



COMUNE DI LODI

STUDIO IDROLOGICO-IDRAULICO DEL TRATTO DI F. ADDA INSERITO NEL TERRITORIO COMUNALE

MARZO 2005 – AGGIORNAMENTO GENNAIO 2010

| | NOME | FIRMA | DATA |
|--------------|-------------|-------|------|
| REDAZIONE | O.W. Cella | | |
| VERIFICA | S. Rossetti | | |
| APPROVAZIONE | S. Rossetti | | |

Il professionista incaricato
Dott. Ing. SILVIO ROSSETTI
Calcoli idraulici
Dott. Ing. OMAR WILLIAM CELLA
Dott. Ing. VERONICA LODIGIANI

STUDIO PAOLETTI
INGEGNERI ASSOCIATI
20133 MILANO – via Bassini, 23 – tel.(02) 26681264
fax (02) 26681553 – E-Mail: Studiopaoletti@etatec.it

TITOLO

RELAZIONE IDROLOGICO-IDRAULICA

| Revisioni | N° | Descrizione | Data |
|-----------|----|---|--------------|
| | 1 | AGGIORNAMENTO PER OPERE REALIZZATE E PER ADEGUAMENTO DELL'ALLEGATO 4 DELLA D.G.R. DELLA LOMBARDIA 22 DICEMBRE 2005, n° 8/1566 | GENNAIO 2010 |
| | 2 | | |
| | 3 | | |

| | | | | |
|------------------|-----------------|--------------------|-----------------|-------------------|
| Numero elaborato | TIPOLOGIA SI | COMMESSA 278-17 | DOCUMENTO RI | NUMERO A.02.00 |
|------------------|-----------------|--------------------|-----------------|-------------------|

I N D I C E

| | | |
|-------|---|----|
| 1. | PREMESSA..... | 1 |
| 2. | L'EVENTO DEL NOVEMBRE 2002 | 6 |
| 2.1 | PRIME STIME DELLA MASSIMA PORTATA..... | 7 |
| 3. | ANALISI IDROLOGICO – IDRAULICA | 11 |
| 3.1 | STUDIO IDROLOGICO – IDRAULICO DEL LUGLIO 2001: ANALISI E RISULTATI..... | 11 |
| 3.1.1 | Confronto dei risultati dei modelli con gli allagamenti del novembre 2002 | 12 |
| 3.2 | STUDIO IDROLOGICO – IDRAULICO DEL MARZO 2005 – ANALISI E RISULTATI..... | 14 |
| 3.2.1 | Dati di taratura piena 2002..... | 15 |
| 3.2.2 | Portate di riferimento per il calcolo idraulico..... | 16 |
| 3.2.3 | Piano territoriale di coordinamento Parco Adda Sud – Piano di settore “fiume e fasce fluviali” – Novembre 1995, Studio Paoletti Ingegneri Associati | 17 |
| 3.2.4 | Direttiva sulla Piena di Progetto da assumere per le progettazioni e le verifiche di compatibilità idraulica. Autorità di Bacino del Fiume Po. | 29 |
| 3.2.5 | Sotto Progetto SP1 – Autorità di Bacino del Fiume Po..... | 29 |
| 3.2.6 | “Studio di fattibilità della sistemazione idraulica del fiume Adda nel tratto da Olginate alla confluenza in Po, del fiume Brembo nel tratto da Lenna alla confluenza in Adda e del fiume Serio nel tratto da Parre alla confluenza in Adda”, redatto per conto dell’Autorità di Bacino del fiume Po..... | 31 |
| 3.3 | CONCLUSIONI | 36 |
| 4. | MODELLO BIDIMENSIONALE..... | 41 |
| 4.1 | GENERALITÀ..... | 41 |
| 4.2 | Caratterizzazione geometrica della valle interessata dal deflusso di piena..... | 42 |
| 4.3 | Il modello bidimensionale agli elementi finiti..... | 45 |
| 4.4 | Approssimazioni del calcolo..... | 46 |
| 4.5 | Taratura nuovo modello bidimensionale | 48 |
| 4.6 | Conclusioni | 52 |
| 4.7 | SIMULAZIONE PER TEMPO DI RITORNO PARI A 200 ANNI | 53 |
| 5. | IL MODELLO QUASI BIDIMENSIONALE..... | 56 |
| 5.1 | CONSTRUZIONE DEL MODELLO..... | 56 |
| 5.2 | TARATURA DEL MODELLO | 60 |
| 6. | ANALISI DI ALCUNI INTERVENTI TRAMITE MODELLO DI MOTO VARIO MONODIMENSIONALE | 63 |
| 7. | PIANO DI PROTEZIONE CIVILE | 65 |

| | |
|--|----|
| APPENDICE A – IL MODELLO IDRODINAMICO MONODIMENSIONALE..... | 66 |
| APPENDICE B – IL MODELLO BIDIMENSIONALE | 71 |
| INTRODUZIONE | 71 |
| ASPETTI GENERALI DI IDRODINAMICA..... | 72 |
| IL METODO DI RISOLUZIONE DI GALERKIN | 74 |
| APPENDICE C – LA MODELLAZIONE TRIDIMENSIONALE | 78 |
| APPENDICE D – PIENA ADDA A LODI – NOVEMBRE 2002 - SELEZIONE FOTOGRAFICA | 87 |

RELAZIONE IDROLOGICO - IDRAULICA

1. PREMESSA

Nell'ottica di ottemperare a quanto disposto dalla Legge n° 41/97, l'Amministrazione comunale di Lodi incaricò lo Studio Paoletti Ingegneri Associati, per la realizzazione di uno studio idrologico-idraulico in termini di aree di esondazione e di livelli idrici connessi con gli eventi di piena di riferimento.

Il suddetto studio idrologico-idraulico, conclusosi nel luglio 2001, ha avuto lo scopo di definire con maggiore precisione tutti i complessi fenomeni connessi con gli eventi di piena e di esondazione, basandosi sull'applicazione di un modello idraulico bidimensionale di simulazione dei fenomeni di propagazione delle piene.

Sulla base di un'attenta indagine idrologica, volta all'interpretazione della serie storica delle portate di piena alla confluenza tra i fiumi Adda e Brembo ed a Lodi, si giunse a determinare, con riferimento ad eventi di piena del F. Adda associati a differenti tempi di ritorno (segnatamente 50, 200 e 500 anni), le aree del territorio comunale di Lodi soggette ad esondazione.

In seguito all'evento di piena del Novembre 2002, lo scenario dipinto dai gravi allagamenti che hanno interessato il territorio comunale di Lodi ha trovato ampia corrispondenza con lo studio idrologico-idraulico condotto per il Comune di Lodi nel 2001, eccezion fatta per alcuni particolari contesti urbani. Tali inesattezze sono state in parte attribuibili ad errori topografici ed in parte alla realizzazione, intervenuta dopo la redazione dello studio, della rampa di accesso alla nuova tangenziale.

Al fine di adeguare la perimetrazione delle aree a rischio di esondazione il Comune di Lodi, anche in seguito alla ridefinizione delle portate di riferimento da parte dell'Autorità di Bacino per il fiume Po, nel Marzo 2005 ha dato incarico all'ing. Silvio Rossetti di predisporre un aggiornamento delle stesse mediante modello idraulico mono e bidimensionale. L'attenta analisi dei dati raccolti durante l'evento di piena del Novembre 2002 ha infatti permesso un

affinamento dei suddetti modelli, l'aggiornamento delle aree di allagamento associate ai diversi livelli di rischio idraulico ed un'ulteriore verifica dell'efficacia degli interventi di mitigazione. Con l'aggiornamento dello studio del marzo 2005, venne definitivamente redatto il quadro complessivo degli interventi necessari per la difesa idraulica dell'abitato di Lodi.

Tale quadro generale venne discusso con tutti gli Enti interessati ed, in particolare, con l'Autorità di Bacino del Po, l'Agenzia per il Po (AIPO) e la Regione Lombardia, che lo condivisero completamente, ritenendolo compatibile con la pianificazione a scala di bacino.

Il suddetto quadro generale degli interventi prevede, oltre ad interventi diffusi di difesa spondale in destra ed in sinistra idrografica, a monte e a valle del Ponte Vecchio, l'abbassamento della briglia esistente a valle del Ponte Vecchio di circa 1÷1,5 m e la ristrutturazione del corazzamento dell'esistente isolotto.

Allo stato attuale, tra le opere definite nello studio del Marzo 2005, sono state realizzate e collaudate le chiaviche sulle Rogge Gaetana e Gelata e le paratoie sulla Roggia Valentina, sono stati ultimati i lavori ed è in corso la fase di collaudo sia degli interventi di arginatura in sponda sinistra idraulica a monte del Ponte Storico (area ex SICC), sia di quelli di arginatura in sponda destra idraulica a valle del Ponte Storico, mentre sono in corso di avanzata realizzazione le opere di abbassamento della quota di coronamento dell'esistente briglia fluviale posta a valle dello stesso Ponte Storico.

Inoltre, il Comune di Lodi ha recentemente avviato le procedure per la realizzazione di una paratoia sulla roggia Sandona, nei pressi del sottopasso di viale Dalmazia, e la costruzione delle opere di sistemazione di un muretto a nord di viale Milano; entrambi gli interventi, data la loro modesta entità, saranno realizzati in tempi brevi.

A seguito della realizzazione di tali opere, è stato considerevolmente ridotto il grado di rischio idraulico a carico di porzioni consistenti del territorio comunale.

Tali variazioni, nell'ambito della predisposizione del PGT (Piano di Governo del Territorio), hanno indotto l'Amministrazione comunale di Lodi alla necessità di aggiornare ulteriormente lo Studio Idrologico – Idraulico del tratto

di F. Adda compreso nel territorio comunale, allo scopo di valutare la compatibilità idraulica delle previsioni degli strumenti urbanistici e territoriali ed adeguarlo a quanto indicato nell'Allegato 4 alla D.G.R. della Lombardia del 28 maggio 2008 n. 8/7374.

In particolare, l'Amministrazione comunale ha conferito incarico al sottoscritto ing. Silvio Rossetti, afferente all'Associazione Professionale STUDIO PAOLETTI Ingegneri Associati di redigere l'aggiornamento dello studio citato. Tale aggiornamento, cui si riferisce la presente relazione, prevede l'adeguamento della classificazione delle aree esondabili in funzione del rischio idraulico ad esse associato a seguito della realizzazione sul territorio comunale di alcune tra le opere di difesa contemplate nel Piano degli interventi necessari per la difesa idraulica dell'abitato di Lodi, nonché l'aggiornamento della tabella propedeutica alla redazione del piano di protezione civile, che definisce, in funzione della portata idrica in transito (o di presunto transito), le aree allagate e quelle di più imminente allagamento.

Nella presente relazione vengono esposti i risultati ottenuti dall'analisi idrologica e dalla modellazione idraulica, necessari per la caratterizzazione delle dinamiche fluviali e dei processi di interscambio fiume- tessuto urbano che si manifestano durante eventi di piena intensi.

Le analisi sono state effettuate basandosi sulle considerazioni ed i risultati riportati nei seguenti studi:

- “Studio di fattibilità della sistemazione idraulica del fiume Adda nel tratto da Olginate alla confluenza in Po, del fiume Brembo nel tratto da Lenna alla confluenza in Adda e del fiume Serio nel tratto da Parre alla confluenza in Adda” redatto per conto dall'Autorità di Bacino del fiume Po (Giugno 2003)
- Piano territoriale di coordinamento Parco Adda sud – Piano di settore – novembre 1995, Studio Paoletti Ingegneri Associati (i risultati delle elaborazioni riportate sono stati utilizzati anche nello studio idrologico-idraulico del tratto di Fiume Adda inserito nel territorio comunale di Lodi, Luglio 2001);

- Studio idrologico-idraulico in termini di aree di esondazione e di livelli idrici connessi con gli eventi di piena di riferimento del Fiume Adda a Lodi – Studio Paoletti Ingegneri Associati (2001).
- Aggiornamento dello Studio idrologico-idraulico in termini di aree di esondazione e di livelli idrici connessi con gli eventi di piena di riferimento del Fiume Adda a Lodi del 2001– ing. Silvio Rossetti - ETATEC S.r.l. (2005).

Inoltre, per la caratterizzazione delle opere ad oggi realizzate ed il loro inserimento nei modelli di simulazione idraulica implementati, sono stati reperiti i seguenti progetti:

- Progetto esecutivo “Interventi di realizzazione dell’argine destro a valle del Ponte Storico – Tratto tra il ponte e la tangenziale Est”;
- Progetto esecutivo “I Lotto – Opere di difesa idraulica zona ex SICC”;
- Progetto esecutivo “Opere e lavori necessari alla realizzazione di n° 2 chiaviche con idrovore sulle Rogge Gelata e Gaetana”.

Le attività di studio sono state condotte dapprima reperendo tutta la documentazione cartografica allegata agli studi e progetti sopraelencati e riguardanti il territorio comunale di Lodi, poi mediante sopralluoghi di verifica effettuati direttamente sul corso d’acqua, lungo le sponde e le aree soggette ad allagamento, nel tratto di fiume compreso tra il quartiere Martinetta a Nord ed il ponte della tangenziale di Lodi a Sud.

Le risultanze dei sopralluoghi sono state poste a confronto con l’ampia documentazione raccolta e, in particolare, con i dati raccolti sull’evento di piena del Novembre 2002.

Infine, le attività di raccolta dati e di indagine diretta sul territorio comunale hanno permesso di aggiornare sia il modello di simulazione idraulica bidimensionale che il modello idraulico quasi-bidimensionale ad esso accoppiato, necessari per la caratterizzazione dei fenomeni di propagazione ed invaso nelle zone interessate e la successiva identificazione delle aree esondabili, dei livelli di rischio idraulico ad esse associati, oltre all’indicazione delle misure atte ad evitare il danneggiamento di beni e strutture ed a garantire la stabilità delle fondazioni.

E' utile segnalare che, in accordo con l'Amministrazione comunale, nei calcoli idraulici atti alla definizione delle condizioni di rischio ed alla definizione degli scenari di realizzazione delle opere di difesa e della tabella propedeutica alla redazione del piano di protezione civile si è ritenuto di considerare eseguite anche quelle opere di difesa (la paratoia sulla roggia Sandona e la sistemazione del "muretto" a nord di viale Milano) la cui realizzazione, come detto, è già stata avviata.

Ciò per due principali ragioni:

1. l'entità contenuta degli interventi per estensione, tempi di realizzazione e costo delle opere ne garantisce l'ultimazione in tempi brevi;
2. la dotazione di piani di emergenza, sia da parte del servizio provinciale di Protezione Civile che da parte dell'Amministrazione comunale stessa, che prevedono – in caso di piena – il posizionamento di sacchi di sabbia in corrispondenza della prevista paratoia sulla roggia Sandona e lungo viale Milano nella zona di piazza Mons. Savarè, quartiere Martinetta.

2. L'EVENTO DEL NOVEMBRE 2002

Durante l'evento di piena del Fiume Adda del novembre 2002 gravi inondazioni hanno interessato il territorio comunale di Lodi. Si è infatti verificata la condizione maggiormente critica per il tratto lodigiano dell'Adda ovvero con la piena del Brembo contemporanea con i massimi deflussi dal Lago di Como.

In seguito ad un intenso flusso di correnti meridionali umide associato ad un vasta area depressionaria dal 14 al 16 Novembre 2002 si verificarono intense precipitazioni sul Piemonte e sulla Lombardia occidentale che interessarono pesantemente l'intero il bacino dell'Adda (257.0 mm registrati nei tre giorni al pluviometro di Fuentes e 355.8 mm al pluviometro di Valtorta). Tale evento provocò intensi afflussi al Lago di Como ed un conseguente innalzamento dei livelli dello stesso. Le piogge si protrassero anche nei giorni successivi fino al 24 Novembre allorquando sopraggiunse una seconda perturbazione (Fig. 2-1) con precipitazioni complessivamente meno intense della prima (142.0 mm registrati nei giorni tra il 25 e 26 Novembre al pluviometro di Fuentes e 238.8 mm al pluviometro di Valtorta) ma caratterizzate da un picco violento e concentrato.

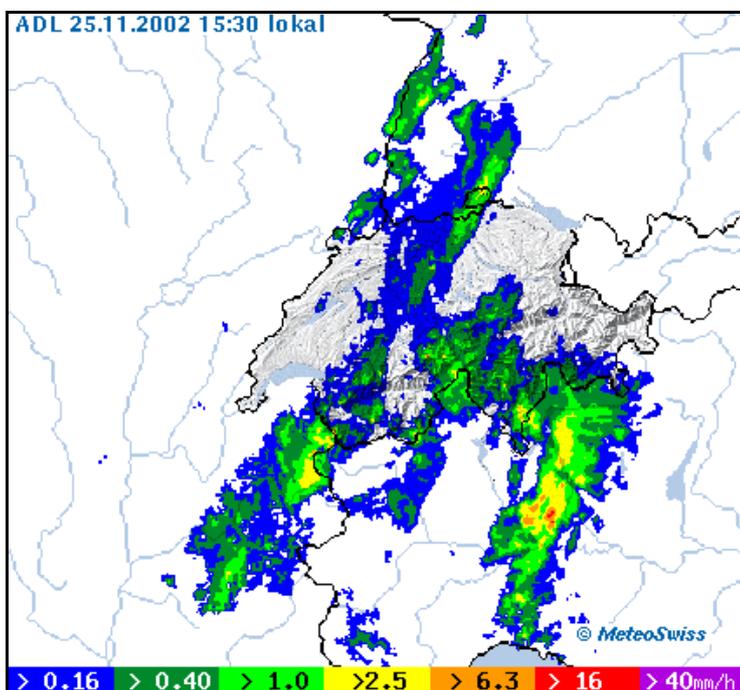


Figura 2-1: 25 Novembre 2002. Radar meteo di Monte Lema (Svizzera)

Tale evento generò un intenso picco di portata del Fiume Brembo che si sovrappose con l'onda di piena in uscita dal Lago di Como, già pieno al sopraggiungere della seconda perturbazione.

L'onda di piena a valle della confluenza con il Brembo ed in particolare a Lodi, ha assunto pertanto le tipiche caratteristiche dovute a tale sovrapposizione schematicamente riportata in figura 2-2.

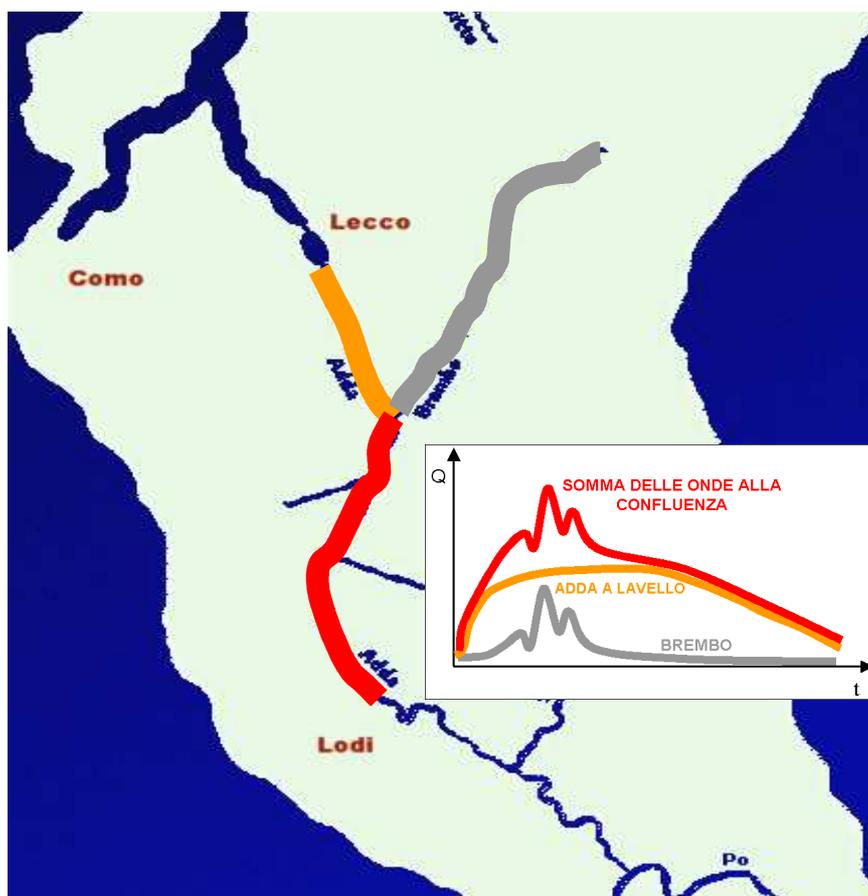


Figura 2-2: Onda di piena dell'Adda alla confluenza con il Brembo

In Figura 3 sono riportati gli andamenti dei livelli misurati durante l'evento del Novembre 2002 dell'Adda a Lodi (Ponte vecchio) e del Brembo a Ponte Briolo. Si nota un sfalsamento temporale fra gli andamenti delle due serie di circa 9-10 ore.

2.1 PRIME STIME DELLA MASSIMA PORTATA

Nei giorni successivi alla piena, al fine di valutare delle portate transitanti a Lodi durante l'evento, non essendo tale stazione di misura dotata di scala delle

portate, fu eseguita dagli scriventi una stima approssimata a partire dalle misure di Lavello sull'Adda e di Ponte Briolo sul Brembo.

Essendo i deflussi dal Lago di Como regolati dalla diga di Olginate, la stima della portata in uscita dal Lago è caratterizzata da un buon livello di accuratezza; tale portata si è mantenuta pressappoco costante durante l'evento di piena del Novembre 2002, attestandosi su valori pari a 850 – 900 m³/s.

Per quanto riguarda il Brembo non esiste una stima altrettanto affidabile delle portate transitate a Ponte Briolo; la scala delle portate per tale sezione, riportata in figura 4, deriva da misure sperimentali effettuate nel campo delle basse portate (la massima portata effettivamente misurata nella sezione risulta pari 339 m³/s, corrispondente ad un'altezza idrometrica di 3.79 m), pertanto il legame portata-livelli per le piene più rilevanti deve necessariamente essere estrapolato, con conseguenti incertezze di stima (grafico in figura 4); inoltre, durante il moto vario che caratterizza la propagazione delle piene, lo stesso legame portata-livelli (cosiddetto cappio di piena) non è più rappresentabile con una espressione univoca.

Da quanto detto, la massima portata transitata durante l'evento dal Fiume Brembo a Ponte Briolo (corrispondente ad un livello pari a 643 cm sullo zero idrometrico) può essere stimata, solo approssimativamente, pari a 1150-1200 m³/s.

Nella composizione dell'onda in uscita dal Lago di Como con la piena del Brembo, e nella propagazione della piena dalla confluenza a Lodi, giocano un ruolo fondamentale:

- a) **i fenomeni di laminazione dell'onda di piena lungo l'asta principale dell'Adda;** degli effetti di laminazione, la cui stima necessita di modelli numerici della propagazione del deflusso in alveo, si parlerà diffusamente nei successivi capitoli: l'onda di piena, nel suo propagarsi verso valle, per il temporaneo invaso e svaso delle aree di pertinenza fluviale (laminazione in alveo), subisce un'attenuazione del picco di portata; in particolare nel tratto del F. Adda fra la confluenza con il Brembo e Lodi, data la morfologia di alveo, l'abbattimento del colmo di piena dovuto alla laminazione in alveo non è trascurabile;

- b) **gli afflussi dalla porzione di bacino residuo affluente**; fra le stazioni di misura dell'Adda a Lavello (Bacino Idrografico Sotteso pari a 4697 km²) e sul Brembo a Ponte Briolo (Bacino Idrografico Sotteso pari a 765 km²) e Lodi (Bacino Idrografico Sotteso pari a 5989 km²) l'Adda riceve le acque di scolo del reticolo minore; l'apporto di tale area drenata (complessivamente pari circa a 652 km²) è certamente sensibile; durante l'evento del Novembre 2002 i tecnici del consorzio di Bonifica della Lodigiana stimarono un apporto da tale reticolo quantificabile in 200-300 m³/s.

Per una prima valutazione della portata transitante a Lodi durante la piena del Novembre 2002 si ipotizzò che i due effetti sopraccitati, l'attenuazione del picco durante la propagazione della piena e gli apporti del reticolo minore, si fossero compensati e che le due onde di piena (Brembo a Ponte Briolo e dell'Adda a Lavello) fossero sommate "in fase", ovvero supponendo i picchi concomitanti, (ipotesi quest'ultima, accettabile data la particolare forma "piatta" dell'idrogramma proveniente da Lavello con una portata di picco persistente nel tempo).

Dalla sovrapposizione dei due idrogrammi (ovvero l'andamento delle portate nel tempo) si ricavò una portata di picco per l'Adda a Lodi durante l'evento del Novembre 2002 pari a 2000 – 2100 m³/s.

Tale stima di massima è stata utilizzata come dato primo tentativo nella taratura dei modelli più oltre descritti.

Relativamente alla valutazione delle portate massime transittanti durante eventi di piena di tale entità è doveroso ribadire che ci si deve comunque attendere un'inevitabile approssimazione del 5-10%.

