

Studio su modello fisico del nuovo attraversamento autostradale del Fiume Reno

Armando BRATH

Facoltà di Ingegneria – Università di Bologna

Alberto MONTANARI

Facoltà di Ingegneria – Università di Bologna

Alessandro ALFI'

SPEA Ingegneria Europea S.p.A. - Milano

1. Introduzione

I modelli di correnti a pelo libero hanno ormai una lunga storia legata alle loro applicazioni, finalizzate per lo più a riprodurre in scala ridotta tratti di alvei fluviali, per studiarne l'evoluzione morfologica, il comportamento idraulico in risposta ad assegnate sollecitazioni di progetto o gli effetti indotti da manufatti inseriti in alveo. Il ruolo di tali modelli è ancora oggi di notevole attualità in seguito alla accresciuta necessità di analizzare la sicurezza degli alvei e di progettare la sistemazione, al fine di proteggere le aree contermini alle aste fluviali nei confronti degli eventi di piena e di tutelare la funzionalità delle infrastrutture interferenti con gli alvei fluviali.

Nella realtà i modelli idraulici in scala ridotta delle correnti a pelo libero sono spesso impiegati per analizzare fenomeni localizzati, quali erosioni alla base di manufatti e difese spondali oppure interferenze fra la corrente fluviale e infrastrutture dalla geometria particolarmente complessa, che rendono problematica la definizione delle condizioni al contorno per l'ipotetica applicazione di modelli numerici, che godono oggi di un'accresciuta popolarità in seguito alla crescente disponibilità di risorse di calcolo automatico.

I modelli fisici sono quindi tuttora uno strumento spesso indispensabile nello studio dei fenomeni idraulici che avvengono negli alvei fluviali, sebbene la loro realizzazione sia vincolata alla disponibilità di idonee strumentazioni e attrezzature di laboratorio. L'individuazione delle condizioni da assicurare per il rispetto dei criteri di similitudine comporta spesso problemi di non facile soluzione. La letteratura scientifica al riguardo è particolarmente ricca di contributi, che sintetizzano un'esperienza nel settore ormai più che secolare.

Ai modelli fisici si richiede normalmente da un lato di rappresentare i fenomeni rilevanti con sufficiente affidabilità e dall'altro di convincere il progettista ed il committente della attendibilità dei risultati da essi forniti. In relazione al primo scopo è indispensabile porre l'accento sul termine

"fenomeni rilevanti". Infatti, la rappresentazione affidabile dei fenomeni non è in genere completa, ma si limita ad alcuni aspetti ritenuti principali, mentre per i restanti ci si accontenta di verificare che nel modello, come nel prototipo, questi restino di secondaria importanza o possano essere filtrati, cioè identificati e rimossi, quando questi acquisissero una qualche importanza. In relazione invece al secondo scopo è necessario che la corrispondenza fra i fenomeni reali e quelli riprodotti nel modello sia semplice e per quanto possibile completa, oltre che facilmente percepibile in relazione alla loro somiglianza ed alla cura nella rappresentazione.

La presente nota è dedicata alla descrizione di un modello fisico a fondo mobile dell'alveo del Fiume Reno in prossimità di Sasso Marconi, realizzato nel Laboratorio di Ingegneria Idraulica (già Laboratorio di Costruzioni Idrauliche) dell'Università degli Studi di Bologna in seguito alla stipula di Convenzione fra il Dipartimento DISTART dell'Università medesima e la SPEA Ingegneria Europea di Milano. Il modello è stato realizzato per analizzare le interazioni tra la corrente fluviale, l'alveo del Fiume Reno, le strutture di attraversamento fluviale esistenti e quella prevista dalla Variante di Valico dell'Autostrada A1 nel tratto Bologna-Firenze. Il fine ultimo delle prove eseguite era verificare che le perturbazioni della corrente idrica indotte dall'inserimento della nuova infrastruttura non creino condizioni idrauliche pericolose per la stabilità degli attraversamenti esistenti e di quello in progetto.

Le prove eseguite hanno mostrato l'effettiva necessità della sperimentazione su modello fisico del nodo fluviale esaminato, in quanto le interazioni fra la corrente e le infrastrutture in alveo hanno originato fenomeni di turbolenza idraulica e di escavazione d'alveo estremamente singolari e localizzati, che altrimenti non avrebbero potuto essere valutati con adeguata precisione.

2. Descrizione dell'intervento in progetto

Il progetto esecutivo dell'intervento di adeguamento dell'Autostrada A1 Milano – Napoli, noto anche come “Variante di Valico”, predisposto dalla SPEA Ingegneria Europea per la Società Autostrade S.p.A, prevede la realizzazione di un nuovo attraversamento del Fiume Reno, in prossimità dell'abitato di Sasso Marconi (*Pierboni et al.*, 1999). Il nuovo attraversamento, che verrà realizzato immediatamente a valle del ponte autostradale esistente, ha lo scopo di migliorare sensibilmente le caratteristiche planimetriche, altimetriche e la sezione utile dell'infrastruttura, consentendo inoltre il raccordo alla successiva galleria Monte Mario (Figura 1).

In aggiunta all'esistente viadotto sull'alveo del Reno insiste, in un ristretto intorno dell'intervento, un'ulteriore attraversamento a monte costituito dal cosiddetto Ponte Albano sulla viabilità provinciale ed è anche presente una traversa di controllo dell'erosione (Figura 2). Le

fotografie riportate nelle Figure 3 e 4 danno una visione di insieme dello stato attuale dei luoghi e dei manufatti esistenti. Il particolare contesto lascia presumere, sotto il profilo dell'interferenza alveo/strutture, l'esistenza di processi idraulici di difficile riproduzione mediante l'impiego di metodologie numeriche.

Il nuovo viadotto Reno è stato progettato quindi tenendo conto, in una prima fase, delle risultanze dello studio idraulico condotto mediante un modello numerico dell'alveo nella sua attuale configurazione. L'impostazione progettuale perseguita ha avuto infatti l'obiettivo di definire una struttura che oltre alla propria sicurezza nei confronti delle sollecitazioni idrauliche e dei fenomeni erosivi, garantisca anche il minimo impatto sul regime idraulico del fiume. Allo scopo si è fatto ricorso a tecnologie che hanno permesso di assegnare una luce particolarmente ampia (134 metri) all'attraversamento dell'alveo, il franco minimo in quota risulta, per esigenze di tracciato, sempre superiore ai 20 metri e non pone quindi alcun problema di natura idraulica. Il viadotto sarà sorretto da quattro pile, poste nell'alveo di magra, e da altre poste nella golena di sinistra. Le quattro pile hanno sezione circolare e diametro pari a 5.50 metri; le fondazioni delle pile sono tutte realizzate mediante plinti quadrati da 16 metri di lato poggianti su 16 pali trivellati da 1500 mm di diametro, immorsati nel substrato, che garantiscono la stabilità delle strutture anche nell'ipotesi di fenomeni erosivi particolarmente severi. Al fine di evitare fenomeni di erosione del fondo alveo e delle sponde localizzati in corrispondenza del basamento delle pile in alveo, è stata prevista la posa in opera di opportune opere di protezione. Come può desumersi dalle sezioni A-A e B-B effettuate in corrispondenza di due delle quattro pile (cfr. Figura 2 per l'ubicazione) e riportate in Figura 6, essenzialmente, queste consistono in una difesa in gabbioni posta in sponda sinistra, raccordata all'alveo mediante una sottostante mantellata in scogliera di massi naturali (Figura 7). Tali gabbionate hanno la funzione di proteggere l'argine posto a ridosso dell'alveo di magra, a margine della golena sinistra. Sempre in sponda sinistra sarà realizzata una mantellata di massi sciolti naturali, aventi volume pari a circa 1 metro cubo, a protezione del basamento delle pile in alveo, al fine di evitare fenomeni di erosione localizzati. In sponda destra è invece prevista la realizzazione di una protezione dei basamenti delle pile in muratura di pietrame, che sarà raccordata all'alveo mediante un mantello di massi sciolti anch'essi del volume di circa 1 metro cubo.

