un'area a tale scopo individuata, inducendo quindi una riduzione del picco di portata.

L'opera svolge dunque un ruolo attivo nella riduzione del rischio di esondazione nel tratto di valle ma, al contempo, influisce sulla dinamica dei sedimenti trasportati dalla corrente e, quindi, sull'apporto solido al tratto localizzato a valle dell'opera stessa. La quantificazione di tali effetti riveste particolare importanza sia per il funzionamento e l'efficacia dell'opera di laminazione sia per l'equilibrio morfologico dell'alveo, che viene influenzato dalla presenza di tali opere in misura ovviamente crescente al crescere del numero di opere. In bacini, come quello in esame, in cui non sono disponibili volumi di invaso considerevoli si tende ad aumentare il numero delle

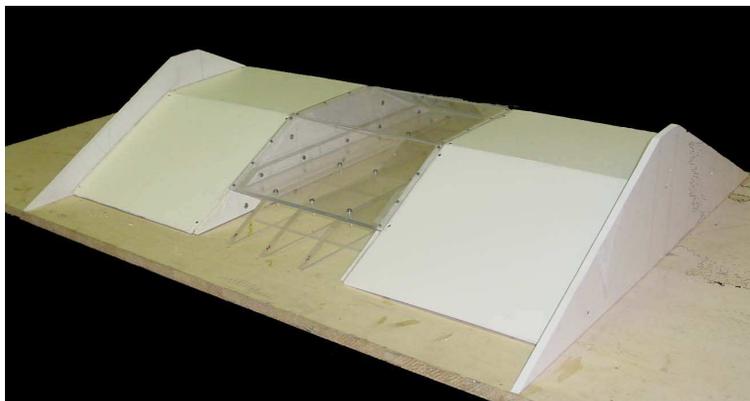


Figura 1: Modello in scala dell'opera trasversale: particolare delle gallerie e dello sfioratore superficiale.

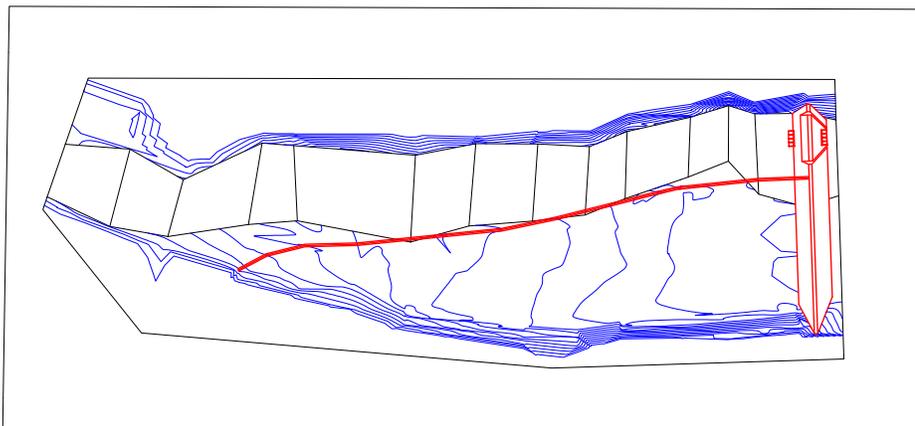


Figura 2: Planimetria dell'area interessata dalla cassa VARA1

opere per sfruttare al meglio i piccoli volumi disponibili, ottenendo buone efficienze complessive di laminazione ma moltiplicando i possibili problemi morfodinamici.

2 Le opere di laminazione

Le opere qui considerate sono costituite da uno sbarramento trasversale che comprende una luce di sfioro a stramazzo e una bocca tarata (vedi Fig. 1). Le configurazioni analizzate fanno riferimento a due principali tipologie di realizzazione delle opere: i) cassa in linea, in cui l'area di invaso, posta

lateralmente all'alveo inciso è costituita dalla naturale area di espansione golenale; ii) cassa mista, in cui è presente un argine longitudinale che delimita l'area di espansione, argine che può essere interamente o parzialmente sormontabile (vedi Fig. 2).

I principali dati di progetto sono così definiti:

1. la portata di progetto (a cui è associato un tempo di ritorno), per la quale la cassa deve realizzare la massima efficienza di laminazione (nei casi esaminati la portata trentennale);
2. la quota di massimo invaso, raggiungibile all'interno della cassa in corrispondenza di un evento estremo (nei casi esaminati l'evento duecentennale);
3. la portata minima per cui l'opera deve iniziare a intervenire (nei casi esaminati la portata con tempo di ritorno 5-10 anni).

Il principale risultato della progettazione di massima consiste nella determinazione dell'efficienza idrodinamica, definita come:

$$\epsilon = \frac{Q_e - Q_u}{Q_e} \quad (1)$$

dove Q_e e Q_u sono rispettivamente la portata di picco entrante e quella uscente dall'opera di laminazione.

Per quanto riguarda infine il comportamento idraulico, la principale differenza tra le configurazioni in linea e mista è legata alla dinamica di invaso: nella cassa in linea, in cui l'argine longitudinale è assente, l'area di espansione partecipa parzialmente al deflusso e viene riempita progressivamente al crescere del livello in alveo. L'introduzione di un argine longitudinale che delimita lateralmente l'area di espansione (cassa mista) ha come obiettivo quello di rendere disponibile alla corrente l'intero volume di invaso al termine della fase ascendente dell'evento di piena di progetto, in modo da utilizzare al meglio il volume disponibile e da ottenere una maggiore laminazione. In questo secondo caso l'argine longitudinale è di altezza tale da contenere la corrente nell'alveo inciso e viene realizzato, in prossimità dell'opera trasversale, uno stramazzo laterale la cui altezza e lunghezza determinano la portata scolmata in funzione sia dei livelli in alveo sia del livello all'interno del volume di invaso, che viene riempito in modo statico.

