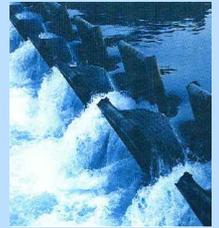




CONSORZIO DEL TICINO

TRAVERSA DELLA MIORINA
COMUNE DI CASTELLETTO SOPRA TICINO (NO)



LAVORI DI MANUTENZIONE STRAORDINARIA PER IL
RIPRISTINO DELLA CAPACITA' D'INVASO DI RITENUTA

INTERVENTO SU CAMPATE 3 E 4 IN SPONDA DESTRA TICINO

PROGETTO ESECUTIVO

RELAZIONE IDROLOGICA ED IDRAULICA



PROGETTAZIONE, COORDINAMENTO DELLE
ATTIVITÀ SPECIALISTICHE, STRUTTURE
PROVVISIONALI E CANTIERIZZAZIONE

MAJONE & PARTNERS
ENGINEERING

DOTT. ING. DENIS CERLINI
DOTT. ING. NICOLA PESSARELLI
DOTT. ING. BEATRICE MAJONE

RESPONSABILE UNICO DEL PROCEDIMENTO:
DORIANA BELLANI

CARPENTERIE



DOTT. ING. STEFANO BARBARESÌ
DOTT. ING. FRANCESCO BARBARESÌ

VIA DEL MONACO, 3 - 61121 PESARO (PU)
TEL. 0721403695 - FAX 072140895
EMAIL: bbprogetti.barbaresi@gmail.com
P.I. 02304940410

COORDINAMENTO PER LA SICUREZZA

STUDIO DI ARCHITETTURA ED INGEGNERIA

M I C R O N

DOTT. ING. MASSIMO MARSILI
via Brescia n.2 - 20063 Cernusco sul Naviglio (MI)
Tel. 335.67.63.018
E-Mail: massimo.marsili@studiomicron.it

ASPETTI IDRAULICI PAESAGGISTICI E AMBIENTALI



DOTT. ING. MASSIMO SARTORELLI

DATA: MAG 2021	REV.1	LUGLIO 2021
	REV.2	
	REV.3	

SCALA:	
FILE:	

TAVOLA:	RID 02
---------	---------------

INDICE

1. PREMESSA.....	3
2. STRUTTURA DEL RAPPORTO.....	4
3. IL MODELLO DI CALCOLO PER LA SIMULAZIONE DEI LIVELLI.....	5
3.1 SCALE DI DEFLUSSO.....	5
3.1.1 <i>Scala di deflusso in regime libero - sezione completa (condizioni normali)</i>	5
3.1.2 <i>Scala di deflusso in regime libero con sezione parzializzata (fase di cantiere)</i>	6
3.1.3 <i>Scala di deflusso in regime regolato</i>	6
3.2 CURVA DI INVASO	7
3.3 CALCOLO DEGLI AFFLUSSI	10
3.3.1 <i>Metodo indiretto</i>	10
3.4 ALTEZZA IDROMETRICA NELLE ALTRE STAZIONI DI RIFERIMENTO	11
3.5 DURATA DELLE MANOVRE SULLO SBARRAMENTO DELLA MIORINA	12
4. IL REGIME IDRAULICO DELL'INCILE DEL LAGO MAGGIORE DURANTE IL CANTIERE	14
4.1 MODELLAZIONE IDRAULICA DELL'INCILE	14
4.2 ASPETTI TEORICI DEL MODELLO IDRAULICO.....	15
4.2.1 <i>Programma utilizzato</i>	15
4.2.2 <i>Regimi di flusso</i>	15
4.2.3 <i>Equazioni di base utilizzate per il calcolo del profilo</i>	16
4.2.4 <i>Passaggio dall'altezza critica</i>	17
4.2.5 <i>Applicazione dell'equazione del momento (Momentum Equation)</i>	18
4.3 COSTRUZIONE DEL MODELLO IDRAULICO	18
4.3.1 <i>Schema idraulico e geometria delle sezioni trasversali</i>	18
4.3.2 <i>Immissione dati relativi al moto permanente: regimi di flusso e condizioni al contorno</i>	20
4.3.3 <i>Calibrazione del modello idraulico</i>	22
4.4 SIMULAZIONI IN REGIME DI MOTO PERMANENTE	28
4.5 LIMITI DELLA MODELLAZIONE IDRAULICA	32
4.6 LE SCALE DI DEFLUSSO DEL LAGO MAGGIORE IN FASE DI CANTIERE	33
5. EFFETTI DEL CANTIERE SUL REGIME IDRAULICO DEL LAGO MAGGIORE E DEL FIUME TICINO.....	37
5.1 RIDUZIONE DELLA CAPACITÀ DI SCARICO DEL LAGO MAGGIORE	37

5.2	SIMULAZIONE DELL'ANDAMENTO DEI PARAMETRI IDROMETRICI SU ALCUNI EVENTI DI PIENA STORICI	42
5.2.1	Ottobre 2000	45
5.2.2	Ottobre 1993	46
5.2.3	Novembre 2014	47
5.2.4	Ottobre 1977	48
5.2.5	Novembre 2002	49
5.2.6	Novembre 1996	50
5.2.7	Novembre 2004	51
5.2.8	Ottobre 1988	52
5.2.9	Novembre 2018	53
5.2.10	Ottobre 1987	54
5.2.11	Novembre 2008	55
5.2.12	Novembre 1994	56
5.2.13	Settembre 1999	57
5.2.14	Ottobre 2019	58
5.2.15	Settembre 1982	59
5.2.16	Settembre 2008	60
5.3	ANALISI DEI RISULTATI	61
6.	EFFETTI DEL CANTIERE SU SCALA LOCALE	65
6.1	VARIAZIONI DEL REGIME IDRAULICO A MONTE DELLO SBARRAMENTO DELLA MIORINA	65
6.2	VERIFICA DELLA QUOTA DI PROTEZIONE DEL CANTIERE E GESTIONE DEL CANTIERE IN CASO DI PIENA	69
7.	CONCLUSIONI	70
7.1	EFFETTI DEL CANTIERE SUL REGIME IDRAULICO DEL LAGO MAGGIORE	70
7.2	EFFETTI DEL CANTIERE SUL REGIME IDRAULICO DEL FIUME TICINO	72
7.3	EFFETTI SU SCALA LOCALE E CRITERI DI GESTIONE PROPOSTI	72

1. **PREMESSA**

Il presente documento costituisce la relazione idrologica e idraulica del progetto esecutivo relativo agli interventi di manutenzione straordinaria per il ripristino della capacità di invaso e ritenuta della traversa della Miorina.

Una descrizione generale dell'intervento in progetto, delle varie fasi operative e della programmazione temporale del cantiere è riportata nella relazione generale di progetto. Gli aspetti relativi alle specifiche tecniche delle nuove portine di regolazione e all'organizzazione del cantiere sono trattati nelle singole relazioni specialistiche e negli elaborati grafici che fanno parte del progetto.

Questo rapporto costituisce un aggiornamento della relazione idrologica e idraulica già predisposta in fase di progettazione definitiva. La relazione è stata aggiornata nei seguenti punti principali:

1. sono state recepite le prescrizioni e le osservazioni del CTA del Provveditorato alle OO.PP. di Milano e della Direzione Generale per le Dighe del Ministero Infrastrutture espresse sul progetto definitivo;
2. sono state incluse nelle simulazioni anche le piene di novembre 2018 e ottobre 2019, in quanto eventi recenti e quindi con maggior probabilità di essere simili a possibili eventi che potrebbero occorrere durante il cantiere;
3. sono state recepite le nuove quote di posa delle palancole e di protezione del cantiere.

Scopo della presente relazione è di descrivere i risultati, le ipotesi di base e le metodologie di calcolo relativi alla previsione degli effetti del cantiere sul regime idraulico del Lago Maggiore e del Fiume Ticino. Le elaborazioni svolte sono poi state utilizzate anche per la stesura del piano di Piano di monitoraggio idrologico e di allertamento, parte integrante del progetto esecutivo all'interno del quale viene descritto come gestire il cantiere in caso di eventi di piena.

2. STRUTTURA DEL RAPPORTO

Nel Capitolo 3 viene descritto il modello di calcolo messo a punto tra il 2015 e il 2016 nell'ambito della sperimentazione della regolazione estiva dei livelli del Lago Maggiore, attualmente utilizzato dal Consorzio del Ticino sia per la previsione in tempo reale dell'andamento dei livelli del lago, sia per effettuare analisi ex post e simulazioni su eventi storici. In questa sede il modello, opportunamente adattato, viene utilizzato per simulare come la parzializzazione della sezione di deflusso in corrispondenza della traversa della Miorina vada ad alterare il regime idraulico del sistema lago-fiume in caso di eventi di piena (Capitolo 5)

Nel Capitolo 4 è invece riportata una descrizione della modellazione idraulica del tratto compreso la sezione terminale del lago (Sesto Calende, località Lisanza) e lo sbarramento di Porto della Torre. La modellazione, finalizzata a predisporre delle scale di deflusso in grado di rappresentare la relazione analitica tra livelli idrometrici del lago e portate scaricate durante il cantiere, è stata effettuata sulla base di sezioni rilevate nel maggio del 1990 e già utilizzate nel 1995 per la modellazione di questo tratto fluviale.

Nel Capitolo 5 vengono riportati i risultati delle elaborazioni e delle simulazioni svolte avvalendosi degli strumenti di calcolo descritti nei precedenti due capitoli. Sono state effettuate sia delle valutazioni di tipo "statico", illustrando come variano i parametri idraulici di interesse nelle varie configurazioni prese in esame, sia delle simulazioni dinamiche, andando a simulare cosa sarebbe successo se eventi storici particolarmente significativi si fossero verificati durante le lavorazioni previste dal progetto.

Nel Capitolo 6, sempre sulla base dei risultati del modello idraulico, è illustrata un'analisi di dettaglio su come il cantiere modifica il regime idraulico del sistema lago-fiume nel tratto compreso tra l'idrometro di Sesto Calende e lo sbarramento della Miorina.

Nel Capitolo 7 sono infine riportati in forma sintetica i risultati delle analisi illustrate nei capitoli precedenti, ricavandone una valutazione complessiva sugli effetti indotti dal cantiere sul regime idraulico del Lago Maggiore e del Fiume Ticino.

3. IL MODELLO DI CALCOLO PER LA SIMULAZIONE DEI LIVELLI

In questo capitolo sono descritte le metodologie adottate e le ipotesi che stanno alla base del modello di calcolo utilizzato nell'ambito della sperimentazione della regolazione estiva del Lago Maggiore.

La descrizione proposta è in linea di massima limitata alle ipotesi di base e alla struttura delle funzioni di calcolo; si rimanda ai singoli rapporti tecnici specifici prodotti nell'ambito della sperimentazione.

Le funzioni di seguito proposte sono quelle utilizzate dal modello di calcolo nella versione 2.0, stabilmente operativa dal 12 novembre 2016.

3.1 Scale di deflusso

3.1.1 Scala di deflusso in regime libero - sezione completa (condizioni normali)

La **scala di deflusso relativa alle condizioni di regime libero** è funzione del solo livello idrometrico rilevato (o previsto) dall'idrometro di Sesto Calende ed è definita dalla seguente equazione:

$$Q = 72.02 (H_{Sc} + 1.92)^{1.98}$$

dove:

Q portata erogata allo sbarramento della Miorina (sbarramento completamente abbattuto) [m³/s]

H_{Sc} livello idrometrico a Sesto Calende [m]

In Figura 1 è rappresentato graficamente l'andamento della funzione ottenuta, confrontata con la scala elaborata dal Servizio Idrografico nel 1968.

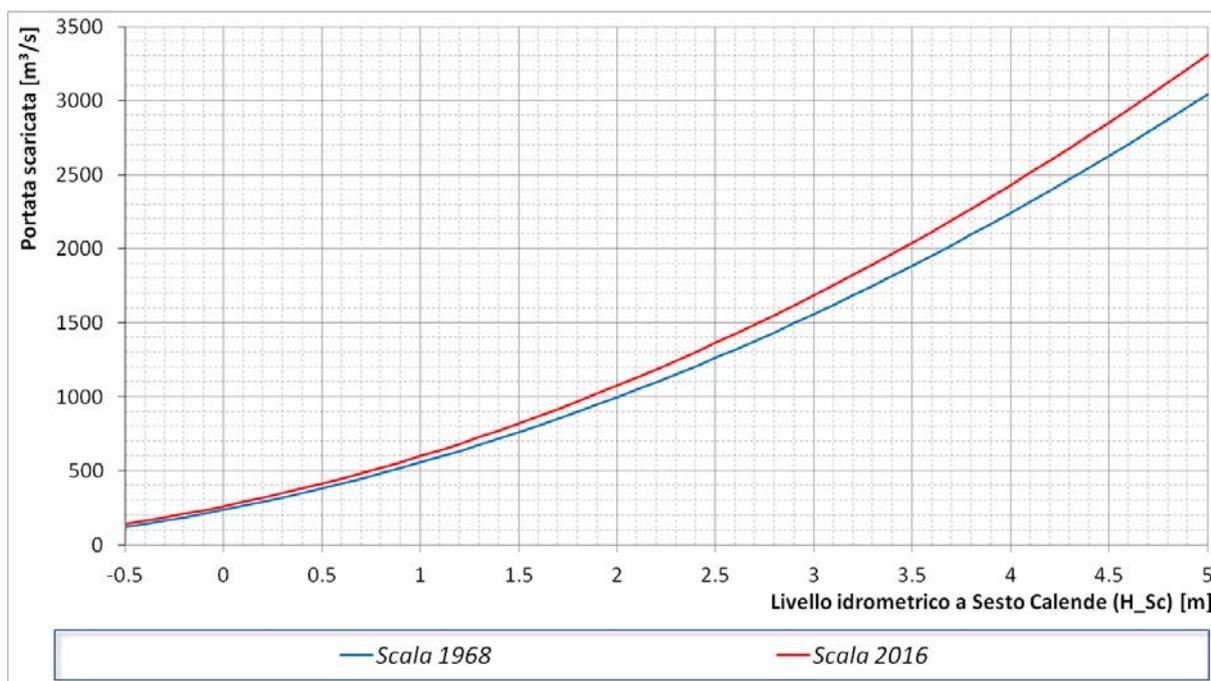


Figura 1: Scala di deflusso in regime libero e confronto con la scala elaborata dal servizio idrografico nel 1968

3.1.2 Scala di deflusso in regime libero con sezione parzializzata (fase di cantiere)

La struttura di tale funzione, così come la metodologia attraverso la quale essa è stata ricavata, è il risultato ultimo della modellazione idraulica descritta Capitolo 4, al quale si rimanda per la rappresentazione delle scale di deflusso relative alle configurazioni di sbarramento parzializzato prese in esame.

3.1.3 Scala di deflusso in regime regolato

La **scala di deflusso relativa alle condizioni di regime regolato** presenta un maggior numero di variabili indipendenti: oltre al livello idrometrico rilevato (o previsto) dall'idrometro di Sesto Calende, nell'equazione sono presenti anche delle variabili che definiscono il numero di portine che si trovano (o che si prevede di posizionare) in una determinata posizione. Così l'equazione che descrive la scala di deflusso in regime regolato assume la seguente forma:

$$\begin{aligned}
 Q = & 0.4269852 d_4 h'^2 + 1.703322 d_3 h'^2 + 1.500785 d_2 h'^2 + 1.483861 d_0 h'^2 - \\
 & 0.9047721 d_4 h' - 0.1207282 d_3 h' + 1.623429 d_2 h' + 3.04090 d_0 h' + \\
 & 85.31032
 \end{aligned}$$

dove:

Q	<i>portata erogata</i>	[m³/s]
h'	<i>altezza idrometrica a Sesto Calende incrementata ($h'=h+0.5$)</i>	[m]
h	<i>altezza idrometrica a Sesto Calende</i>	[m]
d₄	<i>numero di portine disparti in posizione 4</i>	[-]
d₃	<i>numero di portine disparti in posizione 3</i>	[-]
d₂	<i>numero di portine disparti in posizione 2</i>	[-]
d₀	<i>numero di portine disparti in posizione 0</i>	[-]

Visto il numero di variabili indipendenti non è possibile fornire una rappresentazione grafica della funzione ottenuta.

Nel presente paragrafo è stata riportata una descrizione di estrema sintesi dei risultati delle elaborazioni relative alla formulazione delle nuove scale di deflusso in regime libero e regolato. Per una descrizione di dettaglio delle singole fasi attraverso le quali sono state definite le nuove scale di deflusso si rimanda alla documentazione tecnica specifica prodotta nell'ambito della sperimentazione della regolazione estiva del Lago Maggiore.

3.2 **Curva di invaso**

La revisione della curva di invaso del lago è stata ultimata nel settembre 2016. La nuova funzione è stata sviluppata sulla base delle richieste specifiche del Tavolo Tecnico.

Sulla base di quanto richiesto sono stati acquisiti i **DTM** (*Digital Terrain Models*) di interesse per l'area in studio e sono state intraprese le elaborazioni necessarie a tracciare le **curve di livello aggiornate** della fascia perilacuale.

Parallelamente alle attività che hanno riguardato l'elaborazione dei DTM, sono state impostate delle analisi statistiche dei dati idrometrici disponibili, finalizzate a ricavare delle relazioni tra portate erogate, livelli idrometrici di Sesto Calende e livelli nelle altre

stazioni idrometriche di riferimento. Il risultato di queste elaborazioni consente di modellare il **profilo del pelo libero del lago**, in particolare durante gli eventi di piena.

Elaborando assieme la curva ipsografica del lago con la deformazione verticale del pelo libero è stato possibile suddividere il lago in poliedri, il volume di ciascuno dei quali varia in funzione delle quote idrometriche nei vari punti del lago, le quali sono però tutte riconducibili al livello idrometrico a Sesto Calende e alla portata erogata. La relazione tra volume invasato e livello idrometrico a Sesto Calende costituisce la curva di invaso aggiornata del lago.

La curva di invaso aggiornata, che tiene conto della non orizzontalità del profilo del lago, è stata interpolata con una funzione polinomiale di II grado, che assume la seguente forma:

$$V = 5.566800 \times H_{Sc}^2 + 214.477671 \times H_{Sc} + 112.292208$$

dove:

V = volume d'acqua invasato nel lago, espresso in milioni di metri cubi, oltre l'altezza idrometrica di -0.5 m rispetto allo zero di Sesto Calende, che corrisponde a una quota assoluta di 192.516 m s.l.m.

H_{Sc} = altezza idrometrica a Sesto Calende, espressa in metri.

In Figura 2 e in Figura 3 sono rappresentati graficamente l'andamento delle curve ottenute (superfici e volumi di invaso) e un confronto tra le curve di invaso proposte in passato e quella ricavata nell'ambito della sperimentazione.

Nel presente paragrafo è stata riportata una descrizione di estrema sintesi dei risultati delle elaborazioni relative alla formulazione di una nuova curva di invaso. Per una descrizione di dettaglio delle singole fasi attraverso le quali è stata elaborata la nuova curva di invaso si rimanda alla documentazione tecnica specifica prodotta nell'ambito della sperimentazione della regolazione estiva del Lago Maggiore.

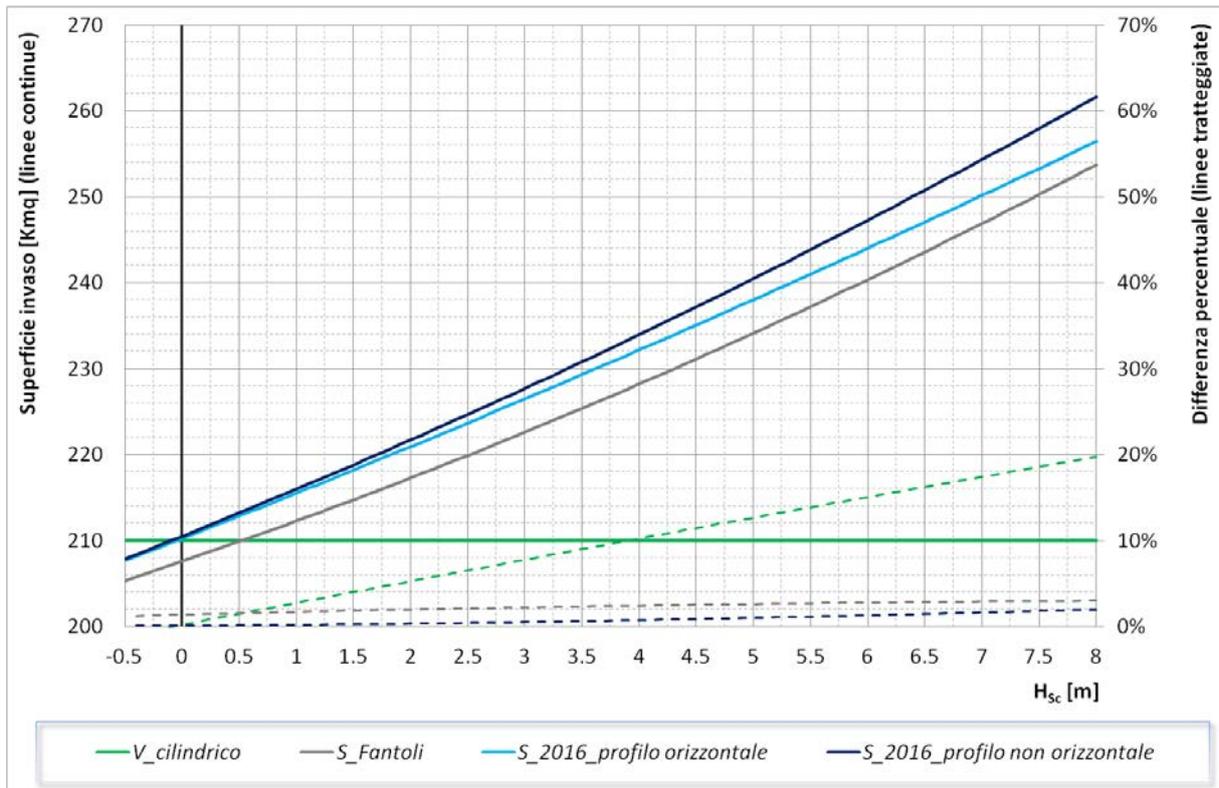


Figura 2: Elaborazione della curva di invaso - confronto superfici di invaso

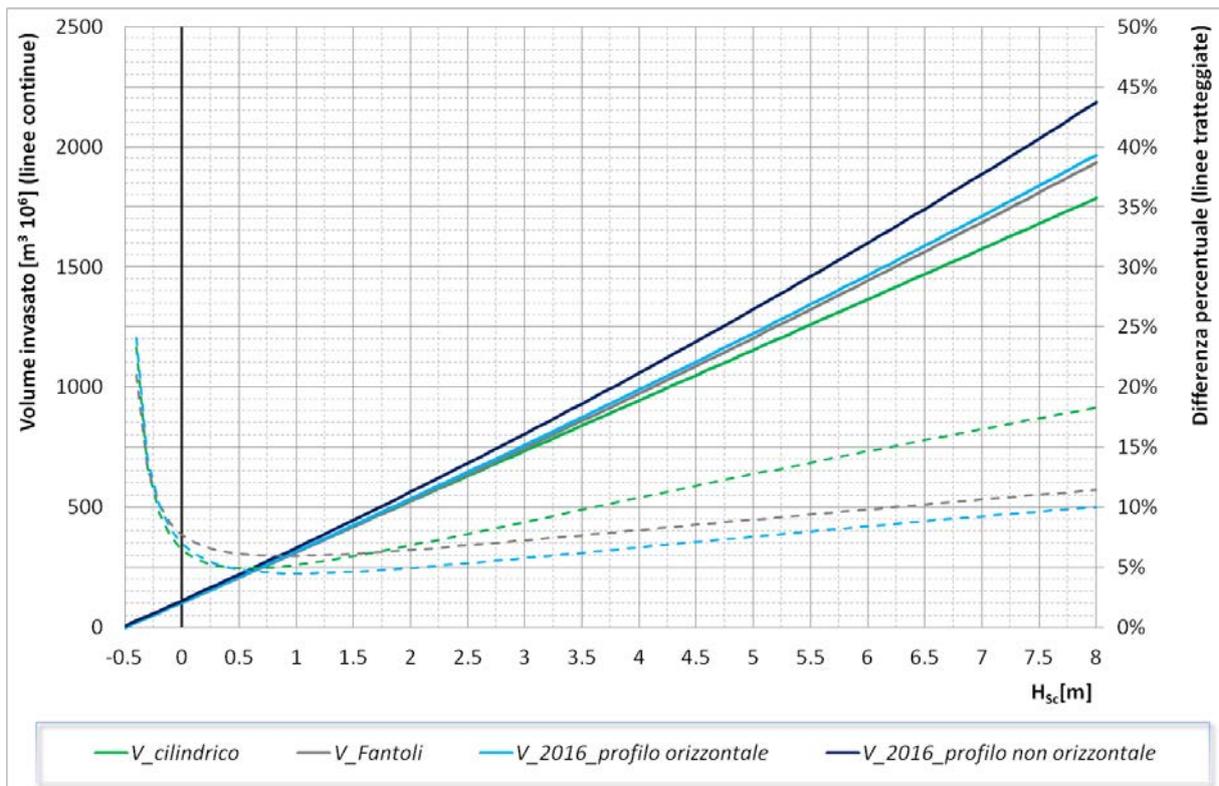


Figura 3: Elaborazione della curva di invaso - confronto volumi di invaso

3.3 Calcolo degli afflussi

Le analisi presentate nel presente rapporto sono state svolte calcolando gli afflussi al lago con diverse metodologie e ipotesi. In particolare possono essere definite due metodi sostanzialmente differenti di calcolo:

1. metodo indiretto, con il quale l'afflusso al lago viene ricavato sulla base di serie note di livelli idrometrici e di portate erogate;
2. metodo diretto, basato sulle misure di portata degli immissari al lago.

Il modello di calcolo, nella versione utilizzata nell'ambito del presente progetto, impiega i soli afflussi calcolati con il metodo indiretto. Viene quindi omessa la parte relativa al calcolo con metodo diretto.

3.3.1 Metodo indiretto

In questo caso il calcolo degli afflussi netti al lago è effettuato utilizzando l'equazione di continuità che si riporta di seguito:

$$Q_{in} = Q_{out} + dV / dt$$

Dove, con il noto significato dei simboli:

Q_{in}	portata entrante nel lago al tempo t	[m ³ /s]
Q_{out}	portata uscente dal lago al tempo t	[m ³ /s]
dV/dt	variazione del volume invasato nell'intervallo di tempo dt	[m ³ /s]

L'equazione viene risolta rispetto a Q_{in} con metodo alle differenze finite in avanti. Il passo temporale adottato è quello triorario (con corrispondenti valori alle 00:00, 03:00, 06:00, e così via). Successivamente i valori ottenuti sono stati interpolati (linearmente) per ricavare valori di afflusso orario.

Nell'integrazione dell'equazione di continuità, si è ammesso che il volume invasato fosse funzione univoca del livello misurato a Sesto Calende tramite la curva d'invaso aggiornata di cui al precedente paragrafo 3.2.

La serie di portate erogate (Q_{out}) utilizzata è stata costruita secondo il criterio "storico", utilizzando valori diversi in funzione di come è regolato lo sbarramento. In particolare:

- in regime libero (sbarramento completamente abbattuto) il valore di Q_{out} viene ricavato applicando la scala di deflusso aggiornata riportata nel paragrafo 3.1.
- in regime regolato viene utilizzato il dato di portata ufficiale reso disponibile dal Consorzio del Ticino, ricavato come somma delle portate derivate dagli utenti che prelevano acqua a monte della traversa di Panperduto e della portata che defluisce oltre la traversa di Panperduto. Tale dato viene fornito con frequenza giornaliera (ore 8.00 del mattino di ogni giorno) ed è tanto più rappresentativo quanto più è stabile la gestione dello sbarramento della Miorina e delle opere di regolazione e di derivazione più a valle.

