

TORRENTE CHIARAVAGNA

**PIANO DI BACINO STRALCIO
PER LA TUTELA DAL RISCHIO IDROGEOLOGICO**
(ai sensi dell'art. 1, comma 1, del D.L. 180/1998 convertito in L. 267/1998)



Allegato C – Studio di approfondimento idraulico del T. Chiaravagna: analisi degli interventi di sistemazione previsti sotto l'aspetto morfodinamico (2014)

APPROVAZIONE	Delibera del Consiglio Provinciale di Genova n. 18 del 30/07/2013
ULTIMA MODIFICA DELL'ELABORATO	Delibera di Giunta Regionale n. 111 del 13/02/2017
ENTRATA IN VIGORE	BURL n. 10 dell'8/03/2017 – parte II

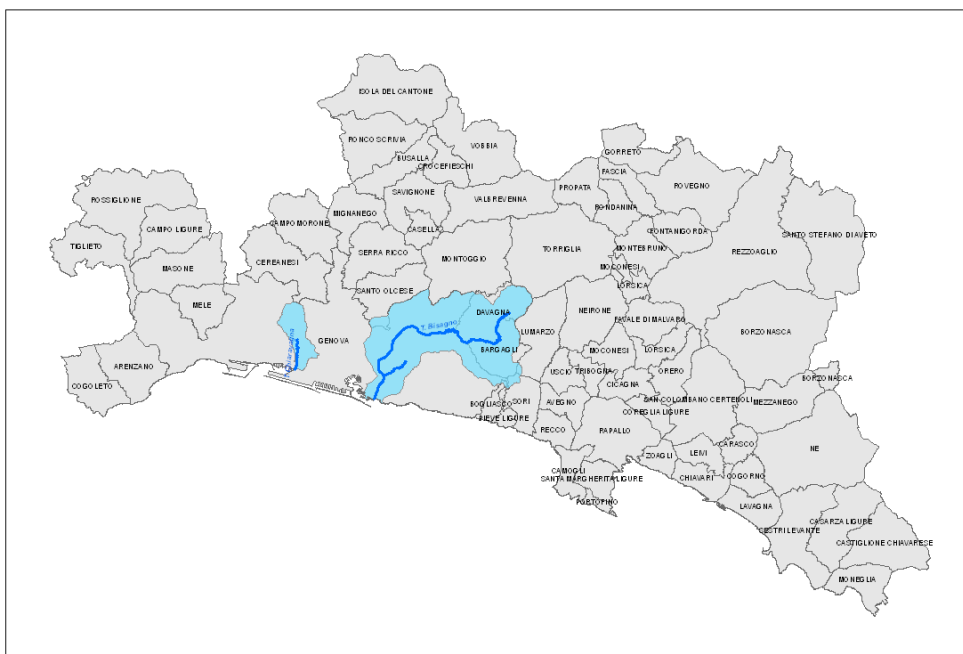


PROVINCIA DI GENOVA

Direzione Pianificazione generale e di bacino

APPROFONDIMENTO IDRAULICO DEI PIANI DI BACINO DEI TORRENTI BISAGNO E CHIARAVAGNA

Estensione del contratto n.53/2013



Torrente Chiaravagna



CODICE ELABORATO

2	2	8	0	0	8	9	8	-	0	1	-	0	0	2	0	0
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

00	AGOSTO 2014	D.PERSI	A.CROSTA	A.CROSTA	
REV.	DATA	REDAZIONE	VERIFICA	AUTORIZZAZIONE	MODIFICHE

This report has been prepared under the DHI Business Management System certified by DNV to comply with ISO 9001 (Quality Management)



DNV Business Assurance, Danmark A/S

INDICE

1	Premessa	1
2	Descrizione delle attività.....	2
3	Aggiornamento dei rilievi topografici	4
3.1	Torrente Chiaravagna – Planimetrie	5
3.2	Torrente Chiaravagna – Sezioni	7
4	Verifica della configurazione di progetto.....	19
4.1	Schema degli assetti geometrici	19
4.2	Definizione della configurazione di progetto	22
4.3	Analisi Idraulica	26
4.3.1	Premessa	26
4.3.2	Geometria delle sezioni trasversali	26
4.3.3	Scabrezza idraulica.....	31
4.3.4	Ulteriori parametri del modello	32
4.3.5	Risultati	34
4.3.5.1	Evento con tempo di ritorno 500 anni	34
4.3.5.2	Evento con tempo di ritorno 200 anni	35
4.3.5.3	Evento con tempo di ritorno 50 anni	35
4.4	Conclusioni dell'analisi idraulica	35
5	Analisi granulometriche.....	37
5.1	Localizzazione dei prelievi in alveo.....	37
5.2	Metodologia di analisi dei prelievi di materiale solido	40
6	Valutazione del trasporto solido potenziale a scala di bacino.....	50
6.1	Calcolo con il metodo di Gavrilovic.....	50
6.2	Calcolo del trasporto di torbida con il metodo Ciccacci	53
7	Ricostruzione delle portate di lungo periodo	57
8	Analisi del trasporto solido	59
8.1	Valutazione della capacità di trasporto a monte della vasca	63
8.1.1	Calcolo della massima portata solida - Formula di Pica	63
8.1.2	Capacità di trasporto solido a monte della vasca di sedimentazione	65
8.1.2.1	Analisi del trasporto solido in caso di eventi di piena di progetto	69
8.1.3	Valutazione speditiva sull'adeguatezza della vasca di sedimentazione.....	70
8.2	Analisi morfologica a fondo mobile del tratto a valle dell'autostrada	71
8.2.1	Configurazione A: vasca di sedimentazione mantenuta.....	72
8.2.2	Configurazione B: vasca di sedimentazione non mantenuta	73
8.2.3	Analisi morfologica a fondo mobile: eventi di piena di progetto.....	76

ALLEGATI

ALLEGATO A–Tabelle delle grandezze idrodinamiche in alveo

ALLEGATO B–MIKE 11 RR UHM

Descrizione tecnica

ALLEGATO C–MIKE 11 HD & ST

Descrizione tecnica

ALLEGATO D–MIKE 21 HD

Descrizione tecnica

1 Premessa

Con provvedimento di aggiudicazione n°2953/69732 del 28 giugno 2013, la Provincia di Genova, ufficio Direzione di Pianificazione Generale e di Bacino, ha incaricato il raggruppamento di imprese formato da DHI Italia e Art Ambiente Risorse e Territorio dell'esecuzione di un approfondimento idraulico dei Piani di Bacino del torrente Bisagno, del Rio Fereggiano e del torrente Chiaravagna.

Il contratto ha avuto come oggetto l'affidamento delle attività necessarie a valutare l'adeguatezza dei contenuti dei Piani di Bacino con specifico riguardo all'assetto del territorio in relazione agli eventi alluvionali verificatisi nel Comune di Genova rispettivamente il 4 ottobre 2010 e il 4 novembre 2011.

In funzione delle risultanze dello studio è emersa la necessità di una serie di approfondimenti di dettaglio, per l'esecuzione dei quali la Provincia ha deliberato una specifica estensione di incarico, con Determinazione n° 2431 del 12 giugno 2014.

In particolare le attività integrative previste sono nel seguito elencate:

- a) *simulazione bidimensionale a fondo fisso di tutti gli interventi previsti nel progetto preliminare del Comune di Genova del 2001 sul torrente Chiaravagna, compreso l'abbassamento del fondo alle quote definite nei progetti definitivi dei vari lotti già predisposti, raccordate al completamento dell'abbassamento alveo proposto nell'ambito del progetto preliminare (TR50, TR200, TR500); predisposizione delle carte delle nuove fasce A, B, C.;*
- b) *valutazione del trasporto solido per il bacino di monte del torrente Chiaravagna per la valutazione del quantitativo di materiale che potenzialmente può raggiungere il tratto oggetto di studio. La valutazione, che comprende l'analisi dei sedimenti attraverso operazioni di campionatura, ha lo scopo di disporre di un dato di confronto in relazione alla portata solida che può defluire verso valle in caso di vasca di sedimentazione di progetto piena. L'analisi mira anche alla valutazione dell'adeguatezza del volume della vasca stessa;*
- c) *determinazione del profilo di equilibrio su lungo periodo per il torrente Chiaravagna, attraverso modellazione a fondo mobile dell'alveo in ipotesi di fondo abbassato, a valle della costruenda vasca di sedimentazione, per le portate ordinarie di lungo periodo (eventi di piena non eccezionali). Le configurazioni di studio saranno le seguenti:*
 - *configurazione A: vasca di sedimentazione vuota, mantenuta pulita ed in grado di garantire la sedimentazione del materiale in arrivo da monte (portata solida verso valle nulla);*
 - *configurazione B: vasca di sedimentazione già piena e quindi ininfluente ai fini dell'intercettazione del trasporto solido (portata solida pari alla massima capacità di portata solida nel tratto immediatamente a monte, previo confronto sul quantitativo di materiale potenziale precedentemente calcolato);*
- d) *modellazione monodimensionale a fondo mobile del torrente Chiaravagna, nelle 2 configurazioni di vasca di sedimentazione (vuota e piena come specificato precedentemente), profilo di fondo iniziale pari a quello di progetto, portate di piena pari a TR50 e TR200 per la valutazione dell'eventuale stato di criticità del Chiaravagna nel caso di evento con tempo di ritorno di progetto, simulando in contemporanea la portata liquida e la corrispondente portata solida e conseguenti variazioni del fondo;*
- e) *modellazione idraulica bidimensionale su Bisagno e Fereggiano con scenari di ostruzione: analisi di sensitività dei risultati del modello idraulico rispetto alla carenza di franco idraulico, attraverso ipotesi di ostruzioni o riduzioni della sezione di deflusso in corrispondenza di ponti*

o coperture per valutare i conseguenti effetti sull'estensione delle aree inondabili. Predisposizione di una proposta di fasce, a seguito delle risultanze delle analisi, derivante dall'inviluppo delle pericolosità ottenute nelle varie simulazioni.

Il presente elaborato riporta la descrizione delle analisi effettuate sul torrente Chiaravagna (attività a-d), mentre si rimanda all'elaborato 22800898-01-00100 per quanto riguarda le risultanze delle valutazioni sul torrente Bisagno (attività e).

2 Descrizione delle attività

Le analisi effettuate sul torrente Chiaravagna hanno la principale finalità di completare il quadro conoscitivo, a livello di rischio idraulico residuo, derivante dal completamento degli interventi progettuali di messa in sicurezza del tratto compreso tra il viadotto dell'autostrada A10 e la foce a mare. In particolare, l'obiettivo del presente studio è quello di valutare l'effettiva messa in sicurezza idraulica del torrente Chiaravagna in seguito alla realizzazione della vasca di sedimentazione subito a valle della soglia dell'autostrada e del successivo abbassamento del profilo di fondo alveo, nonché la verifica del funzionamento della vasca stessa e la stabilità del nuovo fondo alveo nel tempo (lungo periodo o singoli eventi di piena estremi).

Le informazioni di base utilizzate nel presente studio derivano in gran parte dalle attività completate nel corso del primo incarico, ed in particolare il modello numerico idrologico e idraulico, nella configurazione attuale e di progetto (escluso abbassamento del fondo alveo) del torrente, messo a punto e calibrato in funzione dei dati disponibili relativi all'evento dell'ottobre 2010.

Per maggiori informazioni o dettagli su quanto eseguito nel corso dello studio pregresso si rimanda all'elaborato 22800503-01-00303.

La metodologia di studio proposta è articolata sull'analisi dei due fenomeni oggetto di studio, tra loro integrati, la componente idraulica e quella morfologica: nel seguito vengono illustrate in modo sintetico le singole attività eseguite.

Sopralluogo in campo per la verifica delle geometrie d'alveo

Le informazioni geometriche, dati di base per la realizzazione del modello numerico di analisi idraulica e morfologica, sono state completate in seguito ad uno specifico sopralluogo finalizzato alla verifica delle sezioni topografiche disponibili per il tratto a monte del viadotto Autostradale (fonte Piano di Bacino). Il modello utilizzato per l'aggiornamento del Piano di Bacino del T. Chiaravagna è infatti esteso tra il viadotto autostradale e la foce, mentre per le valutazioni sul trasporto solido potenziale di monte si è resa necessaria un'estensione per ulteriori 600 metri fino al ponte della linea ferroviaria Genova – Ovada – Acqui Terme, situato nel tratto tra le stazioni di Genova Borzoli e Genova Costa di Sestri Ponente.

Il Cap. 3 della presente relazione riporta le sezioni di rilievo aggiornate e la relativa documentazione fotografica.

Verifica idraulica della configurazione di progetto

L'oggetto di verifica è il comportamento idraulico e morfologico del torrente Chiaravagna, nella sua configurazione di progetto a completamento di tutti gli interventi previsti per la messa in sicurezza idraulica.

In questa nuova fase di studio, sono quindi stati recepiti tutti i progetti definitivi sviluppati sul tratto del T. Chiaravagna ed integrati, dove necessario, con le informazioni progettuali relative all'ipotesi di abbassamento e riprofilatura del fondo alveo.

A titolo di riepilogo vengono nel seguito citati i progetti assunti come riferimento nella fase di aggiornamento e completamento del modello idraulico del torrente Chiaravagna. Tali studi risultano tutti commissionati dal Comune di Genova e ad un livello di progettazione Definitivo, ad eccezione del Progetto Preliminare del 2001 a cui i successivi progetti definitivi fanno esplicito riferimento.

- Progetto Preliminare redatto nel 2001 dal raggruppamento temporaneo delle società STI – Studio Tecnico di Ingegneria S.r.l. e Hydrodata S.p.A. e avente oggetto “Sistemazione idraulica del tratto di valle del torrente Chiaravagna”.
- Progetto Definitivo redatto nel 2013 dall’Ing. Antonio Belloveso e avente oggetto “Intervento di sistemazione idraulica del torrente Chiaravagna e affluenti – 3° Lotto – Realizzazione vasca di monte”.
- Progetto Definitivo redatto nel 2014 dalla società Progetec s.n.c. e avente oggetto “Sistemazione idraulica del torrente Chiaravagna e affluenti: adeguamento delle sezioni d’alveo in corrispondenza del ponte obliquo”.
- Progetto Definitivo redatto nel 2014 dallo Studio Tecnico Ing. Gianluca Pelle e avente oggetto “Sistemazione idraulica del torrente Chiaravagna in corrispondenza del ponte di via Giotto”.
- Progetto Definitivo redatto nel 2011 dallo Studio Canepa Associati e avente oggetto “Adeguamento delle sezioni idrauliche del torrente Chiaravagna e del rio Ruscarolo in corrispondenza dell’Edificio ELSAG e del ponte stradale di via Manara” (Parte I e II).
- Progetto Definitivo redatto nel 2013 dallo Studio Tecnico di Ingegneria “PRD” (Paese Romelli Damonte Ingegneri Riuniti) e avente oggetto “Sistemazione idraulica del tratto di valle del torrente Chiaravagna - Adeguamento delle sezioni d’alveo in corrispondenza dell’area ILVA”.
- Progetto Definitivo redatto nel 2014 dallo Studio Tecnico Ing. Gianfranco Visconti e avente oggetto “Torrente Chiaravagna: sistemazione e adeguamento delle sezioni d’alveo in corrispondenza dell’area Piaggio”.

Il modello così aggiornato è stato quindi utilizzato per verificare l’effettivo miglioramento delle condizioni di deflusso indotte dalle opere previste in progetto.

La modellazione idraulica è stata effettuata con gli stessi strumenti (MIKE FLOOD del DHI) utilizzate nello studio pregresso, modello idrodinamico calibrato in funzione dell’evento di ottobre 2010 (cfr. elaborato 22800503-01-00303.doc).

Raccolta dei campioni granulometrici

La definizione della granulometria d’alveo rappresenta uno dei dati di input fondamentali per qualsiasi tipo di valutazione sul trasporto solido o sull’evoluzione morfologica di un corso d’acqua naturale. Durante la fase di sopralluogo in sito si è proceduto alla raccolta di 6 differenti campioni granulometrici, distribuiti sia a monte che a valle del viadotto autostradale, al fine di caratterizzare in modo uniforme tutto il tratto oggetto di studio.

I campioni raccolti sono stati elaborati in laboratorio e si è pervenuti alla definizione delle rispettive curve granulometriche.

Valutazioni sul trasporto solido potenziale e sulla vasca di sedimentazione in progetto

Tutte le analisi modellistiche, con particolare riferimento a quelle relative alle valutazioni sul trasporto solido, sono state accompagnate da una serie di valutazioni necessarie sia alla definizione di alcuni dati di input ai modelli, sia per la validazione o verifica degli stessi.

In particolare sono state eseguite tutta una serie di indagini atte a individuare il volume solido potenziale producibile dal bacino alto del Chiaravagna e a valutare il funzionamento della vasca di sedimentazione di progetto in termini di volumi e frequenze di svuotamento. In particolare si è fatto riferimento alle metodologie di calcolo di Gavrilovic e Ciccacci, descritte in dettaglio nel paragrafo 6.

Le conclusioni delle valutazioni effettuate hanno permesso di dare una preziosa conferma sia allo schema di studio adottato, sia di una calibrazione di massima dei risultati della modellazione morfologica.

Ricostruzione del regime di portate

Al fine di analizzare le tendenze evolutive del tratto indagato è stato necessario ricostruire un periodo idrologico “tipico” e quindi una successione di portate ordinarie su lungo periodo, partendo dai dati pluviometrici disponibili per il bacino del Chiaravagna (periodo 2001-2014).

La ricostruzione delle portate è stata effettuata utilizzando il modello numerico idrologico realizzato nel corso dello studio pregresso e calibrato in base all’evento dell’ottobre 2010.

Analisi morfologica

L’analisi del trasporto solido è stata articolata su due differenti fasi, la prima finalizzata alla definizione delle capacità di portata solida del tratto a monte della vasca di sedimentazione in progetto, con l’obiettivo di valutare il volume di sedimenti in grado di raggiungere la vasca stessa e, in caso di assenza di manutenzione, procedere verso valle; la seconda basata su un’analisi morfologica a fondo mobile e sulla tendenza evolutiva dell’alveo nelle condizioni di perfetto funzionamento della vasca o di carenza di manutenzione (vasca piena), con l’obiettivo di verificare eventuali potenziali incrementi del rischio idraulico indotti da fenomeni localizzati di erosione o deposito.

Le valutazioni sono state effettuate realizzando un modello numerico mediante l’applicazione del codice di calcolo MIKE 11, modulo ST, del DHI di cui è riportata una descrizione sintetica nell’allegato C.

3 Aggiornamento dei rilievi topografici

Nei paragrafi seguenti sono riportati i prospetti delle sezioni topografiche per le quali è stato effettuato uno specifico sopralluogo di verifica.

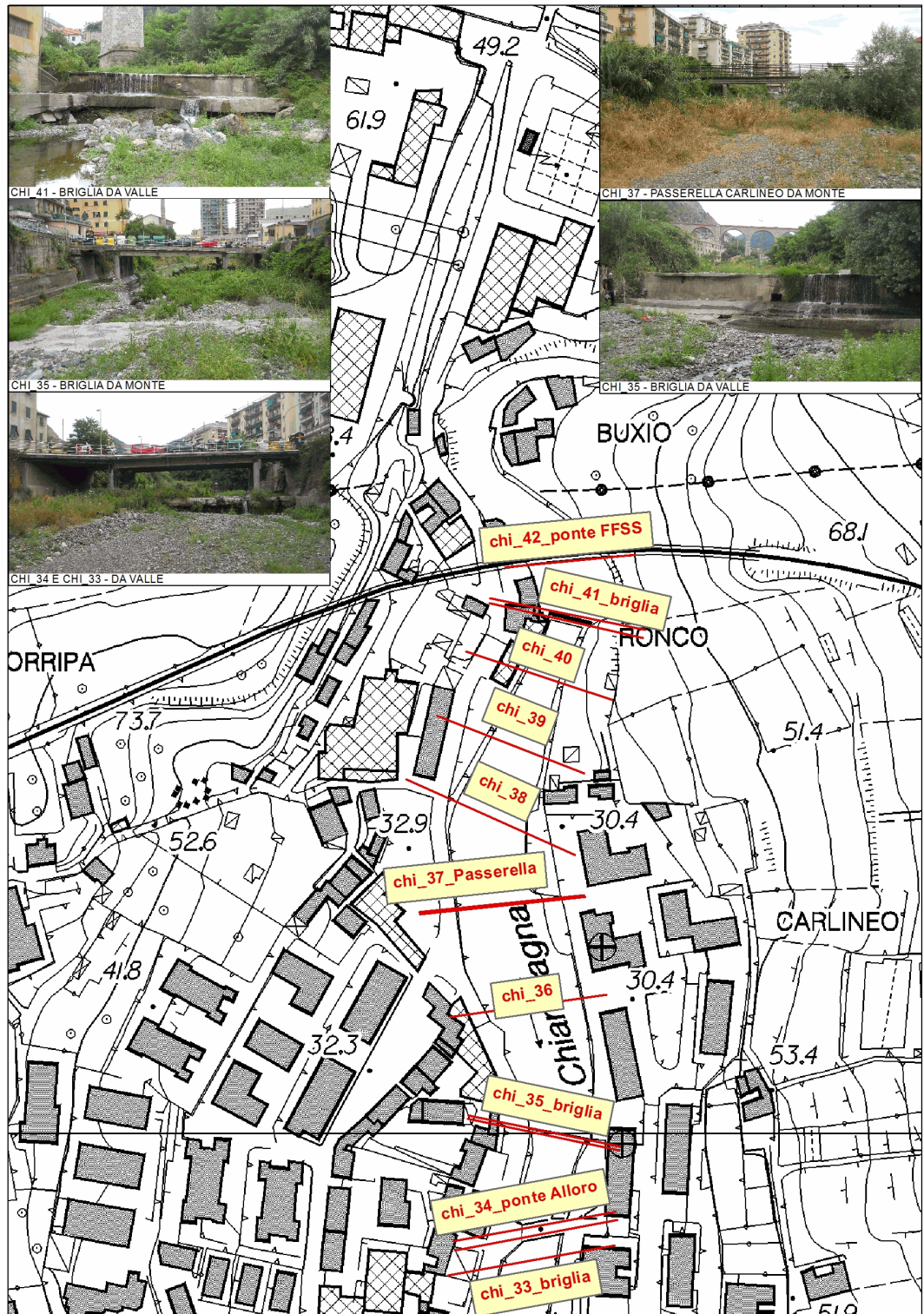
Il rilievo ha avuto come obiettivo principale il controllo ed eventuale aggiornamento delle sezioni acquisite dal Piano di Bacino e ricadenti nel tratto d’alveo a monte del tratto indagato nel precedente studio (Autostrada A10 – Foce), al fine di poter includere anche tratto nel modello numerico.

In particolare sono state verificate le strutture in alveo (attraversamenti e salti di fondo) e le larghezze di sezione al fine di individuare eventuali anomalie o differenze rispetto a quanto indicato nel PdB. Le quote di fondo sono state aggiornate solo dove era evidente una variazione significativa rispetto al rilievo disponibile.

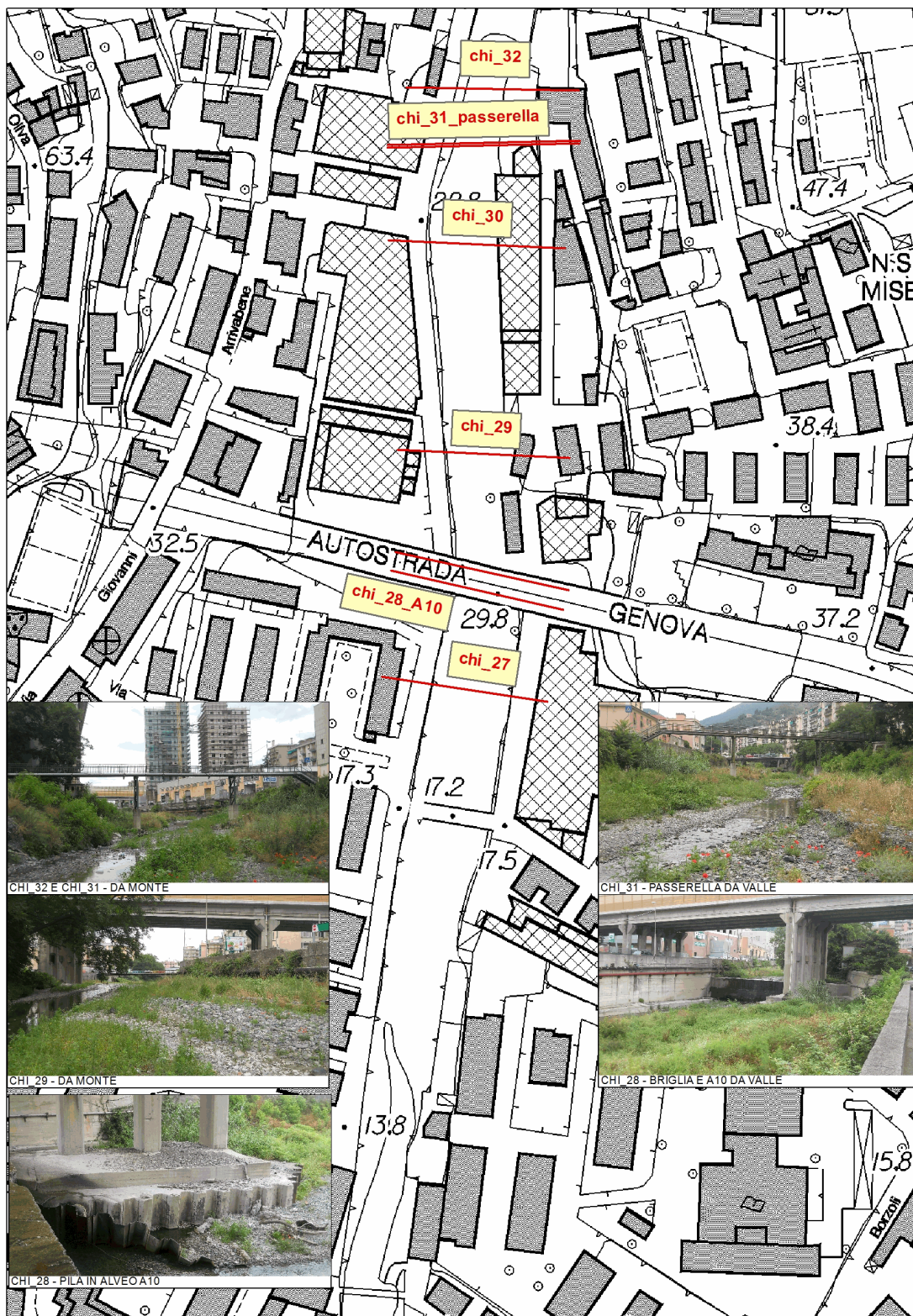
Le sezioni sono accompagnate da una documentazione fotografica raccolta durante le fasi di rilievo. Ogni singola sezione è numerata con il codice identificativo presente nel Piano di Bacino e caratterizzata da una sintetica descrizione caratterizzante l’ubicazione della stessa.

L’ubicazione delle sezioni è individuata tramite specifiche tavolette planimetriche, mentre i prospetti rappresentano sempre le sezioni con vista da monte verso valle.

3.1 Torrente Chiaravagna – Planimetrie

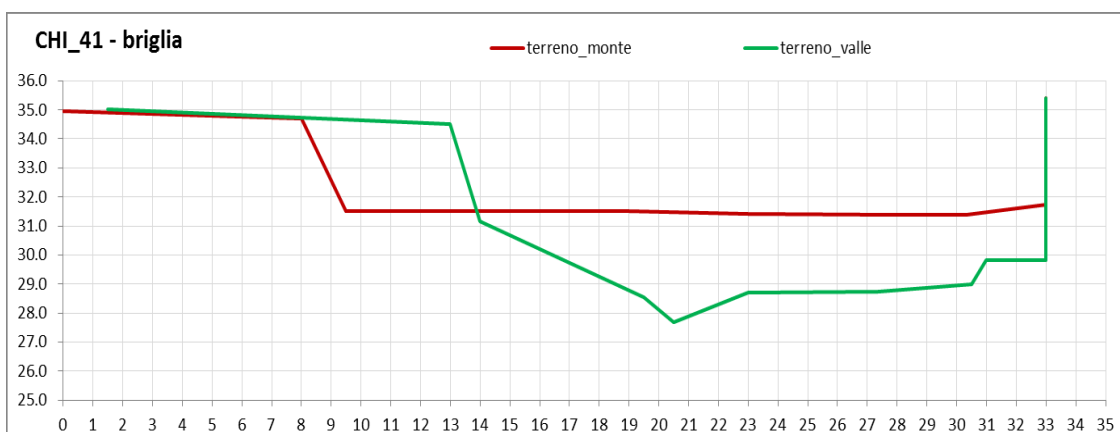
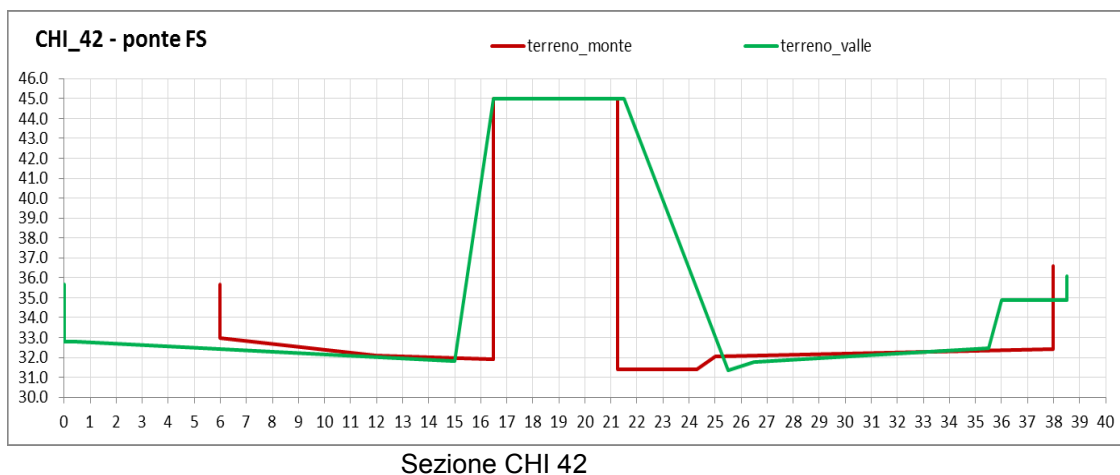


Planimetria da sezione CHI41 a sezione CHI33.

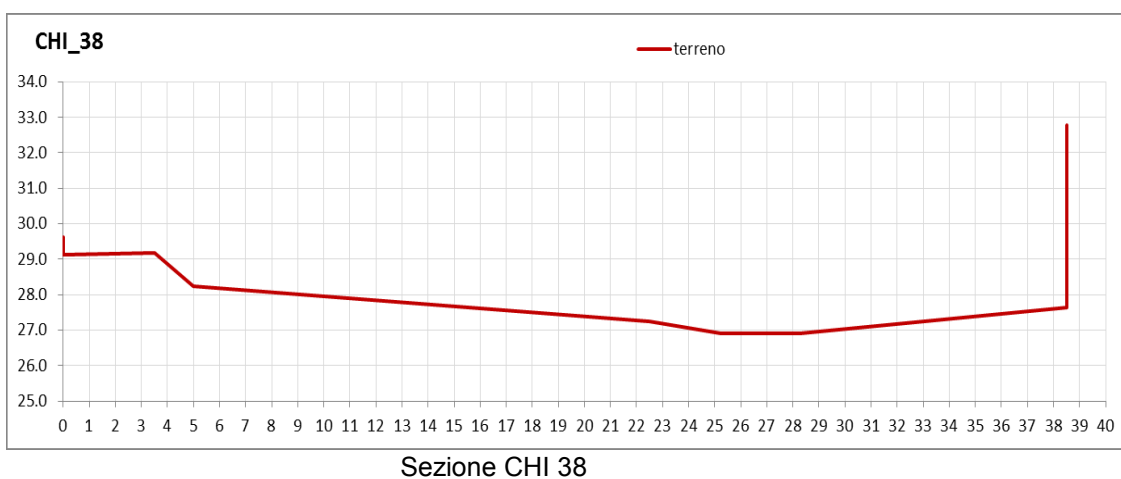
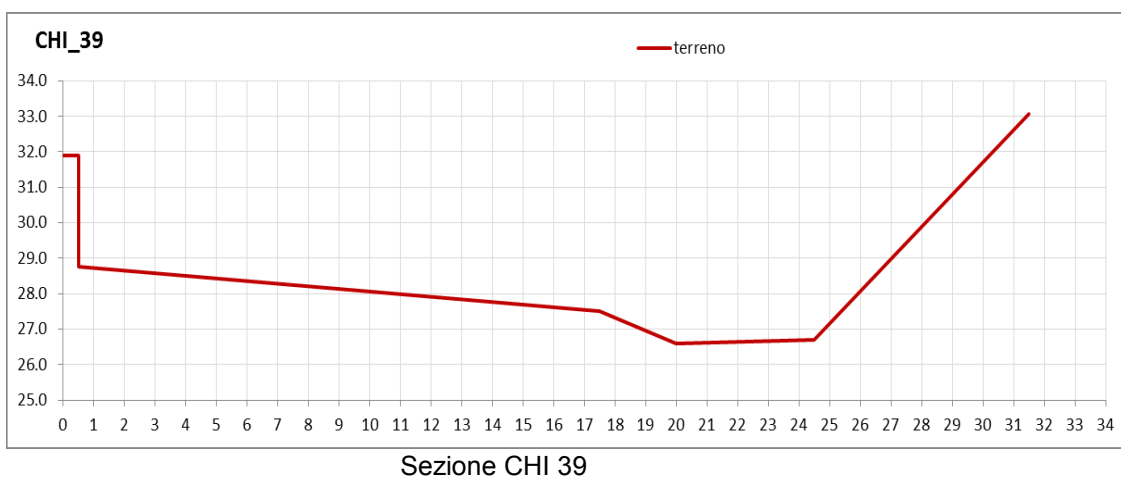
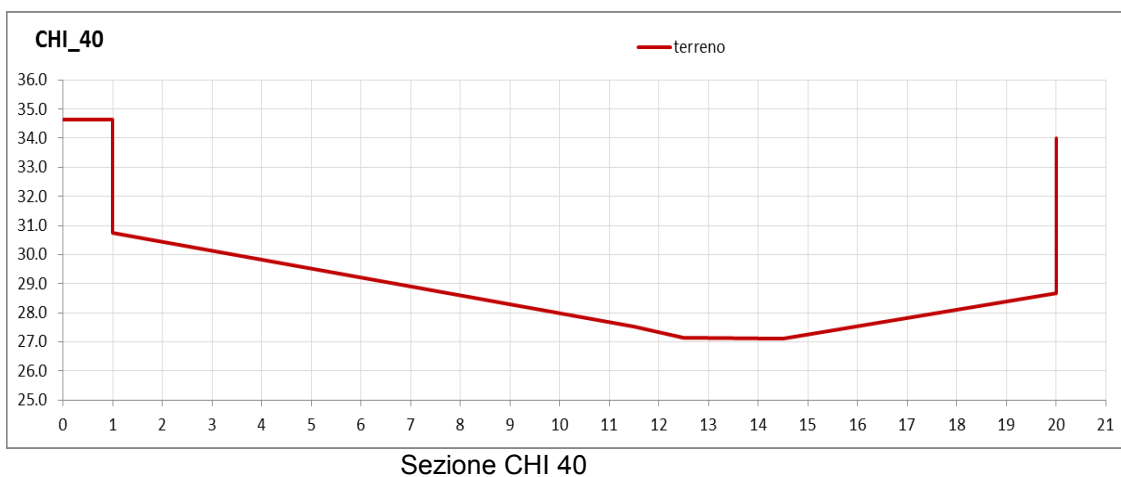


Planimetria da sezione CHI32 al viadotto autostradale.

3.2 Torrente Chiaravagna – Sezioni



Sezione CHI 41 – vista da valle

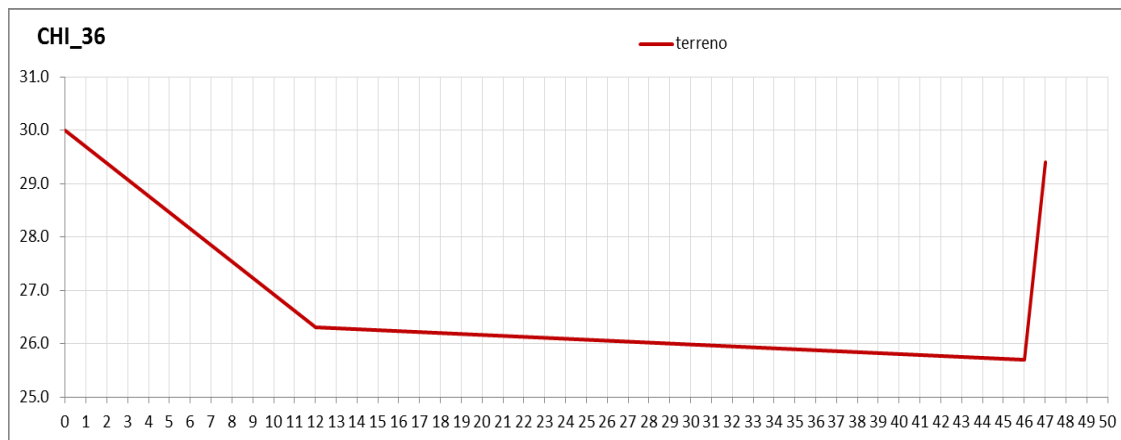




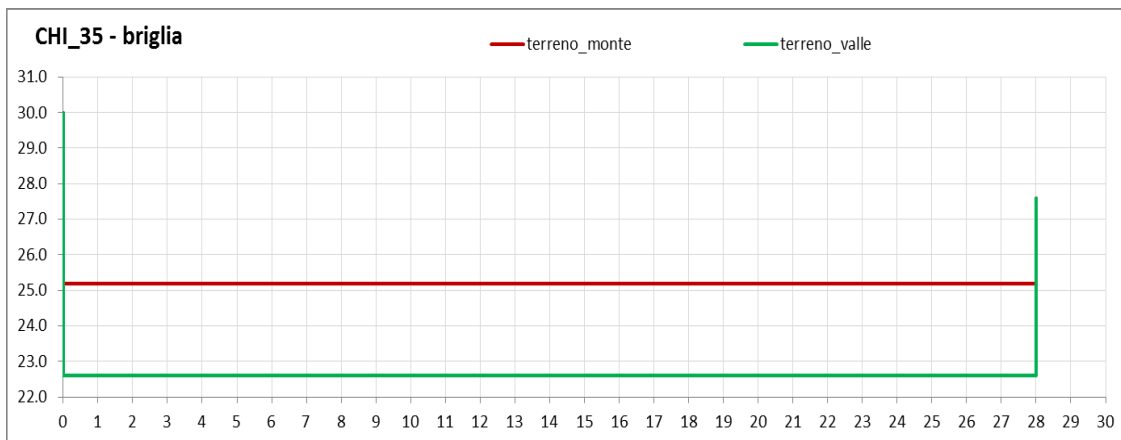
Sezione CHI 37 – vista da monte



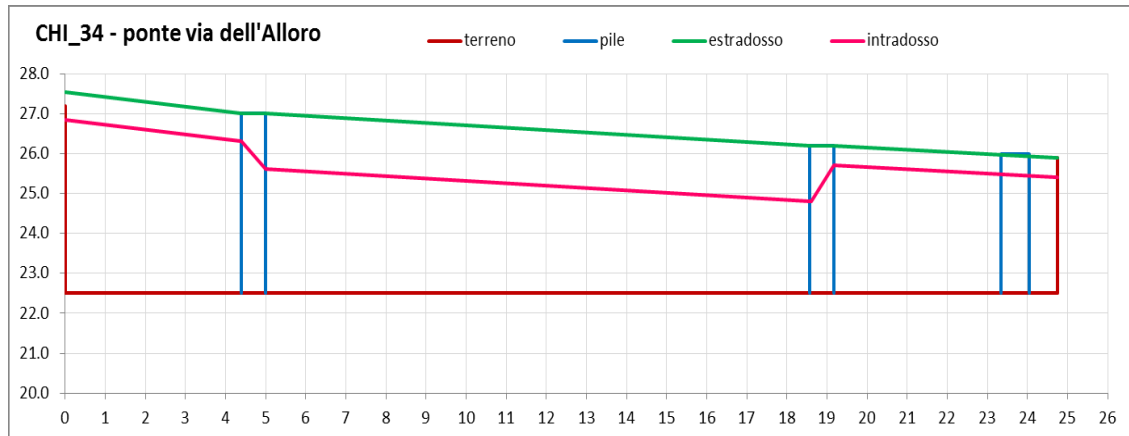
Sezione CHI 37 – vista verso sezione CHI 36 (restringimento sezione incisa)



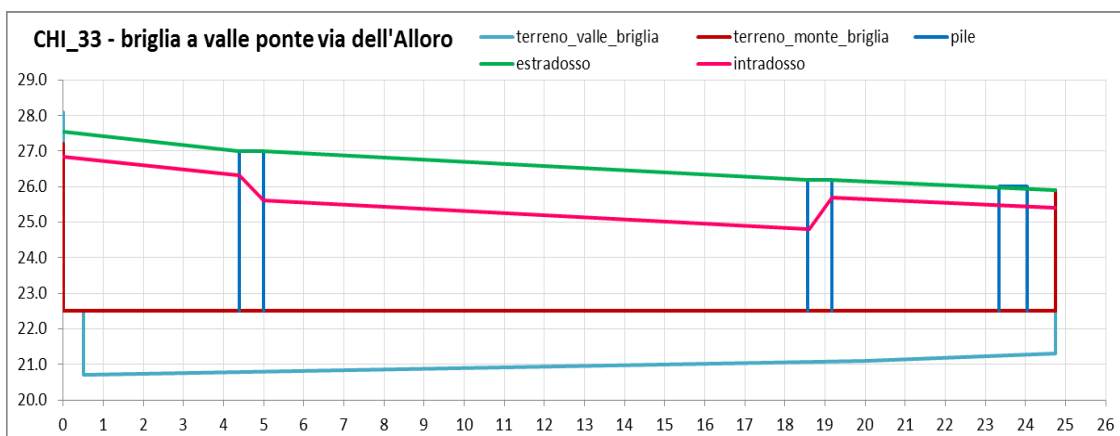
Sezione CHI 36 – vista da monte



Sezione CHI 35 – vista da valle



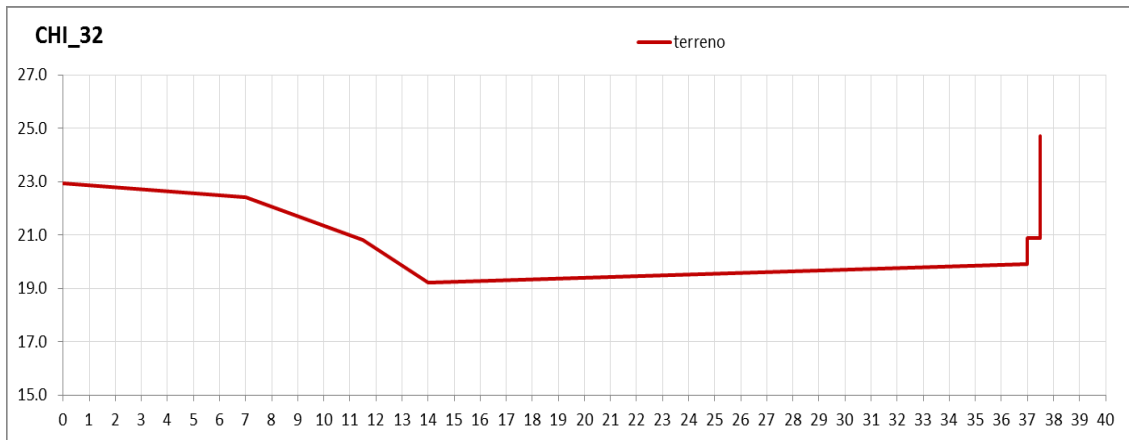
Sezione CHI 34 – vista da monte



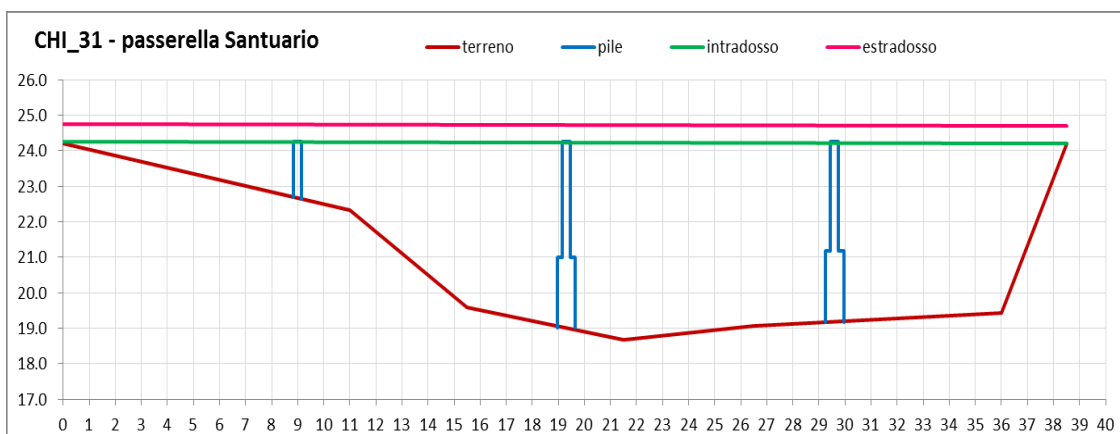
Particolare sezione CHI 33 vista da valle