3 Effetti sull'idrodinamica

La progettazione di massima dell'opera di laminazione procede inizialmente attraverso la definizione della geometria dell'opera trasversale, sulla base delle variabili di progetto precedentemente descritte. In particolare, il ruolo dello sfioratore superficiale è quello di consentire il transito della massima portata in occasione di eventi estremi senza che venga superato il livello massimo di vaso previsto. Al contempo, il livello raggiunto in corrispondenza del passaggio dalla portata di progetto non deve superare la quota di sfioro. In altre parole, la massima efficienza di laminazione si realizza quando il livello della corrente per la portata di progetto è pari alla quota di sfioro e lo sfioratore è dimensionato per smaltire l'eccesso di portata associato ad eventi estremi senza che venga superato il livello massimo di vaso. Essendo questo un dato di progetto e dovendo la larghezza dello sfioratore essere confrontabile, per ovvie ragioni costruttive, con la larghezza dell'alveo di valle, si identifica in questo modo il livello della soglia di sfioro. Una volta identificato tale livello si determina immediatamente l'area della sezione della bocca tarata necessaria a far defluire la portata di progetto. La larghezza ed altezza della bocca tarata sono quindi univocamente determinate essendo assegnata la portata minima per cui la bocca inizia il funzionamento a luce di fondo.

La procedura sopra descritta consente di definire un'opportuna scala di deflusso associata all'opera, che esprime il legame tra portata defluente (attraverso bocca tarata e sfioratore superficiale) e livello a monte dell'opera stessa. La determinazione delle efficienze di laminazione per eventi di diversa intensità e tempo di ritorno richiede poi l'implementazione di un modello numerico non stazionario del funzionamento della cassa che può fondarsi sull'adozione di uno schema di corrente monodimensionale necessariamente non stazionario. Il confronto tra i risultati sperimentali e quelli numerici ha infatti mostrato come gli effetti di bidimensionalità, pur presenti, possano essere trascurati in prima approssimazione (cioè in sede di analisi di fattibilità) semplificando in questo modo la modellazione numerica. L'utilizzo di una modellazione bidimensionale, senz'altro più accurata di quella monodimensionale nella rappresentazione del comportamento idraulico della corrente (in particolare per casse in linea) può essere utilmente rinviata ad un'eventuale fase di progettazione preliminare. La realizzazione di un modello fisico *ad hoc* appare infine necessaria nel corso della progettazione definitiva.

Riveste invece particolare importanza in fase di analisi di fattibilità il dimensionamento delle bocche tarate e dell'opera di sfioro. Se il livello massimo raggiunto dalla corrente a monte dell'opera in corrispondenza del passaggio della piena di progetto risulta infatti apprezzabilmente inferiore (o superio-

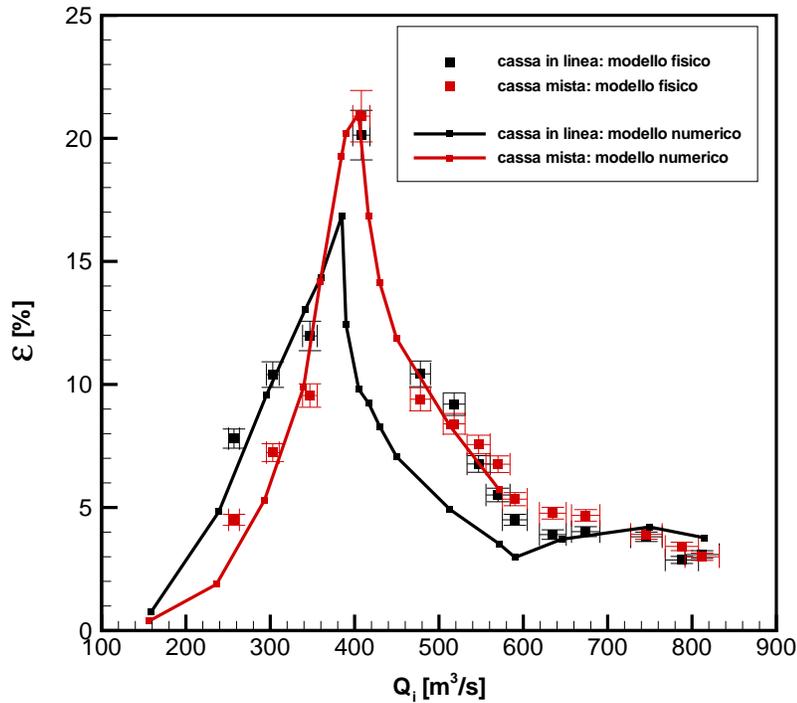


Figura 3: Efficienza di laminazione: Cassa VARA1 configurazione in linea e mista

re) alla quota di sfioro, l'efficienza dell'opera risulta sensibilmente inferiore a quella massima ottenibile. Ciò conduce ad un'errata valutazione della capacità di laminazione dell'opera e, in definitiva, della sua utilità ai fini della riduzione del rischio di inondazione per cui l'opera stessa è progettata.

Come già accennato precedentemente, il dimensionamento dell'opera di sbarramento richiede la conoscenza delle leggi che regolano il deflusso nei diversi regimi di funzionamento dell'opera stessa. Pur essendo possibile una stima per via teorica di tali leggi, le prove numeriche e sperimentali effettuate durante lo studio hanno mostrato che la scala di deflusso risente in modo sensibile dei valori dei coefficienti di portata che sono empiricamente determinati. Nel corso dello studio si è dunque provveduto a determinare sperimentalmente i coefficienti di portata realizzando una serie di prove stazionarie sul modello in scala e interpretando i risultati sperimentali attraverso relazioni analitiche descritte in dettaglio nei rapporti già presentati al Committente.