Il piano di posa dei plinti è impostato alla quota di 83 m s.l.m.; conformazione e spessore sono stati ottimizzati consentendo di ingombrare la sezione dell'alveo con i soli fusti delle pile, in modo da minimizzare l'effetto di rigurgito sulla corrente.

Il tronco fluviale sul quale insisteranno le infrastrutture del nuovo viadotto sarà quindi caratterizzato dalla presenza di tre attraversamenti d'alveo posti in rapida successione (cfr. Figura 2), così da dare luogo a significative perturbazioni della corrente fluviale. Da ciò discende la

necessità di studiare accuratamente gli effetti indotti da tali perturbazioni sulla dinamica morfologica dell'alveo fluviale al fine di verificare la stabilità delle infrastrutture in progetto anche in concomitanza del verificarsi di eventi alluvionali a carattere eccezionale.

La complessità idraulica del nodo fluviale in oggetto ha reso consigliabile la realizzazione di un modello fisico a fondo mobile del tratto d'alveo interessato, riprodotto in scala opportunamente ridotta. Il modello predetto, realizzato anche in ottemperanza ad una specifica prescrizione formulata dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, è quindi finalizzato ad accertare le interazioni tra la corrente fluviale, le strutture esistenti ed in progetto e l'alveo del fiume Reno in seguito alla realizzazione del manufatto di attraversamento. Il fine principale della realizzazione del modello è pertanto l'individuazione di eventuali fenomeni di escavazione, anche localizzati, in corrispondenza delle opere in alveo e delle sistemazioni in progetto. Le prove realizzate su modello avevano inizialmente la finalità di verificare l'idoneità delle protezioni previste a prevenire il verificarsi di fenomeni di erosione localizzata, al passaggio di portate di piena caratterizzate da diversi tempi di ritorno fino ad un valore massimo pari a $3000 \text{ m}^3/\text{s}$, alla quale studi eseguiti da SPEA in occasione del Progetto portano ad attribuire un tempo di ritorno di circa 1000 anni.

In aggiunta alla verifica degli aspetti citati la realizzazione del modello ha permesso, valutando alcune ipotesi alternative di intervento, di ottimizzare il progetto delle sistemazioni idrauliche connesse al viadotto (Alfi et al., 2000).

3. Descrizione del tratto d'alveo fluviale riprodotto

Il tratto d'alveo oggetto di intervento è localizzato nelle immediate vicinanze di Sasso Marconi, in provincia di Bologna, ed ha una pendenza di fondo media pari al 3 per mille. La sezione fluviale caratteristica è di tipo composto, essendo presente un alveo di magra e due golene laterali. Il materiale di fondo è costituito, nell'alveo di magra, in prevalenza di ciottoli alluvionali, mentre nelle due golene detti ciottoli sono frammisti ad una matrice di materiale più fine ricoperto, a tratti, da abbondante vegetazione di tipo arbustivo nella quale non mancano esemplari di alberi di alto fusto. L'alveo di magra è diviso dalle golene da sponde costituite da materiale alluvionale consolidato.

Il modello idraulico del Fiume Reno è stato realizzato con alveo a fondo mobile, in modo da essere in grado di valutare gli scavi prodotti dalla corrente. Il tratto riprodotto dal modello ha una lunghezza di circa 1100 metri posti a cavallo del manufatto di nuova costruzione. La morfologia dell'alveo è stata caratterizzata mediante il rilievo di dettaglio di 30 sezioni trasversali, eseguito a cura di SPEA Ingegneria Europea. La caratterizzazione della granulometria del materiale d'alveo si prefigura quale condizione necessaria al fine di riprodurre correttamente in scala ridotta i sedimenti di fondo, la cui curva granulometrica è stata rilevata eseguendo 3 sondaggi, tutti in sponda destra. Il

primo di essi (S1) è dislocato in immediata prossimità dell'alveo di magra, circa 20 metri a valle della traversa a protezione del ponte autostradale esistente. Gli altri due prelievi sono invece stati eseguiti in golena, rispettivamente 80 (S2) e 200 (S3) metri a valle della traversa predetta. I sondaggi sono stati eseguiti rimuovendo innanzitutto il materiale grossolano superficiale, che funge da corazzamento allo strato sottostante, materiale che è risultato caratterizzato da un diametro massimo in tutti e tre i casi pari a circa 17 *cm*. In seguito è stato operato uno scavo fino alla profondità di 1,2 *m* rispetto al piano di campagna, dal cui materiale di risulta, opportunamente rimescolato, è stato prelevato il campione da sottoporre ad analisi granulometrica. I diametri corrispondenti al 50% e 90% del passante in peso, indicati rispettivamente con i simboli d_{50} e d_{90} , riferiti ai tre sondaggi effettuati, sono riportati in Tabella 1.

Tabella 1. Granulometria del materiale d'alveo in corrispondenza dei 3 sondaggi effettuati

	S1	S2	S3
d_{50}	38 <i>mm</i>	27 <i>mm</i>	30 <i>mm</i>
d_{90}	70 <i>mm</i>	85 <i>mm</i>	80 <i>mm</i>

La Figura 5 mostra invece le curve granulometriche complete risultanti dai 3 sondaggi e la curva granulometrica media. Come si può notare, le caratteristiche dei sedimenti presenti in golena e nell'alveo di magra sono risultate molto simili.

4. Descrizione delle strutture di laboratorio disponibili

Il modello fisico è stato realizzato nel laboratorio di Ingegneria Idraulica della Facoltà di Ingegneria dell'Università degli Studi di Bologna, che dispone di una vasca impermeabilizzata avente superficie complessiva pari a 73 m^2 circa, di dimensioni planimetriche pari a circa 15 metri di lunghezza e 5 metri di larghezza. La vasca è dotata di un sistema di ricircolo dell'acqua composto da tre pompe sommergibili ad iniettore, di potenza pari a 5.5 *HP* cadauna e portata pari a 14 *l/s* per prevalenza pari a 15 *m*. Le pompe sono immerse in una vaschetta, con fondo sagomato a tramoggia, ove vengono raccolti l'acqua e il materiale solido trasportato dalla corrente. L'acqua proveniente dalla mandata delle pompe ricircola per mezzo di tre condotti di diametro pari a 200 *mm* e lunghezza di circa 13.5 *m*, inclinati con pendenza del 2 per mille nel senso del moto onde favorire il trasporto del materiale solido di cui si carica la corrente. Tutte le tubazioni sono in acciaio. Il livello

idrico nella vaschetta di alloggiamento delle pompe è regolabile al fine di impostare la condizione al contorno di valle desiderata.

5. Brevi richiami di teoria dei modelli idraulici in scala ridotta

La conoscenza dei principali fondamenti della teoria della modellazione in scala ridotta delle correnti a pelo libero, in alveo fisso e mobile, è indispensabile al fine di comprendere le scelte progettuali effettuate nel caso del modello del Fiume Reno. Nel seguito si fornirà una sintetica descrizione degli aspetti principali dei criteri adottati per la progettazione di modelli fisici di correnti fluviali in scala ridotta, rimandando il lettore interessato alla letteratura disponibile per maggiori approfondimenti (si veda, ad esempio, *Brath et al., 1999*).