Sezione CHI 33 – vista da valle



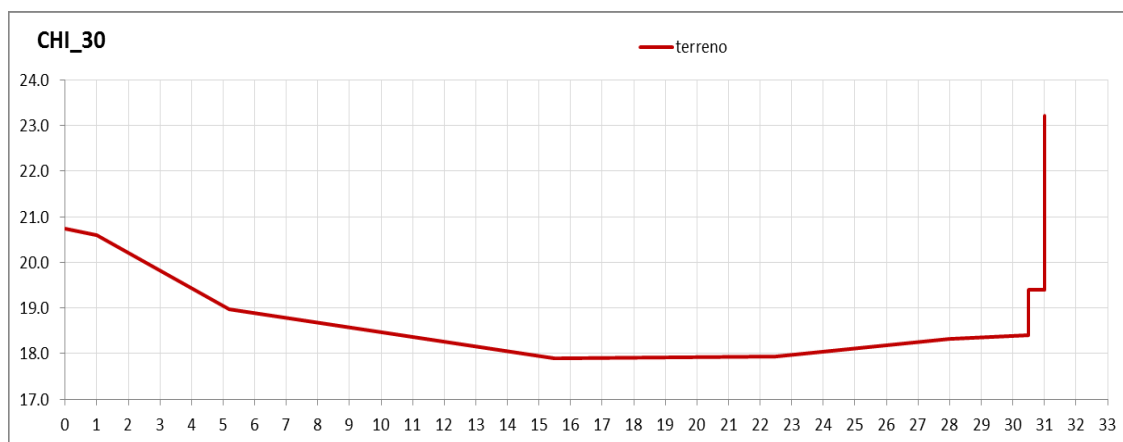
Sezione CHI 32 – vista da monte



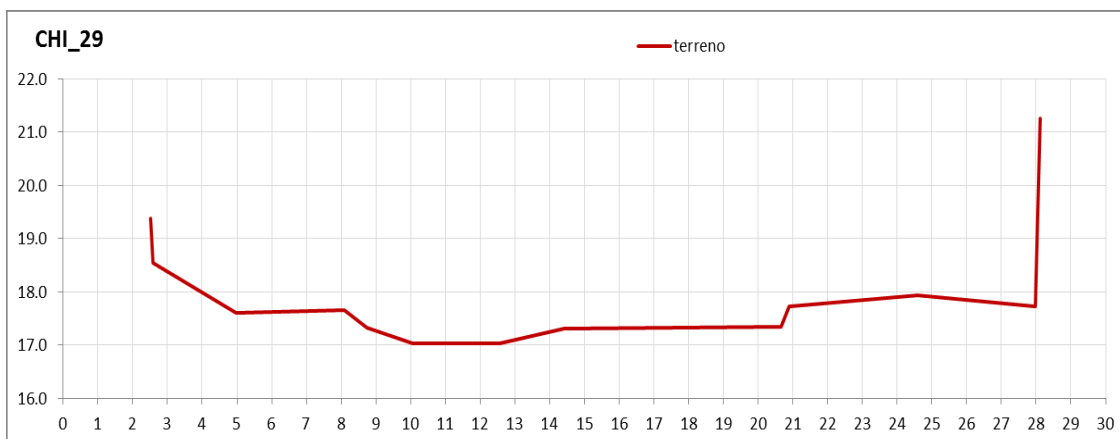
Sezione CHI 31 – vista da valle



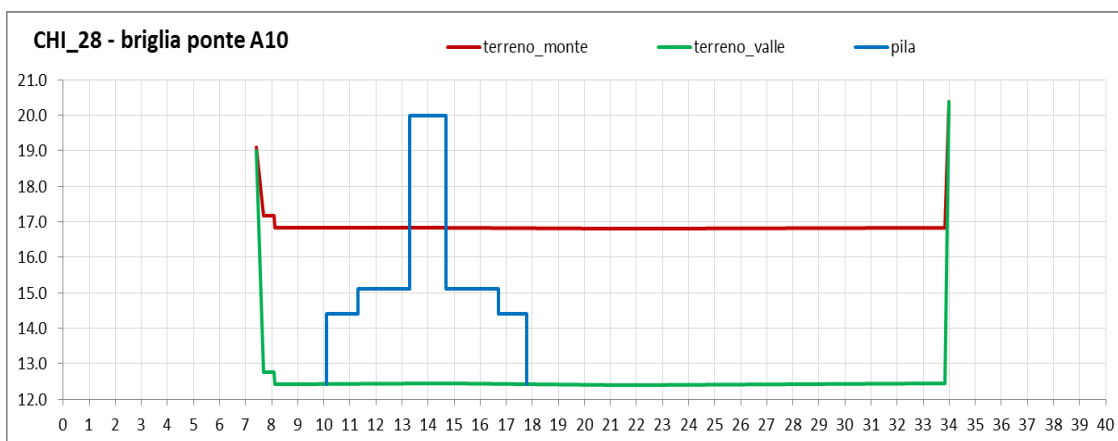
Sezione CHI 31 – particolare pila da monte



Sezione CHI 30 – vista da monte



Sezione CHI 29 – vista da monte



Sezione CHI 28 – briglia vista da valle



Sezione CHI 28 – particolare pila del ponte autostradale A10

4 Verifica della configurazione di progetto

Oggetto del presente capitolo è la verifica del comportamento idraulico del torrente Chiaravagna nella sua configurazione di progetto a completamento di tutti gli interventi previsti per la messa in sicurezza idraulica.

L'attività consiste nella definizione della configurazione finale del corso d'acqua nel tratto dal viadotto autostradale alla foce a partire dalle informazioni raccolte dai diversi progetti di intervento messi a disposizione dall'Amministrazione Provinciale.

A seguito della definizione dell'assetto geometrico vengono svolte le verifiche idrauliche per assegnato tempo di ritorno, pari a 50, 200 e 500 anni, al fine di valutare il comportamento idraulico del corso d'acqua nella sua configurazione definitiva.

4.1 Schema degli assetti geometrici

Il presente paragrafo è finalizzato alla descrizione delle informazioni di base utilizzate per la costruzione del modello numerico.

I dati geometrici di base derivano dalla configurazione di progetto definita nello studio precedente (cfr. elaborato 22800503-01-00303.doc), integrata dalle sezioni rappresentate nel paragrafo 3, alla quale sono state aggiunte le informazioni provenienti dai progetti consultati in questa fase di approfondimento e descritti dettagliatamente nel successivo paragrafo 4.2.

La tabella seguente riporta il dettaglio degli elementi inseriti nel modello con relativo riferimento alla fonte dell'assetto geometrico considerata.

Tabella 4.1 Torrente Chiaravagna – Tabella degli assetti geometrici della configurazione definitiva di progetto

TORRENTE CHIARAVAGNA		CONFIGURAZIONE DEFINITIVA DI PROGETTO
Riferimento tratto	Riferimento codice sezioni	Descrizione origine dato o ipotesi di schematizzazione
Tratto precedente viadotto A10	CHI41 - CHI28	Sezioni modello HEC-RAS fornito dalla Provincia di Genova (studio precedente) così come aggiornate dal rilievo di verifica in sito.
Vasca di sedimentazione	CHI28 - CHI25	Da progressiva 16.04m a progressiva 130.23m inserita la vasca di sedimentazione. Informazione geometrica di base proveniente dal precedente modello sulla quale sono state sovrapposte le informazioni geometriche contenute nel progetto definitivo della vasca di sedimentazione.
Tratto intermedio tra Vasca di sedimentazione e Passerella di via VIII Società Case	CHI25 - CHI23	Intervento di risagomatura delle sezioni. Geometria delle sezioni da progetto preliminare.
Da Passerella di via VIII Società Case a Ponte obliquo di Via Chiaravagna	CHI23 - CHI19	Intervento di abbassamento del fondo. Geometria delle sezioni del modello precedente sulle quali è stato inserito l'abbassamento del fondo così come previsto dal progetto preliminare.
Ponte obliquo di Via Chiaravagna	CHI19	Intervento di abbassamento del fondo e rifacimento del ponte. Geometrie di base del modello precedente, geometrie del ponte e delle altre opere previste dal relativo progetto definitivo, abbassamento del fondo dal progetto preliminare. Sezioni modificate da informazioni progetto definitivo da progressiva 581.28m a progressiva 617.58m.
Da Ponte obliquo di Via Chiaravagna a Ponte di Via Giotto	CHI18.5 - CHI17.6	Intervento di abbassamento del fondo. Geometria delle sezioni del modello precedente sulle quali è stato inserito l'abbassamento del fondo così come previsto dal progetto preliminare.
Ponte di Via Giotto	CHI17.6 - CHI17.4	Intervento di abbassamento del fondo e rifacimento del ponte. Geometrie di base del modello precedente, geometrie del ponte e delle altre opere dal relativo progetto definitivo, abbassamento del fondo da progetto preliminare. Sezioni modificate da informazioni progetto definitivo da progressiva 687.58m a progressiva 715.59m.

TORRENTE CHIARAVAGNA		CONFIGURAZIONE DEFINITIVA DI PROGETTO
Riferimento tratto	Riferimento codice sezioni	Descrizione origine dato o ipotesi di schematizzazione
Tratto in prossimità di Ponte di Via Manara, edificio ELSAG, confluenza R.Ruscarolo.	CHI17 - CHI13	Intervento di abbassamento del fondo unitamente a complesso intervento riguardante il nodo di Via Manara - ELSAG. Informazioni geometriche del progetto definitivo già inserite nella configurazione di progetto dello studio precedente, inserito abbassamento del fondo da progetto preliminare.
Tratto tra passerella ELSAG e ponti ferroviari (FS e ILVA) compresi	CHI13 - CHI08	Intervento di abbassamento del fondo. Geometria delle sezioni del modello precedente (ramo principale e laterali) sulle quali è stato inserito l'abbassamento del fondo così come previsto dal progetto preliminare.
Tratto a valle del 2° Ponte ILVA fino alla foce	CHI08 - CHI01	Interventi di allargamento della sezione defluente e di abbassamento del fondo. Geometrie ricavate interamente dai rispettivi progetti definitivi quale aggiornamento del modello precedente. Introdotta lievi variazioni relativamente alla schematizzazione del ramo laterale "Scolmatore Piaggio" (L=90m) e delle sezioni a valle del ponte di via Marsiglia (colonnato in sponda sinistra). Inserita nuova sezione a progressiva 1080.16m in corrispondenza della sezione terminale della plateazione del fondo in massi cementati.

4.2 Definizione della configurazione di progetto

La configurazione di progetto finale del T. Chiaravagna presa a riferimento per le verifiche idrauliche del presente studio è il risultato di una serie di interventi, tutti inizialmente previsti dal Progetto Preliminare del 2001 e successivamente in parte realizzati e in parte ancora oggetto dei successivi livelli di progettazione.

Per quanto riguarda gli interventi già realizzati, nel presente studio si è fatto riferimento all'effettivo stato dei luoghi così come già evidenziato nello studio precedente, di cui la presente analisi costituisce un approfondimento. Si citano a puro titolo di esempio i più recenti interventi di demolizione degli edifici a monte e valle di via Giotto e di rifacimento della passerella a valle dell'edificio ELSAG.

Per quanto riguarda gli interventi ancora in fase di progettazione, si è fatto riferimento al livello di progetto più avanzato disponibile. Un numero significativo degli interventi considerati era già stato preso in considerazione nella configurazione di progetto dello studio precedente (cfr. elaborato 22800503-01-00303.doc), tuttavia successivamente ad esso sono stati messi a disposizione da parte dell'Amministrazione Provinciale alcuni elementi aggiuntivi, che sono stati pertanto utilizzati per verificare e integrare alcuni degli interventi già precedentemente considerati.

Infine per gli interventi di cui non sono risultati disponibili livelli di progettazione più avanzata, si è fatto riferimento a quanto indicato nel Progetto Preliminare del 2001, così come appositamente specificato dal Committente. In particolare la maggior parte dei Progetti Definitivi considerati non prevede l'abbassamento del fondo alveo se non nel fare riferimento alle future quote definitive del fondo, a successivo abbassamento dell'alveo avvenuto, nella progettazione dei manufatti (ad esempio opere di fondazione).

Di seguito sono riportati in dettaglio il contenuto dei diversi progetti considerati, specificando per ognuno di essi quali interventi includono e per quali invece è risultato necessario far riferimento agli studi precedenti.

Progetto Definitivo redatto nel 2013 dall'Ing. Antonio Belloveso e avente oggetto "Intervento di sistemazione idraulica del torrente Chiaravagna e affluenti – 3° Lotto – Realizzazione vasca di monte".

Il progetto riguarda la realizzazione di una vasca di sedimentazione localizzata tra la briglia sottostante al viadotto dell'Autostrada A10 e il ponte di via Bissone. Poiché in questo tratto non sono previsti ulteriori interventi, quale ad esempio l'abbassamento del fondo alveo, quanto rappresentato negli elaborati progettuali rappresenta la conformazione finale di progetto del torrente. Per omogeneità con lo studio precedente, in caso di lievi discordanze tra quanto indicato nel progetto e quanto in precedenza schematizzato con riferimento a elementi non direttamente afferenti alla vasca in progetto, si è ritenuto opportuno non apportare modifiche a quanto precedentemente rappresentato.

Progetto Definitivo redatto nel 2014 dalla società Progetec s.n.c. e avente oggetto "Sistemazione idraulica del torrente Chiaravagna e affluenti: adeguamento delle sezioni d'alveo in corrispondenza del ponte obliquo".

Il progetto riguarda il rifacimento del ponte obliquo di via Chiaravagna, con un nuovo impalcato e privo di pile in alveo. Congiuntamente al rifacimento del ponte, il progetto prevede alcune variazioni delle quote di sponda, in particolare sul lato sinistro del torrente a monte del ponte stesso, dove è presente un muro di sponda di ridotta altezza. L'intervento oggetto di questo

progetto era già stato considerato in un'analisi idraulica integrativa inserita nel precedente studio, in cui tuttavia si manteneva la quota di fondo nella configurazione attuale.

Secondo quanto definito nel Progetto Preliminare, invece, il tratto di corso d'acqua oggetto del presente intervento sarebbe oggetto di abbassamento del fondo alveo ed effettivamente il Progetto Definitivo tiene conto delle quote di progetto del fondo ad abbassamento avvenuto, tuttavia non prevede tra gli interventi oggetto della progettazione l'abbassamento stesso, considerando le quote finali semplicemente come uno degli elementi progettuali, poiché tale intervento verrà realizzato in tempi successivi rispetto al rifacimento del ponte.

In conclusione, nella definizione delle geometrie di progetto definitive di questo tratto del corso d'acqua, il Progetto Definitivo è stato preso in considerazione solamente per quanto prevede relativamente all'impalcato del ponte e agli interventi di modifica delle quote spondali, facendo invece riferimento al Progetto Preliminare per quanto riguarda le quote di fondo alveo.

Progetto Definitivo redatto nel 2014 dallo Studio Tecnico Ing. Gianluca Pelle e avente oggetto "Sistemazione idraulica del torrente Chiaravagna in corrispondenza del ponte di via Giotto".

Il progetto riguarda il rifacimento del ponte di via Giotto, conseguente alla demolizione degli edifici presenti a monte e valle dello stesso, con un nuovo impalcato caratterizzato da un minor ingombro in altezza, dall'assenza di pile in alveo e da un allargamento in sponda destra della sezione di deflusso di circa 2.5m. Tale intervento tiene in considerazione, quale elemento progettuale, il futuro abbassamento della quota di fondo alveo, così come previsto dal Progetto Preliminare, tuttavia tale intervento non è oggetto della progettazione. L'intervento di rifacimento del ponte era già stato considerato nella configurazione di progetto del precedente studio, di cui il presente costituisce l'estensione, tuttavia in quella configurazione erano state considerate le geometrie del ponte così come schematizzato nel Progetto Preliminare: in questa fase pertanto si è provveduto a recepire quanto contenuto nel Progetto Definitivo aggiornando opportunamente la geometria delle sezioni defluenti.

In conclusione, nella definizione delle geometrie di progetto definitive di questo tratto del corso d'acqua, il Progetto Definitivo è stato preso in considerazione per quanto concerne il nuovo impalcato e gli altri manufatti oggetto di intervento, facendo invece riferimento al Progetto Preliminare per quanto riguarda le quote di fondo alveo.

Progetto Definitivo redatto nel 2011 dallo Studio Canepa Associati e avente oggetto "Adeguamento delle sezioni idrauliche del torrente Chiaravagna e del rio Ruscarolo in corrispondenza dell'Edificio ELSAG e del ponte stradale di via Manara" (Parte I e II).

Il progetto riguarda una serie di interventi localizzati presso il ponte di via Manara e l'edificio ELSAG, già presi in considerazione nella configurazione di progetto del precedente studio:

- il rifacimento del ponte stradale con una nuova struttura idraulicamente più efficiente;
- lo spostamento immediatamente a monte dello stesso della confluenza del Rio Ruscarolo;
- la parziale demolizione dell'ultimo tratto del terrapieno presente tra i due alvei al fine di realizzare la loro connessione idraulica;
- l'apertura di un nuovo fornice in sponda sinistra sotto l'edificio ELSAG e infine il prolungamento dello stesso fino al fornice preesistente, realizzato sotto il parcheggio ABB.

Il progetto tiene in considerazione, nella realizzazione degli interventi sopracitati, la futura quota di fondo alveo secondo quanto previsto dal Progetto Preliminare, tuttavia prevede

espressamente di ripristinare, a seguito dell'esecuzione delle opere fondazionali previste per il nuovo ponte, la quota di fondo presente precedentemente ai lavori stessi, opportunamente regolarizzata. Inoltre nel progetto viene espressamente indicato che, nonostante alcune opere comportino un lieve abbassamento delle quote di fondo alveo dovute alla demolizione delle plateazioni esistenti, tale abbassamento risulta comunque condizionato dalla presenza di utenze in subalveo, la cui rimozione verrà successivamente presa in considerazione contestualmente agli altri interventi necessari per l'approfondimento dell'alveo.

In considerazione di ciò nella definizione delle geometrie di progetto definitive di questo tratto del corso d'acqua, il Progetto Definitivo è stato preso in considerazione esclusivamente per quanto concerne i manufatti oggetto di intervento, facendo invece riferimento al Progetto Preliminare per quanto riguarda le quote di fondo alveo.

Progetto Definitivo redatto nel 2013 dallo Studio Tecnico di Ingegneria "PRD" (Paese Romelli Damonte Ingegneri Riuniti) e avente oggetto "Sistemazione idraulica del tratto di valle del torrente Chiaravagna - Adeguamento delle sezioni d'alveo in corrispondenza dell'area ILVA".

Il progetto riguarda la sistemazione definitiva del corso d'acqua in prossimità dell'area ILVA, nel tratto compreso tra i ponti ferroviari e la tombinatura dello stabilimento Piaggio, comprendendo sia l'allargamento della sezione defluente sia l'abbassamento del fondo alveo secondo il profilo longitudinale originariamente previsto dal Progetto Preliminare.

Tale intervento era già stato considerato nella configurazione di progetto del precedente studio, di cui il presente costituisce l'estensione, tuttavia senza disporre del Progetto Definitivo e sulla base delle informazioni contenute nel Progetto Preliminare integrate dalle indicazioni fornite dall'Amministrazione Provinciale: in questa fase si è pertanto provveduto a recepire quanto contenuto nel Progetto Definitivo aggiornando opportunamente la geometria delle sezioni defluenti.

Il Progetto Definitivo, oltre a comprendere tutti gli interventi atti a raggiungere la configurazione finale del tratto di corso d'acqua, prevede alcune variazioni rispetto al Progetto Preliminare, dovute ai successivi approfondimenti eseguiti con l'avanzare della progettazione. La variazione più rilevante consiste nel fatto di non prevedere più, per l'area soggetta all'allargamento della sezione, la realizzazione di una soletta carrabile in analogia a quanto realizzato presso l'edificio ABB, ma di mantenere completamente sgombra la sezione di deflusso per la sua intera larghezza, pari mediamente a circa 33m. L'intervento prevede inoltre l'abbassamento del fondo alveo di circa 1m e considera come già effettuata la prevista demolizione del ponticello Piaggio. Infine tale intervento non prevede l'abbassamento del fondo alveo nel tratto precedente dei ponti ferroviari, prevedendo un'opportuna congiunzione delle quote di fondo tra questa precedente parte, sopraelevata per quanto riguarda i due fornici originari, rispetto alla quota di fondo del tratto successivo. Tale dislivello non si presenta invece allo sbocco dello scatolare costituente il terzo fornice di allargamento in sponda sinistra, realizzato rispettando le quote finali di abbassamento del fondo previste dal progetto preliminare e pertanto attualmente situato a una quota inferiore rispetto alla preesistente sezione d'alveo.

Poiché il Progetto Definitivo include tutti gli interventi originariamente previsti e finalizzati alla configurazione finale del tratto di corso d'acqua in esame, nella definizione delle geometrie di progetto definitive si è fatto esplicito riferimento a questo progetto considerandolo come totalmente sostitutivo del precedente progetto preliminare, anche in riferimento agli interventi di plateazione del fondo e di modifica delle quote di sponda.

Progetto Definitivo redatto nel 2014 dallo Studio Tecnico Ing. Gianfranco Visconti e avente oggetto “Torrente Chiaravagna: sistemazione e adeguamento delle sezioni d’alveo in corrispondenza dell’area Piaggio”.

Il progetto riguarda la sistemazione idraulica definitiva del tratto di torrente Chiaravagna compreso tra l’inizio del tratto tombinato al di sotto dell’area Piaggio e lo sbocco a valle oltre il ponte di via Marsiglia. Tale progetto prevede essenzialmente tre interventi principali: la realizzazione di un nuovo canale scolmatore sotto il piazzale dell’area Piaggio, in sponda sinistra e di larghezza pari a 9 m, quale naturale prosecuzione degli interventi di allargamento della sezione defluente realizzati nei tratti precedenti; l’abbassamento della platea dei due forni esistenti sottostanti i capannoni dello stabilimento Piaggio al fine di raggiungere la quota definitiva di progetto di fondo alveo; l’abbassamento di 1 m della quota della paratia trasversale presente in alveo e costituente la sezione iniziale della vasca di sedimentazione di valle precedentemente realizzata.

Tale intervento era già stato considerato nella configurazione di progetto del precedente studio, di cui il presente costituisce l’estensione, tuttavia senza disporre del Progetto Definitivo e sulla base delle informazioni contenute nel Progetto Preliminare: in questa fase si è pertanto provveduto a recepire quanto contenuto nel Progetto Definitivo aggiornando opportunamente la geometria delle sezioni defluenti.

Poiché il Progetto Definitivo include tutti gli interventi originariamente previsti e finalizzati alla configurazione finale del tratto di corso d’acqua in esame, nella definizione delle geometrie di progetto definitive si è fatto esplicito riferimento a questo progetto considerandolo come totalmente sostitutivo del precedente progetto preliminare.

Progetto Preliminare redatto nel 2001 dal raggruppamento temporaneo delle società STI – Studio Tecnico di Ingegneria S.r.l. e Hydrodata S.p.A. e avente oggetto “Sistemazione idraulica del tratto di valle del torrente Chiaravagna”.

Il Progetto Preliminare del 2001 ha provveduto alla progettazione della sistemazione idraulica di tutto il tratto di valle del torrente Chiaravagna, prevedendo differenti scenari progettuali da realizzarsi mediante una serie di interventi, di cui è stato definito un ordine di priorità. A partire dal 2001 numerosi interventi in esso previsti sono stati successivamente realizzati, altri risultano in avanzata fase di progettazione.

Per le finalità del presente studio il Progetto Preliminare è stato considerato sostanzialmente per gli interventi non ancora eseguiti e di cui non è disponibile un livello di progettazione più avanzata, oppure per ricavare informazioni per i tratti di corso d’acqua non oggetto degli studi sopraccitati.

In particolare è stato preso a riferimento il Progetto Preliminare per la definizione delle quote definitive di abbassamento del fondo alveo e per le modalità di realizzazione dello stesso (sottofondazione delle opere spondali, plateazioni, ecc.) per tutti i tratti per i quali tale intervento non era oggetto di una successiva progettazione, anche nelle porzioni di corso d’acqua oggetto dei progetti definitivi considerati.

Inoltre, per omogeneità delle sezioni rappresentate, nei tratti non oggetto di nessuno dei progetti sopraccitati, sono state prese in considerazione eventuali modifiche delle sezioni defluenti previste dal Progetto Preliminare, ad esempio mediante interventi di risagomatura delle sezioni, purché essi non comportassero interventi particolarmente impattanti per cui il loro inserimento avrebbe potuto pregiudicare la corretta e fedele rappresentazione della configurazione finale del torrente, nell’ipotesi che tali interventi non venissero poi confermati nei livelli di progettazione successiva. Non sono pertanto stati considerati gli scenari progettuali del Progetto Preliminare che comportano un significativo allargamento della sezione mediante la demolizione degli edifici posti in prossimità delle sponde o altri interventi riguardanti tratti esterni alla porzione di corso d’acqua oggetto del presente studio, cioè a monte del viadotto dell’Autostrada A10.

4.3 Analisi Idraulica

4.3.1 Premessa

Il presente capitolo illustra l'impostazione metodologica e i risultati delle verifiche idrauliche condotte sul tratto di Torrente Chiaravagna oggetto di studio, secondo la configurazione di progetto descritta nel precedente paragrafo.

Lo schema geometrico del corso d'acqua è analogo a quello implementato nello studio precedente, al quale sono state apportate le variazioni di seguito descritte.

In particolare oggetto di modifica e aggiornamento è risultato il solo modello monodimensionale, poiché gli interventi progettuali considerati per la definizione della configurazione finale non comportano variazioni nel dominio schematizzato tramite modellazione bidimensionale.

Finalità della presente analisi è la verifica del comportamento idraulico del torrente a fronte di eventi per assegnato tempo di ritorno pari a 50, 200 e 500 anni, al fine di valutare la presenza di residue criticità nella configurazione finale.

4.3.2 Geometria delle sezioni trasversali

In analogia allo studio precedente (cfr. elaborato 22800503-01-00303.doc), il tratto di T. Chiaravagna oggetto di studio si estende per circa 1.6 km dal viadotto dell'Autostrada A10 alla foce a mare. Tuttavia, per una valutazione complessiva del comportamento idraulico del corso d'acqua nella sua configurazione definitiva, si è ritenuto di estendere il tratto schematizzato tramite approccio monodimensionale da circa 600 m a monte del viadotto autostradale dell'A10, in corrispondenza della briglia situata immediatamente a valle del ponte della linea ferroviaria Genova – Ovada – Acqui Terme, per una lunghezza complessiva del tratto modellato di circa 2,2 Km.

Per la schematizzazione monodimensionale del corso d'acqua è stata mantenuta l'impostazione dello studio precedente, sia nella definizione e nomenclatura delle sezioni, sia nell'utilizzo di più rami al fine di rappresentare autonomamente sia il corso principale del torrente sia i manufatti laterali, connessi al torrente stesso ma idraulicamente separati. La tabella seguente elenca tutte le sezioni inserite nel modello, suddivise per rami, con riportata l'indicazione rispettivamente della sigla, della progressiva e degli eventuali manufatti rappresentati.

Tabella 4.2 Sezioni trasversali per la schematizzazione del torrente Chiaravagna nella configurazione definitiva di progetto.

TORRENTE CHIARAVAGNA					
PROGR. [m]	ID SEZIONE	NOTE	PROGR. [m]	ID SEZIONE	NOTE
-583.59	CHI_41v	briglia ponte FS - valle	793.22	CHI_14b	sezione fine edificio ELSAG
-563.59	CHI_40		796.72	CHI_14a	passerella ELSAG - monte
-530.07	CHI_39		802.52	CHI_13b	passerella ELSAG - valle
-498.07	CHI_38		807.52	CHI_13a	ex confluenza Ruscarolo
-452.07	CHI_37m	passerella Carlineo - monte	815.91	i_CHI_12	
-449.07	CHI_37v	passerella Carlineo - valle	818.91	CHI_12d	
-407.07	CHI_36		820.11	CHI_12c	sezione inizio reach "Parcheggio ABB"
-342.04	CHI_35m	briglia - monte	828.91	CHI_12b	
-339.04	CHI_35v	briglia - valle	851.79	CHI_12a	

TORRENTE CHIARAVAGNA					
PROGR. [m]	ID SEZIONE	NOTE	PROGR. [m]	ID SEZIONE	NOTE
-307.05	CHI_34m	ponte via dell'Alloro - monte	867.47	CHI_12	
-297.05	CHI_34v	ponte via dell'Alloro - valle / briglia - monte	882.98	CHI_11e	
-295.05	CHI_33	briglia - valle	912.98	CHI_11d	
-220.01	CHI_32		942.98	CHI_11c	
-194	CHI_31m	passerella Santuario - monte	962.48	CHI_11b	
-191	CHI_31v	passerella Santuario - valle	964.58	CHI_11a	sez. confluenza ramo "Parcheggio ABB" e derivazione ramo "Scolmatore"
-149	CHI_30		968.78	CHI_11	ponte via Albareto - monte
-49	CHI_29		986.78	CHI_10b	ponte via Albareto - valle
-1	CHI_28m	briglia viadotto A10 - monte	988.79	CHI_10a	ponte ferrovia GE-XXMiglia - monte
0	CHI_28v	briglia viadotto A10 - valle	999.79	CHI_09b	ponte ferrovia GE-XXMiglia - valle
5	CHI_27a		1002.19	CHI_09a	1° ponte ILVA - monte
16.04	CHI_27b	briglia di monte vasca - monte	1013.19	CHI_08c	1° ponte ILVA - valle
25.04	CHI_27c	briglia di monte vasca - valle	1027.16	CHI_08b	2° ponte ILVA - monte
27.04	CHI_27d		1042.16	CHI_08a	2° ponte ILVA - valle
62.02	CHI_27		1043.16	CHI_07c	sezione confluenza ramo "Scolmatore"
89.23	CHI_26a	briglia di valle vasca - monte	1057.16	CHI_07b	
99.23	CHI_26b	briglia di valle vasca - valle	1072.16	CHI_07a	
102.23	CHI_26c		1080.16	i_CHI_07	sezione fine platea massi cementati
106.02	CHI_26m	ponte di via Bissone - monte	1099.5	CHI_07	
116.02	CHI_26v	ponte di via Bissone - valle	1135.66	CHI_06	ex ponticello Piaggio - monte
122.05	CHI_25a	sez. 9 prog def vasca	1142.75	CHI_05b	
127.23	CHI_25b	sezione fine bacino dissipazione vasca	1144.89	CHI_05a	imbocco tombinatura Piaggio
130.23	CHI_25c	sezione fine opera presidio vasca	1226.35	CHI_04c	
216.02	CHI_25		1226.45	CHI_04b	sezione inizio ponte via Marsiglia
283.99	CHI_24		1236.45	CHI_04a	sbocco copertura via Marsiglia
333.99	CHI_23m	passerella di via VIII Società Case - monte	1243.45	CHI_03c	
337.99	CHI_23v	passerella di via VIII Società Case - valle	1258.45	CHI_03b	soglia vasca - monte
400.01	CHI_22		1258.95	CHI_03a	soglia vasca - valle
484.97	CHI_21m	passerella di via Leonardi	1271.45	CHI_03	
541.97	CHI_20		1352.53	CHI_02c	
581.28	CHI_19c		1366.53	CHI_02b	
591.29	CHI_19b		1367.63	CHI_02a	
603.11	CHI_19m	ponte obliquo via Chiaravagna - monte	1592.52	CHI_01	sezione foce (da PdB)
613.11	CHI_19v	ponte obliquo via Chiaravagna - valle			
617.58	CHI_18.5v				
640.11	CHI_18d				
			Reach "Parcheggio ABB"		
			820.11	CHI_12c_p	

TORRENTE CHIARAVAGNA					
PROGR. [m]	ID SEZIONE	NOTE	PROGR. [m]	ID SEZIONE	NOTE
645.57	CHI_18c		824.51	i_CHI_12	
658.57	CHI_18b		828.91	CHI_12b_p	
668.57	CHI_18a		851.79	CHI_12a_p	
670.67	CHI_18	sezione ex imbocco tombinatura palazzo via Giotto 15	867.47	CHI_12_p	
686.58	CHI_17.6a		882.98	CHI_11e_p	
687.58	CHI_17.6m	ponte via Giotto - monte	912.98	CHI_11d_p	
698.48	CHI_17.4m	ponte via Giotto - valle	942.98	CHI_11c_p	
699.48	CHI_17.4a		952.73	CHI_11bb_p	
714.59	CHI_17.2	sezione ex sbocco tombinatura palazzo a valle via Giotto	962.48	CHI_11b_p	
715.59	CHI_17a				
725.57	CHI_17		Reach "Scolmatore"		
729.6	CHI_16d	sezione inizio terrapieno sponda sinistra	0	CHI_11_s	sezione imbocco scolmatore
750.07	i_CHI_16		5	CHI_11_s2	
755.07	i_CHI_16		20	CHI_10_s	
760.07	i_CHI_16		90	CHI_08_s	sezione sbocco scolmatore
761.7	CHI_16	sezione imbocco tombinatura ponte via Manara			
762.7	i_CHI_16		Reach "Scolmatore Piaggio"		
772.52	i_CHI_15		0	CHI_05a_sp	sezione imbocco scolmatore piaggio / Sez. inserita scen. di progetto
773.02	CHI_15	sezione inizio edificio ELSAG	90	CHI_04a_sp	sezione sbocco scolmatore piaggio / Sez. inserita scen. di progetto
788.22	CHI_14c				

Di seguito viene riportata una descrizione delle geometrie implementate nel modello, evidenziando in particolare le modifiche apportate rispetto allo studio pregresso, a seguito dell'inserimento degli interventi previsti dai progetti indicati nel precedente paragrafo. Per una descrizione di dettaglio del tratto di torrente oggetto di studio e dei numerosi manufatti con esso interagenti (ponti, tombinature, ecc.) si rimanda a quanto descritto negli elaborati del precedente incarico. La descrizione è strutturata attraverso l'individuazione di 4 sotto tratti omogenei dal punto di vista degli interventi previsti e delle informazioni disponibili:

- dalla briglia a valle del ponte della linea ferroviaria Genova – Ovada – Acqui Terme (CHI 41) al ponte dell'Autostrada A10 (CHI 28);
- dal ponte dell'Autostrada A10 (CHI 28) alla passerella di via VIII Società Case (CHI 23);
- dalla passerella di via VIII Società Case (CHI 23) ai ponti ferroviari ILVA (CHI 08);
- dai ponti ferroviari ILVA (CHI 08) alla foce (CHI 01).

Sotto tratto dalla briglia a valle del ponte della linea ferroviaria Genova – Ovada – Acqui Terme (CHI 41) al ponte dell’Autostrada A10 (CHI 28)

Nel tratto compreso tra il ponte della linea ferroviaria Genova – Ovada – Acqui Terme e quello dell’Autostrada A10, sono state inserite nel modello le sezioni ufficiali del Piano di Bacino, così come aggiornate dal rilievo in sito descritto nel precedente Cap. 3. In particolare questo tratto è caratterizzato dalla presenza di tre attraversamenti (passerella “Carlineo”, ponte “via dell’Alloro”, passerella “Santuario”) e di tre briglie in calcestruzzo.

Per la schematizzazione delle briglie sono state utilizzate strutture di tipo “weir”, mentre per gli attraversamenti è stata effettuata una differenziazione in funzione della tipologia di struttura e del massimo livello raggiunto dalla corrente rispetto all’impalcato. Poiché le passerelle sono caratterizzate da una struttura molto snella, con ridotto ingombro delle pile in alveo e quota dell’impalcato molto al di sopra del massimo livello del pelo libero raggiunto nelle simulazioni, si è ritenuto opportuno schematizzarle senza l’inserimento di strutture ma con sezioni che tengano opportunamente conto delle geometrie ridotte dalla presenza di pile in alveo; al contrario il ponte di via dell’Alloro è stato schematizzato con una struttura di tipo “culvert” per tener opportunamente conto delle perdite di carico concentrate dovute sia al maggior ingombro del ponte sia dalla presenza di un franco ridotto o nullo nelle simulazioni ai diversi tempi di ritorno.

Questo tratto non era schematizzato nello studio precedente e non è direttamente oggetto dell’approfondimento idraulico, pertanto in esso non sono stati considerati interventi di sistemazione, mantenendo nella configurazione di progetto l’assetto attuale. Ciò nonostante, l’aggiunta di questa porzione del corso d’acqua si è rivelato necessario per le valutazioni in merito al trasporto solido e alla funzionalità della vasca di sedimentazione in progetto, localizzata immediatamente a valle del ponte autostradale, ed è stato ritenuto interessante al fine di una valutazione complessiva del torrente e del suo comportamento idraulico nella configurazione finale, permettendo di esprimere delle valutazioni anche per il tratto immediatamente a monte di quello di studio.

Sotto tratto dal ponte dell’Autostrada A10 (CHI 28) alla passerella di via VIII Società Case (CHI 23)

La configurazione di progetto del tratto compreso tra il ponte autostradale e la passerella di via VIII Società Case si caratterizza per l’assenza di interventi di abbassamento del fondo e per l’inserimento di una vasca di sedimentazione, situata tra il viadotto A10 e il ponte di via Bissone. Alcune opere contestuali alla vasca di sedimentazione interessano anche il tratto immediatamente successivo al ponte di via Bissone, mentre le sezioni successive, fino alla passerella di via VIII Società Case, differiscono dalla configurazione attuale solo per interventi di risagomatura delle stesse ma senza che venga modificato l’assetto del fondo alveo in termini di abbassamento o di plateazione.

In sintesi la vasca di sedimentazione è caratterizzata dalla presenza di due briglie agli estremi di monte e di valle che delimitano un’area di raccolta dei sedimenti il cui fondo è costituito da un reticolo di travi in calcestruzzo armato dentro il quale verranno posizionati massi di prima categoria. Successivamente alla briglia di valle è prevista la realizzazione di un bacino di dissipazione in massi cementati, che comprende la base del ponte di via Bissone, al termine del quale è prevista la realizzazione di una trincea in calcestruzzo armato di presidio allo scalzamento della scogliera. Inoltre, alla base delle briglie, è previsto il posizionamento di tubazioni per il passaggio delle portate di magra. Le briglie sono state schematizzate mediante strutture di tipo “weir”, a cui sono state accoppiate strutture di tipo “culvert” per le tubazioni di magra.

Le informazioni in merito alle modalità realizzative della vasca di sedimentazione sono state tratte dal relativo progetto definitivo, mentre per gli altri interventi afferenti a questo tratto, in

particolare la risagomatura di alcune sezioni, si è fatto riferimento al progetto preliminare del 2001 e alle sezioni di progetto in esso rappresentate.

Sotto tratto dalla passerella di via VIII Società Case (CHI 23) ai ponti ferroviari ILVA (CHI 08)

Il progetto preliminare del 2001 prevede un intervento di abbassamento del fondo della parte terminale del corso d'acqua; tale intervento ha inizio a partire dalla sezione CHI 23, in cui è situata la passerella di via VIII Società Case. Poiché di tale intervento nel suo complesso, ad eccezione di alcuni brevi tratti, non è disponibile un livello di progettazione successivo al preliminare, si è fatto riferimento al progetto del 2001 sia per quanto riguarda le quote di abbassamento del fondo e le relative geometrie delle sezioni, sia per quanto riguarda eventuali interventi di plateazione del fondo.

In particolare in questo sotto tratto, i progetti definitivi che coinvolgono singoli manufatti oggetto di intervento non prevedono la progettazione degli interventi di abbassamento del fondo, per il quale si è pertanto fatto unicamente riferimento al progetto preliminare.

A partire dalla passerella di via VIII Società Case (sezione CHI 23) fino alla sezione CHI 18, localizzata precedentemente al ponte di via Giotto (presso l'imbocco della copertura dell'edificio di via Giotto 15 recentemente demolito), il progetto preliminare prevede contestualmente all'abbassamento del fondo l'inserimento di 8 soglie a raso in massi cementati.

Nel tratto successivo, a partire dalla sezione CHI 18 fino all'imbocco del ponte di via Manara, il progetto prevede la plateazione del fondo da realizzarsi mediante un rivestimento in massi cementati, mentre dal ponte di via Manara fino all'ultimo dei ponti ferroviari ILVA è previsto un rivestimento del fondo attraverso una plateazione in c.a.

E' opportuno citare che il progetto preliminare contestualmente all'intervento di abbassamento del fondo prevede necessariamente anche interventi di sottofondazione dei muri di sponda e degli edifici presenti in fregio all'alveo e di gestione delle eventuali interferenze con i sottoservizi; di questi interventi, nel presente studio, non sono stati considerati i dettagli se non nella conformazione delle sezioni di progetto.

Infine in questo sottotratto sono previsti, oltre all'abbassamento del fondo, altri interventi già oggetto di progettazione definitiva, in particolare il ponte obliquo di via Chiaravagna, quello di via Giotto e il nodo della confluenza con il torrente Ruscarolo, presso la quale sono previsti una serie di interventi riguardanti il ponte di via Manara, l'edificio ELSAG e la confluenza stessa. Tutti i progetti relativi a questi interventi non prevedono l'abbassamento del fondo se non quale parametro progettuale, pertanto sono stati considerati esclusivamente per la definizione delle sezioni in relazione ai manufatti oggetto di progettazione (ad esempio quote degli impalcati dei ponti), mentre per la quota di fondo si è fatto riferimento a quanto indicato nel progetto preliminare.

Per quanto riguarda la schematizzazione dei manufatti interferenti con il torrente (ponti, tombinate, ecc), è stato mantenuto l'approccio modellistico utilizzato nel precedente studio, modificando opportunamente le quote e le geometrie laddove i progetti definitivi hanno permesso di beneficiare di un maggior grado di dettaglio degli interventi.

Sotto tratto dai ponti ferroviari ILVA (CHI 08) alla foce (CHI 01)

Questo tratto, in analogia al precedente, è caratterizzato dall'intervento di abbassamento del fondo, da eseguirsi congiuntamente ad altri interventi, che nello specifico riguardano l'ampliamento delle sezioni di deflusso nei tratti in corrispondenza dell'area ILVA e della copertura Piaggio. Per entrambi gli interventi, il rispettivo progetto definitivo include nella

progettazione anche la sistemazione definitiva del corso d'acqua alla quota finale prevista dal progetto preliminare, con relativi interventi di plateazione del fondo, pertanto per questo tratto del torrente tutte le informazioni in merito alla configurazione finale sono state ricavate dai progetti definitivi che aggiornano in maniera completa quello preliminare. L'area oggetto di intervento include il tratto compreso tra la sezione di sbocco dell'ultimo dei ponti ferroviari (2° ponte ILVA) e la foce; immediatamente a valle del 2° ponte ILVA è previsto un tratto di circa 40m con plateazione realizzata mediante massi cementati, in seguito, in corrispondenza della copertura Piaggio, è previsto congiuntamente a un nuovo fornice in c.a. in sponda sinistra l'abbassamento del fondo dei due fornici attualmente esistenti, con relativa pavimentazione in c.a. Infine, nel tratto terminale situato a valle del ponte di via Marsiglia, non sono presenti ulteriori plateazioni del fondo e l'ultimo intervento considerato consiste nell'abbassamento di 1m della soglia di monte della vasca di sedimentazione realizzata nel tratto terminale del torrente.