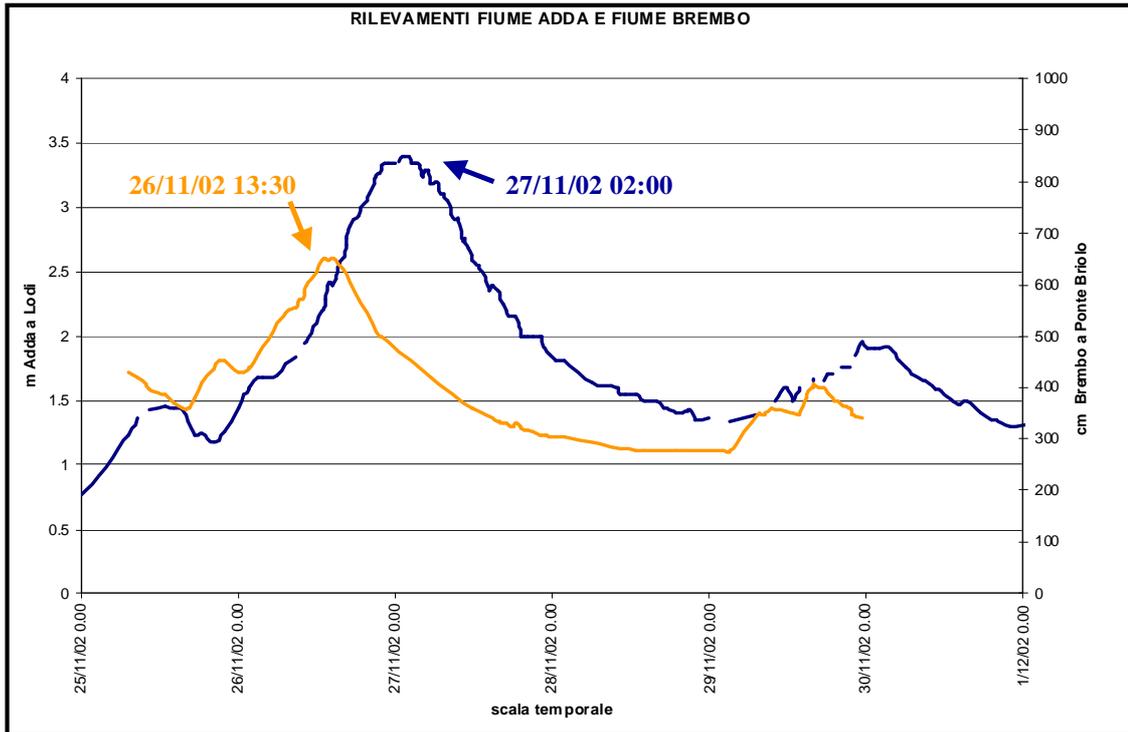


Figura 2-3: Onda di piena dell'Adda alla confluenza con il Brembo

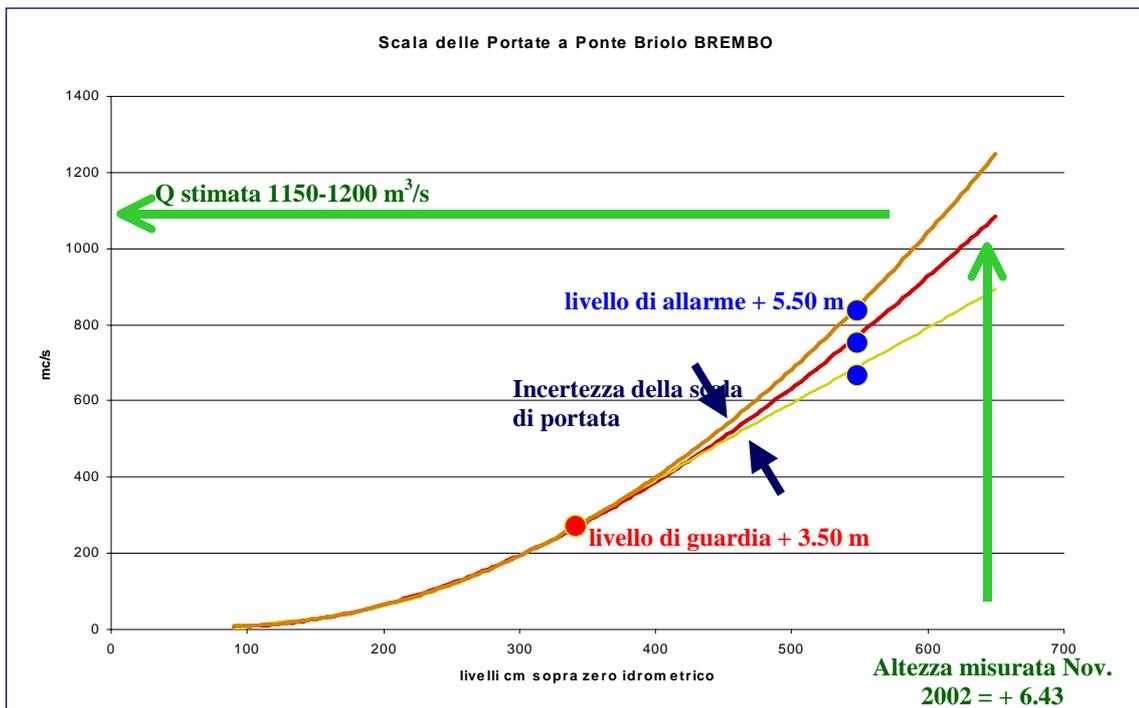


Figura 2-4: Brembo a Ponte Briolo. Scala delle Portate.

3. ANALISI IDROLOGICO – IDRAULICA

Nell'ambito dell'aggiornamento della perimetrazione delle aree a rischio di esondazione nel Comune di Lodi, allo scopo di valutare la compatibilità idraulica delle previsioni degli strumenti urbanistici e territoriali (P.G.T.), nella presente relazione, si è fatto riferimento, per assumere le portate di progetto per la modellazione del tratto in analisi, ai risultati delle recenti elaborazioni idrologiche riportate negli studi precedenti (Luglio 2001 - Marzo 2005). Di seguito, vengono riproposte le analisi effettuate in tali studi, in seguito utilizzate per la redazione del presente studio di aggiornamento.

3.1 STUDIO IDROLOGICO – IDRAULICO DEL LUGLIO 2001: ANALISI E RISULTATI

Nell'ottica di ottemperare a quanto disposto dalla Legge n° 41/97, l'Amministrazione comunale di Lodi decise di affidare l'incarico per l'esecuzione di uno studio idrologico-idraulico in termini di aree di esondazione e di livelli idrici connessi con gli eventi di piena di riferimento allo Studio Paoletti Ingegneri Associati.

Il suddetto studio idrologico-idraulico si è articolato in due fasi:

la prima fase, conclusasi nell'ottobre 1999, è stata approntata con lo scopo di definire, in prima approssimazione, utilizzando un modello idraulico monodimensionale di simulazione dei fenomeni di piena, le aree ad elevato rischio idraulico ai sensi della Legge n° 267/98, cioè quelle aree comprese tra i limiti di progetto di cui al "Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico (PAI)" redatto dall'Autorità di Bacino del fiume Po ed i limiti di esondazione associati ad una piena caratterizzata da tempo di ritorno pari a 50 anni individuati in assenza dei suddetti limiti di progetto di PAI;

la seconda fase, conclusasi nel luglio 2001, ha avuto lo scopo di definire con maggiore precisione tutti i complessi fenomeni connessi con gli eventi di piena e di esondazione, basandosi sull'applicazione di un modello idraulico bidimensionale di simulazione dei fenomeni di propagazione delle piene, con cui si ottengono precisioni maggiori rispetto ad un modello monodimensionale, per contro di più rapida e semplice applicazione.

Nell'ambito del suddetto studio fu inoltre effettuata un'analisi delle tendenze evolutive dell'alveo. Sulla base di un'attenta indagine idrologica, volta alla ricostruzione della serie storica delle portate di piena alla confluenza tra i fiumi Adda e Brembo ed a Lodi, si giunse a determinare, con riferimento ad eventi di piena del F. Adda associati a differenti tempi di ritorno (in particolare $Q_{50} = 1875 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_{200} = 2200 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_{500} = 2500 \text{ m}^3/\text{s}$), le aree del territorio comunale di Lodi soggette ad esondazione.

Furono riscontrate differenze tra i limiti calcolati e quelli di PAI presumibilmente da ricondursi sia al maggior dettaglio della morfologia dei luoghi, integrato da una campagna topografica e batimetrica svoltasi nella primavera 2000; sia alla maggiore precisione dei risultati ottenuti, per via dell'utilizzo di un modello di simulazione bidimensionale.

3.1.1 Confronto dei risultati dei modelli con gli allagamenti del novembre 2002

In seguito all'evento di piena del Novembre 2002, ed in particolare la notte tra il 26 e il 27, gravi allagamenti hanno interessato il territorio comunale di Lodi; in seguito a tale evento lo scenario degli allagamenti verificatisi ha trovato ampia corrispondenza con lo studio idrologico-idraulico condotto per il Comune di Lodi.

La prima stima di portata al colmo pari a $2000 - 2100 \text{ m}^3/\text{s}$, argomentata nel precedente capitolo, sembrò ricevere un'ulteriore conferma. Le aree allagate verificatesi trovarono infatti una buona corrispondenza con uno scenario di piena intermedio tra quelli individuati per 50 anni di Tempo di Ritorno (Portata transitante $1850 \text{ m}^3/\text{s}$) e per 200 anni di Tempo di Ritorno (Portata transitante $2200 \text{ m}^3/\text{s}$). Dall'analisi delle cartografie risultò quindi che gli allagamenti, verificatesi nella notte tra il 26 e 27 di novembre 2002, fossero fedelmente riprodotti ad eccezione di differenze (in Figura 3-1 è riportato lo scenario di allagamento stimato per la portata $2200 \text{ m}^3/\text{s}$, 200 anni di tempo di ritorno):

1) Il quartiere della Martinetta. Dall'esame dei rilievi aereofotogrammetrici disponibili era emerso che tale zona fosse alla medesima quota dei campi circostanti, dato in contrasto la nota differente frequenza di allagamento delle due aree; sulla base di alcune grossolane misure topografiche si era provveduto

alla correzione delle quote in tale zona “sollevandola” di circa 1.50 m; tale sopralzo, è risultato eccessivo di circa 40 cm, per contro di 1.10 m di sovrastima dei battenti che si sarebbe verificata se la correzione non fosse stata apportata.

2) La zona dei laghi. Per tale zona si erano previsti degli allagamenti, che non si sono verificati, questo perché lo studio è stato predisposto prima della realizzazione della rampa di accesso alla tangenziale, che ha funzionato da argine, di fatto impedendo alle acque dell’Adda in piena di investire direttamente tali zone; gli allagamenti che si sono verificati sono infatti da attribuire al rigurgito dei fornici di attraversamento della stessa tangenziale.

3) Campo di Marte. Per la zona di Campo di Marte si è verificata una sottostima delle aree allagate. Tale zona è in parte difesa dalle acque dell’Adda dal rilevato stradale della SS per Boffalora, che è stato di fatto travalicato in alcuni punti come si era previsto nei calcoli in corrispondenza di una portata di 2.200 metri cubi al secondo. La sommità del rilevato stradale introdotto nel modello è però risultata più elevata in alcuni punti di quella realmente esistente, circostanza che ha condotto alla sottostima delle portate “sfiorate”. Tale rilevato stradale inoltre è varcato in più punti dai fornici di attraversamento di alcune rogge irrigue a servizio dei campi situati alle spalle della provinciale. Durante la piena, la mancata chiusura delle paratoie a servizio di tali fornici ha causato il riempimento del reticolo minore della zona di Campo di Marte già nella fase ascendente della piena; il sopraggiungere dei copiosi volumi idrici tracimati dalla sommità stradale, durante la fase critica della piena nella notte fra il 26 e 27 Novembre, ha pertanto messo in crisi tale reticolo minore, con conseguenti allagamenti.

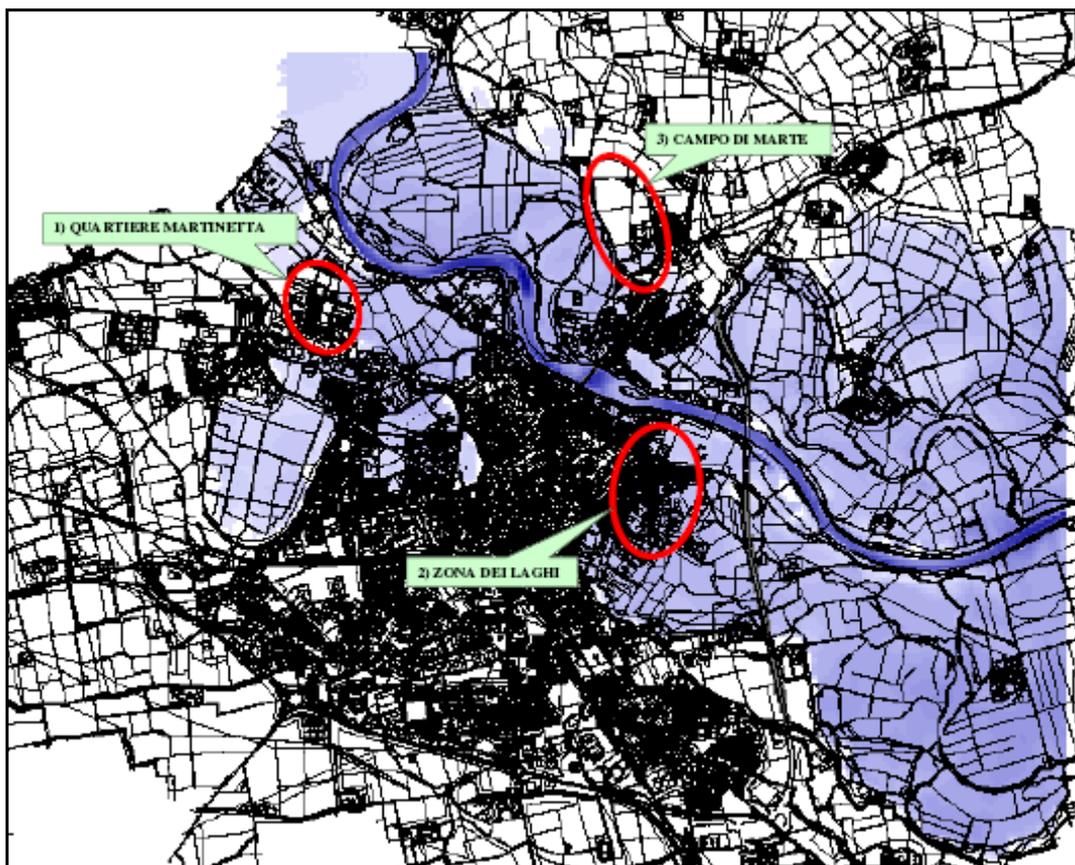


Figura 3-1: studio idrologico-idraulico del Luglio 2001- Allagamenti per $Q=2.200 \text{ m}^3/\text{s}$

3.2 STUDIO IDROLOGICO – IDRAULICO DEL MARZO 2005 – ANALISI E RISULTATI

Come anticipato in premessa, lo scenario dipinto dai gravi allagamenti che hanno interessato il territorio comunale di Lodi durante l'evento del Novembre 2002, ha trovato ampia corrispondenza con lo studio idrologico-idraulico condotto per il Comune di Lodi nel 2001, eccezion fatta per alcuni particolari contesti urbani. Per cui, al fine di aggiornare la perimetrazione delle aree a rischio di esondazione il Comune di Lodi ha dato incarico all'ing. Silvio Rossetti in rappresentanza della Società ETATEC S.r.l. di redigere l'aggiornamento dello studio idrologico – idraulico del tratto di F. Adda compreso nel territorio comunale, conclusosi nel marzo 2005.

L'attenta analisi dei dati raccolti durante l'evento di piena del Novembre 2002, l'aggiornamento di alcuni dettagli topografici non rappresentati nella base aerofotogrammetrica utilizzata originariamente (rampa di accesso alla tangenziale Est non ancora costruita all'epoca della levata aerofotografica di

base, esistenza di fornicci irrigui nel corpo del rilevato stradale della S.P. n° 23 Lodi – Boffalora d’A., introduzione delle corrette quote terreno del Quartiere Martinetta e di V.le Milano, con riferimento ai quali si sono potuti verificare errori significativi nella restituzione cartografica) e la necessità di aggiornamento dovuta alla modifica delle portate idriche di riferimento apportata nel frattempo dall’Autorità di Bacino del Po, permise un affinamento dei modelli idraulici, l’aggiornamento delle aree di allagamento associate ai diversi livelli di rischio idraulico ed una ulteriore verifica dell’efficacia degli interventi di mitigazione previsti.

3.2.1 Dati di taratura piena 2002

L’evento di piena del Novembre è risultato il più gravoso mai registrato nel territorio comunale di Lodi; durante la piena, e nei giorni successivi, si sono effettuati numerosi sopralluoghi e rilievi di campo, sia da parte dei tecnici del comune che dagli scriventi.

Questa attenta fase di monitoraggio, operata su una piena di tale rilevanza, ha permesso la raccolta di un consistente numero di informazioni utilissime; l’interpretazione di tali informazioni e il loro studio, anche mediante l’utilizzo di modelli, hanno condotto alla puntuale ricostruzione dello sviluppo della piena, riportata nei successivi capitoli.

Tali attività di raccolta dati hanno quindi permesso di definire con precisione non solo lo sviluppo delle aree allagate ma anche di rilevare i massimi livelli raggiunti in diversi punti del territorio comunale durante l’evento di piena.

L’evoluzione del fenomeno alluvionale e le dinamiche delle inondazioni sono state ricavate dall’andamento dei livelli all’idrometro di Lodi (Ponte vecchio), riportato nella precedente figura 3-1, supportato da numerose osservazioni effettuate sul campo, proprio durante le fasi critiche della piena, in corrispondenza di diversi punti significativi (Ponte vecchio, Via Emilia, SS per Boffalora).

In appendice è riportata un’ampia documentazione fotografica dell’evento di piena del 2002.

3.2.2 Portate di riferimento per il calcolo idraulico

Nell'ambito dell'aggiornamento della perimetrazione delle aree a rischio di esondazione nel Comune di Lodi del Marzo 2005, per assumere le portate di progetto per la modellazione del tratto in analisi, si è fatto riferimento ai risultati delle recenti elaborazioni idrologiche riportate nello "*Studio di fattibilità della sistemazione idraulica del fiume Adda nel tratto da Olginate alla confluenza in Po, del fiume Brembo nel tratto da Lenna alla confluenza in Adda e del fiume Serio nel tratto da Parre alla confluenza in Adda*" redatto per conto dall'Autorità di Bacino del fiume Po (Giugno 2003).

Non sono state effettuate pertanto ulteriori elaborazioni idrologiche ma è stata condotta una analisi dei risultati ottenuti negli studi pregressi che sono messi a confronto nel presente capitolo. Ciò ha condotto ad uno aggiornamento delle portate associate ai diversi tempi di ritorno individuate nel precedente studio del 2001.

Oltre al sopraccitato studio dell'Autorità di Bacino sono stati presi in esame i risultati riportati:

- Piano territoriale di coordinamento Parco Adda sud – Piano di settore – novembre 1995, Studio Paoletti Ingegneri Associati (i risultati delle elaborazioni riportate sono stati utilizzati anche nello studio idrologico-idraulico del tratto di Fiume Adda inserito nel territorio comunale di Lodi, Luglio 200, del quale il presente studio è l'aggiornamento);
- Direttiva sulla Piana di Progetto da assumere per le progettazioni e le verifiche di compatibilità idraulica. PAI dell'Autorità di Bacino del Fiume Po;
- Sotto Progetto SP1 – Autorità di Bacino del Fiume Po.

Si evidenzia che, non essendo la sezione del Fiume Adda in corrispondenza del comune di Lodi dotata di una serie storica di massimi annui di portate al colmo sufficientemente lunga, non è possibile in tal caso applicare direttamente un metodo di analisi statistica dei massimi per ricavare la relazione che lega le portate ad un corrispondente tempo di ritorno.

Gli studi pregressi analizzati hanno pertanto ricavato le portate a Lodi, legate ai diversi tempi di ritorno, per lo più mediante ricostruzioni basate sui metodi

idrologici, dell'inferenza statistica e di similitudine idrologica (regionalizzazione), che non possono necessariamente tenere in conto, se non in maniera globale e approssimata, gli effetti dovuti agli apporti laterali minori e alla laminazione golenale. Tali effetti devono essere rappresentati attraverso modelli numerici della propagazione del deflusso in alveo.

Tale approccio è stato utilizzato nell'ambito del citato studio AdbPo "Sottoprogetto SP1", i cui risultati indicativi sono stati presi in considerazione per la determinazione delle portate di riferimento e per i calcoli idraulici riportati nella presente relazione.

3.2.3 Piano territoriale di coordinamento *Parco Adda Sud* – Piano di settore "fiume e fasce fluviali" – Novembre 1995, Studio Paoletti Ingegneri Associati

Nell'ambito dello studio "Piano territoriale di coordinamento Parco Adda Sud – piano di settore "fiume e fasce fluviali" – novembre 1995, studio Paoletti Ingegneri Associati" fu condotta una attenta raccolta di dati idrometrici e la ricostruzione della serie storica delle portate a Lodi.

A partire da tali ricostruzioni furono individuate le portate di piena, calcolate per i diversi tempo di ritorno, che sono state utilizzate nell'ambito dello studio idrologico-idraulico del tratto di F. Adda inserito nel territorio comunale di Lodi, del quale il presente studio è da considerarsi l'aggiornamento. Si riporta brevemente nel presente paragrafo la metodologia adottata e i risultati dello studio.

3.2.3.1 Raccolta di dati idrometrici e ricostruzione della serie storica delle portate a Lodi

La genesi delle piene critiche nel tratto del F. Adda nel territorio comunale di Lodi prevede la sovrapposizione della piena del Fiume Brembo con i massimi livelli di deflusso provenienti dal Lago di Como.

Il regime dei deflussi dal Lago di Como è regolato dalla rapida di Lavello dove è in funzione la stazione idrometrografica omonima gestita dal Consorzio dell'Adda e dal Servizio Idrografico Italiano, che provvede alla pubblicazione delle registrazioni sugli Annali Idrologici.

I dati utilizzati nelle elaborazioni, forniti dal Consorzio dell'Adda, furono ricavati i massimi valori giornalieri delle portate per ogni anno, a partire dal 1946 (dopo la realizzazione delle opere di regolazione) e fino al 1994.

Per quanto riguarda il F. Brembo, dai citati Annali Idrologici del S.I.I. e dalle informazioni fornite dal Consorzio di Bonifica della Media Pianura Bergamasca, furono raccolti i dati relativi ai massimi annui di portata giornaliera e di portata al colmo registrati all'idrometrografo di Ponte Briolo (ubicata 19 km a monte della confluenza con l'Adda).

I dati mancanti di portata al colmo a Ponte Briolo furono ricostruiti moltiplicando per una costante C i valori di portata giornaliera registrati nell'anno in cui manca la portata al colmo. La costante C è stata assunta pari al rapporto tra la media dei valori disponibili di portata e la media delle corrispondenti portate giornaliere.

Le serie storiche dei massimi annui di portata giornaliera e di portata al colmo a Ponte Briolo e a Lavello sono riportate nella Tabella 3-1.

Tabella 3-1: serie dei massimi annuali a del Brembo a Ponte Briolo e dell'Adda a Lavello (Q_g = portata giornaliera; Q_{max} = portata al colmo)

| anno | Brembo a Ponte Briolo | | | Adda a Lavello | | |
|------|-----------------------|---------------------------|-------------------------------|----------------|---------------------------|-------------------------------|
| | data | Q_g (m ³ /s) | Q_{max} (m ³ /s) | data | Q_g (m ³ /s) | Q_{max} (m ³ /s) |
| 1946 | 31-ago | 244 | 455.9 | 24-giu | 549 | 549 |
| 1947 | 25-set | 257 | 480.2 | 11-lug | 428 | 428 |
| 1948 | 28-mag | 209 | 390.5 | 21-giu | 567 | 567 |
| 1949 | 28-ott | 186 | 347.5 | 07-mag | 273 | 273 |
| 1950 | 23-nov | 210 | 679 | 27-mag | 467 | 467 |
| 1951 | 08-nov | 525 | 877 | 12-nov | 617 | 617 |
| 1952 | 26-ott | - | 908 | 20-giu | 496 | 496 |
| 1953 | 25-ott | 338 | 551 | 29-ott | 598 | 598 |
| 1954 | 10-dic | 414 | 843 | 12-giu | 490 | 490 |
| 1955 | 22-ott | 166 | 426 | 11-giu | 405 | 405 |
| 1956 | 17-apr | 331 | 424 | 04-set | 530 | 530 |
| 1957 | 06-nov | 286 | 586 | 25-giu | 577 | 577 |
| 1958 | 01-ott | 195 | 411 | 14-ott | 495 | 495 |
| 1959 | 28-ott | 328 | 469 | 30-giu | 326 | 326 |

| anno | Brembo a Ponte Briolo | | | Adda a Lavello | | |
|------|------------------------------|------------------------|--------------------------|-----------------------|------------------------|--------------------------|
| | data | Qg (m ³ /s) | Qmax (m ³ /s) | data | Qg (m ³ /s) | Qmax (m ³ /s) |
| 1960 | 05-set | 317 | 563 | 21-set | 675 | 675 |
| 1961 | 29-mag | 230 | 447 | 28-giu | 503 | 503 |
| 1962 | 02-giu | 277 | 453 | 21-giu | 360 | 360 |
| 1963 | 06-nov | 450 | 733 | 07-nov | 644 | 644 |
| 1964 | 21-apr | 183 | 338 | 04-giu | 364 | 364 |
| 1965 | 03-set | 400 | 673 | 04-set | 723 | 723 |
| 1966 | 05-nov | 613 | 633 | 06-nov | 603 | 603 |
| 1967 | 11-mar | 250 | 345 | 07-ago | 409 | 409 |
| 1968 | 03-nov | 288 | 501 | 17-set | 604 | 604 |
| 1969 | 13-nov | 145 | 320 | 26-giu | 456 | 456 |
| 1970 | 19-nov | 180 | 449 | 18-giu | 313 | 313 |
| 1971 | 02-mag | 259 | 484 | 26-giu | 409 | 409 |
| 1972 | 12-giu | 221 | 412.9 | 14-giu | 449 | 449 |
| 1973 | 15-lug | 355 | 663.3 | 18-giu | 564 | 564 |
| 1974 | - | - | - | 29-giu | 359 | 359 |
| 1975 | 16-set | 237 | 442.8 | 17-giu | 465 | 465 |
| 1976 | - | - | - | 05-ott | 895 | 895 |
| 1977 | 08-ott | 499 | 932.4 | 01-set | 643 | 643 |
| 1978 | - | - | - | 06-lug | 511 | 511 |
| 1979 | 17-ott | 431 | 805.3 | 18-ott | 868 | 868 |
| 1980 | - | - | - | 10-lug | 651 | 651 |
| 1981 | - | - | - | 27-mag | 588 | 588 |
| 1982 | - | - | - | 13-giu | 492 | 492 |
| 1983 | 22-mag | 292 | 545.6 | 24-mag | 736.7 | 736.7 |
| 1984 | 04-mag | 217.7 | 406.8 | 06-ott | 442.3 | 442.3 |
| 1985 | 13-mag | 223 | 416.7 | 08-giu | 502.6 | 502.6 |
| 1986 | 24-apr | 299.4 | 559.4 | 30-mag | 537.2 | 537.2 |
| 1987 | 18-lug | 416.8 | 778.8 | 20-lug | 917.7 | 917.7 |
| 1988 | 18-ott | 513.6 | 959.7 | 15-ott | 525.4 | 525.4 |
| 1989 | 05-apr | 352 | 657.7 | 12-lug | 377.3 | 377.3 |
| 1990 | 22-nov | 155.1 | 289.8 | 08-giu | 508.9 | 508.9 |
| 1991 | 29-set | 287.6 | 537.4 | 01-ott | 527.8 | 527.8 |
| 1992 | 11-lug | 280.8 | 524.7 | 06-lug | 473.1 | 473.1 |
| 1993 | 02-ott | 558.8 | 1044.1 | 15-ott | 847.4 | 847.4 |

| anno | <u>Brembo a Ponte Briolo</u> | | | <u>Adda a Lavello</u> | | |
|------|------------------------------|------------------------|--------------------------|-----------------------|------------------------|--------------------------|
| | data | Qg (m ³ /s) | Qmax (m ³ /s) | data | Qg (m ³ /s) | Qmax (m ³ /s) |
| 1994 | 06-nov | 332.4 | 621.1 | 16-set | 472.4 | 472.4 |

Anche per quanto riguarda il Fiume Serio fu condotta un'attenta raccolta della serie storica dei massimi annuali delle portate al colmo registrate alla stazione idrometrografica di Ponte Cene, integrando i dati pubblicati negli Annali Idrologici con quelli in possesso del Consorzio di Bonifica dell'Isola e della media Pianura Bergamasca.