I modelli in scala ridotta delle correnti a pelo libero devono essere progettati in modo da rispettare condizioni di similitudine dinamica rispetto al prototipo. La teoria dell'analisi dimensionale dimostra come tale condizione sia raggiungibile assicurando la similitudine geometrica e, contemporaneamente, l'invarianza di alcuni numeri adimensionali caratteristici del fenomeno analizzato (*Yalin, 1971*). Nel caso delle correnti a pelo libero, operando con modelli indistorti come nel caso presente, occorre in particolare assicurare la conservazione dei numeri di Reynolds e Froude della corrente, della pendenza e della scabrezza relativa dell'alveo (*Brath et al., 1999*). Il numero di Reynolds (Re) è definito dalla relazione

$$Re = \frac{uR}{\nu} \quad (1)$$

dove u è la velocità media della corrente fluviale, R è il raggio idraulico della sezione, espresso come rapporto fra l'area e il perimetro bagnati e ν è la viscosità cinematica dell'acqua, mentre il numero di Froude (Fr) si scrive come

$$Fr = \frac{u}{\sqrt{gh}} \quad (2)$$

dove g indica l'accelerazione di gravità e h il tirante idrico. I numeri Re e Fr esprimono rispettivamente il rapporto fra le forze inerziali e le forze viscosi che agiscono sul fluido e il rapporto fra le forze inerziali e le forze gravitazionali. La scabrezza relativa si quantifica invece mediante il rapporto fra due quantità geometriche rappresentative rispettivamente della scabrezza d'alveo e della dimensione della sezione trasversale della corrente (*Marchi e Rubatta, 1981*).

La corretta riproduzione di questi parametri nel modello consente di ottenere la similitudine di tutte le grandezze geometriche, cinematiche e dinamiche della corrente. Nel caso dei modelli a fondo mobile, occorre inoltre assicurare la similitudine dei parametri adimensionali caratteristici dei

fenomeni di mobilitazione e trasporto dei sedimenti. Ciò si ottiene assicurando la conservazione dei numeri adimensionali di Reynolds d'attrito, di Froude d'attrito, del diametro relativo e della densità di massa relativa dei sedimenti (*Brath et al., 1999*). Il numero di Reynolds d'attrito (Re^*) si esprime come

$$Re^* = \frac{u^* d}{\nu} \quad (3)$$

dove d è un diametro rappresentativo del materiale di fondo e u^* è la velocità di attrito della corrente che si calcola con l'espressione

$$u^* = \sqrt{\frac{\tau}{\rho}} \quad (4)$$

dove τ è l'azione tangenziale media esercitata dalla corrente sulle sponde e ρ è la densità di massa dell'acqua. Il numero di Froude d'attrito (Fr^*) si esprime invece come

$$Fr^* = \frac{u^*}{\sqrt{gd}} \quad (3)$$

I numeri Re^* e Fr^* possono essere interpretati come indicatori, rispettivamente, del rapporto fra le forze inerziali e le forze viscosse che agiscono sul granello di materiale d'alveo e del rapporto fra le forze inerziali e le forze gravitazionali sul granello medesimo. Il diametro relativo si esprime invece mediante il rapporto fra il diametro del granello e l'altezza d'acqua nella sezione trasversale della corrente.

La conservazione di tutti i numeri adimensionali predetti si configura come una condizione impossibile da rispettare nelle applicazioni pratiche, poiché imporrebbe di adottare nel modello un fluido diverso dall'acqua, scelta che difficilmente può essere effettuata per ragioni tecniche ed economiche. E' quindi indispensabile limitarsi a realizzare un modello nel quale solo alcune grandezze adimensionali sono conservate, il che dal punto di vista fisico equivale a considerare trascurabile l'influenza sul moto del fluido di alcune forze agenti rispetto ad altre. Il modello così ottenuto è rappresentativo solo delle grandezze indipendenti dai parametri caratteristici che sono stati trascurati. Affinché i risultati forniti dal modello siano rappresentativi occorre quindi preliminarmente verificare che risulti lecita l'ipotesi fatta e cioè che l'effetto delle forze trascurate risulti nel modello effettivamente trascurabile.

Nel caso delle correnti a pelo libero a fondo mobile, spesso si rinuncia alla corretta riproduzione di Re e Re^* , mantenendo invece la similitudine di Fr e Fr^* . La ragione di tale scelta risiede nel ruolo secondario che le forze di origine viscosa, in condizioni di moto turbolento, esercitano sul moto delle correnti a pelo libero e sui fenomeni di trasporto solido, rispetto al ruolo invece fondamentale esercitato dalle forze di origine gravitazionale, la cui corretta riproduzione è

assicurata dalla conservazione dei numeri di Froude. Le condizioni di moto turbolento si verificano quando i numeri Re e Re^* si mantengono superiori a valori pari a circa, rispettivamente, 60.000 e 400.

Nei modelli fisici realizzati in similitudine di Froude la scala di riduzione delle velocità della corrente risulta uguale alla radice quadrata della scala di riduzione delle lunghezze geometriche e di conseguenza i numeri Re e Re^* si riducono nel modello rispetto al prototipo secondo un rapporto di scala $\lambda_{Re} = \lambda_L^{3/2}$, dove λ_L indica la scala di riduzione delle lunghezze geometriche, pari al rapporto tra le lunghezze (e le altezze) nel modello e quelle corrispondenti nel prototipo. Detta riduzione della velocità e dei numeri di Reynolds può fare sì che il deflusso della corrente nel modello non avvenga in condizioni di moto turbolento, anche se queste sussistono nel prototipo. Ai fini della corretta applicazione di un modello in similitudine di Froude è quindi indispensabile verificare la presenza di moto assolutamente turbolento non solo nel prototipo, ma soprattutto nel modello. Nel caso in cui questa condizione non sia rispettata, si verifica nel modello una maggiore resistenza al moto della corrente, che si traduce in una riproduzione non fedele dei livelli idrici della corrente stessa, nonché dei fenomeni di trasporto dei sedimenti, che risultano più soggetti ad essere movimentati in ragione del maggiore effetto della viscosità. Detti effetti, se presenti, dovranno essere compensati riducendo la scabrezza dell'alveo del modello e/o aumentando il diametro dei sedimenti nel modello in modo da compensare la loro minore stabilità (Kobus, 1980).

I principali rapporti di scala caratteristici dei modelli a fondo mobile indistorti in similitudine di Froude sono riassunti nella Tabella 2.

Tabella 2. Principali rapporti di scala dei modelli a fondo mobile in similitudine di Froude.

Grandezza	Rapporto di scala
Velocità	$\lambda_u = \lambda_L^{1/2}$
Tempi	$\lambda_T = \lambda_L^{1/2}$
Pendenze	$\lambda_S = 1$
Numeri di Reynolds	$\lambda_{Re} = \lambda_L^{3/2}$
Forze	$\lambda_F = \lambda_L^3$
Portate	$\lambda_Q = \lambda_L^{5/2}$
Peso specifico dei sedimenti	$\lambda_p = 1$
Diametro dei sedimenti	$\lambda_D = \lambda_L$

5. Il modello a fondo mobile del Fiume Reno

5.1. Determinazione del rapporto di scala delle lunghezze geometriche

I rapporti di scala geometrici del modello sono stati determinati in modo da poter riprodurre una lunghezza adeguata dell'alveo del fiume nello spazio massimo disponibile nella vasca in laboratorio. La scala delle lunghezze L_r scelta, pari a 1/100, consente di riprodurre circa 600 metri di alveo a monte del manufatto in progetto e circa 500 metri a valle. Poiché la riduzione di scala geometrica è piuttosto accentuata, si è provveduto a verificare che i valori di Re e Re^* nel modello fossero accettabili. Calcolando il valore medio del numero di Reynolds nel tratto d'alveo riprodotto, al passaggio della portata millenaria pari a $3000 \text{ m}^3/\text{s}$, si ottiene $Re = 50983$. In tali condizioni il moto della corrente nel modello si svolge ai limiti della zona di moto turbolento di transizione, cosicché il mancato rispetto della conservazione del numero di Reynolds fra modello e prototipo risulta ininfluenza nei riguardi della resistenza al moto. I valori dei parametri idraulici calcolati sono riassunti in Tabella 3, che riporta anche i valori dei numeri adimensionali Fr^* e Re^* ; con i pedici m e p si indicano le grandezze riferite, rispettivamente, al modello ed al prototipo.

