

**COMUNE DI SESTO CALENDE  
PROVINCIA DI VARESE**

committente:

**COMUNE DI SESTO CALENDE**

oggetto:

**CONDIZIONI DI RISCHIO IDRAULICO  
AREA CANOA E CIRCOLO SESTESE**

studio idraulico

aprile 2012

**RELAZIONE IDRAULICA: STUDIO STATISTICO  
DEI LIVELLI DEL LAGO MAGGIORE**

IL PROFESSIONISTA INCARICATO  
dott. ing. Giorgio Amolari

**dott. ing. GIORGIO AMOLARI**

**STUDIO INGEGNERIA IDRAULICA-AMBIENTALE**

piazza Moraglia, 2 – 21040 GORNATE OLONA (VA)

tel/fax 0331/820920

*domicilio fiscale:* via nobili Martignoni, 1 – 21043 CASTIGLIONE OLONA (VA)

*e-mail:* ing.amolari@libero.it

Dis. n. 64104/R/I/I

Data APRILE 2012

modif.

copie

4

**INDICE**

<b>1</b>	<b>Premessa.....</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Caratteristiche geografiche, pluviometria e regolazione del lago.....</b>	<b>4</b>
2.1	Caratteristiche del bacino idrografico ed affluenti del lago Maggiore.....	4
2.2	Caratteristiche morfologiche del lago.....	4
2.3	Regime pluviometrico .....	5
2.4	Regime di regolazione del lago .....	5
<b>3</b>	<b>Determinazione dei livelli di piena attesi .....</b>	<b>6</b>
3.1	Analisi dei dati storici.....	6
3.1.1	Eventi di piena del lago riportati nelle cronache storiche .....	6
3.1.2	Dati raccolti all'idrometro di Sesto Calende .....	7
3.1.3	Dati raccolti all'idrometro di Locarno .....	10
3.2	Definizione del campione di osservazioni da sottoporre ad analisi statistica.....	17
3.2.1	Relazione tra massimo annuale del valore di portata media giornaliera, e massimo annuale della portata al colmo, per i valori pubblicati dal Servizio Idrografico .....	17
3.2.2	Relazione tra massimo annuale del valore di portata media giornaliera, e massimo annuale della portata al colmo, per i valori pubblicati dal Consorzio del Ticino.....	17
3.2.3	Campione di dati analizzato.....	17
3.3	Distribuzione probabilistica dei massimi annuali delle portate al colmo del Ticino a Sesto Calende.....	19
3.3.1	Ipotesi ed elaborazioni preliminari.....	19
3.3.2	Legge di distribuzione di Gumbel.....	20
3.3.3	Legge di distribuzione log-normale .....	20
3.3.4	Legge di distribuzione Gamma .....	21
3.3.5	Il test di Pearson.....	21
3.4	Determinazione dei livelli del lago Maggiore occorrenti con i tempi di ritorno prefissati.....	23
3.5	Determinazione dei tiranti idrici da assumere in corrispondenza dell'intervento in progetto .....	24
<b>4</b>	<b>Descrizione dei risultati.....</b>	<b>25</b>
	<b>APPENDICE: CALCOLI IDRAULICI.....</b>	<b>27</b>
<b>1</b>	<b>Principi teorici per la trattazione delle correnti a pelo libero.....</b>	<b>27</b>
<b>2</b>	<b>Calcolo delle condizioni di moto per alvei cilindrici.....</b>	<b>28</b>

**BIBLIOGRAFIA..... 30**

## 1 Premessa.

Il presente studio, commissionato dall'Amministrazione Comunale di Sesto Calende, è finalizzato alla determinazione della distribuzione statistica dei livelli raggiunti dal fiume Ticino nei periodi di piena, appena a valle del ponte ferroviario, ai fini della definizione dei vincoli idraulici da assumere nel corso della progettazione dei lavori di "ristrutturazione area canoa e Circolo Sestese" e dello studio delle condizioni di rischio idraulico sussistenti entro il perimetro dell'intero centro edificato.

Convenzionalmente, quale sezione di separazione tra il lago ed il fiume Ticino si assume quella prospiciente la punta di S. Anna, a circa 2 km ad Ovest del centro abitato di Sesto Calende. Evidenti motivi di similitudine idrologica e paesistica inducono tuttavia a trattare il primo tratto della sponda orientale del fiume Ticino, sino al ponte stradale e ferroviario di Sesto, come se questo non fosse altro che un'appendice del Verbano, secondo quanto dettagliatamente indicato nelle pagine che seguono.