Per la ricostruzione delle serie storiche dei dati di portata al colmo in corrispondenza della confluenza del Brembo in Adda (in Comune di Vaprio d'Adda) e a Lodi, si ricercarono dei valori massimi registrati a Lavello negli stessi giorni in cui venivano registrati i massimi annui a Ponte Briolo e, viceversa, i massimi registrati a Ponte Briolo nelle stesse date in cui venivano registrati i massimi annui a Lavello.

Le coppie di valori detti contemporanei (alla stessa data) osservati in ciascuna delle due stazioni idrometrografiche sono riportate nella Tabella 3-2.

Tabella 3-2: valori contemporanei (Qg= portata giornaliera; Qmax= portata al colmo)

| anno | data | <u>Brembo a Ponte Briolo</u> | | <u>Adda a Lavello</u> | | <u>somma</u> |
|------|--------|------------------------------|--------------------------|------------------------|--------------------------|-----------------------|
| | | Qg (m ³ /s) | Qmax (m ³ /s) | Qg (m ³ /s) | Qmax (m ³ /s) | Q (m ³ /s) |
| 1946 | 31-ago | 244 | 455.9 | 326 | 326 | 781.9 |
| | 24-giu | 108 | 201.8 | 549 | 549 | 750.8 |
| 1947 | 25-set | 257 | 480.2 | 149 | 149 | 629.2 |
| | 11-lug | 55.7 | 104.1 | 428 | 428 | 532.1 |
| 1948 | 28-mag | 209 | 390.5 | 244 | 244 | 634.5 |
| | 21-giu | 93.7 | 175.1 | 567 | 567 | 742.1 |
| 1949 | 28-ott | 186 | 347.5 | 64 | 64 | 411.5 |
| | 07-mag | 62.2 | 116.2 | 273 | 273 | 389.2 |
| 1950 | 23-nov | 210 | 679 | 73 | 73 | 752 |
| | 27-mag | 43.2 | 80.7 | 467 | 467 | 547.7 |
| 1951 | 08-nov | 525 | 877 | 296 | 296 | 1173 |
| | 12-nov | 330 | 616.6 | 617 | 617 | 1233.6 |

| | | Brembo a Ponte Briolo | | Adda a Lavello | | somma |
|-------------|-------------|------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|----------------------------|
| anno | data | Qg (m³/s) | Qmax (m³/s) | Qg (m³/s) | Qmax (m³/s) | Q (m³/s) |
| 1952 | 26-ott | - | 908 | 420 | 420 | 1328 |
| | 20-giu | | | 496 | 496 | 496 |
| 1953 | 25-ott | 338 | 551 | 355 | 355 | 906 |
| | 29-ott | 130 | 242.9 | 598 | 598 | 840.9 |
| 1954 | 10-dic | 414 | 843 | 80 | 80 | 923 |
| | 12-giu | 74.8 | 139.8 | 490 | 490 | 629.8 |
| 1955 | 22-ott | 166 | 426 | 98 | 98 | 524 |
| | 11-giu | 58.3 | 108.9 | 405 | 405 | 513.9 |
| 1956 | 17-apr | 331 | 424 | 253 | 253 | 677 |
| | 04-set | 59.7 | 111.6 | 530 | 530 | 641.6 |
| 1957 | 06-nov | 286 | 586 | 83 | 83 | 669 |
| | 25-giu | 148 | 276.5 | 577 | 577 | 853.5 |
| 1958 | 01-ott | 195 | 411 | 195 | 195 | 606 |
| | 14-ott | 61.7 | 115.3 | 495 | 495 | 610.3 |
| 1959 | 28-ott | 328 | 469 | 74 | 74 | 543 |
| | 30-giu | 60.1 | 112.3 | 326 | 326 | 438.3 |
| 1960 | 05-set | 317 | 563 | 285 | 285 | 848 |
| | 21-set | 234 | 437.2 | 675 | 675 | 1112.2 |
| 1961 | 29-mag | 230 | 447 | 161 | 161 | 608 |
| | 28-giu | 108 | 201.8 | 503 | 503 | 704.8 |
| 1962 | 02-giu | 277 | 453 | 244 | 244 | 697 |
| | 21-giu | 48.2 | 90.1 | 360 | 360 | 450.1 |
| 1963 | 06-nov | 450 | 733 | 636 | 636 | 1369 |
| | 07-nov | 321 | 599.8 | 644 | 644 | 1243.8 |
| 1964 | 21-apr | 183 | 338 | 167 | 167 | 505 |
| | 04-giu | 57.4 | 107.3 | 364 | 364 | 471.3 |
| 1965 | 03-set | 400 | 673 | 688 | 688 | 1361 |
| | 04-set | 150 | 280.3 | 723 | 723 | 1003.3 |
| 1966 | 05-nov | 613 | 633 | 585 | 585 | 1218 |
| | 06-nov | 140 | 261.6 | 603 | 603 | 864.6 |
| 1967 | 11-mar | 250 | 345 | 113 | 113 | 458 |
| | 07-ago | 29.9 | 55.9 | 409 | 409 | 464.9 |
| 1968 | 03-nov | 288 | 501 | 315 | 315 | 816 |
| | 17-set | 72.6 | 135.7 | 604 | 604 | 739.7 |

| | | Brembo a Ponte Briolo | | Adda a Lavello | | somma |
|-------------|-------------|------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|----------------------------|
| anno | data | Qg (m³/s) | Qmax (m³/s) | Qg (m³/s) | Qmax (m³/s) | Q (m³/s) |
| 1969 | 13-nov | 145 | 320 | 67 | 67 | 387 |
| | 26-giu | 48.4 | 90.4 | 456 | 456 | 546.4 |
| 1970 | 19-nov | 180 | 449 | 90 | 90 | 539 |
| | 18-giu | 24.6 | 46 | 313 | 313 | 359 |
| 1971 | 02-mag | 259 | 484 | 254 | 254 | 738 |
| | 26-giu | 58.3 | 108.9 | 409 | 409 | 517.9 |
| 1972 | 12-giu | 221 | 412.9 | 292 | 292 | 704.9 |
| | 14-giu | 64.2 | 120 | 449 | 449 | 569 |
| 1973 | 15-lug | 355 | 663.3 | 145 | 145 | 808.3 |
| | 18-giu | 24.1 | 45 | 564 | 564 | 609 |
| 1974 | - | - | - | - | - | |
| | 29-giu | - | - | 359 | 359 | 359 |
| 1975 | 16-set | 237 | 442.8 | 401 | 401 | 843.8 |
| | 17-giu | 70.9 | 132.5 | 465 | 465 | 597.5 |
| 1976 | - | - | - | - | - | |
| | 05-ott | - | - | 895 | 895 | 895 |
| 1977 | 08-ott | 499 | 932.4 | 450 | 450 | 1382.4 |
| | 01-set | 90.7 | 169.5 | 643 | 643 | 812.5 |
| 1978 | - | - | - | - | - | |
| | 06-lug | - | - | 511 | 511 | 511 |
| 1979 | 17-ott | 431 | 805.3 | 861 | 861 | 1666.3 |
| | 18-ott | 148 | 276.5 | 868 | 868 | 1144.5 |
| 1980 | - | - | - | - | - | |
| | 10-lug | - | - | 651 | 651 | 651 |
| 1981 | - | - | - | - | - | |
| | 27-mag | - | - | 588 | 588 | 588 |
| 1982 | - | - | - | - | - | |
| | 13-giu | - | - | 492 | 492 | 492 |
| 1983 | 22-mag | 292 | 545.6 | 640.7 | 640.7 | 1186.3 |
| | 24-mag | 97.6 | 182.4 | 736.7 | 736.7 | 919.1 |
| 1984 | 04-mag | 217.7 | 406.8 | 160.9 | 160.9 | 567.7 |
| | 06-ott | 70.1 | 131 | 442.3 | 442.3 | 573.3 |
| 1985 | 13-mag | 223 | 416.7 | 214.6 | 214.6 | 631.3 |
| | 08-giu | 56 | 104.6 | 502.6 | 502.6 | 607.2 |

| | | Brembo a Ponte Briolo | | Adda a Lavello | | somma |
|-------------|-------------|------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|----------------------------|
| anno | data | Qg (m³/s) | Qmax (m³/s) | Qg (m³/s) | Qmax (m³/s) | Q (m³/s) |
| 1986 | 24-apr | 299.4 | 559.4 | 390.5 | 390.5 | 949.9 |
| | 30-mag | 81.3 | 151.9 | 537.2 | 537.2 | 689.1 |
| 1987 | 18-lug | 416.8 | 778.8 | 626 | 626 | 1404.8 |
| | 20-lug | 80.4 | 150.2 | 917.7 | 917.7 | 1067.9 |
| 1988 | 18-ott | 513.6 | 959.7 | 377.7 | 377.7 | 1337.4 |
| | 15-ott | 63.5 | 118.7 | 525.4 | 525.4 | 644.1 |
| 1989 | 05-apr | 352 | 657.7 | 108.9 | 108.9 | 766.6 |
| | 12-lug | 48.4 | 90.4 | 377.3 | 377.3 | 467.7 |
| 1990 | 22-nov | 155.1 | 289.8 | 88.6 | 88.6 | 378.4 |
| | 08-giu | 112 | 209.3 | 508.9 | 508.9 | 718.2 |
| 1991 | 29-set | 287.6 | 537.4 | 127 | 127 | 664.4 |
| | 01-ott | 75.2 | 140.5 | 527.8 | 527.8 | 668.3 |
| 1992 | 11-lug | 280.8 | 524.7 | 425.8 | 425.8 | 950.5 |
| | 06-lug | 174 | 325.1 | 473.1 | 473.1 | 798.2 |
| 1993 | 02-ott | 558.8 | 1044.1 | 610.9 | 610.9 | 1655 |
| | 15-ott | 78.3 | 146.3 | 847.4 | 847.4 | 993.7 |
| 1994 | 06-nov | 332.4 | 621.1 | 325.4 | 325.4 | 946.5 |
| | 16-set | 94.9 | 177.3 | 472.4 | 472.4 | 649.7 |

Per ciascun anno si hanno due coppie di dati contemporanei, ognuna delle quali include un valore massimo annuo osservato in una delle due stazioni ed il corrispondente valore massimo (non necessariamente il massimo annuo) osservato nell'altra stazione.

Scegliendo per ogni anno la coppia di dati contemporanei la cui somma risulti maggiore, si è proceduto alla trasposizione di tali dati, registrati rispettivamente a Lavello e a Ponte Briolo, fino alle sezioni ubicate immediatamente a monte della confluenza tra l'Adda e il Brembo.

Successivamente si sono sommati tali dati contemporanei trasposti alle citate sezioni in modo da ottenere una serie di dati massimi annui stimati riferiti alla sezione del Fiume Adda subito a valle dell'immissione del Brembo a Vaprio d'Adda.

Le massime portate al colmo così stimate per il fiume Adda a Vaprio d'Adda sono state ulteriormente trasposte alla sezione di Lodi.

Le citate trasposizioni delle portate al colmo sono state effettuate mediante la seguente espressione di regionalizzazione dei dati:

$$\frac{Q_A}{A_A} = \frac{Q_B}{A_B} \left(\frac{A_B}{A_A} \right)^{2/3} \Rightarrow Q_A = Q_B \left(\frac{A_A}{A_B} \right)^{1/3} \quad (1)$$

dove:

Q_A e Q_B sono le portate al colmo nelle generiche sezione A e B ;

A_A e A_B sono le aree dei bacini racchiusi alle generiche sezioni A e B .

Considerando inizialmente la trasposizione delle portate Q_B registrate a Ponte Briolo ($A_B = 765 \text{ km}^2$) alla sezione del Brembo subito a monte della confluenza con l'Adda ($A_A = 940 \text{ km}^2$), si ottiene:

$$Q_A = Q_B (940/765)^{1/3} = 1,071 Q_B$$

dove Q_A è la portata alla confluenza e Q_B quella registrata a Ponte Briolo.

Per quanto riguarda le portate dell'Adda a valle del Lago di Como, ipotizzando che l'effetto del lago sulle portate a valle sia in qualche modo caratteristico dell'intero bacino racchiuso alla sezione in esame, si è assunto che, a prescindere dalla presenza del lago, le portate osservate a Lavello possano essere considerate come prodotte dal bacino complessivo racchiuso all'idrometrografo ($A_B = 4.572 \text{ km}^2$).

Nella sezione dell'Adda, subito a monte della confluenza con il Fiume Brembo, si considera, pertanto, un bacino complessivo di area $A_A = 4.697 \text{ km}^2$. In questo modo la trasposizione delle portate al colmo da Lavello alla citata confluenza viene effettuata come sotto:

$$Q_A = Q_B (4.679/4.572)^{1/3} = 1,008 Q_B$$

dove, in questo caso, Q_A è la portata alla confluenza e Q_B quella registrata a Lavello.

Come si osserva, le portate dell'Adda a monte della confluenza con il Brembo sono incrementate di poco rispetto a quelle registrate a Lavello. Ciò appare aderente alla realtà, sia per la piccola estensione del bacino residuo

corrispondente al solo tratto Lavello-Fiume Brembo, sia per la configurazione "piatta" delle onde di piena caratteristiche del tratto stesso.

Le serie di dati così stimati nel Brembo e nell'Adda prima della loro confluenza a Vaprio d'Adda sono state riportate in Tabella 3-3 (4^a e 5^a colonna). Nella stessa tabella si riporta la serie stimata a Vaprio d'Adda (6^a colonna) dopo la confluenza. Come già detto in precedenza, quest'ultima serie è il risultato della somma dei dati relativi alle prime due serie citate.

Utilizzando l'espressione di regionalizzazione delle portate al colmo e considerando le stesse ipotesi già descritte in precedenza, si è proceduto alla stima della serie di dati alla sezione di Lodi, a partire dalla serie stimata a Vaprio d'Adda nella sezione a valle del Brembo.

La superficie totale del bacino sotteso a Vaprio d'Adda è $A_B = 4.697+940 = 5.637 \text{ km}^2$, mentre la superficie del bacino racchiuso alla sezione di Lodi è pari a $A_A = 5.989 \text{ km}^2$. Pertanto, i massimi annui di portata al colmo a Lodi risultano pari a:

$$Q_A = Q_B (5.989/5.637)^{1/3} = 1,020 Q_B$$

dove Q_B è, in questo caso, il valore delle portate al colmo a Vaprio d'Adda.

La serie storica ricostruita a Lodi è riportata nell'ultima colonna della citata Tabella 3-3.

Tabella 3-3: serie stimata delle portate al colmo alla confluenza dell'Adda con il Brembo e a Lodi

| | Adda a Lavello | Brembo a ponte Briolo | Adda monte confluenza Brembo | Brembo monte confluenza Brembo | Adda valle confluenza Brembo | Adda a Lodi |
|------|----------------|-----------------------|------------------------------|--------------------------------|------------------------------|-------------|
| anno | $Q (m^3/s)$ | $Q (m^3/s)$ | $Q (m^3/s)$ | $Q (m^3/s)$ | $Q (m^3/s)$ | $Q (m^3/s)$ |
| 1946 | 326 | 455.9 | 328.5 | 488.3 | 816.8 | 833 |
| 1947 | 149 | 480.2 | 150.2 | 514.3 | 664.5 | 678 |
| 1948 | 567 | 175.1 | 571.4 | 187.5 | 758.9 | 774 |
| 1949 | 64 | 347.5 | 64.5 | 372.2 | 436.7 | 446 |
| 1950 | 73 | 679 | 73.6 | 727.3 | 800.8 | 817 |
| 1951 | 617 | 616.6 | 621.8 | 660.4 | 1282.2 | 1308 |

| | Adda a Lavello | Brembo a ponte Briolo | Adda monte confluenza Brembo | Brembo monte confluenza Brembo | Adda valle confluenza Brembo | Adda a Lodi |
|------|-------------------|--------------------------|------------------------------------|---|------------------------------------|-------------|
| anno | $Q (m^3/s)$ | $Q (m^3/s)$ | $Q (m^3/s)$ | $Q (m^3/s)$ | $Q (m^3/s)$ | $Q (m^3/s)$ |
| 1952 | 420 | 908 | 423.3 | 972.5 | 1395.8 | 1424 |
| 1953 | 355 | 551 | 357.7 | 590.2 | 947.9 | 967 |
| 1954 | 80 | 843 | 80.6 | 902.9 | 983.5 | 1004 |
| 1955 | 98 | 426 | 98.8 | 456.3 | 555.0 | 566 |
| 1956 | 253 | 424 | 255.0 | 454.1 | 709.1 | 724 |
| 1957 | 577 | 276.5 | 581.5 | 296.2 | 877.6 | 896 |
| 1958 | 195 | 411 | 196.5 | 440.2 | 636.7 | 650 |
| 1959 | 74 | 469 | 74.6 | 502.3 | 576.9 | 589 |
| 1960 | 675 | 437.2 | 680.2 | 468.3 | 1148.5 | 1172 |
| 1961 | - | - | - | - | - | - |
| 1962 | 244 | 453 | 245.9 | 485.2 | 731.1 | 746 |
| 1963 | 636 | 733 | 640.9 | 785.1 | 1426.0 | 1455 |
| 1964 | 167 | 338 | 168.3 | 362.0 | 530.3 | 541 |
| 1965 | 688 | 673 | 693.3 | 720.8 | 1414.2 | 1443 |
| 1966 | 585 | 633 | 589.5 | 678.0 | 1267.5 | 1293 |
| 1967 | 409 | 55.9 | 412.2 | 59.9 | 472.0 | 482 |
| 1968 | 315 | 501 | 317.4 | 536.6 | 854.0 | 871 |
| 1969 | 456 | 90.4 | 459.5 | 96.8 | 556.4 | 568 |
| 1970 | 90 | 449 | 90.7 | 480.9 | 571.6 | 583 |
| 1971 | 254 | 484 | 256.0 | 518.4 | 774.4 | 790 |
| 1972 | 292 | 412.9 | 294.3 | 442.2 | 736.5 | 752 |
| 1973 | 145 | 663.3 | 146.1 | 710.4 | 856.6 | 874 |
| 1974 | - | - | - | - | - | - |
| 1975 | 401 | 442.8 | 404.1 | 474.3 | 878.4 | 896 |
| 1976 | - | - | - | - | - | - |
| 1977 | 450 | 932.4 | 453.5 | 998.7 | 1452.2 | 1482 |
| 1978 | - | - | - | - | - | - |
| 1979 | 861 | 805.3 | 867.7 | 862.5 | 1730.2 | 1765 |
| 1980 | - | - | - | - | - | - |
| 1981 | - | - | - | - | - | - |
| 1982 | - | - | - | - | - | - |
| 1983 | 640.7 | 545.6 | 645.7 | 584.4 | 1230.0 | 1255 |

| | Adda a Lavello | Brembo a ponte Briolo | Adda monte confluenza Brembo | Brembo monte confluenza Brembo | Adda valle confluenza Brembo | Adda a Lodi |
|------|----------------|-----------------------|------------------------------|--------------------------------|------------------------------|-------------|
| anno | $Q (m^3/s)$ | $Q (m^3/s)$ | $Q (m^3/s)$ | $Q (m^3/s)$ | $Q (m^3/s)$ | $Q (m^3/s)$ |
| 1984 | 442.3 | 131 | 445.7 | 140.3 | 586.0 | 598 |
| 1985 | 214.6 | 416.7 | 216.3 | 446.3 | 662.6 | 676 |
| 1986 | 390.5 | 559.4 | 393.5 | 599.2 | 992.7 | 1013 |
| 1987 | 626 | 778.8 | 630.8 | 834.2 | 1465.0 | 1495 |
| 1988 | 377.7 | 959.7 | 380.6 | 1027.9 | 1408.5 | 1437 |
| 1989 | 108.9 | 657.7 | 109.7 | 704.4 | 814.2 | 831 |
| 1990 | 508.9 | 209.3 | 512.8 | 224.2 | 737.0 | 752 |
| 1991 | 527.8 | 140.5 | 531.9 | 150.5 | 682.4 | 696 |
| 1992 | 425.8 | 524.7 | 429.1 | 562.0 | 991.1 | 1011 |
| 1993 | 610.9 | 1044.1 | 615.6 | 1118.3 | 1733.9 | 1769 |
| 1994 | 325.4 | 621.1 | 327.9 | 665.2 | 993.2 | 1013 |

3.2.3.2 Elaborazione statistica e valutazione delle portate di massima piena a Lodi

Il campione delle portate al colmo Q ricostruite a Lodi è stato elaborato statisticamente al fine di determinare le portate di massima piena associate a prefissate probabilità di non superamento $P(Q)$ o, come è usuale, associate a prefissati tempi di ritorno T in anni.

Tale indagine è stata condotta prendendo in considerazione la legge di Gumbel di distribuzione delle probabilità. Come è noto, la grandezza idrologica in esame si distribuisce solitamente secondo la citata legge la cui espressione è la seguente:

$$P(Q) = e^{-e^{-\alpha(Q-\beta)}} \quad (2)$$

dove α e β sono i parametri della distribuzione che, ove si assuma per la loro stima il metodo dei momenti, risultano legati alla media μ e allo scarto quadratico medio s del campione dalle espressioni:

$$\alpha = 1,283/s \quad (3)$$

$$\beta = \mu - 0,5772/\alpha \quad (4)$$

Introdotta il tempo di ritorno T che rappresenta, per la generica variabile Q , il numero di anni in cui Q è in media superata una sola volta, la legge di Gumbel diventa:

$$Q = \beta - \frac{1}{\alpha} \ln \left[-\ln \left(\frac{T-1}{T} \right) \right] \quad (5)$$

dove T è legato alla probabilità $P(Q)$ tramite la relazione:

$$T(Q) = \frac{1}{1 - P(Q)} \quad (6)$$

Calcolati i parametri della distribuzione, si è quindi applicata l'espressione della legge di Gumbel per tempi di ritorno $T= 5, 10, 20, 30, 50, 100, 150, 200, 250$ e 500 anni, oltre a quelli di piena ordinaria corrispondenti ad un tempo di ritorno di poco più di un anno. I risultati sono riportati in Tabella 3-4 con l'indicazione del fattore di frequenza, della varianza di stima e della fascia fiduciaria.

Tabella 3-4: analisi statistica delle portate di massima piena a Lodi

| T (anni) | Q(T) (m ³ /s) | fattore di frequenza | varianza di stima | fascia fiduciaria | | errore (%) |
|----------|--------------------------|----------------------|-------------------|-------------------|---------|------------|
| | | | | minimi | massimi | |
| 1.1 | 548 | -1.1319 | 3300.4 | 435 | 661 | 20.5% |
| 5 | 1207 | 0.7195 | 7044.7 | 1042 | 1371 | 13.6% |
| 10 | 1415 | 1.3046 | 12851.6 | 1193 | 1637 | 15.7% |
| 20 | 1615 | 1.8659 | 20508.3 | 1334 | 1896 | 17.4% |
| 30 | 1730 | 2.1887 | 25838.8 | 1415 | 2045 | 18.2% |
| 50 | 1874 | 2.5923 | 33453.1 | 1515 | 2232 | 19.1% |
| 100 | 2067 | 3.1367 | 45397.3 | 1650 | 2485 | 20.2% |
| 150 | 2180 | 3.4542 | 53249.5 | 1728 | 2633 | 20.7% |
| 200 | 2260 | 3.6791 | 59209.6 | 1783 | 2737 | 21.1% |
| 250 | 2322 | 3.8535 | 64055.5 | 1826 | 2819 | 21.4% |
| 500 | 2515 | 4.3947 | 80352.1 | 1960 | 3071 | 22.1% |

Si noti come il metodo di ricostruzione delle serie storiche a Lodi sia basato sul trasposizioni delle portate al colmo effettuate mediante espressioni di regionalizzazione dei dati.

3.2.4 Direttiva sulla Piena di Progetto da assumere per le progettazioni e le verifiche di compatibilità idraulica. Autorità di Bacino del Fiume Po.

Tale direttiva fornisce per le sezioni del Fiume Adda di Lavello, Cassano D'Adda (a valle della confluenza con il Brembo) le portate al colmo per i diversi tempi di ritorno riportate nella seguente Tabella 3-5.

Tabella 3-5: Portate studio PAI

| <i>T</i> (anni) | <i>PORTATA m³/s</i> <i>Adda a Lavello</i> | <i>PORTATA m³/s</i> <i>Adda a valle Confluenza</i> <i>Brembo</i> |
|--------------------|---|---|
| 20 | 680 | - |
| 100 | 830 | - |
| 200 | 900 | 1150 |
| 500 | 990 | - |

Si riportano per completezza tali risultati, anche se questi, come si vedrà nel confronto con le risultanze degli altri studi di seguito riportato, sono stati ottenuti mediante l'applicazione, per la serie storica di Lavello, di una distribuzione di frequenza inadeguata e pertanto tali valori risultano decisamente sottostimati.

3.2.5 Sotto Progetto SP1 – Autorità di Bacino del Fiume Po

I risultati dello studio idrologico descritto ai precedenti paragrafi sono stati comparati con i risultati delle elaborazioni contenute nel Sottoprogetto SP1 dell'Autorità di Bacino del Fiume Po.

Le portate per i diversi tempi di ritorno, sono state ricavate per tutte le sezioni del Fiume Adda mediante regressioni statistiche ma con il supporto di un modello idrodinamico di moto vario per una stima più accurata degli effetti idrodinamici della laminazione golenale.