Si sottolinea che tali relazioni consentono di estendere il risultato relativo alla cassa VARA1 ad altre opere di eguale tipologia ma caratterizzate da diverse dimensioni.

I risultati della progettazione di massima eseguita applicando la procedura descritta alla cassa denominata VARA1 sono sintetizzati nel grafico di Fig. 3, in cui viene riportato l'andamento dell'efficienza di laminazione in funzione della portata in ingresso, cioè la funzione $\epsilon(Q_e)$ precedentemente descritta. In figura sono anche riportati i risultati delle misure effettuate su modello fisico nelle due configurazioni in linea e mista.

Nonostante siano presenti alcune differenze tra i risultati numerici e le osservazioni sperimentali, in particolare per il caso di cassa in linea più difficilmente rappresentabile nell'ambito di uno schema monodimensionale, i risultati della modellazione numerica interpretano correttamente il funzionamento dell'opera di laminazione e la stima delle efficienze alle varie portate risulta sufficientemente accurata per uno studio di fattibilità.

Al di là del risultato specifico relativo alla cassa VARA1, l'insieme delle valutazioni numeriche e sperimentali svolte nell'ambito del presente studio si presta ad una serie di considerazioni di carattere generale utili a fini progettuali e pianificatori.

- i) *L'efficienza di laminazione è massima per la portata di progetto e diminuisce sia per portate inferiori (perché il volume di invaso viene utilizzato in misura minore) sia per portate superiori (perché il volume di invaso è già quasi del tutto occupato quando sopraggiunge il colmo dell'onda di piena).* In particolare, allo scopo di individuare parametri che esprimano in maniera sintetica il comportamento di una generica opera di laminazione appare importante determinare non solo il valore massimo dell'efficienza (quello che si realizza in corrispondenza della piena di progetto) ma anche l'andamento della stessa al variare della portata di picco in ingresso. Se l'unico parametro di riferimento è infatti l'efficienza massima, la mancata ottimizzazione delle caratteristiche dell'opera trasversale relativamente all'evento di progetto conduce, ad esempio, ad una sottostima dell'efficienza che può fortemente condizionare le scelte pianificatorie. Inoltre, essendo:

$$Q_u = Q_e(1 - \epsilon(Q_e)) \quad (2)$$

la conoscenza della funzione $\epsilon(Q_e)$ non fornisce solo una misura dell'efficacia dell'opera ma consente di determinare le portate in uscita dalla cassa attraverso un semplice calcolo. La quantità $(1 - \epsilon)$ rappresenta infatti la portata in uscita normalizzata rispetto alla portata in ingresso, rappresenta cioè la *risposta idrodinamica* della cassa ad un dato ingresso. Un ulteriore parametro sintetico di interesse relativo al funzionamento di una singola cassa può essere individuato nell'intervallo di portate $(\Delta Q)_{50}$ caratterizzate da efficienze superiori al 50% del

valore massimo. Tale parametro è una misura della “ampiezza” della curva dell’efficienza ed individua l’intervallo di portate in ingresso per cui la laminazione è comunque ancora sensibile. In generale, è palese che l’efficienza di laminazione dipende fortemente dal volume di invaso disponibile. In presenza di ridotti volumi di invaso, come nei casi esaminati, le efficienze massime sono dell’ordine del 15-20% e il $(\Delta Q)_{50}$ è dell’ordine del 50% della portata di progetto.

- ii) *L’efficienza globale di un sistema di due casse in serie è definita dalla formula:*

$$\epsilon_T = \epsilon_1 + \epsilon_2(1 - \epsilon_1) \quad (3)$$

dove ϵ_1 e ϵ_2 sono le efficienze delle singole casse. Tale relazione indica come l’efficienza totale sia sempre superiore a quella di ognuna delle due casse e può essere facilmente generalizzata al caso di più casse in serie¹ e quando siano presenti affluenti intermedi. L’importanza di questa semplice relazione nel caso si vogliano programmare interventi diffusi sul bacino appare evidente. A questo riguardo può essere utile presentare il risultato di questa analisi per il sistema di casse VARA1-VARA2 esaminato nello studio. In questo caso entrambe le casse sono state progettate per presentare la massima efficienza nel caso di un evento di piena trentennale, per il quale risulta:

$$\epsilon_1 = 0.2 \quad \epsilon_2 = 0.15$$

L’applicazione della (3) conduce quindi a un’efficienza complessiva massima pari a 0.32, del tutto confrontabile con il risultato della simulazione realizzata su tutto il tratto (comprendente le due casse ed un affluente intermedio) che prevede un’efficienza del 30%. Poichè inoltre la funzione la portata di picco in ingresso può essere facilmente correlata ai periodi di ritorno, il calcolo può essere effettuato con riferimento a eventi caratterizzati da un certo periodo di ritorno consentendo di stimare l’efficienza complessiva quale funzione del periodo di ritorno, cioè indipendentemente dalle scelte di ottimizzazione delle singole casse. *Anche questa informazione appare dunque di qualche utilità ai fini della pianificazione a scala di bacino.*

- iii) I risultati presentati in Fig. 3 suggeriscono poi che, nel caso esaminato, *le due configurazioni in linea e mista producono efficienze del tutto confrontabili.* Le principali differenze si osservano nel ramo ascendente