Anche per questo tratto valgono le considerazioni effettuate in precedenza sul mantenimento generale dell'approccio modellistico dello studio precedente, ad eccezione degli aggiornamenti apportati a seguito della disponibilità delle informazioni contenute nei progetti definitivi.

4.3.3 Scabrezza idraulica

Per la definizione dei parametri di scabrezza del modello monodimensionale, a differenza dello studio precedente, si è fatto unicamente riferimento ai valori ufficiali del Piano di Bacino Stralcio del torrente Chiaravagna, nella versione attuale approvato con D.C.P. n.18 del 30/07/2013. Questa differenza di approccio è legata al fatto che nello studio precedente è stata svolta una specifica procedura di calibrazione, eseguita sulla base delle evidenze dell'evento del 04 Ottobre 2010, a seguito della quale era stato adottato un parametro di scabrezza maggiormente cautelativo rispetto ai valori ufficiali del Piano. Tale valore cautelativo era stato mantenuto anche per le verifiche idrauliche nella configurazione di progetto poiché, anche sulla base delle fonti informative consultate e indipendentemente dallo specifico evento, il corso d'acqua ha manifestato nei tempi recenti uno stato generale di scarsa manutenzione e non si erano manifestati elementi sostanziali che permettessero di ipotizzare nel breve periodo un'inversione di tale tendenza.

La configurazione di progetto qui analizzata prevede invece uno stato del torrente profondamente soggetto ad interventi migliorativi delle condizioni di deflusso e in particolare oggetto di interventi direttamente correlabili ad una riduzione di scabrezza, quali la regolarizzazione e plateazione del fondo e la realizzazione di una vasca di sedimentazione in grado di trattenere il materiale solido proveniente da monte. In questa configurazione si è pertanto ritenuto opportuno adottare i valori ufficialmente previsti dal Piano di Bacino per il tratto di studio ed in particolare:

- $30 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$ per "alvei naturali regolari con fondo in ciottoli e ghiaia, liberi da vegetazione a fusto rigido", applicato a tutti i tratti non soggetti a rivestimento del fondo;
- $40 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$ per "tratti plateati o tominati con scatolari chiusi o con fondo regolare sabbioso e privo di vegetazione", applicato a tutti i tratti soggetti a plateazione del fondo.

La tabella seguente riassume le tipologie di rivestimento del fondo previste nella configurazione definitiva di progetto e i relativi valori del parametro di scabrezza associati ai diversi tratti.

Tabella 4.3 Caratterizzazione del fondo del tratto di torrente Chiaravagna oggetto di studio e definizione del parametro di scabrezza per tratti omogenei.

TORRENTE CHIARAVAGNA			
Riferimento tratto	Riferimento progressiva sezioni	Tipologia rivestimento fondo	Valore di scabrezza adottato ($m^{1/3} s^{-1}$)
Tratto precedente alla vasca di sedimentazione	-583.59 m ÷ 16.04 m	Alveo naturale	30
Vasca di sedimentazione	16.04 m ÷ 130.23 m	Rivestimento del fondo in massi e c.a.	40
Tratto compreso tra la vasca di sedimentazione e la sezione CHI 18 (ex imbocco tombinatura palazzo demolito a monte di via Giotto)	130.23 m ÷ 670.67 m	Alveo naturale con la presenza di soglie a raso in serie	30
Tratto compreso tra la sezione CHI 18 (ex imbocco tombinatura palazzo demolito a monte di via Giotto) e la sezione terminale della platea prevista nel tratto ILVA a valle dei ponti ferroviari	670.67 m ÷ 1080.16 m	Plateazione del fondo in massi cementati e in c.a.	40
Tratto ILVA compreso tra la fine della platea e l'imbocco della tombinatura Piaggio	1080.16 m ÷ 1144.89 m	Alveo naturale	30
Copertura Piaggio e ponte via Marsiglia	1144.89 m ÷ 1236.45 m	Fornici in c.a.	40
Tratto compreso tra lo sbocco del ponte di via Marsiglia e la foce	1236.45 m ÷ 1592.52 m	Alveo naturale	30
Rami laterali (Parcheggio ABB, Scolmatore ponti ferroviari e via Albareto, Scolmatore Piaggio)	-	Plateazione del fondo in c.a.	40

4.3.4 Ulteriori parametri del modello

Lo schema modellistico adottato per la configurazione di progetto del presente studio ripercorre nei termini generali quanto previsto nella configurazione di progetto del precedente studio, di cui il presente costituisce un'estensione (cfr. elaborato 22800503-01-00303.doc).

Le variazioni principali riguardano il parametro di scabrezza del modello idraulico, come descritto nel precedente paragrafo e la definizione delle perdite di energia presso i manufatti interferenti con la corrente, come di seguito illustrato.

Per la schematizzazione delle opere di attraversamento quali ponti e tombinature, infatti, è stato mantenuto lo stesso approccio modellistico per quanto riguarda la modalità di schematizzazione delle strutture, utilizzando a seconda del caso specifico sezioni chiuse o strutture di tipo "culvert", modificando opportunamente le quote e le geometrie laddove i progetti definitivi hanno permesso di beneficiare di un maggior grado di dettaglio degli interventi. Tuttavia, una sostanziale variazione introdotta rispetto allo studio precedente, riguarda una generale attenuazione delle perdite di energia localizzate in prossimità dei sopra citati manufatti: nello studio precedente tali dissipazioni erano attribuite, a seguito di specifica calibrazione effettuata sulla base delle risultanze dell'evento del 04 Ottobre 2010, a una pluralità di fenomeni quali la presenza di materiale flottante, sezioni di deflusso fortemente ostruite, il raggiungimento dell'impalcato da parte dei massimi livelli di piena e uno scarso livello di manutenzione generale. La configurazione di progetto definitiva prevede invece la presenza di una vasca di sedimentazione a monte, in grado di intercettare e ridurre eventuale materiale trasportato dalla

parte alta del bacino, una conformazione regolarizzata e in larga parte abbassata e plateata del fondo ed infine massimi livelli del pelo libero che, anche per la portata cinquecentennale, non raggiungono in generale la quota di intradosso degli implacati, evitando quindi i relativi fenomeni di rigurgito e sedimentazione e le conseguenti perdite di energia. Inoltre la presenza di vasti tratti d'alveo plateati, oltre a influenzare direttamente i parametri di scabrezza, comportano, unitamente agli altri interventi citati, uno stato generale del torrente di maggior predisposizione a un corretto deflusso e a una riduzione della presenza di ostruzioni, sedimenti e vegetazione in alveo, direttamente correlabili alle perdite concentrate che si possono manifestare presso gli attraversamenti durante episodi di piena.

Infine è opportuno segnalare, nonostante siano già stati parzialmente considerati nella configurazione di progetto del precedente studio, che alcuni degli interventi di rifacimento dei ponti (via Chiaravagna e via Giotto) prevedono, a differenza della configurazione attuale, nuove strutture sprovviste di pile in alveo, con una conseguente maggiore efficacia idraulica.

Le condizioni al contorno applicate al modello del torrente Chiaravagna risultano inalterate rispetto allo studio precedente, di cui il presente costituisce un'estensione (cfr. elaborato 22800503-01-00303.doc). In particolare tali condizioni sono applicate al solo setup 1D, quali forzanti di portata in ingresso e livello marino imposto presso la sezione terminale.

Nello specifico l'input di portata è costituito dagli idrogrammi per assegnato tempo di ritorno, determinati a seguito di un'apposita analisi idrologica. I tempi di ritorno considerati sono pari a 50, 200 e 500 anni e per ognuno di essi si sono costruiti l'idrogramma di testata e quelli relativi alle porzioni di bacino a valle, sulla base delle sezioni di chiusura precedentemente individuate; in particolare sono stati inseriti nel modello monodimensionale due contributi puntuali, a monte del viadotto autostradale e presso la confluenza con il Rio Ruscarolo, e due contributi distribuiti, relativi rispettivamente al tratto dalla sezione di monte alla confluenza e dalla stessa alla foce.

La tabella seguente fornisce un riepilogo delle portate massime al colmo nelle diverse sezioni di chiusura considerate, rispettivamente per i tempi di ritorno di 50, 200 e 500 anni. Tali valori coincidono con quelli ufficiali definiti nel Piano di Bacino Stralcio del torrente Chiaravagna.

Tabella 4.4 Torrente Chiaravagna - Portate massime al colmo per i tempi di ritorno di 50-200-500 anni nelle sezioni di chiusura di riferimento del tratto oggetto di studio.

DENOMINAZIONE BACINO	Q-TR50 (m ³ /s)	Q-TR200 (m ³ /s)	Q-TR500 (m ³ /s)
Chiaravagna - autostrada	160	203	232
Chiaravagna - monte Ruscarolo	161	204	233
Chiaravagna - valle Ruscarolo	203	257	293
Chiaravagna - foce	214	270	307
Ruscarolo	60	76	87

La condizione di valle per il modello del Torrente Chiaravagna è stata definita, all'interno delle attività del precedente incarico, tramite apposito studio del sovrizzo del livello medio mare alla foce del corso d'acqua. In particolare, poiché la foce del torrente è situata all'interno del bacino portuale della Marina di Genova Sestri, si è considerato l'innalzamento del livello medio mare come dovuto esclusivamente alla somma di marea astronomica e storm surge, dal momento che l'effetto del moto ondoso risulta trascurabile.

Nella configurazione di progetto la stima del livello marino è stata ottenuta a valle di analisi statistiche degli eventi estremi, assumendo per tutti i tempi di ritorno una condizione al contorno di livello marino costante e pari a 0.55 m s.l.m., corrispondente al livello del medio mare con tempo di ritorno decennale. Tale condizione, in analogia allo studio precedente, è stata applicata al solo setup 1D.

4.3.5 Risultati

Sulla base degli schemi geometrici e delle condizioni al contorno illustrate nei precedenti paragrafi, sono state condotte le simulazioni degli eventi associati ai tre tempi di ritorno considerati, pari a 50, 200 e 500 anni, per il tratto di Torrente Chiaravagna oggetto di studio.

Nel seguito viene presentata un'analisi dei risultati delle simulazioni con particolare riferimento, per quanto riguarda la corrente in alveo, ai livelli massimi, confrontati con le relative quote spondali e di intradosso al fine di valutare il franco idraulico di sicurezza. Particolare enfasi è indirizzata ai risultati della simulazione con tempo di ritorno 200 anni al fine di valutare se in essa viene mantenuto un franco idraulico di sicurezza superiore al metro per tutte le sezioni del tratto di corso d'acqua oggetto di studio.

Per i dettagli delle verifiche idrauliche si rimanda all'Allegato A del presente elaborato in cui sono riportate le tabelle relative ai valori idrodinamici in alveo per tutti i tempi di ritorno considerati. Le tabelle riportano le seguenti informazioni:

- Progressiva: valore di posizionamento della sezione trasversale, come distanza progressiva in [m] a partire dall'inizio del tratto;
- ID sezione: identificativo della sezione trasversale;
- Quota fondo: minimo livello altimetrico [m s.l.m.] delle quote d'alveo;
- Y: tirante idrico in [m];
- PL: livello del pelo libero in [m s.l.m.];
- V: velocità della corrente in [m/s];
- Fr: numero di Froude;
- H: valore del carico totale in [m s.l.m.];
- Franco: franco idraulico di sicurezza in [m].

Il risultato più evidente che emerge dall'analisi di tutte le simulazioni con i diversi tempi di ritorno è che, anche con la portata cinquecentennale, nella configurazione di progetto la corrente risulta contenuta entro le sponde dell'alveo, senza coinvolgere alcuna porzione del tessuto urbano circostante. In conseguenza di ciò, indipendentemente dal rispetto del franco idraulico di sicurezza, è possibile affermare che nella configurazione finale di progetto non sono presenti aree soggette ad allagamenti.

4.3.5.1 Evento con tempo di ritorno 500 anni

Per quanto riguarda l'evento cinquecentennale **si evidenzia che tale evento di piena risulta contenuto entro le sponde per tutto il tratto di studio del corso d'acqua**. I franchi risultano tutti positivi e maggiori di un metro per la maggior parte delle sezioni, ad eccezione di alcune di esse in cui risulta pari mediamente a 0.8-0.9m.

Estendendo l'analisi al tratto dal ponte ferroviario a quello autostradale (dalla sezione CHI41 alla CHI28), pur non essendo specificamente oggetto del presente studio, si evidenzia la presenza di un franco negativo presso il ponte di via dell'Alloro, in cui il massimo pelo libero della corrente risulta superiore alla minima quota di intradosso, ma comunque inferiore delle quote di sponda. Inoltre, nel tratto immediatamente a monte della briglia situata presso il viadotto autostradale, si evidenziano franchi positivi ma inferiori a 0.5 m.

In conclusione è possibile affermare che l'evento con tempo di ritorno 500 anni non genera allagamenti nell'area urbana circostante al tratto di torrente Chiaravagna oggetto di studio e che transita nel torrente, nella sua configurazione definitiva, con un franco positivo in tutte le sezioni.

4.3.5.2 Evento con tempo di ritorno 200 anni

In analogia all'evento cinquecentennale, anche quello con tempo di ritorno 200 anni defluisce nell'alveo del torrente, a seguito della sua sistemazione definitiva, senza evidenziare sormonti spondali. In particolare l'evento con TR 200 anni rispetta in tutte le sezioni del tratto oggetto di studio un franco positivo superiore al metro: **è quindi possibile affermare che in tale configurazione di progetto il tratto di torrente in esame risulta in sicurezza.**

Estendendo l'analisi al tratto precedente al viadotto autostradale, si evidenzia un minimo franco negativo presso il ponte di via dell'Alloro, in cui il livello del pelo libero raggiunge la minima quota di intradosso dell'impalcato pur rimanendo inferiore alle quote spondali e, in analogia all'evento cinquecentennale, un franco inferiore al metro nelle sezioni immediatamente precedenti al viadotto autostradale. A tal fine si segnala che il progetto preliminare del 2001 prevedeva, per il tratto compreso tra le sezioni CHI 29 e CHI 28, un adeguamento delle sezioni di deflusso mediante una serie di interventi tra i quali l'abbassamento del fondo, la conseguente parziale demolizione della briglia della sezione CHI 28 al fine di abbassarne la quota di sfioro e l'allargamento in sponda sinistra della sezione di deflusso, da ottenersi anche attraverso la demolizione di alcuni capannoni in lamiera. Le evidenze del presente studio suggeriscono pertanto di valutare la realizzazione di tale intervento, eventualmente anche in misura parziale, al fine di mantenere un franco superiore al metro per l'evento duecentennale anche in questo tratto situato a monte del viadotto autostradale. Per quanto riguarda il ponte di via dell'Alloro, invece, esso risulta al di fuori del tratto oggetto di studio anche del progetto preliminare, pertanto nessuno degli studi consultati nel presente incarico prevede un intervento presso tale attraversamento.

In conclusione è possibile affermare che il tratto oggetto di studio nella sua configurazione finale di progetto risulta in sicurezza a fronte di un evento con tempo di ritorno 200 anni, poiché in tutte le sezioni si evidenziano franchi positivi e superiori al metro.

4.3.5.3 Evento con tempo di ritorno 50 anni

La simulazione dell'evento con tempo di ritorno 50 anni, in analogia ai precedenti, evidenzia l'assenza di sormonti spondali in tutto il tratto di torrente investigato e franchi idraulici costantemente superiori a 1.2 m per la porzione di torrente successiva al viadotto autostradale. Nel tratto a monte di quello oggetto di studio, si evidenziano alcune sezioni con franchi idraulici minori di 1 m, ed in particolare presso il ponte di via dell'Alloro e nel tratto immediatamente precedente all'attraversamento del viadotto autostradale, così come già specificato per gli eventi con i tempi di ritorno precedentemente investigati.

In conclusione è possibile affermare che l'evento con tempo di ritorno 50 anni transita nel torrente, nella sua configurazione definitiva, con un franco idraulico positivo in tutte le sezioni ed in particolare superiore al metro in tutta la porzione di torrente successiva all'attraversamento del viadotto autostradale.

4.4 Conclusioni dell'analisi idraulica

Le analisi idrauliche condotte hanno consentito di definire un quadro molto preciso dell'assetto idraulico del tratto di corso d'acqua indagato nella sua configurazione di progetto definitiva.

Tale configurazione è stata determinata sovrapponendo le informazioni dei diversi progetti disponibili, ponendo quale base informativa il progetto preliminare del 2001, a cui sono state aggiunte, per i rispettivi interventi di competenza, le informazioni dei progetti definitivi; in

particolare si è fatto riferimento al progetto preliminare per quanto riguarda l'assetto finale del fondo del corso d'acqua, sia in termini di quote che di opere di rivestimento, anche nei tratti interessati da alcuni dei progetti definitivi in cui tra gli interventi previsti non era compresa la sistemazione finale del fondo.

Dalle analisi idrauliche così condotte emerge che il tratto di torrente Chiaravagna localizzato tra il viadotto autostradale e la foce, oggetto del presente studio, risulta in tale configurazione definitivamente in sicurezza, poiché l'evento con tempo di ritorno 200 anni transita in tutte le sezioni con un franco idraulico superiore al metro e, considerando anche l'evento con tempo di ritorno 500 anni, che rappresenta sostanzialmente una condizione di rischio residuo, esso risulta contenuto entro le sponde e con franchi idraulici positivi presso tutti gli attraversamenti.

Per quanto riguarda invece il breve tratto localizzato tra il ponte della linea ferroviaria Genova – Ovada – Acqui Terme e il viadotto dell'Autostrada A10, pur non essendo oggetto del presente studio, esso è stato comunque schematizzato all'interno del modello e i risultati evidenziano alcune criticità meritevoli di approfondimento, nonostante per tutti i tempi di ritorno considerati la piena risulti comunque contenuta entro le sponde; in particolare il ponte di via dell'Alloro risulta non verificato poiché il livello della piena duecentennale supera la minima quota di intradosso e infine, presso le sezioni localizzate immediatamente a monte del viadotto autostradale, sono presenti franchi inferiori al metro per tutti i tempi di ritorno e in tale tratto, il progetto preliminare del 2001, ha previsto una serie di interventi di adeguamento delle sezioni di deflusso che allo stato attuale risultano non realizzati e pertanto meritevoli di un approfondimento, al fine di consentire anche in questo tratto il rispetto del minimo franco idraulico necessario per considerare il corso d'acqua in sicurezza.

Quale ulteriore elemento di analisi si riportano nella tabella seguente i valori di franco idraulico per i tre tempi di ritorno considerati, associati a tutte le strutture di attraversamento presenti nel tratto del torrente Chiaravagna oggetto di studio, riferendo tali valori alle rispettive sezioni di monte; in tabella sono riportati i valori anche per gli attraversamenti presenti a monte del viadotto autostradale, schematizzati nel modello 1D ma esterni al tratto di corso d'acqua oggetto del presente incarico.

Tabella 4.5 Livello di intradosso, pelo libero e franco idraulico degli attraversamenti lungo il tratto del Torrente Chiaravagna oggetto di studio nella configurazione definitiva di progetto, per i tre tempi di ritorno considerati (TR50-200-500anni).

Struttura			Configurazione definitiva di progetto						
Nome Sezione	PROGR.	SEZIONE	Intradosso	TR50		TR200		TR500	
	[m]	ID		[m.s.m.]	[m.s.m.]	[m]	[m.s.m.]	[m]	[m.s.m.]
Passerella Carlineo (*) (**)	-452.07	CHI_37m	30.90	28.12	1.98	28.34	1.76	28.47	1.63
Ponte via dell'Alloro (*)	-307.05	CHI_34m	24.80	24.64	0.16	25.01	-0.21	25.25	-0.45
Passerella Santuario (*)	-194.00	CHI_31m	24.20	20.81	3.39	21.08	3.12	21.25	2.95
Ponte De Simone	106.02	CHI_26m	16.60	13.28	3.32	13.60	3.00	13.79	2.81
Passerella v. VIII Soc. Case	333.99	CHI_23m	12.30	10.97	1.33	11.27	1.03	11.46	0.84
Passerella via Leonardi	484.97	CHI_21m	11.95	7.95	4.00	8.38	3.57	8.65	3.30
Ponte obliquo v. Chiaravagna	603.11	CHI_19m	8.34	6.85	1.49	7.26	1.08	7.52	0.82
Ponte via Giotto	687.58	CHI_17.6m	7.39	5.29	2.10	5.57	1.82	5.75	1.64
Ponte via Manara	761.70	CHI_16	6.83	4.55	2.28	4.84	1.99	5.02	1.81
Passerella ELSAG	796.72	CHI_14a	6.55	3.80	2.76	4.13	2.42	4.33	2.22
Ponte via Albareto	968.78	CHI_11	4.50	2.95	1.55	3.28	1.22	3.48	1.02
Ponte ferrovia GE-XXMiglia	988.79	CHI_10a	4.27	2.39	1.88	2.68	1.59	2.85	1.42
1° Ponte ILVA	1002.19	CHI_09a	4.11	2.34	1.77	2.64	1.47	2.80	1.31
2° Ponte ILVA	1027.16	CHI_08b	4.15	2.21	1.94	2.50	1.65	2.67	1.49
Tombinatura Piaggio	1144.89	CHI_05a	2.88	1.62	1.26	1.87	1.01	2.02	0.86
Ponte via Marsiglia	1226.45	CHI_04b	2.86	1.17	1.69	1.38	1.48	1.52	1.34

(*): manufatti esterni al tratto oggetto di incarico - (**): Franco riferito a minima quota di sponda (30.10 m.s.m.)

5 Analisi granulometriche

Nel tratto compreso tra la linea ferroviaria Genova-Ovada-Acqui Terme e la confluenza in mare sono stati eseguiti rilievi granulometrici al fine di caratterizzare morfologicamente l'alveo inciso del Chiaravagna; i dati granulometrici e stratigrafici di rilievo costituiscono le condizioni al contorno da assegnare in input al modello idrodinamico-morfologico per valutare la capacità di trasporto dell'asta fluviale.

5.1 Localizzazione dei prelievi in alveo

La scelta dei punti di campionamento è stata eseguita sulla base delle caratteristiche geometriche e morfometriche del Chiaravagna nel tratto descritto al paragrafo precedente; in particolare gli elementi guida considerati sono i seguenti:

- pendenza longitudinale dell'asta fluviale,
- presenza di opere di difesa trasversali di controllo del trasporto solido di fondo (briglie e soglie),
- indagini di campo in cui si sono determinati i tratti in cui prevale una tendenza all'erosione ovvero al deposito del materiale solido.

Sono stati quindi selezionati 6 punti di indagine di seguito elencati (da monte verso valle) e riportati nelle Figura 5.1 e Figura 5.2:

- P3 localizzato tra le sezioni CHI 36 e 35; nella CHI35 è presente una briglia che si trova a monte del ponte di via dell'Alloro;
- P2 localizzato a valle della briglia CHI 33, ubicata immediatamente a valle del ponte di via dell'Alloro;
- P1 localizzato a valle della briglia CHI 28, in corrispondenza dell'attraversamento dell'A10;
- P4 localizzato tra CHI 18 e l'attraversamento di via Giotto,
- P5 localizzato in corrispondenza dell'attraversamento della linea ferroviaria Genova Ventimiglia,
- P6 a valle dell'edificio Piaggio (CHI 06) in corrispondenza della confluenza in mare.

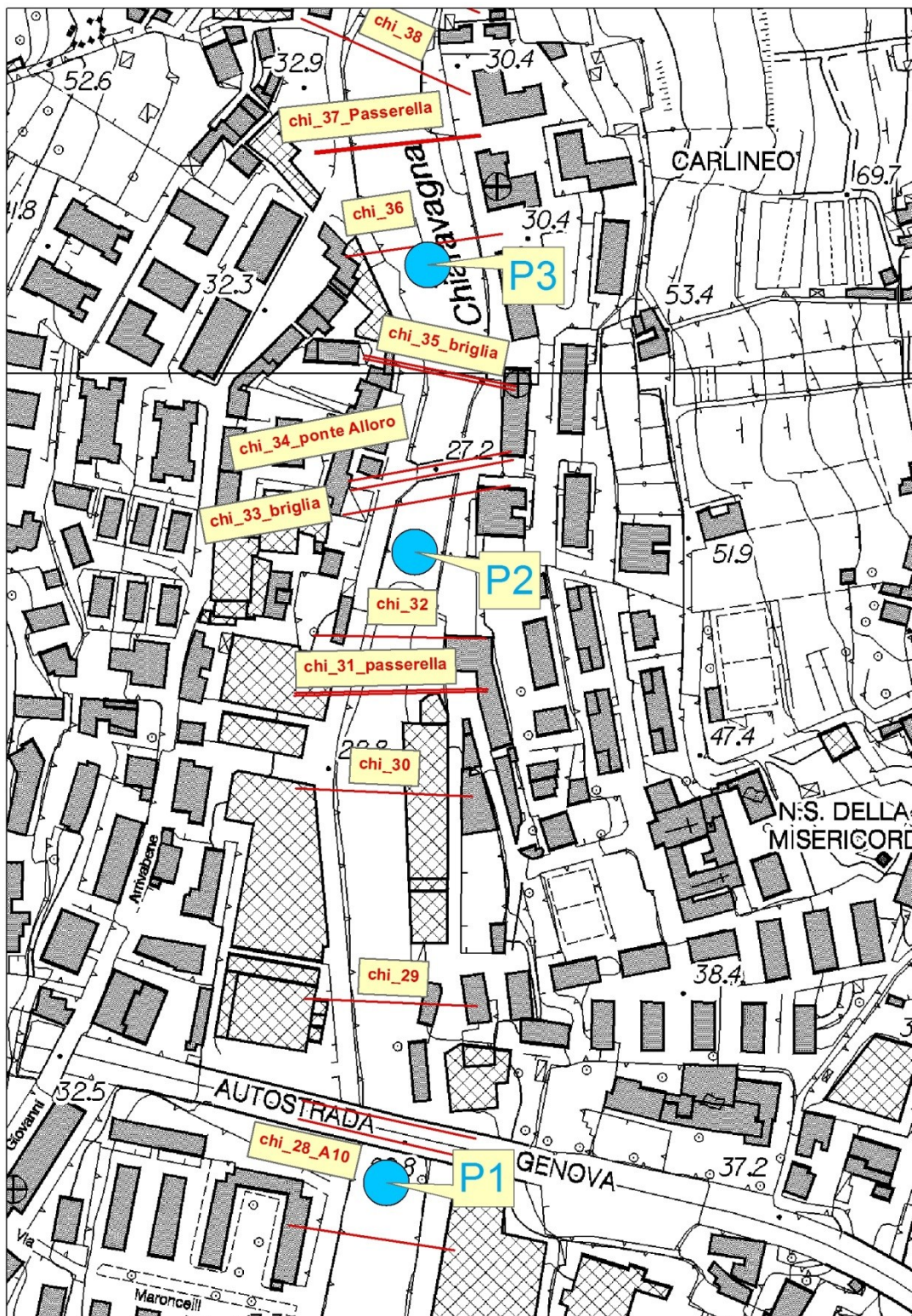


Figura 5.1 – Localizzazione dei punti di prelievo granulometrico (P1, P2, P3).

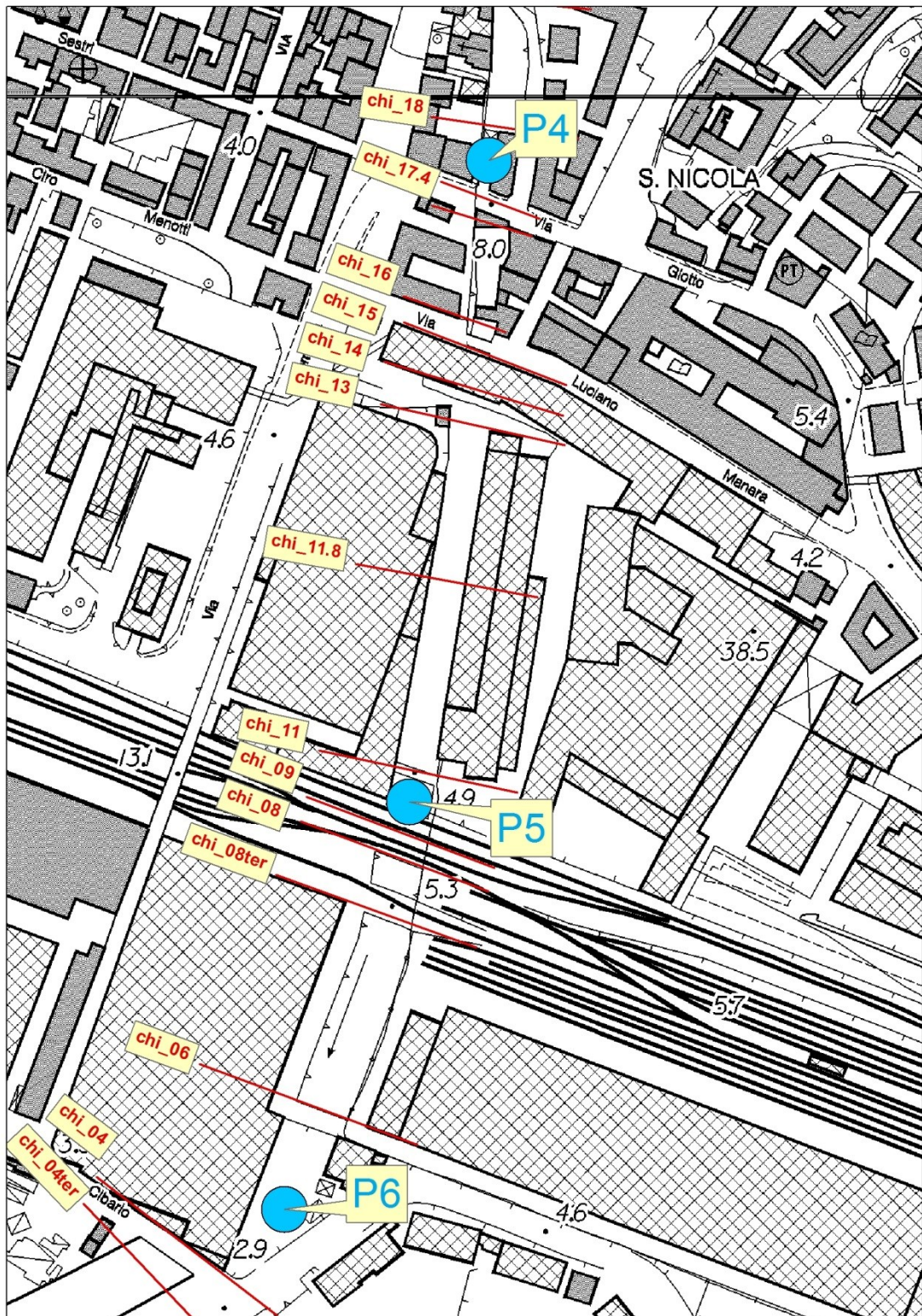


Figura 5.2 – Localizzazione dei punti di prelievo granulometrico (P4, P5, P6).

5.2 Metodologia di analisi dei prelievi di materiale solido

I campioni di materiale del fondo alveo sono stati prelevati dopo aver rimosso lo strato di corazzamento; l'area di superficie di prelievo è caratterizzata da dimensioni 0,6 x 0,6 m.

I campioni, chiusi in sacchetti opportunamente etichettati, sono stati portati in laboratorio e sono stati sottoposti a setacciatura previo essiccamento a 110° seguendo i criteri previsti dalle normative ASTM D421 e D422.

I setacci della serie ASTM utilizzati sono riportati in tabella.

Tabella 5.1 Setacci serie ASTM utilizzati per i campioni granulometrici raccolti.

N° SETACCI ASTM	DIAMETRO SETACCIO (mm)
200	0,075
100	0,149
35	0,5
18	1
10	2
4	4,76
0.5"	12,5
1"	25,4
2"	50,8

Il peso dei singoli campioni esaminati rispetta largamente le prescrizioni (almeno 4 Kg per i campioni con clasti maggiori trattenuti dal setaccio da 2") con pesi compresi tra di 9-12 Kg.

Per la classificazione dei campioni è stata adottata la metodologia dell'AGI (Associazione Geotecnica Italiana) che, oltre a essere probabilmente quella più diffusa in Italia, presenta il vantaggio di avere individuato un sistema anche per l'identificazione dei campioni composti da più frazioni.

La classificazione principale adottata, leggermente modificata per tenere conto della serie di setacci è utilizzata, è la seguente (in mm):

0.075	2	50.8
Limo	Sabbia	Ghiaia
		Ciottoli

Sotto la voce limo è inclusa anche la frazione argillosa, non distinguibile con il tipo di analisi effettuate in laboratorio ma, date le caratteristiche dei corsi d'acqua indagati, verosimilmente poco rilevante.

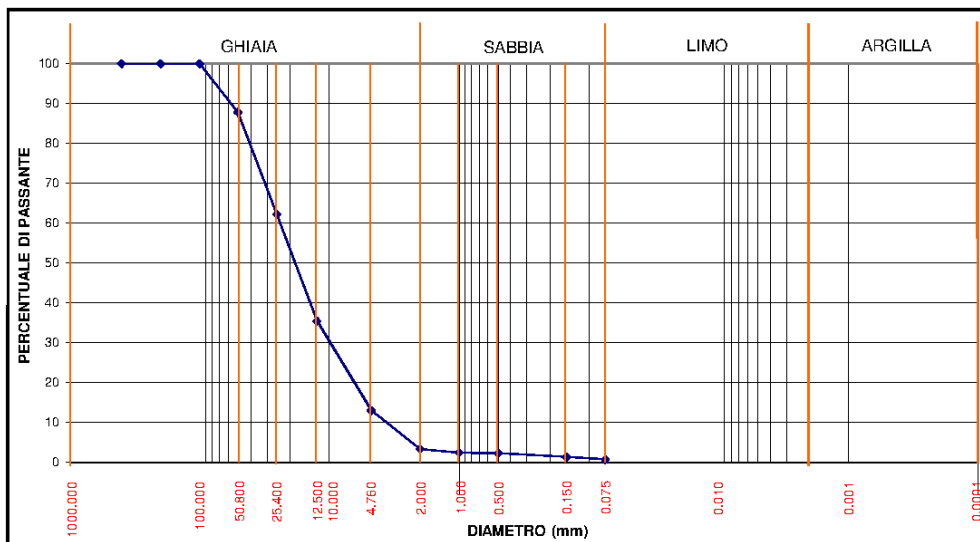
Per quanto riguarda l'identificazione dei terreni composti si riportano di seguito integralmente le raccomandazioni AGI:

"... siano A, B, C i nomi degli intervalli principali (argilla, limo); siano p1, p2, p3 le percentuali di A, B, C, presenti nella terra in esame; se per esempio p1>p2>p3 il terreno viene denominato col nome della frazione A, seguito dai nomi della frazione B e C preceduti dalla congiunzione "con", se il corrispondente p è compreso tra il 50% e il 25 %, seguito dal suffisso "oso" se p è tra il 25% e il 10 %; o infine seguito dal suffisso "oso" e preceduto da "debolmente" se p è compreso tra il 10% e il 5 %".

Nel seguito sono riportati, in ordine procedendo da monte verso valle, i risultati delle setacciate con relative curve granulometriche e immagini del prelievo in situ.

	CURVA GRANULOMETRICA	CLASSIFICAZIONE 2987H003
		MCD LMM M/C PT 012 rev. 5-28/02/08

RIFERIMENTI CAMPIONAMENTO	
CAMPIONE N°:	P3
LUOGO PRELIEVO:	Chiaravagna a Genova
DATA PRELIEVO:	16/06/2014
DESCRIZIONE/NOTE:	



D90= 57.459	D60= 23.955	D50= 18.364	D10= 3.624	Cu=D60/D10= 6.611	Cc=D30^2/(D10*D60)= 1.120
-------------	-------------	-------------	------------	-------------------	---------------------------

CLASSIFICAZIONE CAMPIONE (AGI)	Ghiaia
--------------------------------	--------

ANNOTAZIONI:

ELABORAZIONE:	DATA ELABORAZIONE:	VERIFICA RLLM:	C SOLDERA
---------------	--------------------	----------------	-----------

Figura 5.3 – Risultati setacciatura campione P3.

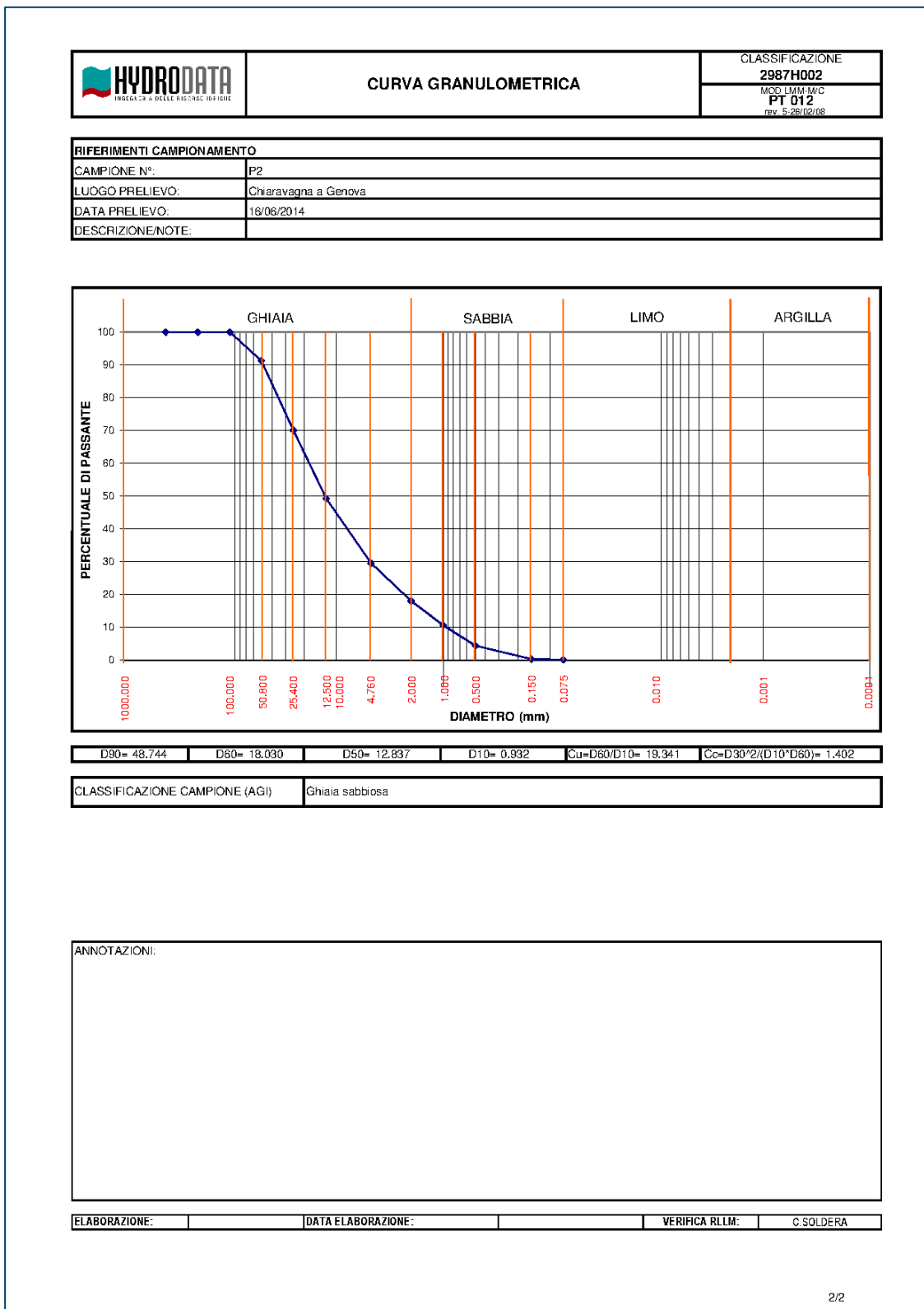
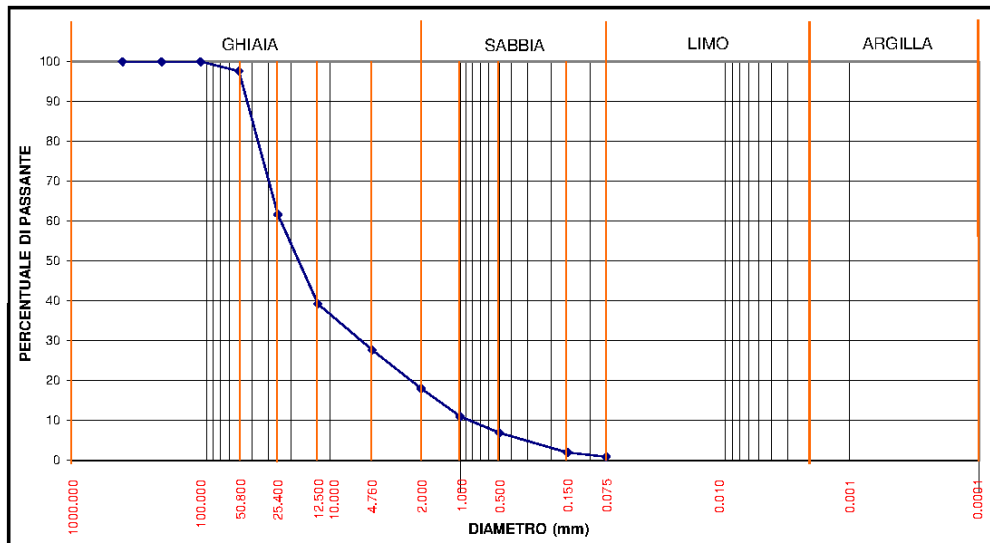


Figura 5.4 - Risultati setacciatura campione P2.

	CURVA GRANULOMETRICA	CLASSIFICAZIONE 2987H001
		MOD. LMM-M/C PT 012 rev. 5/26/02/08

RIFERIMENTI CAMPIONAMENTO	
CAMPIONE N°:	P1
LUOGO PRELIEVO:	Chiaravagna a Genova
DATA PRELIEVO:	18/06/2014
DESCRIZIONE/NOTE:	



D80= 43.882	D60= 24.093	D50= 17.560	D10= 0.840	Cu=D80/D10= 28.674	Cc=D30*2/(D10*D60)= 1.651
-------------	-------------	-------------	------------	--------------------	---------------------------

CLASSIFICAZIONE CAMPIONE (AGI)	Ghiaia sabbiosa
--------------------------------	-----------------

ANNOTAZIONI:

ELABORAZIONE:	DATA ELABORAZIONE:	VERIFICA RLLM:	C.SOLDERA
---------------	--------------------	----------------	-----------

Figura 5.5 - Risultati setacciatura campione P1.