Nella seguente Tabella 3-6 sono riportati i risultati dello studio relativamente alle sezioni di Lavello ed in corrispondenza della confluenza con il Brembo.

Tabella 3-6: Portate studio SP1

| <i>T</i> (anni) | <i>PORTATA m³/s</i> <i>Adda a Lavello</i> | <i>PORTATA m³/s</i> <i>Adda a valle Confluenza Brembo</i> |
|--------------------|---|---|
| 20 | 840 | 1670 |
| 100 | 1000 | 2080 |
| 200 | 1070 | 2285 |

Grazie all'uso di un modello idrodinamico lo studio ha inoltre permesso di ricavare gli involucri delle onde di piena (portate e livelli), per i tempi di ritorno di 20, 100 e 200 anni, di tutto l'Adda sub-lacuale (fig. 3-2). Nella figura si evidenziano le confluenze del F. Brembo e del F. Serio e il tratto di Adda inserito nel territorio comunale di Lodi.

A titolo indicativo si può comunque evidenziare una decisa attenuazione del colmo di piena stimata nel tratto che va dalla confluenza con il Brembo alla confluenza con il Serio. Nel territorio comunale di Lodi l'onda di piena duecentennale transita con una portata di colmo in ingresso di circa 1800 m³/s (un abbattimento del 22 % circa rispetto alla portata alla confluenza Adda-Brembo) ed una portata in uscita di circa 1600 m³/s (un abbattimento del 30 % circa rispetto alla portata alla confluenza Adda-Brembo).

Si evidenzia comunque come la ricostruzione mediante modello idrodinamico della relazione "Portate al colmo-tempi di ritorno" per una sezione non dotata di serie storica delle portate possa differire decisamente dalle ricostruzioni basate su formule di regionalizzazione. La trasposizione idrologica effettuata nell'ambito dello Studio *Parco Adda sud* – Piano di settore – novembre 1995 dello Studio Paoletti Ingegneri Associati conduceva ad un aumento, seppure modesto (2 %), dei colmi di piena corrispondenti fra le sezioni alla confluenza Adda-Brembo e Lodi. Non si dispone, relativamente a tali elaborazioni, delle particolari ipotesi alla base delle ricostruzioni idrodinamiche (volume e forma dell'onda sintetica, stima degli apporti laterali fra le confluenze con i fiumi Brembo e Serio e le altre schematizzazioni modellistiche adottate).

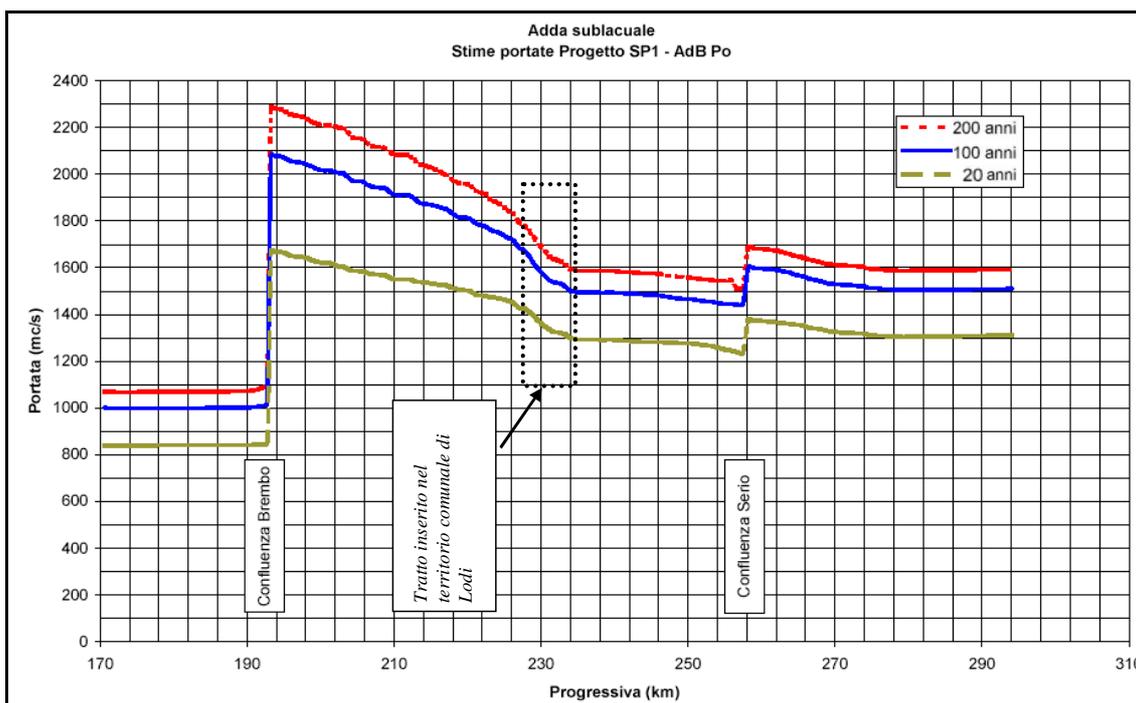


Figura 3-2: Portate al colmo dell'Adda sublacuale, per tempi di ritorno di 20, 100 e 200 anni, secondo le stime effettuate nel Progetto SP1 dell'Autorità di Bacino del Po.

3.2.6 “Studio di fattibilità della sistemazione idraulica del fiume Adda nel tratto da Olginate alla confluenza in Po, del fiume Brembo nel tratto da Lenna alla confluenza in Adda e del fiume Serio nel tratto da Parre alla confluenza in Adda”, redatto per conto dell'Autorità di Bacino del fiume Po

Lo studio redatto per conto dell'Autorità di Bacino del fiume Po da un raggruppamento temporaneo di imprese, di cui Montgomery Watson SpA è la mandataria, è relativo ad un aggiornamento e ad un approfondimento delle stime delle portate di piena del fiume Adda sublacuale, del fiume Brembo da Lenna fino alla confluenza in Adda e del fiume Serio da Parre fino alla confluenza in Adda.

Finalità del lavoro di analisi idrologica del citato studio è stata la determinazione delle portate al colmo e degli idrogrammi di piena aventi tempo di ritorno assegnato fra 2 e 500 anni nelle sezioni dei corsi d'acqua oggetto dello studio di fattibilità che presentano interesse ai fini della successiva modellazione idraulica e delle attività progettuali.

In tale studio l'ampia raccolta dati effettuata ha consentito di desumere le stime delle portate al colmo di assegnato tempo di ritorno sulla base di un campione di osservazioni di dimensioni molto maggiori rispetto a quello considerato nell'ambito degli studi citati ai paragrafi precedenti.

In particolare, grazie alle operazioni di raccolta dei dati idrometrici, la dimensione dei campioni di osservazioni storiche dei massimi annuali delle portate al colmo di piena si è notevolmente accresciuta rispetto a quella dei campioni precedentemente disponibili: infatti, ciò ha reso disponibile un campione di 74 elementi per l'Adda a Lavello, contro i 35 sui cui erano basate le analisi del PAI e che sono riportati nei relativi documenti, di 60 elementi per il Brembo a Ponte Briolo, a fronte dei 26 riportati nei documenti di PAI, e di 52 elementi per il Serio a Ponte Cene, per il quale il PAI non riportava la serie storica che è invece pubblicata dal SIMN ed è composta da 20 osservazioni.

La stima delle portate di piena di assegnato tempo di ritorno nelle stazioni strumentate di Lavello e Pizzighettone sul fiume Adda, per le quali si dispone di un campione abbastanza consistente di osservazioni, è stata condotta su base regionale. In particolare il confronto tra le distribuzioni di frequenza del campione, secondo Gumbel, delle portate massime annuali adimensionalizzate dell'Adda a Lavello e a Pizzighettone rispetto alla media del campione disponibile per ciascuna stazione, ha evidenziato un'ottima analogia, tale quindi da poter affermare che la distribuzione di probabilità delle portate al colmo massime annuali adimensionalizzate sia la medesima nelle due sezioni sopra citate.

Sono stati riuniti in un unico campione, della dimensione di 94 elementi, le portate adimensionalizzate di Lavello e Pizzighettone e successivamente confrontate con la distribuzione di probabilità teorica del campione secondo il modello di Gumbel, i cui parametri sono stati stimati con il metodo dei momenti. Il buon adattamento del modello teorico alla distribuzione di frequenza delle osservazioni, ha permesso di stimare i valori di assegnato tempo di ritorno della portata adimensionalizzata $X(T)$ per i consueti valori del tempo di ritorno.

Tabella 3-7: fattore di crescita dimensionale in funzione del tempo di ritorno T

| T (anni) | X (T) |
|----------|-------|
| 2 | 0,946 |
| 5 | 1,238 |
| 10 | 1,431 |
| 20 | 1,617 |
| 50 | 1,857 |
| 100 | 2,037 |
| 200 | 2,217 |
| 500 | 2,453 |

La stima su base regionale delle portate di assegnato tempo di ritorno $Q(T)$ nelle sezioni di Lavello e Pizzighettone può essere ottenuta moltiplicando la stima del fattore di crescita adimensionale $X(T)$ di pari tempo di ritorno, desumibile dalla Tabella 3-7, per la portata indice μ_Q relativa alla sezione di interesse riportato in Tabella 3-8.

Tabella 3-8: portata indice alle stazioni di misura idrometriche dell'Adda sublacuale

| Stazione | Superficie (km ²) | μ_Q (m ³ /s) | U (m ³ /s km ²) |
|---------------|-------------------------------|-----------------------------|--|
| Lavello | 4572 | 530,8 | 0,116 |
| Pizzighettone | 7775 | 835,7 | 0,108 |

Si ottengono in tal modo le stime su base regionale delle portate al colmo di assegnato tempo di ritorno $Q(T)$, per l'Adda a Lavello e per l'Adda a Pizzighettone.

Tabella 3-9: portate al colmo di piena di assegnato tempo di ritorno T

| T (anni) | Q (m ³ /s) | |
|----------|-----------------------|---------------|
| | Lavello | Pizzighettone |
| 2 | 502 | 790 |
| 5 | 657 | 1035 |
| 10 | 760 | 1196 |
| 20 | 858 | 1351 |
| 50 | 986 | 1552 |
| 100 | 1081 | 1703 |
| 200 | 1177 | 1853 |
| 500 | 1302 | 2050 |

La stima delle portate al colmo di piena nelle sezioni non strumentate dell'Adda sublacuale risulta invece essere abbastanza difficoltosa.

Le piene di tali sezioni derivano infatti dalla composizione delle onde in uscita dal Lago di Como col contributo degli affluenti sublacuali, fra cui spicca per importanza quello del Brembo. Nell'assetto del regime di frequenza delle piene un ruolo fondamentale è quindi esercitato dai fenomeni di laminazione dell'onda di piena lungo l'asta principale dell'Adda, i cui effetti ovviamente non possono essere rappresentati se non attraverso modelli numerici della propagazione del deflusso in alveo e quindi non possono certamente essere descritti tramite modelli di regionalizzazione statistica, in cui il trasferimento dell'informazione disponibile alle stazioni di misura si basa necessariamente sull'uso di parametri di sintesi a scala di bacino. Il regime delle piene del tratto sublacuale intermedio fra le due sezioni di misura di Lavello e di Pizzighettone può essere caratterizzato nell'ambito delle indagini idrologiche solo in via approssimata, che comunque si può ritenere soddisfacente.

Al fine di stimare le portate al colmo dell'Adda a valle della confluenza del Brembo, è stata condotta un'analisi finalizzata alla ricostruzione dei valori di colmo delle principali piene storiche verificatesi in tale sezione, utilizzando i numerosi dati idrometrici raccolti. Sono stati considerati tutti gli idrogrammi di piena disponibili per il Fiume Brembo a Ponte Briolo e le contemporanee onde di piena dell'Adda a Lavello e ne è stata effettuata la composizione al fine di determinare la corrispondente onda di piena storica dell'Adda a valle di foce Brembo.

Per la ricostruzione dei colmi di piena dei singoli eventi del Brembo alla confluenza in Adda, si è ritenuto lecito assimilare questi ultimi ai colmi delle corrispondenti onde osservate a Ponte Briolo. Tale scelta pare avvalorata dalla modesta entità delle differenze esistenti tra i quantili di pari tempo di ritorno delle portate al colmo delle due sezioni, valutati in base allo studio statistico delle piene del Brembo. Una simile impostazione è stata ritenuta valida anche per il trasferimento delle onde di piena registrate a Lavello fino alla sezione dell'Adda posta immediatamente a monte della confluenza col Brembo.

Operando in tal modo si è ottenuto un campione di 138 colmi di piena nella sezione del Fiume Adda posta immediatamente a valle della confluenza del

Brembo, relativo a 53 anni di osservazione. Da tale campione è stata poi estratta la serie dei massimi annuali.

La serie ricostruita dei massimi annuali delle portate al colmo di piena dell'Adda a valle di confluenza Brembo è stata quindi sottoposta ad inferenza statistica (modello di Gumbel), al fine di valutare le portate al colmo di assegnato tempo di ritorno. Il confronto tra la distribuzione di frequenza degli elementi di detta serie, indicati come osservazioni anche se di fatto ottenuti per via indiretta attraverso un'operazione di ricostruzione, e la relativa distribuzione di probabilità teorica del campione secondo il modello di Gumbel, i cui parametri sono stati stimati secondo il metodo dei momenti ha indicato un adattamento molto buono del modello teorico alla distribuzione di frequenza delle osservazioni. Pertanto tale modello è stato impiegato per valutare le portate al colmo di assegnato tempo di ritorno, ottenendo le stime riportate nella Tabella 3-10.

Tabella 3-10: Fiume Adda a valle della confluenza del Brembo, stima delle portate al colmo di assegnato tempo di ritorno T

| T (anni) | Q (m ³ /s) |
|----------|--------------------------------|
| | <i>Valle confluenza Brembo</i> |
| 2 | 807 |
| 5 | 1074 |
| 10 | 1252 |
| 20 | 1422 |
| 50 | 1642 |
| 100 | 1806 |
| 200 | 1971 |
| 500 | 2187 |

Infine per la stima delle portate al colmo di piena nella sezione del fiume Adda posta immediatamente a valle della confluenza del fiume Serio, si è fatto riferimento alle informazioni desunte per la sezione di Pizzighettone. In particolare, considerando modesti effetti di laminazione nel tratto compreso tra la confluenza del fiume Serio in Adda e Pizzighettone, è stato ipotizzato l'incremento della portata al colmo pari al 5% rispetto a quelle stimate per la sezione di Pizzighettone ottenendo i valori riportati in Tabella 3-11.

Tabella 3-11: Fiume Adda a valle della confluenza del Serio, stima delle portate al colmo di assegnato tempo di ritorno T

| T (anni) | Q (m ³ /s) |
|----------|-------------------------------|
| | <i>Valle confluenza Serio</i> |
| 2 | 830 |
| 5 | 1087 |
| 10 | 1256 |
| 20 | 1419 |
| 50 | 1630 |
| 100 | 1788 |
| 200 | 1946 |
| 500 | 2153 |

I risultati di tale studio sono riassunti nella seguente Tabella 3-12. Si sottolinea che i risultati, riportati nello studio AdBPo descritto al presente paragrafo, saranno utilizzati come input di ingresso nelle successive fasi di studio e modellazione idrodinamica che l'Autorità di Bacino intraprenderà al fine di giungere all'aggiornamento degli inviluppi delle onde di piena (portate e livelli) di tutto l'Adda sub-lacuale. Tali aggiornamenti non sono tuttora disponibili.

Tabella 3-12: Stima delle portate al colmo di assegnato tempo di ritorno in m³/s

| TEMPO DI RITORNO (anni) | LAVELLO | CONFLUENZA BREMBO | CONFLUENZA SERIO | PIZZIGHETTONE |
|-------------------------|---------|-------------------|------------------|---------------|
| 2 | 502 | 807 | 830 | 790 |
| 5 | 657 | 1074 | 1087 | 1035 |
| 10 | 760 | 1252 | 1256 | 1196 |
| 20 | 858 | 1422 | 1419 | 1351 |
| 50 | 986 | 1642 | 1630 | 1552 |
| 100 | 1081 | 1806 | 1788 | 1703 |
| 200 | 1177 | 1971 | 1946 | 1853 |
| 500 | 1302 | 2187 | 2153 | 2050 |

3.3 CONCLUSIONI

Il corso dell'Adda sublacuale è caratterizzato da portate che dipendono sia dal regime dei deflussi dal Lago di Como, sia dagli apporti laterali dei due affluenti maggiori: F. Brembo e F. Serio e dal reticolo minore.

In corrispondenza del tratto compreso nel territorio comunale di Lodi non sono presenti stazioni idrometriche per le quali si dispone di una serie storica di massimi annui di portate al colmo sufficientemente lunga per applicare direttamente un metodo di analisi statistica dei massimi e quindi ricavare la relazione che lega le portate ad un corrispondente tempo di ritorno.

In corrispondenza della sezioni strumentata di Lavello le stime riportate negli studi descritti al presente capitolo sono confrontate nella successiva Tabella 3-13.

Tabella 3-13: Fiume Adda a Lavello. Confronto portate al colmo di assegnato tempo di ritorno

| TEMPO DI RITORNO (anni) | A STUDIO PAOLETTI | B DIRETTIVA PAI | C SOTTO PROGETTO SP1 | D STUDIO DI FATTIBILITA' ADBPO |
|--------------------------------|--------------------------|------------------------|-----------------------------|---------------------------------------|
| 2 | - | - | - | 502 |
| 5 | 641 | - | - | 657 |
| 10 | 727 | - | - | 760 |
| 20 | 809 | 680 | 840 | 858 |
| 50 | 915 | - | - | 986 |
| 100 | 995 | 830 | 1000 | 1081 |
| 200 | 1074 | 900 | 1070 | 1177 |
| 500 | 1179 | 990 | - | 1302 |

Si nota che le portate PAI, confrontate con le risultanze degli altri studi, risultano sistematicamente sottostimate in quanto il modello adottato non rappresenta adeguatamente la distribuzione di frequenza della serie storica, le stime Studio Paoletti e SP1 sono in ottimo accordo fra loro ma differiscono di circa il 10 % in difetto rispetto alle più recenti elaborazioni AdBPo (colonna C) che sono basate su un campione di dati più esteso e che, per ciò, si ritengono maggiormente affidabili.

Nella tabella 3-14 sono invece riportate le stime in corrispondenza della confluenza Adda-Brembo. Essendo tale stazione non strumentata le statistiche riportate sono state ricostruite mediante metodi statistici inferenziali e di regionalizzazione come riportato nei precedenti paragrafi. Nel tratto Lavello confluenza Brembo i fenomeni di laminazione dell'onda di piena comportano un'influenza marginale per la forma piatta dell'onda di piena proveniente dal

lago e per la particolare morfologia fluviale incassata e quindi per l'assenza di aree golenali significative.

Anche in questo caso, fra le varie stime, sembra quindi maggiormente affidabile la più recente effettuata dall'Autorità di Bacino (colonna D). Emerge la forte sottostima delle elaborazione PAI (colonna B).

Tabella 3-14: fiume Adda a valle confluenza Brembo. Confronto portate al colmo di assegnato tempo di ritorno

| TEMPO DI RITORNO (anni) | A STUDIO PAOLETTI | B DIRETTIVA PAI | C SOTTO PROGETTO SP1 | D STUDIO DI FATTIBILITA' ADBPO |
|-------------------------|-------------------|-----------------|----------------------|--------------------------------|
| 2 | - | - | - | 807 |
| 5 | 1183 | - | - | 1074 |
| 10 | 1388 | - | - | 1252 |
| 20 | 1584 | - | 1670 | 1422 |
| 50 | 1837 | - | - | 1642 |
| 100 | 2027 | - | 2080 | 1806 |
| 200 | 2216 | 1150 | 2285 | 1971 |
| 500 | 2466 | - | - | 2187 |

Per quanto riguarda il tratto confluenza Brembo – Lodi si ritiene che i fenomeni di laminazione dell'onda di piena lungo l'asta principale dell'Adda possano influenzare la propagazione dell'onda di piena che, il cui colmo di piena, causato anche dagli apporti del Brembo, caratterizzati da repentine variazioni di portata.

Tabella 3-15: F. Adda a Lodi. Confronto portate al colmo di assegnato tempo di ritorno

| TEMPO DI RITORNO (anni) | A STUDIO PAOLETTI | B SP1 INGRESSO COMUNE DI LODI | C SP1 USCITA COMUNE DI LODI |
|-------------------------|-------------------|-------------------------------|-----------------------------|
| 2 | - | - | - |
| 5 | 1207 | - | - |
| 10 | 1415 | - | - |
| 20 | 1615 | 1424 | 1297 |
| 50 | 1874 | - | - |
| 100 | 2067 | 1685 | 1500 |
| 200 | 2260 | 1794 | 1593 |
| 500 | 2515 | - | - |

Tali effetti di laminazione, sono stati stimati per mezzo di modello idrodinamico nell'ambito del SP1 in precedenza descritto; si riporta nella successiva tabella 3-15 il confronto delle stime effettuate in corrispondenza del territorio comunale di Lodi con le elaborazioni effettuate, mediante metodi di regionalizzazione, nell'ambito dello studio "Piano territoriale di coordinamento *parco adda sud* – piano di settore "fiume e fasce fluviali" – novembre 1995" (studio paoletti ingegneri associati). Si evidenzia il deciso scostamento fra le due valutazioni. Da un lato l'applicazione di metodi di regionalizzazione porta ad una sovrastima delle portate, non essendo in grado di rappresentare gli effetti della laminazione golenale. Dall'altro le elaborazioni SP1 valutano un abbattimento del colmo di piena considerevole (vedasi anche figura 3-2), si ribadisce che non si dispone, relativamente a tali elaborazioni, ulteriori informazioni relative alle ipotesi modellistiche adottate: volume e forma dell'onda sintetica e stima degli apporti laterali. Proprio questi ultimi potrebbero risultare infatti sottostimati (si rammenta a tal proposito che, durante l'evento del Novembre 2002 i tecnici del consorzio di Bonifica della Lodigiana stimarono un apporto dal reticolo minore fra la confluenza Adda-Brembo a Lodi quantificabile in 200-300 m³/s.

Questi temi saranno oggetto di accurati approfondimenti nelle successive fasi di studio e modellazione idrodinamica che l'Autorità di Bacino intraprenderà al fine di giungere all'aggiornamento degli involucri delle onde di piena (portate e livelli) di tutto l'Adda sub-lacuale. Tale studio sarà basato sulle elaborazioni idrologiche riportate nello "*Studio di fattibilità della sistemazione idraulica del fiume Adda nel tratto da Olginate alla confluenza in Po, del Fiume Brembo nel tratto da Lenna alla confluenza in Adda e del fiume Serio nel tratto da Parre alla confluenza in Adda*", redatto per conto dell'autorità di bacino del fiume Po. Si è ritenuto pertanto, ai fini delle modellazioni riportate nel presente studio, adottare a favore di sicurezza le distribuzioni statistiche delle portate valutate nell'ambito del recente sopraccitato studio AdbPo per la sezione dell'Adda appena a valle della confluenza del Brembo, ipotizzando che gli effetti di laminazione dell'onda possano compensarsi con gli apporti provenienti dal reticolo minore.

In definitiva le portate adottate nello studio del Marzo 2005 e ivi confermate sono riportate in Tabella 3-16.

Tabella 3-16: fiume Adda a Lodi, portate di piena di riferimento di assegnato tempo di ritorno adottate nel presente studio

| T (anni) | Q (m³/s) |
|-----------------|----------------------------|
| 2 | 807 |
| 5 | 1074 |
| 10 | 1252 |
| 20 | 1422 |
| 50 | 1642 |
| 100 | 1806 |
| 200 | 1971 |
| 500 | 2187 |

4. MODELLO BIDIMENSIONALE

4.1 GENERALITÀ

Lo studio dell'allagamento del centro abitato di Lodi è un problema d'inondazione d'ambiente urbano di alta complessità fisico-numerica. La conformazione dell'area in esame, la presenza dei fabbricati nel centro abitato e di opere d'arte all'interno dell'alveo inciso o sul piano golenale sono tali da indurre nella corrente un campo di moto caratterizzato da componenti della velocità locale in due dimensioni e fenomeni dissipativi associati alle linee di flusso principali e secondarie. Pertanto, il fenomeno è correttamente interpretabile solamente superando tale schema e adottando un approccio 2-D nel piano orizzontale, in grado di cogliere la natura bidimensionale della meccanica dell'allagamento e dei fenomeni dissipativi ad esso associati.

E' evidente che la dinamica fluviale dell'inondazione del tessuto urbano è caratterizzata da numerosi fattori fisici di non facile valutazione dal punto di vista fisico-matematico, ad esempio:

- elevata turbolenza e perdite di carico dovute alla presenza di fabbricati;
- derivazione del flusso lungo le strade con la creazione di una complessa e intrecciata rete di canali;
- suddivisione delle portate agli incroci stradali;
- possibilità che i fabbricati rappresentino delle aree di immagazzinamento delle acque;
- possibilità che i centri abitati costituiscano una significativa fonte di detriti che, trasportati dalla corrente, rappresentano un potenziale ostacolo al flusso.

Per superare queste difficoltà, l'analisi idraulica è stata eseguita utilizzando un modello bidimensionale a moto permanente, appositamente creato per il tratto in esame con il codice di calcolo sms di ems-i, accoppiato ad un modello monodimensionale a moto vario creato con il codice di calcolo Hec-Ras ed estrapolato dal DTM (Digital Terrein Model) utilizzato come base geometrica del modello bidimensionale.

L'utilizzo di un modello 2-D ha consentito di individuare le aree allagabili per eventi di piena due centennale e l'andamento dei filoni di corrente secondo i quali la piena divaga nelle aree allagate. Inoltre, è stato possibile definire quelle zone che non vengono allagate direttamente per superamento delle sommità arginali del fiume da parte della corrente di piena, ma per rigurgito di rogge, fossi e canali direttamente connessi con il Fiume Adda. Nonostante tutto ciò, il modello bidimensionale a moto permanente non può ricostruire le dinamiche di sviluppo nel tempo degli allagamenti e, quindi, cogliere la natura transitoria del fenomeno.

Quindi, per valutare lo sviluppo della piena nelle aree allagate, caratterizzate da velocità al colmo nulle (aree di invaso come l'area in studio), si è ritenuto opportuno effettuare ulteriori verifiche affiancando al modello 2-D implementato un modello quasi-bidimensionale a moto vario.