3.4 Altezza idrometrica nelle altre stazioni di riferimento

Tra le attività svolte nell'ambito dell'aggiornamento della curva di invaso del lago rientra l'analisi statistica delle serie storiche di altezze idrometriche, finalizzata al calcolo dell'inclinazione del profilo del lago, in particolare durante le morbide e le piene.

Sono state ipotizzate funzioni di regressione costruite in vari modi; tra le funzioni proposte, quelle che hanno fornito risultati migliori sono quelle che definiscono delle relazioni lineari tra portata erogata e differenza tra il livello idrometrico rilevato presso le altre quattro stazioni di riferimento (**Locarno, Brissago, Luino e Pallanza**) e il livello idrometrico a Sesto Calende. Nella seguente tabella sono riportate le equazioni di regressione ottenute.

LOCARNO	$H_{Loc} - H_{Sc} =$	$130 \cdot 10^{-6}$	Q_{out}	-0.391291
BRISSAGO	$H_{Bri} - H_{Sc} =$	$131 \cdot 10^{-6}$	Q_{out}	-0.402287
LUINO	$H_{Lui} - H_{Sc} =$	$139 \cdot 10^{-6}$	Q_{out}	-0.293241
PALLANZA	$H_{Pall} - H_{Sc} =$	$120 \cdot 10^{-6}$	Q_{out}	-0.007141

Tabella 1: Funzioni di regressione ricavate nell'ambito della revisione della curva di invaso

Nel presente paragrafo è stata riportata una descrizione di estrema sintesi dei risultati delle elaborazioni relative alla formulazione delle nuove equazioni proposte per la previsione dei livelli idrometrici nelle altre quattro stazioni di riferimento per il modello di calcolo. Per una descrizione di dettaglio delle singole fasi attraverso le quali è stata elaborata la nuova curva di invaso si rimanda alla documentazione tecnica specifica prodotta nell'ambito della sperimentazione della regolazione estiva del Lago Maggiore.

3.5 **Durata delle manovre sullo sbarramento della Miorina**

La formulazione delle equazioni attraverso cui calcolare e prevedere la durata delle manovre sullo sbarramento è stata effettuata sulla base di:

- documenti esistenti prodotti dal Consorzio del Ticino in merito all'argomento;
- un'analisi dei dati storici raccolti nei registri relativa al periodo 1993 - 2015;
- informazioni / verifiche svolte presso lo sbarramento durante le manovre assieme al direttore e al personale impiegato alla diga.

Nel corso delle analisi svolte è emerso chiaramente che non è possibile definire una relazione precisa tra la durata delle manovre e il tipo di manovra svolta, in quanto vi sono numerosi fattori che incidono, spesso anche in modo consistente, sulla reale durata delle manovre. I fattori che condizionano l'effettiva durata delle manovre sono:

Fattori ambientali e climatici	<i>Luce/buio, presenza di nebbia, pioggia, vento, torbidità dell'acqua</i>
Fattori idraulici	<i>Livello idrometrico e portata transitante</i>
Informazione e coordinamento con altri enti e istituzioni	<i>Prima di avviare una manovra di scarico devono essere sempre allertati gli utenti di valle e, in alcuni casi, deve essere dato l'allarme di protezione civile per possibile piena del Ticino.</i>
Caratteristiche intrinseche della manovra	<i>Condizioni iniziali dello sbarramento (la posizione iniziale e finale della singola portina influisce sui</i>

tempi di manovra), portine manovrate (pari, dispari o entrambe), numero di carri utilizzati,

Le funzioni utilizzate dal modello di calcolo sono state formulate mantenendo un approccio cautelativo, ossia ipotizzando una combinazione dei fattori sopra elencati piuttosto sfavorevole. In particolare la durata della manovra effettiva, di interesse per il modello previsionale, viene calcolata al netto di tutte le operazioni preliminari, in cui si provvede all' "**Informazione e coordinamento con altri enti e istituzioni**" e nell'ipotesi -non sempre verificata- che le normali manovre di scarico e riduzione vengano effettuate impiegando un solo operatore, mentre le manovre di abbattimento completo vengano effettuate da due operatori che agiscono simultaneamente.

Le elaborazioni svolte hanno consentito di formulare le seguenti equazioni:

manovre di riduzione (1 carro) $Durata = -0.00005775 \times P^2 + 0.037596 \times P$

manovre di scarico (1 carro) $Durata = 0.06 \times P$

manovre di abbattimento completo (2 carri) $Durata = 0.00002888 \times P^2 + 0.024535 \times P$

dove P corrisponde al numero di portine manovrate.

Un ulteriore fattore cautelativo risiede nella modalità con cui le funzioni appena illustrate sono adattate per renderle compatibili con il passo di calcolo del modello (30 minuti). Questa operazione è stata svolta secondo le seguenti ipotesi:

1. la manovra è definita dall'orario in cui essa viene conclusa; questo avviene tanto in ambito di rappresentazione dei parametri in tempo reale, quanto nella costruzione degli scenari simulati;
2. la durata delle manovre viene sempre e comunque arrotondata per eccesso alla mezz'ora successiva; per cui ad esempio una manovra da 62 minuti sarà distribuita dal modello su un periodo di 90 minuti, ossia di tre step di calcolo.

4. IL REGIME IDRAULICO DELL'INCILE DEL LAGO MAGGIORE DURANTE IL CANTIERE

4.1 Modellazione idraulica dell'incile

Negli studi di approfondimento svolti dal Consorzio del Ticino a supporto della regolazione del Lago Maggiore è sempre stato considerato il comportamento idraulico dell'incile in regime libero e in regime regolato. In particolare il deflusso attraverso lo sbarramento della Miorina avviene normalmente in regime regolato quando il livello idrometrico a Sesto Calende è compreso tra -50 cm e +100, +150 cm, mentre avviene in regime libero per livelli molto bassi (< -50 cm) e per livelli superiori al limite di massima regolazione (variabile tra +100 e +150 cm in funzione della stagione).

Fino a oggi non si è mai reso necessario studiare il comportamento del lago in condizioni di una o più campate completamente chiuse, condizioni che non sono contemplate dal normale esercizio dello sbarramento.

Per le verifiche idrauliche descritte nel presente documento, è invece fondamentale conoscere il comportamento del sistema lago - fiume in condizioni di sbarramento parzializzato, con particolare riferimento alle condizioni di piena e di morbida. È infatti di fondamentale importanza conoscere la relazione che lega il livello del lago alla portata che, in questo particolare regime libero-parzializzato, può defluire nel Fiume Ticino.

Scopo del modello idraulico è proprio quello di formulare delle scale di deflusso in grado di rappresentare la relazione tra livello idrometrico rilevato dall'idrometro di Sesto Calende e la portata che defluisce dallo sbarramento della Miorina nelle due seguenti configurazioni:

- **3 campate libere (3C):** una campata impermeabile fino alla quota di +195.50 m s.l.m., tre campate completamente aperte, come nelle normali condizioni di regime libero;
- **2 campate libere (2C):** due campate impermeabili fino alla quota di +195.50 m s.l.m., due campate completamente aperte, come nelle normali condizioni di regime libero;

Il modello idraulico realizzato permette di ricostruire il profilo idraulico su tutto il tratto modellato e fornisce quindi informazioni utili relative ai tiranti idrici in corrispondenza delle palancolature che andranno a delimitare le aree di cantiere in alveo.

4.2 **Aspetti teorici del modello idraulico**

4.2.1 *Programma utilizzato*

Per costruire il modello idraulico si è utilizzato il programma Hec-Ras (versione 4.1) sviluppato nel 2002 presso l'U.S. Army Corps of Engineers (Centro di Ingegneria Idraulica dell'esercito degli Stati Uniti). Il software e la relativa documentazione d'uso in lingua inglese sono scaricabili gratuitamente dal sito: <http://www.hec.usace.army.mil/software/hecras/hecras-download.html>.

Tale software adotta una schematizzazione monodimensionale e prevede la possibilità di calcolare i profili idraulici in moto permanente o in moto vario. Nel caso in esame si è proceduto al solo calcolo dei profili in moto permanente.

4.2.2 *Regimi di flusso*

La determinazione del profilo liquido può avvenire secondo tre regimi di flusso:

- *Corrente lenta o subcritica (subcritical flow)*: quando la corrente è ovunque lenta ovvero presenta, in tutte le sezioni, un'altezza d'acqua maggiore dell'altezza critica.
- *Corrente veloce o supercritica (supercritical flow)*: quando la corrente è ovunque veloce ovvero presenta, in tutte le sezioni, un'altezza d'acqua minore dell'altezza critica.
- *Corrente mista (mixed flow)*: quando nel tratto in esame si possono verificare transizioni da un tipo di corrente all'altro.

Le correnti oggetto della modellazione in esame sono sempre di tipo lento. Possibili passaggi dallo stato critico possono instaurarsi in prossimità delle sezioni parzializzate in corrispondenza dello sbarramento. Per questo motivo tutte le simulazioni sono state comunque effettuate in condizioni di corrente mista.

4.2.3 Equazioni di base utilizzate per il calcolo del profilo

Per il calcolo del profilo idraulico in moto permanente Hec-Ras utilizza una procedura iterativa per la soluzione dell'equazione del bilancio energetico tra una sezione e quella immediatamente a monte (o quella immediatamente a valle in caso di corrente lenta):

$$y_2 + z_2 + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} = y_1 + z_1 + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} - h_e \quad (1)$$

con:

- y_1 e y_2 = altezze d'acqua riferite al fondo dell'alveo;
- z_1 e z_2 = altezze del fondo rispetto ad una quota di riferimento;
- v_1 e v_2 = velocità medie della corrente nelle due sezioni;
- α_1 e α_2 = coefficienti di ragguglio del termine di energia cinetica (dipende dal fatto che l'alveo è suddiviso in sottosezioni);
- h_e = perdita di carico tra le due sezioni considerate.

Il termine h_e dipende sia dalle perdite per attrito sia da quelle per contrazione ed espansione e viene valutato mediante la relazione:

$$h_e = L \times S_f + c \times \left| \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} - \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} \right| \quad (2)$$

con:

- L = lunghezza del tronco considerato;
- S_f = cadente media tra le due sezioni;
- c = coefficiente di perdita di carico per contrazione o espansione.

Il primo termine dell'equazione (2) ($L \times S_f$) rappresenta le perdite di carico totale per attrito, prodotto tra la distanza tra le due sezioni e la cadente media.

La cadente media viene calcolata utilizzando l'equazione di Manning:

$$S_f = \left(\frac{Q}{K} \right)^2 \quad (3)^1$$

$$K = \left(\frac{1}{n} \right) \times A \times R^{\frac{2}{3}} \quad (4)$$

¹ Hec-Ras permette di selezionare espressioni alternative delle equazioni riportate per il calcolo della cadente media che presuppongono una suddivisione dell'alveo in sottosezioni all'interno delle quali la velocità possa ritenersi con buona approssimazione costante e il coefficiente di Manning invariato.

con:

- Sf = perdita di carico distribuita;
- n = coefficiente di Manning;
- A= area bagnata;
- R = raggio idraulico della sezione (rapporto tra area bagnata e contorno bagnato);
- K = conveyance ovvero misura dell'attitudine di una data sezione a far defluire le portate.

Il secondo termine dell'equazione (2) per il calcolo delle perdite di carico rappresenta il contributo dovuto alla contrazione ed espansione dell'area bagnata ovvero dovuto alla non linearità della corrente in seguito ad allargamento o restringimento della sezione. L'altezza del pelo libero, in riferimento a una assegnata sezione, viene determinato mediante una risoluzione iterativa delle equazioni (1) e (2).

4.2.4 Passaggio dall'altezza critica

Il programma permette di calcolare l'altezza critica corrispondente a ciascuna sezione attraverso un procedimento iterativo che definisce l'altezza d'acqua per cui è minima l'energia totale espressa come:

$$H = WS + \frac{av^2}{2g} \quad (5)$$

con:

- H = energia totale;
- WS = quota del pelo libero dell'acqua corrispondente all'energia di posizione;
- $\frac{av^2}{2g}$ = energia cinematica

L'altezza critica viene considerata altezza d'acqua del profilo idraulico nei seguenti casi:

1. condizione specificata dall'utente come condizione al contorno;
2. passaggio da corrente lenta a corrente veloce;
3. quando il programma non riesce a risolvere l'equazione di bilancio energetico nel numero specificato di iterazioni;

4. quando il controllo effettuato con il numero di Froude indica che l'altezza d'acqua calcolata per il profilo, attraverso l'equazione di bilancio energetico, non corrisponde al regime di flusso selezionato.

Nei casi 3 e 4 il programma visualizza un messaggio di errore che permette di correggere condizioni che hanno portato alla non risoluzione dell'equazione di bilancio energetico o di selezionare un regime di flusso più adeguato.

4.2.5 Applicazione dell'equazione del momento (Momentum Equation)

Nel caso in cui avvenga il passaggio dallo stato critico e in tutti i casi in cui la corrente è rapidamente variata l'equazione di bilancio energetico non può essere applicata. In questi casi Hec-Ras utilizza l'equazione del momento (Momentum Equation) che prevede l'applicazione dell'equazione globale di equilibrio a un elemento di volume d'acqua compreso tra la sezione 1 e 2:

$$\sum F_x = m \times a \quad (6)$$

$$P_2 - P_1 + W_x - F_f = Q\rho\Delta V_x \quad (7)$$

con:

- $P_{1,2}$ = spinta idrostatica nella sezione 1 e 2;
- W_x = forza dovuta al peso dell'acqua nella direzione del moto;
- F_f = forza di attrito dovuta alla resistenza idraulica;
- Q = portata uscente;
- ρ = densità dell'acqua;
- Δv_x = variazione di velocità tra la sezione 1 e 2 nella direzione del flusso.

4.3 Costruzione del modello idraulico

4.3.1 Schema idraulico e geometria delle sezioni trasversali

I dati relativi alla geometria ("Geometric Data") contengono tutte le informazioni relative alle sezioni trasversali del tratto indagato.

Lo schema idraulico del sistema modellato è estremamente semplice: il modello geometrico è costituito da un unico corso d'acqua (RIVER) e da un unico tratto fluviale (REACH).

Per modellare la geometria dell'alveo sono state utilizzate le sezioni rilevate nel 1990 per conto della Sezione Economica delle acque di Bellinzona, già utilizzate nell'ambito delle attività descritte nella Pubblicazione n° 19 del Consorzio del Ticino del 1995 dal titolo *"Il funzionamento idraulico dell'incile del Lago Maggiore"*. Il tratto modellato è lungo complessivamente 11'164 m, di cui 5'297 a monte della traversa della Miorina, 42 metri in corrispondenza dello sbarramento della Miorina e 5'825 tra la diga della Miorina e la diga di Porto della Torre.

Lo schema geometrico del modello non prevede quindi una rete idraulica complessa, essendo costituita da un unico tratto fluviale (REACH) e priva di confluenze (JUNCTION), ripartizioni e opere di derivazione laterale (LATERAL STRUCTURE).

Anche lo sbarramento della Miorina, mantenendo lo schema della modellazione effettuata nella pubblicazione n° 19 del Consorzio del Ticino, è stato modellato attraverso una sequenza di sezioni fluviali particolarmente fitte e non come struttura trasversale (INLINE STRUCTURE).

Sono stati creati diversi file relativi alla geometria della rete, caratterizzati da diverse configurazioni dello sbarramento (2, 3 o 4 campate libere) e da diversi coefficienti di scabrezza. Per le applicazioni del modello finalizzate alla formulazione delle scale di deflusso sono stati utilizzati i seguenti file di geometria:

1. **"13 STATO DI FATTO_INT_0.0285"**, corrispondente all'attuale conformazione dell'alveo e dello sbarramento, rappresentato dalle 59 sezioni rilevate nel 1990 e da 571 sezioni interpolate, con passo variabile in funzione del tratto; il coefficiente di scabrezza di Manning è pari a 0.0285 dove il fondo è naturale e a 0.038 in corrispondenza della traversa della Miorina;
2. **"23 CAMPATE 3-4_0.0285"**, corrispondente all'attuale conformazione dell'alveo, con la terza e la quarta campata dello sbarramento chiuse fino alla quota di 195.50 m s.l.m., per una lunghezza di 25 metri; anche in questo caso l'alveo è rappresentato da 635 sezioni, di cui 59 ricavate da quelle rilevate nel 1990 e 571 sezioni interpolate

con passo variabile; il coefficiente di scabrezza di Manning è pari a 0.0285 dove il fondo è naturale e a 0.038 in corrispondenza della traversa della Miorina;

3. “**33 CAMPATE 2-3-4_0.0285**”, come la precedente, ma con la sola quarta campata chiusa fino alla quota di 195.50 m s.l.m..

4.3.2 Immissione dati relativi al moto permanente: regimi di flusso e condizioni al contorno

Una volta inseriti i dati relativi alla geometria si è proceduto ad immettere quelli relativi al moto permanente attraverso l'utilizzo dell'editor di HEC-RAS “Steady Flow Data”.

I dati relativi alle portate di moto permanente (“Steady Flow Data”) contengono tutte le informazioni relative alle portate defluenti e alle condizioni al contorno di monte e di valle in regime di moto permanente. Si ricorda che il moto permanente si riferisce a condizioni idrauliche che non variano nel tempo; in particolare non variano la portata transitante nelle varie sezioni e le condizioni al contorno (tiranti idrici) in corrispondenza delle sezioni terminali di monte e di valle del tratto modellato.

In tutti i casi gli scenari predisposti relativi alle condizioni di moto permanente come condizione al contorno di monte è stato assunto il livello del pelo libero in condizioni di moto uniforme corrispondente ad una pendenza del 1.0 ‰, per il livello di monte la quota di ritenuta dello sbarramento di Porto della Torre pari a 192.50 m s.l.m..

Per ogni file di dati relativo alle condizioni di moto permanente, il programma permette l'inserimento di più di un profilo, ognuno corrispondente a diverse condizioni di portata.

Nel caso specifico sono stati predisposti i cinque file di portate in moto permanente di seguito elencati:

1 - “**MAGGIO 2018**”

portate misurate nei giorni 8 e 9 maggio 2018, quando è stata testata la chiusura completa della prima e della seconda campata; questo file è stato utilizzato per la calibrazione del modello geometrico.

2, 3, 4 - “**PIENE >250**”, “**PIENE TRA 180 E 250**”, “**PIENE TRA 150 E 180**”

si tratta di 3 file che simulano le condizioni di picco di 13 eventi di piena e di morbida avvenuti tra il 1999 e il 2016; gli eventi sono stati suddivisi in tre gruppi in base al massimo livello idrometrico raggiunto a Sesto Calende; anche questi 3 file sono stati utilizzati per la calibrazione del modello geometrico.

5 - "X SCALE"

si tratta di un unico file costituito da 40 valori di portata progressivamente crescenti tra $50 \text{ m}^3/\text{s}$ e $3'000 \text{ m}^3/\text{s}$, utilizzato per ricavare le scale di deflusso relative alle condizioni di regime libero parzializzato.

4.3.3 Calibrazione del modello idraulico

La calibrazione del modello è stata fondamentale di due tipi:

- a) calibrazione generale della geometria dell'alveo, attraverso la variazione dei coefficienti di scabrezza
- b) verifica del comportamento idraulico del sistema in prossimità dello sbarramento, in occasione delle manovre svolte nei giorni 8, 9 e 10 maggio 2018.

In entrambi i casi la calibrazione è stata effettuata confrontando i dati idrometrici registrati presso quattro stazioni idrometriche dove avviene la misurazione in continuo dei livelli dell'acqua con i livelli idrometrici calcolati dal modello in corrispondenza delle stesse sezioni. Le quattro sezioni di controllo sono:

1. idrometro di Sesto Calende, gestito dal Consorzio del Ticino;
2. idrometro a monte dello sbarramento della Miorina, gestito dal Consorzio del Ticino;
3. idrometro a valle dello sbarramento della Miorina, gestito dal Consorzio del Ticino;
4. idrometro di Golasecca, gestito da Arpa Lombardia.

La calibrazione è stata effettuata assegnando alle sezioni trasversali un coefficiente di Manning che, pur rimanendo all'interno di un range di valori congruenti con quelli proposti dalla letteratura specifica, consenta di minimizzare la differenza tra i livelli osservati e quelli simulati.

Questa operazione è stata effettuata utilizzando il file di geometria corrispondente allo stato di fatto (13 Stato di fatto_INT_0.0285) e i 3 file di portata in moto permanente costruiti sulla base di 13 eventi di piena osservati tra il 1999 e il 2016 (Piene >250, Piene tra 180 e 250, Piene tra 150 e 180).

La calibrazione è stata effettuata in regime di moto permanente, fissando la portata pari al valore ottenuto con la scala messa a punto nell'ambito della sperimentazione della regolazione estiva del Lago Maggiore (paragrafo 3.1.1) al massimo livello idrometrico giornaliero rilevato presso la stazione di Sesto Calende (ore 8.00 A.M.) durante i 13 eventi.

Nell'immagine che segue è riportato a titolo di esempio il profilo relativo alle condizioni del lago la mattina del 16.11.2014 alle ore 08:00 A.M..

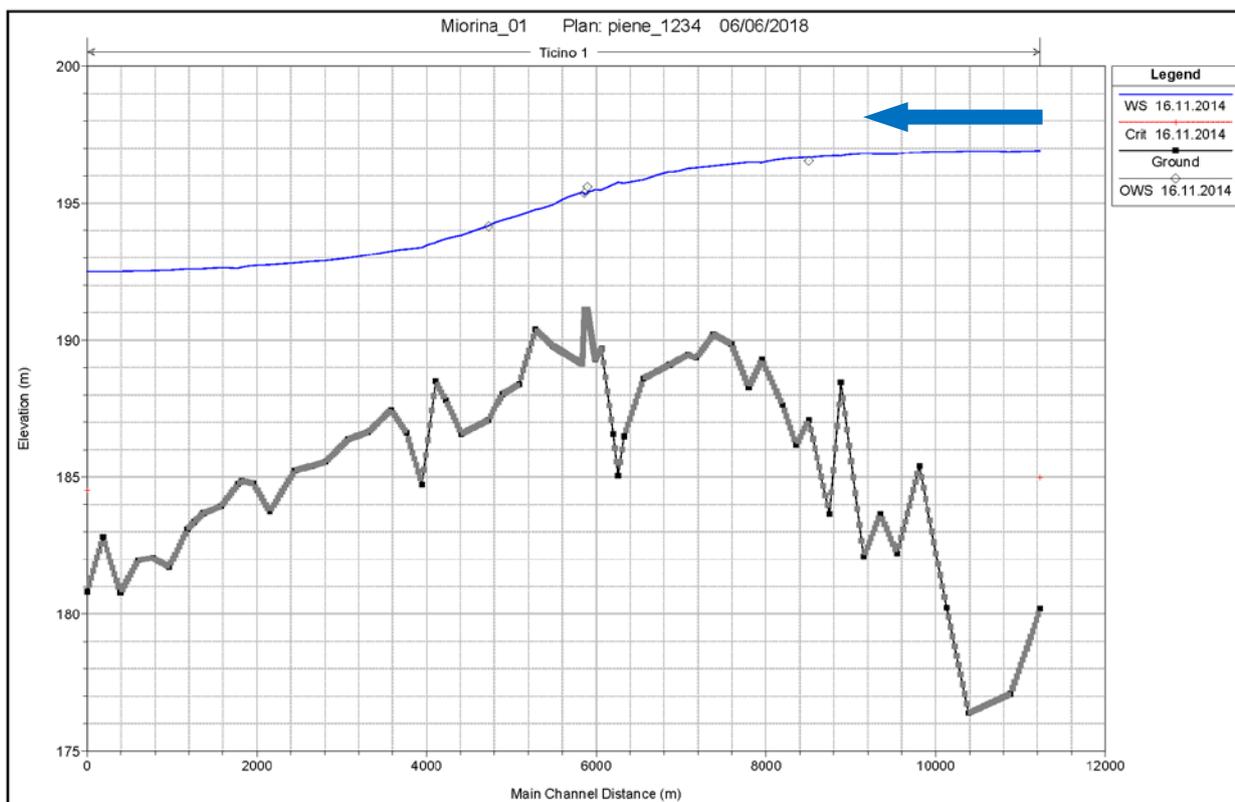


Figura 4 – Calibrazione del modello - profilo idraulico nelle condizioni del 16.11.2014, ore 08:00

River Station	Profile	Q Total (m ³ /s)	Obs W.S. (m s.l.m.)	W.S. Elev (m s.l.m.)	Obs W.S. (cm)	Difference (cm)
<i>IDROMETRO DI SESTO CALENDE</i>						
8452	17.10.2000	2933	197.61	197.82	459	+21
8452	16.11.2014	2056	196.54	196.65	352	+11
8452	30.11.2002	1931	196.37	196.47	335	+10
8452	03.11.2004	1552	195.82	195.88	280	+6
8452	07.11.2008	1267	195.36	195.40	234	+4
8452	29.09.1999	1158	195.17	195.20	215	+3
8452	08.09.2008	1102	195.07	195.09	205	+2
8452	30.04.2009	1091	195.05	195.07	203	+2
8452	27.12.2013	949	194.78	194.79	176	+1
8452	29.11.2012	888	194.66	194.66	164	0
8452	26.11.2016	864	194.61	194.61	159	0
8452	09.12.2006	849	194.58	194.58	156	0
<i>MIORINA MONTE</i>						
5867	16.11.2014	2056	195.6	195.37	258	-23
5867	30.11.2002	1931	195.41	195.22	239	-19
5867	03.11.2004	1552	194.91	194.74	189	-17
5867	07.11.2008	1267	194.61	194.36	159	-25
5867	29.09.1999	1158	194.45	194.20	143	-25
5867	08.09.2008	1102	194.32	194.12	130	-20
5867	30.04.2009	1091	194.37	194.10	135	-27
5867	27.12.2013	949	194.15	193.87	113	-28
5867	29.11.2012	888	194.06	193.78	104	-28
5867	26.11.2016	864	194.01	193.74	99	-27
5867	09.12.2006	849	193.96	193.72	94	-24
<i>MIORINA VALLE</i>						
5827	16.11.2014	2056	195.38	195.33	236	-5
5827	30.11.2002	1931	195.19	195.18	217	-1
5827	03.11.2004	1552	194.70	194.70	168	0

River Station	Profile	Q Total (m ³ /s)	Obs W.S. (m s.l.m.)	W.S. Elev (m s.l.m.)	Obs W.S. (cm)	Difference (cm)
5827	07.11.2008	1267	194.31	194.32	129	1
5827	29.09.1999	1158	194.28	194.16	126	-12
5827	08.09.2008	1102	194.08	194.08	106	0
5827	30.04.2009	1091	194.15	194.06	113	-9
5827	27.12.2013	949	193.88	193.84	86	-4
5827	29.11.2012	888	193.82	193.74	80	-8
5827	26.11.2016	864	193.79	193.71	77	-8
GOLASECCA						
4732	16.11.2014	2056	194.15	194.17	113	+2
4732	26.11.2016	864	193.10	192.94	8	-16

Tabella 2: risultati della calibrazione

La calibrazione ha fornito buoni risultati per la sezione 8452 (idrometro di Sesto Calende) e risultati peggiori per le sezioni a monte e valle della Miorina.

Si ritiene che per le finalità del presente lavoro i risultati ottenuti in fase di calibrazione siano più che soddisfacenti. Si tenga presente che le sezioni utilizzate per sviluppare il modello erano state rilevate con ben altre finalità. Già con portate transitanti dell'ordine di 1'500 m³/s, molte delle sezioni rilevate non sono più in grado di "contenere" la piena simulata e il modello in questi casi prolunga la linea di sezione con sponde verticali, situazione che non corrisponde evidentemente alla naturale configurazione dei luoghi e che tende a dare un errore crescente al crescere della portata erogata.