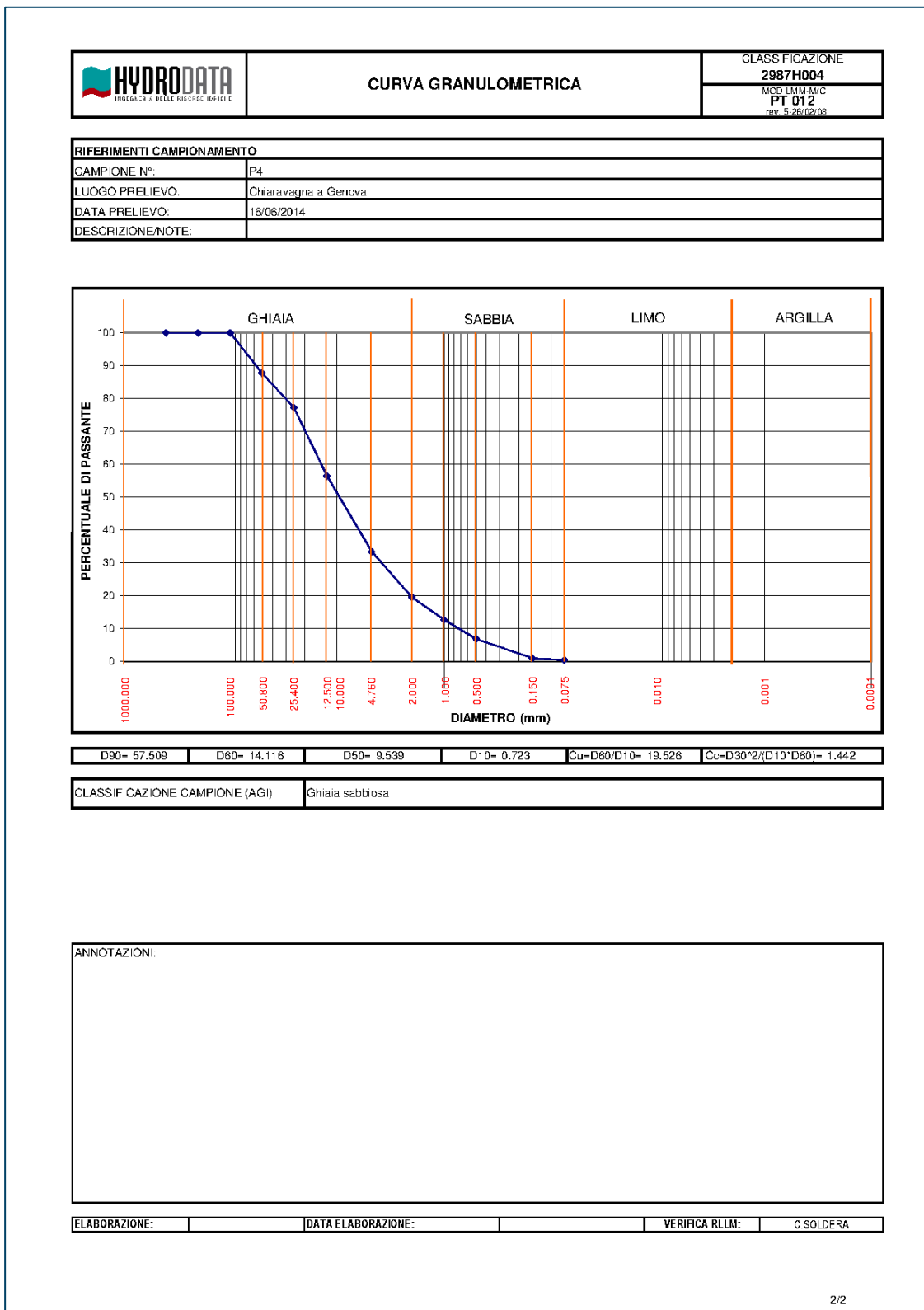
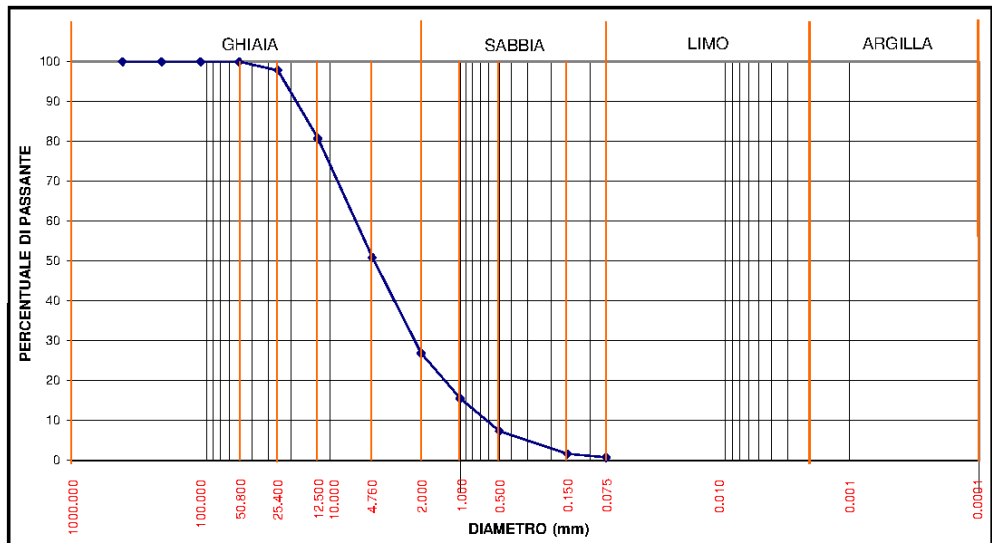


Figura 5.6 - Risultati setacciatura campione P4.

	CURVA GRANULOMETRICA	CLASSIFICAZIONE 2987H005
		MOD. LMM/M/C PT 012 rev. 5/25/10/08

RIFERIMENTI CAMPIONAMENTO	
CAMPIONE N°:	P5
LUOGO PRELIEVO:	Chiaravagna a Genova
DATA PRELIEVO:	18/06/2014
DESCRIZIONE/NOTE:	



D80= 18.366	D60= 6.387	D50= 4.605	D10= 0.623	Cu=D80/D10= 10.255	Cc=D30^2/(D10*D60)= 1.255
-------------	------------	------------	------------	--------------------	---------------------------

CLASSIFICAZIONE CAMPIONE (AGI)	Ghiaia con sabbia
--------------------------------	-------------------

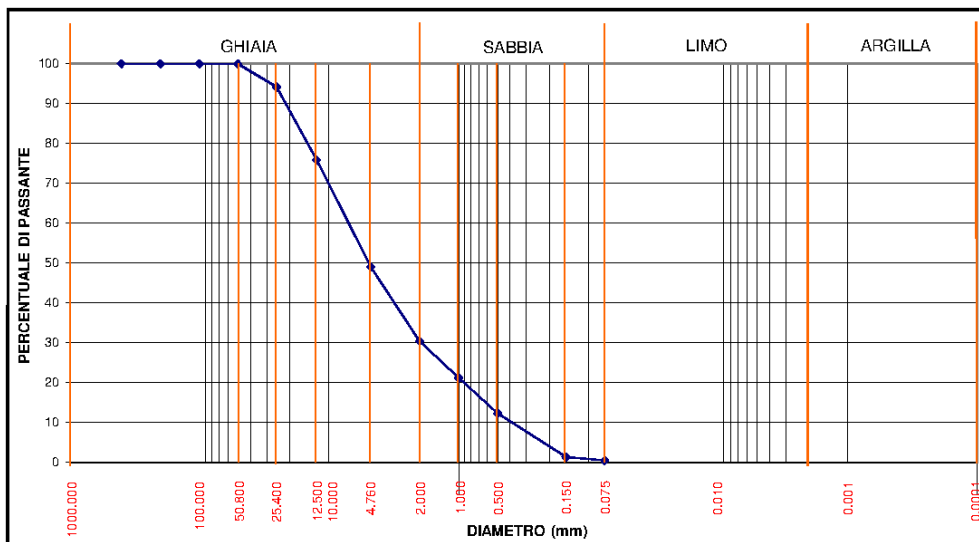
ANNOTAZIONI:

ELABORAZIONE:	DATA ELABORAZIONE:	VERIFICA RLM:	C.SOLDERA
---------------	--------------------	---------------	-----------

Figura 5.7 - Risultati setacciatura campione P5.

	CURVA GRANULOMETRICA	CLASSIFICAZIONE 2987H006
		MOD. LMM M/C PT 012 rev. 5-28/02/08

RIFERIMENTI CAMPIONAMENTO	
CAMPIONE N°:	P6
LUOGO PRELIEVO:	Chiaravagna a Genova
DATA PRELIEVO:	16/06/2014
DESCRIZIONE/NOTE:	



D90= 21.642	D60= 7.067	D50= 4.930	D10= 0.388	Cu=D60/D10= 18.229	Cc=D30^2/(D10*D60)= 1.375
-------------	------------	------------	------------	--------------------	---------------------------

CLASSIFICAZIONE CAMPIONE (AGI)	Ghiaia con sabbia
--------------------------------	-------------------

ANNOTAZIONI:

ELABORAZIONE:	DATA ELABORAZIONE:	VERIFICA RLLM:	C SOLDERA
---------------	--------------------	----------------	-----------

Figura 5.8 - Risultati setacciatura campione P6.



Figura 5.9 – Fondo alveo in corrispondenza del prelievo P3.



Figura 5.10 - Fondo alveo in corrispondenza del prelievo P2.



Figura 5.11 - Fondo alveo in corrispondenza del prelievo P1.



Figura 5.12 - Fondo alveo in corrispondenza del prelievo P4.



Figura 5.13 - Fondo alveo in corrispondenza del prelievo P5.



Figura 5.14 - Fondo alveo in corrispondenza del prelievo P6.

6 Valutazione del trasporto solido potenziale a scala di bacino

La valutazione del trasporto solido potenzialmente reso disponibile dal bacino di testata del Chiaravagna (bacino a monte del viadotto autostradale) è stata condotta utilizzando due differenti metodologie, il metodo di Gavrilovic S.¹ (1959) ed il metodo proposto da Ciccacci *et alii* (1980)².

6.1 Calcolo con il metodo di Gavrilovic

Tale metodologia permette di stimare la produzione di sedimenti media annua in funzione del “peso” attribuito, sulla base di analisi statistiche, alle differenti variabili indipendenti considerate: fisiografia, piovosità, termometria, utilizzazione del territorio e assetto vegetazionale, erodibilità del substrato roccioso, condizioni di dissesto idrogeologico in atto.

Il metodo, già ampiamente utilizzato e verificato in passato, risulta uno dei più completi sotto il profilo delle variabili considerate.

In particolare vengono utilizzati i parametri seguenti.

Parametri fisiografici

- S = superficie bacino (Km²);
- $I' = \sqrt{I}$ dove I è la pendenza media del bacino (-);

Parametri climatici

- $t' = \text{coefficiente di temperatura} = \sqrt{t * 0,1 + 0,1}$ dove t è la temperatura media annua (per $t < -1$ $t' = 0$);
- h = precipitazione media annua (mm);

Uso del suolo

- A = superficie a boschi e frutteti (Km²);
- B = superficie a prati e pascoli (Km²);
- C = superficie seminativi e coltivi vari (Km²);
- D = superficie sterile (Km²);
- U = superficie pavimentata e urbanizzata (Km²);

Litologia

- J = superficie rocce incoerenti (Km²);
- K = superficie rocce pseudocoerenti e semicoerenti (Km²);

¹ Gavrilovic S. (1959) « Methode de la classification des bassins torrentiels et equation nouvelles pour le calcul des hautes eaux et du debit solide ». Vadoprivreda, Belgrado.

² CICCACCI S., FREDI P., LUPIA PALMIERI E. & PUGLIESE F. (1980) – *Contributo dell'analisi geomorfica quantitativa alla valutazione dell'entità dell'erosione nei bacini fluviali*. Boll. Soc. Geol. It. 99. pp 455-516.

- L = superficie rocce coerenti (Km²);

Dissesti

N = superficie con frane (Km²);

P = superficie con erosione accentuata (Km²);

Q = superficie zone con valanghe (Km²).

I singoli parametri vengono opportunamente combinati e pesati per esprimere i coefficienti di degradazione legati ai diversi fattori che concorrono alla definizione del livello di erodibilità dei bacini ovvero il coefficiente di protezione del suolo dato dalla vegetazione (X), il coefficiente di erodibilità del suolo dato dalla litologia (Y) e il coefficiente di degradazione (V'):

$$X = \frac{(A \cdot 0.2 + B \cdot 0.5 + C \cdot 0.8 + D \cdot 1.0 + 0.05 \cdot U)}{S}$$

$$Y = \frac{(J \cdot 1.6 + K \cdot 0.8 + L \cdot 0.3)}{S}$$

$$R = \frac{(N \cdot 7 + P \cdot 4 + Q \cdot 2)}{S} \cdot 100$$

Da R (superficie dissestata relativa) è quindi possibile calcolare il coefficiente di degradazione (V') che varia secondo il seguente schema:

se $0 \leq R \leq 0.5$	allora $V' = 0.1 + R \cdot 0.4$
se $0.5 < R < 2$	allora $V' = 0.134 \cdot R + 0.133$
se $2 \leq R \leq 8$	allora $V' = R/10 + 0.2$
se $R > 8$	allora $V' = 1$

e quindi il coefficiente di erosione relativa (Z):

$$Z = X \cdot Y \cdot (V' + 1)$$

Dai parametri così calcolati è infine possibile arrivare alla stima del volume (in m³) di materiale prodotto annualmente entro il bacino considerato a causa dei processi erosivi ovvero il trasporto solido potenziale (W):

$$W = S \cdot t \cdot h \cdot \pi \cdot \sqrt{Z^3}$$

Noto W si calcola facilmente la profondità di erosione media annua (E1) e il contributo specifico alla produzione dei sedimenti (E2).

Il metodo è stato applicato alla sezione del Chiaravagna in corrispondente dell'attraversamento autostradale.

Nel caso specifico i parametri fisiografici sono stati calcolati direttamente dai dati caratteristici del bacino ricavati dalla relazione "T. Chiaravagna – Analisi idrologica e idraulica", elaborato 22800503-01-00303.doc.

I parametri climatici sono stati desunti dalla serie storica 1970-2000 della stazione meteorologica dell'Aeronautica Militare di Genova Sestri-Ponente. Per tenere conto dell'altitudine media del bacino (333 m s.m.) alla temperatura media annua di detta stazione è stato applicato un gradiente termico di letteratura pari ad una riduzione di 6,5° ogni 1000 m.

Per l'uso suolo è stata utilizzata la carta della Regione Liguria aggiornata al 2012 e scaricata dal sito web <http://www.cartografia.regione.liguria.it>.

Per la litologia si è fatto riferimento al foglio CARG 213 Genova, sempre scaricato dal sopra menzionato sito web.

Per i dissesti è stata utilizzata la "Carta della Franosità Reale" del Piano di Bacino stralcio del Chiaravagna, scaricata dal sito web della Provincia di Genova. Ovviamente, data la modesta altitudine ed al contesto climatico, non sono presenti aree soggette allo sviluppo di valanghe.

Occorre precisare che il metodo di Gavrilovic fornisce un valore medio annuo di materiale eroso che non è correlabile direttamente al volume mobilizzato durante un evento di piena. In effetti è facilmente prevedibile che durante gli eventi catastrofici vengano mobilizzate quantità di depositi superiori alla media annua.

I risultati di tali elaborazioni sono riportati nella tabella seguente e corrispondono ad una erosione media paragonabile, anche se leggermente più bassa, ai valori medi di sollevamento dell'arco alpino (dell'ordine dei mm/anno), per un volume totale annuo di poco inferiore ai 4000 m³. Ferme restando le inevitabili incertezze della metodologia, il volume complessivo desunto dal calcolo è comunque da ritenersi superiore a quello reale che effettivamente può transitare nella sezione di riferimento, infatti il valore calcolato con il metodo di Gavrilovic definisce il quantitativo di materiale eroso. Solo una parte di esso tuttavia subisce un trasporto fino all'asta principale del Chiaravagna, un'altra parte, pur mobilizzata si deposita a monte della sezione di riferimento (nel fondovalle, lungo le conoidi, negli accumuli di frana ecc.).

Si tenga inoltre presente che nelle vasche di sedimentazione si deposita il trasporto solido di fondo, costituito da materiale grossolano (caratterizzato dal diametro d_{50}), e solo una modesta frazione di quello in sospensione.

Tabella 6.1 Bacino del T. Chiaravagna alla sezione dell'attraversamento autostradale: calcolo del trasporto solido con il metodo di Gavrilovic.

Fisiografia	S (Km ²)	7,622
	I	0,470
Clima	t* °C	13,6
	h (mm)	1079
Uso del suolo	A (Km ²)	5,240
	B (Km ²)	0,563
	C (Km ²)	0,343
	D (Km ²)	1,181
	U (Km ²)	0,303
Litologia	J (Km ²)	0,456
	K (Km ²)	0,336
	L (Km ²)	6,830
Dissesti	N (Km ²)	1,683
	P (Km ²)	0,000
	Q (Km ²)	0,000
Fattori di calcolo	R	154,6
	X	0,37
	Y	0,40
	t'	1,208
	V'	1,00
	I'	0,69
	Z	0,25
Risultati	W (m³/a)	3843
	E1 (mm/a)	0,504
	E2 (m ³ /km ² /a)	504

6.2 Calcolo del trasporto di torbida con il metodo Ciccacci

Seguendo la metodologia utilizzata per il calcolo del trasporto solido nel “Piano di Bacino Stralcio per la Tutela del Rischio Idrogeologico” del T. Chiaravagna si è proceduto al calcolo del trasporto di torbida “Tu” con il metodo proposto da Ciccacci.

Tale metodo, previa analisi multivariata di una serie di casi sperimentali, definisce alcune formule empiriche che restituiscono il trasporto torbido unitario, in tonnellate annue per Km², in funzione della densità di drenaggio, della densità di anomalia gerarchica e dell'indice di anomalia gerarchica.

Come noto la densità di drenaggio è data dal rapporto tra la lunghezza, in Km, del reticolo idrografico nel suo complesso e la superficie del bacino idrografico in Km².

Per valutare l'anomalia gerarchica, viceversa, occorre definire l'ordine gerarchico dei corsi d'acqua. Allo scopo il metodo di gran lunga più utilizzato, e a cui si fa riferimento in *Ciccacci et alii*, è quello di Horton-Stralher basato sulle seguenti regole:

1. i canali di primo ordine sono quelli che hanno origine dalle sorgenti (che possono tuttavia non essere perenni);
2. dall'unione di due rami di ordine n ne deriva uno di ordine n+1;

3. dall'unione di due rami di ordine diverso si avrà un ramo corrispondente al ramo di ordine maggiore;
4. la successione di due o più rami, caratterizzati dal medesimo ordine n, costituisce canali del loro stesso ordine;
5. il canale caratterizzato dall'ordine più elevato N determina l'ordine stesso del bacino.

Ha particolare rilevanza nell'applicazione di tale metodologia la scelta dei canali di primo ordine. In proposito Ciccacci, in relazione alla densità di drenaggio, ma il discorso è equivalente per la gerarchizzazione, precisa quanto segue: *“Comunque, ai fini della presente indagine [...] si è ritenuto opportuno considerare i valori della densità di drenaggio che scaturiscono dall'esame di tutte le possibili vie ben definite di scorrimento superficiale delle acque, presenti nelle aree studiate, senza considerare le variazioni che il drenaggio può subire nell'arco dell'anno; variazioni che peraltro sarebbero di difficile identificazione precisa, esistendo una transizione graduale fra corsi d'acqua intermittenti o stagionali e quelli decisamente perenni”*.

Sulla base della gerarchizzazione è possibile definire:

- il numero di anomalie gerarchiche (G_a) pari al numero minimo di canali di 1° ordine necessari a rendere il reticolo idrografico perfettamente gerarchizzato, ovvero in cui ogni asta di un dato ordine (u) confluisce in un'asta di ordine immediatamente superiore ($u + 1$);
- la densità di anomalie gerarchiche (g_a) come rapporto tra il numero di anomalie gerarchiche (G_a) e la superficie del bacino;
- l'indice di anomalie gerarchiche (Δa) come rapporto tra il numero di anomalie gerarchiche (G_a) e il numero di canali di primo ordine effettivamente esistenti.

Poste queste premesse, il metodo di Ciccacci prevede di utilizzare le seguenti relazioni:

$$\log (Tu) = 0,33479 \cdot D + 0,15733 \cdot \Delta a + 1,05954 \text{ per } D < 6;$$

$$\log (Tu) = 1,82818 \cdot \log(D) + 0,01769 \cdot g_a + 1,53034 \text{ per } D \geq 6;$$

ove Tu è espresso in t/annue/Km² di trasporto di torbida.

Ovviamente per passare dal peso al volume occorre considerare che un metro cubo di sedimenti pesa mediamente 1,7 – 1,9 t. Nel caso specifico è stato adottato un valore di peso di volume γ pari ad 1,8 t/m³.

Si è proceduto pertanto alla gerarchizzazione del settore del bacino del Chiaravagna chiuso alla sezione corrispondente all'autostrada A10, pari al 68% del bacino totale. I risultati sono riportati nella figura seguente.

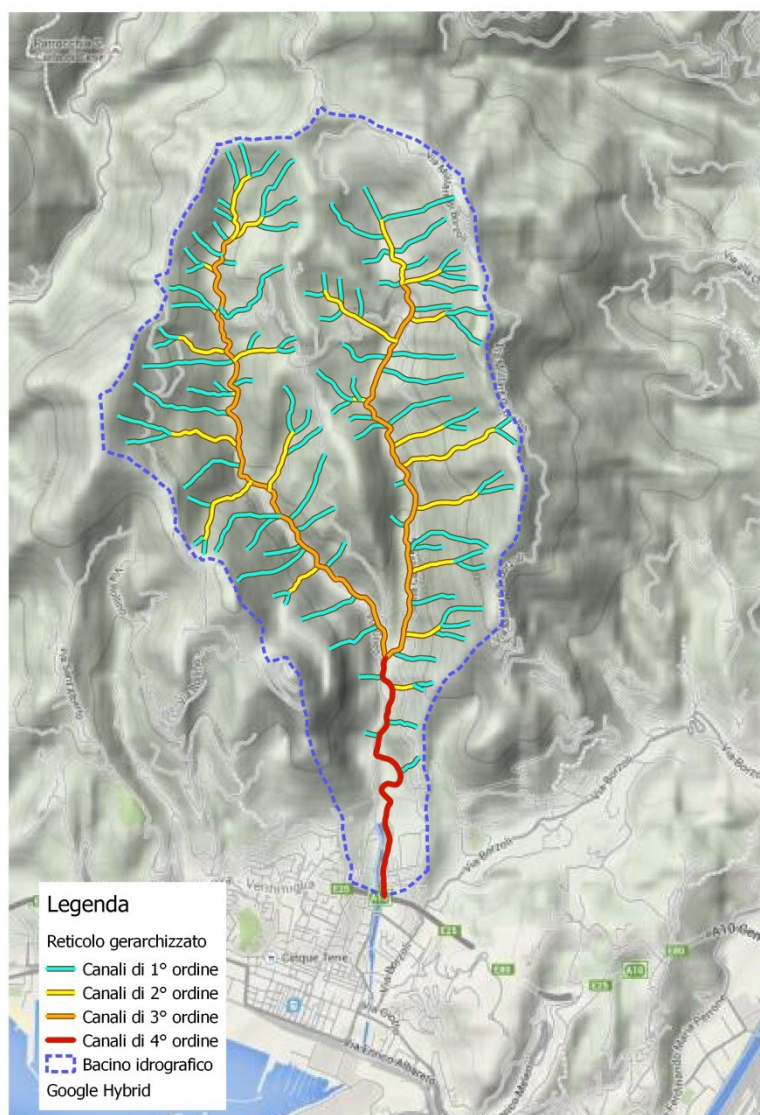


Figura 6.1 Reticolo gerarchizzato del bacino del Chiaravagna chiuso alla sezione di attraversamento dell'autostrada.

Si osserva che si tratta di un bacino di 4° ordine, con due rami secondari di 3° ordine, connessi con un elevato numero di canali di secondo e primo ordine.

Tabella 6.2 Ordine gerarchico dei canali.

Ordine gerarchico	Numero canali
1° ordine	97
2° ordine	48
3° ordine	2
4° ordine	1

Nella tabella sottostante sono riportati i coefficienti utilizzati per il calcolo del deflusso torbido con il metodo di *Ciccacci et alii*.

Tabella 6.3 Calcolo del deflusso torbido con il metodo di *Ciccacci et alii*.

Sviluppo totale reticolo (Km)	38,584
Area bacino - A (Km ²)	7,622
Densità di drenaggio - D (Km)	5,062
Numero canali di 1° ordine - N1	97
Numero di anomalia gerarchica - G _a	44
Densità di anomalia gerarchica - g _a (Km ⁻²)	5,77
Indice di anomalia gerarchica - Δ _a	0,45
Deflusso torbido unitario annuo Tu (t/Km ² /anno)	1244
Deflusso torbido annuo in peso – Tu*A (t/anno)	9484
Deflusso torbido annuo in volume Tu·A/γ (m ³ /anno)	5269

Il metodo, così come è stato applicato, restituisce un valore di poco superiore a 5000 m³/anno, volume non molto dissimile dal trasporto solido potenziale calcolato con il metodo di Gavrilovic, fermo restando che si tratta di parametri differenti, e decisamente più basso di quello calcolato nell'ambito del Piano di Bacino del Chiaravagna (circa 16000 m³), sia pure sul bacino complessivo, più ampio di quello esaminato in questa sede di poco meno del 50%.

Più in generale dall'analisi degli esiti del calcolo si può osservare quanto segue.

Il fatto che i valori di deflusso torbido calcolati nel presente lavoro siano circa la metà (5269 m³/anno alla sezione di interesse e circa 7000 m³/anno alla foce in mare) rispetto a quelli calcolati nel Piano di Bacino (circa 16000 alla foce), dipende dalla densità con cui sono state tracciate le aste di primo ordine, 97 contro 201. Nel presente lavoro sono stati presi in considerazione tutti i canali che sulla Carte Tecniche Regionali sono stati riportati come corsi d'acqua (quindi indicati con una linea nera) e tutti gli impluvi in cui era riconoscibile una chiara incisione del versante. Evidentemente nel Piano di Bacino si è andati oltre tale criterio, individuando come canali anche gli impluvi interessati da deflusso solo in occasione di piogge particolarmente intense, il che però appare eccessivo anche alla luce di quanto riportato in proposito nell'articolo di *Ciccacci et alii*.

Un riscontro indiretto del fatto che i volumi stimati nel Piano di Bacino siano eccessivi è, per altro, costituito dal fatto che i valori utilizzati da *Ciccacci et alii* per le loro elaborazioni (circa 14 sezioni su altrettanti corsi d'acqua italiani) varino da 150 a 2400 t/annue, contro le oltre 32000 t/annue calcolate nel Piano di Bacino.

Per altro i valori sperimentali utilizzati da *Ciccacci et alii* per le elaborazioni sono relativi a soli corsi d'acqua appenninici, gli unici disponibili allora, in cui, verosimilmente, si ha un trasporto solido in sospensione tendenzialmente elevato per la presenza prevalente di substrati terrigeni. Il Chiaravagna, per contro, è impostato su un substrato di tipo alpino (ampia presenza di rocce cristalline), infatti ricade ancora dal punto di vista geologico nella catena Alpina la cui giunzione con l'Appennino è costituita dalla linea Sestri-Voltaggio, posta subito ad Est del Chiaravagna stesso. Non si può quindi escludere che il metodo tenda a sovrastimare il trasporto solido di bacini, come quello in oggetto, impostati su substrato cristallino.

Questo spiega in parte il fatto che il trasporto solido potenziale calcolato con Gavrilovic (metodo fortemente influenzato dalle caratteristiche del substrato), sia, se pure di poco, inferiore al Tu calcolato con il metodo di *Ciccacci et alii* che, come ben spiegato nel relativo articolo, si riferisce al solo trasporto in sospensione. Detto questo trattandosi di metodi empirici non tarati sull'area specifica è ragionevole che tali stime possano comportare un errore anche elevato.

7

Ricostruzione delle portate di lungo periodo

I dati di base utilizzati per le simulazioni condotte con il modello idrologico, già utilizzato per il precedente incarico (cfr. elaborato 22800503-01-00302), sono costituiti dalle piogge a passo orario del periodo temporale compreso tra gli anni 2001 e 2014.

I dati di pioggia sono quelli appartenenti alle stazioni strumentate di Monte Gazzo e Bolzaneto, che sono stati acquisiti dalla rete di misura in tempo reale gestita da ARPAL. Per l'attribuzione delle piogge al modello idrologico sono stati utilizzati gli stessi pesi tarati ed applicati alla ricostruzione dell'evento 2010.

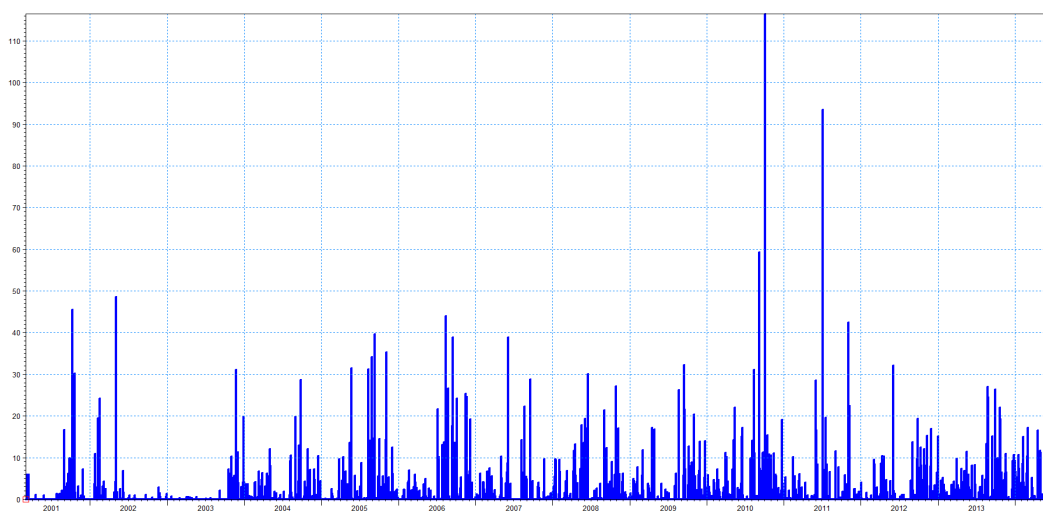


Figura 7.1 Dati pluviometrici utilizzati in input al modello idrologico: altezze di pioggia in mm.

Il periodo di misura introdotto in input nel modello idrologico si estende dal 31/07/2001 al 02/07/2014, per una copertura temporale di circa 13 anni, mantenendo invariata la schematizzazione dei 5 sottobacini contribuenti in cui è stato suddiviso il bacino complessivo del Chiaravagna.

Tabella 7.1 Caratteristiche fisiografiche dei bacini in esame alle sezioni di interesse.

BACINO	S (km ²)	Hmax (m s.m.)	Hmed (m s.m.)	Hmin (m s.m.)	L (km)	i (%)	y (%)
Chiaravagna - autostrada	7,620	646	333	15	5,780	7,5	47
Chiaravagna - monte Ruscarolo	7,850	646	325	4	6,590	7,1	46
Chiaravagna - valle Ruscarolo	10,410	646	275	4	6,590	7,1	42
Chiaravagna - foce	11,080	646	261	0	7,190	6,1	40
Ruscarolo - monte Chiaravagna	2,570	416	116	5	3,050	5,7	32

S superficie del bacino in km²;

Hmax quota massima del bacino;

Hmed quota media del bacino;

Hmin quota minima del bacino;

L lunghezza d'asta in km;

i pendenza percentuale dell'asta fluviale;

y pendenza percentuale dei versanti.

Il modello idrodinamico utilizza normalmente serie temporali di portata come condizione al contorno di monte: considerando che i maggiori fenomeni di trasporto solido e i più significativi cambiamenti della morfologia fluviale avvengono in concomitanza di significative portate liquide, riveste un particolare interesse esaminare la dinamica del trasporto solido durante differenti eventi di piena.

Visti inoltre i dati granulometrici e le caratteristiche dell'alveo (in particolar modo la pendenza del tratto analizzato e la dimensione trasversale delle sezioni), a valle di specifiche simulazioni sull'effettiva capacità di trasporto solido della corrente nel tratto in esame, sono stati individuati come efficaci ai fini dell'evoluzione morfologica solo i valori di portata superiori a $8 \text{ m}^3/\text{s}$: tutte le portate superiori alla soglia individuata sono state integrate in una sequenza continua di eventi.

Per le simulazioni è stata pertanto costruita una serie temporale di "progetto", della durata effettiva di poco più di 1 mese, caratterizzata da 5 di colmi di piena principali e una ventina di piene ordinarie rappresentative ai fini morfologici dei 13 anni di dati idrologici. Questa serie temporale delle portate in ingresso al modello idrodinamico-morfologico è nel seguito denominata "pseudo-storica" ed è riportata nella Figura 7.2, dove ogni linea colorata rappresenta uno dei bacini contribuenti: si nota in particolare l'evento critico dell'ottobre 2010, il valore più alto della serie.

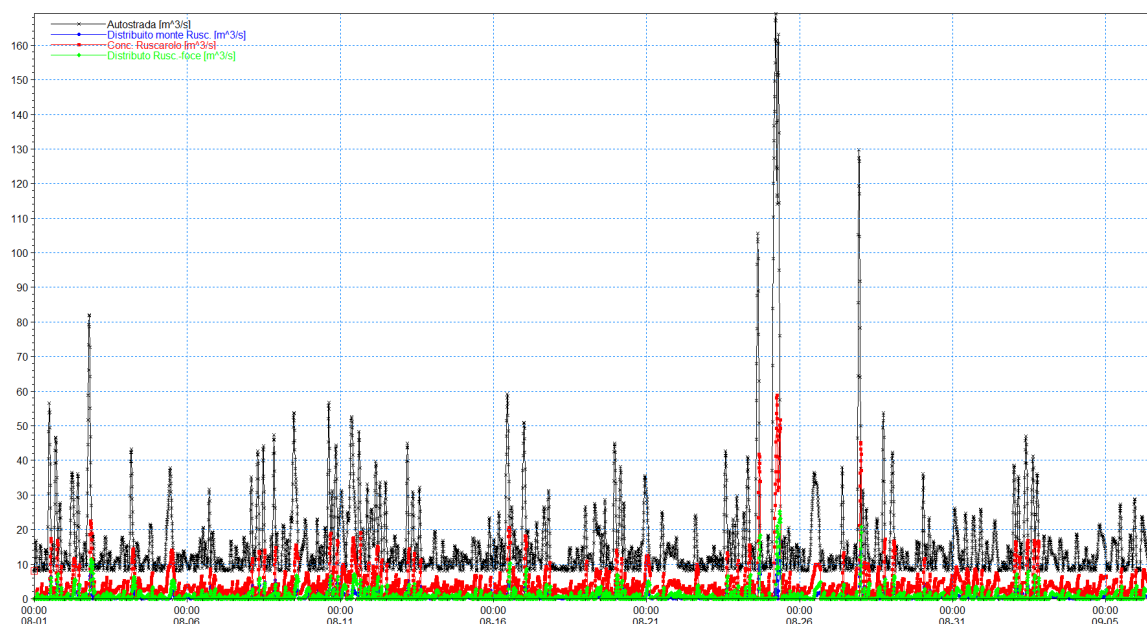


Figura 7.2 Serie "pseudo-storica" delle portate, sintesi del periodo idrologico 2001-2014.

La serie pseudo-storica è stata ricreata assumendo come significativo almeno un evento per ogni anno di osservazione, includendo comunque eventuali altri eventi con portate rilevanti ed escludendo le portate inferiori a circa $8 \text{ m}^3/\text{s}$. Le singole serie temporali, riferite a ciascun bacino contribuyente sono poi correttamente composte all'interno del modello idraulico fornendo la portata complessiva di simulazione per ogni singola sezione di calcolo.

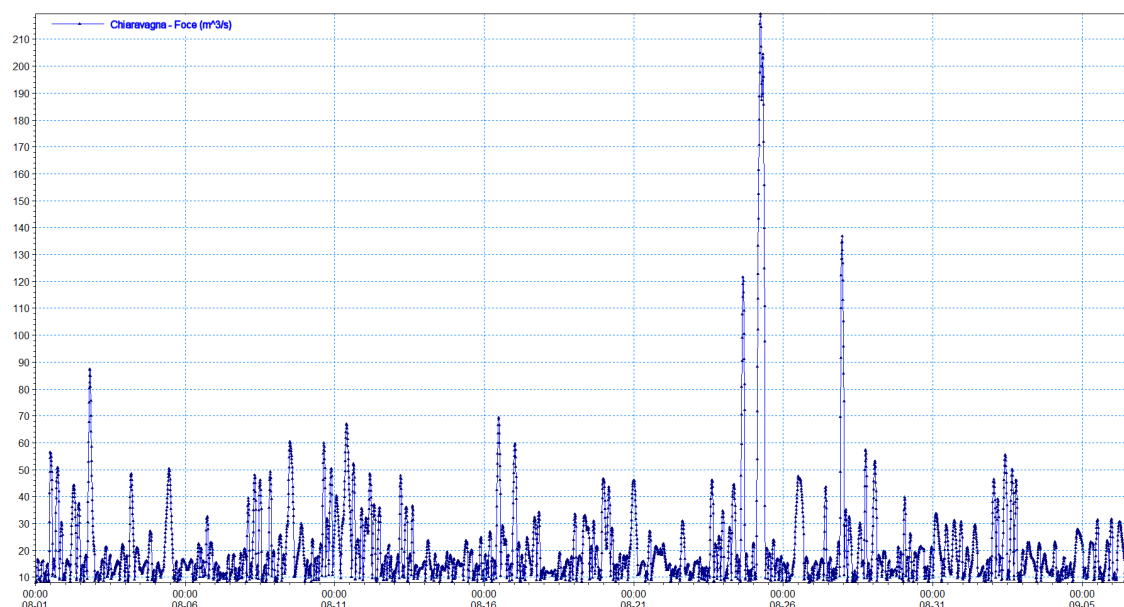


Figura 7.3 Serie “pseudo storica” delle portate, sezione di chiusura a confluenza nel porto di Sestri.

Escluso l’evento dell’ottobre 2010, gli altri picchi di portata maggiori si attestano intorno ai 90, 120 e 140 m³/s, valori di portata con tempo di ritorno inferiore ai 50 anni (con riferimento alle portate di progetto definite nel Piano di Bacino).

8 Analisi del trasporto solido

L’approfondimento relativo ai fenomeni di trasporto solido, per il tratto del torrente Chiaravagna discende dalla considerazione di vari fattori e risultanze di precedenti indagini, in particolare contenute nel Piano di Bacino Stralcio e negli studi pregressi consultati.

Il bacino idrografico del torrente è interessato da numerosi fenomeni franosi, alcuni anche di notevole entità, che danno origine a apprezzabili volumi di materiale potenzialmente movimentabile da parte del torrente e dei suoi tributari. Tale fenomeno, associato alla scarsa manutenzione dell’alveo, può comportare una riduzione delle sezioni dell’alveo e dunque un aumento della pericolosità idraulica nel tratto.

Ulteriore rilevanza assume l’analisi della possibile evoluzione morfologica nel momento in cui l’adeguamento idraulico del tratto terminale del Chiaravagna viene garantito, come confermato nel paragrafo 4, da un intervento progettuale che prevede l’abbassamento del fondo.

Come già evidenziato nell’elaborato 22800503-01-00303, ad ulteriore conferma della criticità idraulica associata al trasporto solido, in corrispondenza della foce è stata realizzata nel 2000 una prima vasca di sedimentazione che già a partire dal 2011 risultava completamente piena (Figura 8.1).

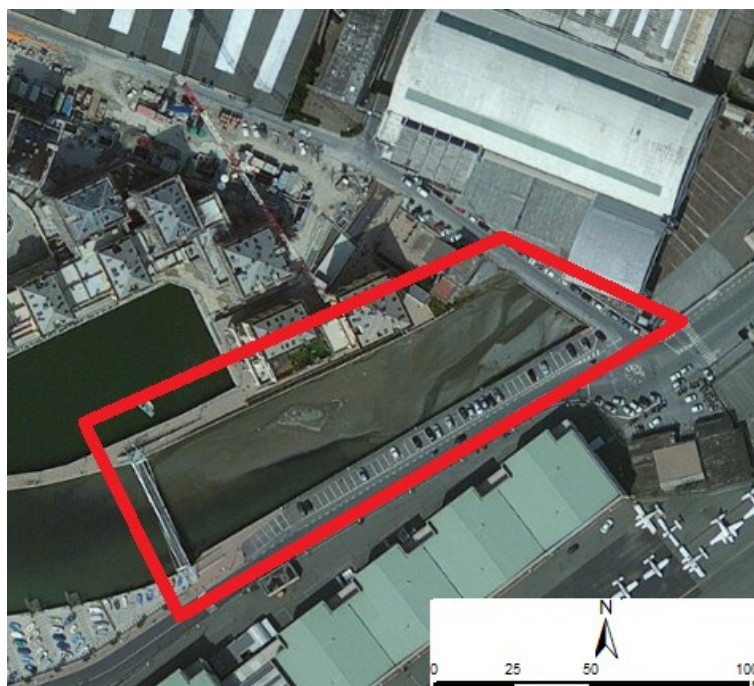


Figura 8.1 Vasca di laminazione alla foce del torrente Chiaravagna. Si nota l'affioramento di sedimenti.

La metodologia applicata si basa sulla stima della capacità di trasporto solido nelle singole sezioni ed il successivo calcolo dell'evoluzione morfologica, condotta mediante la messa a punto di un modello numerico di simulazione monodimensionale, utilizzando il modulo ST (*Sediment Transport*) del codice MIKE 11, strettamente integrato con il modulo idrodinamico HD implementato per le analisi idrodinamiche.

L'analisi è stata sviluppata su due fasi temporali successive:

- una prima verifica delle capacità di trasporto del tratto compreso tra la ferrovia Genova-Ovada-Acqui e il sito di realizzazione della nuova vasca di sedimentazione, subito a valle della soglia dell'autostrada; questa analisi ha permesso il raggiungimento di un duplice obiettivo: in primo luogo la valutazione del comportamento di diverse formule per il calcolo del trasporto solido e la scelta di quelle maggiormente idonee al caso in esame, in secondo luogo la determinazione della serie pseudo-storica di portate solide da associare alle portate liquide nella simulazione morfologica del tratto di valle;
- lo studio della possibile evoluzione morfologica del tratto a valle della realizzanda vasca di sedimentazione (circa 1.5 km di alveo), mediante modellazione a fondo mobile, nelle due ipotesi previste di vasca funzionante (manutenzione periodica ed asportazione dei sedimenti) o di vasca piena e quindi non in grado di trattenere il materiale litoide proveniente da monte.

Il modello di simulazione del trasporto solido è basato sul modello idrodinamico realizzato nel corso del precedente studio (per ogni riferimento si veda l'elaborato 22800503-01-00303), aggiornato con l'inserimento della configurazione di fondo alveo previsto nel progetto definitivo di sistemazione idraulica del torrente Chiaravagna, così come descritto nel paragrafo 4.

Tale modello presenta un grado di schematizzazione di dettaglio, con una riproduzione della conformazione dell'alveo che, seppur sempre legata ad un codice di calcolo monodimensionale, ha permesso mediante uno schema quasi-bidimensionale, la rappresentazione di tutti gli elementi previsti in progetto quali scolmatori, finestrate laterali, raddoppi di sezione ed altro.

Per quanto riguarda la modellazione del trasporto solido a fondo mobile, stante la complessità del fenomeno analizzato legato all'interazione continua tra calcolo idrodinamico e calcolo del trasporto solido, e vista l'incertezza legata alla mancanza di dati sperimentali di trasporto solido

per una conferma puntuale dei risultati modellistici, in particolare in corrispondenza delle sezioni più complesse, si è dovuto optare per una semplificazione dello schema di simulazione, pur garantendo la corretta rappresentazione del fenomeno oggetto di studio.

A questo scopo sono stati eliminati i tratti di schema quasi-bidimensionale (scolmatore ABB e scolmatore Piaggio) e le relative sezioni sono state integrate nella sezione d'alveo principale, al fine di simulare correttamente la variazione di area disponibile e la conseguente riduzione delle velocità. Analoghe semplificazioni sono state assunte in corrispondenza di alcuni manufatti di attraversamento, dove la configurazione progettuale prevedeva la realizzazione di strutture non più interferenti in modo significativo con il deflusso di portate ordinarie o anche di piena (assenza di pile in alveo, minima riduzione della sezione di deflusso, quota dell'intradosso non raggiunta dalle acque di piena).