Nel corso dello studio ci si è avvalsi di diverse serie di dati, registrati in corrispondenza di altrettante stazioni di misura del livello del pelo libero del lago, ubicate lungo le sponde del Verbano e del fiume Ticino. In particolare, lo studio è basato principalmente sui dati registrati presso l'idrometro di Sesto Calende e pubblicati negli "Annali Idrologici" a cura dell'Ufficio Idrografico e Mareografico per il Po, e sulle registrazioni effettuate a Locarno a cura dell'Ufficio Federale delle Acque e della Geologia (UFAEG). Altre preziose fonti di informazioni al riguardo sono state il Consorzio del Ticino, che pubblica periodicamente dati e rapporti sul comportamento del sistema costituito dal lago Maggiore e dal fiume Ticino suo emissario, e l'Istituto di Scienza della Terra della Scuola Universitaria Professionale della Svizzera Italiana, con sede a Cadenazzo (TI), presso il quale opera un Laboratorio di Idrologia dedito tra l'altro allo sviluppo di un modello previsionale del comportamento del lago.

Per la rappresentazione cartografica dei risultati si è fatto ricorso alla base topografica in scala 1:2.000 fornita dall'Amministrazione Comunale, opportunamente integrata a mezzo di rilievo topografico di dettaglio, condotto a cura dello scrivente lungo l'area costiera del territorio comunale allo scopo di verificare l'adattabilità della base esistente alla scala di dettaglio richiesta.

Il rilievo ha dato luogo alla determinazione di alcune sezioni topografiche del terreno, disseminate lungo il territorio di indagine, collegate fra di loro e con l'idrometro di Sesto Calende mediante livellazione di precisione.

Lo studio è stato articolato nelle seguenti fasi, sommariamente illustrate nel seguito della Relazione e negli allegati grafici:

- 1) raccolta ed analisi dei livelli raggiunti dal lago nel corso delle piene storiche di cui vi sia notizia;
- 2) elaborazioni preliminari allo scopo di selezionare ed omogeneizzare i dati disponibili;
- 3) conduzione di analisi statistiche sul campione di dati selezionato;
- 4) determinazione dei livelli di piena potenzialmente raggiunti con i tempi di ritorno assegnati;
- 5) determinazione delle aree di potenziale esondazione, mediante estensione sul territorio della curva di livello corrispondente ai livelli idrometrici stimati.

La presente Relazione è corredata da una appendice, per l'approfondimento dei concetti e dei modelli di calcolo utilizzati per la determinazione dei livelli di piena.

Si rimanda ai paragrafi terminali del presente elaborato per l'illustrazione sommaria dei risultati dei calcoli.

## 2 Caratteristiche geografiche, pluviometria e regolazione del lago

### 2.1 Caratteristiche del bacino idrografico ed affluenti del lago Maggiore

Il bacino imbrifero del lago Maggiore si estende complessivamente su un'area di 6.598 km<sup>2</sup>, 3.229 dei quali in territorio italiano e 3.369 in territorio elvetico. Il rapporto tra l'area del bacino e quella lacustre è di circa 31:1, la più alta d'Italia assieme al lago di Como.

Il reticolo idrografico del bacino è caratterizzato dalla presenza di numerosi tributari. I principali sottobacini vengono indicati nella tabella che segue, unitamente alla rispettiva estensione geografica.

sottobacino	estensione (km <sup>2</sup> )
Ticino	1.616
Toce	1.774
Maggia	926
Tresa (lago di Lugano)	754
Verzasca	237
Strona (lago d'Orta)	223
Bardello (lago di Varese)	134
San Bernardino	131
Cannobino	110
San Giovanni	61

**Tabella 1:** sottobacini tributari del lago Maggiore

Si rileva che i dati sinora illustrati influiscono sia sui livelli di piena (proporzionali al rapporto tra l'area del bacino e l'area dello specchio lacustre), sia sulla loro frequenza (la quale risente invece del numero dei bacini indipendenti che alimentano il lago).

All'interno del bacino idrografico sono presenti numerosi altri specchi lacustri. Tra quelli naturali, nove presentano un'estensione superiore a 0,50 km<sup>2</sup> (Lugano, Orta, Varese, Mergozzo, Comabbio, Monate, Biandronno, Ritom e Piano), ma ben più importanti sono, nel loro complesso, gli invasi artificiali, costruiti prevalentemente per la produzione di energia elettrica: essi presentano una capacità utile che supera i 600 milioni di metri cubi. L'importanza di tali bacini risiede nel fatto che la loro capacità complessiva di invaso corrisponde, qualora essi rilasciassero contemporaneamente tutta l'acqua immagazzinata, e si chiudesse il Ticino emissario, all'innalzamento del livello del lago Maggiore di oltre 2,5 metri.