Tabella 3. Principali parametri idraulici relativi alla portata $Q = 3000 \text{ m}^3/\text{s}$
(valori medi nel tronco d'alveo considerato)

u_p (m/s)	R_p (m)	τ_p (N/m ²)	Re_m	d_{90p} (mm)	Re_m^*	Fr_p^*
3.03	4.21	79.89	50982	120	14.1	0.125

E' opportuno che calcoli analoghi vengano condotti anche con riferimento a portate inferiori, ad esempio la portata che, in media, produce le condizioni di equilibrio limite del materiale d'alveo. Il diametro rappresentativo di quest'ultimo viene assunto a favore di sicurezza pari a 50 mm , (inferiore quindi al d_{90} dei sedimenti medesimi) diametro per il quale l'equilibrio limite dei sedimenti è raggiunto al transito della portata liquida pari a $1000 \text{ m}^3/\text{s}$. I valori dei principali parametri idraulici riferiti al transito di tale portata sono riportati in Tabella 4.

Tabella 4. Principali parametri idraulici relativi alla portata $Q = 1000 \text{ m}^3/\text{s}$
(valori medi nel tronco d'alveo considerato)

u_p (m/s)	R_p (m)	τ_p (N/m ²)	Re_m	d_{90p} (mm)	Re_m^*	Fr_p^*
2.55	2.36	43.91	24072	75	6.29	0.054

In riferimento a tale ultima portata, il valore di Re indica che il moto si svolge nella zona di transizione. Tuttavia, analisi più approfondite hanno mostrato come la resistenza al moto in tali condizioni sia praticamente pari a quella che si sarebbe avuta in condizioni di moto assolutamente turbolento, sicché l'approssimazione introdotta appare più che accettabile.

5.2. Individuazione del rapporto di scala dei sedimenti

Il rapporto di scala delle lunghezze geometriche scelto rende impossibile ottenere nel modello valori di Re^* per i quali sia lecito poter trascurare l'influenza delle forze viscosi sulla movimentazione dei sedimenti d'alveo. Infatti, anche riferendosi alla portata pari nel prototipo a $3000 \text{ m}^3/\text{s}$, la Tabella 3 evidenzia come il valore medio di Re^* nelle sezioni d'alveo considerate sia pari a solo 14.1, quindi ben inferiore ai valori necessari che come detti si mantengono attorno a $Re^* = 400$. Tale circostanza è ancora più evidente nel caso del transito della portata pari a $1000 \text{ m}^3/\text{s}$, che induce un valore medio di Re^* pari a 6.29.

Il rapporto di scala dei sedimenti è stato di conseguenza determinato in modo da compensare l'incremento della forza di trascinamento della corrente conseguente all'effetto delle forze viscosi. Allo scopo è stato applicato il criterio di Supino (*Supino, 1964; Brath et al, 1999*) che ha fornito per la scala di riduzione del materiale d'alveo un valore pari a 1/57. Il materiale d'alveo utilizzato nel modello è quindi caratterizzato da valori del d_{50} e del d_{90} pari rispettivamente a 0.52 mm e 1.31 mm.

E' tuttavia da notare che, in accordo allo schema adottato (criterio di Supino), si trovano a rigore in condizioni di similitudine solo i sedimenti che, nel modello e nel prototipo, sono in condizioni di equilibrio limite. I sedimenti di diametro maggiore risulteranno invece più stabili nel modello rispetto al prototipo, viceversa per i sedimenti di diametro minore. Analisi comparative hanno poi evidenziato la bassa sensitività della scala di riduzione del materiale d'alveo, così calcolata, rispetto al valore della portata fluviale.

Riassumendo il modello è caratterizzato dalle seguenti scale:

Scala delle lunghezze geometriche 1:100

Scala delle altezze geometriche 1:100

Scala del diametro dei sedimenti 1:57

Scala del peso specifico dei sedimenti 1:1

Scala delle pendenze longitudinali 1:1

Scala delle portate 1:100000.

Le scale adottate dovrebbero a rigore causare un lieve aumento della resistenza al moto, dovuta all'azione congiunta della minore turbolenza del fluido e della maggiore scabrezza del materiale d'alveo caratterizzato da maggiori dimensioni rispetto al prototipo. Tuttavia, i risultati

delle prove preliminari, finalizzate alla verifica operativa del modello, hanno evidenziato come i profili del pelo libero corrispondenti al transito di diversi valori di portata siano sostanzialmente ben riprodotti, confermando così l'adeguatezza delle scelte fatte in materia di rapporti di scala nella progettazione del modello.

I massi sciolti delle protezioni in scogliera delle pile sono stati riprodotti, a favore di sicurezza, secondo il rapporto di scala delle lunghezze geometriche (1:100), utilizzando ciottoli di pietra naturale, anziché secondo il rapporto di scala dei sedimenti (1:57).

Le Figure 8 e 9 mostrano alcune immagini riprese durante la realizzazione del modello. Sono ben visibili le sagome in legno delle sezioni fluviali che sono state utilizzate per realizzare il profilo dell'alveo, che sono state successivamente rimosse prima di eseguire le prove. Le Figure 10, 11 e 12 mostrano invece alcune immagini del modello finito, prima dell'esecuzione delle prove.

6. Descrizione dei risultati delle prove

La prima serie di prove eseguite ha avuto lo scopo di verificare il corretto funzionamento del modello e le scelte effettuate a proposito della riproduzione del materiale d'alveo e di individuare l'intervallo di portate di maggior interesse ai fini dei fenomeni di escavazione. E' stato simulato il transito di quattro valori diversi di portata, pari rispettivamente a 700, 1230, 2000 e 3000 m^3/s nel prototipo, alle quali corrispondono nel modello portate, nell'ordine, di 7, 12.3, 20 e 30 l/s . Le Figure 13 e 14 documentano una delle prove con portata pari a 3000 m^3/s . Le prove sono state condotte in riferimento ad un ampio intervallo di portate al fine, da un lato, di verificare l'attendibilità della ricostruzione dei profili del pelo libero ottenuti integrando numericamente le equazioni differenziali del moto permanente e, dall'altro, di seguire l'evoluzione della morfologia del fondo per scenari idrologici differenti e corrispondenti al verificarsi di eventi caratterizzati da un ampio ventaglio di valori del tempo di ritorno. Il livello idrico nell'ultima sezione a valle del tratto d'alveo riprodotto è stato imposto variando la posizione della soglia di sfioro posta al termine della vasca, assumendolo pari al livello del profilo del pelo libero, in condizioni di moto permanente, calcolato per la corrispondente portata.

Il profilo del pelo libero lungo l'alveo è stato rilevato mediante cinque idrometri, posizionati in corrispondenza di alcune sezioni particolarmente significative. Per tutte le portate considerate si è riscontrata una soddisfacente concordanza tra il profilo del pelo libero osservato nel modello e quello ottenuto dai calcoli idraulici effettuati integrando numericamente le equazioni differenziali del moto permanente.

Sono state eseguite diverse prove per ciascuna delle portate simulate; l'evoluzione della morfologia del fondo è stata rilevata mediante rilievi diretti e mediante immagini fotografiche. In

particolare è stata rilevata l'evoluzione della morfologia in quattro sezioni trasversali, ritenute significative, posizionate nelle vicinanze degli attraversamenti esistenti e di quello in progetto. Le prove sono state condotte, a favore di sicurezza, prolungandone la durata fino al raggiungimento delle condizioni di equilibrio della morfologia d'alveo, eccezion fatta per le prove con portata pari a $3000 \text{ m}^3/\text{s}$ nel prototipo, per le quali il prolungarsi di una tale portata per intervalli temporali estesi appare poco verosimile in relazione al regime di piena del corso d'acqua.

Durante l'effettuazione della prima serie di prove si è verificato che escavazioni significative si verificano solo a partire da portate dell'ordine di $2000 \text{ m}^3/\text{s}$. Di conseguenza, la seconda serie di prove, maggiormente approfondite, è stata realizzata in riferimento alle sole portate di 2000 e $3000 \text{ m}^3/\text{s}$.