Per quanto riguarda la caratterizzazione sedimentologica del materiale in alveo, i dati di partenza sono quelli riportati nel paragrafo 5.

Nella tabella seguente sono riportati i valori medi dei diametri caratteristici così come inseriti all'interno della modellazione numerica.

Tabella 8.1 Diametri medi (mm) dei campioni granulometrici e dati di input al modello.

Cod.	N.	Progr.	10	16	30	35	50	60	84	90	d90/d30	St. Dev
Campione	Sez.	(m)	(mm)								(-)	(-)
P3	CHI_36	-407.07	3.62	5.78	10.60	12.32	18.36	23.96	47.05	57.46	5.42	2.87
P2	CHI_32	-220.01	0.93	1.72	4.96	6.92	12.84	18.03	42.09	48.74	9.83	5.36
P1	CHI_27a	5	0.84	1.71	6.32	9.66	17.56	24.09	41.19	43.88	6.95	6.32
media			1.80	3.07	7.29	9.63	16.25	22.03	43.44	50.03	7.40	4.85
P4	CHI_17.6a	686.58	0.72	1.47	4.07	5.07	9.54	14.12	41.75	57.51	14.12	5.42
P5	CHI_11	968.78	0.62	1.04	2.35	2.93	4.60	6.39	14.96	18.37	7.81	3.84
P6	CHI_05a	1144.89	0.39	0.71	1.96	2.50	4.93	7.07	18.26	21.64	11.06	5.33
media			0.58	1.07	2.79	3.50	6.36	9.19	24.99	32.51	10.99	4.86
Trans.			1.19	2.07	5.04	6.57	11.31	15.61	34.22	41.27	9.20	4.86

Nella tabella sono riportati tutti i parametri di input inseriti nel modello morfologico: il diametro medio caratteristico d_{50} , il rapporto d_{90}/d_{50} utilizzato nella formulazione di Smart-Jaeggi e lo scarto quadratico medio σ_s calcolato con la seguente formula,

$$\sigma_s = \frac{1}{2} \left(\frac{d_{84}}{d_{50}} + \frac{d_{50}}{d_{16}} \right).$$

Da una prima osservazione dei soli dati granulometrici si può osservare una suddivisione in 2-3 zone distinte:

- la zona a valle della soglia dell'autostrada, fino alla foce, presenta una granulometria più fine, con un d_{50} medio di poco superiore ai 6 mm;
- la zona a monte dell'autostrada, nel tratto fino alla sezione in corrispondenza dell'attraversamento ferroviario, presenta invece una granulometria leggermente più grossolana, con maggiori evidenze a monte della briglia di sezione CHI_35, a conferma dell'effetto indotto dalle diverse briglie presenti lungo il tratto (ferrovia, monte di ponte Alloro, valle di ponte Alloro, autostrada) che comportano una locale riduzione di pendenza e la conseguente deposizione del materiale più grossolano.

La tabella riporta le grandezze granulometriche medie rappresentative dei due tratti ed una valutazione sul tratto di transizione tra le due aree evidenziate: tali valori sono quelli assunti all'interno del modello numerico di simulazione.

Il grafico di Figura 8.2 illustra la correlazione tra la posizione dei punti di campionamento ed il rispettivo diametro d_{50} e lo sviluppo del tratto di Chiaravagna indagato, con l'indicazione della posizione dei principali attraversamenti.

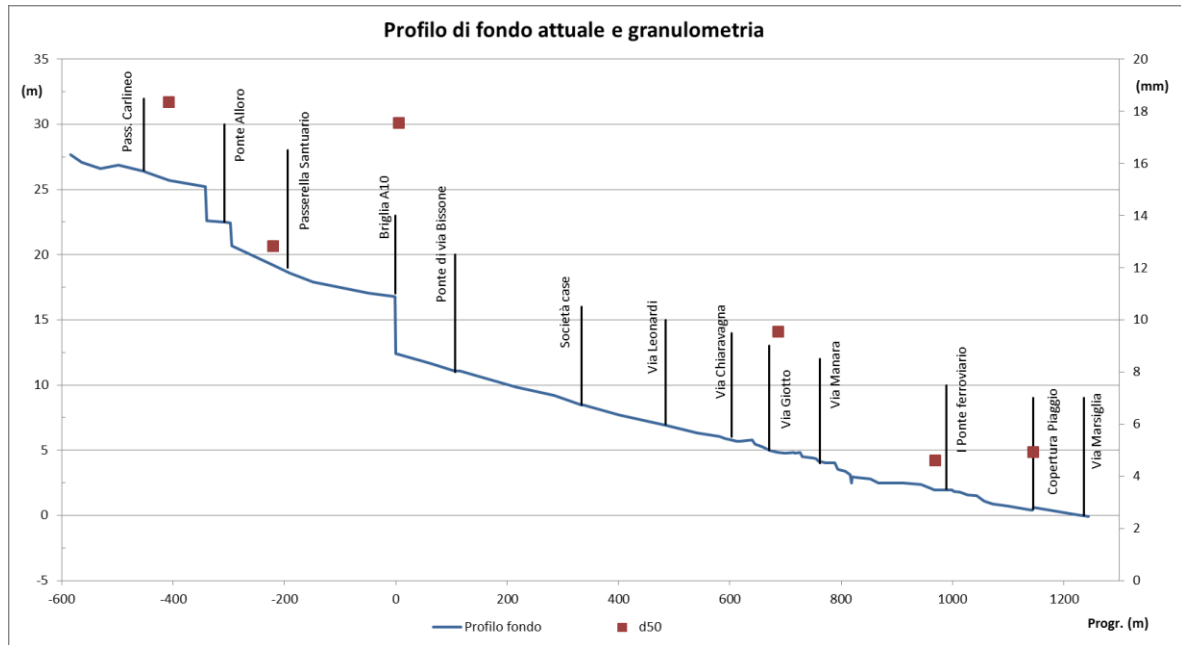


Figura 8.2 Profilo di fondo nella configurazione attuale e punti di campionamento granulometrico.

In base ai dati granulometrici disponibili e ai sopralluoghi effettuati che evidenziano una certa uniformità del materiale di fondo, si è optato per la messa a punto di un modello di trasporto solido a “singola frazione granulometrica”, rappresentando in particolare quella relativa alla componente ghiaiosa. Con sedimenti di tali dimensioni ha minor rilevanza il calcolo del trasporto solido in sospensione, per cui un modello di trasporto solido puramente di fondo risulta sufficiente allo scopo.

L'elevata variabilità delle caratteristiche geometriche dell'alveo ha fortemente sconsigliato l'applicazione del modello con l'opzione di considerare la granulometria variabile per classi (al posto dell'input “standard” che considera solo il diametro medio e lo scarto quadratico medio) per i seguenti motivi:

- il modello, in particolare nella sua configurazione di progetto con le forti variazioni puntuali di quota fondo e di sezione geometrica, sarebbe risultato estremamente complesso e difficilmente gestibile;
- il modello avrebbe presentato elevati problemi di instabilità numerica con necessità di impiegare piccoli passi temporali di integrazione con conseguenti lunghi tempi di simulazione;
- è un tipo di modello che fornisce buoni risultati solo in presenza di un discreto numero di dati di taratura, altrimenti non si giustifica la sua applicazione.

Si è pertanto deciso di usare nel modello la variazione longitudinale lungo l'alveo del corso d'acqua del diametro medio d_{50} .

8.1 Valutazione della capacità di trasporto a monte della vasca

Il modello idrodinamico sviluppato nel corso dello studio pregresso è stato esteso a monte dell'autostrada fino alla sezione immediatamente a valle della briglia del ponte ferroviario.

L'obiettivo è stato quello di poter schematizzare, dal punto di vista idraulico e del trasporto solido, anche il tratto a monte della vasca di sedimentazione in progetto, con le seguenti finalità:

- valutare il quantitativo di trasporto solido annuale in grado di essere trasportato fino alla vasca di sedimentazione al fine di avere dei dati di confronto rispetto a quanto determinato, a livello di bacino, nel paragrafo 6 (applicazione delle metodologie di Gavrilovic e Ciccacci); tale stima è stata inoltre utilizzata come dato di portata solida in input al modello morfologico di valle;
- valutare, in funzione delle caratteristiche del corso d'acqua e della granulometria, in base alla risposta delle singole formulazioni ed in funzione dell'applicazione di semplici formule di letteratura (Pica e Gavrilovic), quale delle diverse equazioni per il calcolo del trasporto solido e disponibili all'interno del codice di calcolo, sono maggiormente idonee al presente caso di studio.

In particolare, tra le formule disponibili e ritenute valide per il caso di studio, quelle inizialmente prese in considerazione per le valutazioni sul trasporto solido del Chiaravagna sono:

- Engelund - Hansen (Total load);
- Ackers - White (Total load);
- Smart - Jaeggi (Total load);
- Engelund - Fredsøe (Bed load and Suspended load);
- Meyer Peter and Muller (Bed load).

8.1.1 Calcolo della massima portata solida - Formula di Pica

Per quanto riguarda il volume annuo di sedimenti teoricamente movimentabili a livello di bacino, un termine di confronto è dato dall'applicazione del metodo di Gavrilovic (cfr. paragrafo 6).

Un analogo termine di confronto, in relazione però alla portata solida massima movimentabile, è stato ricercato applicando una classica formula di letteratura per il calcolo della componente di portata solida.

Tra le diverse formulazioni disponibili si è optato per quella di Pica³ (valida per $\tau \geq 0,5$), già applicata in altri contesti del territorio Ligure:

$$g_s = \frac{1}{\gamma_s \cdot \gamma_*^{1/2} \cdot g^{5/16}} \cdot \frac{G_s \cdot i^{13/16}}{Q^{3/8} \cdot d^{25/16}} = 0,74 \cdot \tau^{2,3} = 0,74 \cdot \left(\frac{1}{\gamma_*} \frac{Q^{3/8} \cdot i^{13/16}}{g^{3/16} \cdot d^{15/16}} \right)^{2,3}$$

$$\tau = \frac{1}{\gamma_*} \frac{Q^{3/8} \cdot i^{13/16}}{g^{3/16} \cdot d^{15/16}}$$

$$\gamma_* = \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} = 165$$

³Marco Pica - Trasporto solido di fondo - L'Energia Elettrica n.8, 1974.

dove:

τ = parametro adimensionale all'inizio del trasporto solido;

γ = peso specifico dell'acqua (kg/m³);

γ_s = peso specifico del materiale di fondo alveo (kg/m³);

d = diametro medio del materiale di fondo alveo (m);

i = pendenza di fondo alveo (m/m);

Q = portata idrica (m³/s);

g = accelerazione di gravità (m²/s);

g_s = parametro dimensionale di trasporto solido;

G_s = portata solida (kg/s).

Il tratto di torrente Chiaravagna, a monte della briglia dell'autostrada è stato suddiviso in una serie di sottotratti, dove, in funzione del diametro medio e della pendenza del fondo alveo, si è applicata la formula di Pica ad una serie di portate liquide, partendo dal valore minimo di 8 m³/s fino ad un massimo di circa 170 m³/s in analogia con le portate liquide della serie pseudo-storica.

Nella Tabella 8.2 sono riportati i valori di calcolo ed i risultati ottenuti, avendo indicato inoltre con:

$$Q_s = G_s / \gamma_s \quad \text{la portata solida in volume (m}^3\text{/s);}$$

$$p = \frac{G_s}{\gamma \cdot Q} \quad \text{la percentuale in peso di trasporto solido.}$$

E' interessante notare come anche applicando la formula di Pica la portata liquida di 8 m³/s rappresenta la soglia di attivazione del trasporto solido. Per quanto riguarda la portata solida, si osserva un valore di picco pari a circa 7 m³/s (per una portata liquida di 169 m³/s): tale valore però è da ritenersi poco realistico perché riferito ad un tratto (Alloro – Autostrada) caratterizzato dalla presenza di un salto di fondo (che altera quindi il calcolo dell'effettiva pendenza), e che è sotteso da un tratto a ridotta pendenza (Santuario – Autostrada).

I singoli tratti con le relative caratteristiche di pendenza e quota fondo sono ben individuabili nel profilo di Figura 8.2.

In generale si può concludere che l'applicazione dell'equazione di Pica restituisce, per le massime portate liquide, una portata solida pari a circa 2 m³/s.

Tabella 8.2 Parametri di calcolo della portata solida per il T. Chiaravagna nel tratto a monte della briglia dell'A10 Genova-Ventimiglia.

Tratto Pass. Carlineo							
Q	i	d	TAU	gs	Gs	Qs	p
(m³/s)	(m/m)	(m)			(kg/s)	(m³/s)	(%)
8	0.010	0.001836	7.284	71.241	140	0.05	1.76%
15	0.010	0.001836	9.221	122.517	306	0.11	2.04%
30	0.010	0.001836	11.958	222.758	721	0.27	2.40%
50	0.010	0.001836	14.483	346.081	1357	0.50	2.71%
70	0.010	0.001836	16.430	462.608	2058	0.76	2.94%
100	0.010	0.001836	18.782	629.240	3200	1.19	3.20%
169	0.010	0.001836	22.866	989.393	6125	2.27	3.62%
Tratto Alloro-Autostrada							
Q	i	d	TAU	gs	Gs	Qs	p
(m³/s)	(m/m)	(m)			(kg/s)	(m³/s)	(%)
8	0.019	0.001625	13.759	307.592	444	0.16	5.56%
15	0.019	0.001625	17.416	528.980	967	0.36	6.45%
30	0.019	0.001625	22.586	961.783	2281	0.84	7.60%
50	0.019	0.001625	27.355	1494.245	4293	1.59	8.59%
70	0.019	0.001625	31.034	1997.364	6509	2.41	9.30%
100	0.019	0.001625	35.475	2716.816	10121	3.75	10.12%
169	0.019	0.001625	43.190	4271.815	19375	7.18	11.46%
Tratto Santuario - Autostrada							
Q	i	d	TAU	gs	Gs	Qs	p
(m³/s)	(m/m)	(m)			(kg/s)	(m³/s)	(%)
8	0.007	0.001625	6.395	52.806	91	0.03	1.14%
15	0.007	0.001625	8.095	90.812	198	0.07	1.32%
30	0.007	0.001625	10.498	165.114	467	0.17	1.56%
50	0.007	0.001625	12.715	256.524	879	0.33	1.76%
70	0.007	0.001625	14.424	342.897	1334	0.49	1.91%
100	0.007	0.001625	16.489	466.408	2074	0.77	2.07%
169	0.007	0.001625	20.075	733.362	3970	1.47	2.35%

8.1.2 Capacità di trasporto solido a monte della vasca di sedimentazione

Il modello di simulazione della capacità di trasporto solido è stato applicato al tratto esteso circa 600 metri monte del viadotto autostradale, applicando come condizione al contorno di monte la serie pseudo-storica di portate determinata nel paragrafo 7.

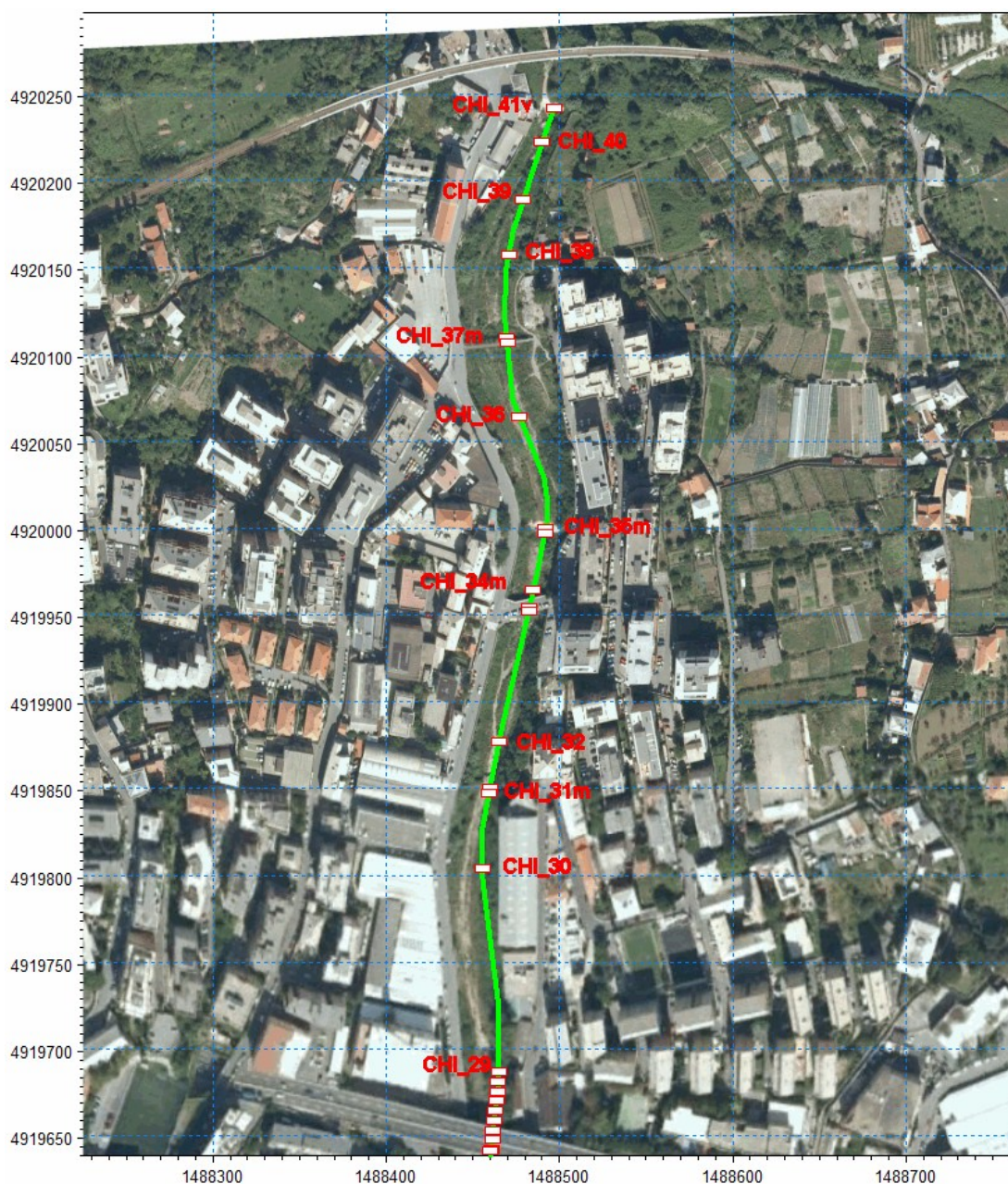


Figura 8.3 Planimetria del modello per la valutazione della capacità di trasporto solido, con indicazione delle principali sezioni trasversali d'alveo.

Il modello restituisce come risultato principale l'andamento delle capacità di trasporto solido sezione per sezione, individuando quindi sia il valore massimo puntuale sia il valore cumulato sull'intero periodo di simulazione (serie rappresentativa di 13 anni).

A titolo di esempio si riporta, in Figura 8.4, la rappresentazione dei massimi valori di capacità di trasporto solido calcolati dal modello di simulazione applicando la formula di Engelund-Hansen: nel grafico è sempre riportato il profilo di fondo del tratto indagato con indicazione della posizione dei principali manufatti; la capacità di trasporto solido potenziale è indicata dalla linea rossa (asse di riferimento sulla destra).

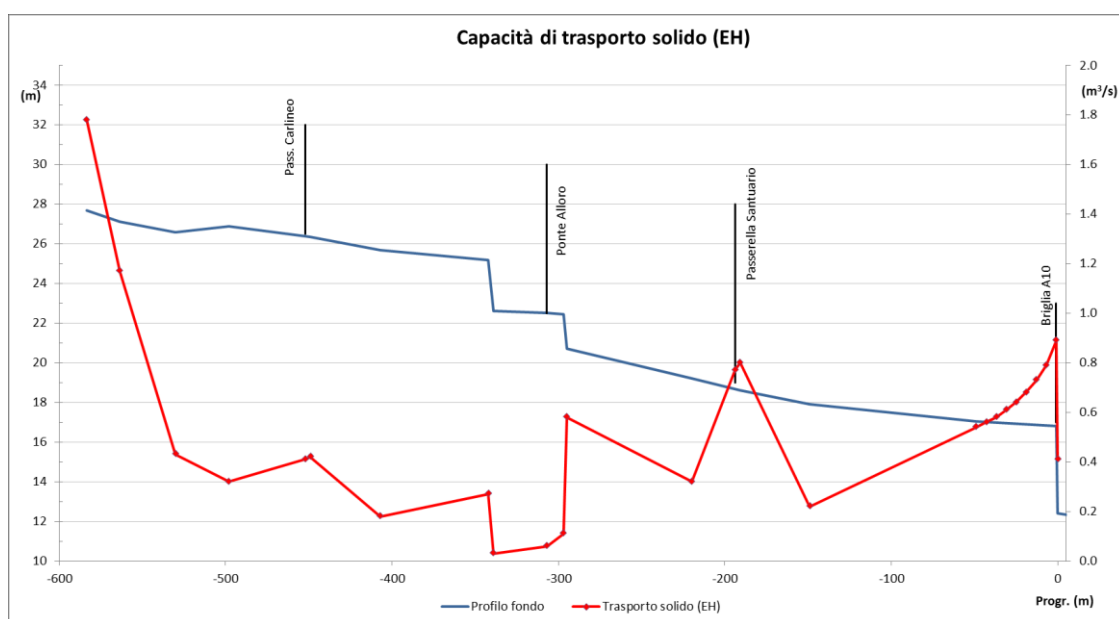


Figura 8.4 Esempio dell'output del modello di simulazione: capacità potenziale di trasporto solido calcolata mediante l'applicazione della formula di Engelund-Hansen.

La Tabella 8.3 riporta i risultati delle elaborazioni effettuati a partire dalle serie di portata solida calcolate dal modello in funzione delle diverse formulazioni utilizzate. La tabella riassume le seguenti grandezze:

- Q_s max: valore massimo, sul tratto (singola sezione d'alveo), della capacità di trasporto solido (m^3/s);
- Q_s media: valore medio, sul tratto, della capacità di trasporto solido (m^3/s);
- V_s max annuo: volume solido annuo cumulato massimo sul tratto (singola sezione trasversale d'alveo) (m^3);
- V_s annuo: volume solido annuo cumulato, valore medio sul tratto indagato (m^3);
- V_{TOT} annuo: volume cumulato totale (solidi e vuoti – coefficiente di porosità pari a 0.35), valore medio annuo sul tratto (m^3).

Tabella 8.3 Risultati della modellazione del trasporto solido per il tratto a monte della nuova vasca di sedimentazione in progetto. I differenti colori indicano il grado di adeguatezza valutato per la singola formula: rosso indica non adeguatezza, giallo indica adeguatezza parziale.

	Q_s max	Q_s media	V_s max	V_s annuo	V_{TOT} annuo
	(m^3/s)	(m^3/s)		(m^3)	(m^3)
Ackers - White	0.21	0.11	5917	1737	2672
Engelund - Hansen	1.78	0.55	5824	3356	5162
Smart -Jaeggi	1.32	0.56	16089	7880	12124
Engelund - Fredsøe	0.86	0.30	4215	2553	3928
Mayer Peter Muller	0.07	0.02	1128	77	118

I primi risultati dello studio sono stati utilizzati per la scelta della formulazione più adatta per il tratto in esame ed in particolare idonea alla simulazione a fondo mobile del tratto dall'autostrada A10 fino alla confluenza a mare: dal momento che non sono disponibili dati di misura del

trasporto solido sul torrente Chiaravagna o valutazioni di campo sui volumi movimentabili annui, i risultati ottenuti e riportati nella tabella precedente, sono stati valutati in confronto a quanto determinato con le formule di letteratura di Gavrilovic e di Pica, applicate precedentemente rispettivamente per il calcolo del volume potenzialmente erodibile nel bacino di monte e per il calcolo della massima portata solida sul tratto.

Da tali indicazioni si osserva come la formulazione di Mayer Peter & Muller sottostimi ampiamente sia la portata solida che il volume solido annuo; anche la formula di Ackers-White è stata scartata in quanto tende leggermente a sottostimare i volumi annui, ma soprattutto fornisce un dato sulla portata solida molto discordante dalle altre formule e dalla stima di Pica.

Delle 3 formule rimanenti, Engelund-Hansen e Engelund-Fredsoe sono le 2 metodologie di calcolo che si ritengono più idonee e che pertanto verranno utilizzate sia per la determinazione della portata solida potenziale di monte (input al modello morfologico di valle) sia per lo studio a fondo mobile del tratto del torrente Chiaravagna a valle della vasca di. L'equazione di Smart-Jaeggi tende invece, unica tra le formule selezionate, a sovrastimare il volume cumulato annuo, anche perché è una formulazione che nasce per materiale del fondo alveo con una pezzatura leggermente più grossolana di quanto presente nell'alveo del Chiaravagna. Tuttavia sembra rappresentare molto bene le portate solide massime, in corrispondenza dei picchi di portata liquida, e verrà quindi utilizzata nel corso delle successive analisi, con particolare riferimento alla valutazione dell'evoluzione morfologica in caso di singoli eventi di piena (TR50 e TR200 anni).

Un altro importante elemento di valutazione, che nasce dall'osservazione dei valori puntuali di trasporto solido calcolati, è quello relativo ai singoli eventi di piena: la serie pseudo-storica di portate liquide utilizzata include infatti l'evento di ottobre 2010 che, come da valutazioni riportate nel precedente studio, rappresenta un evento di poco inferiore ad un evento duecentennale come portata al colmo, ma pari o superiore in termini di volume. Tale evento, riferito ad una serie di soli 13 anni, tende a spostare eccessivamente verso l'alto la successione di eventi di piena "modellanti" simulati.

Per questo motivo, unito al fatto che verranno effettuate delle specifiche analisi sul comportamento morfologico in funzione di singoli eventi di piena, si è deciso di escludere dalla serie di portate in input al modello l'evento del 2010, sia nelle valutazioni propedeutiche alla determinazione della portata solida di monte, sia nelle successive simulazioni a fondo mobile del tratto di valle.

La Tabella 8.4 riassume i risultati conclusivi, in termini di portata solida massima e volume cumulato annuo, relativi al contributo solido potenziale che il torrente Chiaravagna è in grado di "trasportare" a monte della vasca di sedimentazione in progetto.

Tabella 8.4 Selezione delle formule ritenute idonee per il calcolo del trasporto solido – Contributo solido a monte della vasca di sedimentazione.

	Q_s max	Q_s media	V_s max	V_s annuo	V_{TOT} annuo	Peso 2010
	(m ³ /s)	(m ³ /s)	(m ³)	(m ³)	(m ³)	(-)
Engelund - Hansen	0.69	0.32	4938	2760	4247	18%
Smart - Jaeggi	1.01	0.41	14973	7247	11149	8%
Engelund - Fredsoe	0.48	0.18	3698	2247	3456	12%

Si ricorda come tali valori, in linea con le valutazioni ottenute dalla formulazione di Gavrilovic, sono stati determinati utilizzando la serie pseudo-storica di portate priva dell'evento di ottobre 2010: il "peso" di tale evento sulla valutazione dei volumi cumulati annui è indicato per le singole formule nella colonna relativa (indicativamente variabile tra il 10% ed il 20%).

La serie pseudo-storica della portata solida simulata, utilizzata quale input per il modello a fondo mobile del tratto a valle della vasca di sedimentazione, è stata estratta in corrispondenza della sezione CHI 29, a progressiva -49 metri. Tale sezione è stata assunta come riferimento in quanto:

- è ubicata nel tratto terminale immediatamente a monte della vasca di sedimentazione in progetto;
- è sufficientemente lontana dalla soglia ubicata al di sotto del viadotto autostradale da non risentire troppo dell'effetto di richiamo indotto dal salto;
- presenta dei valori di portata solida e di volume annuo cumulato intorno ai valori medi sia nel caso della formulazione di EH ($0.34 \text{ m}^3/\text{s}$, 2300 m^3) sia di EF ($0.18 \text{ m}^3/\text{s}$, 2050 m^3).

8.1.2.1 Analisi del trasporto solido in caso di eventi di piena di progetto

Il modello allestito e descritto nel precedente paragrafo è stato utilizzato per il calcolo del contributo solido, non solo su un lungo periodo idrologico (13 anni) ma anche nel caso di un singolo evento di piena.

In particolare è stata calcolata la capacità di trasporto solido determinata dal passaggio di eventi con tempo di ritorno di 50 e 200 anni, rispettivamente pari, nella sezione di chiusura in corrispondenza del viadotto autostradale a $160 \text{ m}^3/\text{s}$ e $203 \text{ m}^3/\text{s}$.

Gli idrogrammi di piena utilizzati sono gli stessi determinati nella fase di studio pregressa ed utilizzati per le verifiche idrauliche del paragrafo 4.

I risultati, sempre in termini di portata solida massima puntuale e media sul tratto e di volume cumulato massimo e medio sono riportati nelle due tabelle seguenti.

Tabella 8.5 Contributo solido a monte della vasca di sedimentazione in caso di evento con tempo di ritorno di 50 anni.

Evento TR50	Q _s max	Q _s media	V _s max	V _s medio	V _{TOT} medio	Peso
	(m ³ /s)	(m ³ /s)	(m ³)	(m ³)	(m ³)	(-)
Engelund - Hansen	1.05	0.45	3191	1919	2952	57%
Smart -Jaeggi	1.24	0.52	4867	2454	3775	31%
Engelund - Fredsøe	0.72	0.25	1877	1099	1690	43%

Tabella 8.6 Contributo solido a monte della vasca di sedimentazione in caso di evento con tempo di ritorno di 200 anni.

Evento TR200	Q _s max	Q _s media	V _s max	V _s medio	V _{TOT} medio	Peso
	(m ³ /s)	(m ³ /s)	(m ³)	(m ³)	(m ³)	(-)
Engelund - Hansen	1.68	0.67	4811	2932	4510	87%
Smart -Jaeggi	1.56	0.67	6789	3263	5020	41%
Engelund - Fredsøe	0.84	0.38	2977	1688	2598	66%

Come già anticipato in precedenza, nel caso di singoli eventi di piena anche la formula di Smart & Jaeggi fornisce risultati in linea con le altre metodologie utilizzate e, pertanto, verrà presa in considerazione nell'ambito delle valutazioni sull'evoluzione morfologica del tratto di valle.

E' interessante anche osservare i valori riportati nella colonna "Peso", i quali rappresentano appunto il "peso" di un singolo evento, in termini di portate e volumi, in rapporto agli analoghi valori calcolati dalla simulazione su lungo periodo, a conferma che un singolo evento estremo (tempo di ritorno pari o superiore ai 50 anni) può apportare in media un contributo solido tra il 30 ed il 50% del volume complessivo su lungo periodo (serie pseudo storica equivalente a 13 anni idrologici).

Per la definizione del singolo idrogramma di portata solida da utilizzare in input al modello morfologico di valle si è fatto riferimento sempre alla sezione CHI_29, con valori di portata solida massima e volume cumulato annuo riportati nella tabella seguente.

Tabella 8.7 Dati sintetici relativi alla capacità di trasporto della sezione CHI_29, input al modello morfologico di valle.

		EF	EH	SJ
Q _s max (m ³ /s)	TR50	0.26	0.48	0.44
	TR200	0.40	0.74	0.58
V _s annuo (m ³)	TR200	1124	2076	2353
	TR50	1751	3236	3138

8.1.3 Valutazione speditiva sull'adeguatezza della vasca di sedimentazione

Alla luce delle valutazioni condotte circa la stima dell'apporto solido potenziale a scala di bacino e della capacità di trasporto solido del tratto di alveo a monte della vasca di sedimentazione in progetto, è possibile trarre alcune conclusioni circa l'adeguatezza del volume previsto per la cassa stessa.

Il trasporto solido potenziale calcolato con la formula di Gavrilovic, pari a **3843 m³/anno**, rappresenta un volume medio annuo di sedimento che realisticamente potrebbe raggiungere la cassa e depositare in essa la sua frazione più grossolana; comprendendo anche frazioni di sedimento fine, è pertanto da considerare come un valore (medio annuo) teoricamente non superabile. Possono poi verificarsi anni in cui tale volume non arriva alla cassa per carenza di eventi di piena significativi e si accumula temporaneamente in più tratti a monte lungo il reticolo idrografico ed anni in cui si verifica un evento di piena gravoso al punto di movimentare tutti i precedenti accumuli e di trasportare nella cassa un volume complessivo anche maggiore di quello calcolato (che rappresenta comunque un valore medio annuo).

Il trasporto solido potenziale di torbida calcolato con la formula di Ciccacci, pari a **5269 m³/anno**, rappresenta invece una stima del trasporto solido in sospensione che, per definizione, corrisponde alla frazione di trasporto solido difficilmente catturabile dalla vasca in progetto. Per questo motivo e per i limiti del metodo precedentemente descritti, per la valutazione dell'adeguatezza della cassa di sedimentazione si è deciso di non tenere in alcun conto tale valore.

Le valutazioni riguardanti la capacità di trasporto solido del tratto di alveo a monte della cassa sono invece importanti perché consentono di quantificare i volumi che, se disponibili sul fondo alveo, possono giungere alla cassa stessa. Considerato il fatto che l'alveo del Chiaravagna è in gran parte stabilizzato da soglie di fondo fisse che limitano il potere di erosione della corrente, la capacità di trasporto solido calcolata può essere "saturata" solo dal trasporto solido proveniente dal bacino montano.

Delle formule di trasporto solido applicate nel modello MIKE 11, quelle più rappresentative per il corso d'acqua in esame e le granulometrie presenti sul fondo alveo sono senza dubbio quelle di Engelund-Hansen e di Engelund-Fredsøe che forniscono valori medi annui di capacità di trasporto solido (volume solido senza vuoti) pari rispettivamente a 3356 m³/anno e 2553

m³/anno, nel caso che include anche l'anno 2010 nella serie storica delle portate ricostruite, e pari a 2760 m³/anno e 2247 m³/anno nel caso in cui il 2010 venga escluso.

Per tenere conto della porosità nell'ambito del volume di sedimento che si deposita nella cassa e poter confrontare le capacità di trasporto solido con il valore di trasporto solido potenziale calcolato con la formula di Gavrilovic, occorre dividere i valori su indicati per 0,65 (avendo considerato una porosità pari a 0,35).

Con la formula di Engelund-Hansen si ottiene così una capacità media di trasporto solido pari a un volume di 4246÷5163 m³/anno e con la formula di Engelund-Fredsoe pari a un volume di 3457÷3928 m³/anno.

Tutte le valutazioni condotte, negli ampi limiti di approssimazione che le contraddistinguono, convergono pertanto ad un **volume di apporto solido annuo dello stesso ordine di grandezza del volume della vasca di sedimentazione in progetto.**

Si può pertanto affermare che, su basi teoriche, la vasca in progetto sarà soggetta a riempirsi mediamente in un anno: ciò significa che, in assenza di eventi di piena significativi, il riempimento potrà avvenire anche in più anni, ma che un solo evento critico potrebbe altresì del tutto o in gran parte colmarla nell'arco di poche ore.

La realizzazione della vasca richiederà pertanto frequenti operazioni di asportazione del materiale depositato e un'attenta azione di monitoraggio finalizzata alla programmazione di tali operazioni. Rappresenterà inoltre un'ottima occasione, dal punto di vista scientifico, per poter quantificare con scarso margine di errore i quantitativi di trasporto solido prodotti e poter tarare le formule teoriche per future applicazioni su bacini simili del versante ligure.

8.2 Analisi morfologica a fondo mobile del tratto a valle dell'autostrada

L'analisi della tendenza evolutiva del torrente Chiaravagna, nel tratto compreso tra la vasca di sedimentazione in progetto, a valle della soglia dell'autostrada Genova-Ventimiglia, e la foce a mare, ovvero del tratto oggetto di ribassamento del fondo nell'ambito degli interventi di adeguamento idraulico del torrente, è stata effettuata realizzando un modello numerico a fondo mobile, con il codice di calcolo MIKE 11 modulo ST, accoppiato al modello idrodinamico aggiornato appunto con tutti gli interventi previsti in progetto (cfr. paragrafo 4).

In dettaglio, il modello a fondo mobile si estende dalla sezione a progressiva 102.23 metri (subito a valle della briglia di chiusura della vasca di sedimentazione, poco a monte del ponte di via Bissone – sezione CHI_26) fino alla confluenza in mare.

I dati di input utilizzati possono essere così riassunti:

- geometrie delle sezioni: inserimento delle configurazioni previste dai progetti definitivi di adeguamento idraulico del torrente Chiaravagna, già approvati, finanziati ed in parte attuati alla data di stesura del presente documento (descritti in dettaglio nel paragrafo 4.2);
- idrogramma di portata liquida: utilizzo della serie pseudo-storica, equivalente a 13 anni idrologici, ricostruita a partire dai dati pluviometrici disponibili così come riportato nel paragrafo 7; per la simulazione degli eventi di piena di progetto si è fatto riferimento agli idrogrammi di portata definiti nello studio pregresso e riportati nell'elaborato 22800503-01-00303); tali idrogrammi hanno come portata al colmo quella definita dal Piano di Bacino;
- granulometrie del fondo alveo: così come definite da apposita analisi granulometrica su una serie di campioni raccolti lungo il tratto di torrente oggetto di studio; nel modello è stato applicato il diametro medio d_{50} . Maggiori dettagli sui dati di input sono riportati nel paragrafo 5 e nell'introduzione al presente paragrafo 8;

- idrogramma di portata solida: per ogni singolo scenario di studio, legato alla valutazione su lungo periodo o all'analisi dei singoli eventi di piena, gli idrogrammi di portata solida, rappresentanti il contributo potenzialmente proveniente da monte, sono stati stimati e ricostruiti mediante specifiche simulazioni (cfr. paragrafo 8.1).

La tendenza evolutiva del tratto in esame è stata analizzata in 2 differenti scenari relativi al diverso grado di manutenzione della vasca di sedimentazione in progetto:

- configurazione A: vasca di sedimentazione vuota, mantenuta pulita ed in grado di garantire la sedimentazione del materiale in arrivo da monte (portata solida verso valle nulla);
- configurazione B: vasca di sedimentazione già piena e quindi ininfluente ai fini dell'intercettazione del trasporto solido (portata solida verso valle pari alla capacità di portata solida nel tratto immediatamente a monte).

8.2.1 Configurazione A: vasca di sedimentazione mantenuta

Nella configurazione A si prevede che la vasca di sedimentazione sia periodicamente oggetto di manutenzione e svuotamento in modo da garantirne la perfetta efficienza.

Nelle condizioni descritte il contributo di portata solida a valle della vasca di sedimentazione è nullo (o minimo nel caso di eventuale contributo da parte del Ruscarolo), tale quindi da non poter determinare condizioni di deposizione. L'unica condizione che teoricamente potrebbe realizzarsi è quindi legata a fenomeni di erosione e scalzamento.

Tuttavia l'analisi di dettaglio degli interventi di adeguamento previsti lungo il tratto oggetto di studio ha evidenziato come sia prevista la quasi completa plateazione (seppur in diverse forme quali platea continua, massi cementati, serie di soglie stabilizzanti) del tratto tra il ponte di via Bissone e lo sbocco a mare, come descritto in dettaglio nel paragrafo 4.3.2.

La Figura 8.5 chiarisce in dettaglio l'estensione dei tratti oggetto di plateazione.

La modellazione morfologica ha quindi restituito l'ovvia conclusione che, in assenza di contributo solido da monte e con il 90% del profilo di fondo plateato, il profilo rimane invariato, ad eccezione di un ridotto effetto di erosione a valle di via Marsiglia, nel tratto attualmente occupato dalla vasca di sedimentazione di valle (simulata nelle condizioni evidenziate dai sopralluoghi nel corso del 2013 e 2014, ovvero completamente piena di sedimenti).

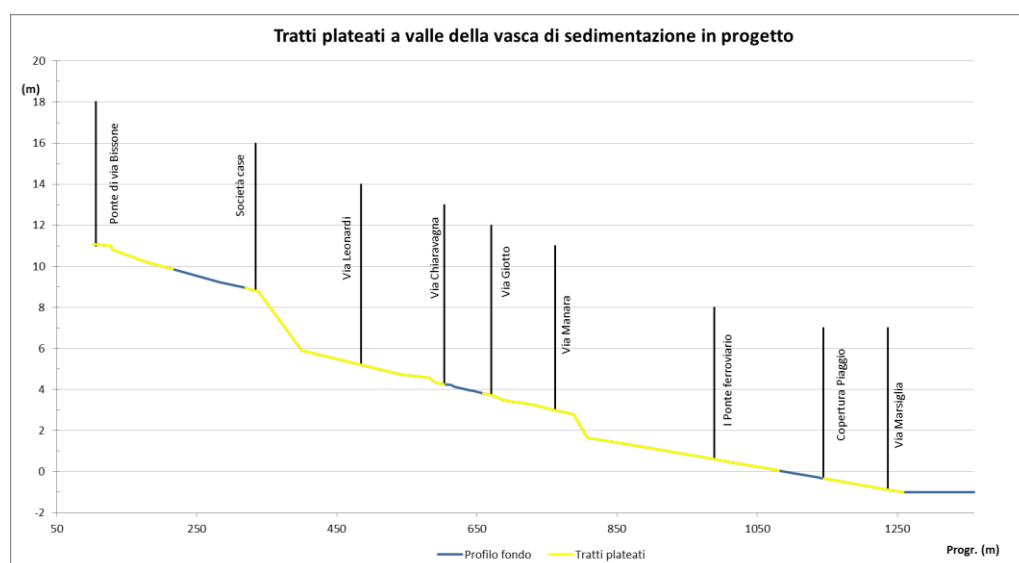


Figura 8.5 Individuazione dei tratti plateati previsti in progetto lungo il profilo di fondo del Chiaravagna.

8.2.2 Configurazione B: vasca di sedimentazione non mantenuta

Nella configurazione B si prevede che la vasca di sedimentazione non sia oggetto di costante manutenzione e svuotamento e quindi in condizioni tali da non garantirne la perfetta efficienza.

A partire da questa ipotesi si è quindi analizzata la condizione peggiore e più cautelativa, quella in cui la vasca non sia in grado di trattenere il trasporto solido proveniente da monte.

In questo scenario si è quindi applicato il modello a fondo mobile, analizzando il comportamento morfologico dell'alveo sul periodo pseudo-storico ricostruito e rappresentativo di un periodo idrologico di 13 anni.

I risultati della modellazione sono riportati sia in forma tabellare (Tabella 8.8) che in formato grafico (Figura 8.6).

In particolare sono indicati:

- il profilo di fondo nella configurazione di progetto con abbassamento del fondo, indicato come "Profilo fondo B", linea nera continua;
- il profilo di fondo nella configurazione attuale, ovvero con riferimento allo schema di sistemazione idraulica senza abbassamento del fondo alveo, indicato come "Profilo fondo A", linea tratteggiata;
- il profilo di fondo rappresentativo della tendenza evolutiva, indicato come "Profilo fondo Evoluzione", linea rossa.

Il profilo è stato calcolato come media dei risultati delle due formule per il calcolo del trasporto solido ritenute significative, come descritto in precedenza, ovvero Engelund-Hansen e Engelund-Fredsoe.