In corrispondenza della sezione 5867 (idrometro di Miorina monte), e in misura minore in corrispondenza della sezione 5827 (idrometro di Miorina valle), i livelli osservati sono sempre maggiori di quelli forniti dal modello, errore che però rimane circoscritto al segmento fluviale in corrispondenza dello sbarramento. Anche in questo caso si ritiene che l'errore sia dovuto alla qualità delle sezioni disponibili e che potrebbe essere ridotto solo realizzando un rilievo di dettaglio dell'alveo a monte e a valle dello sbarramento. In ogni caso, l'errore non pregiudica i risultati delle analisi svolte in questa sede.

Per quanto riguarda la calibrazione rispetto ai test effettuati tra l'otto e il nove maggio 2018, sono stati verificati due profili corrispondenti alle seguenti condizioni:

- ✓ 8 maggio, ore 06:00: sbarramento in configurazione di abbattimento completo (4 campate aperte), portata erogata 680 m³/s, quota idrometrica a Sesto Calende 194.21 m s.l.m.;
- ✓ 9 maggio, ore 06:00: 1^a e 2^a campata completamente chiuse (tutte le portine in posizione 4), 3^a e 4^a campata completamente aperte (tutte le portine in posizione 0), portata erogata 575 m³/s, quota idrometrica a Sesto Calende 194.26 m s.l.m.;

In questo caso il modello, applicato utilizzando i coefficienti di scabrezza precedentemente individuati, tende a sovrastimare di qualche centimetro il livello idrometrico a Sesto Calende per entrambi gli scenari simulati.

Considerato che:

- a) l'entità della sovrastima è analoga per i due scenari (poco meno di 10 cm);
- b) per quelle che sono le finalità del presente lavoro, la sovrastima dei livelli costituisce di per sé un elemento cautelativo;
- c) la calibrazione del modello è stata fatta in modo da dare risultati ottimali per portate dell'ordine di 1'000 – 1'500 m³/s ed è quindi da ritenersi normale un errore di qualche centimetro in condizioni idrauliche ben diverse da quelle in base alle quali è stato calibrato il modello;

si ritiene che anche in questo caso i risultati della verifica svolta possano essere considerati accettabili.

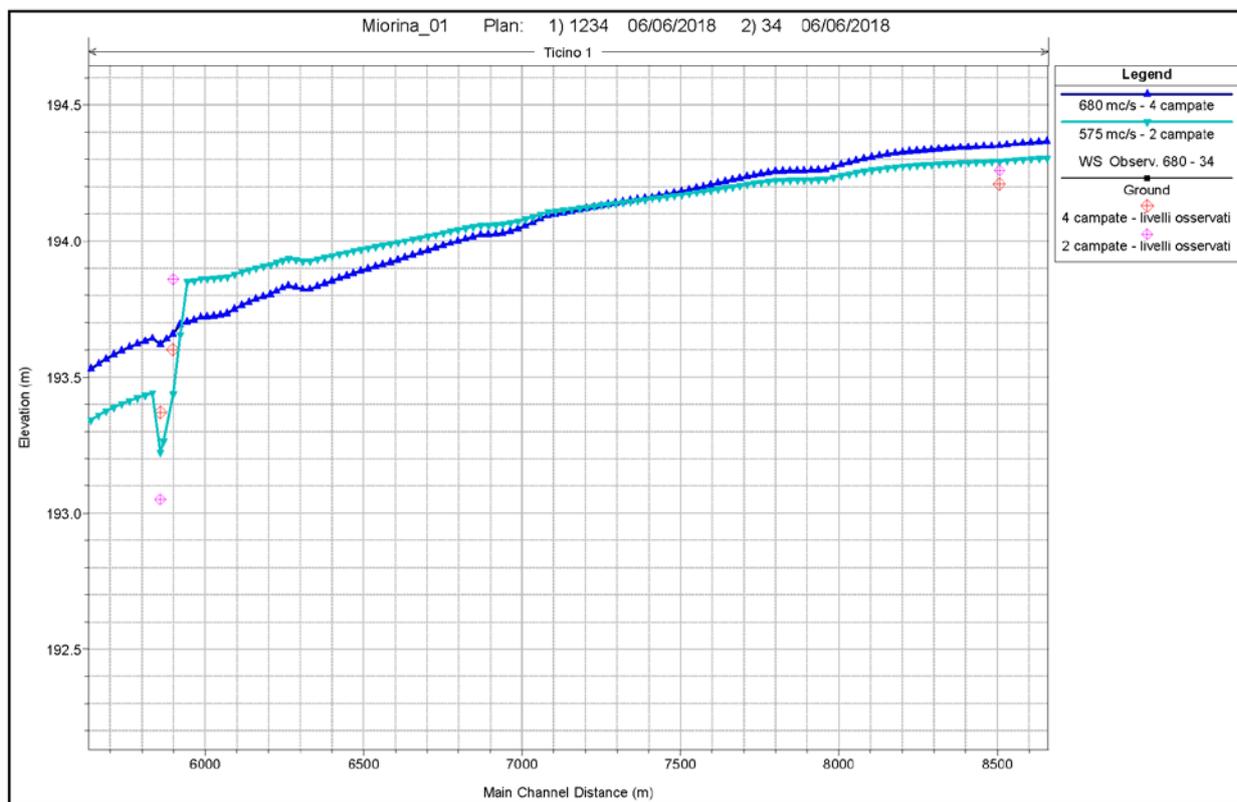


Figura 5 – Calibrazione del modello – verifica durante i test condotti tra i giorni 8 e 10 maggio 2018



Figura 6 – Lo sbarramento della Miorina durante il test svolto

4.4 Simulazioni in regime di moto permanente

Nelle pagine che seguono sono riportati i principali risultati relativi alle analisi svolte in regime di moto permanente. Tali analisi sono state effettuate con l'obiettivo principale di ricavare delle scale di deflusso, ossia delle relazioni tra livello idrometrico a Sesto Calende e portata erogata, in grado di rappresentare la configurazione dello sbarramento della Miorina durante il periodo interessato dal cantiere. In particolare, come già illustrato nel paragrafo 4.3.1, sono state assunte come condizioni idrauliche rappresentative della configurazione di cantiere quelle in cui lo sbarramento presenta 3 campate aperte e 1 chiusa e quelle in cui sono invece 2 le campate aperte e 2 quelle chiuse.

Il modello fornisce poi anche i profili idraulici lungo tutto il tratto modellato e le altezze idrometriche nelle varie sezioni di calcolo. I primi sono sicuramente utili per una valutazione qualitativa e quantitativa del profilo idraulico del Ticino nel tratto a monte della Miorina, mentre le altezze idrometriche, nei limiti già precedentemente illustrati, possono fornire indicazioni utili per determinare l'entità dei tiranti idrici presso il cantiere.

Una volta calibrato il modello mediante l'attribuzione di coefficienti di scabrezza adeguati, sono state effettuate alcune simulazioni utilizzando i tre file di geometria relativi allo sbarramento completamente abbattuto nella configurazione normale, con 4 campate "aperte" (file 13 *Stato di fatto_INT_0.0285*) e alle due configurazioni che rappresentano la fase di cantiere caratterizzate dall'aver rispettivamente 2 o 3 campate disponibili per il deflusso dell'acqua (23 *Campate 3e4_0.0285* e 33 *Campate 2-3-4_0.0285*) con il file di portate "X Scale", creato per la costruzione delle scale di deflusso.

Nelle pagine che seguono sono riportati alcuni dei profili idraulici elaborati attraverso le simulazioni svolte. Nella legenda dei grafici riportate i codici 4C, 3C e 2C si riferiscono rispettivamente alle configurazioni con 4 (file 13 *Stato di fatto_INT_0.0285*), 3 (33 *Campate 2-3-4_0.0285*) e 2 (23 *Campate 3e4_0.0285*) campate aperte.

Interpolando le altezze idrometriche nelle sezioni di interesse è stato possibile ricavare poi le scale di deflusso relative a ciascuna delle configurazioni dello sbarramento adottate nella simulazione. I risultati di tale elaborazione, scopo ultimo delle attività illustrate nel presente capitolo, sono descritti nel paragrafo 4.6.

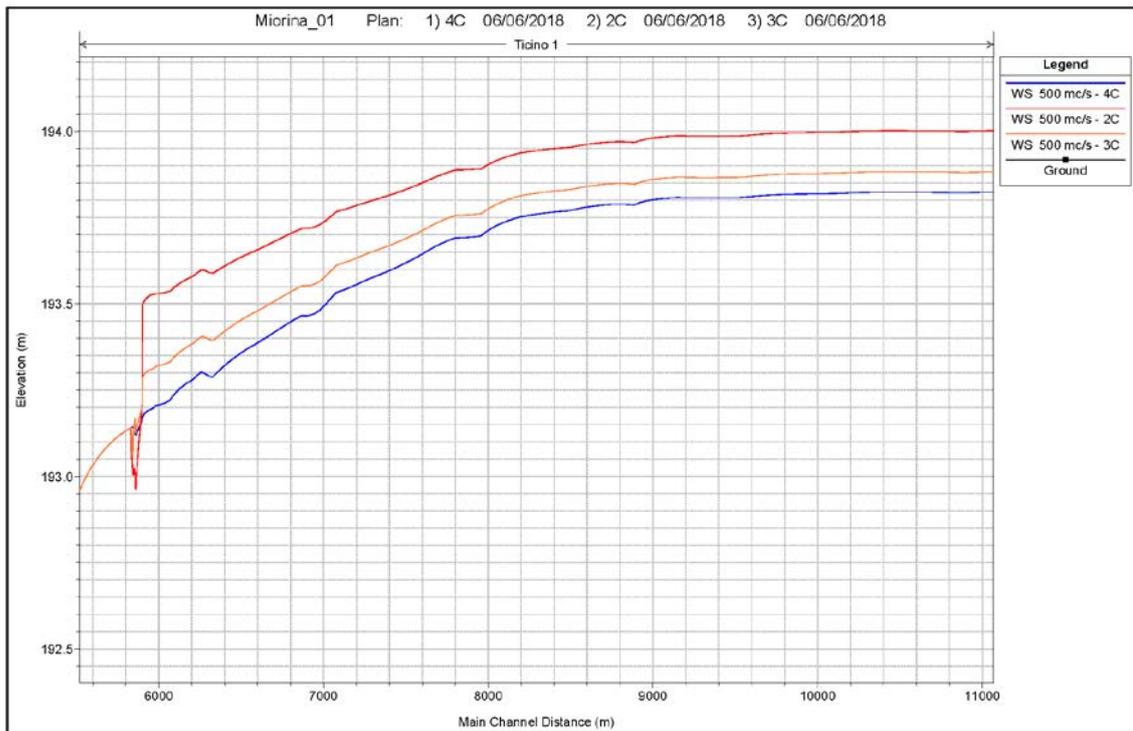


Figura 7: Profili idraulici in moto permanente – tratto Lisanza -Miorina - Portata 500 m³/s

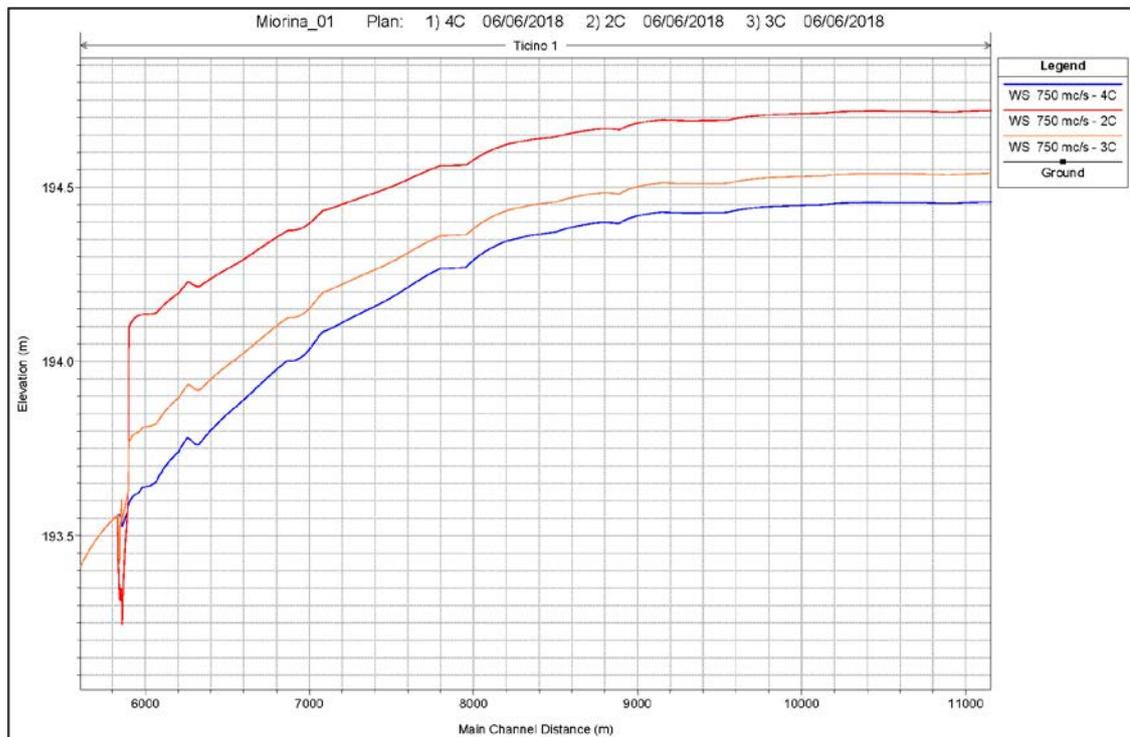


Figura 8: Profili idraulici in moto permanente – tratto Lisanza -Miorina - Portata 750 m³/s

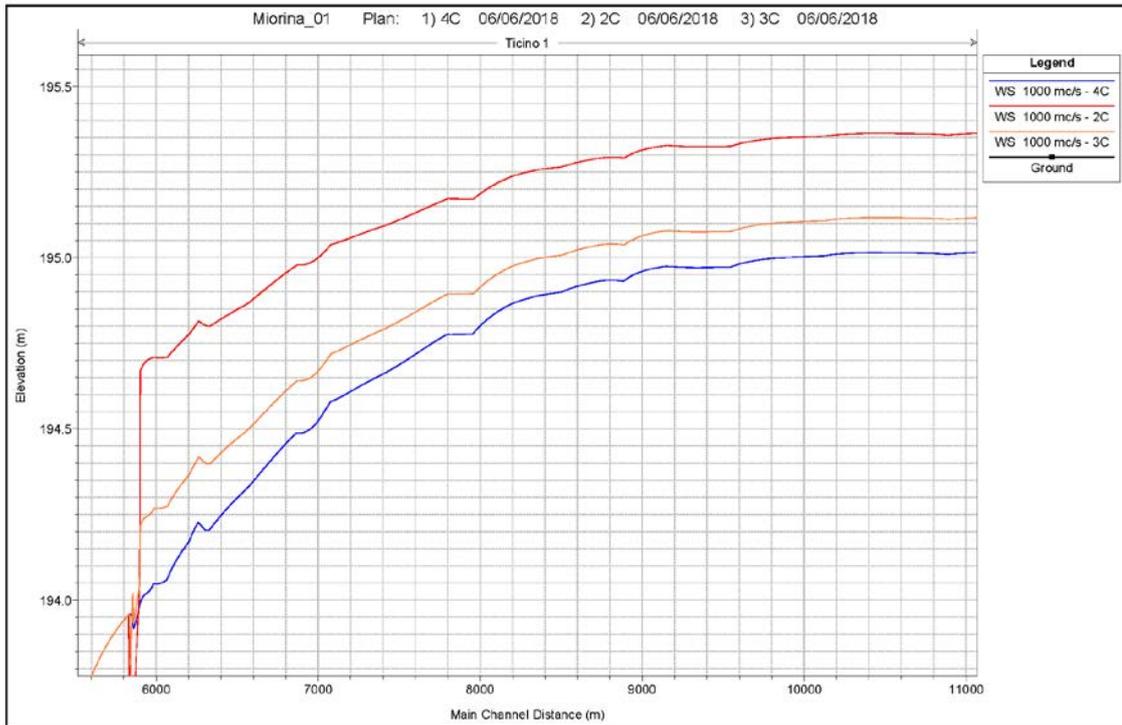


Figura 9: Profili idraulici in moto permanente – tratto Lisanza -Miorina - Portata 1000 m³/s

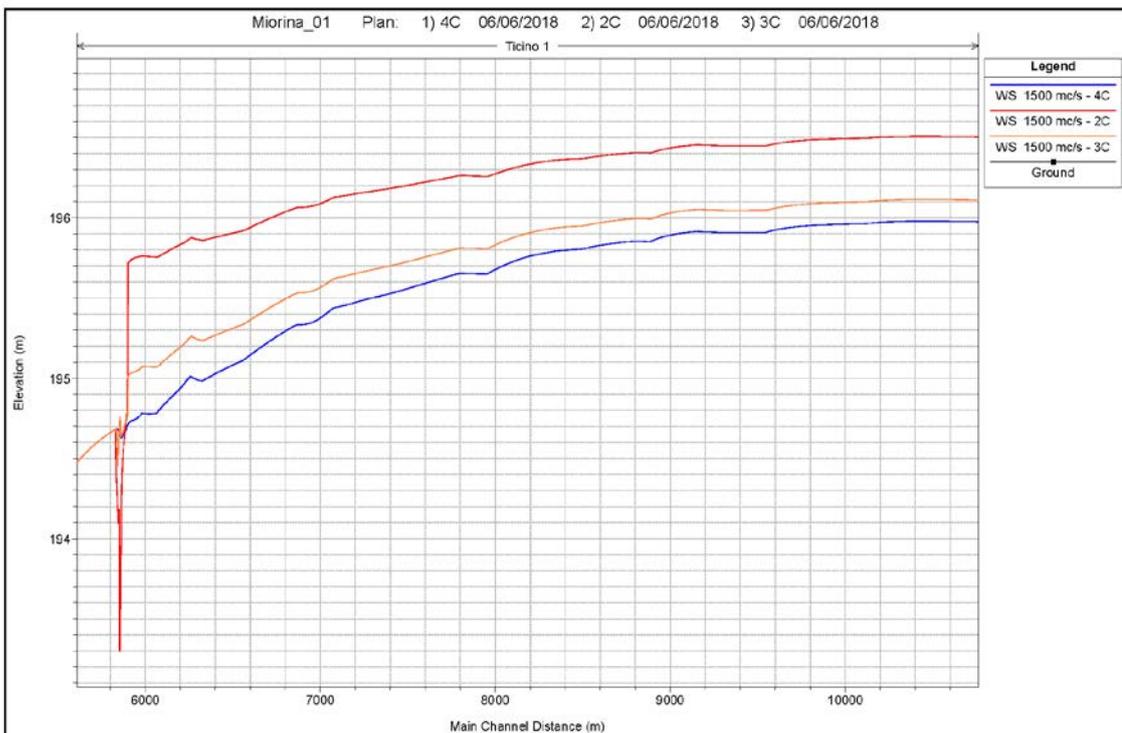


Figura 10: Profili idraulici in moto permanente – tratto Lisanza -Miorina - Portata 1500 m³/s

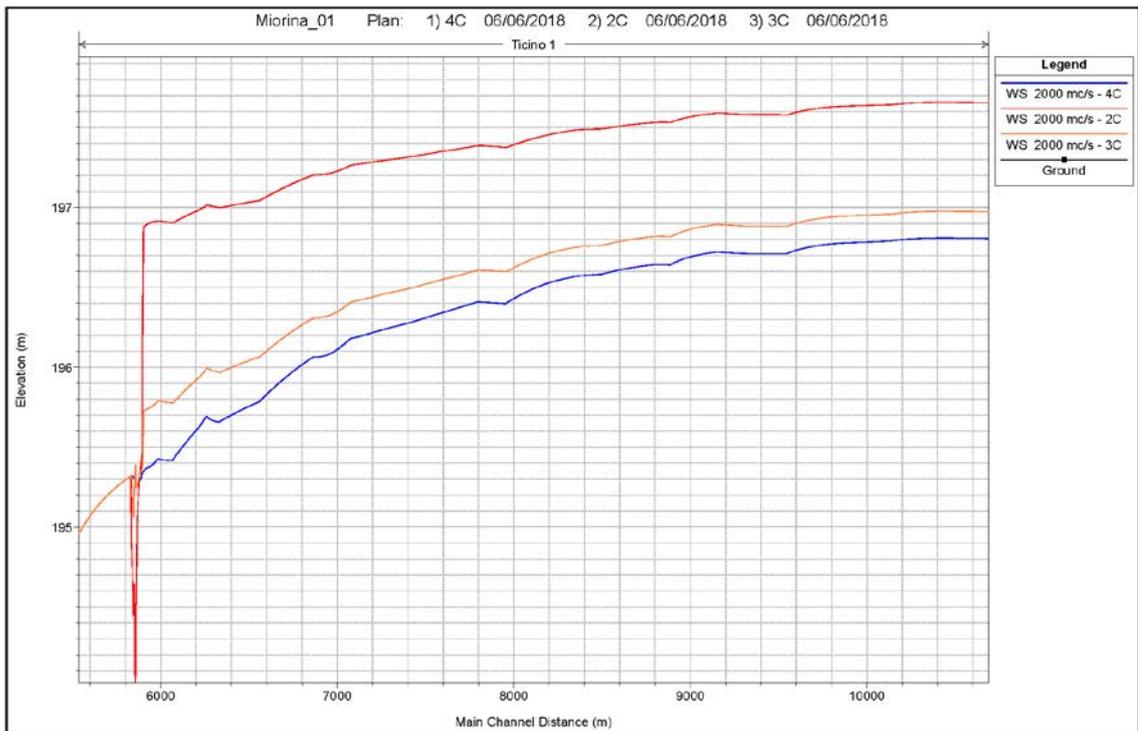


Figura 11: Profili idraulici in moto permanente – tratto Lianza -Miorina - Portata 2000 m³/s

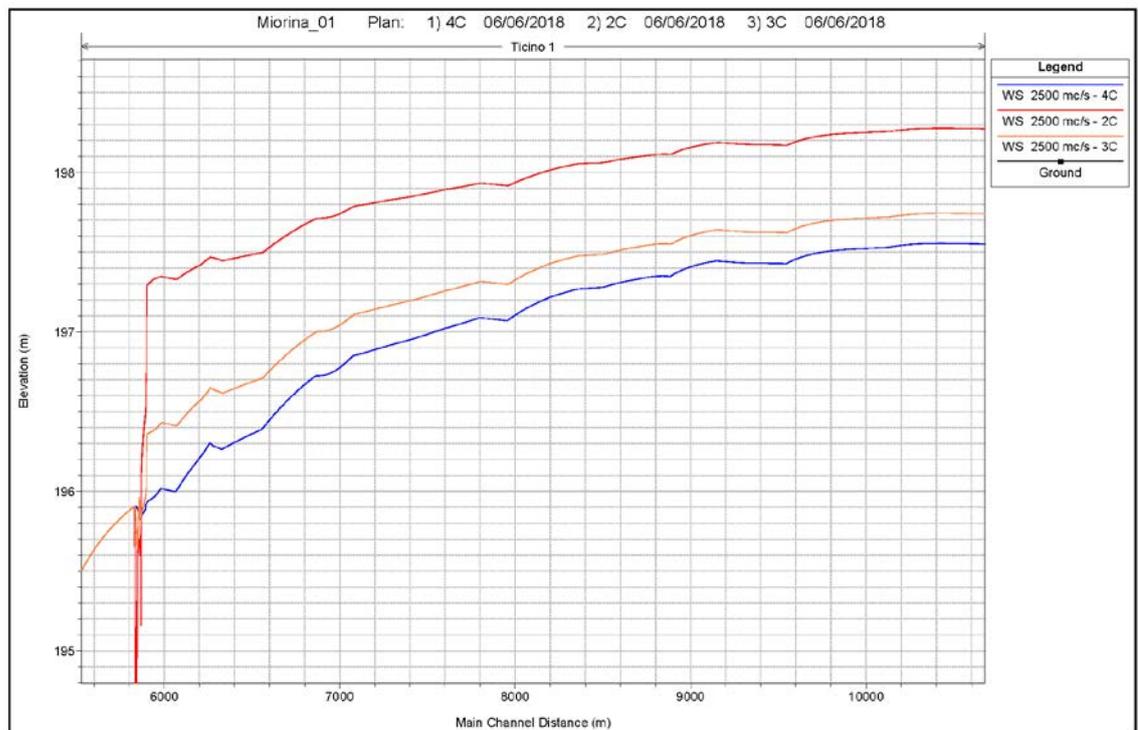


Figura 12: Profili idraulici in moto permanente – tratto Lianza -Miorina - Portata 2500 m³/s

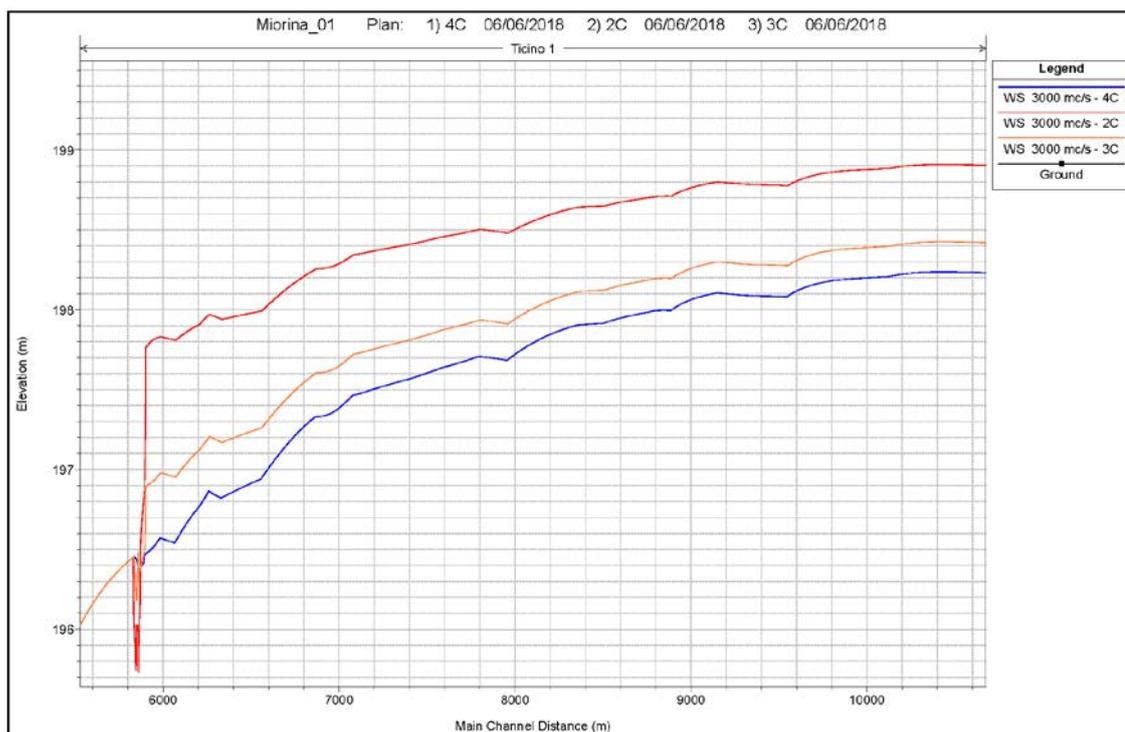


Figura 13: Profili idraulici in moto permanente – tratto Lisanza -Miorina - Portata 3000 m³/s

4.5 Limiti della modellazione idraulica

Prima di procedere con la rappresentazione delle scale di deflusso ottenute e con la descrizione di come esse sono state utilizzate per la valutazione degli effetti del cantiere sul regime idraulico del Ticino durante la fase di cantiere, si ritiene importante riassumere i limiti della modellazione svolta. Ciò serve da un lato per capire come e con quali risultati attesi la modellazione idraulica dell'incile possa essere migliorata, dall'altro per capire in che misura i risultati della modellazione possano essere ritenuti attendibili e se un eventuale errore del modello sia o non sia da considerarsi a favore di sicurezza. Ciò premesso, si ritiene che i principali limiti del modello siano riassumibili nei seguenti 4 punti:

- 1) Le sezioni trasversali hanno un'estensione limitata: non coprono interamente l'alveo interessato dal deflusso delle piene, il che porta a sottostimare la sezione utile per il deflusso; questo errore cresce progressivamente con la portata transiente e, a parità di portata imposta, determina una sottostima dei livelli idrometrici nelle sezioni a monte della Miorina.