Le prove eseguite hanno messo in evidenza l'idoneità dell'alveo a contenere al proprio interno il deflusso di piena corrispondente a tutte le portate previste. Il livello del pelo libero, infatti, è risultato sempre abbondantemente inferiore alle quote arginali e il moto idrico si è svolto senza dare luogo a singolarità tali da evidenziare incompatibilità fra le strutture in progetto e il deflusso della corrente. Tuttavia, è emersa la necessità di considerare con particolare attenzione la breve zona d'alveo interessata dagli attraversamenti. Infatti, la presenza concomitante delle pile e di un forte restringimento dell'alveo naturale in sponda destra dovuto all'esistenza di un promontorio, restringimento che ha peraltro indotto a realizzare gli attraversamenti proprio in quella zona, origina situazioni di deflusso idrico caratterizzate dalla presenza di singolarità localizzate, quali vortici e risalti idraulici, posti in rapida successione. Un particolare di tali singolarità, attorno alle pile del ponte in progetto, è riportato nella Figure 15 e 16, dove si evidenzia l'effetto esercitato dalla presenza della traversa fluviale posta immediatamente a monte della pila e del disassamento tra le pile del vecchio attraversamento e quello del nuovo. Gli effetti indotti da quest'ultimo sulla corrente sono anche evidenziati dalla Figura 13.

Tali fenomeni si verificano soprattutto in sponda destra e sono localizzati in prossimità delle protezioni spondali previste a protezione delle pile del ponte in progetto. Ciò ha evidenziato la necessità di proteggere con particolare cura le fondazioni delle pile in tale zona.

Le prove eseguite, al transito delle portate pari a 2000 e $3000 \text{ m}^3/\text{s}$, hanno messo in luce la presenza di fenomeni di escavazione localizzati in prossimità delle pile dei ponti esistenti, sostanzialmente congruenti con il rilievo disponibile dell'attuale morfologia dell'alveo e tali da non destare situazioni di preoccupazione per la stabilità delle infrastrutture medesime.

Al transito delle portate pari a 2000 e $3000 \text{ m}^3/\text{s}$ si sono manifestati elevati valori del flusso di materiale solido trasportato da parte della corrente fluviale, con erosioni e depositi di sedimenti di notevole entità, come evidenziato nella Figura 17, tali da provocare significative variazioni della

morfologia dell'alveo. Per quanto riguarda gli effetti sui manufatti in progetto, si sono manifestati fenomeni di scavo localizzato in sponda destra, al piede delle protezioni in scogliera poste a difesa delle pile del nuovo attraversamento, tali comunque da non compromettere la stabilità delle scogliere medesime (Figura 18). Le profondità massime di scavo sono risultate attorno ai 2 metri, sostanzialmente immutate al transito delle due portate predette.

Al fine di meglio indagare le condizioni di stabilità delle scogliere di protezione, sono state eseguite nella prima serie di prove alcune sperimentazioni sostituendo le scogliere in pietra naturale previste dal Progetto con altre realizzate in malta di cemento, caratterizzate quindi da peso specifico più contenuto. Il passaggio prolungato della portata pari a $3000 \text{ m}^3/\text{s}$ su dette scogliere ne ha provocato l'asportazione, con conseguente formazione di ingenti fenomeni erosivi alla base delle pile dell'attraversamento in progetto; le profondità di scavo si sono attestate su quote leggermente inferiori ai 6 metri, comunque non preoccupanti per la stabilità delle fondazioni. L'esperienza eseguita ha quindi confermato la necessità di porre in opera protezioni in scogliera di dimensioni non inferiori a quelle previste dal Progetto.

I fenomeni di escavazione in sponda destra sono risultati essere le uniche fonti di preoccupazione, dal punto di vista della sicurezza idraulica dell'alveo e degli attraversamenti fluviali, messe in evidenza dal modello.

7. Conclusioni

Il modello idraulico a fondo mobile del Fiume Reno in prossimità di Sasso Marconi è stato realizzato al fine di studiare l'interazione fra la corrente fluviale, i ponti esistenti e quello previsto dal Progetto della Variante di Valico dell'autostrada A1 Bologna-Firenze.

Il tronco fluviale sul quale insisteranno le infrastrutture del nuovo viadotto sarà infatti caratterizzato dalla presenza di tre attraversamenti d'alveo posti in rapida successione, così da dare luogo a significative perturbazioni della corrente fluviale. La complessità del nodo idraulico esaminato ha reso consigliabile la realizzazione di un modello fisico a fondo mobile dell'alveo, realizzato in scala opportunamente ridotta, in modo da rappresentare compiutamente gli effetti di alcuni fenomeni che, vista la geometria alquanto irregolare del campo di moto e la presenza di significativi moti tridimensionali, non potrebbero essere descritti con analoga affidabilità facendo uso di modelli numerici del campo idrodinamico. Da ciò discende la necessità di studiare su modello fisico gli effetti indotti da tali perturbazioni sulla dinamica morfologica dell'alveo fluviale al fine di verificare la stabilità delle infrastrutture in progetto anche in concomitanza del verificarsi di eventi alluvionali a carattere eccezionale.

Scopo principale degli studi eseguiti su modello era la verifica dell' idoneità delle protezioni spondali previste dal Progetto esecutivo a fronteggiare eventi caratterizzati da portate fluviali estreme, in modo da contenere entro valori accettabili gli effetti erosivi alla base delle pile del manufatto.

Sono state eseguite un totale di 17 prove, facendo transitare portate variabili, nel prototipo, da 700 a 3000 m³/s, quest'ultima corrispondente alla portata millenaria, nel prototipo, stimata nel Progetto per il tronco d'alveo in studio.

Le prove condotte hanno mostrato l' idoneità dell'alveo a consentire il deflusso di eventi di piena corrispondenti a tempi di ritorno millenari, anche in presenza delle strutture in progetto; nel contempo esse hanno però evidenziato la necessità di porre particolare attenzione al corretto posizionamento delle protezioni in sponda destra delle pile in progetto, sulle quali è particolarmente marcata l'azione erosiva dalla corrente fluviale.

Nel complesso, l'esperienza condotta ha messo in evidenza l'opportunità di studiare il nodo idraulico in esame tramite un modello fisico, mediante il quale è stato possibile riconoscere l'esistenza di fenomeni localizzati altrimenti ben difficilmente identificabili e prevedibili.

8. Riferimenti bibliografici

- Alfi, A., Brath, A. e Montanari, A., Modello idraulico a fondo mobile del Fiume Reno per il nuovo attraversamento dell'Autostrada del Sole, *Quarry and Construction*, 2, 136-148, 2000.
- Brath, A., Lamberti, A., e Montanari, A., Lo studio dei fenomeni fluviali mediante modelli fisici, in *L'ingegneria naturalistica nella sistemazione dei corsi d'acqua*, a cura di U. Maione e A. Brath, Atti del Corso di Aggiornamento, Milano 5-9 ottobre 1998, pp. 167-210, Editoriale BIOS, 1999.
- Kobus, H., *Hydraulic modelling*, Bullettin n°7-German Association for Water Resources and Land Improvement, Amburg, 1978.
- Marchi, E. e Rubatta, A., *Meccanica dei fluidi*, Utet, Torino, 1981.
- Pierboni, L., Lenti, S., Donferri, M., Variante di valico, *Quarry and Costruction*, n.1, 1999.
- Supino, G., *Le reti idrauliche*, Patron, Bologna, 1964.
- Yalin, M.S., *Theory of Hydraulic Models*, Macmillian, London, 1971

DIDASCALIE DELLE FIGURE

Figura 1 – Corografia generale degli attraversamenti stradali esistenti e del nuovo attraversamento della variante autostradale di valico Bologna-Firenze. Fiume Reno, località Sasso Marconi (Bo).