¹la relazione per tre casse risulta, ad esempio: $\epsilon_T = \epsilon_1 + \epsilon_2(1 - \epsilon_1) + \epsilon_3(1 - \epsilon_2)(1 - \epsilon_1)$ con ovvio significato dei simboli.

della curva, cioè per portate inferiori alla portata di progetto. In particolare le efficienze della cassa mista risultano inferiori perché il volume di invaso non viene utilizzato fino a quando i livelli in alveo non superano la quota dello sfioratore laterale, al contrario di quanto avviene per la configurazione in linea. La configurazione mista è in generale in grado di produrre un'efficienza massima superiore a quella ottenibile nella configurazione in linea. Per portate superiori a quella di progetto, le due configurazioni producono efficienze di laminazione molto prossime (si noti che le efficienze stimate numericamente sono inferiori alle sperimentali per il già citato effetto legato alla forte bidimensionalità del moto): il volume di invaso è infatti in entrambi i casi sostanzialmente già utilizzato al passaggio del picco di piena. Nello specifico caso esaminato, il lieve miglioramento in termini di massima efficienza non appare tale da giustificare la realizzazione di un'opera più complessa e di maggiore impatto ambientale. Si sottolinea come questo risultato sia legato anche al ridotto volume disponibile per l'invaso che caratterizza questo particolare intervento.

4 Effetti sulla dinamica del trasporto solido

Le opere di laminazione qui considerate incidono invariabilmente sulla dinamica del trasporto solido, in misura dipendente dell'intensità dell'evento considerato. Il rallentamento della corrente che, in ultima analisi, produce il richiesto effetto di laminazione non può che indurre una tendenza alla formazione di aree di deposito all'interno della cassa, un processo che si osserva in tutte le prove sperimentalmente così come nelle simulazioni numeriche.

In particolare, l'azione dell'opera di sbarramento in questa tipologia di casse è quella di innalzare sensibilmente il livello all'interno della cassa, in modo da generare invasi consistenti pur con limitate aree di espansione disponibili. In prossimità dell'opera trasversale, dunque, è quasi nulla la capacità di trasporto della corrente, con conseguente deposito della intera portata solida proveniente da monte durante l'evento di piena.

Questo effetto è particolarmente sensibile in alvei montani caratterizzati da elevate pendenze come quelli esaminati, tipicamente a carattere torrentizio anche per portate con tempi di ritorno dell'ordine dei 5-10 anni, in cui la profondità di moto uniforme è dell'ordine del metro a fronte di profondità dell'ordine della decina di metri indotte dallo sbarramento. Altre tipologie di casse in cui l'opera di sbarramento è assente, ad esempio le casse in derivazione, avrebbero probabilmente un impatto minore sul trasporto di sedimenti ma risulterebbero decisamente meno efficaci per la laminazione poichè i volumi disponibili per l'invaso diminuirebbero drasticamente.

L'analisi condotta sugli effetti morfodinamici dell'opera di laminazione si è dunque indirizzata verso due specifici obiettivi:

- i) Analisi a scala di evento: si propone di valutare l'effetto del trasporto solido sull'efficienza idrodinamica della cassa, l'entità del deposito e la sua distribuzione planimetrica nelle configurazioni in linea e mista. Il volume complessivo di sedimenti depositati all'interno della cassa è definito percentualmente nella forma

$$\Delta V = \frac{V_e - V_u}{V_e} \quad (4)$$

dove V_e e V_u sono rispettivamente i volumi di sedimenti entranti e uscenti dalla cassa durante un evento di piena. La quantità $(1 - \Delta V)$ rappresenta il volume complessivo di sedimenti in uscita normalizzato con il volume in ingresso e quindi, in modo sintetico, esprime la *risposta morfodinamica* della cassa.

- ii) Analisi a lungo termine: si propone di individuare, ove possibile, condizioni di regime dal punto di vista del bilancio complessivo di sedimenti

sulla base dei risultati ottenuti sollecitando l'opera attraverso successioni di eventi di piena o con portate stazionarie. E' infatti importante sottolineare che la scala temporale su cui evolvono i processi sedimentologici è decisamente maggiore di quella caratteristica dei singoli eventi. I processi morfodinamici, anche importanti, associati a ciascuno di essi contribuiscono lentamente al raggiungimento di condizioni asintotiche di regime sul lungo termine.

4.1 Analisi morfodinamica a scala di evento

Il complesso delle prove sperimentali e numeriche eseguite ha consentito di costruire un quadro conoscitivo relativamente ampio sulla risposta morfodinamica ad eventi di piena di diversa intensità. L'intervallo di tempi di ritorno esaminato è ampio (5-200 anni); Sono stati analizzati con maggior dettaglio eventi caratterizzati dai tempi di ritorno più modesti (5, 15, 30 anni), che, per la modellazione morfodinamica, si rivelano tuttavia più significativi di eventi senz'altro più intensi ma più rari.

Un prima osservazione di carattere generale riguarda *il confronto tra il comportamento della configurazione in linea rispetto a quella mista*. Se da un lato, le due configurazioni producono simili comportamenti idrodinamici a fondo fisso (tanto che le massime efficienze di laminazione sono quasi identiche), l'assenza di un argine longitudinale nella configurazione in linea consente alla corrente di depositare anche nell'area di espansione quando quest'ultima viene utilizzata.

Non essendo la corrente più in grado di movimentare il materiale solido accumulato nell'area golenale, regioni sempre più ampie dell'area di invaso vengono progressivamente riempite da sedimenti. La quasi totalità del volume di sedimenti entrante nella cassa durante un evento di piena viene depositato ($\Delta V = 100\%$) al suo interno, interrompendo l'alimentazione solida del tratto del corso d'acqua localizzato a valle dell'opera. Questo aspetto risulta fortemente penalizzante per un duplice motivo: i) l'utilizzo dell'area di espansione per fini agricoli risulta compromesso; ii) il depauperamento in termini di apporto solido a valle risulta massimo.