4.2 CARATTERIZZAZIONE GEOMETRICA DELLA VALLE INTERESSATA DAL DEFLUSSO DI PIENA

Le caratteristiche topografiche delle aree interessate sono state dedotte sulla base della cartografia aerofotogrammetrica di dettaglio, resa disponibile dall'Amministrazione comunale di Lodi, che se ne è dotata nell'ottobre 2000 e delle 36 sezioni trasversali batimetriche dell'alveo inciso ad integrazione dell'informazione topografica esistente. Tali informazioni topografiche sono state utilizzate nello studio idrologico-idraulico del Luglio 2001.

Successivamente, per lo studio di aggiornamento del Marzo 2005, tali informazioni topografiche, sono state integrate con ulteriori dettagli. In particolare:

sono state inserite le rampe della nuova Tangenziale est mediante rilevazioni a terra di tali manufatti;

sono state verificate ed aggiornate le quote del terreno della Zona Pratello – Viale Milano alla luce dei nuovi rilievi effettuati da Astem;

è stata corretta la geometria del rilevato stradale della SS Lodi-Boffalora in base ai nuovi rilievi effettuati dal Consorzio Bonifica Muzza Bassa Lodigiana.

Infine, in questa sede si è provveduto ad aggiornare DTM di base (studio del 2005) inserendo le informazioni topografiche relative alla opere di difesa

idraulica, realizzate fino ad oggi, per proteggere il territorio comunale di Lodi.

In particolare, sono state inserite le seguenti informazioni topografiche:

è stato inserito il rilevato dell'argine posto in destra idraulica a valle del Ponte Storico;

è stato inserito il rilevato dell'argine in sinistra idraulica posto a monte del ponte storico in prossimità dell'area Ex-SICC;

sono state considerate le chiaviche realizzate sulle Rogge Gelata e Gaetana.

Il DTM così aggiornato, utilizzato per le modellazioni mostrate nella presente relazione, è riprodotto in Figura 4-1.

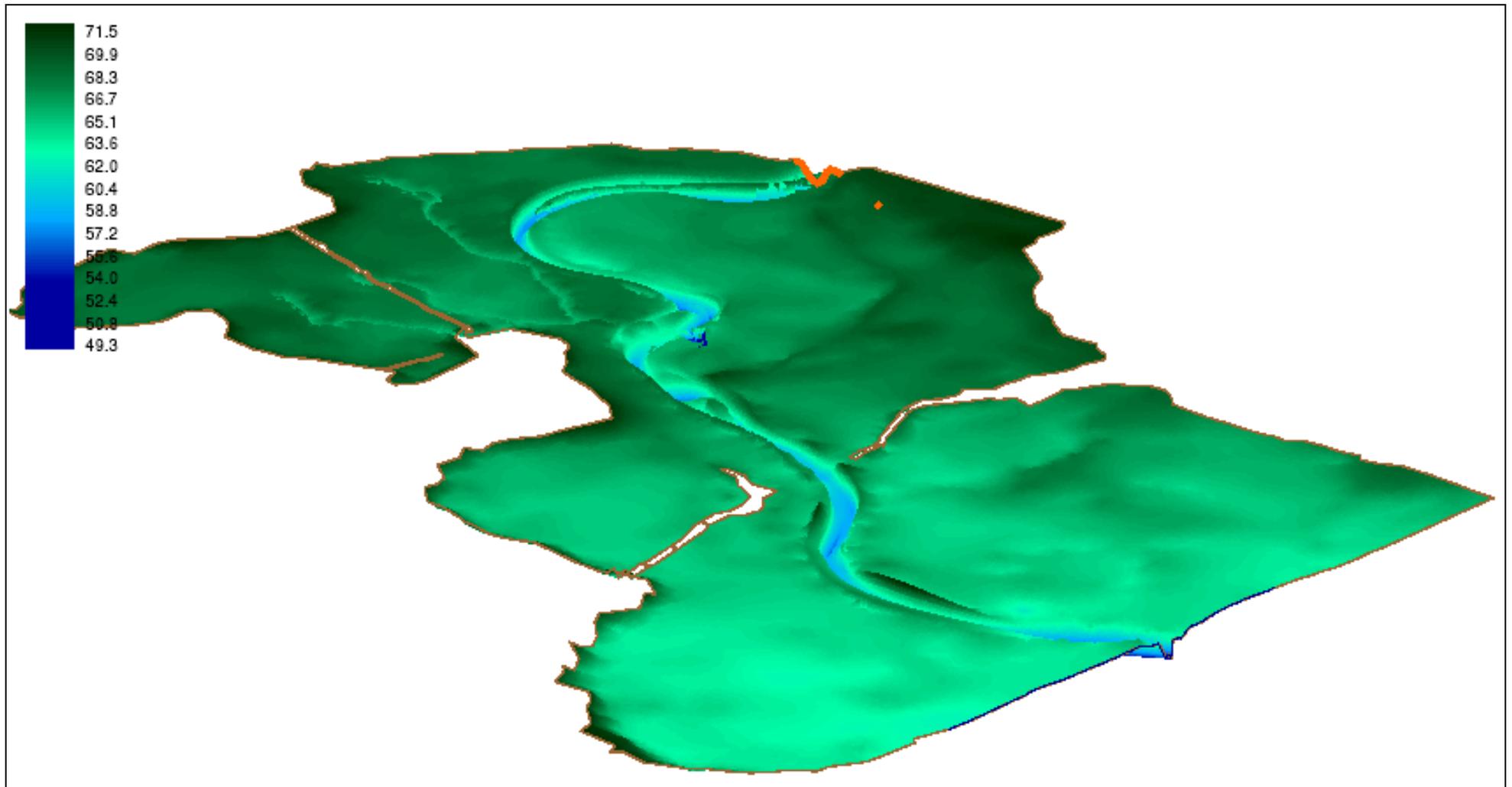


Figura 4-1: DTM - Modello digitale del terreno. Vista prospettica

4.3 IL MODELLO BIDIMENSIONALE AGLI ELEMENTI FINITI

Il modello bidimensionale agli elementi finiti utilizzato (vedi Appendice A) è quello noto in letteratura come FESWMS (Froehlich, 1989) che permette di analizzare il campo di moto a partire da un DTM (digital terrain model) rappresentativo della geometria del dominio di calcolo. Il modello si basa sulla risoluzione di tre equazioni non lineari alle differenze finite (Lee and Froehlich, 1989) per la determinazione del campo di moto della corrente su di un piano bidimensionale (x,y).

Due di queste sono le equazioni del moto nelle direzioni x e y. La terza equazione è data dalla legge di continuità che garantisce la conservazione della massa all'interno del dominio di calcolo. Il modello viene rappresentato attraverso una griglia di elementi quadrangolari e triangolari. Le tre equazioni vengono risolte in ciascun nodo della maglia di calcolo; il metodo di risoluzione delle suddette equazioni è riconducibile al cosiddetto metodo di Galerkin attraverso una procedura di risoluzione iterativa per la minimizzazione dello scarto della soluzione. FESWMS calcola in questo modo la velocità in ogni nodo mediandola sul tirante idrico, non si tiene cioè conto della variazione della velocità nella direzione z.

Per tenere conto di possibili errori numerici nella soluzione, a causa di scarti nel calcolo dell'equazione di conservazione di massa, si è localmente infittita la maglia di calcolo per limitare tali effetti di diffusione numerica.

FESWMS permette all'utente di assegnare differenti parametri idraulici: la prassi progettuale è quella di testare il modello sulla base di coefficienti di scabrezza ricadenti nei normali intervalli di letteratura, nonché facendo variare il cosiddetto parametro di viscosità cinematica (che simula la resistenza aggiuntiva legata alla turbolenza della corrente) in un range di valori plausibili come da letteratura; nel caso in esame si è imposta una viscosità pari a $5 \text{ m}^2/\text{s}$.

La schematizzazione della superficie del terreno interessata dal deflusso della piena è stata definita mediante un modello digitale del terreno in grado di rispettarne tutte le particolarità, come le linee di struttura (canali, torrenti, etc.), le linee di rottura (strade, rilevati, argini, etc.) e altri tipi di ostacoli come cave o

avvallamenti. L'alveo inciso del fiume Adda, risultante dalle informazioni geometriche disponibili, è stato inserito all'interno del modello digitale del terreno allo scopo di ben rappresentare tutta l'area in studio.

Tale rappresentazione, sia per quanto riguarda la geometria dell'alveo, che la piana d'allagamento, è da ritenersi adeguata agli scopi del presente studio.

E' bene sottolineare che ad essa possono sfuggire dettagli di un certo rilievo per il deflusso locale, ma che tuttavia in linea generale è compatibile con l'approssimazione fisico-matematica adottata per affrontare la riproduzione fenomeno. Nel presente studio è stato utilizzato un reticolo di calcolo composto da celle irregolari di dimensioni variabili, generando così oltre 8500 celle per la rappresentazione di tutto il dominio di calcolo.

4.4 APPROSSIMAZIONI DEL CALCOLO

Le equazioni di base, impiegate per simulare il moto bidimensionale indotto dalla piena di riferimento nell'area in studio, sono affette da alcune approssimazioni. Innanzi tutto, le due equazioni del moto lungo le direzioni x e y si basano sull'ipotesi che la corrente sia lineare e che quindi la pressione abbia una distribuzione verticale idrostatica.

A livello geometrico la dimensione della maglia, se non sufficientemente piccola, può generare effetti di instabilità al momento in cui un elemento passa dalla condizione di completa immersione ad un parziale asciugamento. Il modello considera appartenente al campo di moto solo gli elementi in cui tutti i nodi presentano un tirante maggiore di zero. Per questo motivo nelle tavole allegate, più oltre presentate, è stato corretto manualmente il cromatismo dell'*output* del modello al fine di evitare incongruenze come quelle evidenziate dalla seguente figura 4-2.

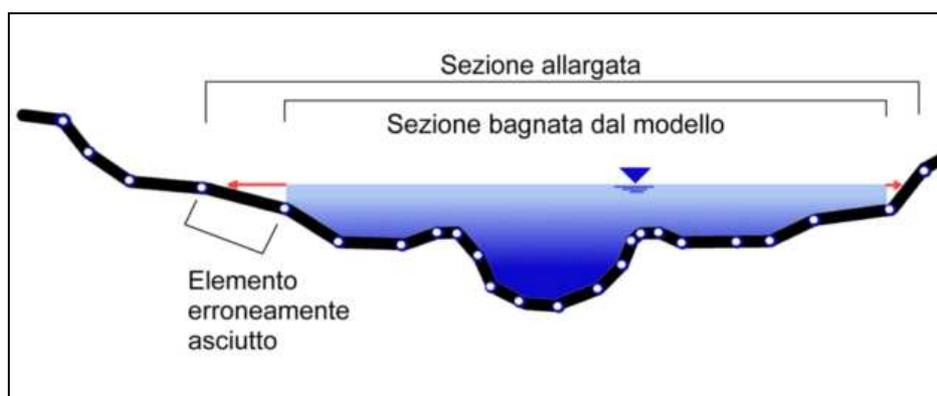


Figura 4-2: Esempio di correzione dell'output grafico

Un'altra importante approssimazione del modello di calcolo risiede nella formula adottata per la resistenza idraulica del fondo, che viene fatta dipendere dal quadrato del modulo della velocità e dal coefficiente di scabrezza di Manning supposto localmente. Se sulla prima dipendenza non ci sono particolari dubbi, dato il carattere turbolento della corrente, sulla dipendenza da un valore costante del coefficiente di Manning esistono non poche incertezze, specialmente per le profondità minori e in presenza di un forte trasporto di materiale solido.

Anche il presente modello comunque contiene incertezze nella definizione dei tiranti idrici e delle velocità della corrente. Infatti la rappresentazione modellistica del territorio è stata spinta ad un grado di dettaglio tale da compendiare le contrastanti esigenze di garanzia di buona qualità dei risultati con un'accettabile stabilità del modello.

In questo modo si sono volute limitare le problematiche connesse a eccessivi appesantimenti del DTM e ai problemi di risoluzione numerica, che di fatto costituiscono, anche per i calcolatori di ultima generazione, uno dei limiti maggiori dell'uso di tali softwares 2D.

Per le medesime problematiche connesse alla complessità del calcolo numerico (elevati tempi di computazione, instabilità) il modello di simulazione idraulica bidimensionale è stato utilizzato in modalità "stazionaria" ovvero permanente nel tempo.

In particolare non si è inserito nel dettaglio ogni singola strada di campagna, che di fatto può costituire un ostacolo alla corrente, o singoli manufatti puntuali come cascinali o altri edifici posti in golena.

Il risultato di tali modelli permette, infatti, di ottenere un'interpretazione adeguata per stimare il comportamento medio della corrente in piena senza la pretesa di raggiungere una corrispondenza millimetrica con la realtà, tenuto anche conto delle incertezze insite nella definizione delle condizioni al contorno, nella fase di calibratura del modello (ad es. la definizione dei parametri di scabrezza e di viscosità) e nella fase di creazione del DTM (incertezza del rilievo, semplificazione della geometria delle strade e di altri ostacoli).

Per i suddetti motivi si è fatta seguire alla fase di modellazione idraulica una fase di interpretazione dei risultati, che ha portato alla redazione delle tavole grafiche allegate tenendo conto di tali ipotesi semplificative. Si è quindi proceduto a ridefinire i contorni bagnati del dominio di calcolo facendo aderire le aree allagate al contorno bagnato presunto.

4.5 TARATURA NUOVO MODELLO BIDIMENSIONALE

La fase di calibratura del modello, ovvero il processo di aggiustamento dei parametri ai fini della convergenza del modello su di una soluzione il più aderente possibile alla realtà, è stato condotto tramite il confronto con i dati disponibili relativi alla piena del Novembre 2002. La procedura di taratura è stata condotta utilizzando il modello bidimensionale dello studio del 2005, non ancora aggiornato con le opere di difesa realizzate ad oggi, e come parametri di taratura, i seguenti aspetti modellistici:

- Scabrezze dell'alveo e delle zone allagate
- Portata massima al colmo
- Condizione al contorno di valle

La risposta idraulica delle aree interessate a qualunque sollecitazione di deflusso è determinata dalla natura dei vari terreni e delle loro diverse coperture, ovvero la vegetazione, o eventuali ostacoli presenti. Alla diversa

natura delle coperture dei terreni sono associabili le specifiche caratteristiche di scabrezza idraulica, determinanti ai fini della simulazione del fenomeno.

Nel caso in esame, la disponibilità di dati idrometrici ha permesso di effettuare una taratura rigorosa; è stato cioè possibile individuare i valori plausibili dei parametri di taratura (scabrezze e viscosità) sulla base delle accurate classificazioni disponibili in letteratura e dei dati forniti dalla cartografia tematica dell'uso del suolo (fonte Regione Lombardia). La valutazione precisa del coefficiente di scabrezza è assai difficile, in quanto esso dipende in generale da molteplici fattori, quali la morfologia dell'alveo, il trasporto di materiale solido da parte della corrente e l'entità della portata e, quindi, del tirante idrico. E' comunque importante sottolineare che il possibile errore nella stima delle scabrezze è normalmente di ordine di grandezza inferiore rispetto ad altre incertezze insite nelle ipotesi di calcolo. Per l'area di studio la scelta dei coefficienti di scabrezza è stata effettuata sulla base delle indicazioni riportate nella tab. 2 contenuta nella Direttiva¹ dell'Autorità di Bacino del Fiume Po. In particolare sono stati assunti distinti valori del coefficiente di scabrezza secondo Manning: ad esempio per l'alveo del fiume si è adottato il valore $n = 0.022 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$; mentre per la zona golenale la non-uniformità della copertura vegetale e la sua variabilità periodica ha richiesto di ricorrere a un valore compreso tra 0.033 e $0.010 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$ (tabella 4-1).

Tabella 4-1: Valori adottati per le scabrezze

| Scabrezze di Manning ($\text{m}^{-1/3}\text{s}$) | Uso del suolo |
|--|--------------------|
| $n = 0.0176$ | ALVEO |
| $n = 0.0264$ | AGRICOLO |
| $n = 0.0350$ | BOSCO |
| $n = 0.0800$ | CASE (urbanizzato) |

Ai fini della simulazione delle perdite di carico localizzate per il passaggio della corrente tra le pile del ponte si è localmente aumentato l'effetto della scabrezza imponendo un valore di Manning pari a circa $0.1 - 0.2 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$.

¹ Piano Stralcio delle Fasce Fluviali (legge 18 maggio 1989, n. 183 e successive e integrazioni, art. 17 comma 6-ter) – Direttiva “Criteri per la valutazione della compatibilità idraulica delle infrastrutture pubbliche e di interesse pubblico all'interno delle fasce A e B”.

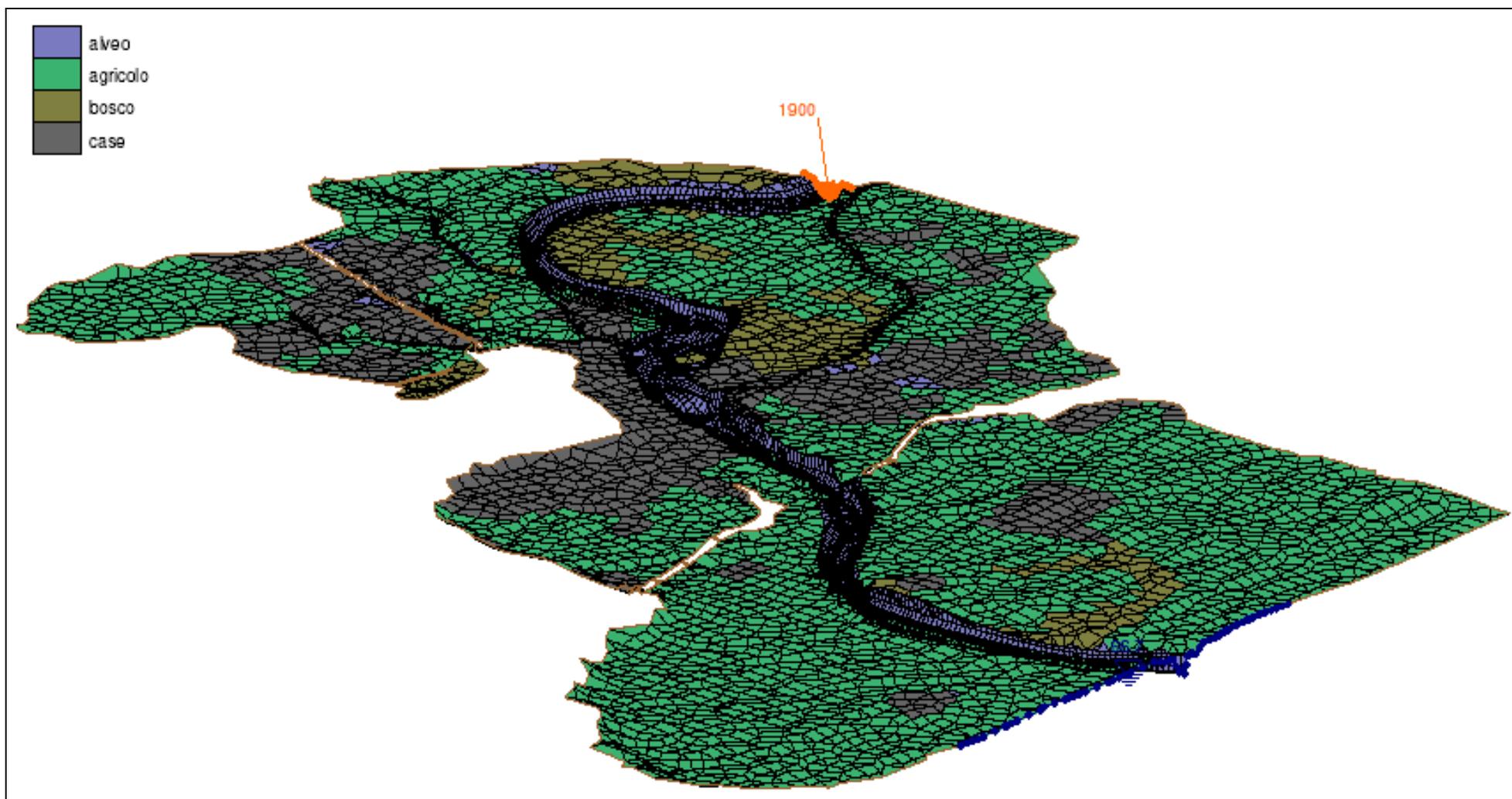


Figura 4-3: Mappa dei parametri di scabrezza omogenei

Le condizioni iniziali sono rappresentate in termini di profondità h e di componenti della velocità u e v prima dell'arrivo dell'onda di piena. Nelle diverse simulazioni effettuate è stata assunta l'ipotesi di alveo inizialmente asciutto e quindi all'istante $t=0$ si ha $h = u = v = 0$ in tutte le celle del dominio di calcolo. Le condizioni al contorno sono da assumere nel seguente modo: date le caratteristiche di corrente lenta, idrogramma $q(t)$ nella sezione di monte, livello idrometrico costante nella sezione di valle.

Ciò premesso, il modello utilizzato richiede una complessa procedura per giungere ad una corretta inizializzazione dei calcoli. La condizione iniziale viene infatti raggiunta per successivi tentativi a partire da un idrogramma a monte di moto permanente (condizione di tipo steady), con portata pari a 3.000 m³/s (ben superiore a quella di calcolo) e da un livello di valle pari a 75.00 m s.m. (quota superiore ad ogni nodo del dominio). A partire da questo scenario iniziale di completo allagamento del dominio di calcolo, si è portato il modello ad una convergenza verso la soluzione ricercata definita dalla aderenza della soluzione numerica alle aree allagate e alle quote idriche massime misurate, in alcuni punti di controllo, durante la piena. Si è operato abbassando per gradi portata di ingresso e condizione al contorno di valle.

Tali abbassamenti progressivi sono stati condotti inizialmente utilizzando un valore di viscosità turbolenta appositamente elevato (superiore a 100 m²/s) al fine di escludere instabilità numeriche.

Ai contorni laterali del dominio di calcolo è stata assegnata una condizione di efflusso nullo imponendo la tangenza delle velocità al dominio lungo i bordi. L'inizializzazione definitiva è stata ottenuta facendo abbassare progressivamente la viscosità sino a valori compresi tra 10 e 2 m²/s che, oltre a rientrare nel range di valori di letteratura, risultano rappresentativi dei fenomeni di turbolenza sulla scala del modello.

In figura 4-4 è riportato l'adattamento dei livelli calcolati nella simulazione finale di taratura ai livelli massimi di piena misurati durante l'evento di piena. Tale simulazione di finale di taratura è stata conseguita immettendo una portata costante in ingresso pari a 1900 m³/s.

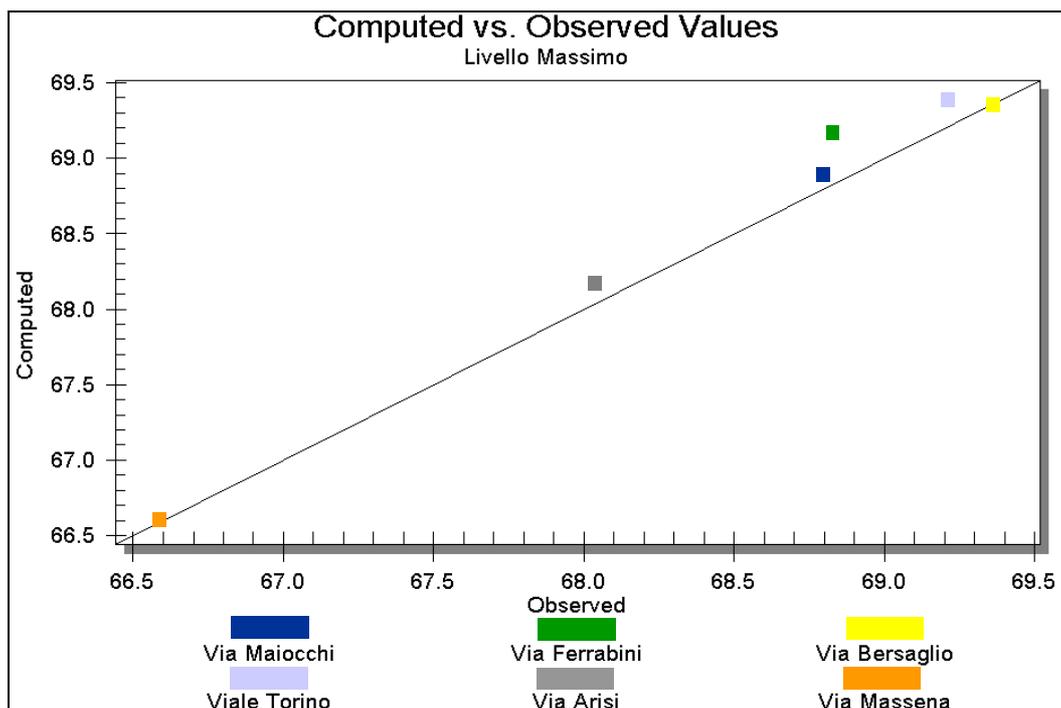


Figura 4-4: Simulazione di taratura. Scostamenti con i livelli massimi misurati

Dalla figura si evince un buon adattamento ai dati misurati, gli scostamenti, comunque contenuti, sono attribuibili all'aver utilizzato un modello a moto permanente che non può necessariamente cogliere la natura transitoria dell'allagamento delle zone golenali e di invaso poste in fregio all'alveo principale.

4.6 CONCLUSIONI

Dai risultati delle operazioni di taratura del modello bidimensionale a moto permanente descritto al presente paragrafo si è potuta ottenere una valutazione numerica della portata di piena del Fiume Adda durante la piena del Novembre 2002.

Tale portata è risultata pari a circa 1900 m³/s a cui è associato un tempo di ritorno di circa 130-150 anni.

La riproduzione delle aree allagate risulta aderente a quanto rilevato con buon adattamento ai massimi colmi rilevati.

Pur nei limiti di aver utilizzato un modello a moto permanente si sono potute approfondire alcune dinamiche di allagamento verificatesi durante la piena, in particolare:

si è verificato che l'allagamento dell' area "Selvagrega" sia causato dal rigurgito dai forni della nuova tangenziale;

si sono verificate velocità pressoché nulle rilevate dal modello nella zone allagate nel quartiere Pratello;

si è ottenuta un stima della portata che ha causato allagamenti a Campo di Marte per lo scavalco del rilevato della strada per Boffalora: circa $80 \text{ m}^3/\text{s}$.