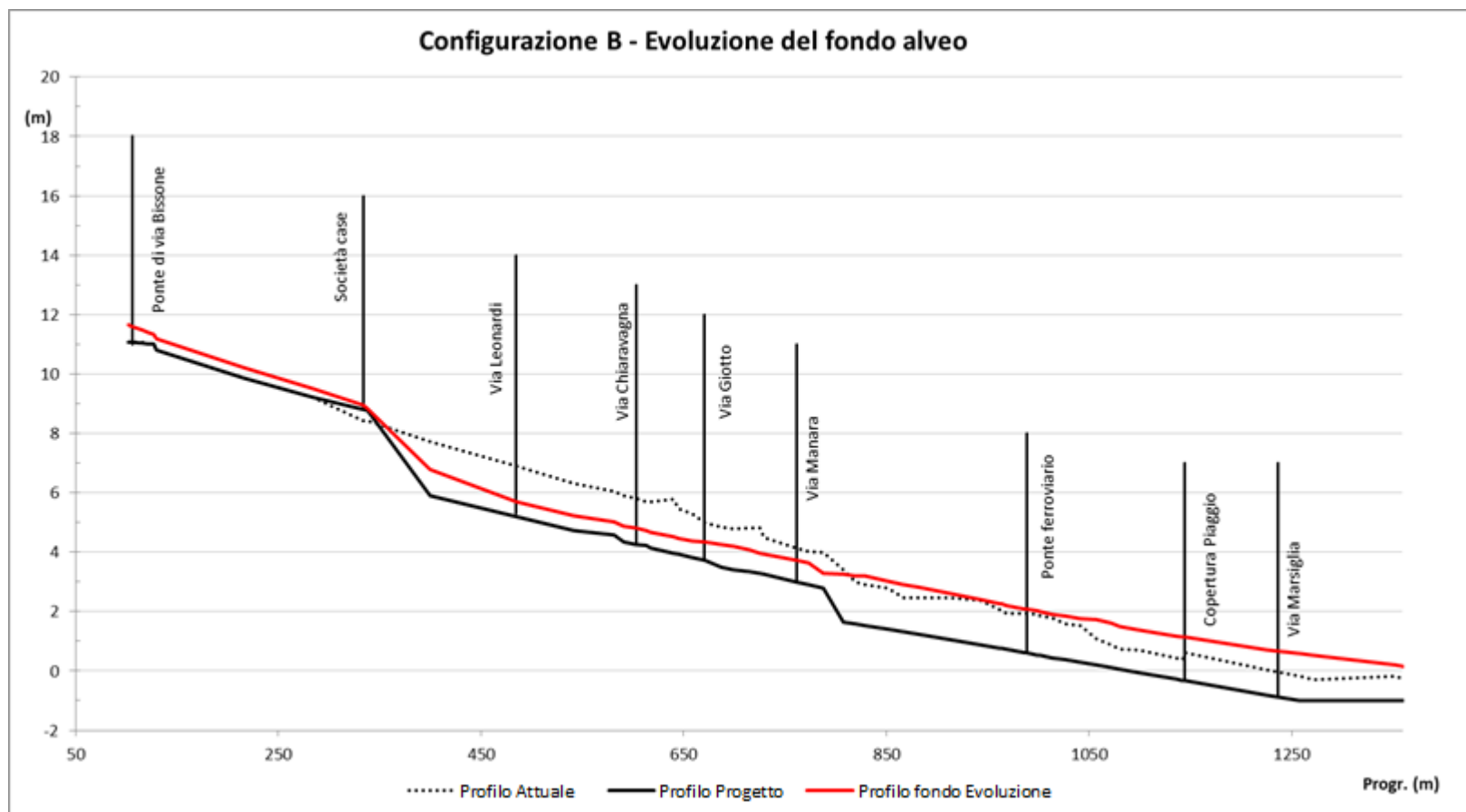


Figura 8.6 Evoluzione del profilo di fondo su lungo periodo: la linea nera rappresenta la quota di fondo di progetto inclusiva dell'abbassamento del fondo alveo, la linea nera tratteggiata è la linea di fondo attuale, la linea rossa rappresenta l'evoluzione prevista nell'arco di 10-15 anni in caso di vasca non mantenuta (configurazione B).

Gli stessi risultati sono riportati nella tabella seguente; in aggiunta a quanto riportato nel grafico, in tabella sono presentati anche:

- le quote di evoluzione del profilo di fondo calcolate con le due formule e la relativa variazione rispetto alla quota di fondo ad inizio simulazione (ovvero la quota di fondo da progetto di riprofilatura – “Progetto B”);
- la differenza tra la quota media di fondo alveo di evoluzione e la quota di fondo alveo di progetto ante ribassamento: questo dato è interessante per vedere numericamente quanto il fondo alveo di evoluzione si discosti dalle quote di fondo attuali.

Tabella 8.8 Risultati complessivi dell'analisi morfologica a fondo mobile nella configurazione B (vasca non mantenuta).

Progr.	Q.fondo Prog. A		Q.fondo Prog. B		QUOTA FONDO EVOLUZIONE					
	(m)	(m s.m.)	(m)	(m s.m.)	EH	Δ	EF	Δ	Δ medio Prog. B	Fondo Medio
102.23	11.08	11.08	11.20	0.12	12.14	1.06	0.59	11.67	0.59	
106.02	11.06	11.07	11.11	0.04	12.06	0.99	0.52	11.59	0.53	
116.02	11.06	11.05	11.10	0.05	11.84	0.79	0.42	11.47	0.41	
122.05	11.00	11.00	11.05	0.05	11.73	0.73	0.39	11.39	0.39	
127.23	11.00	11.00	11.03	0.03	11.63	0.63	0.33	11.33	0.33	
130.23	10.80	10.80	10.87	0.07	11.49	0.69	0.38	11.18	0.38	
216.02	9.87	9.87	10.03	0.16	10.43	0.56	0.36	10.23	0.36	
283.99	9.23	9.23	9.39	0.16	9.62	0.39	0.27	9.51	0.27	
333.99	8.43	8.80	8.92	0.12	8.96	0.16	0.14	8.94	0.51	
337.99	8.43	8.79	8.80	0.01	8.85	0.06	0.04	8.83	0.40	
400.01	7.73	5.90	6.25	0.35	7.32	1.42	0.89	6.79	-0.95	
484.97	6.89	5.20	5.25	0.05	6.14	0.94	0.50	5.70	-1.20	
541.97	6.31	4.74	4.79	0.05	5.67	0.93	0.49	5.23	-1.08	
581.28	6.06	4.58	4.60	0.02	5.44	0.86	0.44	5.02	-1.04	
591.29	5.91	4.35	4.40	0.05	5.36	1.01	0.53	4.88	-1.03	
603.11	5.81	4.26	4.32	0.06	5.28	1.02	0.54	4.80	-1.01	
613.11	5.7	4.22	4.25	0.03	5.20	0.98	0.51	4.73	-0.98	
617.58	5.7	4.15	4.20	0.05	5.15	1.00	0.53	4.68	-1.03	
640.11	5.78	3.97	4.05	0.08	5.00	1.03	0.56	4.53	-1.26	
645.57	5.47	3.93	4.00	0.07	4.95	1.02	0.55	4.48	-1.00	
658.57	5.27	3.82	3.91	0.09	4.84	1.02	0.56	4.38	-0.90	
670.67	5	3.73	3.84	0.11	4.82	1.09	0.60	4.33	-0.67	
687.58	4.83	3.50	3.83	0.33	4.68	1.18	0.75	4.26	-0.58	
699.48	4.78	3.41	3.77	0.36	4.60	1.19	0.78	4.19	-0.60	
714.59	4.8	3.34	3.69	0.35	4.44	1.10	0.73	4.07	-0.73	
725.57	4.8	3.28	3.61	0.33	4.31	1.03	0.68	3.96	-0.84	
729.6	4.5	3.25	3.59	0.34	4.27	1.02	0.68	3.93	-0.57	
761.7	4.15	3.00	3.49	0.49	3.98	0.98	0.74	3.74	-0.42	
773.02	4.01	2.90	3.40	0.50	3.88	0.98	0.74	3.64	-0.37	
788.22	4	2.79	3.29	0.50	3.29	0.50	0.50	3.29	-0.71	
807.52	3.39	1.63	3.14	1.51	3.37	1.74	1.63	3.26	-0.14	
820.11	2.98	1.58	3.01	1.43	3.40	1.82	1.63	3.21	0.23	
828.91	2.9	1.53	2.96	1.43	3.43	1.90	1.67	3.20	0.30	
851.79	2.8	1.41	2.84	1.43	3.21	1.80	1.62	3.03	0.23	
867.47	2.45	1.33	2.76	1.43	3.07	1.74	1.59	2.92	0.47	
882.98	2.46	1.24	2.67	1.43	2.94	1.70	1.57	2.81	0.35	
912.98	2.46	1.06	2.52	1.46	2.68	1.62	1.54	2.60	0.14	
942.98	2.38	0.88	2.37	1.49	2.43	1.55	1.52	2.40	0.02	
962.48	2.05	0.76	2.27	1.51	2.27	1.51	1.51	2.27	0.22	
964.58	2.01	0.75	2.27	1.52	2.26	1.51	1.52	2.27	0.26	
968.78	1.95	0.72	2.20	1.48	2.20	1.48	1.48	2.20	0.25	

Progr.	QUOTA FONDO EVOLUZIONE								
	Q.fondo Prog. A	Q.fondo Prog. B	EH	Δ	EF	Δ	Δ medio Prog. B	Fondo Medio	Δ medio Prog. A
(m)	(m s.m.)	(m s.m.)	(m s.m.)	(m)	(m s.m.)	(m)	(m)	(m s.m.)	(m)
986.78	1.94	0.61	2.13	1.52	2.06	1.45	1.49	2.10	0.16
988.79	1.95	0.60	2.13	1.53	2.05	1.45	1.49	2.09	0.14
999.79	1.92	0.53	2.09	1.56	1.97	1.44	1.50	2.03	0.11
1002.19	1.85	0.52	2.05	1.53	1.93	1.41	1.47	1.99	0.14
1013.19	1.78	0.45	1.99	1.54	1.85	1.40	1.47	1.92	0.14
1027.16	1.58	0.37	1.93	1.56	1.74	1.37	1.47	1.84	0.26
1042.16	1.52	0.29	1.86	1.57	1.63	1.34	1.46	1.75	0.23
1057.16	1.07	0.19	1.88	1.69	1.58	1.39	1.54	1.73	0.66
1072.16	0.88	0.10	1.77	1.67	1.45	1.35	1.51	1.61	0.73
1080.16	0.73	0.05	1.68	1.63	1.32	1.27	1.45	1.50	0.77
1099.5	0.69	-0.07	1.57	1.64	1.20	1.27	1.46	1.39	0.70
1135.66	0.45	-0.27	1.37	1.64	1.00	1.27	1.46	1.19	0.74
1142.75	0.38	-0.32	1.33	1.65	0.96	1.28	1.47	1.15	0.77
1144.89	0.6	-0.34	1.32	1.66	0.99	1.33	1.50	1.16	0.56
1226.35	0.03	-0.82	0.96	1.78	0.47	1.29	1.54	0.72	0.69
1258.45	-0.18	-1.00	0.86	1.86	0.30	1.30	1.58	0.58	0.76
1271.45	-0.31	-1.00	0.80	1.80	0.26	1.26	1.53	0.53	0.84
1352.53	-0.19	-1.00	0.42	1.42	-0.02	0.98	1.20	0.20	0.39
1366.53	-0.32	-1.00	0.33	1.33	-0.09	0.91	1.12	0.12	0.44

Dall'esame dei risultati è evidente come la mancata manutenzione della nuova vasca di sedimentazione comporta, su un periodo di tempo pari a circa 15 anni, il ripristino di un profilo di fondo di equilibrio che, a valle di via Manara, tende a annullare il beneficio apportato dalla riprofilatura d'alveo prevista in progetto. Nel tratto a cavallo di via Chiaravagna la tendenza al deposito, seppur sempre presente, risulta essere minore (in media 60 cm di deposito) e tale da non compromettere la sicurezza idraulica di questo tratto del torrente Chiaravagna.

8.2.3 Analisi morfologica a fondo mobile: eventi di piena di progetto

L'evoluzione morfologica del Chiaravagna è stata analizzata anche considerando l'impatto di un singolo evento di piena estremo, in particolare con riferimento agli eventi con tempo di ritorno di 50 anni e 200 anni.

L'analisi è stata effettuata nel solo scenario di configurazione B (vasca non mantenuta) in seguito alle valutazioni riportate nel paragrafo 8.2.1 ed ha tenuto in considerazione, come descritto in precedenza, i risultati di 3 formule di calcolo del trasporto solido, considerando quindi anche la formula di Smart-Jaeggi.

La rappresentazione dei risultati è riprodotta in modo del tutto analogo a quanto visto in precedenza per l'evoluzione morfologica su lungo periodo.

Si può osservare come il singolo evento di piena, per quanto gravoso, non sia in grado di trasportare il materiale di fondo fino alla foce, ma determini un progressivo deposito nel primo tratto immediatamente a valle della vasca di sedimentazione.

Tutte le tre formule presentano dei risultati coerenti, con depositi di circa 50 cm nel tratto a valle della vasca, e trascurabili effetti di sedimentazione nel resto del tratto oggetto di studio.

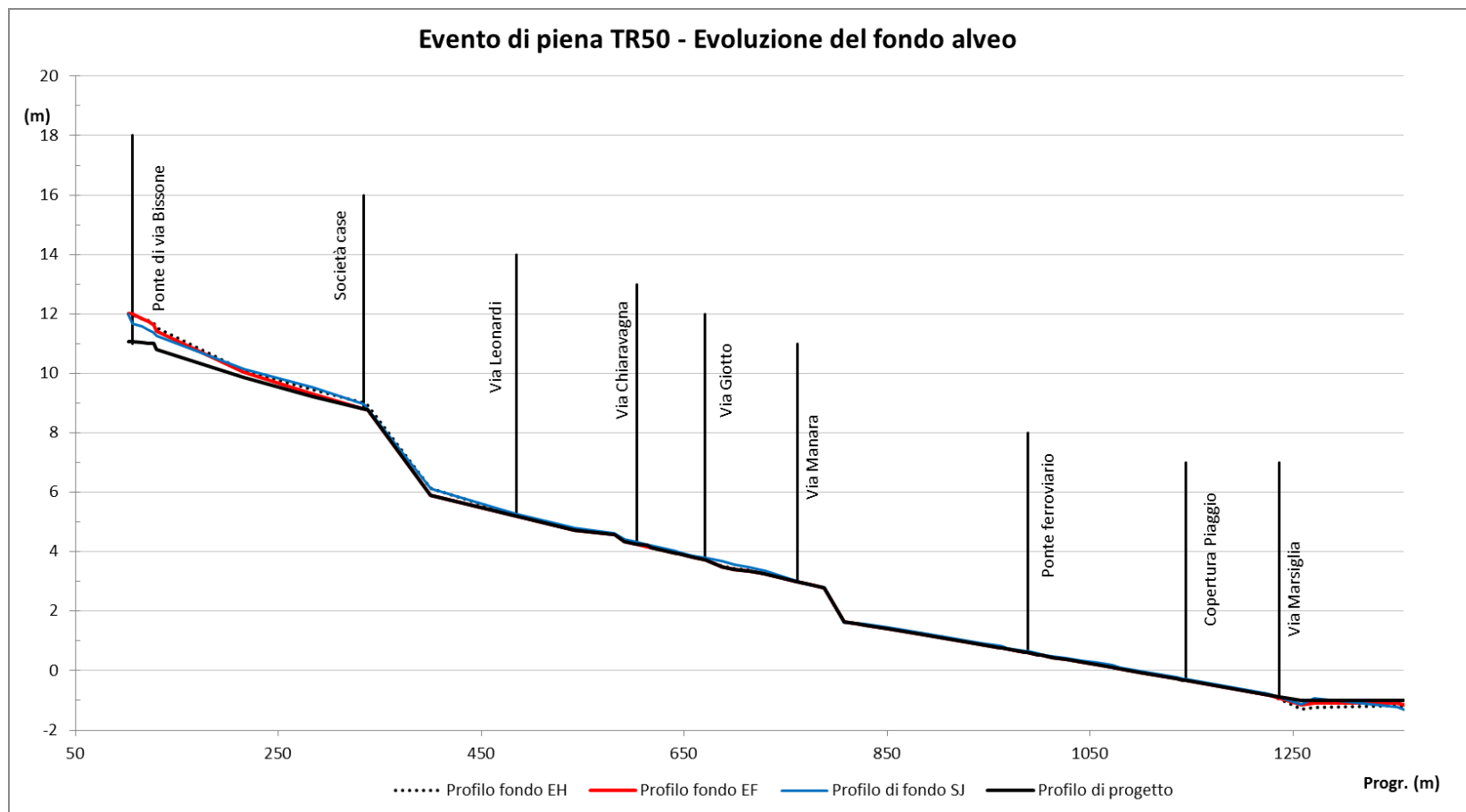


Figura 8.7 Evoluzione del profilo di fondo per effetto di un evento di piena con tempo di ritorno di 50 anni: la linea nera rappresenta la quota di fondo di progetto inclusiva dell'abbassamento del fondo alveo, la linea nera tratteggiata è l'evoluzione prevista con la formula di Engelund-Hansen, la linea rossa rappresenta l'evoluzione prevista dalla formula di Engelund-Fredsoe e la linea blu la tendenza evolutiva prevista dalla formula di Smart & Jaeggi.

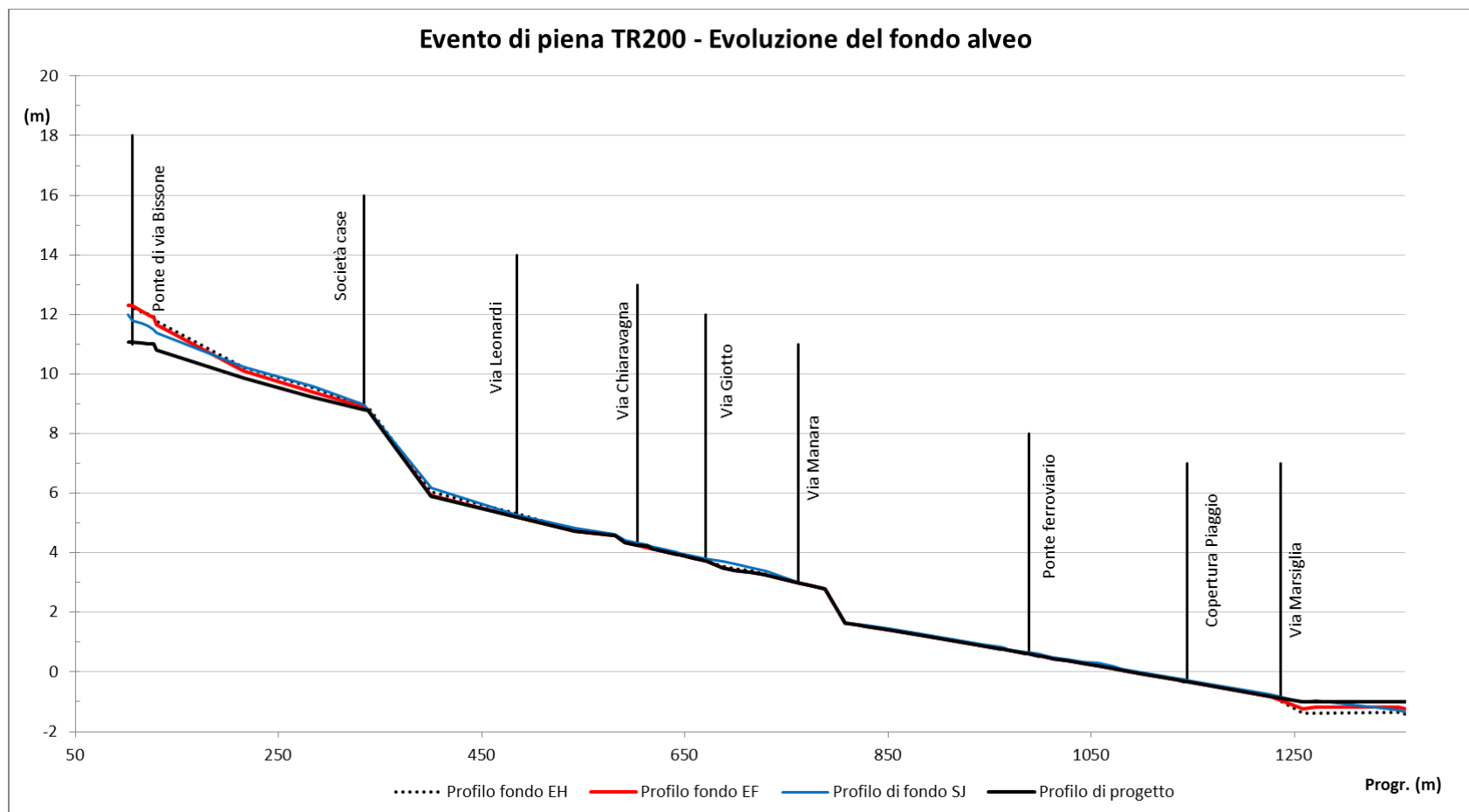


Figura 8.8 Evoluzione del profilo di fondo per effetto di un evento di piena con tempo di ritorno di 200 anni: la linea nera rappresenta la quota di fondo di progetto inclusiva dell'abbassamento del fondo alveo, la linea nera tratteggiata è l'evoluzione prevista con la formula di Engelund-Hansen, la linea rossa rappresenta l'evoluzione prevista dalla formula di Engelund-Fredsøe e la linea blu la tendenza evolutiva prevista dalla formula di Smart & Jaeggi.

Tabella 8.9 Risultati complessivi dell'analisi morfologica a fondo mobile nella configurazione B (vasca non mantenuta), eventi con tempo di ritorno di 50 e 200 anni

Progr.	Q.fondo Prog. B (m s.m.)	Q.fondo TR50								Q.fondo TR200							
		EH (m s.m.)	Δ (m)	EF (m s.m.)	Δ (m)	SJ (m s.m.)	Δ (m)	Δ medio (m)	Fondo Medio (m s.m.)	EH (m s.m.)	Δ (m)	EF (m s.m.)	Δ (m)	SJ (m s.m.)	Δ (m)	Δ medio (m)	Fondo Medio (m s.m.)
102.23	11.08	12.00	-	12.00	-	12.00	-	-	-	12.30	-	12.30	-	12.00	-	-	-
106.02	11.07	11.98	0.91	12.01	0.94	11.66	0.59	0.81	11.88	12.24	1.17	12.31	1.24	11.79	0.72	1.04	12.11
116.02	11.05	11.84	0.79	11.83	0.78	11.58	0.53	0.70	11.75	12.08	1.03	12.10	1.05	11.70	0.65	0.91	11.96
122.05	11.00	11.76	0.76	11.73	0.73	11.47	0.47	0.65	11.65	12.00	1.00	11.99	0.99	11.60	0.60	0.86	11.86
127.23	11.00	11.68	0.68	11.62	0.62	11.38	0.38	0.56	11.56	11.91	0.91	11.88	0.88	11.50	0.50	0.76	11.76
130.23	10.80	11.55	0.75	11.42	0.62	11.27	0.47	0.61	11.41	11.78	0.98	11.67	0.87	11.38	0.58	0.81	11.61
216.02	9.87	10.11	0.24	10.03	0.16	10.14	0.27	0.22	10.09	10.23	0.36	10.09	0.22	10.22	0.35	0.31	10.18
283.99	9.23	9.46	0.23	9.31	0.08	9.52	0.29	0.20	9.43	9.55	0.32	9.40	0.17	9.58	0.35	0.28	9.51
333.99	8.80	9.02	0.22	8.80	0.00	8.97	0.17	0.13	8.93	8.93	0.13	8.91	0.11	8.98	0.18	0.14	8.94
337.99	8.79	8.92	0.13	8.79	0.00	8.82	0.03	0.05	8.84	8.91	0.12	8.82	0.03	8.81	0.02	0.06	8.85
400.01	5.90	6.13	0.23	5.90	0.00	6.11	0.21	0.15	6.05	6.04	0.14	5.93	0.03	6.19	0.29	0.15	6.05
484.97	5.20	5.21	0.01	5.20	0.00	5.27	0.07	0.03	5.23	5.30	0.10	5.20	0.00	5.27	0.07	0.06	5.26
541.97	4.74	4.75	0.01	4.74	0.00	4.81	0.07	0.03	4.77	4.75	0.01	4.74	0.00	4.82	0.08	0.03	4.77
581.28	4.58	4.58	0.00	4.58	0.00	4.62	0.04	0.01	4.59	4.59	0.01	4.58	0.00	4.62	0.04	0.02	4.60
591.29	4.35	4.36	0.01	4.35	0.00	4.41	0.06	0.02	4.37	4.37	0.02	4.35	0.00	4.41	0.06	0.03	4.38
603.11	4.26	4.27	0.01	4.26	0.00	4.34	0.08	0.03	4.29	4.28	0.02	4.26	0.00	4.34	0.08	0.03	4.29
613.11	4.22	4.19	-0.03	4.18	-0.04	4.25	0.03	-0.01	4.21	4.20	-0.02	4.18	-0.04	4.26	0.04	-0.01	4.21
617.58	4.15	4.16	0.01	4.15	0.00	4.21	0.06	0.02	4.17	4.16	0.01	4.15	0.00	4.22	0.07	0.03	4.18
640.11	3.97	3.98	0.01	3.97	0.00	4.03	0.06	0.02	3.99	3.99	0.02	3.97	0.00	4.04	0.07	0.03	4.00
645.57	3.93	3.93	0.00	3.93	0.00	3.99	0.06	0.02	3.95	3.94	0.01	3.93	0.00	3.99	0.06	0.02	3.95
658.57	3.82	3.83	0.01	3.82	0.00	3.87	0.05	0.02	3.84	3.83	0.01	3.82	0.00	3.88	0.06	0.02	3.84
670.67	3.73	3.74	0.01	3.73	0.00	3.79	0.06	0.02	3.75	3.74	0.01	3.73	0.00	3.81	0.08	0.03	3.76
687.58	3.50	3.52	0.02	3.50	0.00	3.68	0.18	0.07	3.57	3.54	0.04	3.50	0.00	3.72	0.22	0.09	3.59
699.48	3.41	3.44	0.03	3.41	0.00	3.58	0.17	0.07	3.48	3.46	0.05	3.41	0.00	3.61	0.20	0.08	3.49
714.59	3.34	3.37	0.03	3.34	0.00	3.47	0.13	0.05	3.39	3.39	0.05	3.34	0.00	3.50	0.16	0.07	3.41
725.57	3.28	3.30	0.02	3.28	0.00	3.38	0.10	0.04	3.32	3.32	0.04	3.28	0.00	3.41	0.13	0.06	3.34
729.6	3.25	3.27	0.02	3.25	0.00	3.36	0.11	0.04	3.29	3.29	0.04	3.25	0.00	3.38	0.13	0.06	3.31
761.7	3.00	3.00	0.00	3.00	0.00	3.00	0.00	0.00	3.00	3.00	0.00	3.00	0.00	3.00	0.00	0.00	3.00
773.02	2.90	2.90	0.00	2.90	0.00	2.90	0.00	0.00	2.90	2.90	0.00	2.90	0.00	2.90	0.00	0.00	2.90
788.22	2.79	2.79	0.00	2.79	0.00	2.79	0.00	0.00	2.79	2.79	0.00	2.79	0.00	2.79	0.00	0.00	2.79
807.52	1.63	1.64	0.01	1.63	0.00	1.64	0.01	0.01	1.64	1.64	0.01	1.63	0.00	1.64	0.01	0.01	1.64
820.11	1.58	1.58	0.00	1.58	0.00	1.61	0.03	0.01	1.59	1.58	0.00	1.58	0.00	1.61	0.03	0.01	1.59
828.91	1.53	1.53	0.00	1.53	0.00	1.56	0.03	0.01	1.54	1.53	0.00	1.53	0.00	1.56	0.03	0.01	1.54
851.79	1.41	1.42	0.01	1.41	0.00	1.45	0.04	0.02	1.43	1.42	0.01	1.41	0.00	1.45	0.04	0.02	1.43
867.47	1.33	1.34	0.01	1.33	0.00	1.37	0.04	0.02	1.35	1.34	0.01	1.33	0.00	1.37	0.04	0.02	1.35
882.98	1.24	1.25	0.01	1.24	0.00	1.28	0.04	0.02	1.26	1.25	0.01	1.24	0.00	1.28	0.04	0.02	1.26
912.98	1.06	1.07	0.01	1.06	0.00	1.10	0.04	0.02	1.08	1.07	0.01	1.06	0.00	1.10	0.04	0.02	1.08
942.98	0.88	0.89	0.01	0.88	0.00	0.93	0.05	0.02	0.90	0.89	0.01	0.88	0.00	0.93	0.05	0.02	0.90

Progr.	Q.fondo Prog. B (m s.m.)	Q.fondo TR50								Q.fondo TR200							
		EH (m s.m.)	Δ (m)	EF (m s.m.)	Δ (m)	SJ (m s.m.)	Δ (m)	Δ medio (m)	Fondo Medio (m s.m.)	EH (m s.m.)	Δ (m)	EF (m s.m.)	Δ (m)	SJ (m s.m.)	Δ (m)	Δ medio (m)	Fondo Medio (m s.m.)
962.48	0.76	0.77	0.01	0.76	0.00	0.82	0.06	0.02	0.78	0.77	0.01	0.76	0.00	0.82	0.06	0.02	0.78
964.58	0.75	0.76	0.01	0.75	0.00	0.80	0.05	0.02	0.77	0.76	0.01	0.75	0.00	0.81	0.06	0.02	0.77
968.78	0.72	0.73	0.01	0.72	0.00	0.76	0.04	0.02	0.74	0.73	0.01	0.72	0.00	0.76	0.04	0.02	0.74
986.78	0.61	0.62	0.01	0.61	0.00	0.66	0.05	0.02	0.63	0.62	0.01	0.61	0.00	0.66	0.05	0.02	0.63
988.79	0.60	0.61	0.01	0.60	0.00	0.65	0.05	0.02	0.62	0.61	0.01	0.60	0.00	0.65	0.05	0.02	0.62
999.79	0.53	0.54	0.01	0.53	0.00	0.58	0.05	0.02	0.55	0.54	0.01	0.53	0.00	0.59	0.06	0.02	0.55
1002.19	0.52	0.52	0.00	0.52	0.00	0.55	0.03	0.01	0.53	0.52	0.00	0.52	0.00	0.56	0.04	0.01	0.53
1013.19	0.45	0.46	0.01	0.45	0.00	0.49	0.04	0.02	0.47	0.46	0.01	0.45	0.00	0.49	0.04	0.02	0.47
1027.16	0.37	0.38	0.01	0.37	0.00	0.41	0.04	0.02	0.39	0.38	0.01	0.37	0.00	0.42	0.05	0.02	0.39
1042.16	0.29	0.29	0.00	0.29	0.00	0.33	0.04	0.01	0.30	0.29	0.00	0.29	0.00	0.34	0.05	0.02	0.31
1057.16	0.19	0.22	0.03	0.19	0.00	0.28	0.09	0.04	0.23	0.22	0.03	0.19	0.00	0.31	0.12	0.05	0.24
1072.16	0.10	0.12	0.02	0.10	0.00	0.18	0.08	0.03	0.13	0.12	0.02	0.10	0.00	0.19	0.09	0.04	0.14
1080.16	0.05	0.06	0.01	0.05	0.00	0.10	0.05	0.02	0.07	0.06	0.01	0.05	0.00	0.11	0.06	0.02	0.07
1099.5	-0.07	-0.06	0.01	-0.07	0.00	-0.02	0.05	0.02	-0.05	-0.06	0.01	-0.07	0.00	-0.01	0.06	0.02	-0.05
1135.66	-0.27	-0.26	0.01	-0.27	0.00	-0.22	0.05	0.02	-0.25	-0.26	0.01	-0.27	0.00	-0.21	0.06	0.02	-0.25
1142.75	-0.32	-0.31	0.01	-0.32	0.00	-0.27	0.05	0.02	-0.30	-0.31	0.01	-0.32	0.00	-0.26	0.06	0.02	-0.30
1144.89	-0.34	-0.33	0.01	-0.34	0.00	-0.29	0.05	0.02	-0.32	-0.33	0.01	-0.34	0.00	-0.28	0.06	0.02	-0.32
1226.35	-0.82	-0.81	0.01	-0.82	0.00	-0.77	0.05	0.02	-0.80	-0.81	0.01	-0.82	0.00	-0.74	0.08	0.03	-0.79
1258.45	-1.00	-1.30	-0.30	-1.14	-0.14	-1.12	-0.12	-0.19	-1.19	-1.38	-0.38	-1.24	-0.24	-1.03	-0.03	-0.22	-1.22
1271.45	-1.00	-1.24	-0.24	-1.08	-0.08	-0.92	0.08	-0.08	-1.08	-1.39	-0.39	-1.18	-0.18	-0.97	0.03	-0.18	-1.18
1352.53	-1.00	-1.18	-0.18	-1.09	-0.09	-1.23	-0.23	-0.17	-1.17	-1.34	-0.34	-1.17	-0.17	-1.29	-0.29	-0.27	-1.27
1366.53	-1.00	-1.30	-0.30	-1.22	-0.22	-1.39	-0.39	-0.30	-1.30	-1.46	-0.46	-1.30	-0.30	-1.44	-0.44	-0.40	-1.40

ALLEGATO A
Tabelle delle grandezze
idrodinamiche in alveo



Di seguito si riportano le tabelle relative ai valori idrodinamici in alveo per tutti i tratti considerati. Le tabelle riportano le seguenti informazioni:

- Progressiva: valore di posizionamento della sezione trasversale, come distanza progressiva in [m] a partire dall'inizio del tratto;
- ID sezione: identificativo della sezione trasversale;
- Quota fondo: minimo livello altimetrico [m s.l.m.] delle quote d'alveo;
- Y: tirante idrico in [m];
- PL: livello del pelo libero in [m s.l.m.];
- V: velocità della corrente in [m/s];
- Fr: numero di Froude;
- H: valore del carico totale in [m s.l.m.].
- Franco: franco idraulico di sicurezza in [m].

Tr=50 anni

CHIARAVAGNA Tr=50anni - Configurazione definitiva di progetto								
PROGRESSIVA	ID SEZIONE	Quota Fondo	Y	PL	V	Fr	H	Franco
[m]		[m sm]	[m]	[m sm]	[m/s]	[-]	[m sm]	[m]
-583.59	CHI_41v	27.69	2.74	30.43	6.22	2.08	32.40	4.60
-563.59	CHI_40	27.11	2.75	29.86	5.78	1.41	31.56	4.14
-530.07	CHI_39	26.60	2.56	29.16	4.27	1.15	30.09	2.74
-498.07	CHI_38	26.90	1.82	28.72	3.81	1.10	29.46	0.91
-452.07	CHI_37m	26.40	1.72	28.12	3.72	1.09	28.82	1.98
-449.07	CHI_37v	26.35	1.72	28.07	3.72	1.09	28.77	2.03
-407.07	CHI_36	25.70	1.66	27.36	3.31	0.98	27.91	2.05
-342.04	CHI_35m	25.20	1.55	26.75	3.67	0.97	27.44	0.85
-339.04	CHI_35v	22.60	2.22	24.82	2.57	0.55	25.15	2.08
-307.05	CHI_34m	22.50	2.14	24.64	3.01	0.66	25.10	0.16
-297.05	CHI_34v	22.45	1.99	24.44	3.23	0.73	24.97	0.36
-295.05	CHI_33	20.70	1.69	22.39	4.59	1.35	23.46	3.31
-220.01	CHI_32	19.20	1.92	21.12	4.06	1.07	21.96	1.83
-194	CHI_31m	18.67	2.14	20.81	4.69	1.20	21.93	3.39
-191	CHI_31v	18.62	2.13	20.75	4.72	1.21	21.89	3.45
-149	CHI_30	17.90	1.97	19.87	3.72	0.96	20.57	0.86
-49	CHI_29	17.03	1.89	18.92	4.53	1.23	19.97	0.46
-1	CHI_28m	16.80	1.34	18.14	4.68	1.55	19.25	0.96
0	CHI_28v	12.40	3.53	15.93	2.24	0.62	16.18	3.07
5	CHI_27a	12.29	3.74	16.03	1.48	0.32	16.14	2.97
16.04	CHI_27b	12.06	4.01	16.07	1.12	0.18	16.13	2.68
25.04	CHI_27c	12.06	2.64	14.70	2.27	0.77	14.96	4.06
27.04	CHI_27d	12.06	2.63	14.69	2.28	0.87	14.96	4.06
62.02	CHI_27	11.33	3.44	14.77	1.56	0.37	14.90	3.58
89.23	CHI_26a	10.80	4.01	14.81	1.23	0.21	14.88	2.69
99.23	CHI_26b	11.10	2.23	13.33	2.50	0.59	13.65	4.30
102.23	CHI_26c	11.08	2.25	13.33	2.48	0.58	13.64	4.30
106.02	CHI_26m	11.07	2.21	13.28	2.60	1.04	13.63	3.32
116.02	CHI_26v	11.05	1.78	12.83	3.82	1.16	13.57	3.77
122.05	CHI_25a	11.00	1.79	12.79	3.69	1.17	13.48	4.52
127.23	CHI_25b	11.00	1.75	12.75	3.73	1.73	13.46	4.55
130.23	CHI_25c	10.80	1.93	12.73	3.43	0.95	13.33	4.57
216.02	CHI_25	9.87	2.10	11.97	4.26	1.00	12.90	2.76
283.99	CHI_24	9.23	2.08	11.31	3.75	0.91	12.03	1.47
333.99	CHI_23m	8.80	2.17	10.97	2.92	0.69	11.40	1.33

CHIARAVAGNA Tr=50anni - Configurazione definitiva di progetto								
PROGRESSIVA	ID SEZIONE	Quota Fondo	Y	PL	V	Fr	H	Franco
[m]		[m sm]	[m]	[m sm]	[m/s]	[-]	[m sm]	[m]
337.99	CHI_23v	8.79	1.35	10.14	4.94	1.72	11.38	2.16
400.01	CHI_22	5.90	2.40	8.30	3.27	0.74	8.85	4.30
484.97	CHI_21m	5.20	2.75	7.95	4.10	0.89	8.81	4.00
541.97	CHI_20	4.74	2.66	7.40	4.10	0.90	8.25	2.60
581.28	CHI_19c	4.58	2.44	7.02	4.28	0.96	7.95	2.64
591.29	CHI_19b	4.35	2.58	6.93	4.05	0.81	7.76	2.72
603.11	CHI_19m	4.26	2.59	6.85	3.89	0.77	7.62	1.49
613.11	CHI_19v	4.22	2.10	6.32	4.80	1.06	7.49	2.02
617.58	CHI_18.5v	4.15	2.12	6.27	4.85	1.08	7.47	3.73
640.11	CHI_18d	3.97	2.00	5.97	4.80	1.08	7.15	3.01
645.57	CHI_18c	3.93	1.97	5.90	4.94	1.12	7.14	3.22
658.57	CHI_18b	3.82	1.89	5.71	5.28	1.20	7.13	3.43
668.57	CHI_18a	3.75	1.80	5.55	5.55	1.51	7.12	3.82
670.67	CHI_18	3.73	1.76	5.49	5.58	1.56	7.08	3.88
686.58	CHI_17.6a	3.51	1.80	5.31	5.49	1.53	6.84	4.06
687.58	CHI_17.6m	3.50	1.79	5.29	4.86	1.16	6.49	2.10
698.48	CHI_17.4m	3.42	1.78	5.20	4.89	1.18	6.42	2.19
699.48	CHI_17.4a	3.41	1.78	5.19	4.90	1.18	6.41	4.30
714.59	CHI_17.2	3.34	1.72	5.06	5.13	1.25	6.40	4.04
715.59	CHI_17a	3.32	1.73	5.05	5.11	1.24	6.38	4.05
725.57	CHI_17	3.28	1.68	4.96	5.27	1.40	6.38	4.14
729.6	CHI_16d	3.25	1.67	4.92	5.26	1.39	6.33	1.54
750.07	i_CHI_16	3.09	1.61	4.70	5.64	1.75	6.32	1.78
755.07	i_CHI_16	3.05	1.59	4.64	5.74	1.84	6.31	1.85
760.07	i_CHI_16	3.01	1.55	4.56	3.93	1.02	5.34	3.39
761.7	CHI_16	3.00	1.55	4.55	3.92	1.10	5.33	2.28
762.7	i_CHI_16	2.99	1.55	4.54	3.86	1.00	5.30	2.29
772.52	i_CHI_15	2.90	1.38	4.28	4.34	1.21	5.24	2.55
773.02	CHI_15	2.90	1.37	4.27	4.33	1.43	5.23	2.26
788.22	CHI_14c	2.79	1.24	4.03	4.85	1.99	5.22	2.51
793.22	CHI_14b	2.75	1.15	3.90	5.03	3.16	5.19	2.63
796.72	CHI_14a	2.34	1.46	3.80	4.79	2.59	4.96	2.76
802.52	CHI_13b	1.67	2.06	3.73	3.56	0.81	4.38	2.82
807.52	CHI_13a	1.63	2.10	3.73	3.47	0.76	4.34	3.98
815.91	i_CHI_12	1.60	2.08	3.68	3.54	0.80	4.32	4.02
818.91	CHI_12d	1.58	2.10	3.68	3.45	0.76	4.29	4.02
820.11	CHI_12c	1.58	1.98	3.56	3.78	0.88	4.28	4.14
828.91	CHI_12b	1.53	1.99	3.52	3.83	0.92	4.27	4.18
851.79	CHI_12a	1.41	2.02	3.43	4.00	0.93	4.24	4.27
867.47	CHI_12	1.33	2.04	3.37	4.03	0.93	4.20	4.33
882.98	CHI_11e	1.24	2.07	3.31	4.13	0.95	4.18	4.40
912.98	CHI_11d	1.06	2.13	3.19	4.03	0.91	4.02	4.51
942.98	CHI_11c	0.88	2.21	3.09	3.87	0.85	3.85	4.06
962.48	CHI_11b	0.76	2.28	3.04	3.77	0.81	3.76	4.11
964.58	CHI_11a	0.75	2.33	3.08	2.66	0.53	3.44	3.02
968.78	CHI_11	0.72	2.23	2.95	3.06	0.70	3.43	1.55
986.78	CHI_10b	0.61	1.78	2.39	3.62	0.91	3.06	2.11
988.79	CHI_10a	0.60	1.79	2.39	3.38	0.85	2.97	1.88
999.79	CHI_09b	0.53	1.83	2.36	3.36	0.77	2.93	1.93
1002.19	CHI_09a	0.52	1.82	2.34	3.38	0.87	2.93	1.77
1013.19	CHI_08c	0.45	1.83	2.28	3.37	0.86	2.86	1.83
1027.16	CHI_08b	0.37	1.84	2.21	3.29	0.86	2.76	1.94
1042.16	CHI_08a	0.29	1.84	2.13	3.30	0.89	2.68	2.02
1043.16	CHI_07c	0.28	1.88	2.16	3.03	0.40	2.62	3.18
1057.16	CHI_07b	0.19	1.95	2.14	3.05	0.71	2.62	3.19
1072.16	CHI_07a	0.10	1.97	2.07	3.25	0.78	2.60	2.70
1080.16	i_CHI_07	0.05	1.98	2.03	3.25	0.77	2.57	2.75
1099.5	CHI_07	-0.07	1.98	1.91	3.43	0.79	2.51	2.90
1135.66	CHI_06	-0.27	1.95	1.68	3.45	0.79	2.29	3.13
1142.75	CHI_05b	-0.32	1.95	1.63	3.46	0.79	2.24	3.18
1144.89	CHI_05a	-0.34	1.96	1.62	3.45	0.90	2.23	1.26
1226.35	CHI_04c	-0.82	1.99	1.17	3.35	0.79	1.75	1.67

CHIARAVAGNA Tr=50anni - Configurazione definitiva di progetto								
PROGRESSIVA	ID SEZIONE	Quota Fondo	Y	PL	V	Fr	H	Franco
[m]		[m sm]	[m]	[m sm]	[m/s]	[-]	[m sm]	[m]
1226.45	CHI_04b	-0.82	1.99	1.17	3.34	0.79	1.74	1.69
1236.45	CHI_04a	-0.88	2.01	1.13	3.33	0.78	1.70	1.73
1243.45	CHI_03c	-0.92	2.11	1.19	2.26	0.40	1.45	1.53
1258.45	CHI_03b	-1.00	2.13	1.13	2.44	0.55	1.44	1.45
1258.95	CHI_03a	-1.00	2.13	1.13	2.43	0.55	1.43	1.45
1271.45	CHI_03	-1.00	2.08	1.08	2.50	0.57	1.39	1.42
1352.53	CHI_02c	-1.00	1.66	0.66	3.42	0.78	1.26	1.58
1366.53	CHI_02b	-1.00	1.59	0.59	3.57	0.94	1.24	1.59
1367.63	CHI_02a	-2.50	3.10	0.60	1.76	0.33	0.75	1.59
1592.52	CHI_01	-2.50	3.05	0.55	0.75	0.14	0.58	0.00