Si ritiene dunque più adeguata la soluzione che preveda la realizzazione di un argine longitudinale sormontabile, in massi o in materiale permeabile, avente come unico scopo il contenimento del trasporto solido in alveo.

E' ragionevole aspettarsi che i limiti evidenziati siano generalizzabili all'intera categoria delle casse in linea. Nel prosieguo di questa relazione si è fatto quindi particolare riferimento alla configurazione mista. Alcune prove sperimentali realizzate con argine longitudinale interamente sormontabile hanno infatti mostrato come, dal punto di vista idrodinamico e morfodinami-

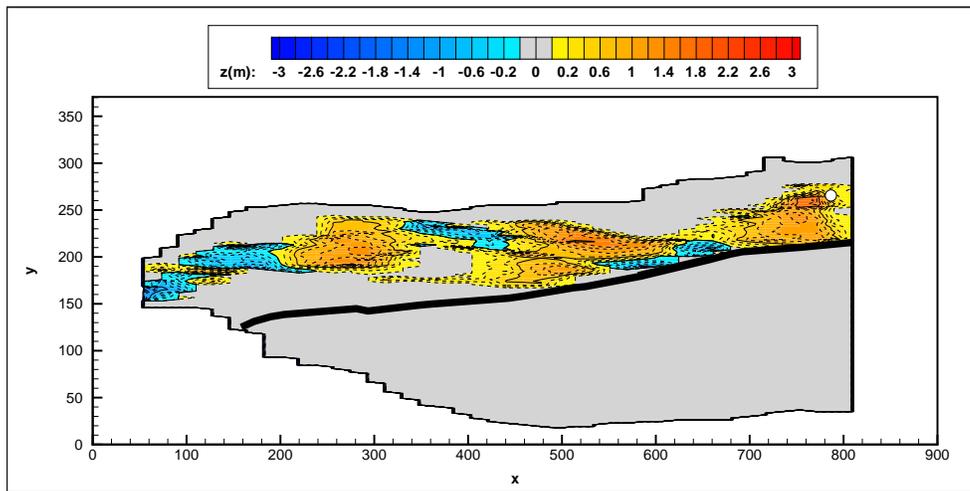


Figura 4: Mappa di erosione e deposito dopo il passaggio di un singolo evento trentennale - modello fisico; cassa VARA1, configurazione mista.

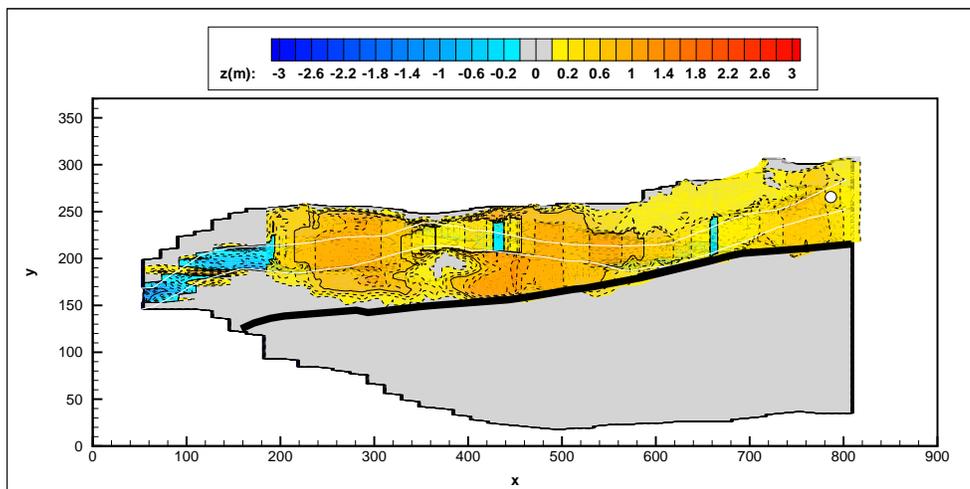


Figura 5: Mappa di erosione e deposito dopo il passaggio di un singolo evento trentennale - modello numerico; cassa VARA1, configurazione mista.

co, non si osservino particolari differenze rispetto alla configurazione di cassa mista dove l'argine è sormontabile solo in corrispondenza dello stramazzo laterale.

La stima dell'efficienza dell'opera in presenza di trasporto solido può ancora essere effettuata per via numerica, facendo uso però di modelli non stazionari a fondo mobile, analoghi a quelli impiegati nel presente studio, di non semplice implementazione e utilizzo. Il buon confronto qualitativo e quantitativo tra i risultati delle simulazioni numeriche e le misure effettuate su modello fisico in termini di assetto del fondo successivo al passaggio di un evento di piena (si vedano le figure 4-5) appare tuttavia incoraggiare l'utilizzo