- 2) Le sezioni utilizzate sono datate, in quanto sono state ricavate da un rilievo effettuato nel 1990; sezioni più aggiornate, costruite integrando rilievi batimetrici in alveo con rilievi Lidar della parte emersa consentirebbero di ricostruire più fedelmente la geometria dell'alveo di magra e di piena nel tratto di interesse.
- 3) Per le finalità del presente lavoro sarebbe opportuno disporre di sezioni più fitte nei tratti a monte e a valle dello sbarramento della Miorina.
- 4) Non è stato possibile calibrare il modello nelle due configurazioni di progetto (1 o 2 campate chiuse fino alla quota di 195.50 m s.l.m.).
- 5) La chiusura di una o due campate durante il cantiere, specialmente con portate elevate, determina un flusso d'acqua da destra (campate chiuse) verso sinistra (campate aperte), con conseguente perdita di carico idraulico; il modello idraulico utilizzato, in quanto monodimensionale, non è in grado di simulare questo fenomeno.

4.6 **Le scale di deflusso del Lago Maggiore in fase di cantiere**

Per la costruzione delle scale di deflusso, per ciascuna delle 3 configurazioni geometriche di riferimento, sono state effettuate 36 simulazioni con portate crescenti da 250 m³/s a 3'000 m³/s.

Le quote idrometriche calcolate in corrispondenza delle sezioni dotate di idrometro, ossia Sesto Calende, Miorina-monte e Miorina-valle, sono state estrapolate e interpolate con funzioni polinomiali di II grado, ottenendo le curve riportate nelle figure che seguono. Per quanto riguarda la sezione in corrispondenza dell'idrometro di Sesto Calende, le funzioni ottenute sono state sovrapposte alla scala di deflusso in regime libero proposta nel 2016, illustrata nel paragrafo 3.1.1.

Per quanto riguarda la sezione Miorina-monte, per ovviare al limite della modellazione esposto al punto 5) del precedente paragrafo, invece di utilizzare la sezione della sezione 5867, quella utilizzata per la calibrazione del modello, viene da qui in poi utilizzata la sezione 5958, collocata circa 100 m a monte della precedente, e sicuramente meglio in grado di rappresentare il comportamento idraulico del lago lungo tutta la schiera della palancolatura di monte.

Dal grafico di Figura 14 si osserva che la funzione ottenuta corrispondente a 4 campate aperte (4C) tende a sottostimare la portata ricavata con la scala di deflusso in regime libero. Tale differenza è trascurabile per portate inferiori a 1'000 m³/s, prossima al 5% per portate dell'ordine di 2'000 m³/s e di circa il 7% per portate di 3'000 m³/s. Questo scostamento, dovuto probabilmente ai limiti della modellazione geometrica e della calibrazione del modello descritti nel paragrafo precedente, vale a rigor di logica anche per le due scale di deflusso ricavate per la fase di cantiere. Il fatto di sottostimare la portata scaricata, ossia la **"capacità del lago di svuotarsi" a parità di livello idrometrico**, per quelle che sono le finalità del presente lavoro, costituisce chiaramente un elemento a favore di sicurezza.

In Figura 15 è invece riportato l'andamento della perdita di capacità di deflusso del lago in funzione del livello idrometrico a Sesto Calende. Dai grafici si vede come tale perdita sia mediamente dell'ordine del 5-6% nel caso venga chiusa una sola campata e raggiunga valori dell'ordine del 20% quando le campate chiuse diventano due.

Le curve riportate in Figura 15 sono state ottenute dal rapporto tra le scale di deflusso ricavate nella modellazione: la curva 2C% è calcolata come $1-2C/4C$, la curva 4C% come $1-3C/4C$. Per il calcolo si è preferito utilizzare la funzione 4C piuttosto che la scala di deflusso in regime libero "ufficiale" elaborata nel 2016, in quanto essa è stata ricavata con le stesse metodologie e ipotesi delle funzioni 2C e 3C e si presta quindi meglio a essere confrontata con le due funzioni che rappresentano la sezione parzializzata.

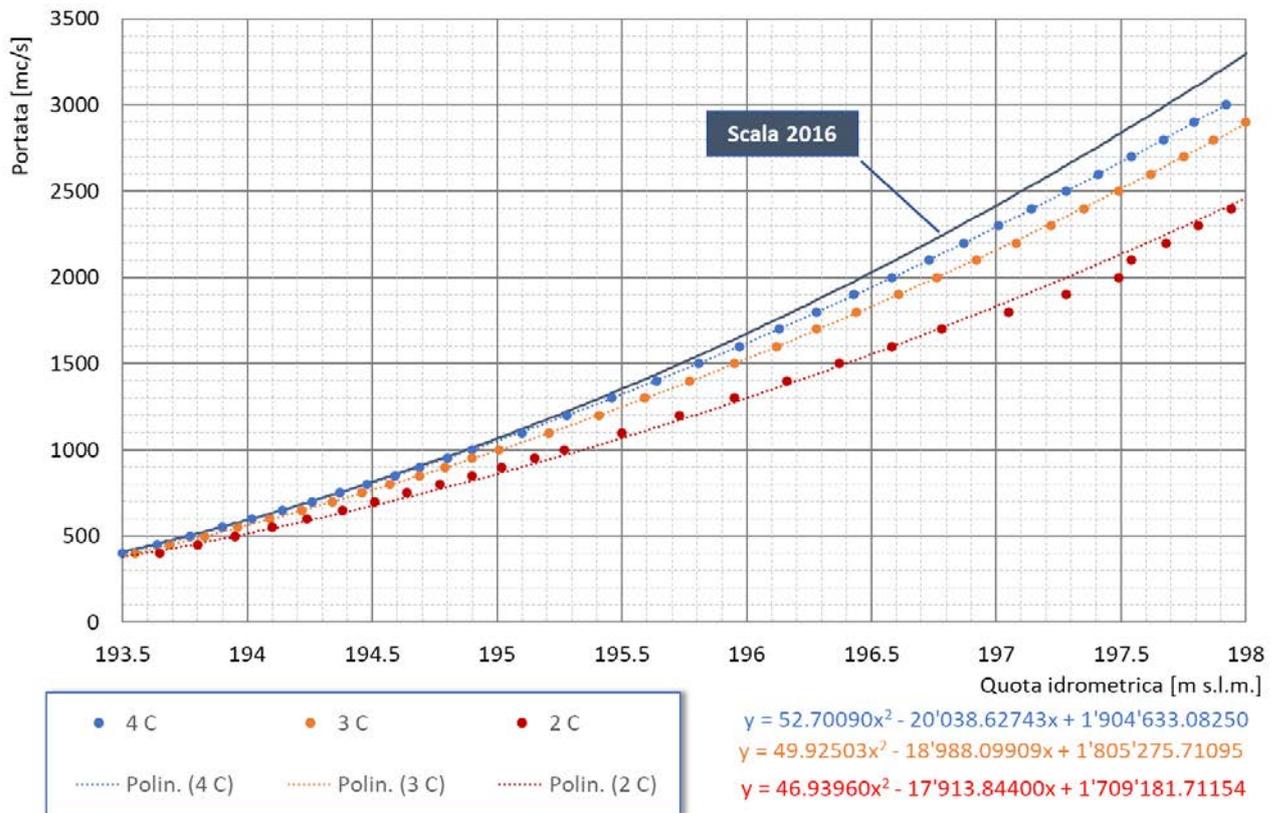


Figura 14: Sezione in corrispondenza dell'idrometro di Sesto Calende -Scale di deflusso ricavate

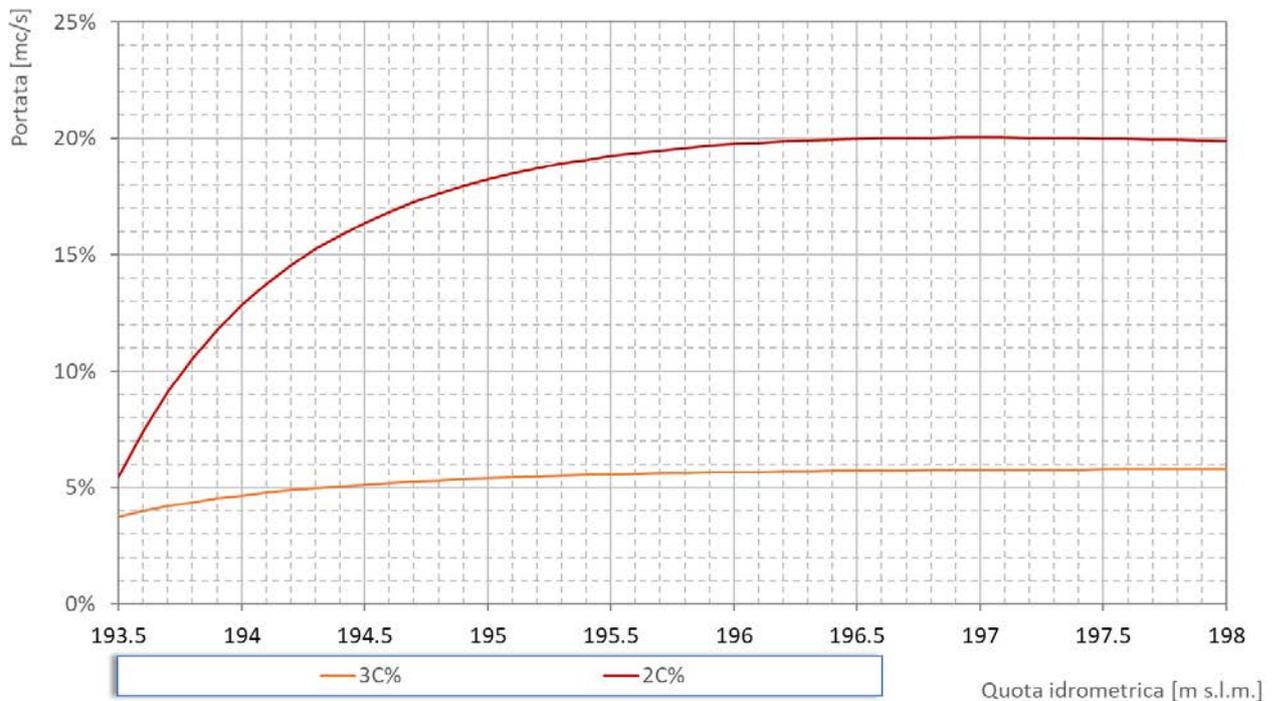


Figura 15: Perdita di capacità di deflusso in regime libero, in funzione dell'altezza idrometrica a Sesto Calende

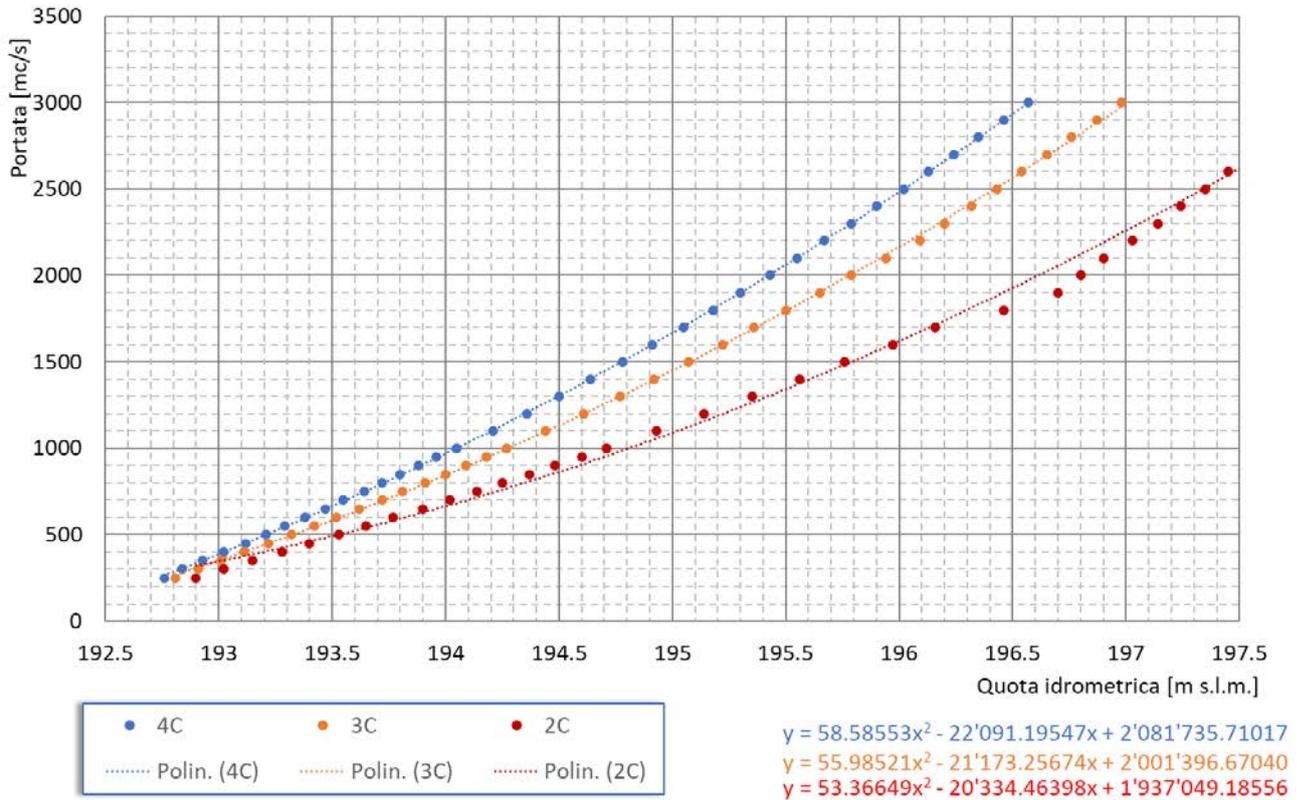


Figura 16: Sezione in corrispondenza dell'idrometro di Miorina M - Interpolazione delle scale di deflusso

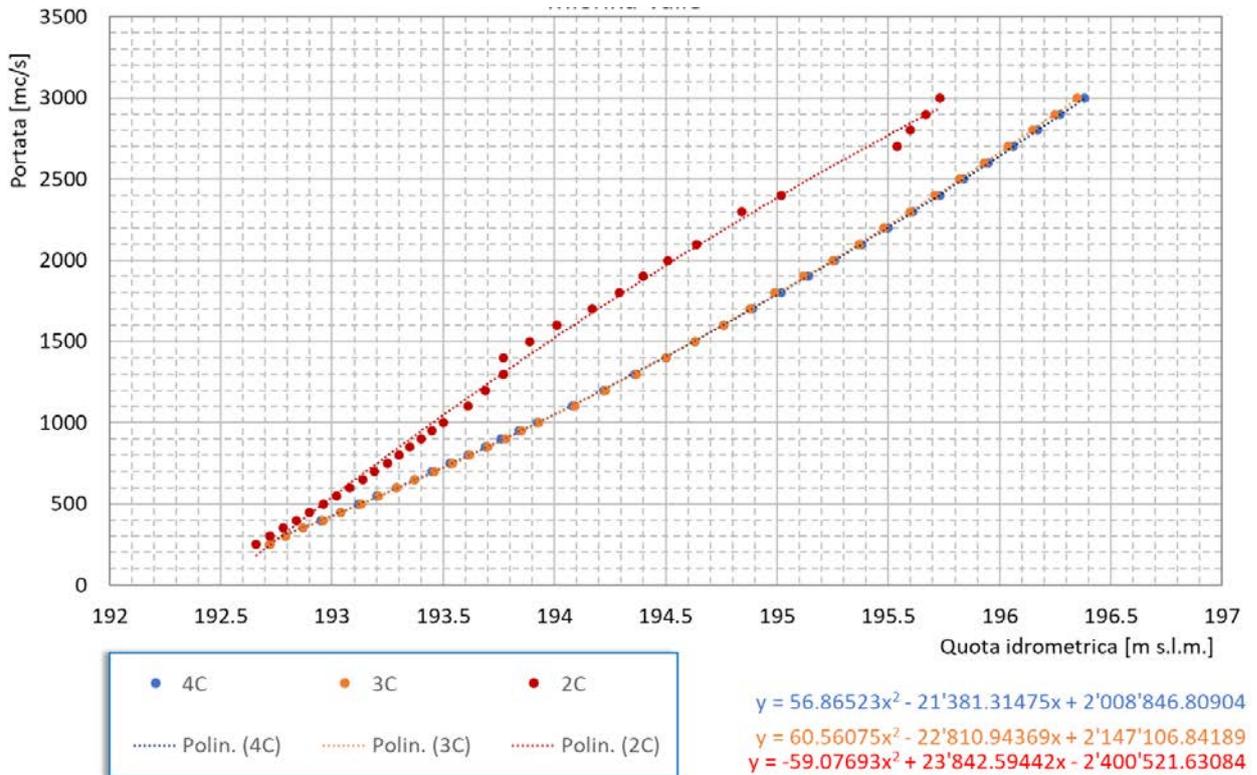


Figura 17: Sezione in corrispondenza dell'idrometro di Miorina V - Interpolazione delle scale di deflusso

5. EFFETTI DEL CANTIERE SUL REGIME IDRAULICO DEL LAGO MAGGIORE E DEL FIUME TICINO

Come già anticipato in premessa, le opere in progetto, una volta ultimate, non hanno alcun tipo di effetto sul regime idraulico del Lago Maggiore e del Fiume Ticino. Gli unici effetti previsti derivano dalle opere provvisorie che saranno realizzate durante la fase di cantiere, le quali determinano una riduzione della sezione di deflusso in corrispondenza dell'incile, con effetti sull'andamento dei livelli del Lago Maggiore e sulle portate scaricate nel Fiume Ticino.

5.1 Riduzione della capacità di scarico del lago Maggiore

Lo sbarramento della Miorina ha lo scopo di invasare temporaneamente una riserva d'acqua nel Lago Maggiore per poterla utilizzare in momenti successivi per soddisfare gli utilizzatori della risorsa idrica che fanno riferimento al Ticino sublacuale. Il ciclo di accumulo della risorsa idrica ha indicativamente una periodicità semestrale. Grazie allo sbarramento, normalmente viene rilasciata nel Ticino una portata minore di quella che defluirebbe naturalmente dal lago verso il fiume; quando invece lo sbarramento è completamente aperto (sbarramento abbattuto), la portata scaricata dal lago non è più in alcun modo controllata dal regolatore. Nel primo caso, si parla di regime regolato, nel secondo di regime libero.

È importante chiarire questa differenza perché in **regime regolato** il gestore dello sbarramento decide quale deve essere la portata da rilasciare e -sulla base di questa decisione- agisce sullo sbarramento in modo da rilasciare la portata stabilita. In **regime libero** si instaura invece una relazione diretta tra livello del lago e portata erogata, che non dipende più in alcun modo dalle scelte del gestore.

Questa premessa è importante per comprendere che quando il lago si trova in condizioni di regime regolato l'effetto delle opere provvisorie è nullo: in ogni caso, infatti, il regolatore agirà sullo sbarramento in modo da rilasciare la portata richiesta dagli utenti di valle. Quello che può succedere, vista la ridotta capacità di deflusso, è che il regolatore per soddisfare la domanda d'acqua si trovi a dover istaurare le condizioni di re-

gime libero con maggior frequenza, situazione che può presentarsi più che altro in condizioni di magra.

La valutazione degli effetti del cantiere riguarderà quindi le sole condizioni di regime libero. Per recepire le osservazioni della Direzione Generale per le Dighe del Ministero Infrastrutture, che prescrive di mantenere un livello di massima regolazione in fase di cantiere di +50cm sull'idrometro di Sesto Calende, le analisi di seguito riportate analizzano il regime libero a partire da +50 cm sull'idrometro di Sesto Calende, mentre nel progetto definitivo le stesse analisi cominciavano a +100 cm.

In condizioni di normale esercizio dello sbarramento, la relazione tra livello idrometrico a Sesto Calende e portata erogata in regime libero è rappresentata dalla scala di deflusso in regime libero, la cui equazione è riportata nel paragrafo 3.1.1. Durante il cantiere, in funzione del numero di campate interessate dalla palancoatura, tale funzione assume l'andamento riportato in Figura 14. Le tre equazioni appena illustrate hanno la seguente forma:

- a) 4 campate aperte: $Q = 72.022 [(H_{SC} - 193.016) + 1,920]^{1.979}$
- b) 3 campate aperte: $Q = 49.925 H_{SC}^2 - 18'988.099 H_{SC} + 1'805'275.711$
- c) 2 campate aperte: $Q = 46.940 H_{SC}^2 - 17'913.844 H_{SC} + 1'703'181.712$

dove:

- Q: portata scaricata in regime libero [m³/s]
- H_{SC}: quota idrometrica all'idrometro di Sesto Calende [m s.l.m.]

Evidentemente durante le attività di montaggio e smontaggio delle palancole a protezione della quarta e della terza campata, il regime idraulico del Fiume Ticino sarà rappresentato da una condizione intermedia tra la funzione a) e la funzione b) e tra la funzione b) e la funzione c).

Gli effetti del restringimento della sezione di deflusso dovuti al cantiere sono ben rappresentati in Figura 15: con tre campate aperte la capacità di deflusso del lago si riduce mediamente del 5-6%, mentre con due campate aperte l'entità della riduzione arriva a raggiungere valori massimi dell'ordine del 20%.

Tali valori sono significativamente minori di quelli che ci si può aspettare da una valutazione grossolana del problema: dimezzando la larghezza della sezione di deflusso ci si aspetta infatti una riduzione del 50% della sezione di deflusso, così come chiudendo una campata su quattro ci si aspetterebbe una riduzione del 25%.

Il fatto di avere una riduzione della capacità di deflusso significativamente minore rispetto a quella attesa dipende dal fatto che nel tratto di "lago" compreso tra l'idrometro di Sesto Calende e lo sbarramento della Miorina, lungo circa 2.6 km, il lago assume un regime idraulico di tipo fluviale, ossia presenta un profilo idraulico non orizzontale, ma caratterizzato da un gradiente monte-valle; tale gradiente, come dimostrato dalla modellazione idraulica descritta nel Capitolo 4, aumenta al crescere della portata defluente (Figura 18).

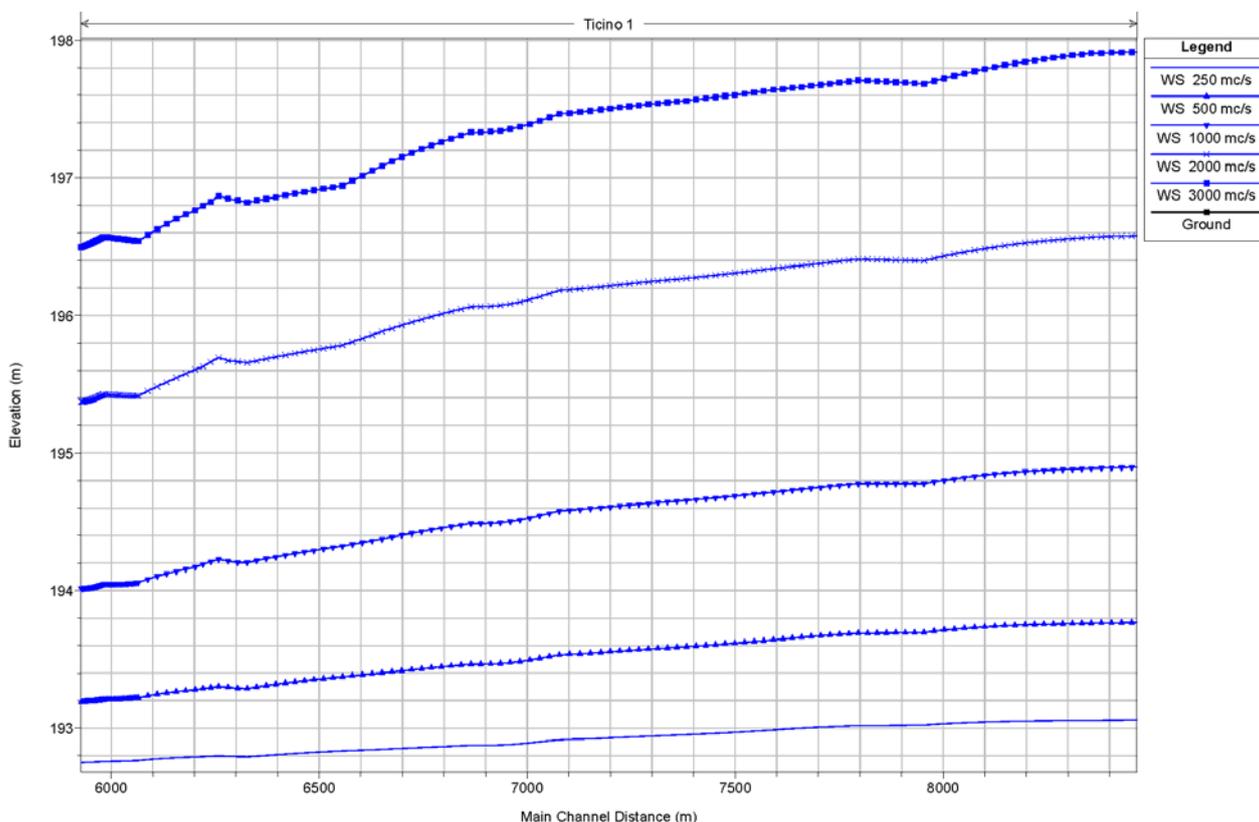


Figura 18: Profili idraulici in regime libero nel tratto compreso tra l'idrometro di Sesto Calende e lo sbarramento della Miorina - sbarramento in normale configurazione di esercizio con 4 campate disponibili per il deflusso

Riducendo la larghezza della sezione di deflusso, ossia chiudendo una o due delle quattro campate che costituiscono lo sbarramento della Miorina, il profilo idraulico ricavato per una data portata non subisce solo una traslazione verso l'alto, ma assume un andamento meno inclinato, motivo per cui la riduzione di portata è minore di quanto ci si aspetta da una prima analisi superficiale. Questo fenomeno si osserva chiaramente confrontando i vari profili idraulici riportati nel paragrafo 4.4.

Per meglio comprendere in che cosa si traduce la riduzione della capacità di deflusso appena illustrata, nel successivo paragrafo sono presentati i risultati di alcune simulazioni svolte ipotizzando che durante alcuni eventi di piena avvenuti negli anni passati, lo sbarramento fosse nella configurazione che assumerà durante il cantiere. Prima di presentare i risultati di queste simulazioni di tipo "dinamico", in Tabella 3 sono riportati i valori di portata relativi ad alcuni livelli idrometrici ritenuti particolarmente significativi, per le varie configurazioni dello sbarramento. In Tabella 4 sono invece riportati i risultati dell'applicazione a ritroso delle scale: dato un livello di riferimento, viene ricavata la corrispondente portata in condizioni di regime libero con le quattro campate aperte, quindi a partire da questo valore di portata viene nuovamente calcolato il livello idrometrico necessario per scaricare la suddetta portata nelle varie configurazioni di cantiere. Le due tabelle, rispetto al progetto definitivo, sono state aggiornate con i valori delle due piene di autunno 2018 e 2019.