Pur individuando l'andamento dei filoni di corrente secondo i quali la piena divaga nelle aree allagate investite dalla corrente il modello bidimensionale a moto permanente non può ricostruire le dinamiche di sviluppo nel tempo degli allagamenti e quindi cogliere la natura transitoria del fenomeno. In particolare nel tratto di Adda che ricade nel territorio comunale di Lodi tali fenomeni risultano particolarmente rilevanti, ciò trova una conferma dai risultati delle elaborazioni a moto vario condotte dall'Autorità di Bacino del Fiume Po nell'ambito del Sotto Progetto SP1. Nella figura 3-2 riportata al precedente capitolo si evidenzia infatti un sensibile abbattimento del colmo di portata in corrispondenza di Lodi, circostanza che indica una significativa capacità di laminazione della piena di tale tratto fluviale.

Con il modello bidimensionale descritto al presente capitolo non si può valutare l'influenza sullo sviluppo della piena nelle aree allagate caratterizzate da velocità al colmo nulle (aree di invaso) e quindi ricostruire gli effetti sul deflusso della piena di eventuali modifiche apportate alla geometria dell'alveo che prevedono la sottrazione al deflusso di un'area di invaso.

Si è pertanto ritenuto opportuno effettuare ulteriori verifiche mediante modello di moto vario quasi-bidimensionale descritto al successivo capitolo.

4.7 SIMULAZIONE PER TEMPO DI RITORNO PARI A 200 ANNI

Mediante l'applicazione del modello idrodinamico FEWMS, secondo le ipotesi e le modalità sopra illustrate, è stata eseguita la simulazione del campo di moto conseguente al deflusso della portata di riferimento ($T=200$ anni).

In generale, i risultati ottenuti dalla simulazione rispecchiano, in termini di livelli ed aree allagate, quanto già indicato nello studio di aggiornamento del rischio idraulico del 2005 ad eccezione di alcune zone che risentono degli effetti prodotti dalle nuove opere di difesa idraulica realizzate fino ad oggi.

In particolare, dai risultati ottenuti si evince che, in seguito alla realizzazione delle chiaviche sulla roggia Gelata e Gaetana, delle paratoie sulle Rogge Valentina e Sandona e della sistemazione del muretto a nord della porzione centrale di V.le Milano, per eventi con tempo di ritorno duecentennale, viene eliminato il rischio di allagamento nel quartiere “Pratello”.

I risultati ottenuti per il quartiere “Pratello” confermano quanto indicato nello studio di aggiornamento del rischio idraulico del 2005, in cui era evidenziato il fatto che, per eventi di piena duecentennale, realizzando le chiaviche sul reticolo minore (Roggia Gelata e Gaetana), il rischio idraulico del quartiere “Pratello” sarebbe diminuito, ma non debellato completamente. La completa messa in sicurezza dell’area si potrà ottenere solo realizzando le ulteriori opere previste nello studio di aggiornamento del 2005, tra cui la realizzazione di un muretto di difesa lungo parte di Viale Milano ed una paratoia sulla Roggia Sandone all’imbocco di Viale Dalmazia. Proprio per questo, l’Amministrazione comunale di Lodi ha recentemente avviato le procedure per la realizzazione di tali opere, che – data la loro modesta entità – saranno realizzati in tempi brevi. In ogni caso, pur in assenza di tali opere, sia il servizio provinciale di Protezione Civile, che l’Amministrazione comunale stessa, in caso di emergenza, fanno riferimento ad un piano, che prevede, in caso di piena, il posizionamento di sacchi di sabbia in corrispondenza della prevista paratoia sulla roggia Sandona e lungo viale Milano nella zona di piazza Mons. Savarè, quartiere Martinetta. Tali procedure risultano sostitutive delle opere attualmente ancora mancanti.

Inoltre, in seguito alla realizzazione dell’argine in zona ex SICC viene protetta tutta l’area urbana compresa tra l’argine, via Cavallotti e Viale Piave, mentre la realizzazione dell’argine destro a valle del ponte storico ha permesso la messa in sicurezza di tutto il quartiere Borgo Adda e le zone poste vicino al Centro Sportivo “Isola Bella”.

Nelle Tavole da D.05.00 a D.14.00 è riportata l'estensione delle aree allagate per vari tempi di ritorno in termini di livelli, velocità e tiranti della corrente idrica.

5. IL MODELLO QUASI BIDIMENSIONALE

Come anticipato nei paragrafi precedenti, l'impossibilità di cogliere la natura transitoria del fenomeno di allagamento, riproducendo correttamente le dinamiche di sviluppo degli allagamenti nell'area d'interesse mediante un modello di calcolo bidimensionale in moto permanente, ha condotto gli scriventi ad effettuare ulteriori verifiche affiancando il modello 2-D implementato con un modello quasi-bidimensionale in moto vario. In questo modo è stato possibile affinare il calcolo dei volumi realmente defluiti, durante eventi di piena duecentennale, verso aree caratterizzate da velocità al colmo nulle come il quartiere "Pratello". In particolare, l'utilizzo di un modello quasi bidimensionale ha permesso di valutare con maggior precisione lo sviluppo della piena in tali aree e, soprattutto, la caratterizzazione delle grandezze idrauliche necessarie per identificare il grado di rischio idraulico ad esse associato.

5.1 COSTRUZIONE DEL MODELLO

Utilizzando come base di partenza il modello bidimensionale descritto al precedente capitolo, si è ritenuto opportuno effettuare ulteriori approfondimenti ed analisi, relative alla esondazioni causate dalla piena di riferimento (T=200 anni) del Fiume Adda, mediante un modello quasi bidimensionale realizzato con il codice di calcolo HEC-RAS.

Il tronco di Fiume Adda modellato è quello compreso nel territorio del Comune di Lodi (Fig. 6-3).

La geometria del tratto è stata ricavata dal DTM (Digital Terrain Model) utilizzato per la costruzione del modello bidimensionale. Le 30 sezioni estratte dal DTM sono state orientate in modo tale da risultare per quanto possibili ortogonali ai filoni di corrente che sono stati individuati con la simulazione bidimensionale dello stato attuale determinata al precedente capitolo.

Onde evitare che, per l'eccessiva distanza fra le sezioni rilevate, le variazioni del carico cinetico potessero risultare troppo elevate per determinare con sufficiente accuratezza il gradiente della linea dell'energia, si è provveduto ad

un ulteriore infittimento delle sezioni di calcolo condotto per interpolazione delle sezioni rilevate per un totale di circa 240 sezioni di calcolo.

In questo modo si è costruito il tratto dell'Adda (alveo e aree golenali) investito direttamente dalla piena: nella figura seguente si riportano in planimetria le sezioni utilizzate nel modello per descrivere la geometria di tale tratto.

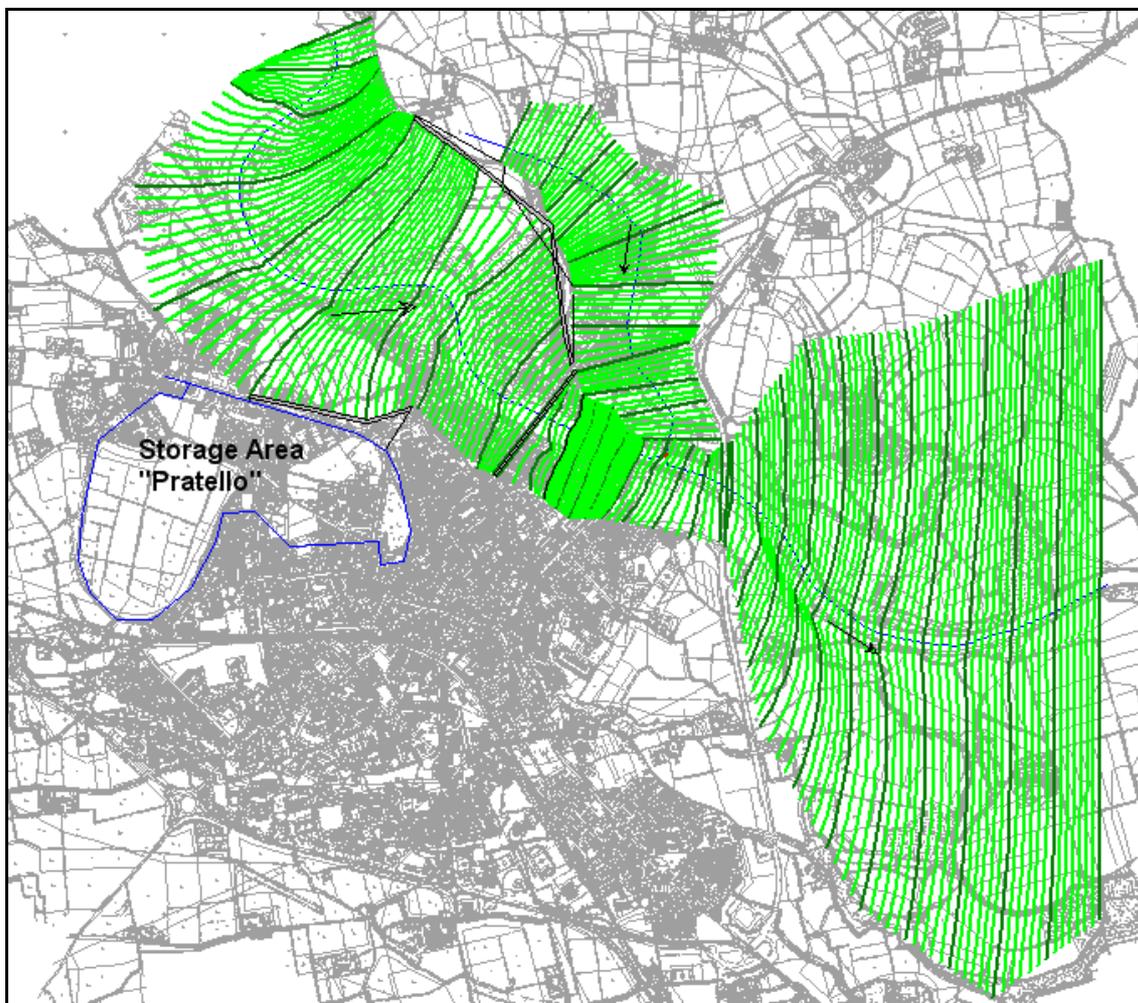


Figura 5-1: Modello quasi bidimensionale del tronco di Fiume Adda compreso nel territorio comunale di Lodi

Al fine di riprodurre in modo corretto gli allagamenti che si verificano durante un evento di piena duecentennale nella zona del “Pratello” è stato inserito nel modello un invaso statico (Storage area) collegato ad uno stramazzo laterale, necessario per modellare viale Milano durante le fasi di scavalco delle acque di piena (Fig. 5-2). La relazione altezze-volumi di invaso utilizzata per modellare l'area d'invaso, riportata in figura 5-3, è stata ricavata dal DTM utilizzato per il modello bidimensionale.

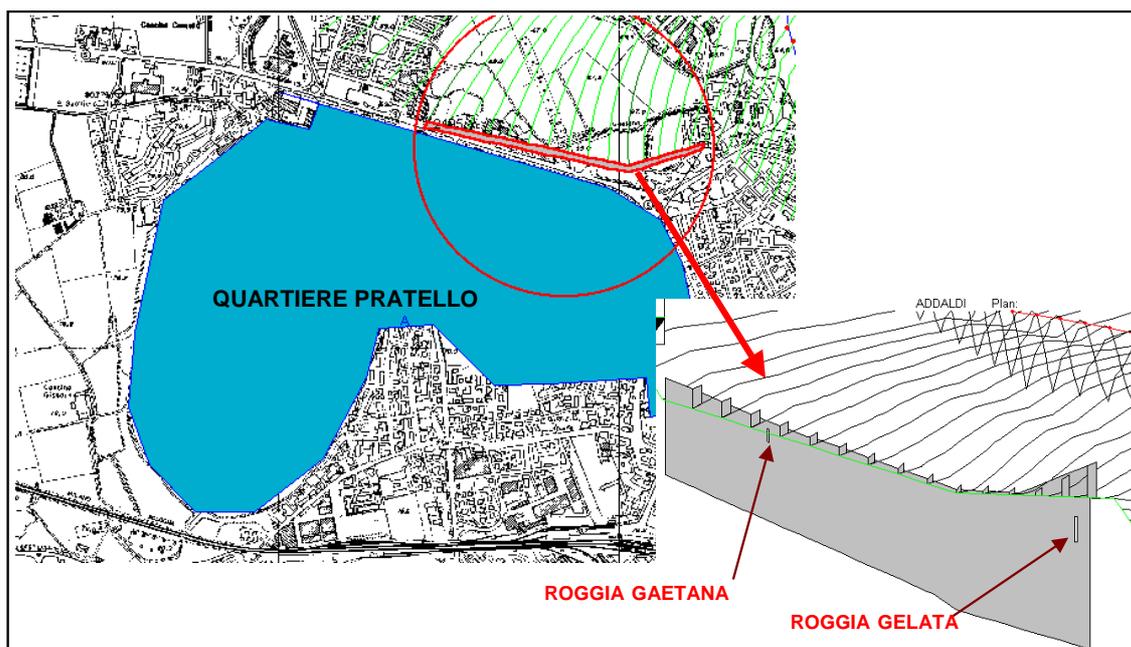


Figura 5-2: Schema idraulico quartiere Pratello

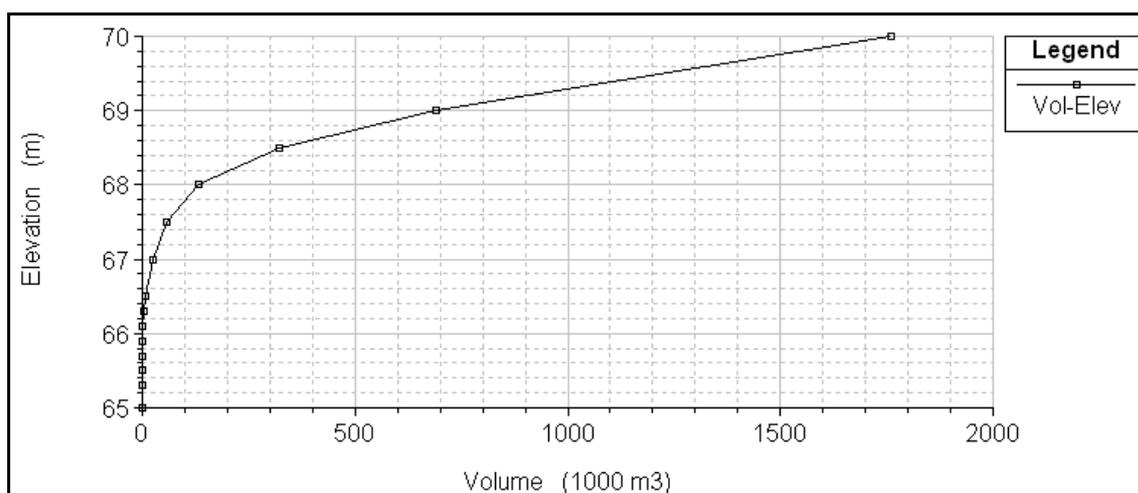


Figura 5-3: Quartiere Pratello - Relazione Altezze-Volumi invasati

Le chiaviche realizzate sul reticolo minore sono state modellate considerando le bocche a battente, comprese nello stramazzo laterale (Viale Milano) e rappresentanti i forni di attraversamento delle rogge Gelata e Gaetana, completamente chiuse. Inoltre, sono state considerate le idrovore a servizio delle chiaviche poste sulla roggia Gelata e Gaetana, rispettivamente:

- n.3 idrovore da 1,5 m³/s;
- n. 2 idrovore da 0,7 m³/s.

Durante le simulazioni, a scopo cautelativo, la capacità complessiva delle idrovore è stata considerata mediamente pari a $2 \text{ m}^3/\text{s}$, considerando in questo modo possibili malfunzionamenti, il funzionamento non simultaneo delle pompe e mantenendo una certa capacità al servizio del sollevamento delle acque affluite nelle rogge da monte.

Naturalmente, con la realizzazione della paratoia sulla Roggia Sandona e con la sistemazione del muretto a nord della porzione centrale di V.le Milano, ovvero con l'attuazione delle procedure d'emergenza (sacchi di sabbia nella zona di chiusura della R. Sandona e sul lato nord di V.le Milano), viene eliminato completamente il rischio idraulico del Quartiere "Pratello".

Per quanto riguarda l'area di campo di Marte è stata inserita nel modello come ramo laterale, secondo lo schema idraulico riportato nella successiva figura 5-5. Il rilevato stradale della SP n 25 Lodi – Boffalora d'Adda è stato inserito come sfioratore laterale dotato di fornici di attraversamento.

Sono inoltre state inserite nel modello le opere in alveo. In figura 5-4 è riportata la vista prospettica del Ponte Vecchio e della briglia posta poco a valle (inserita come sfioratore in linea).

Infine, l'argine sinistro in prossimità dell'area ex SICC e l'argine destro a valle del ponte Storico sono stati modellati tramite apposite strutture chiamate "Levee".

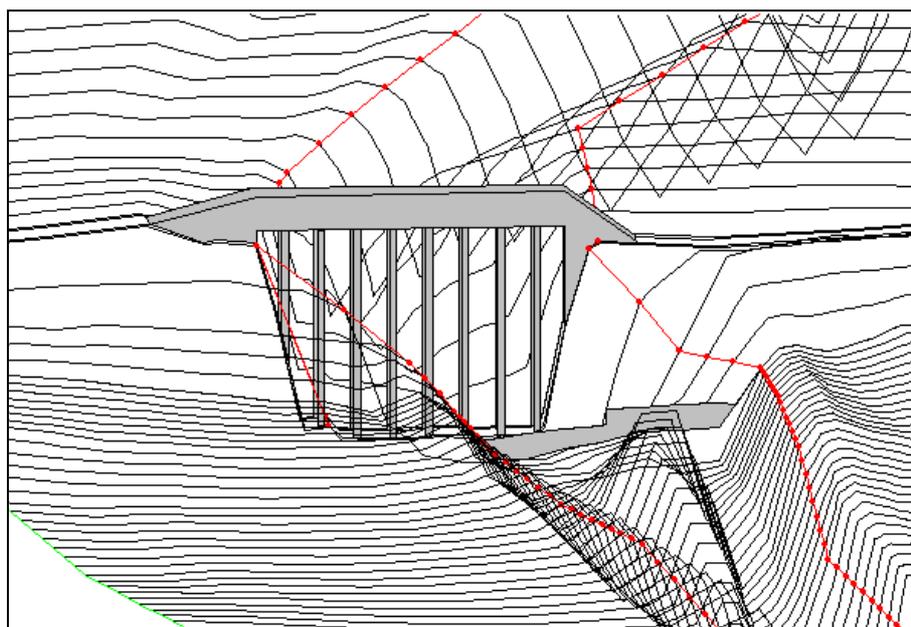


Figura 5-4: Vista Prospettica Ponte Vecchio e Briglia

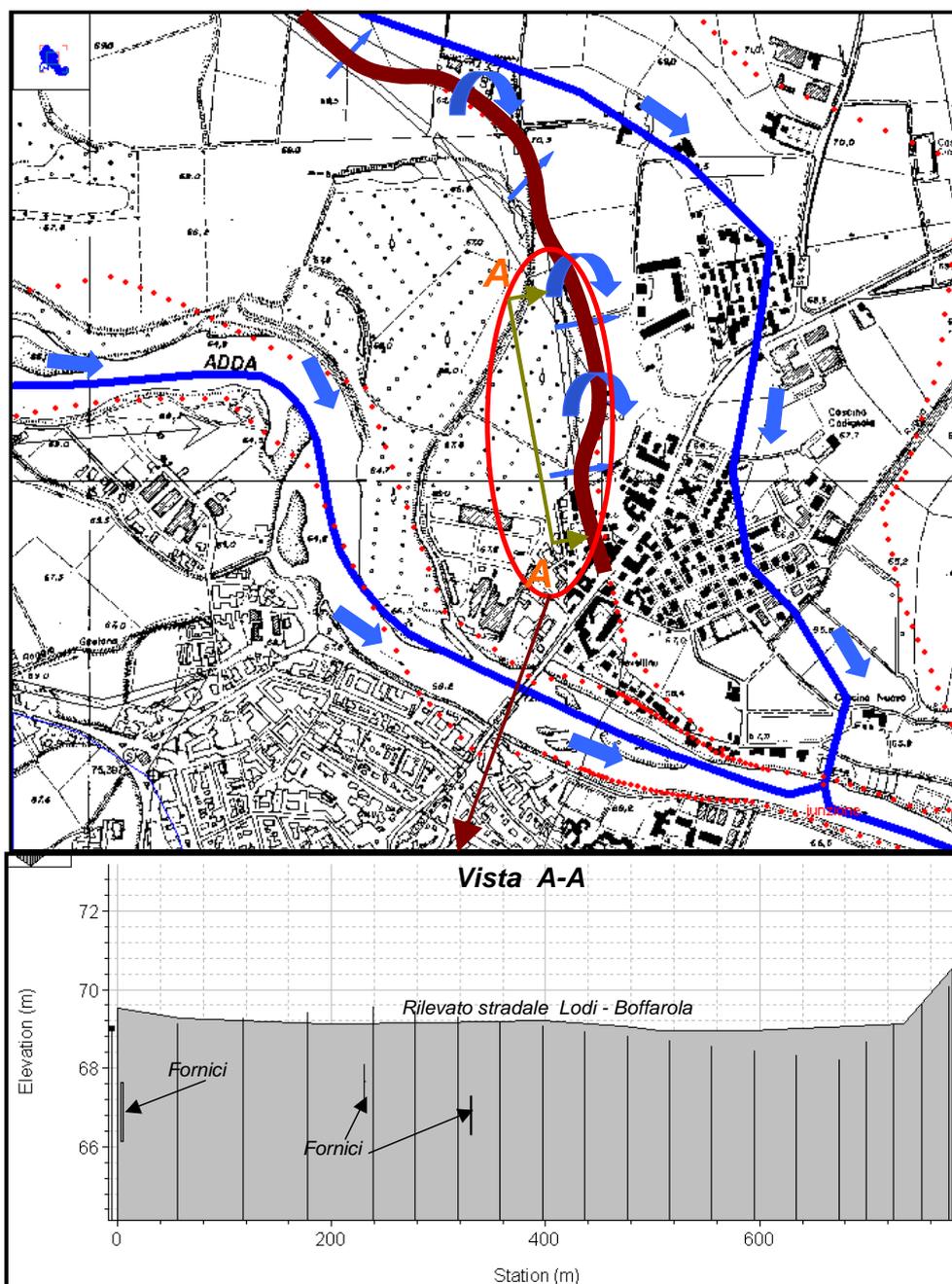


Figura 5-5: Schema idraulico quartiere Campo di Marte

5.2 TARATURA DEL MODELLO

Il modello quasi-bidimensionale è stato accuratamente tarato seguendo la procedura descritta al presente paragrafo ed utilizzando, per la verifica della attendibilità delle ricostruzioni, sia i massimi livelli raggiunti nella piena nei vari punti del territorio comunale di Lodi, sia l'andamento temporale dei livelli idrici registrati dall'idrometro posto in corrispondenza del Ponte Vecchio.

Si sono innanzitutto inserite le scabrezze desunte dal modello bidimensionale ed effettuate delle prime verifiche a moto permanente in modo tale da costruire una scala delle portate in corrispondenza del ponte Vecchio.

L'applicazione di tale scala delle portate ai livelli misurati ha permesso quindi di ricostruire un idrogramma di primo tentativo che è stato utilizzato in ingresso nel modello di moto vario.

La correttezza dell'onda di piena così ricostruita è stata verificata mediante il confronto dei livelli calcolati con quelli registrati in corrispondenza dell'idrometro del Ponte Vecchio. Per successive approssimazioni, mediante una procedura tentativo-errore, si è giunti alla ricostruzione dell'onda in ingresso al modello che riproduce in modo affidabile sia gli allagamenti di piena massimi verificatisi, sia l'andamento dei livelli misurati all'idrometro durante la piena (Figura 14 e 15). La ricostruzione delle dinamiche degli allagamenti, e del loro succedersi del tempo, ha trovato riscontro con le osservazioni dirette effettuate durante la piena dallo scrivente professionista.

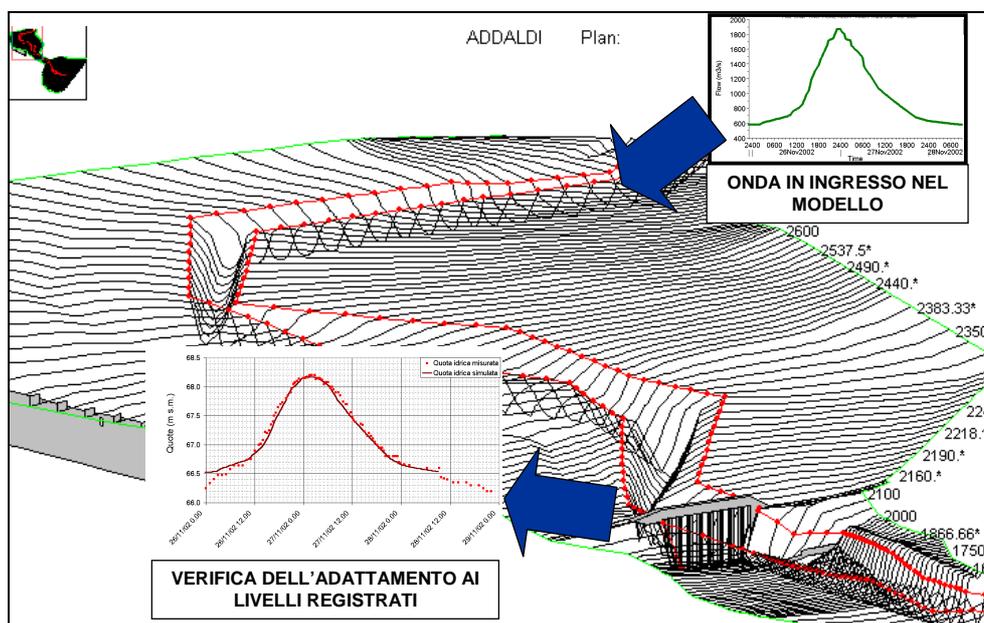


Figura 5-6: Taratura modello monodimensionale a moto vario

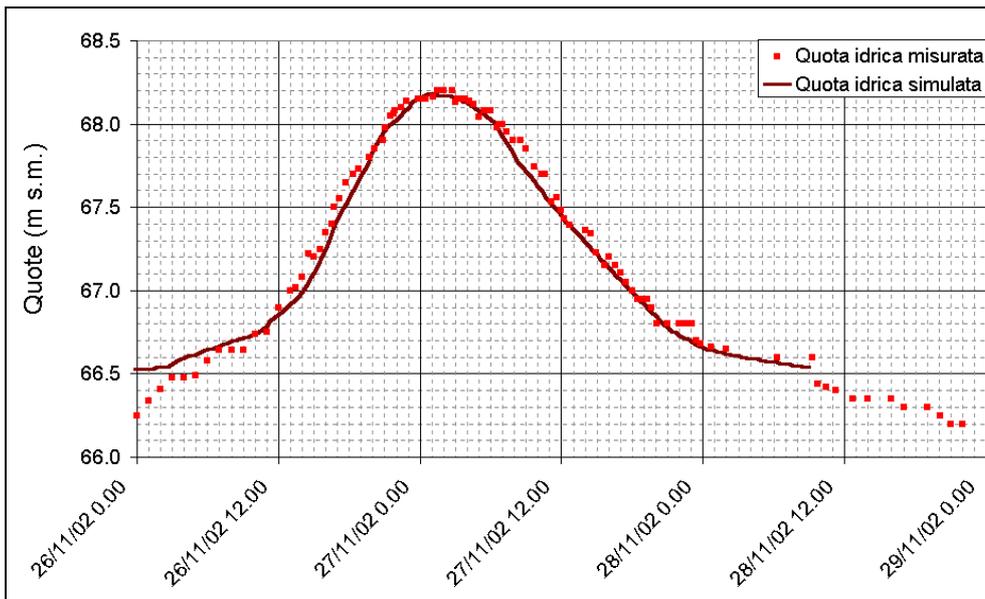


Figura 5-7: Taratura modello monodimensionale a moto vario. Adattamento ai livelli misurati

6. ANALISI DI ALCUNI INTERVENTI TRAMITE MODELLO DI MOTO VARIO MONODIMENSIONALE

Nel presente paragrafo si riporta il riassunto schematico delle simulazioni condotte in moto vario tramite modellazione monodimensionale degli scenari di intervento di mitigazione dei rischi per il territorio comunale di Lodi.