Tr=200 anni

CHIARAVAGNA Tr=200anni - Configurazione definitiva di progetto								
PROGRESSIVA	ID SEZIONE	Quota Fondo	Y	PL	V	Fr	H	Franco
[m]		[m sm]	[m]	[m sm]	[m/s]	[-]	[m sm]	[m]
-583.59	CHI_41v	27.69	3.00	30.69	6.69	2.04	32.97	4.34
-563.59	CHI_40	27.11	3.02	30.13	6.33	1.47	32.17	3.87
-530.07	CHI_39	26.60	2.78	29.38	4.69	1.18	30.50	2.52
-498.07	CHI_38	26.90	2.02	28.92	4.13	1.11	29.79	0.71
-452.07	CHI_37m	26.40	1.94	28.34	3.95	1.10	29.13	1.76
-449.07	CHI_37v	26.35	1.94	28.29	3.95	1.10	29.08	1.81
-407.07	CHI_36	25.70	1.88	27.58	3.56	0.95	28.23	1.82
-342.04	CHI_35m	25.20	1.80	27.00	4.01	0.98	27.82	0.60
-339.04	CHI_35v	22.60	2.59	25.19	2.79	0.55	25.59	1.71
-307.05	CHI_34m	22.50	2.51	25.01	3.25	0.66	25.55	-0.21
-297.05	CHI_34v	22.45	2.30	24.75	3.56	0.75	25.39	0.05
-295.05	CHI_33	20.70	1.94	22.64	4.97	1.35	23.89	3.07
-220.01	CHI_32	19.20	2.19	21.39	4.36	1.08	22.35	1.57
-194	CHI_31m	18.67	2.41	21.08	4.95	1.22	22.33	3.12
-191	CHI_31v	18.62	2.40	21.02	4.99	1.23	22.29	3.18
-149	CHI_30	17.90	2.21	20.11	4.07	0.99	20.95	0.63
-49	CHI_29	17.03	2.11	19.14	4.96	1.25	20.40	0.24
-1	CHI_28m	16.80	1.55	18.35	5.09	1.54	19.67	0.75
0	CHI_28v	12.40	3.75	16.15	2.63	0.63	16.50	2.85
5	CHI_27a	12.29	3.98	16.27	1.76	0.30	16.43	2.73
16.04	CHI_27b	12.06	4.26	16.32	1.34	0.21	16.41	2.43
25.04	CHI_27c	12.06	2.87	14.93	2.57	0.81	15.27	3.82
27.04	CHI_27d	12.06	2.87	14.93	2.58	0.91	15.27	3.82
62.02	CHI_27	11.33	3.69	15.02	1.82	0.44	15.19	3.33
89.23	CHI_26a	10.80	4.26	15.06	1.46	0.24	15.17	2.44
99.23	CHI_26b	11.10	2.55	13.65	2.71	0.59	14.02	3.99
102.23	CHI_26c	11.08	2.56	13.64	2.69	0.59	14.01	3.99
106.02	CHI_26m	11.07	2.53	13.60	2.76	1.07	13.99	3.00
116.02	CHI_26v	11.05	2.03	13.08	4.02	1.16	13.90	3.52
122.05	CHI_25a	11.00	2.04	13.04	3.89	1.18	13.81	4.26
127.23	CHI_25b	11.00	2.01	13.01	3.92	1.75	13.80	4.29
130.23	CHI_25c	10.80	2.19	12.99	3.65	0.97	13.67	4.31
216.02	CHI_25	9.87	2.42	12.29	4.62	1.02	13.37	2.45
283.99	CHI_24	9.23	2.38	11.61	4.05	0.91	12.45	1.17
333.99	CHI_23m	8.80	2.47	11.27	3.17	0.69	11.78	1.03
337.99	CHI_23v	8.79	1.56	10.35	5.22	1.72	11.74	1.95
400.01	CHI_22	5.90	2.81	8.71	3.68	0.78	9.40	3.89
484.97	CHI_21m	5.20	3.18	8.38	4.39	0.90	9.36	3.57
541.97	CHI_20	4.74	3.08	7.82	4.38	0.91	8.80	2.18
581.28	CHI_19c	4.58	2.85	7.43	4.62	0.96	8.51	2.22
591.29	CHI_19b	4.35	2.99	7.34	4.40	0.82	8.33	2.31
603.11	CHI_19m	4.26	3.00	7.26	4.24	0.78	8.18	1.08
613.11	CHI_19v	4.22	2.41	6.63	5.29	1.09	8.05	1.72
617.58	CHI_18.5v	4.15	2.43	6.58	5.35	1.11	8.04	3.42

CHIARAVAGNA Tr=200anni - Configurazione definitiva di progetto								
PROGRESSIVA	ID SEZIONE	Quota Fondo	Y	PL	V	Fr	H	Franco
[m]		[m sm]	[m]	[m sm]	[m/s]	[-]	[m sm]	[m]
640.11	CHI_18d	3.97	2.29	6.26	5.29	1.11	7.69	2.72
645.57	CHI_18c	3.93	2.26	6.19	5.39	1.16	7.67	2.93
658.57	CHI_18b	3.82	2.17	5.99	5.71	1.24	7.65	3.15
668.57	CHI_18a	3.75	2.07	5.82	5.98	1.53	7.64	3.55
670.67	CHI_18	3.73	2.03	5.76	6.05	1.58	7.63	3.61
686.58	CHI_17.6a	3.51	2.08	5.59	5.95	1.55	7.39	3.78
687.58	CHI_17.6m	3.50	2.07	5.57	5.32	1.19	7.02	1.82
698.48	CHI_17.4m	3.42	2.06	5.48	5.37	1.21	6.95	1.91
699.48	CHI_17.4a	3.41	2.06	5.47	5.37	1.21	6.94	4.02
714.59	CHI_17.2	3.34	2.00	5.34	5.54	1.28	6.91	3.76
715.59	CHI_17a	3.32	2.01	5.33	5.52	1.27	6.88	3.77
725.57	CHI_17	3.28	1.96	5.24	5.64	1.43	6.86	3.86
729.6	CHI_16d	3.25	1.95	5.20	5.66	1.42	6.83	1.27
750.07	i_CHI_16	3.09	1.89	4.98	5.98	1.78	6.80	1.50
755.07	i_CHI_16	3.05	1.87	4.92	6.02	1.87	6.77	1.56
760.07	i_CHI_16	3.01	1.84	4.85	4.30	1.02	5.79	3.10
761.7	CHI_16	3.00	1.84	4.84	4.30	1.09	5.78	1.99
762.7	i_CHI_16	2.99	1.84	4.83	4.12	1.00	5.70	2.00
772.52	i_CHI_15	2.90	1.66	4.56	4.60	1.21	5.63	2.28
773.02	CHI_15	2.90	1.65	4.55	4.59	1.43	5.62	1.98
788.22	CHI_14c	2.79	1.53	4.32	5.03	1.99	5.61	2.21
793.22	CHI_14b	2.75	1.46	4.21	5.22	3.16	5.60	2.32
796.72	CHI_14a	2.34	1.79	4.13	4.95	2.54	5.38	2.42
802.52	CHI_13b	1.67	2.41	4.08	3.86	0.81	4.84	2.48
807.52	CHI_13a	1.63	2.44	4.07	3.77	0.76	4.79	3.64
815.91	i_CHI_12	1.60	2.42	4.02	3.85	0.81	4.78	3.68
818.91	CHI_12d	1.58	2.44	4.02	3.80	0.77	4.76	3.68
820.11	CHI_12c	1.58	2.32	3.90	4.09	0.91	4.75	3.80
828.91	CHI_12b	1.53	2.33	3.86	4.15	0.94	4.74	3.84
851.79	CHI_12a	1.41	2.36	3.77	4.29	0.94	4.71	3.93
867.47	CHI_12	1.33	2.38	3.71	4.39	0.93	4.69	3.99
882.98	CHI_11e	1.24	2.41	3.65	4.50	0.95	4.68	4.05
912.98	CHI_11d	1.06	2.48	3.54	4.40	0.91	4.52	4.17
942.98	CHI_11c	0.88	2.56	3.44	4.23	0.86	4.35	3.71
962.48	CHI_11b	0.76	2.63	3.39	4.11	0.82	4.25	3.77
964.58	CHI_11a	0.75	2.67	3.42	2.88	0.54	3.85	2.68
968.78	CHI_11	0.72	2.56	3.28	3.31	0.71	3.84	1.22
986.78	CHI_10b	0.61	2.07	2.68	3.92	0.91	3.46	1.82
988.79	CHI_10a	0.60	2.08	2.68	3.65	0.85	3.36	1.59
999.79	CHI_09b	0.53	2.12	2.65	3.60	0.77	3.31	1.65
1002.19	CHI_09a	0.52	2.12	2.64	3.60	0.87	3.30	1.47
1013.19	CHI_08c	0.45	2.12	2.57	3.59	0.86	3.23	1.54
1027.16	CHI_08b	0.37	2.13	2.50	3.54	0.86	3.13	1.65
1042.16	CHI_08a	0.29	2.13	2.42	3.54	0.88	3.06	1.73
1043.16	CHI_07c	0.28	2.15	2.43	3.41	0.41	3.03	2.90
1057.16	CHI_07b	0.19	2.23	2.42	3.39	0.74	3.01	2.91
1072.16	CHI_07a	0.10	2.24	2.34	3.61	0.80	3.00	2.43
1080.16	i_CHI_07	0.05	2.26	2.31	3.62	0.80	2.97	2.48
1099.5	CHI_07	-0.07	2.24	2.17	3.81	0.82	2.91	2.64
1135.66	CHI_06	-0.27	2.20	1.93	3.87	0.84	2.69	2.89
1142.75	CHI_05b	-0.32	2.19	1.87	3.88	0.84	2.64	2.94
1144.89	CHI_05a	-0.34	2.21	1.87	3.89	0.91	2.64	1.01
1226.35	CHI_04c	-0.82	2.20	1.38	3.81	0.84	2.12	1.46
1226.45	CHI_04b	-0.82	2.20	1.38	3.77	0.84	2.11	1.48
1236.45	CHI_04a	-0.88	2.21	1.33	3.76	0.83	2.05	1.53
1243.45	CHI_03c	-0.92	2.26	1.34	2.69	0.45	1.70	1.37
1258.45	CHI_03b	-1.00	2.27	1.27	2.88	0.63	1.69	1.32
1258.95	CHI_03a	-1.00	2.27	1.27	2.87	0.63	1.68	1.32
1271.45	CHI_03	-1.00	2.19	1.19	2.98	0.66	1.64	1.30
1352.53	CHI_02c	-1.00	1.74	0.74	3.67	0.91	1.43	1.50
1366.53	CHI_02b	-1.00	1.62	0.62	3.90	1.11	1.40	1.56
1367.63	CHI_02a	-2.50	3.11	0.61	2.19	0.41	0.85	1.57
1592.52	CHI_01	-2.50	3.05	0.55	0.94	0.17	0.60	0.00

Tr=500 anni

CHIARAVAGNA Tr=500anni - Configurazione definitiva di progetto								
PROGRESSIVA	ID SEZIONE	Quota Fondo	Y	PL	V	Fr	H	Franco
[m]		[m sm]	[m]	[m sm]	[m/s]	[-]	[m sm]	[m]
-583.59	CHI_41v	27.69	3.16	30.85	6.98	2.04	33.33	4.18
-563.59	CHI_40	27.11	3.18	30.29	6.65	1.50	32.54	3.71
-530.07	CHI_39	26.60	2.91	29.51	4.95	1.20	30.76	2.39
-498.07	CHI_38	26.90	2.15	29.05	4.34	1.12	30.01	0.58
-452.07	CHI_37m	26.40	2.07	28.47	4.11	1.09	29.33	1.63
-449.07	CHI_37v	26.35	2.07	28.42	4.11	1.10	29.28	1.68
-407.07	CHI_36	25.70	2.03	27.73	3.70	0.94	28.43	1.67
-342.04	CHI_35m	25.20	1.96	27.16	4.22	0.96	28.07	0.44
-339.04	CHI_35v	22.60	2.84	25.44	2.91	0.55	25.87	1.46
-307.05	CHI_34m	22.50	2.75	25.25	3.39	0.66	25.84	-0.45
-297.05	CHI_34v	22.45	2.49	24.94	3.75	0.76	25.66	-0.14
-295.05	CHI_33	20.70	2.09	22.79	5.20	1.36	24.16	2.91
-220.01	CHI_32	19.20	2.35	21.55	4.54	1.08	22.60	1.40
-194	CHI_31m	18.67	2.58	21.25	5.07	1.23	22.56	2.95
-191	CHI_31v	18.62	2.56	21.18	5.18	1.24	22.55	3.02
-149	CHI_30	17.90	2.36	20.26	4.28	1.00	21.19	0.47
-49	CHI_29	17.03	2.25	19.28	5.22	1.26	20.67	0.10
-1	CHI_28m	16.80	1.69	18.49	5.34	1.51	19.94	0.61
0	CHI_28v	12.40	3.89	16.29	2.88	0.67	16.71	2.71
5	CHI_27a	12.29	4.13	16.42	1.94	0.31	16.61	2.58
16.04	CHI_27b	12.06	4.43	16.49	1.47	0.22	16.60	2.26
25.04	CHI_27c	12.06	3.02	15.08	2.75	0.81	15.47	3.67
27.04	CHI_27d	12.06	3.02	15.08	2.76	0.93	15.47	3.67
62.02	CHI_27	11.33	3.84	15.17	1.98	0.44	15.37	3.18
89.23	CHI_26a	10.80	4.42	15.22	1.60	0.26	15.35	2.28
99.23	CHI_26b	11.10	2.74	13.84	2.83	0.60	14.25	3.79
102.23	CHI_26c	11.08	2.76	13.84	2.81	0.59	14.24	3.79
106.02	CHI_26m	11.07	2.72	13.79	2.91	1.05	14.23	2.81
116.02	CHI_26v	11.05	2.19	13.24	4.13	1.16	14.11	3.36
122.05	CHI_25a	11.00	2.21	13.21	4.00	1.19	14.02	4.09
127.23	CHI_25b	11.00	2.18	13.18	4.05	1.74	14.01	4.12
130.23	CHI_25c	10.80	2.36	13.16	3.77	0.98	13.89	4.14
216.02	CHI_25	9.87	2.61	12.48	4.82	1.03	13.66	2.25
283.99	CHI_24	9.23	2.57	11.80	4.23	0.91	12.71	0.98
333.99	CHI_23m	8.80	2.66	11.46	3.32	0.70	12.02	0.84
337.99	CHI_23v	8.79	1.70	10.49	5.46	1.72	12.01	1.81
400.01	CHI_22	5.90	3.08	8.98	3.91	0.79	9.76	3.62
484.97	CHI_21m	5.20	3.45	8.65	4.62	0.90	9.74	3.30
541.97	CHI_20	4.74	3.34	8.08	4.61	0.91	9.17	1.92
581.28	CHI_19c	4.58	3.11	7.69	4.81	0.96	8.87	1.96
591.29	CHI_19b	4.35	3.25	7.60	4.60	0.83	8.68	2.05
603.11	CHI_19m	4.26	3.26	7.52	4.46	0.79	8.53	0.82
613.11	CHI_19v	4.22	2.60	6.82	5.59	1.11	8.41	1.52
617.58	CHI_18.5v	4.15	2.63	6.78	5.65	1.13	8.40	3.23
640.11	CHI_18d	3.97	2.48	6.45	5.54	1.14	8.01	2.53
645.57	CHI_18c	3.93	2.44	6.37	5.65	1.18	8.00	2.75
658.57	CHI_18b	3.82	2.35	6.17	5.97	1.27	7.99	2.97
668.57	CHI_18a	3.75	2.25	6.00	6.24	1.54	7.98	3.38
670.67	CHI_18	3.73	2.21	5.94	6.31	1.59	7.97	3.43
686.58	CHI_17.6a	3.51	2.26	5.77	6.21	1.56	7.73	3.60
687.58	CHI_17.6m	3.50	2.25	5.75	5.60	1.22	7.35	1.64
698.48	CHI_17.4m	3.42	2.24	5.66	5.65	1.23	7.28	1.73
699.48	CHI_17.4a	3.41	2.24	5.65	5.64	1.24	7.27	3.84
714.59	CHI_17.2	3.34	2.18	5.52	5.82	1.31	7.25	3.58
715.59	CHI_17a	3.32	2.19	5.51	5.79	1.30	7.22	3.59
725.57	CHI_17	3.28	2.14	5.42	5.92	1.45	7.20	3.68
729.6	CHI_16d	3.25	2.12	5.37	5.92	1.44	7.16	1.09
750.07	i_CHI_16	3.09	2.07	5.16	6.21	1.81	7.12	1.32
755.07	i_CHI_16	3.05	2.06	5.11	6.25	1.90	7.10	1.38
760.07	i_CHI_16	3.01	2.02	5.03	4.57	1.02	6.10	2.92
761.7	CHI_16	3.00	2.02	5.02	4.57	1.09	6.09	1.81

CHIARAVAGNA Tr=500anni - Configurazione definitiva di progetto								
PROGRESSIVA	ID SEZIONE	Quota Fondo	Y	PL	V	Fr	H	Franco
[m]		[m sm]	[m]	[m sm]	[m/s]	[-]	[m sm]	[m]
762.7	i_CHI_16	2.99	2.03	5.02	4.27	1.00	5.94	1.81
772.52	i_CHI_15	2.90	1.83	4.73	4.74	1.21	5.88	2.10
773.02	CHI_15	2.90	1.83	4.73	4.74	1.43	5.87	1.80
788.22	CHI_14c	2.79	1.71	4.50	5.14	1.99	5.85	2.03
793.22	CHI_14b	2.75	1.65	4.40	5.28	3.16	5.82	2.13
796.72	CHI_14a	2.34	1.99	4.33	5.07	2.51	5.64	2.22
802.52	CHI_13b	1.67	2.61	4.28	4.05	0.82	5.12	2.27
807.52	CHI_13a	1.63	2.64	4.27	3.96	0.78	5.07	3.43
815.91	i_CHI_12	1.60	2.62	4.22	4.05	0.82	5.06	3.48
818.91	CHI_12d	1.58	2.65	4.23	3.99	0.78	5.04	3.47
820.11	CHI_12c	1.58	2.53	4.11	4.27	0.95	5.04	3.59
828.91	CHI_12b	1.53	2.54	4.07	4.34	0.96	5.03	3.63
851.79	CHI_12a	1.41	2.57	3.98	4.52	0.95	5.02	3.72
867.47	CHI_12	1.33	2.59	3.92	4.53	0.94	4.97	3.78
882.98	CHI_11e	1.24	2.62	3.86	4.63	0.96	4.95	3.84
912.98	CHI_11d	1.06	2.69	3.75	4.62	0.92	4.83	3.95
942.98	CHI_11c	0.88	2.77	3.65	4.44	0.87	4.66	3.50
962.48	CHI_11b	0.76	2.84	3.60	4.31	0.83	4.54	3.55
964.58	CHI_11a	0.75	2.88	3.63	3.26	0.54	4.17	2.47
968.78	CHI_11	0.72	2.76	3.48	3.63	0.72	4.15	1.02
986.78	CHI_10b	0.61	2.24	2.85	4.11	0.91	3.71	1.65
988.79	CHI_10a	0.60	2.25	2.85	3.82	0.85	3.59	1.42
999.79	CHI_09b	0.53	2.28	2.81	3.74	0.78	3.53	1.48
1002.19	CHI_09a	0.52	2.28	2.80	3.75	0.87	3.52	1.31
1013.19	CHI_08c	0.45	2.29	2.74	3.74	0.86	3.45	1.37
1027.16	CHI_08b	0.37	2.30	2.67	3.68	0.86	3.36	1.49
1042.16	CHI_08a	0.29	2.30	2.59	3.69	0.89	3.28	1.56
1043.16	CHI_07c	0.28	2.32	2.60	3.62	0.41	3.27	2.73
1057.16	CHI_07b	0.19	2.39	2.58	3.59	0.75	3.24	2.75
1072.16	CHI_07a	0.10	2.40	2.50	3.77	0.82	3.23	2.27
1080.16	i_CHI_07	0.05	2.42	2.47	3.78	0.82	3.20	2.31
1099.5	CHI_07	-0.07	2.40	2.33	4.04	0.84	3.16	2.48
1135.66	CHI_06	-0.27	2.35	2.08	4.11	0.87	2.94	2.73
1142.75	CHI_05b	-0.32	2.34	2.02	4.12	0.87	2.89	2.79
1144.89	CHI_05a	-0.34	2.36	2.02	4.08	0.92	2.87	0.86
1226.35	CHI_04c	-0.82	2.34	1.52	4.04	0.86	2.35	1.32
1226.45	CHI_04b	-0.82	2.34	1.52	4.00	0.86	2.33	1.34
1236.45	CHI_04a	-0.88	2.35	1.47	3.99	0.86	2.28	1.39
1243.45	CHI_03c	-0.92	2.35	1.43	2.95	0.48	1.88	1.28
1258.45	CHI_03b	-1.00	2.35	1.35	3.15	0.68	1.86	1.23
1258.95	CHI_03a	-1.00	2.35	1.35	3.14	0.68	1.85	1.23
1271.45	CHI_03	-1.00	2.26	1.26	3.26	0.71	1.81	1.23
1352.53	CHI_02c	-1.00	1.80	0.80	4.04	0.99	1.63	1.45
1366.53	CHI_02b	-1.00	1.65	0.65	4.29	1.22	1.59	1.53
1367.63	CHI_02a	-2.50	3.13	0.63	2.47	0.46	0.94	1.55
1592.52	CHI_01	-2.50	3.05	0.55	1.07	0.20	0.61	0.00

Di seguito si riportano una tabella relativa alla criticità idraulica di ogni struttura di attraversamento localizzata nel tratto di indagine del Torrente Chiaravagna per i tre tempi di ritorno considerati nella configurazione definitiva di progetto. La tabella riporta le seguenti informazioni:

- Nome sezione: denominazione della struttura di attraversamento;
- Progressiva: valore di posizionamento della sezione trasversale, come distanza progressiva in [m] a partire dall'inizio del tratto;
- ID sezione: identificativo della sezione trasversale;
- Intradosso: livello altimetrico [m s.l.m.] dell'intradosso della struttura;
- PL: livello del pelo libero in [m s.l.m.];
- Franco: franco idraulico in [m] rispetto all'intradosso.

I valori di livello del pelo libero e di franco idraulico sono riportati per ognuno dei tre tempi di ritorno considerati: 50, 200 e 500 anni.

Struttura			Configurazione definitiva di progetto						
Nome Sezione	PROGR.	SEZIONE	Intradosso	TR50		TR200		TR500	
	[m]	ID		P.L.	Franco	P.L.	Franco	P.L.	Franco
				[m.s.m.]	[m]	[m.s.m.]	[m]	[m.s.m.]	[m]
Passerella Carlineo (*) (**)	-452.07	CHI_37m	30.90	28.12	1.98	28.34	1.76	28.47	1.63
Ponte via dell'Alloro (*)	-307.05	CHI_34m	24.80	24.64	0.16	25.01	-0.21	25.25	-0.45
Passerella Santuario (*)	-194.00	CHI_31m	24.20	20.81	3.39	21.08	3.12	21.25	2.95
Ponte De Simone	106.02	CHI_26m	16.60	13.28	3.32	13.60	3.00	13.79	2.81
Passerella v. VIII Soc. Case	333.99	CHI_23m	12.30	10.97	1.33	11.27	1.03	11.46	0.84
Passerella via Leonardi	484.97	CHI_21m	11.95	7.95	4.00	8.38	3.57	8.65	3.30
Ponte obliquo v. Chiaravagna	603.11	CHI_19m	8.34	6.85	1.49	7.26	1.08	7.52	0.82
Ponte via Giotto	687.58	CHI_17.6m	7.39	5.29	2.10	5.57	1.82	5.75	1.64
Ponte via Manara	761.70	CHI_16	6.83	4.55	2.28	4.84	1.99	5.02	1.81
Passerella ELSAG	796.72	CHI_14a	6.55	3.80	2.76	4.13	2.42	4.33	2.22
Ponte via Albareto	968.78	CHI_11	4.50	2.95	1.55	3.28	1.22	3.48	1.02
Ponte ferrovia GE-XXMiglia	988.79	CHI_10a	4.27	2.39	1.88	2.68	1.59	2.85	1.42
1° Ponte ILVA	1002.19	CHI_09a	4.11	2.34	1.77	2.64	1.47	2.80	1.31
2° Ponte ILVA	1027.16	CHI_08b	4.15	2.21	1.94	2.50	1.65	2.67	1.49
Tombinatura Piaggio	1144.89	CHI_05a	2.88	1.62	1.26	1.87	1.01	2.02	0.86
Ponte via Marsiglia	1226.45	CHI_04b	2.86	1.17	1.69	1.38	1.48	1.52	1.34

(*): manufatti esterni al tratto oggetto di incarico - (**): Franco riferito a minima quota di sponda (30.10 m.s.m.)





ALLEGATO B
MIKE 11 RR UHM
Descrizione Tecnica



B MIKE 11 RR UHM – Descrizione tecnica

Il modulo UHM del codice di calcolo MIKE 11 del DHI (Danish Hydraulic Institute) simula il deflusso generato su un bacino idrografico da un singolo evento di pioggia attraverso l'utilizzo del metodo dell'idrogramma unitario.

La pioggia netta è calcolata assumendo che le perdite nel bacino per infiltrazione possano essere descritte con un valore iniziale fisso e costante, con un valore variabile proporzionale (di fatto come nel metodo razionale) o con il metodo CN del SCS (Soil Conservation Service, 1972).

La pioggia netta è quindi trasformata in deflusso nel corso d'acqua attraverso il metodo dell'idrogramma unitario. Il modulo UHM permette di utilizzare sia l'idrogramma adimensionale del SCS sia qualsiasi idrogramma definito dall'utente e memorizzato in un database, il quale gestisce anche le condizioni al contorno, ovvero le serie storiche dei dati registrati di precipitazione e di portata.

B.1 Modello delle perdite nel bacino

Durante un evento di pioggia parte dell'acqua caduta si infiltra nel suolo. Una grossa parte di tale acqua evapora o raggiunge la rete superficiale come deflusso sotterraneo, quindi dopo un lungo lasso di tempo dalla fine dell'evento.

Quindi risulta ragionevole in questo tipo di modellazione idrologica descrivere la maggior parte dell'infiltrazione come perdita.

La quantità di pioggia che raggiunge il corso d'acqua durante un evento, cioè la precipitazione totale meno la perdita, è definita come pioggia netta.

Il modulo UHM include tre metodi differenti per il calcolo della pioggia netta e sono tutti modelli a parametri concentrati, ovvero che considerano ciascun bacino come un'unità e quindi i parametri utilizzati rappresentano valori medi sul bacino.

Tutti i metodi includono un fattore di aggiustamento areale che tiene conto dell'eventuale distribuzione non uniforme della precipitazione sul bacino.

B.2 Perdita proporzionale (metodo razionale)

Le perdite sono assunte proporzionali al tasso di precipitazione; la pioggia netta viene espressa come: $P_{netta} = a \cdot A_f \cdot P$

con

P_{netta} = pioggia netta (mm/ora);

a = coefficiente di deflusso (fra 0 e 1);

A_f = fattore areale;

P = precipitazione totale (mm/ora).

B.3 Perdita fissa iniziale e perdita costante

Il metodo prevede che non si produca pioggia netta fino a quando la perdita iniziale, definita a priori dall'utente, non sia stata raggiunta. Di conseguenza la pioggia netta è generata solo quando il tasso di precipitazione è superiore a uno specifico tasso costante di perdita.

$$P_{netta} = \begin{cases} 0 & \text{per } P_{somma} < I_a + I_c \cdot dt \\ A_f \cdot P - I_c & \text{per } P_{somma} > I_a \end{cases}$$

- P_{netta} = pioggia netta (mm/ora);
 P_{somma} = pioggia cumulata dall'inizio dell'evento (mm);
 I_a = perdita iniziale definita dall'utente (mm);
 I_c = tasso costante di perdita definito dall'utente (mm/ora);
 A_f = fattore areale;
 P = precipitazione totale (mm/ora);
 dt = passo di tempo di calcolo (ore).

In questo modo il metodo tiene conto del fatto che le perdite sono maggiori all'inizio dell'evento di precipitazione.

B.4 Perdita con metodo SCS

Il metodo del U.S. Soil Conservation Service (SCS) è stato sviluppato nel 1972 per il calcolo delle perdite durante un evento di pioggia.

Durante un evento di pioggia, l'altezza di pioggia netta (o deflusso diretto P_e) è sempre minore o uguale all'altezza totale di pioggia P ; perciò, quando inizia il deflusso superficiale, l'altezza d'acqua immagazzinata nel bacino, F_a , è minore o uguale alla massima ritenzione potenziale S .

Si individua una certa quantità di pioggia I_a (perdita iniziale) per la quale non si produce alcun deflusso; in tal modo il deflusso potenziale è definito come $P-I_a$.

L'ipotesi del metodo SCS è che il rapporto fra le quantità attuali e potenziali di perdita e precipitazione sia uguale e cioè:

$$\frac{F_a}{S} = \frac{P_e}{P - I_a}$$

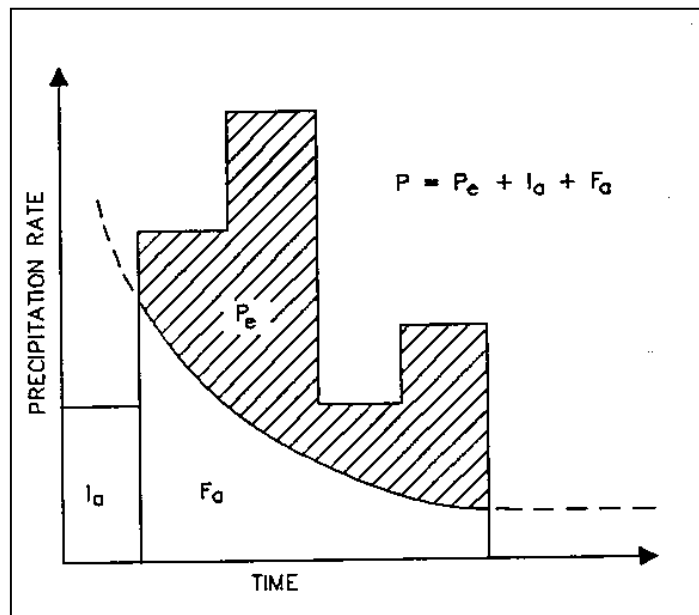
Per il principio di continuità è:

$$P = P_e + I_a + F_a$$

Combinando le precedenti equazioni si ottiene:

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S}$$

che è l'equazione base per il calcolo dell'altezza di pioggia netta o deflusso diretto del metodo SCS.



Variabili del metodo SCS

Sono stati utilizzati i risultati di numerosi piccoli bacini sperimentali per ottenere la relazione empirica:

$$I_a = 0.2 \cdot S$$

Ne deriva l'equazione base utilizzata nel modello UHM:

$$P_e = \frac{(P - 0.2 \cdot S)^2}{P + 0.8 \cdot S}$$

Il fattore S, ritenzione massima potenziale del bacino, è calcolato attraverso il parametro adimensionale CN, utilizzando la seguente formula empirica derivata dall'analisi del fenomeno afflussi-deflussi su un gran numero di bacini:

$$S = ((1000/CN) - 10) \cdot 25.4 \quad (\text{mm})$$

Il valore del parametro CN (curve number) dipende dal tipo di suolo, dall'uso del suolo e dalle condizioni precedenti di imbibizione del suolo all'inizio dell'evento di pioggia (confronta tabella 1 allegata). Varia fra 0, cioè nessun deflusso, e 100, cioè pioggia netta pari alla pioggia totale. Per bacini naturali generalmente CN varia fra 50 e 100.

Le classi di appartenenza del suolo nel metodo SCS sono:

- A. Suoli ad alta permeabilità, costituiti da sabbie grossolane, silt calcarei non consolidati ed omogenei.
- B. Suoli a moderata permeabilità, costituiti da sabbie limose ed argillose.

- C. Suoli a medio-bassa permeabilità, costituiti da argille e limi, con contenuti organici.
- D. Suoli a bassa permeabilità, costituiti da argille plastiche, con livello piezometrico permanentemente alto.

Il modello opera considerando tre diverse condizioni precedenti di imbibizione:

AMC (I) : condizioni secche, vicine all'appassimento;

AMC (II) : condizione medie, vicine alla capacità del suolo;

AMC (III): condizioni bagnate, vicine alla saturazione.

Per ciascun passo di calcolo la pioggia netta è calcolata come la differenza fra la pioggia netta cumulata fra l'inizio e la fine del passo di tempo.

Il metodo SCS è stato sviluppato sulla base di eventi di pioggia giornalieri e di conseguenza il programma considera l'inizio di un nuovo periodo di 24 ore come un nuovo evento, cioè:

- ogni 24 ore AMC è aggiornato di una classe ogni 16 mm di pioggia caduti durante il periodo di simulazione;
- CN e S sono ricalcolati in relazione al valore aggiornato di AMC, utilizzando la tabella 2 allegata;
- il quantitativo di pioggia netta P_e e resettato a zero.

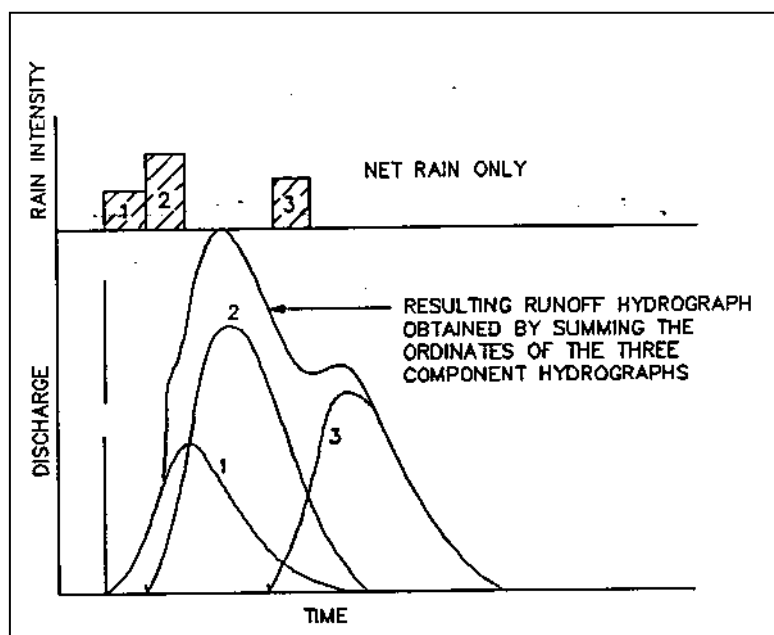
B.5 Modello dell'idrogramma unitario

Il metodo dell'idrogramma unitario è un semplice modello lineare che può essere usato per derivare l'idrogramma risultante da un qualsiasi quantitativo di pioggia netta.

L'idrogramma unitario rappresenta la funzione di risposta impulsiva unitaria di un sistema idrologico lineare, ovvero l'idrogramma diretto di portata risultante da un'unità di pioggia netta nella durata t_r .

Le seguenti ipotesi sono la base del metodo:

- la pioggia netta ha intensità costante nella durata effettiva
- la pioggia netta è distribuita uniformemente sull'intero bacino idrografico
- il tempo di base dell'idrogramma di portata risultante da una pioggia netta di data durata è costante
- le ordinate di tutti gli idrogrammi di portata con una comune base di tempo sono direttamente proporzionali all'ammontare totale della pioggia netta rappresentata da ciascun idrogramma
- è applicato il principio di sovrapposizione degli idrogrammi risultanti da periodi in continuo o isolati di pioggia netta a intensità costante
- per un dato bacino, l'idrogramma risultante da una specifica pioggia netta riflette le condizioni invariabili del bacino.



Principio di sovrapposizione degli idrogrammi di portata.

In condizioni naturali le precedenti ipotesi non sono perfettamente soddisfatte. Tuttavia, in molti casi le condizioni idrologiche sono sufficientemente vicine alle ipotesi sopraddette in modo tale da generare risultati soddisfacenti.

In accordo con le sopraddette ipotesi, il modello ad ogni passo di tempo determina l'idrogramma corrispondente alla pioggia netta generata dal modello delle perdite nel bacino nello stesso passo di tempo, e aggiunge tale risposta al contributo di deflusso generato nel passo di tempo precedente.

B.6 Tipi di idrogrammi unitari

Un idrogramma unitario è caratterizzato dalla durata della pioggia unitaria (t_r) e dal "lag time" (t_l) definito come la differenza di tempo fra il centro dell'evento unitario di pioggia e il picco di portata.

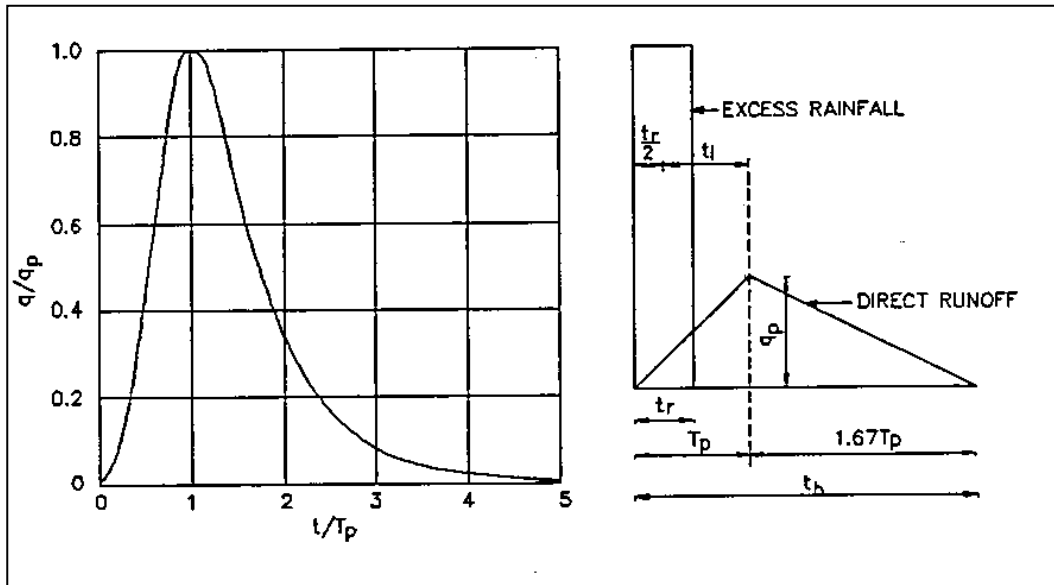
Il tempo di picco (T_p), cioè il tempo dall'inizio dell'evento fino al momento in cui si verifica il picco di portata, può essere calcolato come:

$$T_p = t_r/2 + t_l$$

Il realtà l'idrogramma unitario per un dato bacino è unico. Tuttavia sono stati fatti molti sforzi per sviluppare un idrogramma unitario sintetico che potesse essere più e meno generalmente applicabile.

Nel presente modello sono specificati due tipi di idrogrammi unitari sintetici: l'SCS triangolare e l'SCS adimensionale.

L'utente può sceglierne uno dei due o decidere di utilizzare uno specifico idrogramma preso dal database.



Idrogrammi sintetici del Soil Conservation Service.

Il modello permette di inserire nel database tre tipi di idrogrammi unitari definiti dall'utente:

- un idrogramma adimensionale specificato come: portata diviso portata di picco (q/q_p)
funzione del tempo diviso tempo di picco (T/T_p)
- idrogrammi specifici per ciascun bacino, dimensionati e con le corrispondenti durate unitarie di pioggia t_r
- idrogrammi unitari istantanei derivati dal metodo area-tempo.

Gli idrogrammi unitari istantanei sono automaticamente convertiti in idrogrammi, ovvero con una durata unitaria di precipitazione uguale al passo di calcolo dt , attraverso la formula:

$$q_{dt}(t) = (q(t) + q(t - dt)) / 2$$

dove:

$q_{dt}(t)$ è l'ordinata al tempo t dell'idrogramma convertito

$q(t)$ è l'ordinata al tempo t dell'idrogramma istantaneo

t è tempo di calcolo attuale

dt è il passo di tempo di calcolo

L'utente deve specificare il "lag time" che deve essere utilizzato nei calcoli. Il programma mette quindi automaticamente nella giusta scala l'idrogramma applicato, facendo attenzione che l'area sotto la curva risulti unitaria.

Il "lag time" può anche essere calcolato dai dati caratteristici del bacino utilizzando la formula sperimentale del SCS:

$$t_l = \frac{(L \cdot 3,28 \cdot 10^3)^{0,8} \cdot (100\% / CN - 9)^{0,7}}{(1900 \cdot Y^{0,5})}$$

dove

t_l = lag time (ore)

L = lunghezza del bacino (km)

CN = SCS curve number

Y = pendenza media del bacino (%)

Un idrogramma unitario derivato dalle curve area-tempo è considerato specifico del bacino. Di conseguenza non si può specificare un lag time arbitrario se si utilizza tale metodo. Il programma utilizza semplicemente il lag time implicitamente dato dalle curve area-tempo.

Il metodo area-tempo implementato nel modulo UHM descrive una pura traslazione dello ietogramma di pioggia netta attraverso la rete di drenaggio superficiale, descritta usando il tempo di percorrenza del canale di flusso. L'idrogramma in uscita ignora quindi gli effetti di immagazzinamento nel bacino.

B.7 Passo di tempo di calcolo

Se si utilizza un idrogramma unitario definito dall'utente è l'utente stesso che deve verificare che il passo di tempo specificato corrisponda alla durata unitaria di pioggia dell'idrogramma unitario.

Se si utilizzano gli idrogrammi del SCS è suggerito un passo di tempo selezionato come il 22% del lag time ed in ogni caso non superiore al 27% del lag time.



ALLEGATO C
MIKE 11 HD & ST
Descrizione tecnica

PREMESSA

MIKE 11 è un software in grado di simulare il flusso monodimensionale, stazionario e non, di fluidi verticalmente omogenei in qualsiasi sistema di canali o aste fluviali. Sviluppato a partire dagli anni '70 dal DHI (Danish Hydraulic Institute), rappresenta lo stato dell'arte nella modellistica matematica in ambito fluviale e riferimento nell'ambito della modellistica idrodinamica monodimensionale.

Caratteristiche del codice sono la velocità di calcolo e l'efficienza del robusto motore di simulazione idrodinamica (risolve le equazioni complete del De St.Venant), la struttura logica e sequenziale per l'inserimento e gestione dei dati di input (geometrie, serie storiche ecc.) ed i molteplici strumenti di interpretazione e visualizzazione dei risultati, in grado di garantire un'ottima rappresentazione degli studi condotti (rappresentazione di sezioni, profili, piani quotati, anche in ambiente GIS).

La grande flessibilità del codice di calcolo permette di integrare, attraverso specifici moduli, le applicazioni idrodinamiche con fenomeni idrologici, trasporto solido, advezione-dispersione, qualità delle acque, ecologia, rendendo MIKE 11 uno strumento indispensabile per affrontare e risolvere molteplici problemi d'ingegneria fluviale quali, ad esempio:

- studi di idraulica fluviale e di propagazione dell'onda di piena;
- studi di idrologia e idrogeologia;
- supporto alla progettazione e gestione di opere idrauliche;
- analisi della rottura dighe;
- analisi del trasporto solido e morfologia fluviale;
- modelli di previsione in tempo reale e di supporto decisionale;
- analisi dei fenomeni di intrusione del cuneo salino in fiumi ed estuari;
- studi di valutazione della qualità delle acque sia superficiali che sotterranee;
- analisi dello stato ecologico dei corsi d'acqua.