H _{sc} [CM]	DESCRIZIONE	Q [M ³ /S]			
		Scala 2016	4C	3C	2C
+50	massimo livello di regolazione in fase di cantiere	414	405	389	381
+100	massimo livello di regolazione 15-9 11 15	600	597	569	520
+125	massimo livello di regolazione 15-3 9 15	706	703	668	598
+150	massimo livello di regolazione 15-11 3 15	821	816	774	681
+200	limite fascia demaniale	1'075	1'061	1'003	867
+213	colmo piena ott. 2019	1'148	1'129	1'067	919
+237	colmo piena nov. 2008	1'285	1'259	1'189	1'019
+255	colmo piena nov. 2018	1'396	1'361	1'285	1'098
+285	colmo piena nov. 2004	1'585	1'538	1'451	1'236
+341	colmo piena nov. 2002	1'974	1'894	1'785	1'516
+354	colmo piena nov. 2014	2'071	1'981	1'868	1'585
+426	colmo piena ott. 1993	2'646	2'497	2'353	1'997
+462	colmo piena ott. 2000	2'960	2'775	2'615	2'221

Tabella 3: portate scaricate in regime libero nelle varie configurazioni dello sbarramento

H _{sc} [CM] →	Q_4C [M ³ /S]	DESCRIZIONE	H _{sc} [CM]		
			4C	3C	2C
+50	405	massimo livello di regolazione in fase di cantiere	+50	+55	+59
+100	598	massimo livello di regolazione 15-9 11 15	+100	+107	+125
+125	703	massimo livello di regolazione 15-3 9 15	+125	+133	+156
+150	816	massimo livello di regolazione 15-11 3 15	+150	+160	+187
+200	1'061	limite fascia demaniale	+200	+212	+247
+213	1,129	colmo piena ott. 2019	+213	+225	+262
+237	1'259	colmo piena nov. 2008	+237	+250	+290
+255	1,361	colmo piena nov. 2018	+255	+269	+311
+285	1'538	colmo piena nov. 2004	+285	+300	+345
+341	1'894	colmo piena nov. 2002	+341	+358	+407
+354	1'981	colmo piena nov. 2014	+354	+372	+423
+426	2'497	colmo piena ott. 1993	+426	+446	+504
+462	2'776	colmo piena ott. 2000	+462	+483	+544

Tabella 4: Livelli idrometrici corrispondenti a varie portate scaricate, nelle varie configurazioni dello sbarramento

5.2 **Simulazione dell'andamento dei parametri idrometrici su alcuni eventi di piena storici**

Nel paragrafo precedente sono state riportate alcune relazioni tra livelli idrometrici e portate scaricate con diverse possibili configurazioni dello sbarramento, ricavate dall'applicazione del modello idraulico sviluppato nell'ambito del presente lavoro. Si tratta di relazioni "istantanee", che mettono appunto in relazione un valore di livello ad uno di portata (e viceversa), senza considerare la dinamica dell'evento di piena, determinata essenzialmente dalle condizioni iniziali e dall'andamento temporale degli afflussi a lago.

Per sviluppare un'analisi dinamica di questo tipo ci possono essere essenzialmente tre approcci:

[1] Utilizzare eventi storici caratterizzati da:

- ✓ una serie di afflussi ricavata da elaborazioni ex post;
- ✓ un determinato livello iniziale del lago;
- ✓ delle scelte precise operate del regolatore, costituite essenzialmente dal momento in cui viene abbattuto lo sbarramento;

per simulare come si sarebbe comportato il sistema Lago Maggiore - Fiume Ticino con una o due campate permanentemente chiuse.

[2] Utilizzare gli stessi eventi di cui al punto precedente, ma cambiando il momento in cui viene abbattuto lo sbarramento ed eventualmente le condizioni iniziali; ad esempio questo tipo di analisi viene svolta per verificare come si comporta il sistema abbattendo lo sbarramento al superamento di un determinato livello.

[3] Creare degli eventi teorici, completamente artificiali, costituiti da un idrogramma in ingresso semplificato e da un livello idrometrico iniziale definito in sede di simulazione.

Le analisi di seguito riportate sono state effettuate facendo riferimento ai primi due metodi illustrati, utilizzando il modello di calcolo descritto dettagliatamente nel Capitolo 3. Le simulazioni di tipo [1] sono state fatte con l'intento di simulare cosa sarebbe accaduto se in quelle circostanze il cantiere fosse stato presente, mantenendo però in-

variati i criteri di gestione (lo sbarramento viene abbattuto nello stesso momento). Le simulazioni di tipo [2] hanno invece lo scopo di verificare cosa sarebbe successo nelle stesse circostanze, ma trovandosi a inizio evento nelle condizioni più sfavorevoli che potrebbero verificarsi durante il cantiere, ossia con il livello del lago prossimo al limite di massima regolazione (+50 cm all'idrometro di Sesto Calende) e lo sbarramento non ancora abbattuto. Uno degli scopi di questo secondo set di simulazioni è di definire tempi di crescita della piena e livelli di riferimento per formulare il piano di evacuazione del cantiere.

Non sono infine state effettuate analisi di tipo [3].

Sono stati simulati complessivamente 16 eventi storici, compresi tra il 1977 e il 2019. Tutti gli eventi scelti ricadono nel periodo 15 luglio / 31 marzo, periodo in cui è prevista la presenza del cantiere. Non sono stati quindi presi in considerazione gli eventi cosiddetti "primaverili". In realtà gli eventi rilevanti sono poi sempre avvenuti tra settembre e dicembre.

Nelle pagine che seguono sono riportati i risultati delle simulazioni svolte. Gli eventi simulati non sono riportati in ordine cronologico, ma in ordine decrescente in base al massimo livello raggiunto dal lago.

Per ogni simulazione sono riportati in forma grafica solo gli andamenti temporali dei livelli. Sono stati omessi i grafici relativi alle portate rilasciate, presenti invece nella relazione presentata in sede di progettazione definitiva.

Nei grafici riportati di seguito le linee verdi rappresentano l'andamento dei livelli idrometrici "reali", rilevati dall'idrometro di Sesto Calende nel corso dell'evento di piena; le linee blu l'andamento del livello simulato con la configurazione "**4 campate aperte**", le linee arancioni si riferiscono invece alla configurazione "**3 campate aperte**", mentre le linee rosse si riferiscono alla configurazione "**2 campate aperte**"; le linee azzurre tratteggiate indicano l'andamento temporale degli afflussi a lago. Le linee colorate verticali indicano infine le manovre di abbattimento dello sbarramento, la linea nera verticale (T_P) il superamento del valore di $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ come portate in ingresso al lago, momento a cui è stato convenzionalmente associato l'inizio dell'evento di piena.



Figura 19: Legenda degli idrogrammi riportati nelle prossime pagine

In tutti i 16 eventi proposti la manovra di completo abbattimento dello sbarramento della Miorina è avvenuta con livelli idrometrici a Sesto Calende superiori a + 50 cm.

Tutte le simulazioni i tipo [2] contemplano il completo abbattimento dello sbarramento al superamento del livello di +50 cm all'idrometro di Sesto Calende.

Per ciascun evento i risultati e i grafici delle analisi di tipo [1] e [2] sono presentati all'interno dello stesso paragrafo e messi tra loro a confronto.

Nei casi di piene con più colmi progressivamente crescenti, è stato indicato nei grafici con un cerchio viola a quale dei colmi si riferiscono i valori riportati nelle tabelle riepilogative. La scelta di studiare il primo colmo, piuttosto del più alto, è stata effettuata in base alle caratteristiche di ciascun evento.

5.2.2 Ottobre 1993

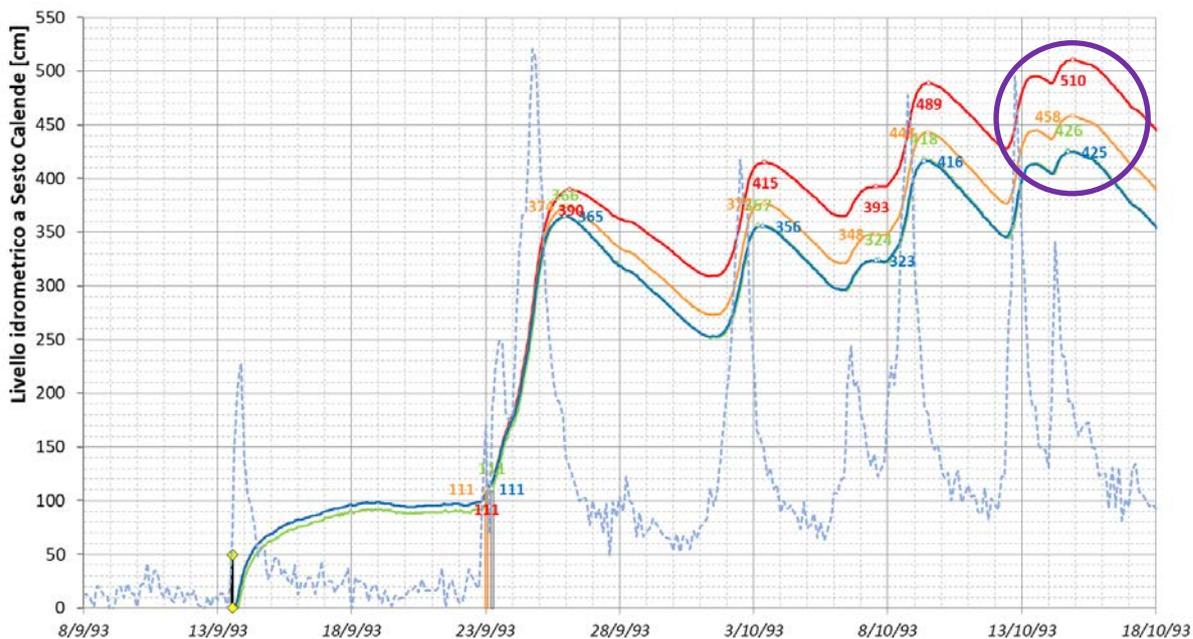


Figura 22 – Evento di piena di ottobre 1993 - simulazioni di tipo [1] – abbattimento a cm +111 cm

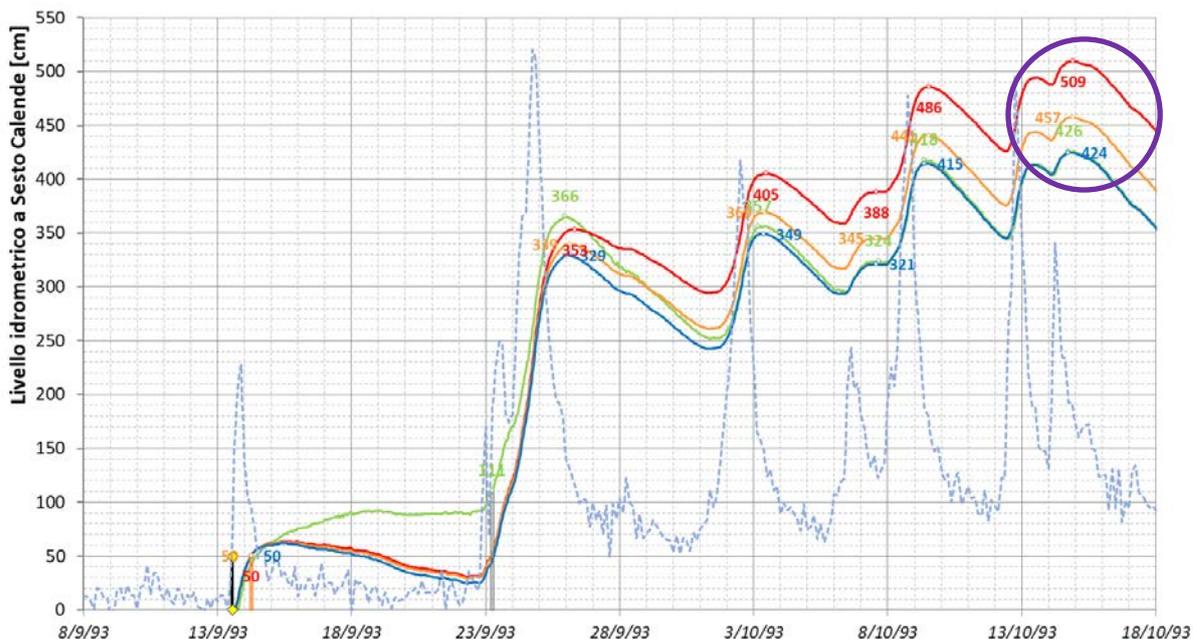


Figura 23 – Evento di piena di ottobre 1993 - simulazioni di tipo [2] – abbattimento a cm +50 cm

PARAMETRO	VALORI REGISTRATI	SIMULAZIONI DI TIPO [1] LIVELLO INIZIALE: -4 CM ABBATTIMENTO: +111 CM			SIMULAZIONI DI TIPO [2] LIVELLO INIZIALE: -4 CM ABBATTIMENTO: +50 CM		
		4 C	3C	2C	4C	3C	2C
		Altezza massima [cm]	426	425	458	510	455
Portata massima [m ³ /s]	2648	2636	2585	2542	2898	2717	2527

Tabella 6– Evento di piena di ottobre 1993 - Colmi di piena e portate massime simulati

5.2.3 Novembre 2014

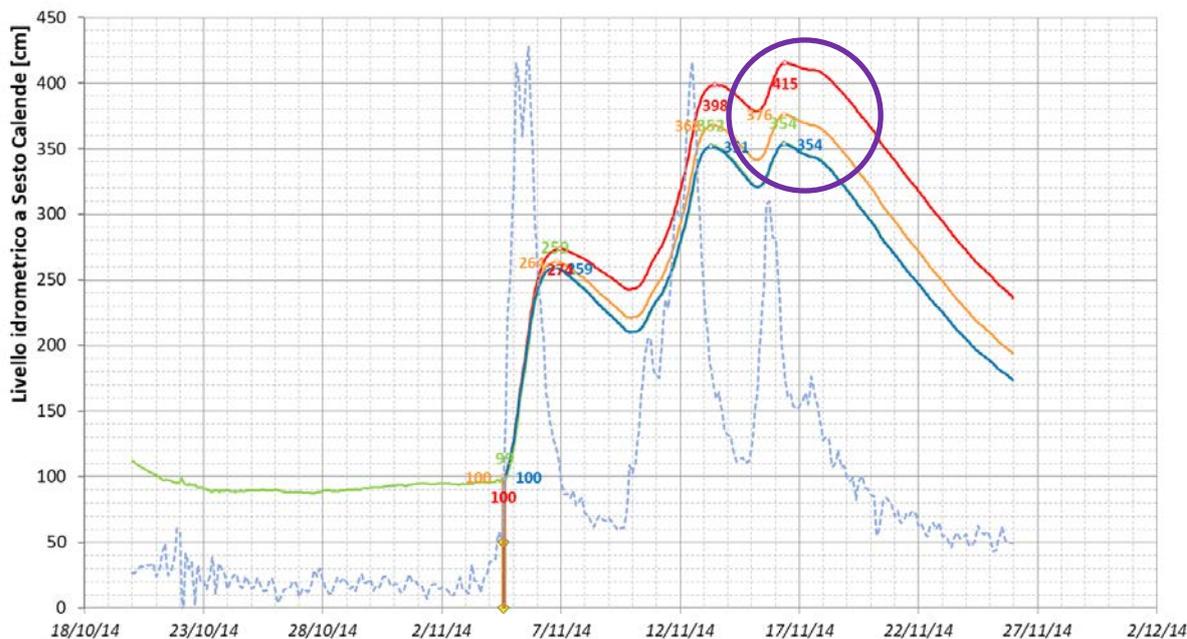


Figura 24 – Evento di piena di novembre 2014 - simulazioni di tipo [1] – abbattimento a cm +99 cm

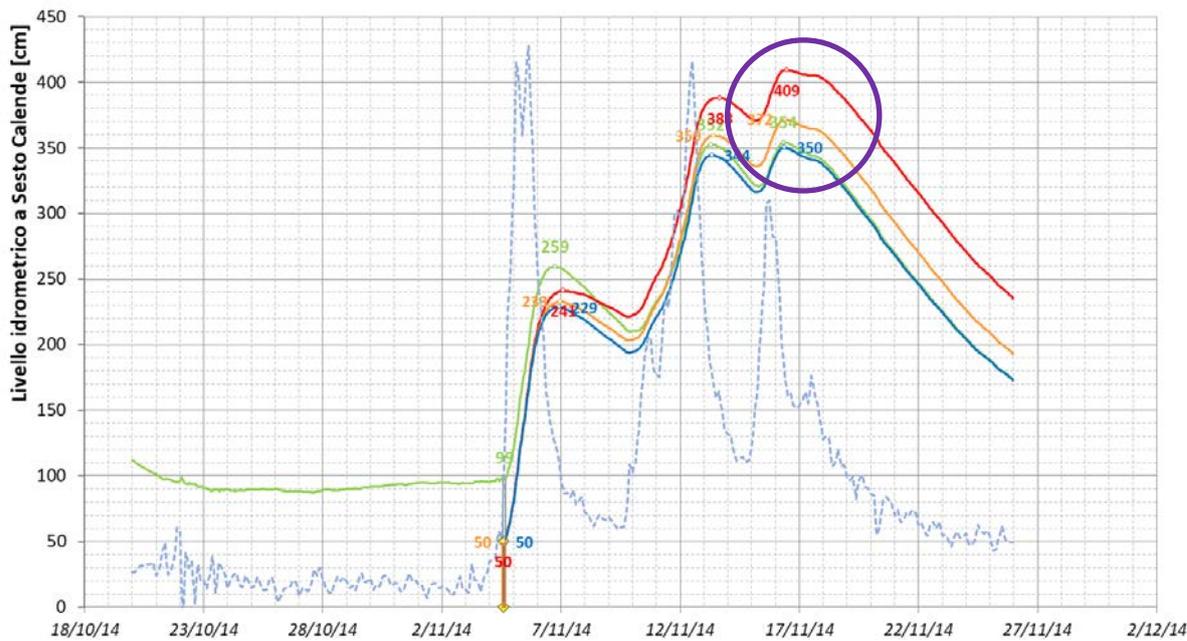


Figura 25 – Evento di piena di novembre 2014 - simulazioni di tipo [2] – abbattimento a cm +50 cm

PARAMETRO	VALORI REGISTRATI	SIMULAZIONI DI TIPO [1] LIVELLO INIZIALE: +112 CM ABBATTIMENTO: +99 CM			SIMULAZIONI DI TIPO [2] LIVELLO INIZIALE: +50 CM ABBATTIMENTO: +50 CM		
		4 C	3C	2C	4C	3C	2C
Altezza massima [cm]	354	354	376	415	350	372	409
Portata massima [m ³ /s]	2073	2067	2010	1932	2043	1981	1897

Tabella 7– Evento di piena di novembre 2014 - Colmi di piena e portate massime simulati

5.2.4 Ottobre 1977

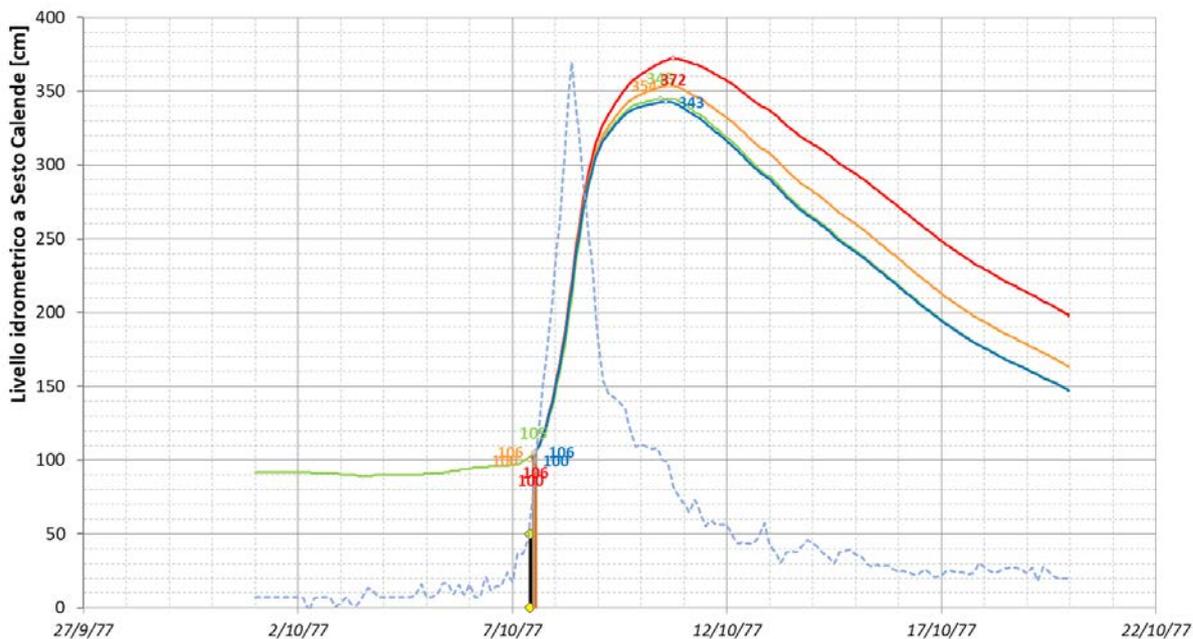


Figura 26 – Evento di piena di ottobre 1977 - simulazioni di tipo [1] – abbattimento a cm +105 cm

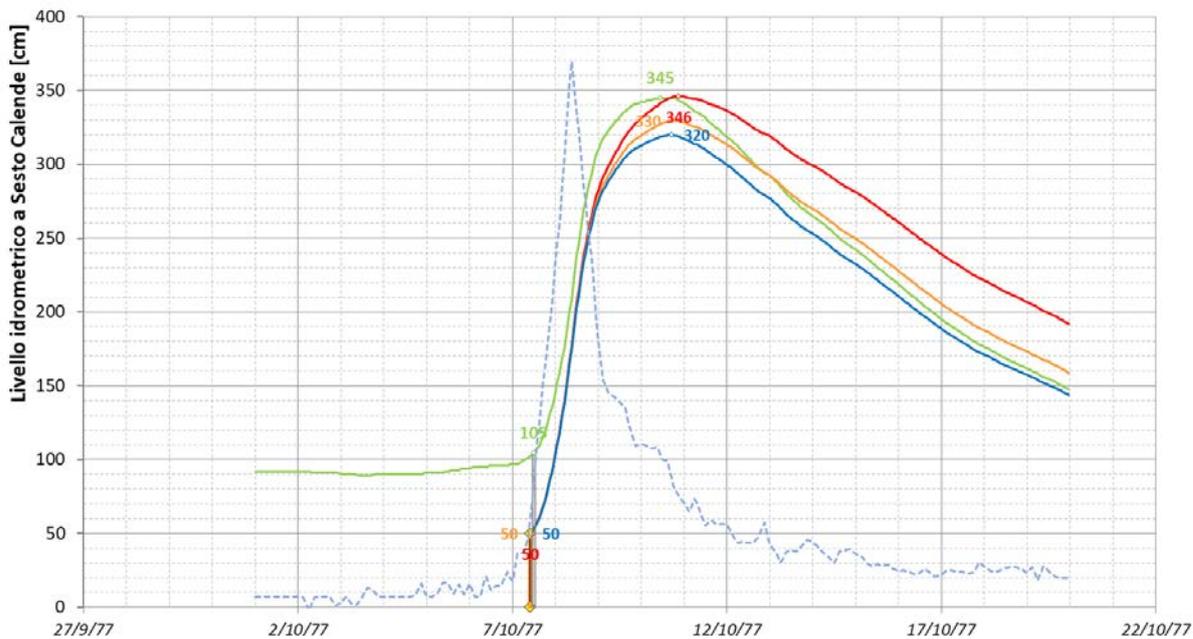


Figura 27 – Evento di piena di ottobre 1977 - simulazioni di tipo [2] – abbattimento a cm +50 cm

PARAMETRO	VALORI REGISTRATI	SIMULAZIONI DI TIPO [1] LIVELLO INIZIALE: +92 CM ABBATTIMENTO: +105 CM			SIMULAZIONI DI TIPO [2] LIVELLO INIZIALE: +50 CM ABBATTIMENTO: +50 CM		
		4C	3C	2C	4C	3C	2C
Altezza massima [cm]	345	343	354	372	320	330	346
Portata massima [m ³ /s]	2004	1986	1867	1684	1823	1715	1542

Tabella 8– Evento di piena di ottobre 1977 - Colmi di piena e portate massime simulati

5.2.6 Novembre 1996



Figura 30 – Evento di piena di novembre 1996 - simulazioni di tipo [1] – abbattimento a cm +151cm

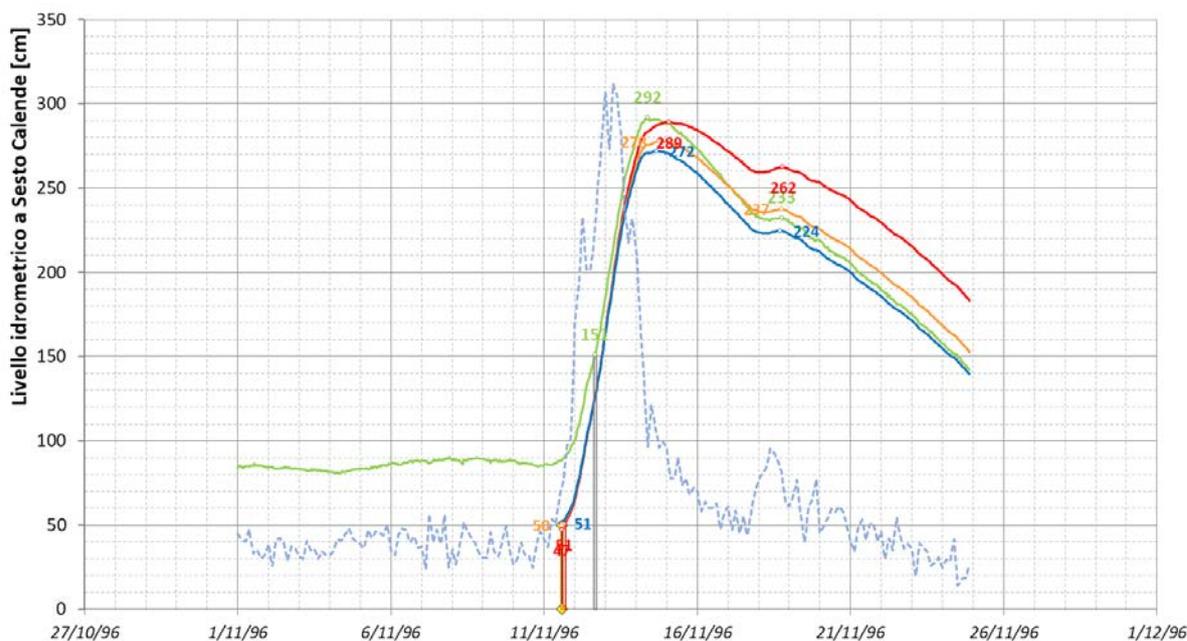


Figura 31 – Evento di piena di novembre 1996 - simulazioni di tipo [2] – abbattimento a cm +50 cm

PARAMETRO	VALORI REGISTRATI	SIMULAZIONI DI TIPO [1] LIVELLO INIZIALE: +84 CM ABBATTIMENTO: +151 CM			SIMULAZIONI DI TIPO [2] LIVELLO INIZIALE: +50 CM ABBATTIMENTO: +50 CM		
		4 C	3C	2C	4C	3C	2C
Altezza massima [cm]	292	293	298	309	271	278	289
Portata massima [m ³ /s]	1631	1638	1527	1350	1500	1409	1256