Figura 2 – Planimetria generale degli attraversamenti e delle sistemazioni d'alveo previste.

Figura 3 – Vista del sito da monte. In primo piano si nota il Ponte Albano, in secondo l'attraversamento autostradale esistente.

Figura 4 – Vista del sito da valle. Si notano l'attraversamento autostradale esistente e, in primo piano, la traversa che ne protegge le fondazioni.

Figura 5. Curve granulometriche del materiale d'alveo risultanti dai 3 sondaggi effettuati e curva granulometrica media.

Figura 6 – Sezioni delle sistemazioni d'alveo in corrispondenza di due delle quattro pile in alveo del nuovo attraversamento.

Figura 7 – Sezioni tipologiche delle sistemazioni.

Figura 8 – Particolare del modello durante la costruzione (Laboratorio di Ingegneria Idraulica, Università degli Studi di Bologna, 1999). Vista da valle. In primo piano si notano le sagome di legno delle sezioni fluviali, utilizzate per tracciare il profilo dell'alveo. Sulla destra si notano le pile del nuovo viadotto ed in secondo piano quelle dei ponti esistenti.

Figura 9 – Particolare del modello durante la modellazione del profilo dell'alveo fluviale (Laboratorio di Ingegneria Idraulica, Università degli Studi di Bologna, 1999). Le sagome in legno sono parzialmente coperte dal materiale alluvionale di fondo (dette sagome sono state tolte prima di eseguire le prove). Vista da valle. In primo piano si notano le pile del nuovo viadotto e le opere di protezione spondale. In secondo piano sono visibili le pile dei ponti esistenti e la traversa a loro protezione.

Figura 10 – Particolare del modello finito prima dell'esecuzione delle prove (Laboratorio di Ingegneria Idraulica, Università degli Studi di Bologna, 1999).

Figura 11 – Particolare del modello finito prima dell'esecuzione delle prove (Laboratorio di Ingegneria Idraulica, Università degli Studi di Bologna, 1999). Vista da monte. In primo piano si notano le pile del viadotto autostradale esistente, sul retro la traversa fluviale e ancora dietro le pile del nuovo viadotto.

Figura 12 – Particolare del modello finito prima dell'esecuzione delle prove (Laboratorio di Ingegneria Idraulica, Università degli Studi di Bologna, 1999). Vista da valle. In primo piano si notano le pile in sponda destra del nuovo attraversamento e le relative protezioni di sponda. In secondo piano le pile del ponte autostradale esistente e nel retro quelle del Ponte Albano.

Figura 13 – Vista di insieme da valle dell'alveo nel modello in scala ridotta durante una prova con portata pari a $3000 \text{ m}^3/\text{s}$ nel prototipo. In primo piano si notano le pile in sponda destra del nuovo attraversamento.

Figura 14 – Vista laterale dell'alveo nel modello in scala ridotta durante una prova con portata pari a $3000 \text{ m}^3/\text{s}$ nel prototipo.

Figura 15 – Vista della pila destra lato sud durante una prova con portata pari a $3000 \text{ m}^3/\text{s}$ nel prototipo.

Figura 16 – Particolare della pila destra lato sud durante una prova con portata pari a $3000 \text{ m}^3/\text{s}$ nel prototipo.

Figura 17 – Vista di insieme dell'alveo da valle al termine di una delle prove con portata pari a $3000 \text{ m}^3/\text{s}$ nel prototipo.

Figura 18 – Particolare delle protezioni delle pile in sponda destra del nuovo attraversamento al termine di una delle prove con portata pari a $3000 \text{ m}^3/\text{s}$ nel prototipo.

FIGURE

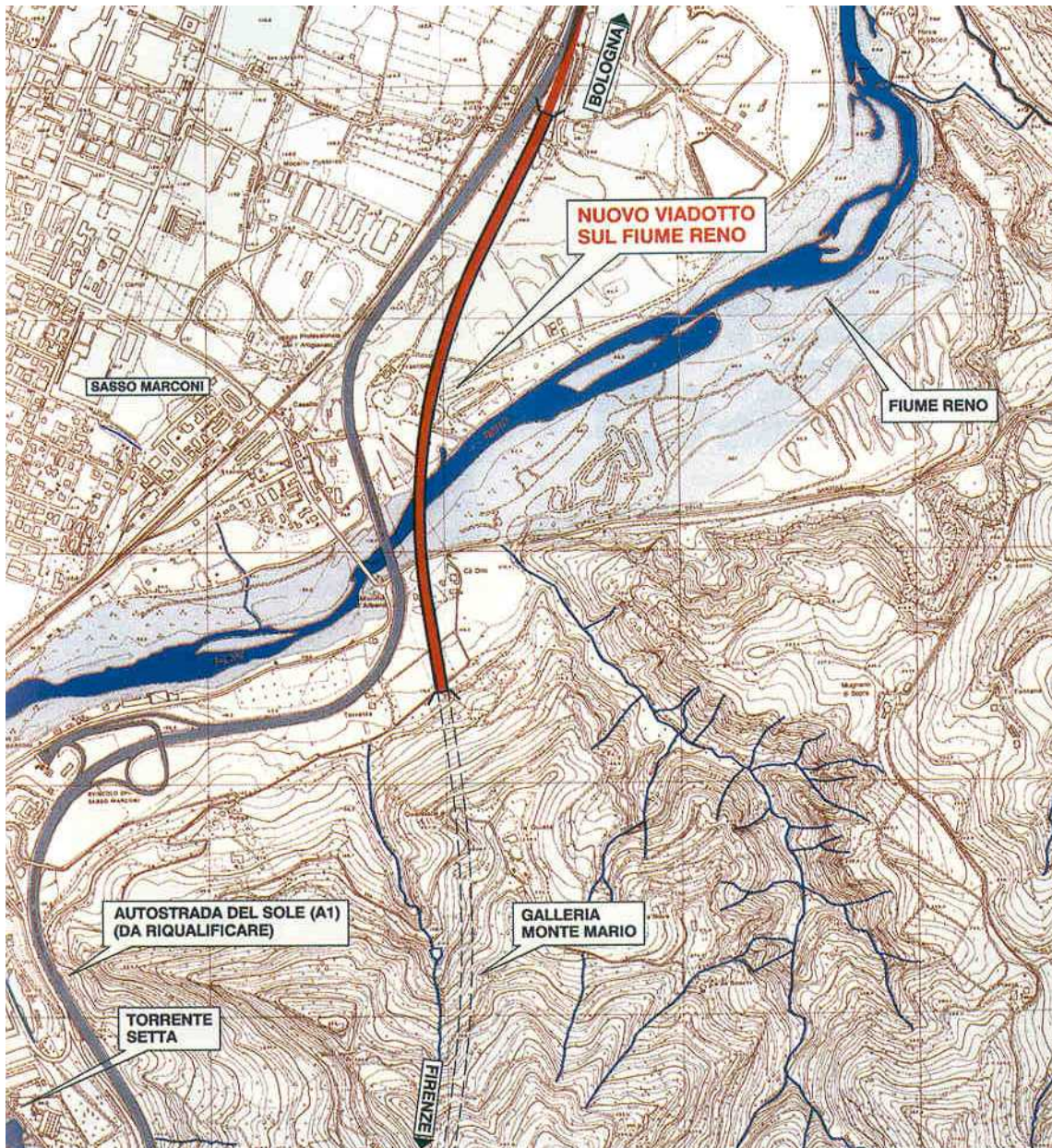


Figura 1 – Corografia generale degli attraversamenti stradali esistenti e del nuovo attraversamento della variante autostradale di valico Bologna-Firenze. Fiume Reno, località Sasso Marconi (Bo).