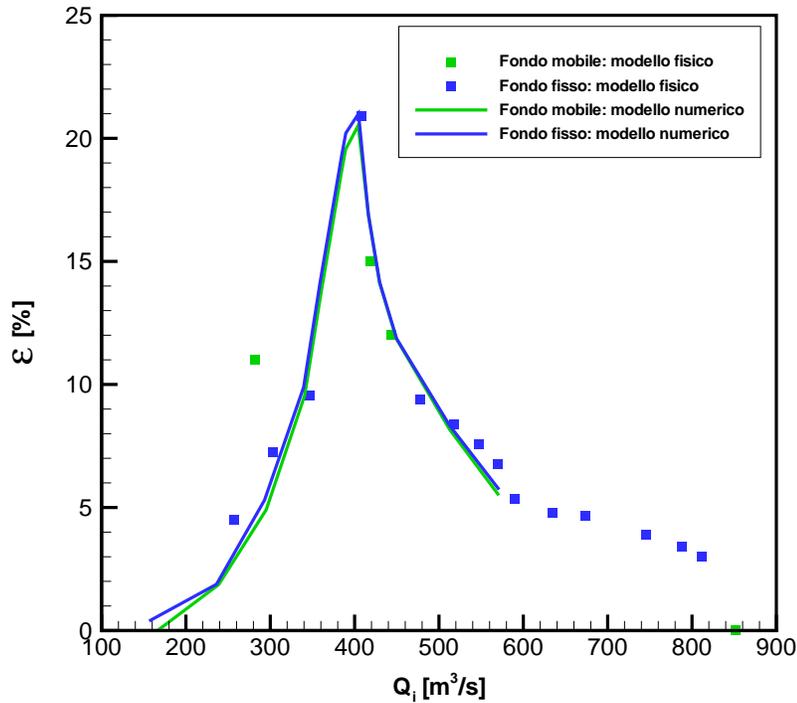


Figura 6: Efficienza di laminazione a fondo fisso e mobile; Cassa VARA1 configurazione mista

di modelli numerici idro-morfodinamici anche in fase di progetto.

Per quanto riguarda le efficienze di laminazione, il grafico in Figura 6 presenta un confronto tra i risultati ottenuti, sia sperimentalmente sia numericamente a fondo fisso e mobile nel corso di un *singolo evento di piena*.

Si osserva una lieve riduzione dell'efficienza legata alla sottrazione di volume di invaso da parte dei sedimenti depositati, anche se questo effetto non appare particolarmente significativo. Le efficienze diminuiscono in particolare per portate inferiori alla portata di progetto, cioè quando il volume di invaso è solo parzialmente utilizzato e quindi il volume sottratto dai sedimenti è percentualmente superiore. Le variazioni rispetto al caso di fondo fisso sono comunque minime anche se è da attendersi un maggiore effetto sull'efficienza al crescere del deposito cioè a seguito di ulteriori eventi in assenza di interventi di rimozione del deposito stesso.

In sede di pianificazione di interventi si ritiene dunque che l'informazione ricavata dall'analisi a fondo fisso sia sufficiente, in prima approssimazione, per il dimensionamento dell'opera di sbarramento, e, soprattutto, che la curva di efficienza ottenuta in queste condizioni sia sufficientemente rappresentativa del comportamento della cassa ai fini della laminazione di eventi di piena

anche nel caso di fondo mobile. In un'eventuale progettazione preliminare dell'intervento potranno essere richieste analisi a fondo mobile più approfondite che consentiranno di raffinare l'analisi e la valutazione delle efficienze. Una modellazione fisica dell'opera potrà infine essere utilmente prevista in fase di progettazione definitiva dell'intervento, fornendo in quella sede precise informazioni sugli effetti idrodinamici e morfodinamici indotti dalla presenza dell'opera stessa.

Per quanto riguarda la distribuzione del deposito all'interno della cassa, il fenomeno è di non semplice interpretazione pur presentando alcune caratteristiche di regolarità. In particolare, partendo dalla stessa configurazione topografica iniziale, al passaggio del primo evento di piena si assiste sempre alla formazione di tre ampie zone di deposito alternate a zone di relativo scavo che assumono la forma di barre centrali stazionarie. La prima si osserva nel tratto di monte, dove inizia la zona di espansione e l'alveo si allarga, l'ultima è posta immediatamente a monte dell'opera di sbarramento mentre una terza area di deposito, in genere la più intensa, è localizzata in una posizione intermedia tra le due. Dopo questo primo assestamento del fondo, il passaggio di identiche piene produce un deposito più distribuito e di minore intensità, a cui corrisponde un sensibile aumento del trasporto solido in uscita. In conclusione, i volumi di sedimenti mobilitati durante il primo evento vengono interamente utilizzati per modificare l'assetto iniziale mentre eventi successivi tendono verso una configurazione di equilibrio in cui il volumi erosi e quelli depositati durante l'evento si bilanciano, assetto a cui corrisponderebbe un volume di sedimenti in uscita pari a quello in ingresso ($\Delta V = 0\%$). Questa configurazione di equilibrio si raggiunge prima per le sezioni prossime allo sbarramento e successivamente per le sezioni più a monte. Ciò è confermato dalle prove stazionarie effettuate con portata pari alla portata di picco dell'evento quinquennale e quindicennale, in cui l'evoluzione verso una configurazione di equilibrio è più rapida essendo l'opera sollecitata continuamente con la portata massima.

E' da notare come anche per le portate più basse (tempo di ritorno 5 anni), in cui l'opera trasversale produce solo un modesto rigurgito legato al restringimento, il processo di deposito proceda in maniera analoga. *Questo suggerisce che il tratto di alveo in cui insiste l'opera di laminazione VARA1 manifesti una tendenza al deposito indipendentemente dalla presenza dell'opera trasversale.* Tale osservazione è confermata indirettamente dal confronto di due rilievi altimetrici realizzati a distanza di circa 10 anni (1992-2003), che ha mostrato come il tratto di alveo considerato sia stato oggetto di un diffuso deposito di spessore medio dell'ordine di 1.5-2 m. Se da un lato quindi i consistenti depositi che si osservano per evento quindicennale e trentennale sono indubbiamente accentuati dalla presenza dell'opera, anche in assenza

dello sbarramento si assisterebbe probabilmente alla comparsa di aree di deposito, un aspetto di rilievo per la valutazione dell'influenza morfodinamica dell'opera.