Tabella 10– Evento di piena di novembre 1996 - Colmi di piena e portate massime simulati

5.2.7 Novembre 2004

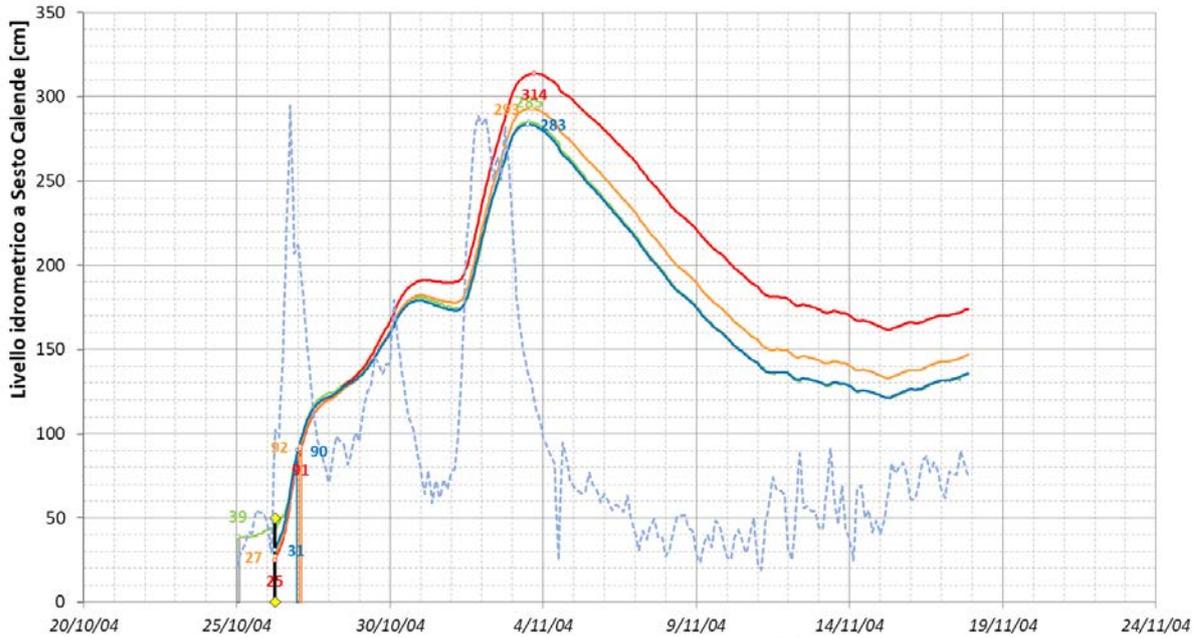


Figura 32 – Evento di piena di novembre 2004 - simulazioni di tipo [1] – abbattimento a cm +90 cm

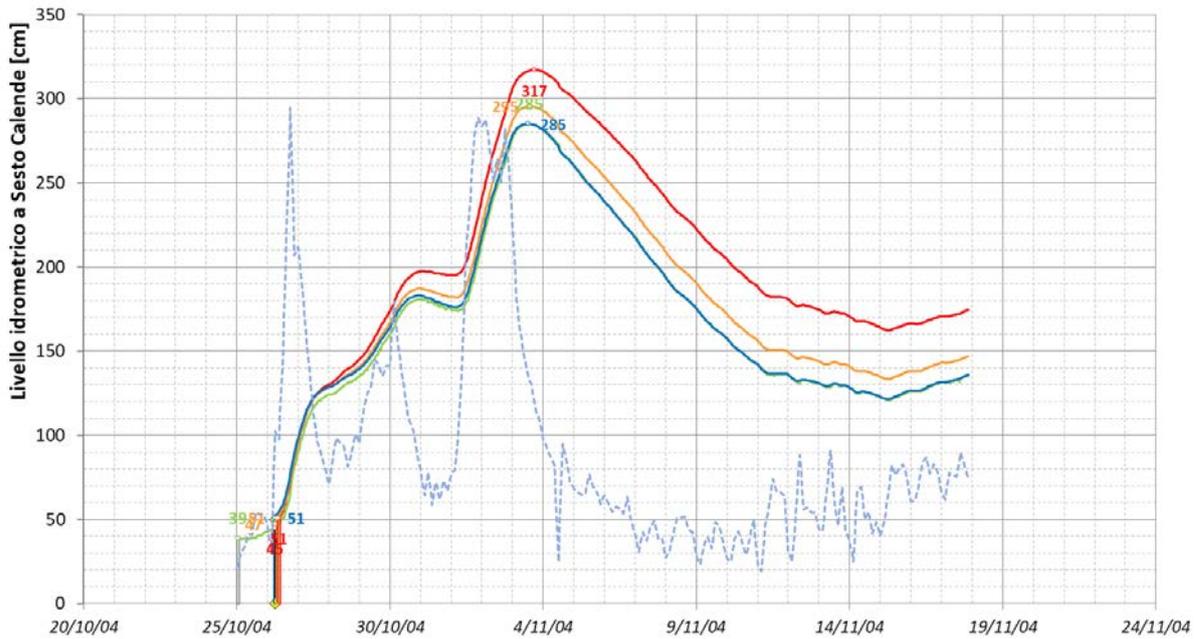


Figura 33 – Evento di piena di novembre 2004 - simulazioni di tipo [2] – abbattimento a cm +50 cm

PARAMETRO	VALORI REGISTRATI	SIMULAZIONI DI TIPO [1] LIVELLO INIZIALE: +39 CM ABBATTIMENTO: +90 CM			SIMULAZIONI DI TIPO [2] LIVELLO INIZIALE: +50 CM ABBATTIMENTO: +50 CM		
		4 C	3C	2C	4C	3C	2C
Altezza massima [cm]	285	284	293	313	285	295	317
Portata massima [m ³ /s]	1585	1574	1496	1375	1585	1511	1393

Tabella 11– Evento di piena di novembre 2004 - Colmi di piena e portate massime simulati

5.2.8 Ottobre 1988

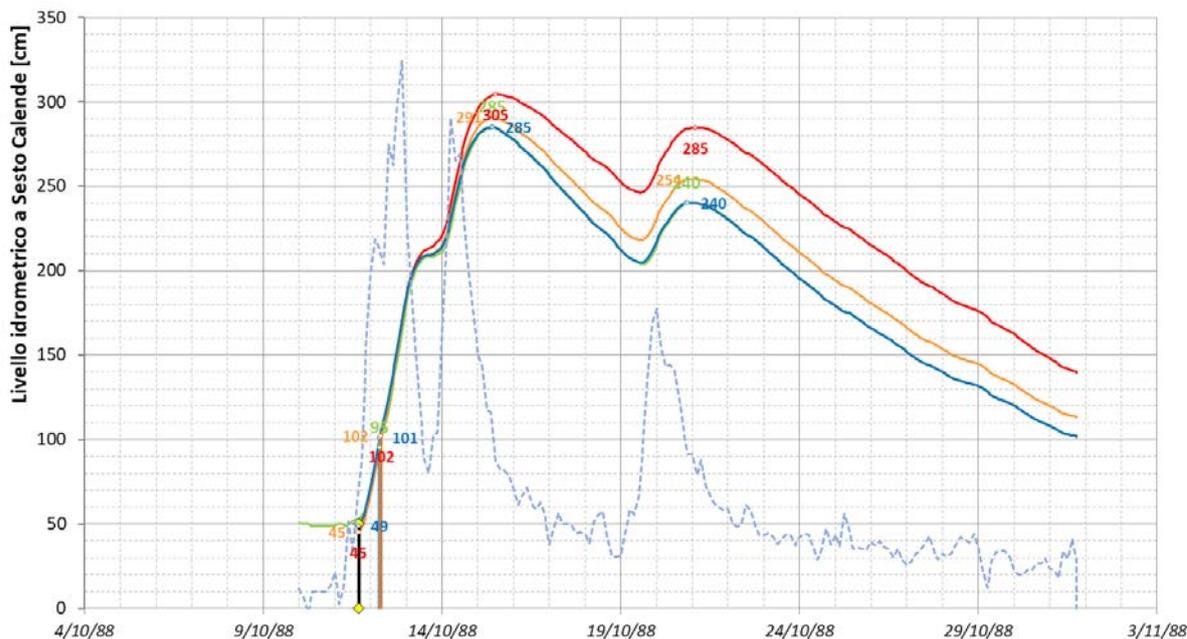


Figura 34 – Evento di piena di ottobre 1988 - simulazioni di tipo [1] – abbattimento a cm +95 cm

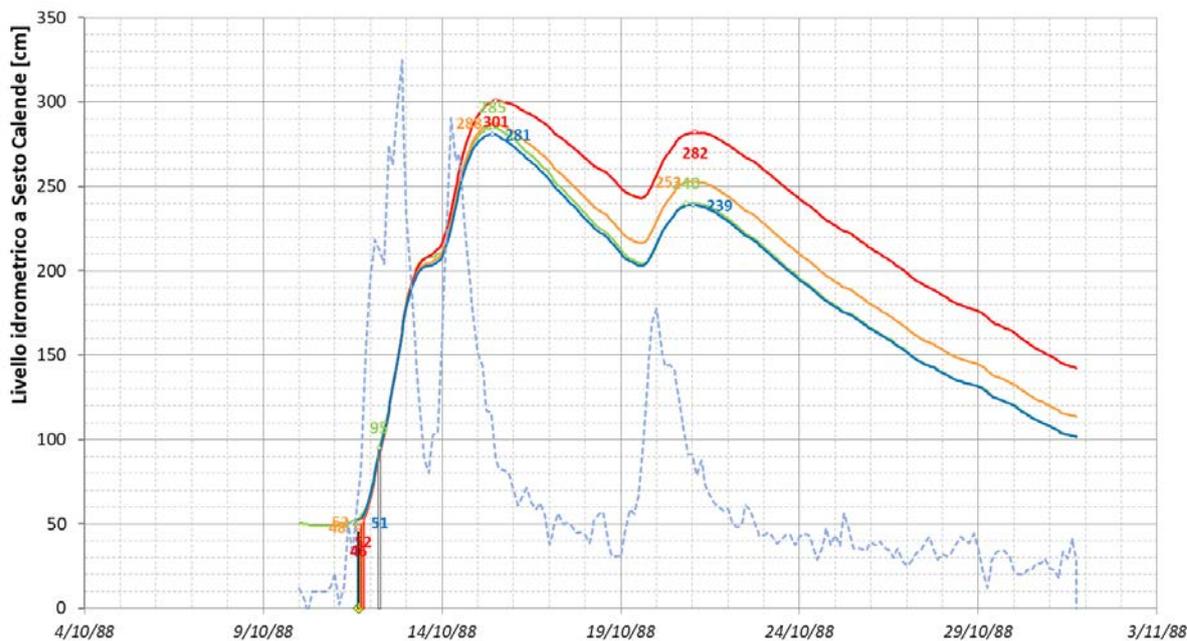


Figura 35 – Evento di piena di ottobre 1988 - simulazioni di tipo [2] – abbattimento a cm +50 cm

PARAMETRO	VALORI REGISTRATI	SIMULAZIONI DI TIPO [1] LIVELLO INIZIALE: +50 CM ABBATTIMENTO: +95 CM			SIMULAZIONI DI TIPO [2] LIVELLO INIZIALE: +50 CM ABBATTIMENTO: +50 CM		
		4 C	3C	2C	4C	3C	2C
		Altezza massima [cm]	285	285	292	305	281
Portata massima [m ³ /s]	1585	1588	1488	1333	1558	1466	1312

Tabella 12– Evento di piena di ottobre 1988 - Colmi di piena e portate massime simulati

5.2.9 Novembre 2018



Figura 36 – Evento di piena di novembre 2018 - simulazioni di tipo [1] – abbattimento a cm +45 cm

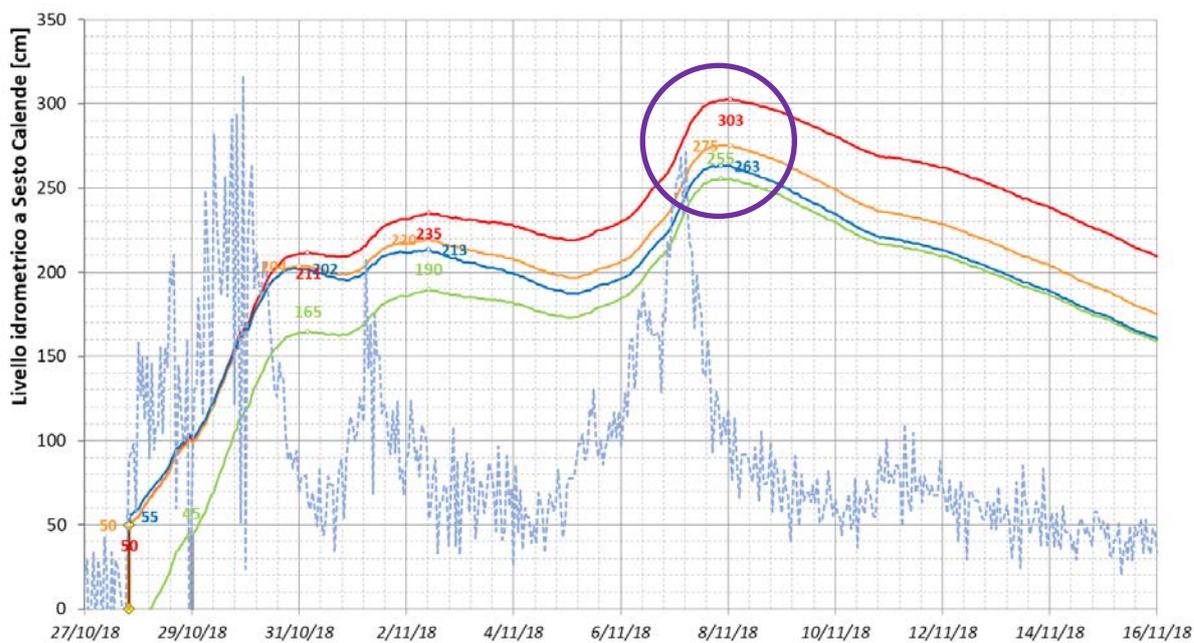


Figura 37 – Evento di piena di novembre 2018 - simulazioni di tipo [2] – abbattimento a cm +50 cm

PARAMETRO	VALORI REGISTRATI	SIMULAZIONI DI TIPO [1] LIVELLO INIZIALE: +22 CM ABBATTIMENTO: +45 CM			SIMULAZIONI DI TIPO [2] LIVELLO INIZIALE: +50 CM ABBATTIMENTO: +50 CM		
		4 C	3C	2C	4C	3C	2C
		Altezza massima [cm]	255	256	267	292	263
Portata massima [m ³ /s]	1396	1401	1350	1267	1445	1396	1321

Tabella 13– Evento di piena di novembre 2018 - Colmi di piena e portate massime simulati

5.2.10 Ottobre 1987

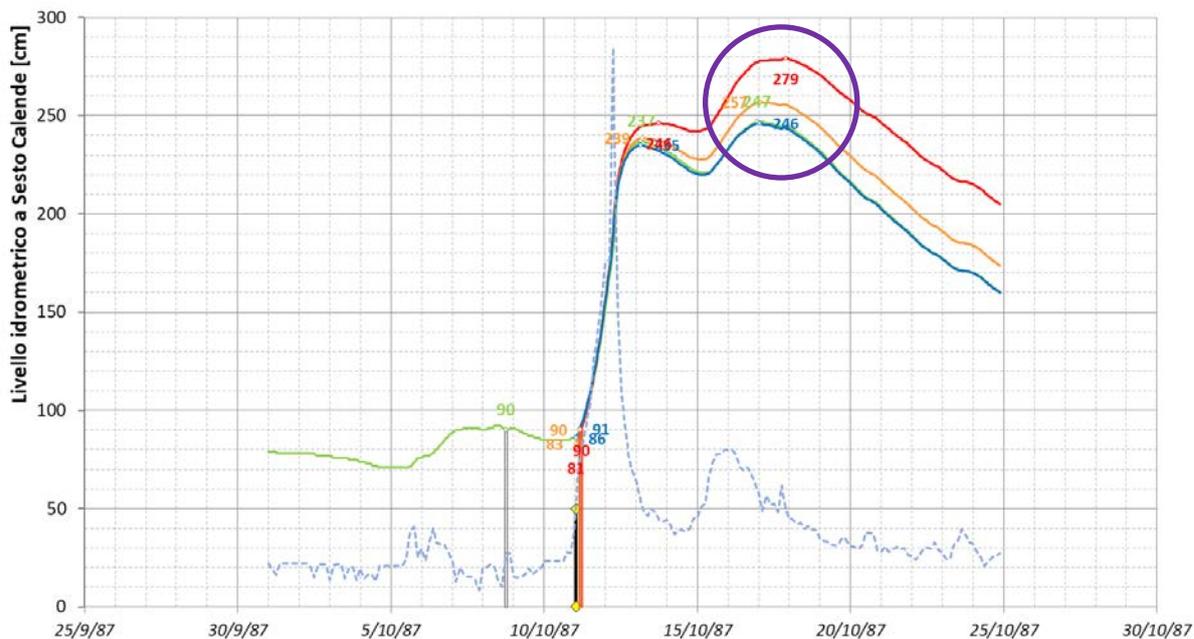


Figura 38 – Evento di piena di ottobre 1987 - simulazioni di tipo [1] – abbattimento a cm +90 cm

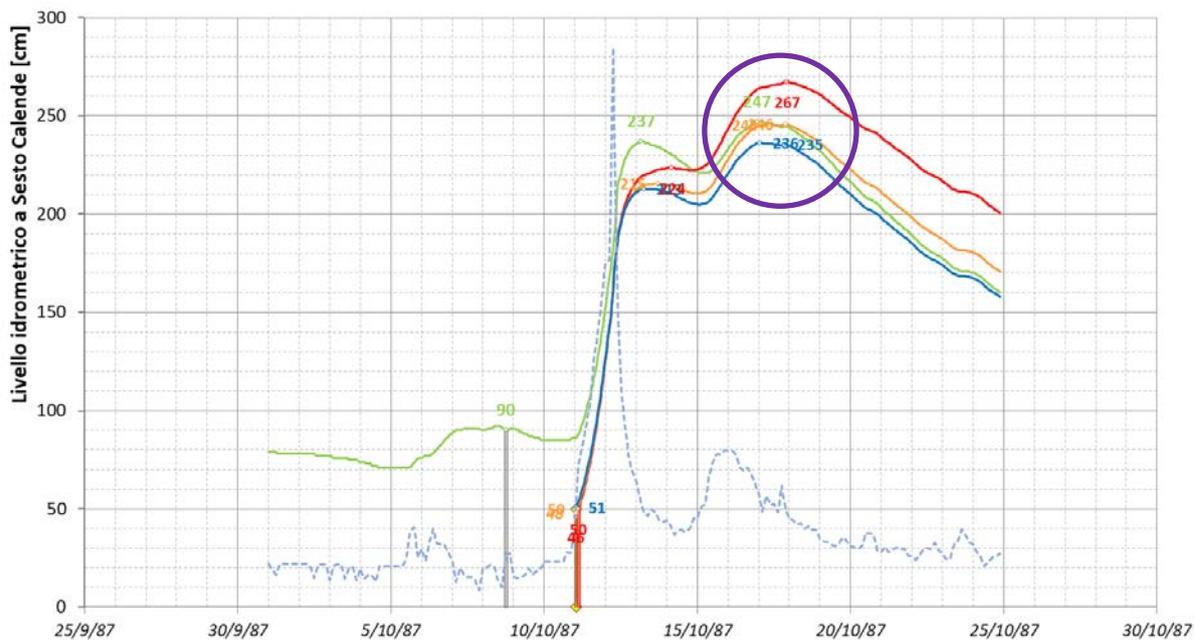


Figura 39 – Evento di piena di ottobre 1987 - simulazioni di tipo [2] – abbattimento a cm +50 cm

PARAMETRO	VALORI REGISTRATI	SIMULAZIONI DI TIPO [1] LIVELLO INIZIALE: +79 CM ABBATTIMENTO: +90 CM			SIMULAZIONI DI TIPO [2] LIVELLO INIZIALE: +50 CM ABBATTIMENTO: +50 CM		
		4 C	3C	2C	4C	3C	2C
		Altezza massima [cm]	247	246	257	279	236
Portata massima [m ³ /s]	1345	1340	1295	1208	1280	1233	1153

Tabella 14– Evento di piena di ottobre 1987 - Colmi di piena e portate massime simulati

5.2.11 Novembre 2008

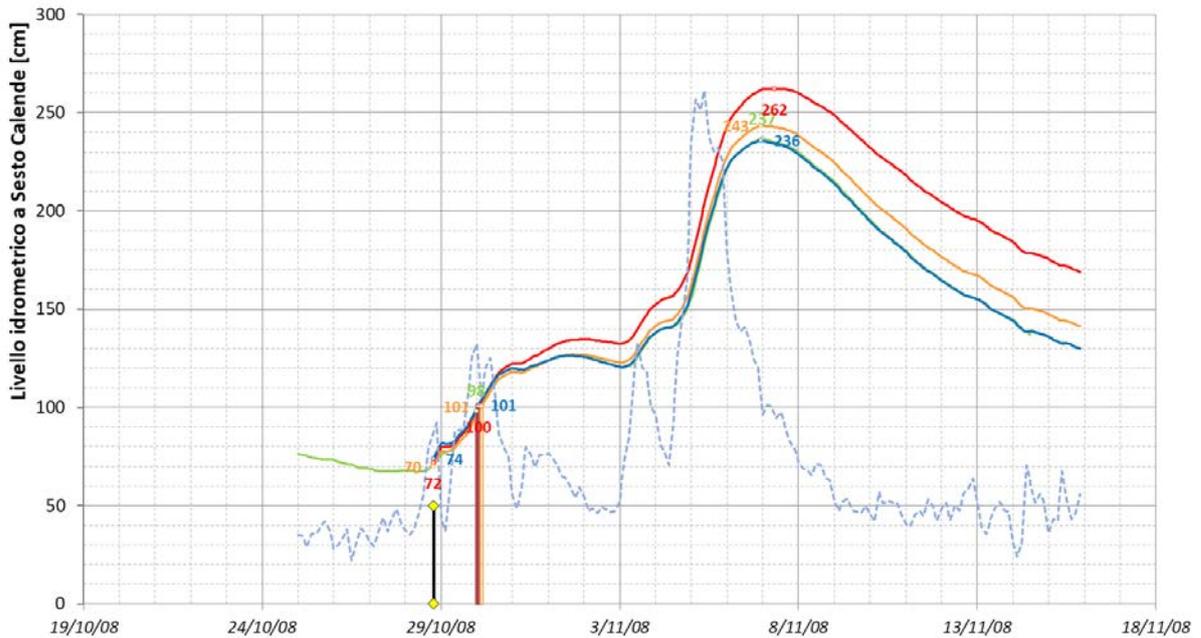


Figura 40 – Evento di piena di novembre 2008 - simulazioni di tipo [1] – abbattimento a cm +98 cm

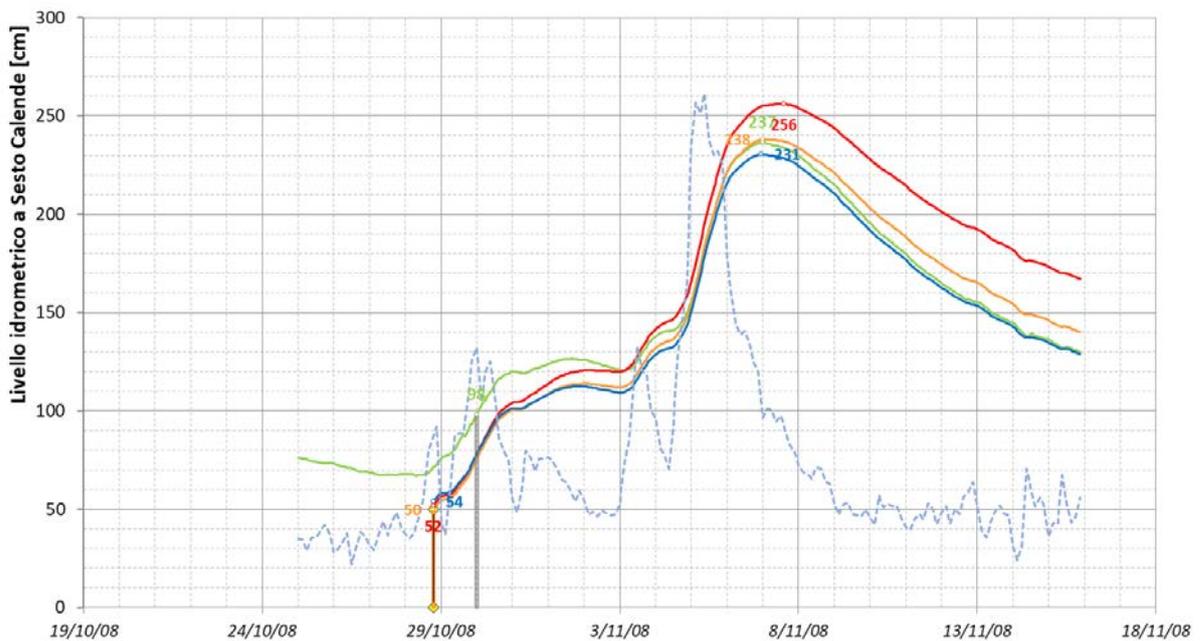


Figura 41 – Evento di piena di novembre 2008 - simulazioni di tipo [2] – abbattimento a cm +50 cm

PARAMETRO	VALORI REGISTRATI	SIMULAZIONI DI TIPO [1] LIVELLO INIZIALE: +76 CM ABBATTIMENTO: +98 CM			SIMULAZIONI DI TIPO [2] LIVELLO INIZIALE: +50 CM ABBATTIMENTO: +50 CM		
		4 C	3C	2C	4C	3C	2C
		Altezza massima [cm]	237	236	243	262	231
Portata massima [m ³ /s]	1283	1277	1223	1130	1247	1195	1102

Tabella 15– Evento di piena di novembre 2008 - Colmi di piena e portate massime simulati

5.2.12 Novembre 1994

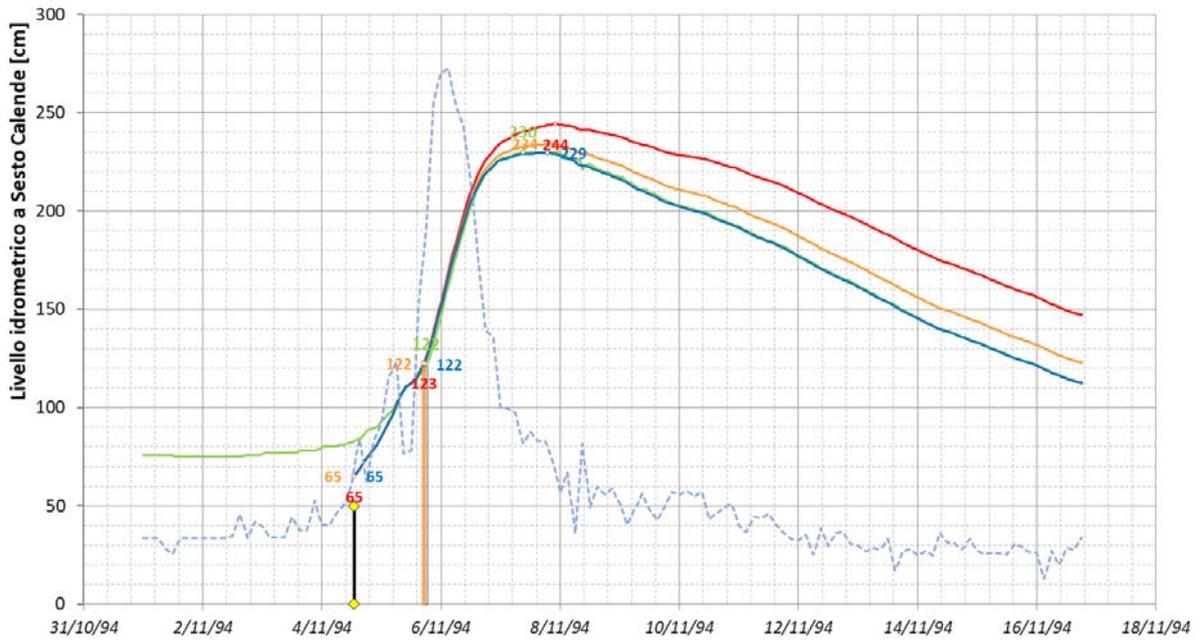


Figura 42 – Evento di piena di novembre 1994 - simulazioni di tipo [1] – abbattimento a cm +122 cm