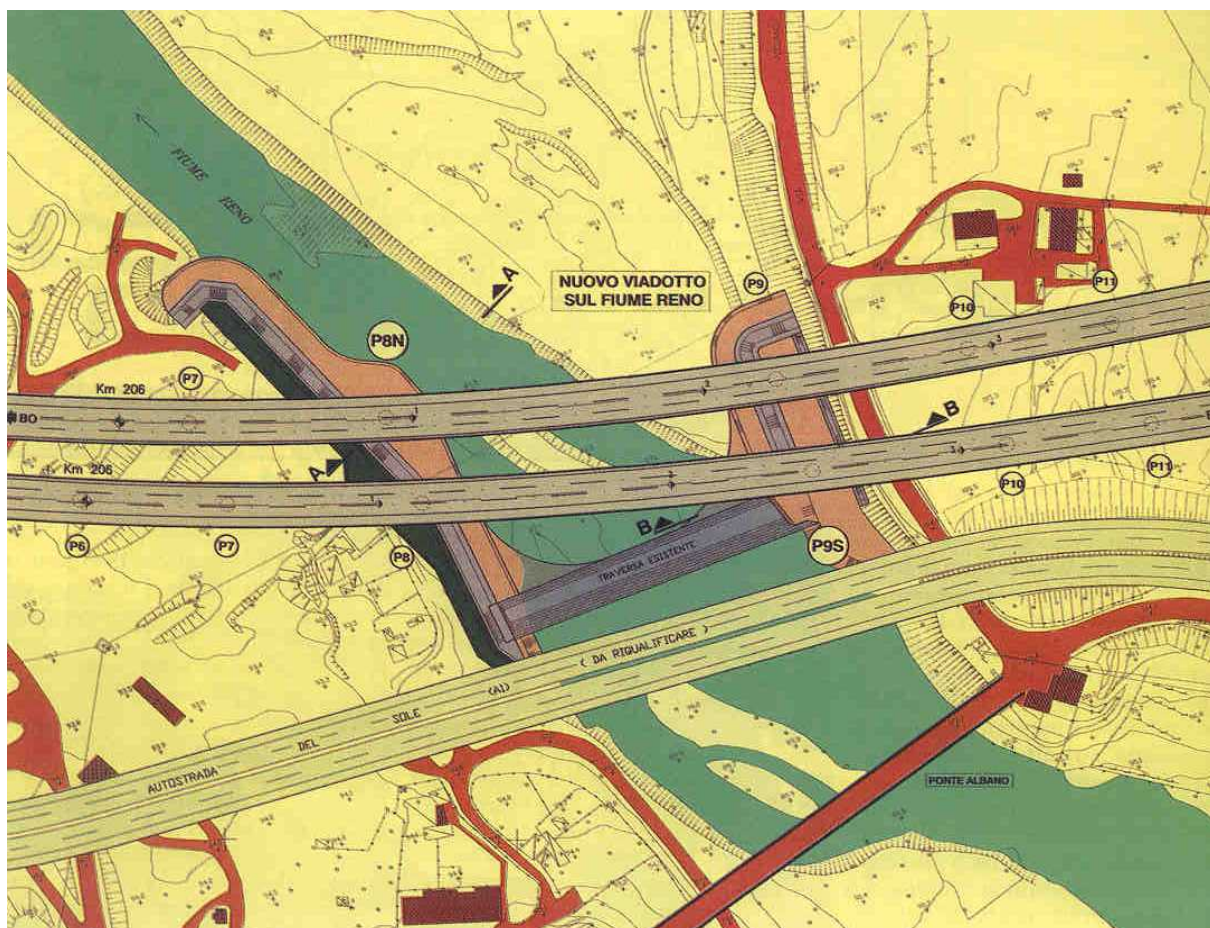


Figura 2 – Planimetria generale degli attraversamenti e delle sistemazioni d'alveo previste.



Figura 3 – Vista del sito da monte. In primo piano si nota il Ponte Albano, in secondo l'attraversamento autostradale esistente.



Figura 4 – Vista del sito da valle. Si notano l'attraversamento autostradale esistente e, in primo piano, la traversa che ne protegge le fondazioni.

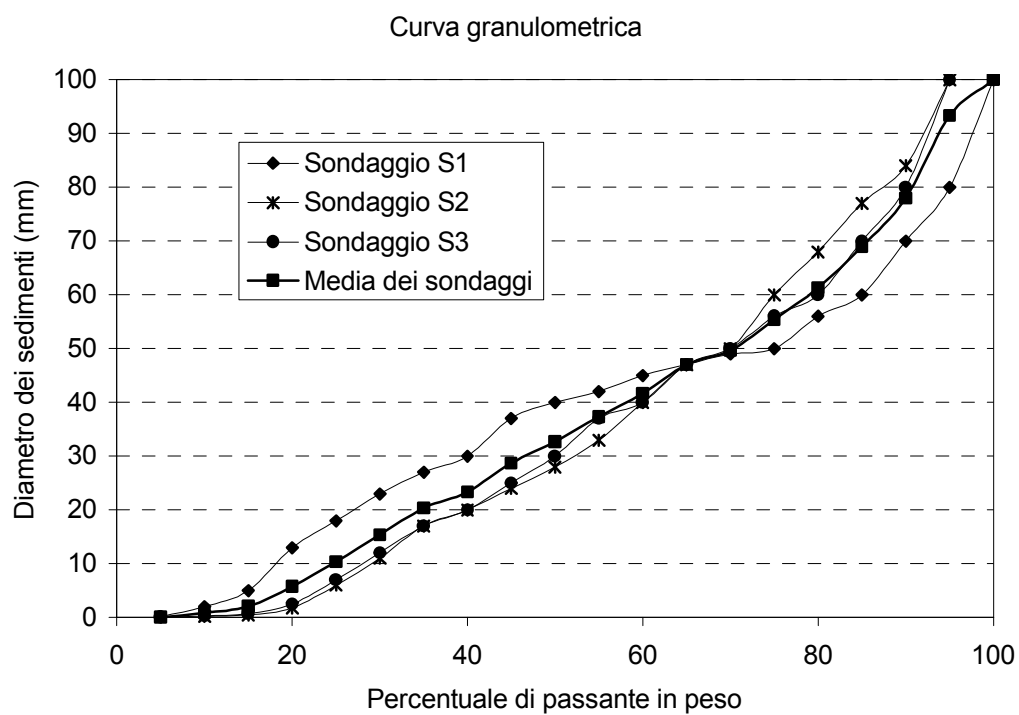


Figura 5 – Curve granulometriche del materiale d'alveo risultanti dai 3 sondaggi effettuati e curva granulometrica media.

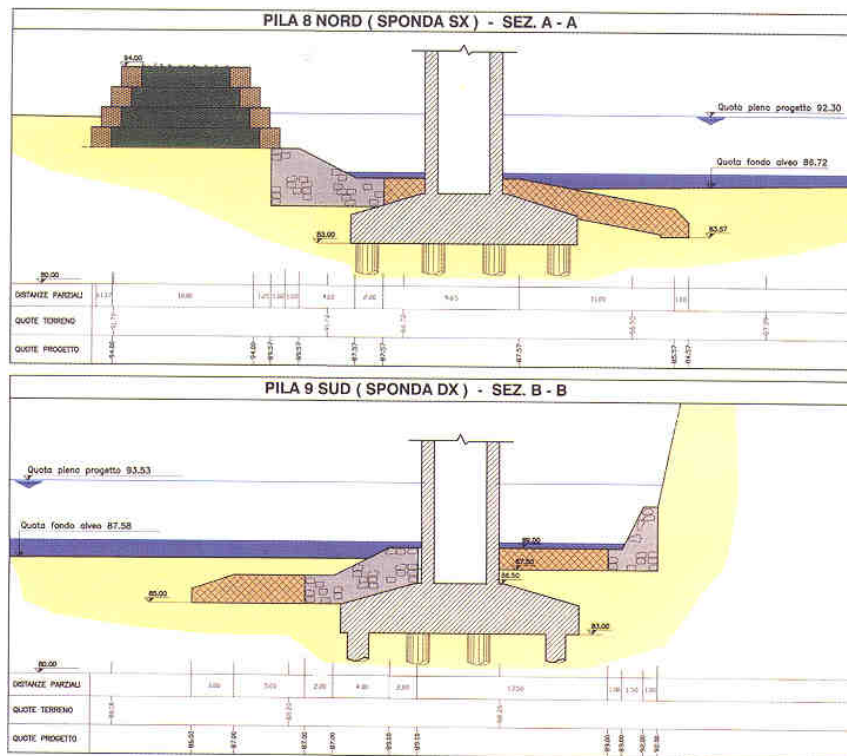


Figura 7 – Sezioni tipologiche delle sistemazioni.