MIKE 11 è costituito dai seguenti moduli:

- HD (idrodinamico): simulazione del flusso in canali a pelo libero, costituisce la base per ulteriori moduli aggiuntivi;
- RR (afflussi-deflussi): modulo che consente, partendo dai dati meteorologici (pioggia, temperature, evapotraspirazione, ecc...), su bacini naturali o artificiali, di ricostruire attraverso l'utilizzo di modelli idrologici (NAM, UHM, Drift, ecc...) le portate idriche in assegnate sezioni di calcolo;
- AD (advezione-dispersione): simulazione del processo di advezione e dispersione di una sostanza in soluzione o in sospensione di qualsiasi natura nel corpo idrico, eventualmente caratterizzata da una cinetica di decadimento lineare;
- ECOLab (ecologico): simulazione di una serie di processi qualitativi, tra i quali il ciclo BOD-DO con nitrificazione-denitrificazione, il ciclo del fosforo, l'eutrofizzazione, il trasporto di metalli pesanti ecc.;

- ST (trasporto sedimenti): simulazione del trasporto solido di materiale non coesivo, in modalità disaccoppiata (senza variazione della geometria del fondo alveo) o accoppiata (calcolo delle trasformazioni morfologiche);
- FF/DA (previsioni in tempo reale): il modulo consente, assimilando i dati misurati in tempo reale su un bacino e/o corso d'acqua, di correggere la simulazione idrodinamica al fine di garantire una affidabilità massima sulla previsione di un evento di piena.

Particolarmente efficace risulta la possibilità di poter integrare il codice MIKE 11, con altri codici di calcolo della famiglia MIKE quali: MIKE 21 (MIKE FLOOD), per simulare in maniera combinata fenomeni 1D e 2D; MIKE SHE, per la modellazione di corpi idrici superficiali e sotterranei; WEST, per simulare in dettaglio i processi nell'impianto di trattamento ed il relativo impatto sul corso d'acqua recettore; MOUSE (MIKE URBAN FLOOD), simula le interferenze tra il corso d'acqua e la rete di drenaggio.

Di seguito si descrive il codice MIKE 11 HD.

MODULO IDRODINAMICO (HD)

Il modulo idrodinamico HD rappresenta il "cuore" del codice di calcolo MIKE 11 ed è in grado di simulare il flusso idrico monodimensionale, stazionario e non, di fluidi verticalmente omogenei in qualsiasi sistema di canali o aste fluviali. Attraverso l'utilizzo di HD è possibile simulare:

- portate laterali;
- condizioni di corrente veloce o lenta;
- flusso libero o rigurgitato in corrispondenza di sfioratori;
- differenti regole operative di funzionamento di serbatoi o invasi;
- resistenze localizzate e perdite di carico concentrate;
- casse d'espansione;
- condizioni di flusso quasi - bidimensionale sulle pianure alluvionali;
- azione del vento;
- nodi idraulici (biforcazioni e confluenze).

L'adozione del programma di simulazione MIKE 11 consente la soluzione del problema idrodinamico di moto vario con uno schema di soluzione numerica molto efficiente, che limita i tempi di calcolo consentendo una adeguata rappresentazione dell'evolversi temporale dei transitori idraulici legati al passaggio dell'onda di piena.

DESCRIZIONE DELLE CONDIZIONI DI MOTO SIMULATE

Il modello consente di attivare tre diverse descrizioni del moto, mediante tre differenti formulazioni matematiche:

- Approccio dell'"onda cinematica". Le condizioni di moto sono calcolate imponendo il bilancio tra le forze di gravità e di attrito. Questa semplificazione non permette di simulare gli effetti di rigurgito.
- Approccio dell'"onda diffusiva". Oltre alle forze di gravità ed attrito viene tenuto conto del gradiente idrostatico in modo tale da poter valutare anche gli effetti a monte delle condizioni al contorno di valle e quindi simulare i fenomeni di rigurgito.

- Approccio dell'"onda dinamica". Utilizzando le equazioni complete del moto, comprese le forze di accelerazione, è possibile simulare con questa formulazione transitori veloci, flussi di marea ecc.

In funzione del tipo di problema da risolvere è possibile scegliere la descrizione del moto più appropriata. Ognuna delle tre formulazioni consente di simulare sia sistemi idrici ramificati che reti idrauliche con maglie chiuse.

EQUAZIONI GENERALI DI DE SAINT VENANT

MIKE 11, risolve le equazioni di conservazione del volume e della quantità di moto (equazioni di De Saint Venant) che sono derivate sulla base delle seguenti assunzioni:

- il fluido (acqua) è incomprimibile ed omogeneo, cioè senza significativa variazione di densità;
- la pendenza del fondo è piccola;
- le lunghezze d'onda sono grandi se paragonate all'altezza d'acqua, in modo da poter considerare in ogni punto parallela al fondo la direzione della corrente: è cioè trascurabile la componente verticale dell'accelerazione e su ogni sezione trasversale alla corrente si può assumere una variazione idrostatica della pressione.

Integrando le equazioni di conservazione della massa e della quantità di moto si ottiene:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\alpha \frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial h}{\partial x} = 0$$

ed introducendo la resistenza idraulica (attrito) e le portate laterali addotte:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = q$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\alpha \frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{gQ|Q|}{C^2AR} = 0$$

dove:

- A = area della sezione bagnata (m²);
- C = coefficiente di attrito di Chezy (m^{1/2} s⁻¹);
- g = accelerazione di gravità (m s⁻²);
- h = altezza del pelo libero rispetto ad un livello di riferimento orizzontale (m);
- Q = portata (m³/s);
- R = raggio idraulico (m);
- α = coefficiente di distribuzione della quantità di moto;
- q = portata laterale addotta (m² s⁻¹).

SIMULAZIONE DELLE CORRENTI VELOCI CON L'APPROCCIO DELL'ONDA DINAMICA

Per le correnti veloci viene applicata una equazione "ridotta" del moto, ottenuta trascurando il termine non lineare:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{gQQ}{C^2AR} = 0$$

La descrizione del moto è tanto più accurata quanto meno rapidamente variabile è la velocità della corrente.

Il vantaggio di questa schematizzazione è rappresentato dal fatto che è possibile ottenere una soluzione stabile con la stessa metodologia usata per le correnti lente. Nella transizione tra corrente lenta e veloce viene applicata una riduzione graduale del termine non lineare.

APPROSSIMAZIONE DELL'ONDA DIFFUSIVA

L'approssimazione dell'"onda diffusiva" consiste nel trascurare, nelle equazioni generali di De Saint Venant, tutti i termini legati alla quantità di moto:

$$gA \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{gQQ}{C^2AR} = 0$$

Questa formulazione assicura ancora la descrizione dell'effetto di rigurgito attraverso il termine $\frac{\partial h}{\partial x}$. Per ragioni di stabilità questo termine viene smorzato; ciò significa che vengono risolti soltanto fenomeni di rigurgito relativamente stazionari (confrontati con lo step di tempo utilizzato).

DESCRIZIONE IN CORRISPONDENZA DI STRUTTURE

Dal punto di vista matematico la descrizione della corrente attraverso stramazzi o soglie e sezioni trasversali strette è abbastanza simile. Sono diversi i tipi di strutture che possono essere simulate:

Tipo 1. Stramazzo a larga soglia

Il programma automaticamente determina le caratteristiche di funzionamento standard dello stramazzo sulla base della geometria e dei coefficienti di perdita di carico specificati dall'utente. Viene assunta una distribuzione idrostatica delle pressioni sulla soglia e vengono utilizzati diversi algoritmi per la simulazione del deflusso libero e di quello rigurgitato.

Tipo 2. Relazione Q-h

Nel caso in cui le condizioni standard di funzionamento (tipo 1) dello stramazzo non risultino adeguate (ad esempio quando è evidente una significativa curvatura delle linee di corrente) è possibile specificare le relazioni Q-h (portate-livelli) valide per la data struttura. La relazione Q-h viene utilizzata per il deflusso libero in condizioni critiche, mentre per il deflusso rigurgitato (o sommerso) vengono utilizzati gli stessi algoritmi della struttura "tipo 1".

Tipo 3. Tombino

Un tombino può essere descritto mediante diversi algoritmi validi per condizioni di deflusso critico, rigurgitato o a "tubo pieno". Il funzionamento a "tubo pieno" è a sua volta suddiviso in deflusso libero a valle, flusso rigurgitato e flusso sommerso: il codice calcola in automatico una relazione Q-h che contempla tutti i casi di deflusso critico allo sbocco del tombino. La portata critica è determinata da una formulazione di stramazzo a larga soglia quando l'imbocco è libero e da una formulazione di luce sotto battente quando l'imbocco è sommerso.

Tipo 4. Relazione Q-t

E' possibile inserire una qualsiasi relazione Q-t esterna per descrivere ad esempio il deflusso da una diga o un pompaggio. Questa relazione sostituisce localmente l'equazione di conservazione della quantità di moto.

Tipo 5. Relazione $Q = A(Zj1) \cdot Zj2$

Il deflusso nell'ambito di una struttura può essere posto in relazione, in modo dinamico, a due qualsiasi variabili indipendenti del sistema consentendo di simulare regole operative particolari. Il deflusso da un invaso può per esempio essere correlato alla portata in ingresso e al livello nell'invaso (o al livello a valle di esso).

Tipo 6. Strutture mobili

E' possibile simulare la presenza di strutture mobili con condizioni di deflusso di tipo sfioro o luce sotto battente. Viene assegnata la geometria fissa della struttura (larghezza, quota del fondo per sistemi a sfioro tipo ventola, quota del livello massimo della paratoia per sistemi con luce sotto battente) ed una regola operativa che determina la quota della parte mobile della struttura in funzione di una delle seguenti condizioni idrodinamiche calcolate dal modello: un livello, una differenza di livelli, una portata, una differenza di portate, il tempo. Il modulo simula dinamicamente la variazione della geometria della struttura ed il flusso che ne consegue.

Tipo 7. Ponti

In MIKE 11 possono essere utilizzate diverse formulazioni da letteratura per il calcolo del deflusso attraverso i ponti e del conseguente effetto di rigurgito. In particolare sono implementati i modelli della FHWA (Federal Highway Administration USA, WSPRO method) e della USBPR (US Bureau of Public Roads), modelli per la simulazione della presenza delle pile (Nagler e Yarnell), modelli per il libero deflusso attraverso ponti ad arco (Biery & Delour, HR method). Tutti i precedenti metodi di calcolo possono essere integrati con il calcolo del moto in pressione e con il calcolo del sormonto della struttura (tombini e stramazzi).

RESISTENZA D'ATTRITO

MIKE 11 consente di utilizzare due diverse formulazioni della resistenza d'attrito: l'espressione di Chezy e quella di Strickler. Secondo la formula di Chezy, nell'equazione del moto il termine di resistenza risulta pari a:

$$\tau_r = \frac{gQQ}{C^2AR}$$

dove C è il coefficiente di attrito di Chezy.

Secondo la formula di Strickler, lo stesso termine diventa:

$$\tau_r = \frac{gQQ}{M^2AR^{4/3}}$$

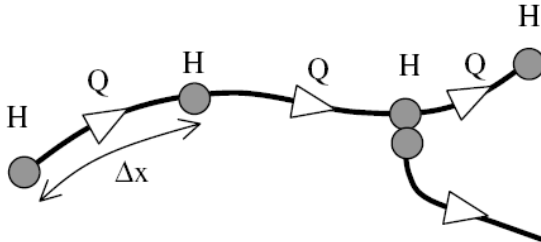
dove M è il coefficiente di Strickler, pari a $1/n$, essendo n il coefficiente di Manning.

CONDIZIONI INIZIALI

Le condizioni iniziali possono essere specificate dall'utente oppure essere calcolate automaticamente. Nel secondo caso viene usata la formula di Chezy per determinare i livelli idrici e le portate da considerare all'inizio della simulazione su tutta la rete o schema idraulico. In alternativa a queste due opzioni è possibile anche assumere come condizioni iniziali i risultati di una precedente simulazione effettuata sullo stesso schema idraulico.

METODO DI SOLUZIONE

La soluzione del sistema di equazioni è indipendente dall'approccio modellistico seguito (cinematico, diffusivo, dinamico). Le equazioni generali di De Saint Venant sono trasformate in un sistema di equazioni implicite alle differenze finite secondo una griglia di calcolo con punti Q e h alternati tra loro, nei quali la portata Q e il livello idrico h, rispettivamente, sono determinati ad ogni passo temporale (schema di Abbott a 6 punti).



La griglia di calcolo viene generata dal modello in base alle richieste dell'utente:

- i punti Q sono posizionati sempre a metà tra due punti h vicini;
- la distanza tra due punti h può essere variabile;
- ad ogni sezione trasversale d'alveo viene assegnato un punto h;
- ad ogni struttura viene assegnato un punto Q.

CONDIZIONI AL CONTORNO

In MIKE 11 le condizioni al contorno sono distinte in esterne ed interne. Le condizioni al contorno interne sono: legami tra punti nodali, strutture, portate interne. Le condizioni al contorno esterne sono: valori costanti di h e Q, valori di h e Q variabili nel tempo, relazioni tra h e Q (ad es. scala di deflusso per una sezione d'alveo).

DEFINIZIONE DEI PASSI DI CALCOLO

La scelta ottimale dei passi di calcolo Dx (spazio) e Dt (tempo) da utilizzare nell'ambito di una simulazione è molto importante perché questi parametri possono condizionare pesantemente la stabilità del calcolo numerico e quindi i risultati stessi della simulazione.

Esistono due differenti criteri per determinare correttamente i passi di calcolo Dx e Dt. Essi sono descritti nel seguito.

1) Criterio di Courant

$$Cr = \frac{\sqrt{g \cdot d + V} \cdot Dt}{Dx}$$

dove:

Cr = numero di Courant;

d = altezza d'acqua media;

V = velocità media della corrente;

g = accelerazione di gravità;

Dt, Dx = passi di calcolo.

Il numero di Courant esprime quanti Dx vengono percorsi da un'onda, causata da una piccola perturbazione, che si muove in un intervallo di tempo Dt unitario.

Per correnti lente ($Fr < 1$), il valore massimo del numero di Courant deve essere inferiore a 20.

2) Criterio della velocità.

Il criterio della velocità stabilisce che i passi Dx e Dt di calcolo siano definiti in modo tale che la corrente si muova di uno spazio Dx in un tempo maggiore di Dt, e cioè:

$$V * Dt < Dx$$

dove V è velocità media della corrente.

In definitiva entrambi i criteri esprimono il concetto che, per un dato passo di tempo Dt, Dx deve essere maggiore di un valore definito; contemporaneamente sia Dt che Dx devono essere inferiori a valori prestabiliti, in modo da descrivere correttamente il fenomeno in esame.

Il modello DHI/MIKE 11 genera automaticamente una griglia di calcolo sulla quale i nodi che rappresentano le altezze d'acqua sono localizzati in corrispondenza delle sezioni trasversali di rilievo. Nel caso in cui la distanza tra due sezioni sia maggiore di Dx, vengono inseriti ulteriori nodi intermedi di calcolo, distanti fra loro Dx o meno.

MODULO TRASPORTO SEDIMENTI (ST)

Il modulo ST simula il trasporto, erosione e deposizione di sedimenti non-coesivi (sabbia, ghiaia, sassi). Sono incluse molteplici formulazioni relative al trasporto di fondo ed in sospensione.

Il modulo ST può essere applicato in due modalità: "esplicita" o a fondo fisso per la valutazione della capacità di trasporto solido della corrente e "morfologica", in combinazione con il modulo HD, per la determinazione della variazione della geometria delle sezioni d'alveo indotta dal trasporto solido ad ogni passo di calcolo della simulazione idrodinamica.

Nella modalità esplicita, i calcoli sul trasporto solido si basano sui risultati provenienti da una simulazione idrodinamica o da una simulazione che gira in parallelo al modulo ST. Il trasporto di sedimenti è chiaramente funzione dei valori assunti dai parametri idrodinamici (portata, livelli, velocità, ecc...).

I risultati sono espressi in termini di volume trasportato e volume accumulato per deposizione o erosione. Questa modalità di calcolo va adottata, se il corso d'acqua subisce difficilmente delle trasformazioni morfologiche significative. Inoltre, il modulo permette, in termini di tempi di calcolo, una stima veloce del bilancio di sedimenti.

I calcoli del trasporto solido effettuati nella modalità morfologica sono realizzati in parallelo con i calcoli idrodinamici. Il trasporto dei sedimenti è calcolato spazialmente e temporalmente come funzione esplicita dei corrispondenti valori dei parametri idrodinamici.

Il modulo ST risolve l'equazione di continuità dei sedimenti e determina la resistenza al fondo, il tasso di trasporto, le variazioni dell'alveo inciso e le dimensioni delle dune (in funzione della formulazione adottata). I cambiamenti dei coefficienti di scabrezza e della geometria della sezione incisa, dovuta al trasporto dei sedimenti, vengono successivamente inclusi nel calcolo idrodinamico. La modalità di simulazione morfologica richiede tempi di calcolo molto più lunghi rispetto al modo esplicito, ma rappresenta meglio i processi morfodinamici a cui è sottoposto un corso d'acqua.

FORMULE DEL TRASPORTO SOLIDO

Sono disponibili molte formule per il calcolo del trasporto solido. Alcune calcolano il totale dei sedimenti trasportati mentre altre distinguono tra trasporto al fondo e in sospensione. Di seguito viene riportato l'elenco delle principali formule disponibili:

- Engelund-Hansen (carico totale);
- Ackers-White (carico totale);
- Smart-Jaeggi (carico totale);
- Engelund-Fredsøe (trasporto al fondo e in sospensione);
- Van Rijn (trasporto al fondo e in sospensione);
- Meyer Peter e Muller (trasporto di fondo);
- Sato, Kikkawa e Ashida (trasporto di fondo);
- Ashida e Michiue Model (trasporto al fondo e in sospensione);
- Lane-Kalinske (trasporto in sospensione);
- Yang - sabbia e ghiaia (carico totale).

Tutti i modelli di trasporto possono essere utilizzati sia in modalità esplicita che morfologica. Il trasporto solido dipende in modo non lineare della velocità della corrente e varia in funzione della formulazione scelta. Particolare attenzione deve essere tenuta nella determinazione delle condizioni iniziali e del passo di calcolo scelto al fine di evitare problemi di instabilità.

Si riporta di seguito una breve descrizione delle formule più utilizzate.

Formulazione di Smart-Jaeggi

L'equazione permette il calcolo del trasporto solido di materiale grossolano in fiumi o canali ad elevata pendenza. La formula è basata sull'equazione originale di Meyer-Peter Müller, derivata da esperimenti di laboratorio con sedimenti non uniformi di varia pezzatura e una pendenza del fondo alveo compresa tra 0,04% e 2,0%. Si è osservato che l'equazione originale di Meyer-Peter Müller tende a sottostimare la quantità di trasporto solido per pendenze di fondo maggiori del 3%, per cui Smart e Jaeggi hanno proposto una modifica all'equazione originale basandosi ancora su prove di laboratorio e considerando sia il parametro di Shields in funzione della pendenza, sia la non uniformità dei sedimenti.

$$\Phi = 4 [(d_{90} / d_{30}) 0.2 \mid 0.6 C \theta 0.5(\theta - \theta_{cr})] \quad (1)$$

dove:

- d₉₀ : diametro caratteristico corrispondente al passante al 90% in peso del sedimento;
- d₃₀ : diametro caratteristico corrispondente al passante al 30% in peso del sedimento;
- I : pendenza della superficie libera o del fondo;
- C : coefficiente di scabrezza di Chezy;
- θ : tensione tangenziale al fondo (adimensionale);
- θ_{cr} : parametro di Shields corretto in funzione della pendenza del fondo.

Formulazione di Engelund-Hansen

La formula di Engelund-Hansen per il calcolo del trasporto solido deriva da considerazioni sull'effetto che la corrente induce sul materiale di fondo in movimento. Sebbene la formula sia stata derivata per un fondo alveo caratterizzato dalla presenza di dune, si è osservata la possibilità di applicazione anche in presenza di condizioni di deflusso in regime superiore (letto piano o anti-dune).

L'equazione di Engelund-Hansen è la seguente:

$$\Phi = 0,1 \cdot \theta^{5/2} / f \quad (2)$$

$$\Phi = qt / [(s-1) g d^3]^{0,5} \quad (3)$$

$$f = 2(uf^2 / u^2) \quad (4)$$

dove:

- Φ : tensione tangenziale al fondo adimensionale;
- θ : portata solida adimensionale;
- s : peso specifico relativo del sedimento = $(\rho_s - \rho) / \rho$;
- d : diametro caratteristico del sedimento;
- g : accelerazione di gravità;
- qt : trasporto solido al fondo totale per unità di larghezza;
- f : fattore di attrito;
- uf, u : rispettivamente velocità di attrito e velocità

Formulazione di Engelund-Fredsøe

L'equazione di Engelund-Fredsøe per il calcolo del trasporto solido permette una dettagliata descrizione del fenomeno e le sue interazioni con la resistenza idraulica. Il trasporto solido totale è suddiviso in trasporto solido al fondo e trasporto solido in sospensione: la portata solida è calcolata a partire dalla "skin friction", cioè la tensione tangenziale che agisce sulla superficie delle dune.

Il trasporto in sospensione Q_s è calcolato come integrale della velocità della corrente u e della concentrazione del sedimento in sospensione c :

$$Q_s = a^D \int c u dy \quad (5)$$

dove:

- a : spessore dello strato di fondo ($a \approx 2d$ dove d è il diametro dei granuli);
- D: altezza d'acqua della corrente.

Combinando le equazioni della velocità delle particelle in movimento e la probabilità che hanno tali particelle di muoversi, Engelund e Fredsøe hanno definito la seguente equazione per il calcolo del trasporto solido al fondo (6):

$$\Phi_b = 5 (1 + [\beta \cdot \pi/6 / (\theta' - \theta_c)]^4) \cdot (\theta'^{0,5} - 0,7 \cdot \theta_c^{0,5}) \quad (6)$$

$$\Phi_b = Q_b / [(s-1) g d^3]^{0,5} \quad (7)$$

dove:

- Φ_b : trasporto solido al fondo adimensionale;
- Q_b : portata solida adimensionale;
- s : peso specifico relativo del sedimento = $(\gamma_s - \gamma) / \gamma$;
- d : diametro caratteristico del sedimento;
- g : accelerazione di gravità;
- β : coefficiente di attrito dinamico;
- θ' : attrito superficiale adimensionale;
- θ_c : parametro di Shields.

L'output che si ottiene dal modello applicando una simulazione morfologica è il valore di trasporto solido totale e la variazione delle quote di fondo durante il periodo di simulazione in tutti i punti di calcolo del modello. Inoltre la formula di Engelund-Fredsøe calcola il trasporto solido totale suddiviso in trasporto solido in sospensione e trasporto solido al fondo, per cui è possibile ottenere come risultato del modello entrambi i valori in tutti i punti di calcolo.

CARATTERISTICHE DEI SEDIMENTI

In ST la dimensione del materiale solido viene espressa tramite il diametro medio d_{50} in ogni punto della griglia di calcolo. In aggiunta è necessario definire la deviazione standard (σ) della dimensione della dimensione del sedimento. Questi parametri possono essere assunti costanti o variabili lungo tutto il tratto di corso d'acqua analizzato.

Altre caratteristiche dei sedimenti, che possono essere inseriti in ST sono:

- densità relativa: $s = \gamma_s / \gamma$, (dove γ è il peso specifico dell'acqua (≈ 1.0) e γ_s della sabbia ($\approx 2,65$));
- porosità: $\varepsilon = n / (n-1)$, dove n rappresenta il vuoto di una unità di volume (particelle sferiche $\approx 0,35$);
- forzo di taglio critico: $\theta_c (\approx 0,05)$.

EQUAZIONE DI CONTINUITÀ DEI SEDIMENTI

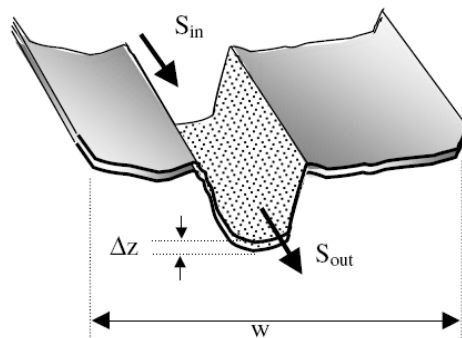
L'equazione di Exner viene risolta per capire come evolve l'alveo inciso del fiume, in funzione del materiale trasportato:

$$\frac{\partial S}{\partial x} + (1 - \varepsilon)w \cdot \frac{\partial z}{\partial t} = 0$$

dove:

- S : portata di sedimento (m^3/s);
 x : coordinata longitudinale;
 ε : porosità;
 z : quota del fondo alveo;
 t : tempo;
 w : larghezza della sezione trasversale.

La soluzione dell'equazione di continuità richiede una condizione di monte, che può essere rappresentata sia da una portata solida ($S_{upstream}$) o dalla quota dell' alveo a monte ($Z_{upstream}$). E' possibile specificare come condizione al contorno di monte anche la variazione della quota di fondo in funzione del tempo.

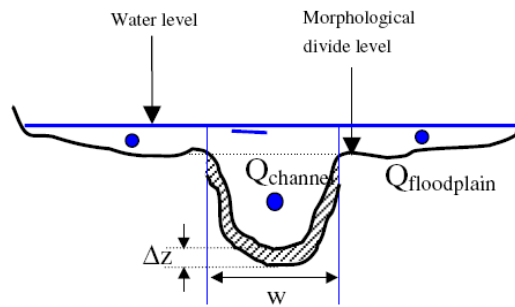


Cambiamento della quota di fondo alveo

CAMBIAMENTI NELLE SEZIONI COMPOSTE

Nelle sezioni composte può essere fatta una distinzione tra alveo inciso e zone golenali. Ciò ha due conseguenze:

- la larghezza (w) si riferisce solo alla larghezza dell'alveo principale;
- il trasporto dei sedimenti (S) viene calcolato solo in funzione della portata transitante nell'alveo principale.



Calcolo del trasporto solido nelle sezioni composte

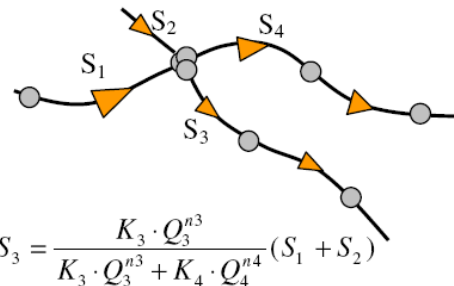
Oltre alla geometria impostata nel database delle sezioni trasversali, i diversi coefficienti di scabrezza separano la parte di alveo inciso dalla zona golenale, determinando una diversa capacità di trasporto.

Inoltre, possono essere specificati diversi metodi di variazione dell'area disponibile per il trasporto ($\Delta z \cdot w$):

1. Δz può essere costante per tutta la larghezza della sezione;
2. Δz può variare in funzione del tirante;
3. la deposizione del materiale può essere distribuita in layer orizzontali.

TRASPORTO SOLIDO NELLE RETI DI CANALI

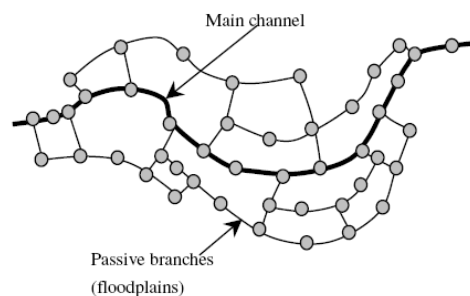
In un modello monodimensionale non si può prevedere la suddivisione del trasporto dei sedimenti in una zona di confluenza tra due corpi idrici. La distribuzione della portata solida in un nodo può essere associata alla distribuzione di portata:



dove:

- S : portata di sedimento;
 Q : portata fluviale;
 K ed n : coefficienti di calibrazione.

Inoltre, è possibile definire “passive branches” all’interno della rete di canali simulati. Il calcolo del trasporto solido e la variazione delle quote di fondo è inattiva su questi rami. Questa funzione è generalmente applicata quando siamo in presenza di un rea golenale in cui si ipotizza non avvenga trasporto solido.



Schema dei "passive branches"

TRASPORTO SOLIDO IN ALVEI ALLUVIONALI

Il calcolo delle resistenze al moto della corrente e quindi del trasporto solido, risulta più complesso nel caso di alvei alluvionali, rispetto a quanto accade per gli alvei incisi. Questo perché la resistenza idraulica, degli alvei alluvionali è condizionata dalle forme di fondo (dune, ripples, ecc...) che spesso si vengono a creare a causa dei fenomeni di trasporto solido.

Esistono diversi modelli per calcolare e aggiornare le resistenze al fondo nel corso della simulazione. Ciò è importante quando, a causa della comparsa delle forme di fondo, la resistenza al moto cambia in maniera significativa rispetto al suo valore iniziale. Si potrebbero per esempio, sviluppare dune che poi scompaiono a seguito di un evento alluvionale intenso. In questi casi possono essere applicati dei modelli di formazione e sviluppo delle forme di fondo tipo quello proposto da Engelund-Fredsøe.

INPUT

Per riassumere, i parametri di input al modello ST sono:

- granulometria (d_{50}) e deviazione standard;
- densità e la porosità dei sedimenti;
- formula di trasporto;
- condizioni al contorno a monte (solo in modalità morfologica): tasso trasporto dei sedimenti, quota fondo alveo fissa o variabile nel tempo.

OUTPUT

I risultati principali sono:

- tasso di trasporto solido (m^3/s);
- accumulated sediment transport;
- quote fondo alveo (modalità morfologica);
- resistenza al fondo (opzionale);
- dimensioni dune (opzionale).





ALLEGATO D
MIKE 21 HD
Descrizione tecnica

PREMESSA

Il MIKE 21 è un programma modulare contenente diversi codici per la simulazione di corpi idrici per i quali sia possibile adottare l'approssimazione idrodinamica bidimensionale, piana, per fluidi verticalmente omogenei. Infatti, il numero "21" che contraddistingue il codice indica proprio la bidimensionalità nel piano ("2") e la monodimensionalità lungo la verticale ("1").

Il sistema modellistico è stato sviluppato per la simulazione delle correnti a pelo libero e dei fenomeni correlati all'idraulica in fiumi, laghi o invasi, così come in ambito costiero e offshore. I principali campi di applicazione sono:

- modellazione idrodinamica del trasporto solido e della qualità delle acque in fiumi;
- laghi ed aree golenali;
- studio del moto ondoso in aree costiere, bacini portuali ed offshore;
- analisi idrodinamica del trasporto solido e morfologica in aree costiere;
- analisi della qualità delle acque al largo e sottocosta;
- supporto alla pianificazione e progettazione di opere costiere ed offshore;
- supporto alla pianificazione e progettazione di opere di difesa fluviale;
- supporto all'ottimizzazione di layout portuali;
- analisi impatto ambientale;
- previsione degli stati di mare a supporto della navigazione;
- analisi di allagamenti in aree costiere e fenomeni di storm surge.

In generale il MIKE 21 offre un ambiente di lavoro completo, efficace e robusto a supporto dell'ingegneria e della pianificazione e gestione territoriale a diverse scale spaziali. La combinazione di un'interfaccia grafica avanzata con un motore di calcolo robusto ed affidabile, frutto di un pluriennale e continuo sviluppo da parte del DHI, rende questo software lo strumento più utilizzato ed efficace per l'ingegneria fluviale e marittima in tutto il mondo.



Il pacchetto MIKE 21 è disponibile in 4 versioni che si differenziano in base alla schematizzazione geometrica adottata:

- CLASSIC GRID (Griglia classica singola): le equazioni di continuità e del moto sono risolte con una tecnica implicita alle differenze finite su una griglia rettangolare, uniforme in tutto il dominio di calcolo;
- MULTIPLE GRID (Griglia multipla): questo schema utilizza lo stesso approccio della griglia singola, con la possibilità di innestare nel dominio griglie a risoluzione crescente nelle aree ove sia richiesto un maggiore dettaglio;
- FLEXIBLE MESH (Griglia flessibile): questo schema utilizza un metodo ai volumi finiti per la discretizzazione delle equazioni di flusso e trasporto con valori centrati sul singolo elemento. Il dominio di calcolo è discretizzato nelle dimensioni orizzontali attraverso una maglia non strutturata. La griglia non strutturata garantisce il massimo della flessibilità nella rappresentazione di geometrie complesse, in particolare per domini di calcolo estesi in cui sia necessario adottare una risoluzione spaziale variabile;
- CURVILINEAR (Griglia curvilinea): è la griglia adottata da MIKE 21C, codice di calcolo studiato appositamente per applicazioni di morfologia fluviale.

In campo fluviale MIKE 21 può essere utilizzato in modo integrato con altri codici di calcolo del DHI, in particolare:

- MIKE 11, grazie al modulo MIKE FLOOD, che consente di condurre simulazioni idrodinamiche accoppiando gli approcci 1d e 2d in modo totalmente integrato;
- MIKE URBAN CS per la simulazione di allagamenti in ambito urbano dalla rete di drenaggio.

In campo marittimo e costiero, dove risulta più efficace l' utilizzo della versione FM, il MIKE 21 consente di studiare in modo integrato il moto ondoso (moduli SW, PMS, NSW, BW, EMS), le correnti e le variazioni di livello superficiale (HD), il trasporto solido e la morfologia di sedimenti non coesivi e coesivi (ST, MT), la dispersione di soluti (AD/TR).

L'utilizzo di formati comuni a tutti i codici del mondo MIKE garantisce la possibilità di utilizzare i file di MIKE 21 anche in input ad altri modelli quali LITPACK e MIKE 3.

Infine, attraverso l'utilizzo di EcoLab, MIKE 21 consente di studiare anche i processi più complessi in termini di qualità delle acque, in presenza di composti e reagenti.

Di seguito si descrive il modulo MIKE 21 HD Classical Grid.

Modulo Idrodinamico (HD)

Il modulo idrodinamico (HD), cuore del codice MIKE 21, simula le variazioni di livello e corrente in risposta alle differenti tipologie di forzanti considerate, potendo essere utilizzato da solo o come base per i calcoli effettuati dagli altri moduli disponibili. In particolare, il modulo HD di MIKE 21 permette di tenere in considerazione i seguenti fenomeni:

- flooding and drying;
- perdite di carico;
- attrito al fondo;
- forza di Coriolis;
- effetto del vento;
- gradienti di pressione barometrica;
- coperture di ghiaccio;
- effetto delle maree;
- precipitazioni/Evaporazioni;
- radiation stresses;
- pozzi e sorgenti.

Come menzionato in precedenza, i risultati di una simulazione MIKE 21 HD possono essere usati come input per la simulazione di fenomeni fisici strettamente dipendenti dagli aspetti idrodinamici:

- trasporto di sostanze disciolte/sospese in acqua, modulo AD e modulo "Mud Transport";
- trasporto solido di materiale non coesivo, modulo ST;
- qualità delle acque ed idroecologia, modulo ECO Lab.

Infine, per quanto riguarda le analisi dei fenomeni di esondazione, MIKE 21 può essere accoppiato in modo dinamico attraverso l'interfaccia MIKE FLOOD al codice monodimensionale MIKE 11, per la simulazione degli alvei e dei canali, ed al codice MIKE URBAN, per la

simulazione delle reti di drenaggio e collettamento urbano, schematizzando il dominio di calcolo in modo integrato 1D/2D.

Il modulo idrodinamico HD del Mike 21 risolve le equazioni complete del moto di De St.Venant in un caso bidimensionale piano (la terza dimensione - asse z - è implicitamente integrata nelle equazioni considerando un mezzo verticalmente omogeneo), non stazionario. Il sistema delle equazioni di De St.Venant è costituito dalle seguenti equazioni.

Equazione di conservazione della massa:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} = 0$$

Equazione di conservazione della quantità di moto lungo x:

$$\begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{p^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{gp\sqrt{p^2+q^2}}{C^2 h^2} - \frac{1}{\rho_w} \left[\frac{\partial}{\partial x} (h\tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (h\tau_{yy}) \right] - \Omega q - fVV_x \\ + \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial x} p_a + \frac{1}{\rho_w} \left(\frac{\partial \mathcal{S}_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \mathcal{S}_{xy}}{\partial y} \right) = 0 \end{aligned}$$

Equazione di conservazione della quantità di moto lungo y:

$$\begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{gq\sqrt{p^2+q^2}}{C^2 h^2} - \frac{1}{\rho_w} \left[\frac{\partial}{\partial y} (h\tau_{yy}) + \frac{\partial}{\partial x} (h\tau_{xy}) \right] - \Omega p - fVV_y \\ + \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial y} p_a + \frac{1}{\rho_w} \left(\frac{\partial \mathcal{S}_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \mathcal{S}_{xy}}{\partial x} \right) = 0 \end{aligned}$$

nelle quali:

$h(x,y,t)$ = profondità dell'acqua;

$\zeta(x,y,t)$ = quota del pelo libero;

$p,q(x,y,t)$ = portate unitarie nelle direzioni x e y;

$C(x,y)$ = coefficiente di scabrezza di Chezy;

G = accelerazione di gravità;

$f(V)$ = fattore d'attrito del vento;

$V, V_x, V_y(x,y,t)$ = velocità del vento e componenti lungo le direzioni x e y;

$\Omega(x,y)$ = parametro di Coriolis;

$p_a(x,y,t)$ = pressione atmosferica;

ρ_w = densità dell'acqua;

x, y = coordinate spaziali;

t = tempo;

$\tau_{xx}, \tau_{xy}, \tau_{yy}$ = componenti dello sforzo di taglio che tengono conto della turbolenza e del profilo verticale delle velocità;

S_{xx}, S_{xy}, S_{yy} = componenti del radiation stress (nel caso la forzante idrodinamica derivi dall'interazione tra il moto ondoso ed il fondo).

Il termine di turbolenza è rappresentato dagli sforzi di taglio τ che compaiono nelle equazioni di conservazione della quantità di moto lungo le direzioni x e y . La formulazione utilizzata prende in considerazione il parametro E "eddy viscosity" che è implementato secondo due modalità:

1. dipendente dal flusso locale:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(E \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(E \frac{\partial p}{\partial y} \right) \quad (\text{nella direzione } x);$$

2. oppure dipendente dalla velocità locale:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(h E \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(h E \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (\text{nella direzione } x);$$

Le due equazioni rappresentano il termine di sforzo di taglio nelle equazioni di conservazione della quantità di moto. Il coefficiente E può essere specificato come costante su tutta la griglia, variabile da punto a punto, o come funzione del campo di velocità locale secondo la formulazione di Smagorinski:

$$E = c_s^2 \Delta^2 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right]$$

nella quale u e v sono le componenti della velocità locale, Δ è la dimensione spaziale della griglia e c_s è una costante compresa tra 0,25 e 1.

In questo caso il termine di sforzo di taglio nelle equazioni di conservazione della quantità di moto (asse x) è dato da:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(h E \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{2} h E \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right)$$

La portata entrante nell'area di calcolo viene assegnata come portata unitaria ($m^3/s/m$) lungo la frontiera libera dalla quale entra il flusso: viene assegnata al modello la portata complessiva (m^3/s) che viene poi ripartita automaticamente sui punti di calcolo della griglia.

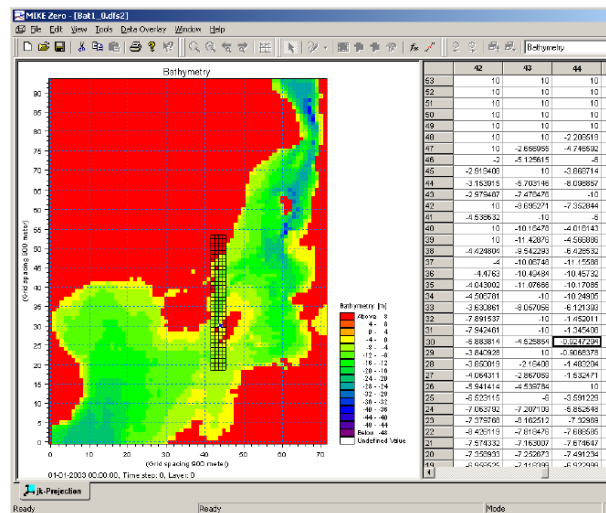
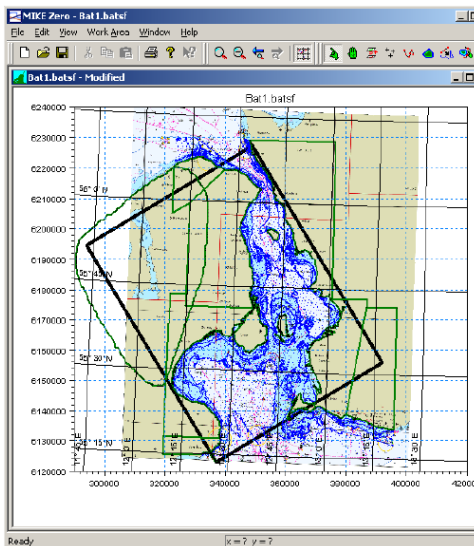
La condizione iniziale è rappresentata da una situazione di "quiete", nel senso che tutte le componenti delle forzanti sono nulle (portate, velocità, livelli) e variano poi linearmente nel tempo fino a raggiungere il valore assegnato in un tempo prefissato. Questa tecnica, detta del "soft start" consente di eliminare eventuali brusche oscillazioni iniziali della soluzione che

potrebbero presentarsi per problemi di stabilità numerica. Al termine del "soft start" la situazione ottenuta è di effettiva stazionarietà.

Le equazioni di continuità del moto sono risolte con una tecnica implicita alle differenze finite su una griglia rettangolare, uniforme su tutto il dominio di calcolo, costituita da celle di dimensioni tali da poter descrivere in maniera sufficientemente corretta le variazioni plano-altimetriche della batimetria.

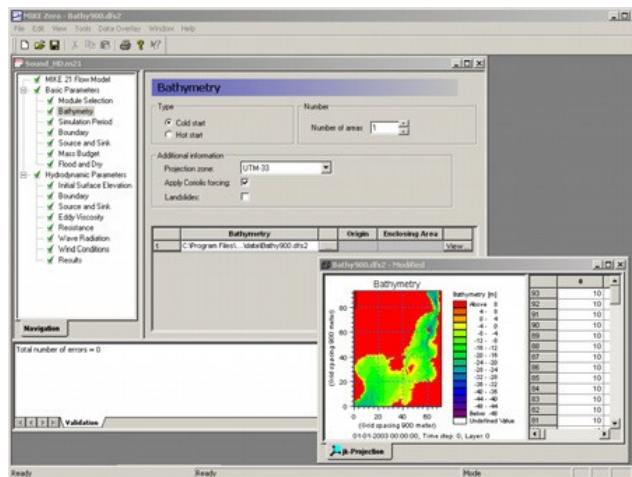
Il medesimo approccio della griglia singola viene utilizzato anche nella versione "griglia multipla-nested grid", che permette di innestare nel dominio di calcolo griglie a risoluzione crescente nelle aree ove sia richiesto un maggiore dettaglio.

Le equazioni della conservazione della massa e della quantità di moto sono risolte alle differenze finite utilizzando il metodo ADI (Alternating Direction Implicit). Il sistema di equazioni linearizzate che scaturisce dall' algoritmo è risolto con il metodo DS (Double Sweep, Abbott, 1979).



Il modello MIKE 21 HD necessita di una serie di dati di input che si possono raggruppare in differenti categorie, ovvero:

- parametri temporali e del dominio (risoluzione della griglia di calcolo, time step, durata simulazione);
- fattori di calibrazione (bed resistance, viscosità turbolenta);
- condizioni iniziali (livelli e campi di corrente);
- condizioni al contorno (livelli, portate);
- altre forzanti (campi di vento, radiation stresses, sorgenti o pozzi).



I risultati di un'applicazione modellistica bidimensionale possono essere rappresentati con i molteplici strumenti di visualizzazione statica e dinamica a corredo dello strumento modellistico utilizzato. Gli strumenti di post processing consentono di creare animazione 2D da esportare ed utilizzare in ambiente di lavoro esterno alla piattaforma modellistica utilizzata per il calcolo numerico.

L'utilizzo di un approccio di tipo bidimensionale, permette di indagare non solo l'intensità del fenomeno ma anche direzione e verso del vettore velocità in ogni cella della matrice. Ad esempio per ognuno degli elementi della griglia, sono rappresentati le variazioni temporali delle seguenti variabili:

- profondità e livelli idrici;
- flussi di corrente nelle direzioni principali;
- velocità di corrente e direzione.