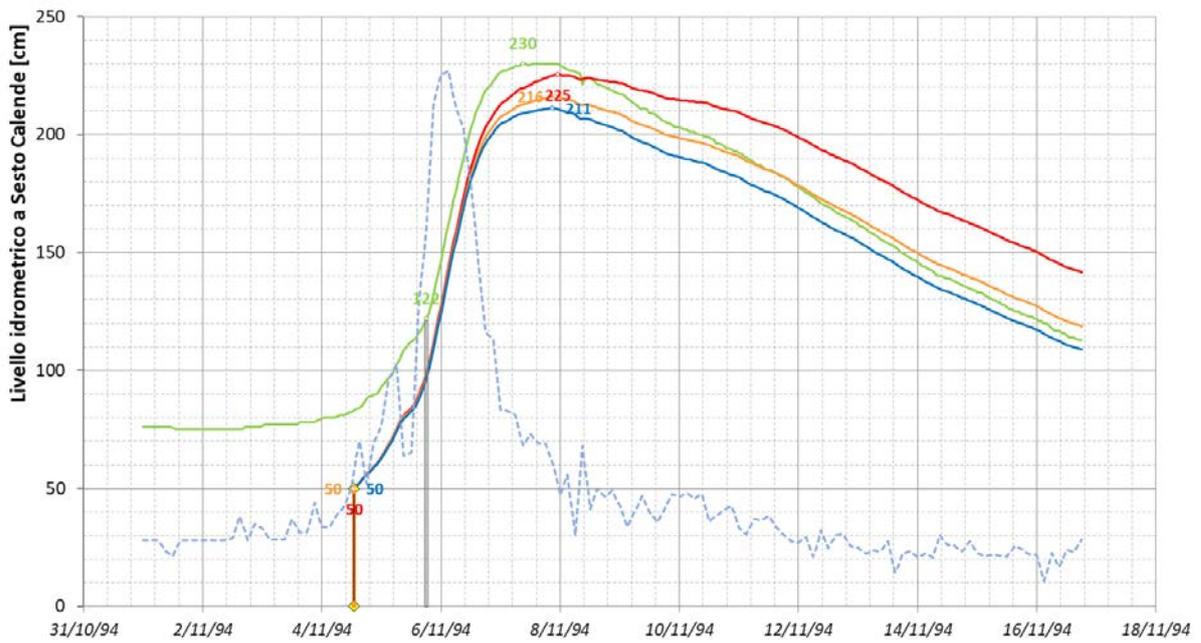


Figura 43 – Evento di piena di novembre 1994 - simulazioni di tipo [2] – abbattimento a cm +50 cm

PARAMETRO	VALORI REGISTRATI	SIMULAZIONI DI TIPO [1] LIVELLO INIZIALE: +76 CM ABBATTIMENTO: +122 CM			SIMULAZIONI DI TIPO [2] LIVELLO INIZIALE: +50 CM ABBATTIMENTO: +50 CM		
		4C	3C	2C	4C	3C	2C
Altezza massima [cm]	230	229	234	244	211	216	225
Portata massima [m ³ /s]	1244	1240	1175	1050	1136	1082	969

Tabella 16– Evento di piena di novembre 1994 - Colmi di piena e portate massime simulati

5.2.13 Settembre 1999

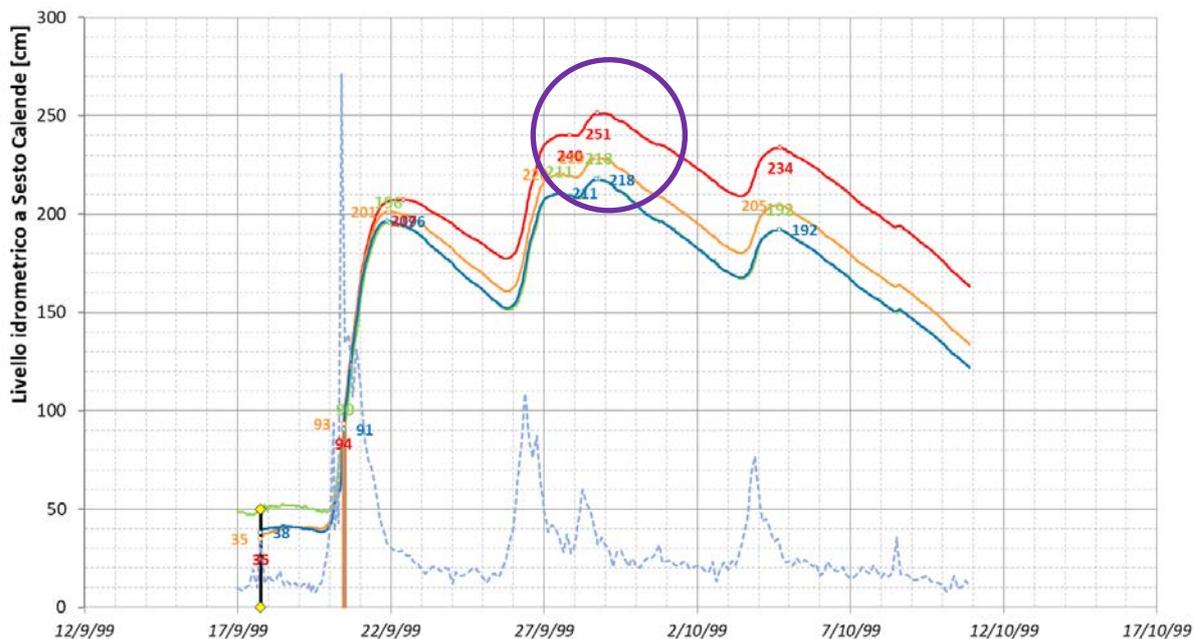


Figura 44 – Evento di piena di settembre 1999 - simulazioni di tipo [1] – abbattimento a cm +90 cm

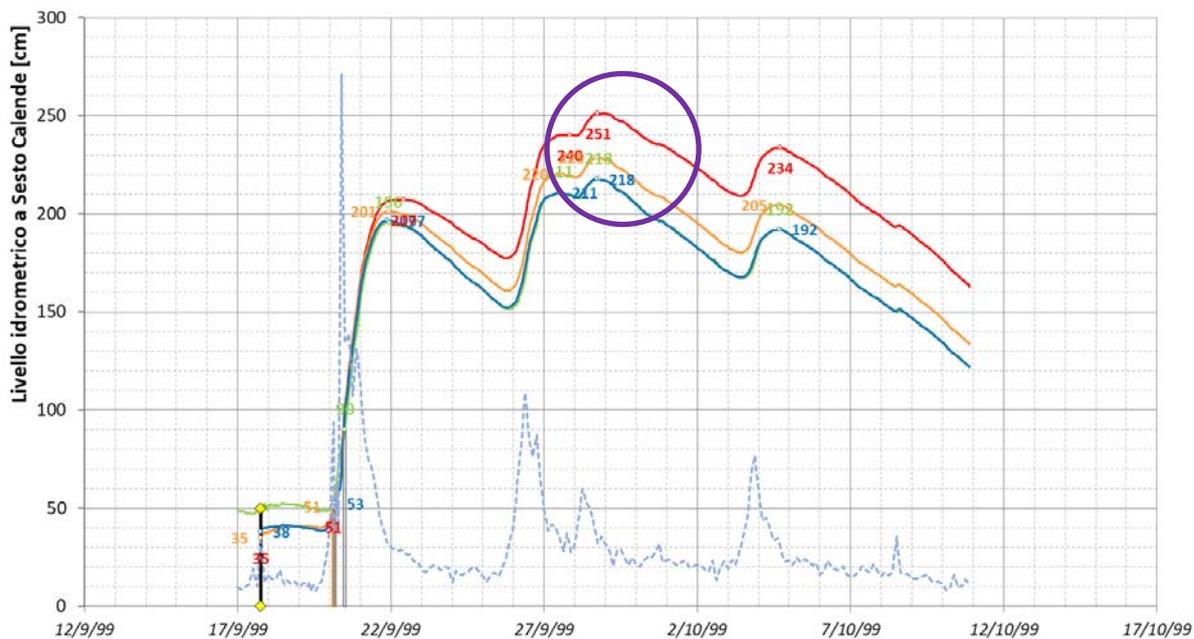


Figura 45 – Evento di piena di settembre 1999 - simulazioni di tipo [2] – abbattimento a cm +50 cm

PARAMETRO	VALORI REGISTRATI	SIMULAZIONI DI TIPO [1] LIVELLO INIZIALE: +49 CM ABBATTIMENTO: +90 CM			SIMULAZIONI DI TIPO [2] LIVELLO INIZIALE: +50 CM ABBATTIMENTO: +50 CM		
		4 C	3C	2C	4C	3C	2C
Altezza massima [cm]	218	218	229	251	218	229	251
Portata massima [m ³ /s]	1174	1173	1146	1080	1173	1146	1080

Tabella 17– Evento di piena di settembre 1999 - Colmi di piena e portate massime simulati

5.2.14 Ottobre 2019

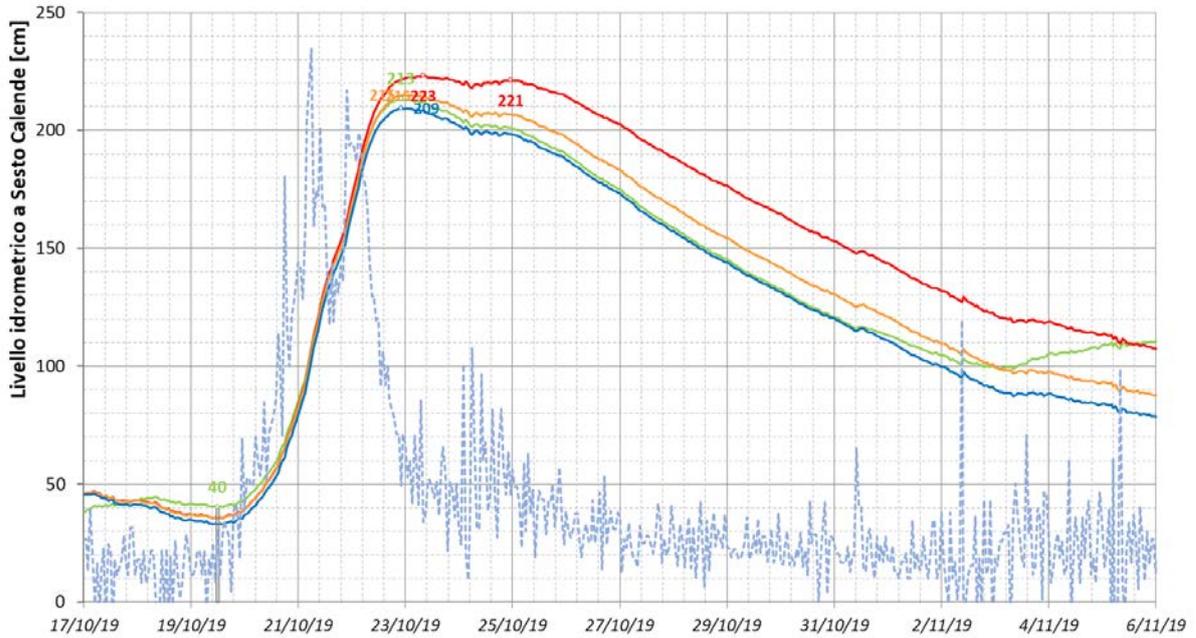


Figura 46 – Evento di piena di ottobre 2019 - simulazioni di tipo [1] – abbattimento a cm +40 cm

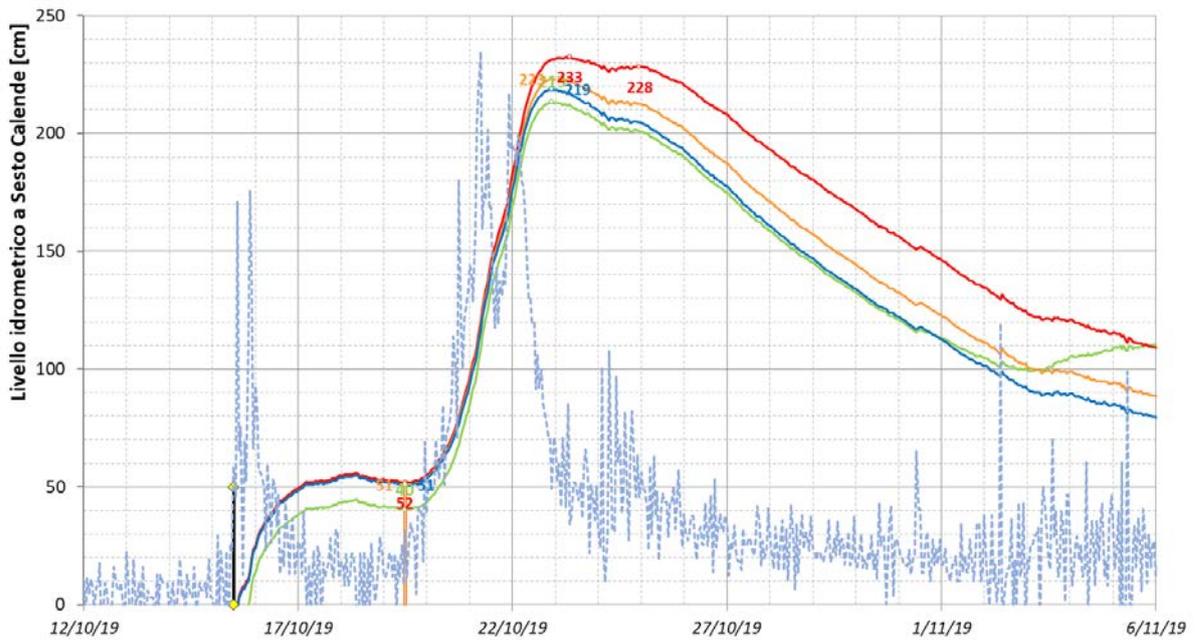


Figura 47 – Evento di piena di ottobre 2019 - simulazioni di tipo [2] – abbattimento a cm +50 cm

PARAMETRO	VALORI REGISTRATI	SIMULAZIONI DI TIPO [1] LIVELLO INIZIALE: -12 CM ABBATTIMENTO: +40 CM			SIMULAZIONI DI TIPO [2] LIVELLO INIZIALE: +50 CM ABBATTIMENTO: +50 CM		
		4 C	3C	2C	4C	3C	2C
Altezza massima [cm]	213	209	215	223	219	223	233
Portata massima [m ³ /s]	1148	1126	1077	962	1179	1119	1000

Tabella 18– Evento di piena di settembre 1982 - Colmi di piena e portate massime simulati

5.2.15 Settembre 1982

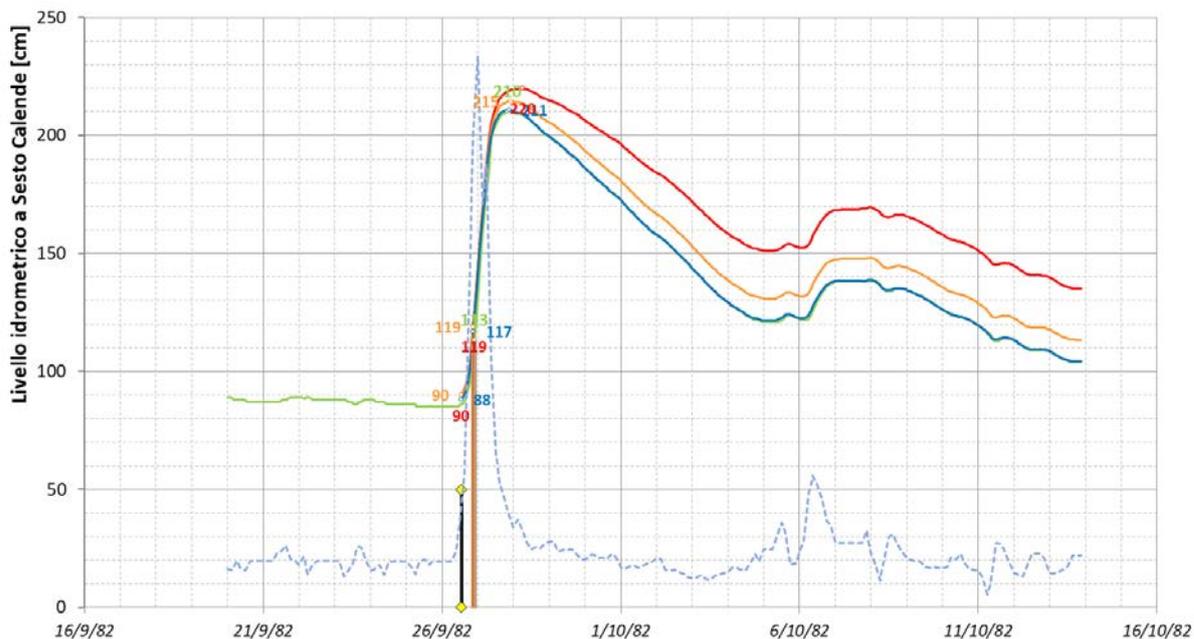


Figura 48 – Evento di piena di settembre 1982 - simulazioni di tipo [1] – abbattimento a cm +113 cm

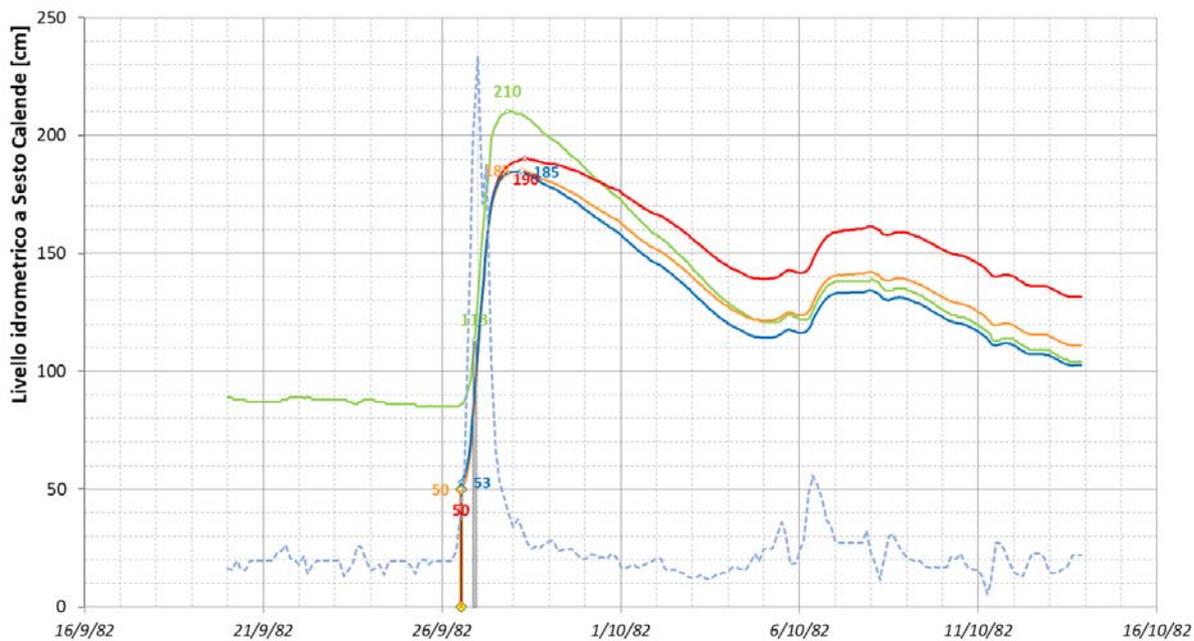


Figura 49 – Evento di piena di settembre 1982 - simulazioni di tipo [2] – abbattimento a cm +50 cm

PARAMETRO	VALORI REGISTRATI	SIMULAZIONI DI TIPO [1] LIVELLO INIZIALE: +89 CM ABBATTIMENTO: +113 CM			SIMULAZIONI DI TIPO [2] LIVELLO INIZIALE: +50 CM ABBATTIMENTO: +50 CM		
		4C	3C	2C	4C	3C	2C
Altezza massima [cm]	210	211	215	220	185	185	190
Portata massima [m ³ /s]	1130	1134	1075	947	993	933	829

Tabella 19– Evento di piena di settembre 1982 - Colmi di piena e portate massime simulati

5.2.16 Settembre 2008

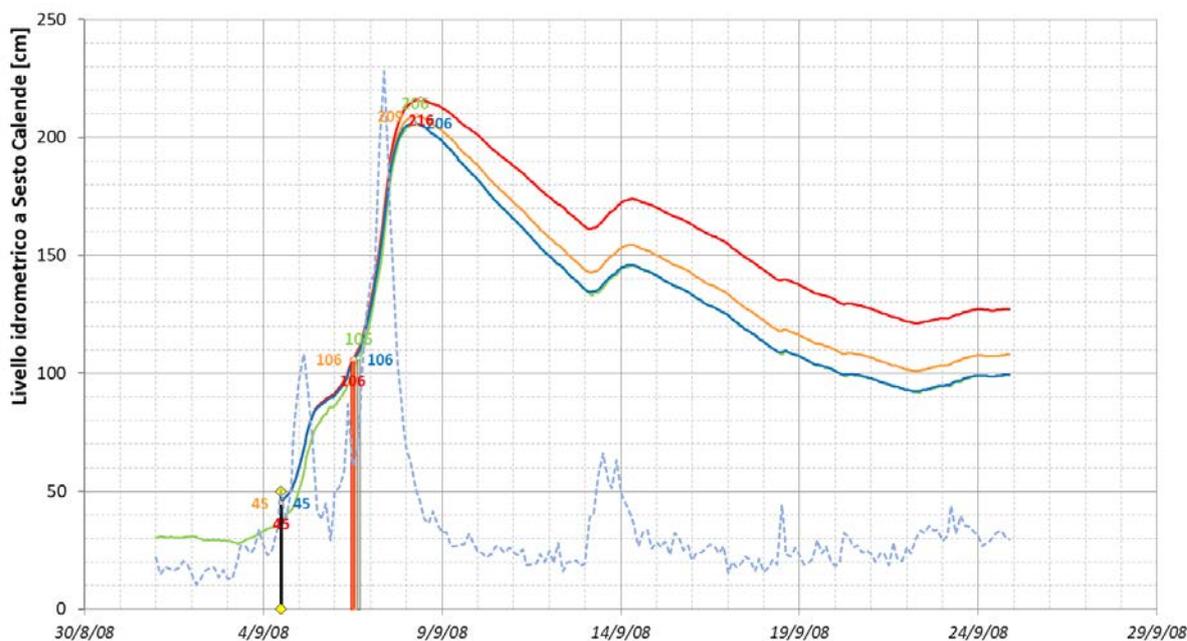


Figura 50 – Evento di piena di settembre 2008 - simulazioni di tipo [1] – abbattimento a cm +106 cm

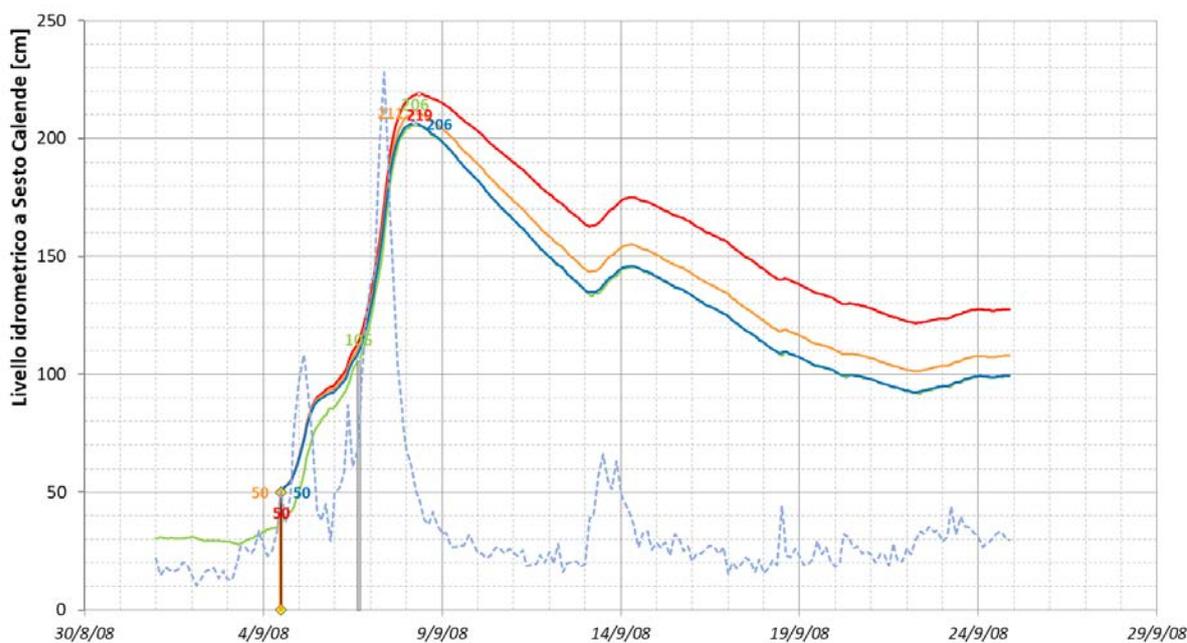


Figura 51 – Evento di piena di settembre 2008 - simulazioni di tipo [2] – abbattimento a cm +50 cm

PARAMETRO	VALORI REGISTRATI	SIMULAZIONI DI TIPO [1] LIVELLO INIZIALE: +30 CM ABBATTIMENTO: +106 CM			SIMULAZIONI DI TIPO [2] LIVELLO INIZIALE: +50 CM ABBATTIMENTO: +50 CM		
		4C	3C	2C	4C	3C	2C
Altezza massima [cm]	206	206	209	216	206	211	219
Portata massima [m ³ /s]	1106	1108	1047	931	1108	1056	942

Tabella 20– Evento di piena di settembre 2008 - Colmi di piena e portate massime simulati

5.3 **Analisi dei risultati**

Nei precedenti paragrafi si è cercato di fornire una quantificazione degli effetti della temporanea chiusura di una o due campate dello sbarramento della Miorina sul regime idraulico del sistema Lago Maggiore - Fiume Ticino emissario. In termini generali, si può concludere che:

- 1) tali effetti si manifestano solo ed esclusivamente quando il deflusso dal lago verso il fiume avviene in regime libero, ossia quando lo sbarramento, seppur parzialmente, si presenta in condizioni di abbattimento totale;
- 2) l'entità di tali effetti è estremamente ridotta quando una sola delle quattro campate è palancolata, mentre diventa sensibilmente più marcata quando le campate chiuse sono due; nel primo caso la perdita di capacità di deflusso è infatti dell'ordine del 5-6%, nel secondo caso del 20%;
- 3) in caso di eventi di piena e di morbida, a parità di afflussi al lago e di condizioni iniziali, la riduzione della capacità di deflusso si traduce in:
 - a) un incremento del livello massimo raggiunto dal Lago Maggiore;
 - b) una riduzione del colmo di piena del Fiume Ticino emissario;
 - c) un ritardo nel raggiungimento del colmo di piena (del lago e del fiume);
 - d) una maggior durata dell'evento di piena, che si manifesta specialmente durante la fase di rientro.