Figura 8 – Particolare del modello durante la costruzione (Laboratorio di Ingegneria Idraulica, Università degli Studi di Bologna, 1999). Vista da valle. In primo piano si notano le sagome di legno delle sezioni fluviali, utilizzate per tracciare il profilo dell'alveo. Sulla destra si notano le pile del nuovo viadotto ed in secondo piano quelle dei ponti esistenti.



Figura 9 – Particolare del modello durante la modellazione del profilo dell'alveo fluviale (Laboratorio di Ingegneria Idraulica, Università degli Studi di Bologna, 1999). Le sagome in legno sono parzialmente coperte dal materiale alluvionale di fondo (dette sagome sono state tolte prima di eseguire le prove). Vista da valle. In primo piano si notano le pile del nuovo viadotto e le opere di protezione spondale. In secondo piano sono visibili le pile dei ponti esistenti e la traversa a loro protezione.



Figura 10 – Particolare del modello finito prima dell'esecuzione delle prove (Laboratorio di Ingegneria Idraulica, Università degli Studi di Bologna, 1999).

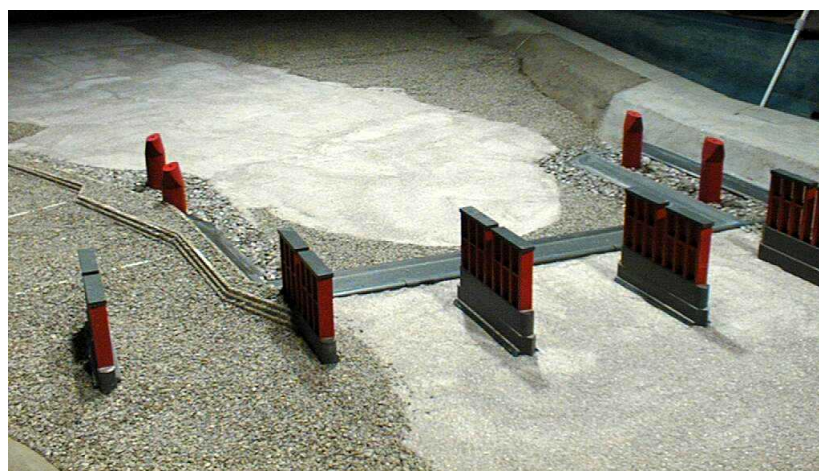


Figura 11 – Particolare del modello finito prima dell'esecuzione delle prove (Laboratorio di Ingegneria Idraulica, Università degli Studi di Bologna, 1999). Vista da monte. In primo piano si notano le pile del viadotto autostradale esistente, sul retro la traversa fluviale e ancora dietro le pile del nuovo viadotto.

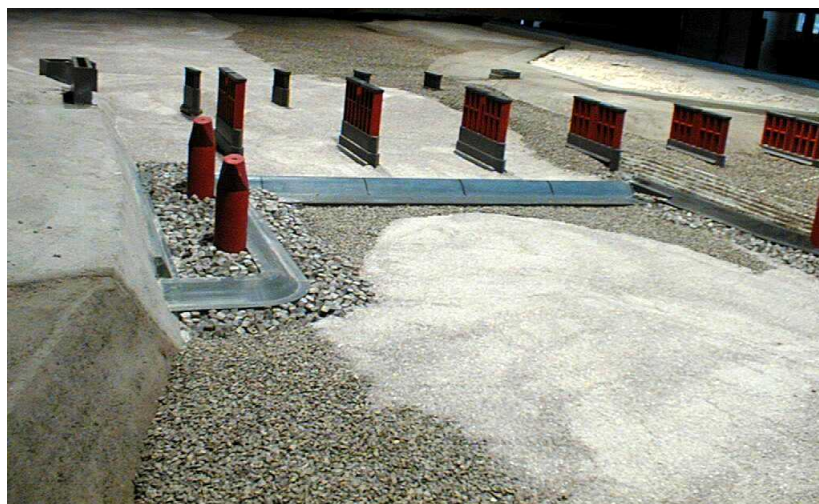


Figura 12 – Particolare del modello finito prima dell'esecuzione delle prove (Laboratorio di Ingegneria Idraulica, Università degli Studi di Bologna, 1999). Vista da valle. In primo piano si notano le pile in sponda destra del nuovo attraversamento e le relative protezioni di sponda. In secondo piano le pile del ponte autostradale esistente e nel retro quelle del Ponte Albano.



Figura 13 – Vista di insieme da valle dell'alveo nel modello in scala ridotta durante una prova con portata pari a $3000 \text{ m}^3/\text{s}$ nel prototipo. In primo piano si notano le pile in sponda destra del nuovo attraversamento.



Figura 14 – Vista laterale dell'alveo nel modello in scala ridotta durante una prova con portata pari a $3000 \text{ m}^3/\text{s}$ nel prototipo.



Figura 15 – Vista della pila destra lato sud durante una prova con portata pari a $3000 \text{ m}^3/\text{s}$ nel prototipo.



Figura 16 – Particolare della pila destra lato sud durante una prova con portata pari a $3000 \text{ m}^3/\text{s}$ nel prototipo.

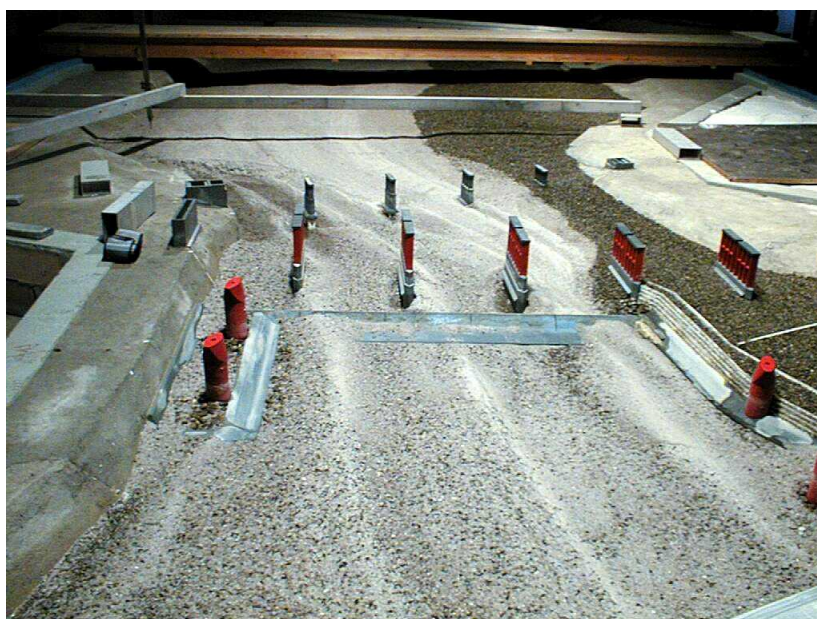


Figura 17 – Vista di insieme dell'alveo da valle al termine di una delle prove con portata pari a $3000 \text{ m}^3/\text{s}$ nel prototipo.



Figura 18 – Particolare delle protezioni delle pile in sponda destra del nuovo attraversamento al termine di una delle prove con portata pari a $3000 \text{ m}^3/\text{s}$ nel prototipo.