Il riferimento cartografico è contenuto nella tavola degli *Scenari di Intervento: confronto delle simulazioni di piena di progetto in differenti configurazioni di intervento*. Gli interventi sono descritti in 5 scenari di inserimento delle opere:

Scenario 0: configurazione di stato di fatto, in assenza delle opere di difesa idraulica, condizioni geometriche antecedenti il 2005.

Scenario 1: inserimento delle chiaviche e delle paratoie sul reticolo minore (rogge Gaetana, Gelata, Valentina e Sandona) e sistemazione del muretto a nord di V.le Milano per la messa in sicurezza delle aree a sud di V.le Milano stessa; realizzazione dell'argine a difesa dell'area EX Sicc a difesa del comparto a est di via Piave; realizzazione dell'argine destro a valle del Ponte Storico a difesa del Borgo Adda e Zone vicine al centro sportivo Isola Bella.

Scenario 2: abbassamento della briglia a quota 62,50 m s.m. posta a valle del ponte di Lodi per ottimizzare il deflusso delle piene nello snodo idraulico a valle del ponte.

Scenario 3: realizzazione dell'argine lungo la SP 25 a difesa del comparto compreso tra la SP 25, la SS 235 e la SS 427; realizzazione muretto di difesa lungo Viale Milano.

Scenario 4: formazione dell'argine in destra idraulica a protezione della golena destra a monte del ponte; : formazione dell'argine in sinistra idraulica a protezione della golena sinistra tra il ponte Vecchio di Lodi e quello della tangenziale più a valle e interventi di chiusura delle aperture nel corpo del rilevato stradale della tangenziale a protezione del depuratore e della zona della Selvagreca.

Scenario 5: Apertura di una nuova campata del ponte in sinistra idraulica per aumentare la capacità di deflusso delle piene e aumentare i franchi di sicurezza delle difese arginali del tratto a monte del fiume Adda.

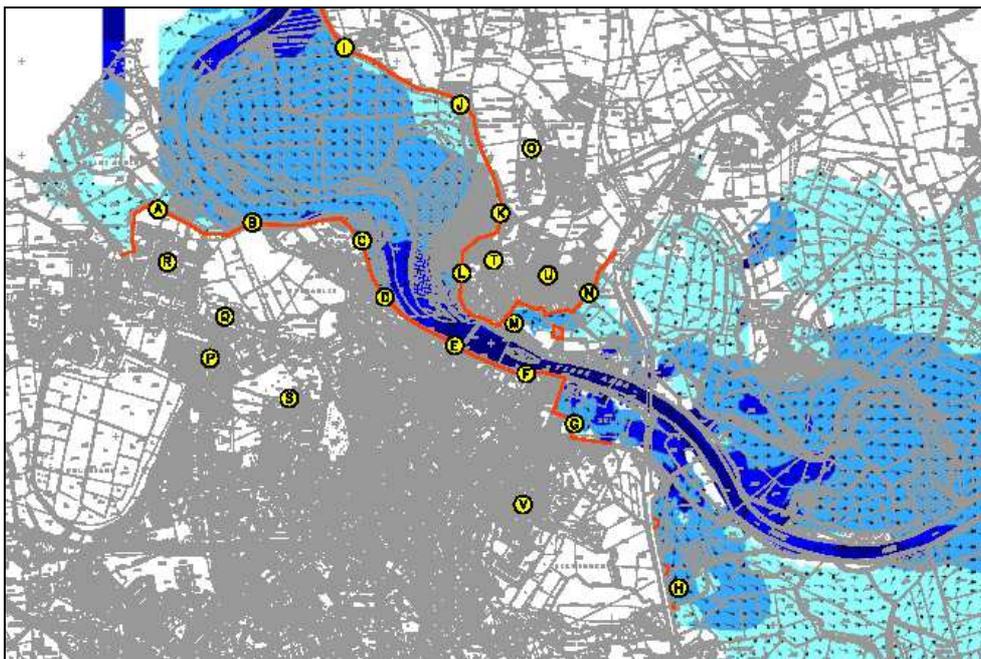


Figura 6-1: Stralcio della tavola D.24.00 allegata al presente studio

La Tavola D.24.00, di cui si riporta un estratto planimetrico, riporta una tavola numerica in cui si evidenzia il beneficio in termini di livelli di piena e velocità della corrente in alcuni punti notevoli (A-V) del territorio. La modellazione idraulica degli scenari di abbassamento della briglia a valle del ponte Vecchio e di apertura della nuova campata è stata validata utilizzando un modellazione 3D a fondo mobile per verificare l'entità dell'escavazione del fondo fluviale nell'intorno del ponte. La modellazione ha permesso di verificare che l'abbassamento della soglia utile per ottimizzare il deflusso della piena è dell'ordine di 1-1.5 m; ulteriori abbassamenti non determinano un aumento della capacità di deflusso delle piene in quanto la condizione di valle a 200 anni di tempo di ritorno è tale da annegare idraulicamente la soglia stessa. Dettagli sulla modellazione 3D è riportata in appendice. La medesima tavola contiene anche un'indicazione della dinamica dell'evento di piena duecentennale in condizione di Stato Attuale, senza ulteriori interventi, come indicazione della sequenza di interessamento delle diverse zone allagate ai fini dell'individuazione di un possibile piano di intervento di Protezione Civile come meglio descritto nel paragrafo successivo.

7. PIANO DI PROTEZIONE CIVILE

In riferimento ai punti riportati nella planimetria precedente la modellazione idraulica in moto vario ha permesso di individuare la sequenza dell'interessamento delle diverse zone del territorio comunale da parte delle acque di piena nelle condizioni di stato di fatto (scenario 1) in assenza delle difese spondali non ancora realizzate o in fase di realizzazione (scenario 2 - scenario 5). Per ogni punto (A-V) viene indicato il battente in funzione della lettura idrometrica riferita al ponte Vecchio.

L'elaborato permette agli organi preposti alla gestione delle emergenze di prevedere in un determinato istante della piena i quartieri che verranno progressivamente interessati per un innalzamento dei livelli e di conseguenza adottare le più opportune mitigazione dei rischi.

Milano, gennaio 2010

IL PROFESSIONISTA INCARICATO

Dott. Ing. Silvio Rossetti

APPENDICE A – IL MODELLO IDRODINAMICO MONODIMENSIONALE

Il pacchetto software HEC-RAS 3.1 (Hydrologic Engineering Center's River Analysis System), elaborato dall' U.S. Army Corps of Engineers è uno strumento di calcolo idraulico monodimensionale dalla consolidata affidabilità, ampiamente utilizzato in campo internazionale e nazionale. HEC-RAS permette di condurre l'analisi idraulica monodimensionale sia a moto permanente che vario. L'interfaccia utente (Graphical User Interface GUI) permette un agevole inserimento di dati e una pronta analisi dei risultati e la possibilità di georeferenziare le sezioni introdotte permette una intuitiva rappresentazione grafica dei risultati.

Il modello a moto permanente, costruito con il codice di calcolo HEC-RAS permette di valutare tutte le grandezze idrauliche di interesse per una corrente gradualmente variata in regime subcritico, supercritico o misto.

Tale codice è basato essenzialmente sull'integrazione, alle differenze finite, dell'equazione dell'energia di una corrente. Le perdite di energia sono valutate mediante il coefficiente di scabrezza di Manning per le perdite distribuite e mediante i coefficienti di contrazione ed espansione della corrente per valutare le perdite concentrate dovute alla variazione della sezione trasversale. Nella simulazione del moto vario il modello utilizza il motore di calcolo UNET sviluppato dal Dr. Robert L. Barkau's, UNET risolve le equazioni complete di de St. Venant utilizzando uno schema di risoluzione implicito alle differenze finite. Tale schema di calcolo è stato sviluppato per il moto vario in corrente subcritica.

Lo schema di risoluzione utilizza il metodo di Newton-Raphson iterativo per risolvere equazioni non lineari. Tale codice di calcolo, comunque, pur utilizzando una soluzione linearizzata, per una corrente subcritica fornisce risultati affidabili e stabili, avendo l'accortezza di utilizzare intervalli di calcolo sufficientemente ridotti. Permette inoltre di simulare in modo efficace le singolarità introdotte nel modello: ponti, tratti tombinati, invasi in linea e in derivazione, sfioratori in linea, sfioratori laterali, luci a battente.

I profili di corrente sono calcolati risolvendo, mediante procedura iterativa (standar step method) la seguente equazione del bilancio dell'energia fra due sezioni:

$$Y_2 + Z_2 + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} = Y_1 + Z_1 + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} + h_e$$

dove:

Y_1, Y_2 : Altezze idriche in corrispondenza delle sezioni 1 e 2

Z_1, Z_2 : Quote dei punti di talweg in corrispondenza delle sezioni 1 e 2

V_1, V_2 : Velocità medie

α_1, α_2 : Coefficienti di perdita

g : Accelerazione di gravità

h_e : Perdite fra le sezioni calcolate con la seguente espressione:

$$h_e = L \bar{S}_f + C \left| \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} - \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} \right|$$

dove:

L : Distanza fra le sezioni pesata sulle portate

S_f : Pendenza della linea dell'energia per le perdite distribuite

C : Coefficiente di espansione o contrazione

Per distanza fra le sezioni pesata sulle portate si intende la lunghezza calcolata con la seguente formula:

$$L = \frac{L_{lob} \bar{Q}_{lob} + L_{ch} \bar{Q}_{ch} + L_{rob} \bar{Q}_{rob}}{\bar{Q}_{lob} + \bar{Q}_{ch} + \bar{Q}_{rob}}$$

dove:

L_{lob}, L_{ch}, L_{lor} : Distanza fra le sezioni specificata rispettivamente per la golena sinistra, per l'alveo e per la golena destra

Q_{lob}, Q_{ch}, Q_{lor} : Somma aritmetiche delle portate defluenti rispettivamente nella golena sinistra, nell'alveo e nella golena destra

- 1 Si ipotizza che il moto si gradualmente variato, ovvero che, in corrispondenza di ciascuna sezione, vi sia una distribuzione idrostatica delle pressioni.
2. In prossimità di singolarità, dove il moto diventa rapidamente variato, il programma utilizza in automatico, invece dell'equazione dell'energia, l'equazione dell'equilibrio delle spinte o altre equazioni empiriche.

3. Il moto è ipotizzato monodimensionale.

Con il supporto del software HEC-RAS, è possibile calcolare, in tutte le sezioni di interesse del modello, le principali caratteristiche della corrente sia in moto permanente che vario. I dati necessari per la costruzione del modello sono i dati geometrici relativi alle sezioni, le distanze fra le sezioni, coefficienti di scabrezza, coefficienti di espansione e contrazione, la descrizione geometrica ed i parametri idraulici di eventuali strutture aggiuntive (ponti, traverse, sfioratori).

Nell'inserimento dei dati relativi alla geometria, HEC-RAS permette di georeferenziare sia il tracciato dell'asta fluviale, sia le sezioni fluviali, permettendo così la costruzione di una visualizzazione prospettica del modello e dei suoi risultati in termini di livelli idrici.

L'opzione "Ineffective Areas" permette di definire, per ciascuna sezione, una porzione della stessa che non partecipa attivamente al deflusso; in tali aree, soggette comunque ad allagamento, la velocità di deflusso è molto prossima allo zero. Il volume invasato è incluso nell'equazione di continuità, ma la porzione di perimetro bagnato relativo a tali aree non partecipa al calcolo delle perdite distribuite.

E' inoltre possibile fissare una quota di disattivazione di tali aree; ovvero quando il livello idrico nella sezione raggiunge o supera tale valore la porzione di sezione viene attivata e partecipa al deflusso.

La contrazione e l'espansione della vena liquida fra due sezioni adiacenti è causa di perdite di carico valutate dal codice di calcolo come concentrate con l'utilizzo di opportuni valori del coefficiente C.

Tipici valori, nel caso di correnti supercritiche variano fra 0.1 e 0.3 per il coefficiente di contrazione e fra 0.3 e 0.5 per il coefficiente di espansione. I valori più elevati sono tipici in prossimità dei restringimenti causati dall'ingombro delle spalle e delle pile dei manufatti di attraversamento.

Tali coefficienti sono quindi utilizzati per valutare le perdite di energia a valle e a monte dei ponti inseriti nel modello. L'area che, a monte e valle dei manufatti di attraversamento, partecipa attivamente al deflusso può essere introdotta nel calcolo mediante il posizionamento nelle sezioni adiacenti di opportune "Ineffective Areas". Il programma ha la capacità di utilizzare

approcci di calcolo differenti per modellare le differenti configurazioni del passaggio della corrente a seconda che l'altezza idrica interessi l'impalcato del ponte e che il deflusso sia in regime di corrente lenta veloce o passi lo stato critico in corrispondenza dell'attraversamento.

Nel caso delle simulazioni effettuate, ovvero di corrente completamente subcritica (Classe A) che non interessa l'impalcato dei ponti, l'effetto di rigurgito indotto dalla presenza delle pile e delle spalle può essere valutato dal programma mediante diverse opzioni:

- 1 - Standard Step Method
- 2 - Bilancio delle spinte
- 3 - L'equazione empirica di Yarnell
- 4 - Il metodo FHWA WSPRO

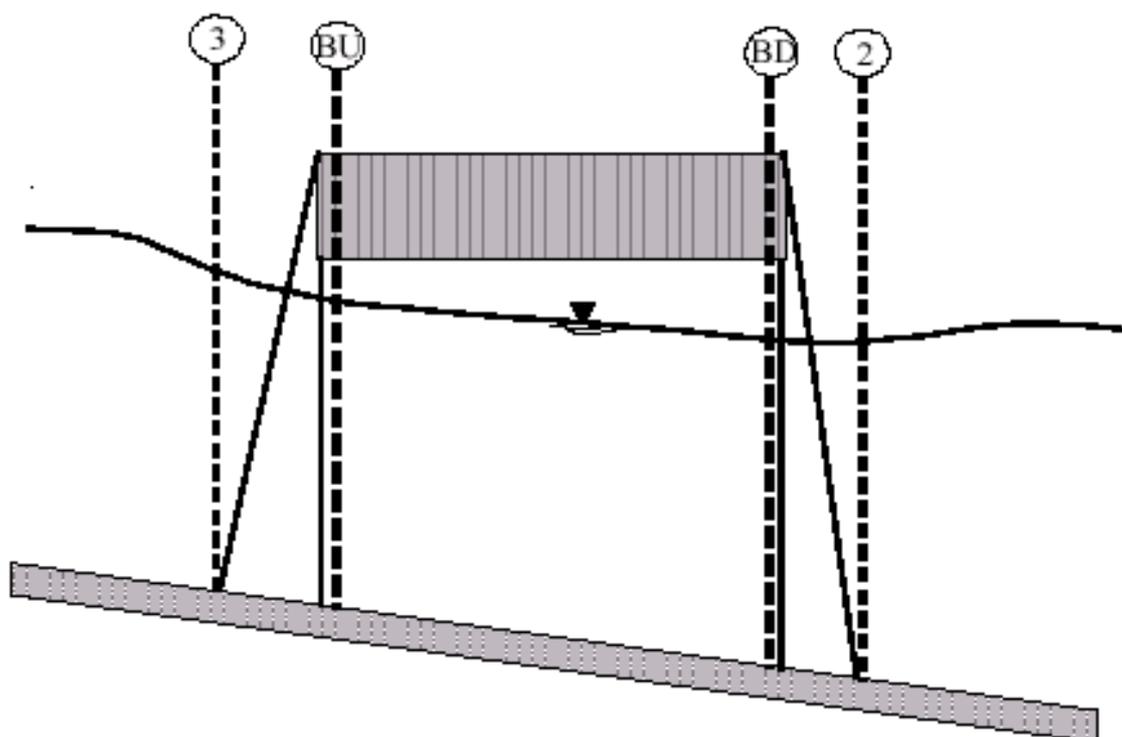


Figura B.1 Profilo in corrispondenza di un ponte.

Nel modello costruito si sono valutate le perdite con la formula empirica di Yarnell. Il livello idrico a monte dell'attraversamento (sez. 3 in figura A.1) è calcolato sommando al livello a valle la quantità:

$$H_{3-2} = 2K(K + 10\omega - 0.6)(\alpha + 15\alpha^4) \frac{V^2}{2g}$$

dove:

- K : Coefficiente di forma delle pile del ponte
 ω : Rapporto fra l'altezza cinetica e quella idrica alla sez. 2
 α : Rapporto fra l'area ostruita dal manufatto e l'area totale alla sez.2
 V_2 : Velocità media alla sez. 2

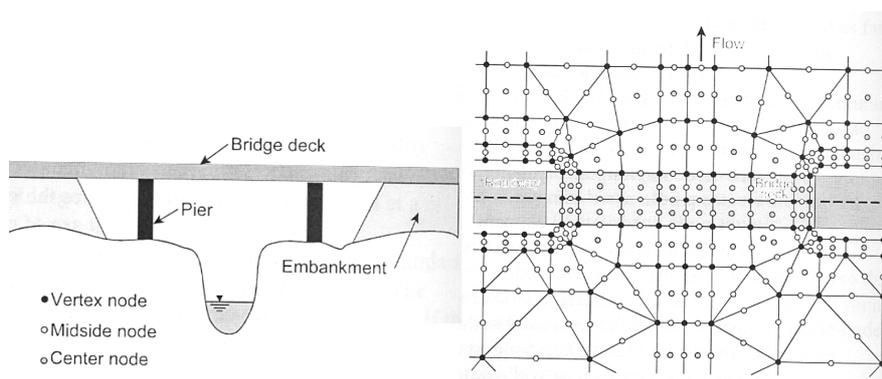
APPENDICE B – IL MODELLO BIDIMENSIONALE

INTRODUZIONE

Il modello utilizzato per lo studio è noto in letteratura come *Flo2DH*, che costituisce il motore di calcolo del modello agli elementi finiti *FESWMS* della U.S. Federal Highway Administration (Froehlich, 1989).

Questo modello matematico simula il campo di moto dell'acqua, e dei sedimenti di tipo non coesivo, in fiumi, estuari e lagune costiere. *Flo2DH* applica la risoluzione delle equazioni idrodinamiche tramite il metodo degli elementi finiti sia in condizioni stazionarie (*steady state conditions*) che in simulazioni dinamiche (*time-dependent conditions*). L'uso di tale modello risulta appropriato in simulazioni in cui le variazioni della componenti della velocità risultano in direzione verticale (z) trascurabile rispetto alle variazioni nelle direzioni orizzontali (x e y). Speciale enfasi è stata posta nell'adattamento del motore di calcolo nella modellazione degli attraversamenti fluviali dati da rilevati stradali dove il comportamento idraulico della corrente risulta essere generalmente complesso per essere studiato con modelli monodimensionale convenzionali. La modellazione bidimensionale fornisce sostanzialmente il valore numerico del livello d'acqua e la distribuzione del flusso di corrente (componenti della velocità nelle direzioni x e y) nel dominio di calcolo una volta definite da parte dell'utente la geometria del modello e le condizioni idrodinamiche al contorno. In particolare i modelli bidimensionali permettono di studiare il campo di moto di una corrente nelle più differenti geometrie. Possibili applicazioni possono riguardare lo studio idraulico della confluenza di due correnti (ad esempio di due fiumi), il moto all'interno di aree golenali, l'effetto di un'isola sulla corrente principale o di qualsiasi altro ostacolo (pile dei ponti, pennelli o altri manufatti), l'interazione delle maree negli estuari o nelle lagune costiere, il campo di moto all'interno di porti o il comportamento di opere idrauliche quali canali deviatori, vasche di calma, scarichi di dighe e manufatti di dissipazione all'interno di impianti idroelettrici. L'uso di tali modelli permette di tenere in conto di differenti aspetti che possono influenzare il comportamento della corrente, quali ad esempio la variazione spaziale della scabrezza del fondo alveo, lo sforzo di taglio dato dal vento, la forza di Coriolis,

lo sforzo di taglio dovuto alla combinazione della corrente con il moto ondos, l'effetto del gradiente di pressione barometrica, ecc. Inoltre è possibile includere effetti su manufatti quali la simulazione delle correnti in pressione sotto i ponti, la resistenza delle pile e dei rilevati, il deflusso attraverso forni, chiaviche e tombinature, con la quantificazione dello scavo nell'intono delle pile dei ponti, dell'erosione e del trasporto di materiale non coesivo, delle zone con tendenza al deposito permettendo di dimensionare le opere di protezione quali scogliere e *rip-rap*.

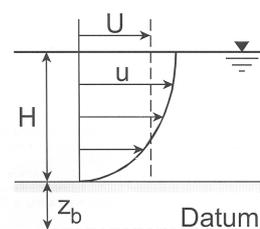


ASPETTI GENERALI DI IDRODINAMICA

Si riportano in questo paragrafo gli aspetti più generali relativi alle equazioni dell'idrodinamica alla base del motore di calcolo di FESWMS².

Velocità media nelle due componenti x e y:

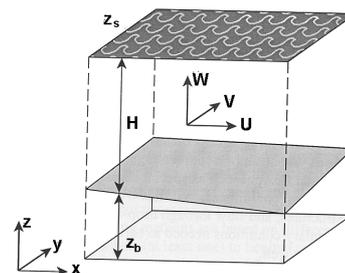
$$U = \frac{1}{H} \int_{z_b}^{z_s} u \, dz \quad V = \frac{1}{H} \int_{z_b}^{z_s} v \, dz$$



Equazione di continuità:

² User's Manual for FESWMS Flo2DH, Publ No. FHWA-RD-03-053 September 2002 – U.S. Department of Transportation – Federal Highway Administration.

$$\frac{\partial z_w}{\partial t} + \frac{\partial q_1}{\partial x} + \frac{\partial q_2}{\partial y} = q_m$$



Equazioni del moto:

$$\begin{aligned} \frac{\partial q_1}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\beta \frac{q_1^2}{H} + \frac{1}{2} g H^2 \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\beta \frac{q_1 q_2}{H} \right) + g H \frac{\partial z_b}{\partial x} + \frac{H}{\rho} \frac{\partial p_a}{\partial x} - \Omega q_2 \\ + \frac{1}{\rho} \left[\tau_{bx} - \tau_{sx} - \frac{\partial(H\tau_{xx})}{\partial x} - \frac{\partial(H\tau_{xy})}{\partial y} \right] = 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial q_2}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\beta \frac{q_1 q_2}{H} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\beta \frac{q_2^2}{H} + \frac{1}{2} g H^2 \right) + g H \frac{\partial z_b}{\partial y} + \frac{H}{\rho} \frac{\partial p_a}{\partial y} + \Omega q_1 \\ + \frac{1}{\rho} \left[\tau_{by} - \tau_{sy} - \frac{\partial(H\tau_{yx})}{\partial x} - \frac{\partial(H\tau_{yy})}{\partial y} \right] = 0 \end{aligned}$$

dove:

$q_1 = UH$, flusso unitario nella direzione x

$q_2 = VH$, flusso unitario nella direzione y

β = coefficiente correttivo di variazione delle velocità lungo la verticale

g = accelerazione di gravità

ρ = densità dell'acqua

p_a = pressione atmosferica

Ω = parametro di Coriolis

τ = componenti di sforzo di taglio, al fondo (τ_b), sulla superficie del pelo libero (τ_s) e sforzi dovuti alla turbolenza tra filetti di fluido (τ_{xx} τ_{xy} τ_{yx} τ_{yy}) determinati dalla viscosità cinematica dovuta alle turbolenze (Eddy Viscosity).

$$\tau_{xx} = \rho \nu_t \left(\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial U}{\partial x} \right), \quad \tau_{xy} = \tau_{yx} = \rho \nu_t \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right), \quad \tau_{yy} = \rho \nu_t \left(\frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial y} \right)$$

Eddy Viscosity:

$$\nu_t = \nu_{t0} + c_{\mu 1} u_* H + c_{\mu 2} |J| \sqrt{\left(\frac{\partial U}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial y}\right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x}\right)^2}$$

ν_{t0} = viscosità cinematica di base (Eddy Viscosity)

c_{μ} = coefficienti adimensionali

$|J|$ = determinante della matrice Jacobiana

La viscosità cinematica viene definita specificando ν_{t0} su valori dell'ordine di 1-10 m²/s con $c_{\mu} = 0$.