L'entità delle alterazioni dipende dal numero di campate chiuse e dalle caratteristiche degli eventi di piena che si possono verificare.

Le simulazioni di tipo dinamico presentate nel paragrafo 5.2 sono state svolte con l'intento di:

- ✓ valutare cosa sarebbe successo se i 16 eventi di piena considerati si fossero verificati durante il cantiere, con una o due campate chiuse (analisi di tipo [1]);
- ✓ verificare l'effetto della gestione dell'invaso in accordo con il limite di massima regolazione di +50 cm richiesto dall'Ufficio dighe (analisi di tipo [2]);

- ✓ ricavare dei tempi di crescita della piena per poter definire le procedure di sicurezza da adottare in cantiere (analisi di tipo [2]).

Le tabelle riepilogative riportate di seguito riassumono le altezze al colmo di ciascuna simulazione dinamica sia di tipo [1] che di tipo [2] e riportano le differenze tra altezze rilevate e altezze simulate.

Per le **analisi di tipo [1]**, i risultati più sfavorevoli si rilevano in presenza di eventi lunghi e lenti; in questi casi, infatti, il progressivo accumulo di acqua nel lago durante la fase che precede il colmo principale contribuisce ad aumentare la differenza tra livelli reali e simulati. È il caso dell'evento di ottobre 1993 dove il livello idrometrico al colmo cresce di 32 e 84 cm rispettivamente per le configurazioni 3C e 2C.

EVENTO	RILEVATA	SIMULAZIONI DI TIPO [1]					SIMULAZIONI DI TIPO [2]		
		LIVELLO INIZIALE	ABB.	4 C	3C	2C	4C	3C	2C
1 OTTOBRE 2020	462	-26	+104	458	479	513	455	476	508
2 OTTOBRE 1993	426	-4	+111	425	458	510	455	476	508
3 NOVEMBRE 2014	354	+112	+99	354	376	415	350	372	409
4 OTTOBRE 1977	345	+92	+105	343	354	372	320	330	346
5 NOVEMBRE 2002	341	+60	+144	354	359	373	340	347	361
6 NOVEMBRE 1996	292	+84	+151	293	298	309	271	278	289
7 NOVEMBRE 2004	285	+39	+90	284	293	313	285	295	317
8 OTTOBRE 1988	285	+50	+95	285	292	305	281	288	301
9 NOVEMBRE 2018	255	+22	+45	256	267	292	263	275	303
10 OTTOBRE 1987	247	+79	+90	246	257	279	236	246	267
11 NOVEMBRE 2008	237	+76	+98	236	243	262	231	238	256
12 NOVEMBRE 1994	230	+76	+122	229	234	244	211	216	225
13 SETTEMBRE 1999	218	+49	+90	218	229	251	218	229	251
14 OTTOBRE 2019	213	-12	+40	209	215	223	219	223	233
15 SETTEMBRE 1982	210	+89	+113	211	215	220	185	185	190
16 SETTEMBRE 2008	206	+30	+106	206	209	216	206	211	219

Tabella 21- Altezze al colmo degli eventi critici simulati – livelli idrometrici a Sesto Calende [cm]

EVENTO	RILEVATO	SIMULAZIONI DI TIPO [1]		DIFFERENZA TRA RILEVATO E SIMULAZIONI DI TIPO [1]		DIFFERENZA TRA RILEVATO E SIMULAZIONI DI TIPO [2]	
		LIVELLO INIZIALE	QUOTA ABBATT.	3C	2C	3C	2C
1 OTTOBRE 2020	462	-26	+104	17	51	14	46
2 OTTOBRE 1993	426	-4	+111	32	84	50	82
3 NOVEMBRE 2014	354	+112	+99	22	61	18	55
4 OTTOBRE 1977	345	+92	+105	9	27	-15	1
5 NOVEMBRE 2002	341	+60	+144	18	32	6	20
6 NOVEMBRE 1996	292	+84	+151	6	17	-14	-3
7 NOVEMBRE 2004	285	+39	+90	8	28	10	32
8 OTTOBRE 1988	285	+50	+95	7	20	3	16
9 NOVEMBRE 2018	255	+22	+45	12	37	20	48
10 OTTOBRE 1987	247	+79	+90	10	32	-1	20
11 NOVEMBRE 2008	237	+76	+98	6	25	1	19
12 NOVEMBRE 1994	230	+76	+122	4	14	-14	-5
13 SETTEMBRE 1999	218	+49	+90	11	33	11	33
14 OTTOBRE 2019	213	-12	+40	2	10	10	20
15 SETTEMBRE 1982	210	+89	+113	5	10	-25	-20
16 SETTEMBRE 2008	206	+30	+106	3	10	5	13

Tabella 22– Differenze tra altezze al colmo simulate e altezze rilevate [cm]

I risultati delle **analisi di tipo [2]** confermano che l'effetto della chiusura temporanea di una o due campate, oltre a dipendere dall'entità dell'evento (l'entità dell'innalzamento diminuisce man mano che gli eventi si fanno meno importanti), aumenta all'aumentare della durata dell'evento e del tempo che intercorre tra l'inizio e il colmo di piena. Ne sono un esempio i primi tre eventi riportati in tabella (quelli più intensi) e quelli di novembre 2004, novembre 2018, novembre 2008 e settembre 1999.

Per contro, quando gli eventi sono rapidi ed il primo colmo di piena non è seguito da altri colmi, l'effetto è minore. Ne sono un esempio gli eventi di ottobre 1977, novembre 2002, novembre 1996, ottobre 1988, novembre 1994 e ottobre 2019.

Anche il fatto di mantenere a +50 il limite di massima regolazione del lago ha un effetto significativo in caso di eventi brevi, che si riduce però progressivamente all'aumentare della durata dell'evento.

Questo vuol dire che la scelta di adottare il limite di massima regolazione a+50 cm non ha effetti di particolare rilievo sulle piene del lago (gli eventi più critici in termini assoluti) sono quelli lunghi, ma ha un effetto di rilievo rispetto alla gestione del cantiere, in quanto gli eventi brevi e improvvisi sono quelli per i quali le procedure di messa in sicurezza devono essere rigorosamente adottate in tempi rapidi.

Confrontando infine i risultati delle simulazioni di tipo dinamico (paragrafo 5.2) con quelle di tipo statico (paragrafo 5.1), si osserva che quasi sempre le analisi di tipo dinamico forniscono risultati più favorevoli, ossia livelli massimi stimati durante il cantiere più bassi rispetto a quelli ottenuti con le analisi di tipo “statico”; è il caso delle piene di ottobre 2000, ottobre 1993, novembre 2008 e ottobre 2019.

6. EFFETTI DEL CANTIERE SU SCALA LOCALE

6.1 *Variazioni del regime idraulico a monte dello sbarramento della Miorina*

Nel paragrafo 5.1 si è accennato al fatto che il profilo idraulico del tratto compreso tra l'idrometro di Sesto Calende -sezione ove avviene la misurazione ufficiale del livello idrometrico del lago- e lo sbarramento della Miorina presenti un gradiente. In regime libero, questo gradiente cresce al crescere della portata scaricata, indipendentemente dal fatto che lo sbarramento sia completamente libero o che, come avverrà in fase di cantiere, il deflusso attraverso una o due campate sia parzialmente interrotto fino al raggiungimento di una determinata quota.

La differenza di livello, che in regime regolato oscilla normalmente tra 2 e 15 cm, in regime libero può raggiungere valori dell'ordine di 100 cm.

L'analisi dei dati storici registrati giornalmente dal Consorzio del Ticino dal 1989 fornisce un andamento analogo a quello ricavato dalla modellazione svolta a supporto del presente documento. I risultati di entrambe le analisi sono riportati nel grafico di Figura 52. Dal grafico si osserva che i punti relativi ai dati storici rilevati in condizioni di regime regolato indicano condizioni di profilo poco inclinato, con un abbassamento della piezometrica variabile tendenzialmente tra 0 e 30 cm, con alcune punte che raggiungono i 40 cm.

In condizioni di regime libero sia i dati storici sia il modello idraulico indicano chiaramente che l'abbassamento della piezometrica cresce al crescere del livello idrometrico a Sesto Calende, anche se le due serie di dati presentano una differenza di circa 25-30 cm costante al crescere del livello idrometrico di Sesto. Questo sfasamento deriva dai problemi di calibrazione già illustrati nel paragrafo 4.5: il modello, per come sono state schematizzate le sezioni fluviali, sottostima la superficie delle sezioni trasversali del tratto fluviale di interesse e la sua capacità di laminazione, motivo per cui è verosimile che esso tenda a sovrastimare la perdita di carico tra le due sezioni: così ad esempio, se la quota idrometrica a Sesto Calende è di 196.00 m s.l.m., il modello restituisce una

quota a monte della Miorina 194.85 m s.l.m., mentre i dati storici indicano un valore dell'ordine di 195.10 m s.l.m., 25 cm più alto.

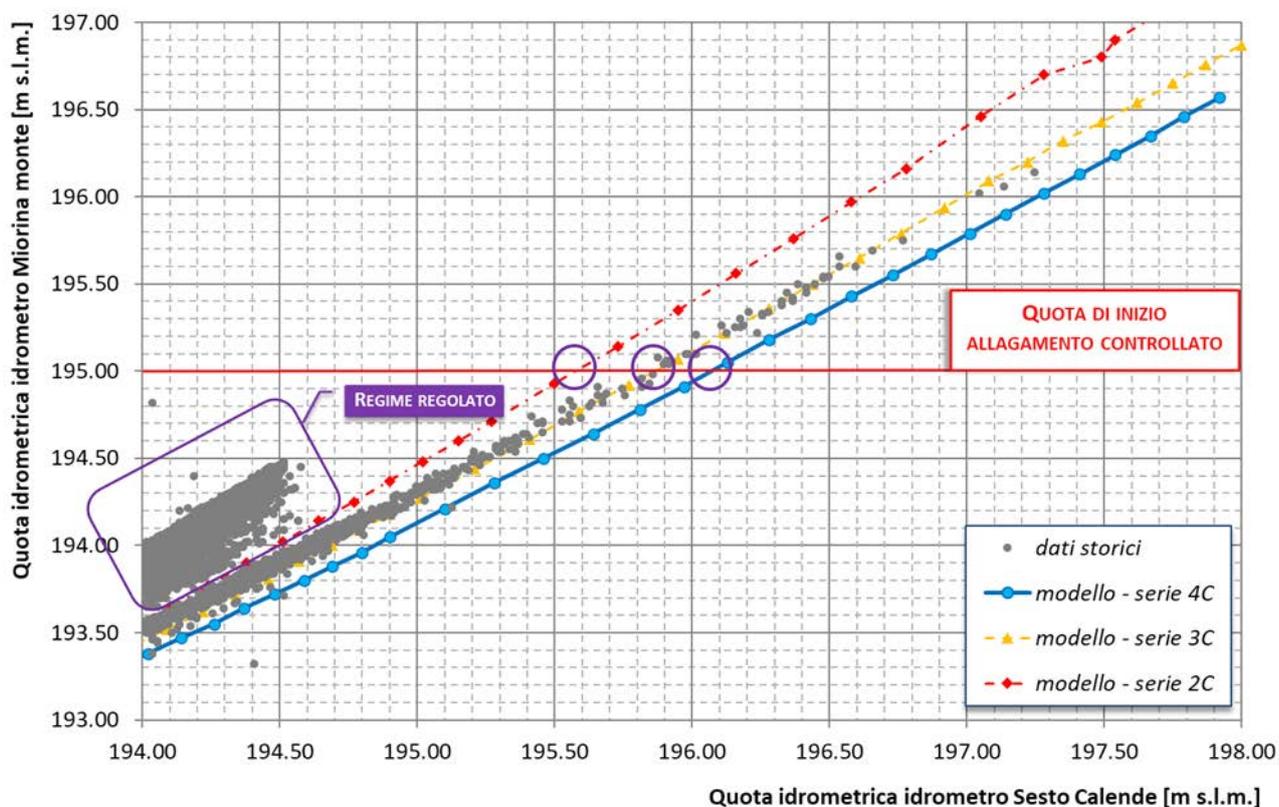
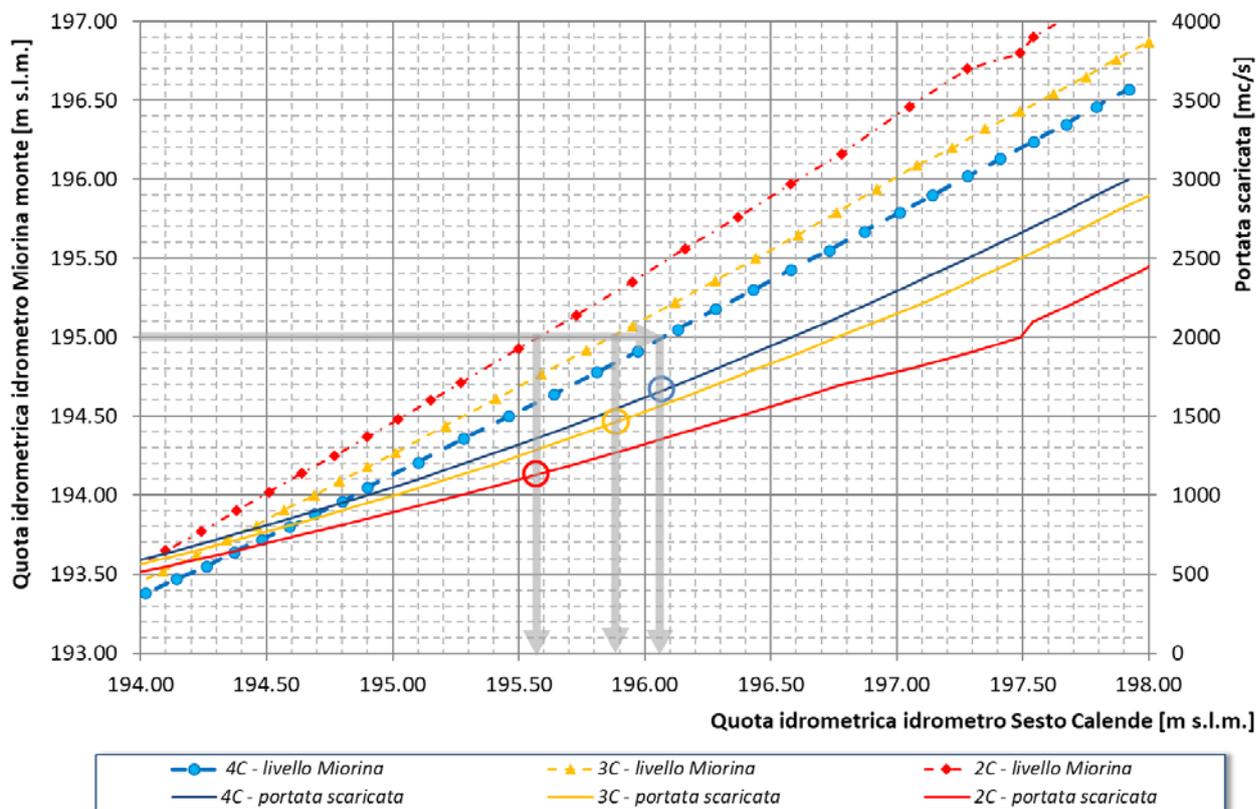


Figura 52: Relazione tra quote idrometriche all'idrometro di Sesto Calende e a monte dello sbarramento della Miorina

Ai fini del presente lavoro è interessante osservare che, posta pari a 195.00 m s.l.m. la quota raggiunta la quale inizia l'allagamento controllato dell'area di cantiere, essa corrisponde a (Figura 52 e Figura 53):

- + 195.90 m s.l.m. all'idrometro di Sesto Calende, basandosi sulla serie di dati storici.
- poco meno di + 196.07 m s.l.m. all'idrometro di Sesto Calende, basandosi sulla serie ottenuta con il modello di calcolo relativa allo sbarramento con quattro campate disponibili per il deflusso (serie 4C).
- + 195.87 m s.l.m. all'idrometro di Sesto Calende, basandosi sulla serie ottenuta con il modello di calcolo relativa alla configurazione di cantiere che prevede tre campate aperte su quattro (serie 3C).

- + 195.58 m s.l.m. all'idrometro di Sesto Calende, basandosi sulla serie ottenuta con il modello di calcolo relativa alla configurazione di cantiere che prevede due campate aperte su quattro (serie 2C).



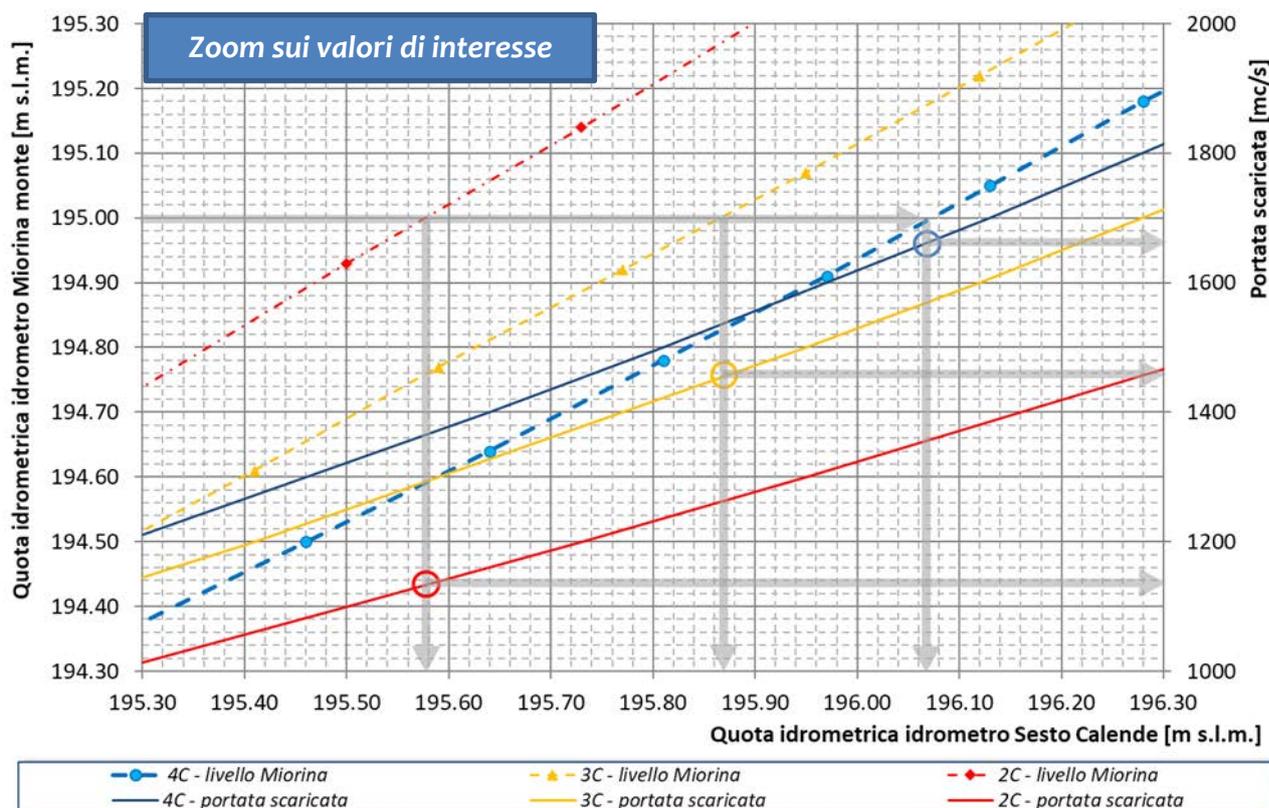


Figura 53: Relazione tra quote idrometriche all'idrometro di Sesto Calende, quote e a monte dello sbarramento della Miorina e portate scaricate

Da quanto appena illustrato emerge chiaramente che la differenza di livello tra l'idrometro di Sesto Calende e la sezione in corrispondenza della Miorina si riduce al ridursi della sezione di deflusso. Più aumento l'effetto "strozzatura" presso lo sbarramento, più il profilo tra l'idrometro di Sesto e la diga tende ad appiattirsi. Fissata la quota di 195.00 m s.l.m. alla Miorina, il livello a Sesto cresce rispettivamente di 58, 87 e 107 cm rispettivamente per le serie 2C, 3C e 4C.

Analogamente, restringendo la sezione, a parità di livello idrometrico presso la sezione di Miorina-monte, la riduzione della sezione di deflusso comporta una riduzione delle portate defluenti. In Figura 53 sono rappresentate le stesse serie di Figura 52, con l'aggiunta delle portate scaricate, rappresentata sull'asse delle ordinate secondario di destra: dal grafico si vede che fissata pari a 195.00 m s.l.m. la quota idrometrica a monte dello sbarramento della Miorina, la quota all'idrometro di Sesto Calende è di circa 195.58, 195.87 e 196.07 m s.l.m. rispettivamente per le serie 2C, 3C e 4C (già visto nel

grafico precedente), ma la portata scaricata è di 1'140 m³/s, 1'460 m³/s, e 1'660 m³/s rispettivamente per le serie 2C, 3C e 4 C. A conclusione di questa parte relativa agli effetti del cantiere su scala locale, si può affermare quanto segue:

1. in condizioni idrauliche potenzialmente critiche per la sicurezza del cantiere, la differenza di quota del pelo libero tra la sezione in corrispondenza dell'idrometro di Sesto Calende e lo sbarramento della Miorina è di oltre 50 cm;
2. in condizioni di regime libero, il profilo del pelo libero tra la sezione in corrispondenza dell'idrometro di Sesto Calende e lo sbarramento della Miorina tende ad assumere un andamento sempre più orizzontale al ridursi della sezione di deflusso; il fatto di chiudere una o due campate dello sbarramento determina inoltre, a parità di livello idrometrico a Sesto Calende, una riduzione della portata scaricata.

6.2 **Verifica della quota di protezione del cantiere e gestione del cantiere in caso di piena**

Queste parti, presenti nella relazione idrologica e idraulica allegata al progetto definitivo, in sede di predisposizione degli elaborati del progetto esecutivo sono state stralciate dal presente documento ed inserite in un allegato dedicato a questi aspetti dal titolo "Piano di monitoraggio idrologico e di allertamento" (Allegato RPM10).

7. CONCLUSIONI

7.1 Effetti del cantiere sul regime idraulico del Lago Maggiore

La momentanea chiusura di una o due campate dello sbarramento della Miorina fino alla quota di +195.50 m s.l.m., garantendo l'assenza di acqua in cantiere fino alla quota di +195.00 m s.l.m., comporta una riduzione della capacità di scarico del lago, effetto che si manifesta solo in condizioni di regime libero, ossia quando lo sbarramento è completamente aperto e non vi è alcun tipo di regolazione. La perdita di capacità deflusso, intesa come portata che viene scaricata dal lago a parità di livello idrometrico a Sesto Calende è dell'ordine del 5-6% quando una sola delle quattro campate è chiusa e dell'ordine del 20% quando sono chiuse due campate su quattro.

Alla luce di tali risultati, la progettazione degli interventi e la programmazione delle varie fasi delle lavorazioni è stata sviluppata fatta cercando di rendere il più breve possibile il periodo in cui rimangono chiuse due campate. Inoltre, preso atto del fatto che le piene del lago si manifestano prevalentemente tra ottobre e novembre, la chiusura completa della terza campata è stata prevista per l'inizio di dicembre.

Nel capitolo 5 sono riportati alcuni valori indicativi sugli effetti della temporanea chiusura di una o due campate sul regime idraulico del Lago Maggiore, espressi sia in termini assoluti, ossia indicando come varia la relazione tra livelli idrometrici e portate erogate durante il cantiere, sia andando a simulare alcuni eventi storici rappresentativi ipotizzando la chiusura di una o due campate.

Le stesse simulazioni sono state poi ripetute ipotizzando che durante quegli stessi eventi venisse adottato il limite di massima regolazione a +50 cm, limite previsto dal progetto per il periodo compreso tra per il 15 settembre e il 15 marzo, in accordo con quanto prescritto dalla Direzione Generale per le dighe ed infrastrutture idriche ed elettriche del MIT.

La Tabella 23, che riprende in forma sintetica le tempistiche delle varie lavorazioni riportate dettagliatamente nel cronoprogramma dei lavori (Allegato CRN44), riassume le principali fasi delle lavorazioni previste, indicando per ciascuna di esse il numero di

campate aperte, il limite di massima regolazione normalmente vigente nel periodo e quello che sarà adottato durante l'esecuzione dei lavori.

PERIODO	FASE OPERATIVA	NUMERO DI CAMPATE APERTE	LIMITE DI MAX. REGOLAZIONE [CM]	
			VIGENTE	PROGETTO
15.07 → 7.08	<i>Fasi A, B, C, D, E: apertura cantiere e opere provvisoriale che non interferiscono con il deflusso</i>	4/4	125	125
08.08 → 15.09	<i>Fasi F, G, H: Opere provvisoriale campata 4</i>	4/4 → 3/4	125	100
15.09 → 9.10			100	100
08.09	COMPLETAMENTO CHIUSURA 4^A CAMPATA	3/4	125	50
10.10 → 29.10	<i>Fase I: Sostituzione portine campata 4</i>	3/4	100	50
30.10 → 15.11	<i>Fase I: Sostituzione portine campata 4</i>	3/4 → 2/4	100	50
15.11 → 24.12	<i>Fasi J, K, L: Opere provvisoriale campata 3</i>		150	50
01.12	COMPLETAMENTO CHIUSURA 3^A CAMPATA	2/4	150	50
25.12 → 9.03	<i>Fase I: Sostituzione portine campata 4</i> <i>Fase M: Sostituzione portine campata 3</i>	2/4	150	50
10.03 → 15.03	<i>Fasi N, O: smontaggio opere provvisoriale</i>	2/4 → 4/4	150	50
15.03 → 30.03			125	100
16.03	APERTURA 3^A CAMPATA	3/4	125	100
30.03	APERTURA 4^A CAMPATA	4/4	125	100
31.03 → 11.04	<i>FASE P: Smobilizzo cantiere</i>	4/4	125	125

Tabella 23: limiti di massima regolazione del lago che saranno adottati durante il cantiere

7.2 Effetti del cantiere sul regime idraulico del Fiume Ticino

Dalle analisi riportate nel Capitolo 4 e dai risultati delle simulazioni rappresentati nel Capitolo 5, è risultato che in caso di eventi di piena e di morbida, a parità di afflussi al lago e di condizioni iniziali, la riduzione della capacità di deflusso del lago implica un incremento del livello massimo raggiunto dal Lago Maggiore, una riduzione del colmo di piena del Fiume Ticino emissario, un ritardo nel raggiungimento del colmo di piena e un prolungamento della fase di rientro dalla piena stessa. Ne deriva che l'effetto del cantiere sul Ticino emissario risulta:

- nullo quando il deflusso dal lago verso il fiume avviene in regime regolato;
- positivo quando il deflusso dal lago verso il fiume avviene in regime libero: il fatto di smorzare i colmi di piena ha un effetto positivo, sia in termini di sicurezza idraulica, sia rispetto alla componente ambientale, mentre il fatto di "prolungare" le morbide non ha effetti rilevanti sulla componente antropica mentre continua ad avere un impatto positivo sulla componente ambientale.

7.3 Effetti su scala locale e criteri di gestione proposti

Nel capitolo 6 sono stati presentati i risultati delle analisi specifiche relative al profilo idraulico nel tratto compreso tra l'idrometro di Sesto Calende e lo sbarramento della Miorina. Sulla base di questi esiti sono state valutate le probabilità di allagamento del cantiere e i tempi con cui esse possono verificarsi ed è stato sviluppato il "Piano di monitoraggio idrologico e di allertamento" (Allegato RPM10), che costituisce un allegato a sé stante del presente progetto esecutivo.