E' stata inoltre realizzata una prova sperimentale in cui ad un evento trentennale seguiva una serie di eventi quinquennali, per valutare quanto eventi relativamente più frequenti ma meno intensi fossero in grado di modificare l'assetto del fondo generato da un evento meno frequente ma più intenso. Il risultato di tale prova ha mostrato come si ottenga un lieve abbassamento del fondo solo nella regione prossima all'opera mentre i depositi più a monte continuano ad aumentare. Anche in questo caso, dunque, la corrente tende a depositare indipendentemente dalla presenza dell'opera e non è in grado di eliminare gli ingenti depositi associati all'evento intenso se non nella regione posta nelle immediate vicinanze dell'opera stessa.

Un'ultima informazione, utile ai fini di un'eventuale manutenzione della cassa, è relativa al complessivo volume depositato da singoli eventi di diversa intensità a partire dalla medesima configurazione iniziale. Tali volumi sono sostanzialmente pari al volume totale di sedimenti in ingresso alla cassa e dunque stimabili per via teorica una volta noto l'idrogramma in ingresso.

4.2 Analisi morfodinamica a lungo termine

L'evoluzione morfodinamica all'interno della cassa procede, come detto, su scale temporali molto più lente di quelle del singolo evento.

La tendenza evolutiva, in presenza dell'opera, è evidentemente dipendente dalla sequenza di idrogrammi con cui viene sollecitata l'opera stessa e, quindi, dall'idrologia del bacino a monte dell'opera, caratterizzabile solo in termini probabilistici.

Si è ritenuto dunque di analizzare il comportamento asintotico dell'opera, sollecitandola, sia sperimentalmente su modello fisico sia numericamente, attraverso una sequenza di eventi caratterizzati da un periodo di ritorno o attraverso portate stazionarie associabili a eventi di durata infinita. Tali prove sono dunque rappresentative di ciò che si osserverebbe, in assenza di interventi di manutenzione sulla cassa, su un arco di tempo sufficientemente elevato, ancorché per effetto di una sola tipologia di eventi.

L'esame di figura 7, in cui è riportata la percentuale del volume entrante che viene depositato per una sequenza di identici eventi trentennali e quindicennali, mostra che in entrambi i casi la percentuale di volume depositato ΔV è pari al 100% durante il primo evento e scende quindi gradualmente fino al 40% dopo quattro-cinque eventi successivi. Ulteriori eventi, simulati per il solo caso trentennale, conducono ad un'ulteriore diminuzione, anche se più lieve, dell'entità dei depositi. Il processo morfodinamico è dunque ancora

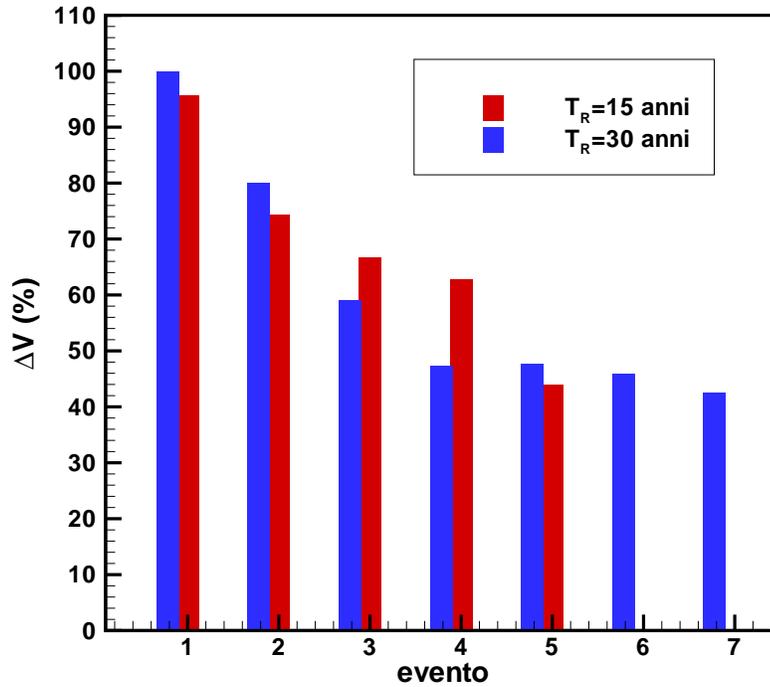


Figura 7: Percentuali volumi depositati durante successioni di eventi

lontano dal raggiungimento di una configurazione di equilibrio per gli eventi considerati anche se il volume restituito a valle (pari a $1 - \Delta V$) comincia ad essere una percentuale significativa (60%) del volume entrante dopo cinque eventi.

E' da notare come un eventuale intervento di rimozione dei depositi a valle di un evento di piena particolarmente intenso che riportasse l'alveo alla configurazione iniziale riatterrebbe di fatto questo processo, rendendo nuovamente la cassa disponibile ad accogliere l'intero volume in ingresso e interrompendo dunque nuovamente, nell'evento seguente, l'alimentazione di sedimenti a valle dell'opera.