IL METODO DI RISOLUZIONE DI GALERKIN

Il metodo agli elementi finiti è una particolare procedura numerica per la risoluzione delle equazioni differenziali utilizzate in problemi di modellistica fisica e di ingegneria. Le grandezze fisiche vengono in questo metodo approssimate da un set di variabili in punti discreti del dominio di calcolo rappresentato da una rete o maglia.

Nel campo della risoluzione delle equazioni idrodinamiche di campi di moto bidimensionali, attraverso l'uso del metodo agli elementi finiti, si ricorda la trattazione condotta da Lee e Froehlich (1986).

Il modello FESWMS utilizza in particolare il metodo di Galerkin³ che prevede l'introduzione di *elementi* (quadrilateri o triangolari) per la suddivisione del dominio di calcolo, individuati da *nod*i di calcolo posti lungo il perimetro e in posizione baricentrica. Le variabili dipendenti (tiranti e velocità) vengono definite ai nodi di tali elementi per poi essere definite sull'intera superficie dell'elemento tramite interpolazioni spaziali.

³ *Finite Element Analysis and Applications*, R. Wait and A.R. Mitchell, 1985, ISBN 0 471 90677 8, John Wiley & Sons

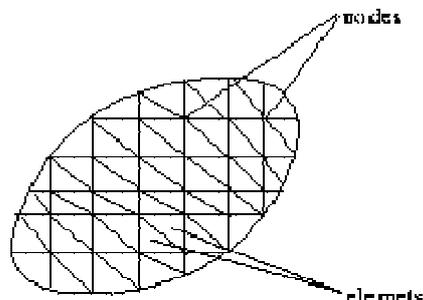
Computational Galerkin Methods, C.A.J. Fletcher, 1984, ISBN 0-387-12633-3, Springer-Verlag

Numerical Computation of Internal and External Flows, Vol. 1, C. Hirsch, 1988, ISBN 0-471-92385-0, John Wiley & Sons

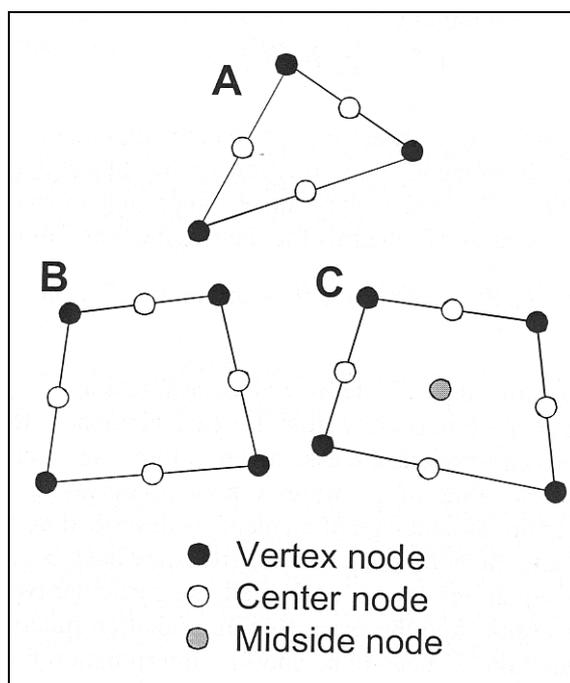
Schaum Outline Series: Theory and Problems of Finite Element Analysis, George R. Buchanan, 1995, ISBN 0-07-008714-8, McGraw-Hill

Per garantire stabilità numerica alla soluzione *Flo2DH* utilizza differenti procedure di interpolazione, in particolare:

- funzioni quadratiche per interpolare le portate specifiche su tutti i nodi del singolo elemento;
- funzioni lineari per interpolare i tiranti solo sui nodi ai vertici dell'elemento.



Il metodo dei pesi residui è la tecnica matematica utilizzata per l'approssimazione della soluzione di equazioni differenziali. In primo luogo si introduce una soluzione numerica di primo tentativo (condizione iniziale) tale da soddisfare globalmente le equazioni differenziali alla base del fenomeno in esame.



Nel caso in particolare di problemi di idraulica bidimensionale ciò significa ipotizzare in termini di tiranti e velocità su tutti i nodi della maglia di calcolo un valore di primo tentativo.

Ovviamente tale condizione iniziale è tanto migliore quanto minore è l'errore che ne deriva dalla risoluzione delle equazioni differenziali utilizzando tali valori di primo tentativo; l'errore introdotto viene chiamato *residuo*.

La soluzione definitiva viene ottenuta tramite processi iterativi finalizzati alla minimizzazione di tali residui. In particolare si introduce una funzione moltiplicativa peso che moltiplicando le equazioni portando ad annullare lo scarto di errore.

Si riporta qui di seguito una trattazione concisa del metodo di Galerkin per la risoluzione approssimata delle equazioni differenziali.

Data un'equazione differenziale nella forma

$$L(u) = 0$$

su di un dominio $D(x,y)$ con date condizioni al contorno

$$S(u) = 0$$

il metodo di Galerkin assume una soluzione u che può essere espressa nella seguente forma

$$u_a = u_0(x,y) + \sum_{j=1}^N a_j \varphi_j(x,y)$$

dove n_j sono le equazioni analitiche (funzioni di base), u_0 è introdotto per soddisfare le condizioni al contorno e i coefficienti a_j sono le incognite da determinare.

Se tale soluzione approssimata viene sostituita nelle equazioni differenziali lineari si individua la grandezza residuo, R , diverso da zero rappresentativa dell'errore tra soluzione e condizione iniziale ipotizzata

$$R(a_0, a_1, \dots, a_N, x, y) = L(u_a) = L(u_0) + \sum_{j=1}^N a_j L(\varphi_j).$$

Tale residuo risulterà diverso da zero fin tanto che la soluzione approssimata u_a contiene un errore residuo che non rende soddisfatta l'equazione iniziale $L(u)=0$. Il metodo di Galerkin determina i coefficienti incogniti a_j risolvendo il seguente sistema di equazioni:

$$(R, \varphi_k) = 0, \quad k = 1, \dots, N$$

Vista la linearità del problema è possibile riscrivere la precedente attraverso una notazione matriciale:

$$\sum_{j=1}^M \alpha_j (L(\varphi_j), \varphi_k) = -(L(u_0), \varphi_k)$$

Sostituendo in α_j i valori di u_a si ottiene di conseguenza la soluzione approssimata. Il metodo dei pesi residui parte dalla soluzione approssimata e tenta di minimizzare l'errore tra soluzione vera e soluzione approssimata:

$$R = T_{true} - T_{approx}$$

$$L(u) = q$$

$$R(\tilde{u}) = L(\tilde{u}) - q \neq 0$$

$$\int_{\Omega} w_i(\vec{x}) R(\tilde{u}) d\Omega = 0$$

$$\int_{\Omega} w_i(\vec{x}) L(\tilde{u}) d\Omega = \int_{\Omega} q w_i(\vec{x}) d\Omega$$

La soluzione approssimata nella notazione di Galerkin viene pertanto espressa nella seguente forma:

$$\tilde{u}(\vec{x}, t) = \sum_I u_I(t) N_I(\vec{x}) \quad (I = 1, \dots, M)$$

APPENDICE C – LA MODELLAZIONE TRIDIMENSIONALE

Simulation of Sediment movements in water intakes with MULTIBLOCK OPTION

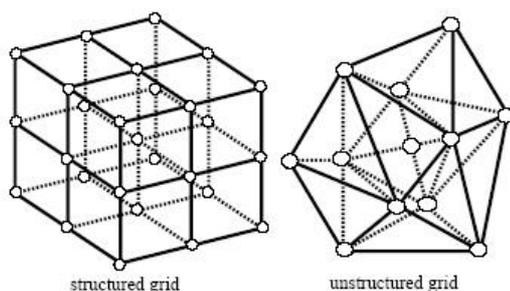
Premessa

Il programma SSIIM è stato sviluppato a partire dagli inizi degli anni '90 dal dipartimento di Ingegneria Idraulica all'Istituto di Tecnologia Norvegese di Trondheim.

L'abbreviazione SSIIM deriva da "Simulazione di movimenti di sedimenti in opere di presa (intakes) con l'opzione multiblock". Attualmente il programma è oggetto di continui adeguamenti e revisioni finalizzati all'introduzione di nuovi moduli di calcolo e all'aggiornamento dell'interfaccia grafica.

Il programma è nato come supporto alla modellazione idraulica in problemi ingegneristici quali le problematiche della sedimentazione in fiumi e bacini artificiali. Inizialmente il programma è nato per la simulazione dei movimenti dei sedimenti al fondo in geometrie riconducibili a fiumi e canali artificiali. L'uso di tale programma è stato accoppiato alla modellazione fisica dei processi di sedimentazione in laboratorio dimostrandone ampiamente l'utilità tecnica di tale supporto alla progettazione. In seguito l'uso di tale modello è stato esteso ad altri problemi progettuali quali i manufatti di scarico negli invasi artificiali, la perdita di carico in condotte, problemi di torpidità nelle correnti e problemi di qualità.

La principale caratteristica del modello SSIIM, confrontandolo con altri modelli computazionali di fluidodinamica, è la capacità di modellare il trasporto solido delle correnti con letto mobile in geometrie complesse. Il modello permette di studiare differenti granulometrie contemporaneamente, sia per i sedimenti depositati che per quelli in sospensione, con la possibilità di includere gli effetti delle forme di fondo. Le ultime versioni del modello premettono di includere la modellazione di parziali asciugamenti della maglia di calcolo e di simulare morfologie complesse in griglie di tipo "non strutturato".



Negli ultimi anni, SSIIM è stato utilizzato anche per modellare alcuni parametri biotici per alcuni studi sugli habitat dei fiumi (concentrazione di ossigeno per impianti di allevamento ittici, fitoplancton, crescita algale, ecc.)

Il modello

Il programma utilizza le equazioni di Navier-Stokes discretizzate spazialmente ai nodi di una maglia di tipo tridimensionale non ortogonale⁴.

La discretizzazione del dominio è condotta all'interno di un cosiddetto volume di controllo mentre la risoluzione numerica si basa su di uno schema numerico a legge di potenza oppure del secondo ordine. Il metodo SIMPLE⁵ è utilizzato per il calcolo della pressione mentre un risolutore di tipo implicito è utilizzato per definire la velocità nel dominio in esame. Le velocità vengono utilizzate dal modello per risolvere poi le equazioni di diffusione-convezione per le differenti granulometrie di sedimenti dati in ingresso al programma. Il programma è anche in grado fornire un'analisi dell'efficienza della capacità di trattenuta dei sedimenti (trap efficiency) e l'andamento del deposito all'interno della maglia di calcolo.

L'interfaccia utente del programma permette di rappresentare il campo di moto (vettori delle velocità) e le variabili scalari (pressioni, viscosità di Eddy, ecc.) in una rappresentazione bidimensionale (planimetrica o lungo sezioni verticali, trasversali o longitudinali). Il modello include inoltre dei moduli di

⁴ Olsen, N. R. B. (1999) "Class notes: CFD in Hydraulic and Sedimentation Engineering" Norwegian Univ. of Science and Technology

⁵ "Solution to two-dimensional Incompressible Navier-Stokes Equations with SIMPLE, SIMPLER and Vorticity-Stream Function Approaches. Driven-Lid Cavity Problem: Solution and Visualization.", Maciej Matyka, University of Linköping, CFD Project Report #3, 6.V.2003

preprocessing per la realizzazione della maglia di calcolo e la creazione del modello digitale del terreno e l'interpolazione dell'informazione topologica derivante dai rilievi.

Nei paragrafi successivi si riporta una descrizione generale delle basi teoretiche e delle ipotesi modellistiche contenute nel codice SSIIM. Si rimanda alla bibliografia richiamata nelle note per ogni ulteriore approfondimento.

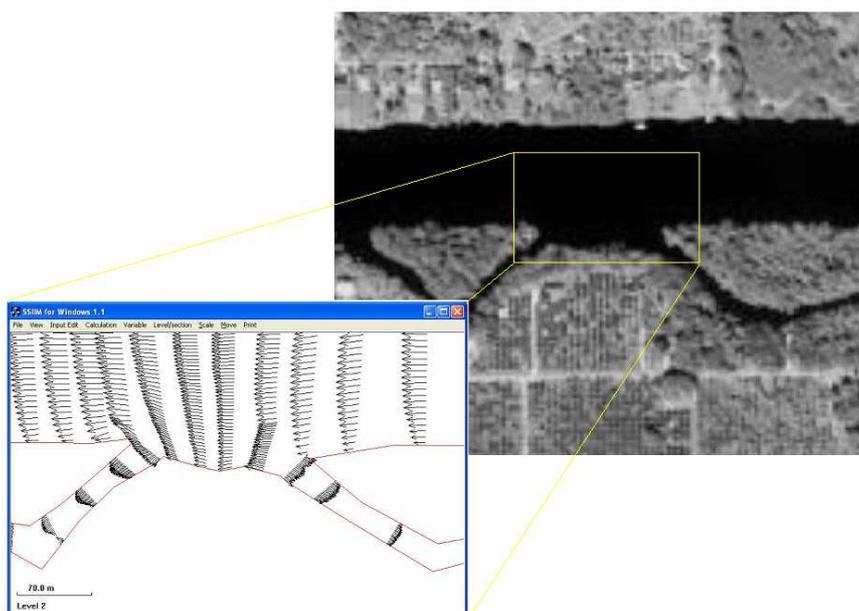


Figura 7-1 Esempio di modellazione tramite SSIIM - da Caloosahatchee River Oxbows Research Project , A. Pagani (2003)

Modello numerico

Le equazioni di Navier-Stokes

Il calcolo delle velocità all'interno della maglia viene svolto risolvendo le equazioni di Navier-Stokes per correnti di tipo turbolento. Il modello utilizzato per il calcolo dello sforzo di taglio in corrente ass. turbolenta è quello denominato $\bar{k}\epsilon$; è comunque possibile utilizzare a tal fine un modello. La formulazione è stata stabilita da Navier nel 1822 e da Poisson nel 1829 sulla base di alcune considerazioni concernenti le foze intermolecolari. Successivamente Saint-Venant nel 1843 e Stokes nel 1845 la ristabilirono supponendo la linearità tra sforzi e velocità di deformazione conformemente

alla relazione di Newton⁶. Le equazioni di Navier-Stokes per fluidi non comprimibili e a densità costante possono venire descritte dalla seguente formula:

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} (-P \delta_{ij} - \rho \overline{u_i u_j})$$

dove il primo termine della parte sinistra dell'equazione è denominato termine di moto vario o transitorio, dipendente dal tempo, mentre il termine successivo è detto termine convettivo. Nella parte destra dell'equazione compaiono invece termini detti di pressione e di sforzo di Reynolds.

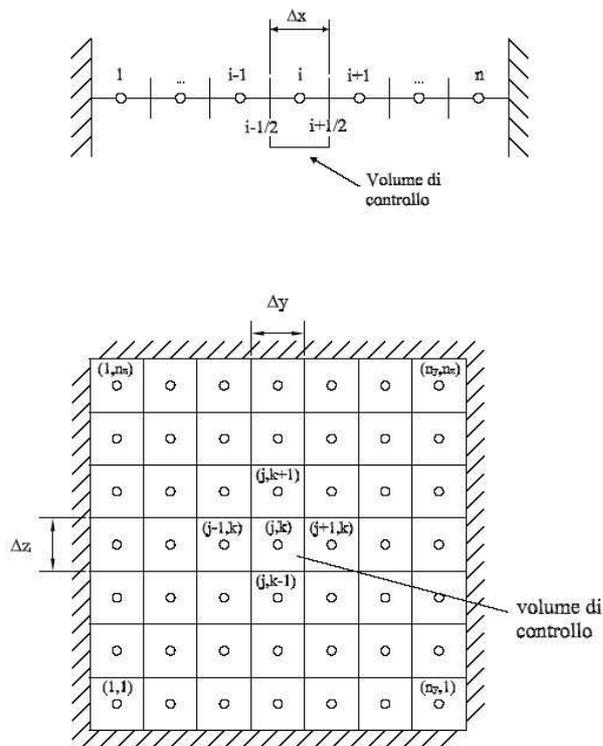


Figura 7-2 Volume di controllo nel caso monodimensionale e bidimensionale

⁶ Citrini, D., Nosedà, G. (1975) IDRAULICA.

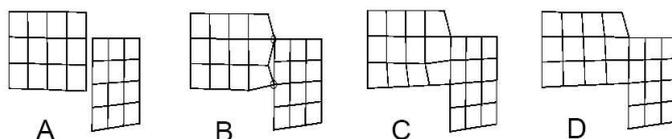


Figura 7-3 Creazione di una maglia multiblock

L'equazione viene discretizzata secondo la nota rappresentazione del volume di controllo applicato alle tre dimensioni i, j e k (in figura). Un risolutore di tipo implicito viene utilizzato, in particolare viene utilizzato anche nel caso di griglie multiblock.

Il modello k - ϵ

Il termine dato dallo sforzo di Reynolds viene descritto attraverso un modello di turbolenza denominato κ - ϵ che tiene conto della viscosità di Eddy.

$$-\overline{u_i u_j} = \nu_T \left(\frac{\partial U_j}{\partial x_i} + \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) + \frac{2}{3} k \delta_{ij}$$

Il primo termine a destra dell'equazione costituisce il termine diffusivo dell'equazione di Navier-Stokes. Il secondo termine di destra è invece spesso omissso nel calcolo, ma può comunque essere incluso modificando opportunamente il file control in cui l'utente del programma definisce ogni parametro per la risoluzione del problema. Il terzo termine include come grandezza la pressione, quest'ultima è di solito sufficientemente piccola da permettere di considerarlo nullo.

La viscosità di Eddy, parametro rappresentativo delle dissipazioni energetiche tra i filetti di fluido della corrente, segue il modello $\tilde{k}\epsilon$:

$$\nu_T = c_\mu \frac{k}{\epsilon}$$

è il l'energia cinetica definita nella seguente formula:

$$k \equiv \frac{1}{2} \overline{u_i u_i}$$

il termine K viene modellato nella seguente forma differenziale:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{v_T}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + P_k - \varepsilon$$

dove P_k è dato da:

$$P_k = v_T \frac{\partial U_i}{\partial x_i} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_i} + \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right)$$

La dissipazione del termine di energia cinetica k segue la seguente equazione:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + U_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{v_T}{\sigma_k} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} P_k + C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k}$$

In quest'ultima equazione i termini C sono da intendersi costanti e non modificabili dall'utente. Come premesso il modello $\tilde{k}\varepsilon$ è quello predefinito dal motore di calcolo.

Influenza della variazione della densità

L'effetto della variazione di densità all'interno del campo di moto è tenuto in conto introducendo un valore variabile della viscosità di Eddy, ottenuto moltiplicando per un opportuno termine⁷ dipendente dalla velocità e dai gradienti di concentrazione dei sedimenti.

$$v_T = v_{T,0} \left[1 + \beta \left(-\frac{g}{\rho} \frac{\frac{\partial \rho}{\partial z}}{\langle \frac{\partial U}{\partial z} \rangle^2} \right) \right]^\alpha$$

In questa formulazione β è una costante pari a 10, ρ è la densità della miscela acqua/sedimenti, U è la velocità, z è la variabile geometrica nella direzione verticale, g è la costante gravitazionale e α è una costante pari a -0.5 . Le due costanti α e β contenute nella formula possono venire opportunamente cambiate per tenere conto di un valore minore di viscosità, ad esempio per modellazioni di differenti tipi di fluidi.

Legge alle pareti

La legge al contorno del dominio segue la modellazione di una parete a contatto con un fluido secondo la formulazione di Schlichting⁸:

$$\frac{U}{u_x} = \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{30y}{k_s} \right)$$

⁷ Rodi, W. (1980) "Tulence models and their application in hydraulics", IAHR State of the art paper.

⁸ Schlichting, H. (1979) "Boundary layer theory", McGraw-Hill

il termine κ_s è la scabrezza individuata dal diametro delle particelle al fondo definite dall'utente. Il modello è in grado di tener conto di una variazione di tale scabrezza all'interno del dominio di calcolo.

Influenza della concentrazione dei sedimenti e qualità

Per quanto riguarda la modellazione del trasporto solido si è scelto di rifarsi alle due seguenti ipotesi, generalmente accettate in ambito scientifico:

si ipotizza un moto al fondo dato da una movimentazione a salti delle particelle. Questo implica una locale variazione della velocità della corrente in quanto parte dell'energia del filetto di fluido viene trasmesso alla particella per muoverla. Il processo di dissipazione energetico viene modellato in termini di un aumento della scabrezza secondo la formulazione proposta da Einstein e Ning Chen⁹, a seguito delle loro sperimentazioni sulla misura delle distribuzioni delle velocità in funzione della concentrazione dei sedimenti. Tale formula è data dalla seguente espressione.

$$\kappa = \kappa_0 \frac{1}{(1 + 2.5c)}$$

Il processo di aumento della densità del fluido in funzione della concentrazione dei sedimenti sospesi viene modellata introducendo un termine aggiuntivo nell'equazione di Navier-Stokes:

$$\rho_s g \frac{\partial c}{\partial z}$$

Il modello SSIIM, come premesso, è in grado di simulare processi convettivi-diffusivi per lo studio di problemi di qualità dell'acqua.

L'equazione utilizzata è la seguente:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + U_j \frac{\partial c}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_T \frac{\partial c}{\partial x_j} \right)$$

L'obiettivo originario perseguito dagli implementatori del modello era quello di fornire all'utente un modello il più flessibile possibile in modo da poter definire le singole costanti di reazione e decadimento della grandezza in esame

⁹ Einstein, H. A. and Ning Chien (1955) "Effects of heavy sediment concentration near the bed on velocity and sediment distribution", UCLA – Berkeley, Inst. Eng. Research

(ad es. temperatura, concentrazione dell'ossigeno e dell'azoto...) Si rimanda al manuale utente per maggiori dettagli in merito¹⁰.

Il trasporto dei sedimenti

Il calcolo del trasporto di sedimenti avviene separatamente per ciascuna frazione granulometrica. I parametri richiesti all'utente sono, per ciascuna frazione, la dimensione della particella e la velocità di caduta. Esistono due differenti modi per definire la portata solida in ingresso: un modo è quello di definire una portata solida [kg/s] per ciascuna frazione granulometrica, il modello utilizza poi la notazione di Hunter-Rouse per determinare la concentrazione de sedimenti nella direzione verticale. Il metodo alternativo è quello di specificare in un opportuno dataset la concentrazione in un tratto del contorno del dominio modellato in termini di frazione volumetrica.

Il trasporto solido viene tradizionalmente diviso in trasporto al fondo e sospeso.

Il carico sospeso viene calcolato con l'equazione di convezione-diffusione:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + U_j \frac{\partial c}{\partial x_j} + w \frac{\partial c}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_T \frac{\partial c}{\partial x_j} \right)$$

dove w è la velocità di caduta della particella sospesa. Il coefficiente di diffusione Γ è desunto dal modello $k-\epsilon$.

$$\Gamma = \frac{v_T}{Sc}$$

Sc è il cosiddetto numero di Schmidt, di solito posto pari a 1 ma eventualmente modificabile dall'utente.

Per il carico sospeso Van Rijn¹¹ (1987) ha sviluppato una formulazione per la determinazione della concentrazione di equilibrio dei sedimenti, c_{bed} , in prossimità del fondo:

$$c_{bed} = 0.015 \frac{d^{0.3} \left[\frac{\tau - \tau_c}{\tau_c} \right]^{1.5}}{a \left[\frac{(\rho_s - \rho_w) g}{\rho_w v^2} \right]^{0.1}}$$

¹⁰ Olsen, N. R. B. (2002) "A three-dimensional numerical model for simulation of sediment movements in water intakes with Multibloc Option", Norwegian Univ. of Science and Technology

¹¹ van Rijn, L. C. (1987) "Mathematical modelling of morphological processes in the case of suspended sediment transport", Ph. D Thesis, Delft Univ. of Technology

Il diametro della particella è dato dal termine d , a è pari all'altezza della scabrezza, τ è lo sforzo di taglio al fondo, τ_c è lo sforzo critico per la movimentazione dei sedimenti secondo la curva di Shield, ρ_w e ρ_s sono pari alla densità dell'acqua e dei sedimenti, ν è la viscosità dell'acqua e g è la costante gravitazionale.

Per tenere conto dell'effetto di riduzione dello sforzo di taglio critico su fondo inclinato si ricorre al fattore K secondo la teoria di Brooks¹²:

$$K = -\frac{\sin\phi \sin\alpha}{\tan\theta} + \sqrt{\left(\frac{\sin\phi \sin\alpha}{\tan\theta} - \cos^2\phi\right) \left[1 - \left(\frac{\tan\phi}{\tan\theta}\right)^2\right]}$$

dove α è l'angolo tra la linea di flusso della corrente e la normale al piano inclinato. ϕ è l'inclinazione del piano mentre θ è un parametro funzione della pendenza.

In aggiunta al carico sospeso, il carico al fondo, q_b , viene calcolato con la formula empirica di Van Rijn:

$$\frac{q_b}{D_{50}^{1.5} \sqrt{\frac{(\rho_s - \rho)g}{\rho}}} = 0.053 \frac{\left[\frac{\tau - \tau_c}{\tau_c}\right]^{1.5}}{D_{50}^{0.3} \left[\frac{(\rho_s - \rho)g}{\rho \nu^2}\right]^{0.1}}$$

L'altezza delle forme di fondo Δ è data dalla seguente espressione:

$$\frac{\Delta}{d} = 0.11 \left(\frac{D_{50}}{d}\right)^{0.3} \left(1 - e^{\left[\frac{\tau - \tau_c}{2\tau_c}\right]}\right) \left(25 - \left[\frac{\tau - \tau_c}{\tau_c}\right]\right)$$

dove d è il tirante idrico e la scabrezza effettiva K_s è calcolata nel seguente modo:

$$k_s = 3D_{90} + 1.1\Delta \left(1 - e^{\frac{25\Delta}{\lambda}}\right)$$

dove λ è la lunghezza della forma di fondo.

¹² Brook, H. N. (1963), discussion of "Boundary Shear Stresses in Curved Trapezoidal Channels", by A. T. Ippen and P. A. Drinker, ASCE Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 89, No. HY3.

**APPENDICE D – PIENA ADDA A LODI – NOVEMBRE 2002 - SELEZIONE
FOTOGRAFICA**



Viale Dalmazia



Il ponte sull'Adda



Il ponte sull'Adda



Piarda Ferrari



Il ponte sull'Adda



Il fiume Adda



Croce Rossa



Viale Milano



Via del Capanno



Bosco Isolabella



Il fiume Adda



La piena dell'Adda, veduta del ponte