Il grafico di figura 8, analogo al precedente, mostra il risultato delle prove effettuate con portate stazionarie pari alla portata di picco degli eventi quindicennale e quinquennale. Nelle prove stazionarie l'esperimento è stato interrotto a intervalli regolari per rilevare l'assetto del fondo. In questo caso quindi in ascisse non viene riportato il numero di eventi ma la durata della prova al vero. A tale proposito, si sottolinea come, in un evento non stazionario la cassa sia sollecitata con i valori di portata al picco solo istantaneamente mentre nelle prove stazionarie la cassa è sollecitata con quel valore di portata per tutta la durata della prova. Anche in questo caso il fondo

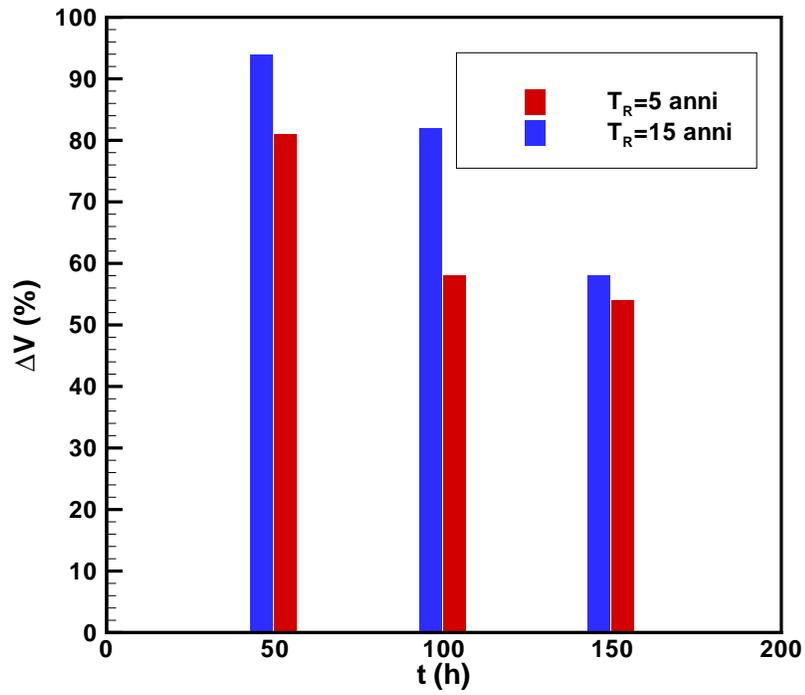


Figura 8: Percentuali volumi depositati durante prove stazionarie

tende ad assestarsi su una condizione di regime che consente di trasportare a valle una percentuale pari a circa il 50% del complessivo volume entrante.

5 Conclusioni

Nella progettazione di opere di laminazione, che hanno come obiettivo la difesa del territorio dalle inondazioni, una crescente attenzione è stata recentemente dedicata a limitare gli effetti dell'opera stessa sul complessivo trasporto di sedimenti, sempre più spesso inteso come indicatore della naturalità e della qualità ambientale di un corso d'acqua.

Lo studio effettuato ha condotto ad una approfondita comprensione dei fenomeni idraulici e morfodinamici che si realizzano all'interno di un'opera di laminazione e degli effetti da essi indotti sul corso d'acqua a valle dell'opera stessa. I risultati dello studio possono estendersi a opere di analoga tipologia realizzativa e hanno consentito di formulare alcuni suggerimenti utilizzabili sia nella fase di pianificazione sia nei diversi stadi della progettazione di tali opere. L'analisi dei processi idro-morfodinamici che si realizzano all'interno della cassa durante il passaggio di un'onda di piena è stata svolta attraverso una modellazione sia fisica sia numerica e questo ha permesso, tra l'altro, di individuare gli strumenti modellistici più indicati per affrontare le diverse fasi della pianificazione e della progettazione.

Le opere di laminazione qui considerate costituiscono ancora oggi uno degli strumenti più efficaci a disposizione del pianificatore per la riduzione del rischio di esondazione. Tuttavia tali opere non possono che alterare, a lungo termine, il naturale equilibrio del sistema fluviale e anzi, come qualunque altro intervento di sistemazione, esse vengono realizzate con il preciso obiettivo di modificare o controllare tale equilibrio. Sia in fase di progettazione sia in fase di esecuzione e, non ultima, in fase di esercizio, gli effetti sulla idrodinamica e sul trasporto solido indotti dalla presenza dell'opera devono dunque essere attentamente valutati, in particolare per quantificare i costi e i benefici associati alla realizzazione dell'opera stessa.

Se da un lato infatti l'efficienza idraulica delle opere non sembra risentire particolarmente dell'accumulo di materiale solido conseguente al passaggio di piene intense e l'assetto del fondo mostra una tendenza ad assestarsi su un nuovo assetto di equilibrio, dall'altro lato questa tendenza si sviluppa su un arco di tempo dell'ordine delle decine di anni, durante il quale la quantità di materiale trasportato viene drasticamente ridotta, con conseguente comparsa di fenomeni erosivi a valle dell'opera stessa e con un complessivo depauperamento in termini di bilancio sedimentario che risulta inoltre tanto più discontinuo quanto più sono numerose le opere di laminazione previste lungo il corso d'acqua.

Alcune scelte realizzative (cassa in linea o cassa mista, argine longitudinale o barriera sormontabile di contenimento del solo trasporto solido al fondo) si dimostrano efficaci nel limitare l'effetto dell'opera sul trasporto solido e

in questo senso contribuiscono a diminuire i costi ambientali senza influire particolarmente sui benefici di tipo idraulico.

In conclusione, nonostante il sistema fluviale mostri una tendenza ad adattarsi alle nuove condizioni imposte dalla presenza di casse di laminazione, la corretta progettazione, il monitoraggio e la manutenzione di queste opere appaiono di fondamentale importanza per una attenta e sostenibile gestione del corso d'acqua, non solo per quanto riguarda il mantenimento della richiesta efficienza di laminazione per cui l'opera stessa è progettata ma anche per la conservazione della non meno importante qualità ambientale del corso d'acqua su cui la cassa agisce.