### 2.2 Caratteristiche morfologiche del lago

Il lago Maggiore occupa la parte centro - meridionale dell'area del proprio bacino di competenza, in

area amministrativamente suddivisa fra Svizzera (cantone Ticino) ed Italia. Lo specchio d'acqua si trova ad una altezza mediamente oscillante fra 193,20 m/slm (livello medio minimo) e 193,80 m/slm (livello medio massimo). La superficie dello specchio d'acqua, variabile con il livello, viene riassunta nella tabella che segue.

livello del pelo libero (m/slm)	estensione dello specchio d'acqua (km <sup>2</sup> )
193,00	208
193,20	212
197,00	232
200,00	254

**Tabella 2:** variazione della superficie del lago in funzione del livello del pelo libero

### 2.3 Regime pluviometrico

Il regime pluviometrico dell'area del bacino imbrifero è di tipo sub - litoraneo alpino, con minimo assoluto invernale e massimi in autunno ed estate. Esso è caratterizzato da una elevata piovosità, tanto che l'area in esame comprende quella che in assoluto presenta la massima altezza media annua di pioggia nell'intero bacino del Po (oltre 2.000 mm, nella zona tra il Maggiore ed il Toce, fino allo spartiacque nella zona del S. Gottardo). All'esterno di tale perimetro, le aree che presentano valori di piovosità annua superiori ai 1.000 mm ricoprono estensioni notevoli, specie alle quote medie. Lungo fasce altimetricamente più elevate del bacino del Ticino immissario e nella maggior parte del Cantone Ticino si registrano invece valori di piovosità minori, compresi fra 700 e 1.000 mm.

Particolarmente elevati sono anche i deflussi, ad evidenziare un elevato grado di impermeabilità del bacino, fra i maggiori di tutti i grandi laghi prealpini.

### 2.4 Regime di regolazione del lago

L'esercizio della regolazione del lago Maggiore attraverso lo sbarramento mobile della Miorina è iniziato ufficialmente il 1° gennaio 1943, a seguito della sistemazione dell'incile e la costruzione della diga della Miorina, circa 3 km a valle di Sesto Calende. Complessivamente, le opere qui realizzate comprendono lo sbarramento di regolazione, una conca di navigazione in sponda sinistra ed altri manufatti accessori.

La traversa mobile della Miorina è larga 200 metri, ed è costituita da 120 portine metalliche completamente abbattibili, accostate l'una all'altra ed incernierate nella base alla platea di fondo. Esse sono manovrate dall'alto, e possono assumere quattro differenti posizioni per la ritenuta delle acque; una quinta posizione di totale abbattimento rende l'alveo completamente libero per il deflusso delle piene e ricostituisce praticamente la situazione "naturale" dell'incile, così come era prima della costruzione dello sbarramento.

Le variazioni del livello del lago nei periodi di regolazione sono contenute entro i limiti definiti dagli atti della Concessione: quello inferiore, fisso, è pari a -0,50 m rispetto allo zero

dell'idrometro di Sesto, mentre quello superiore varia durante l'anno, in ragione della variazione stagionale degli afflussi e del rischio di piene: +1,00 m dal 1° marzo al 31 ottobre; +1,50 m dal 1° novembre alla fine di febbraio. A ciò corrisponde una possibilità di invaso pari a 315 milioni di m<sup>3</sup>, che salgono a 420 milioni nel periodo invernale.

L'utilizzazione dei volumi accumulati nel lago avviene in primavera – estate (utenze irrigue) ed autunno – inverno (utenze industriali): compatibilmente con le disponibilità idriche accumulate nel lago, in tali periodi si erogano rispettivamente 210÷240 m<sup>3</sup>/s e 140÷150 m<sup>3</sup>/s.

### 3 Determinazione dei livelli di piena attesi

#### 3.1 Analisi dei dati storici

##### 3.1.1 Eventi di piena del lago riportati nelle cronache storiche

Presso la Società Meteorologica Italiana sono stati recentemente raccolti i dati relativi a tutte le piene del lago di cui vi sia memoria nelle cronache storiche. I dati raccolti vengono riportati nella tabella che segue. Sebbene essi siano largamente incompleti, e non utilizzabili ai fini statistici (soprattutto per la mancanza di riferimenti topografici certi ai quali rapportare le quote indicate), essi rendono un'idea abbastanza precisa del campo di livelli che può essere atteso nel corso dell'indagine.

data dell'evento	livello di piena	data dell'evento	livello di piena
1178	203,67 m/slm	1880	195,80 m/slm
1640	198,82 m/slm	1882	196,00 m/slm
1705	199,03 m/slm	1886	196,00 m/slm
1755	197,77 m/slm	30 ottobre 1889	196,56 m/slm
1777	198,57 m/slm	1891	196,20 m/slm
1792	197,67 m/slm	1892	196,10 m/slm
1807 (?)	199,28 m/slm	1896	196,40 m/slm
1829	197,15 m/slm	28 agosto 1900	196,40 m/slm
1834	197,30 m/slm	1906	195,80 m/slm
1840	197,78 m/slm	18 ottobre 1907	197,21 m/slm
1846	197,08 m/slm	1917	196,20 m/slm
1855	197,22 m/slm	1918	196,30 m/slm
4 ottobre 1868	200,23 m/slm	25 settembre 1920	196,40 m/slm
22 maggio (?) 1872	197,32 m/slm	1926	196,50 m/slm
1879	195,70 m/slm	1926	196,60 m/slm

**Tabella 3:** eventi di piena registrati sul lago Maggiore in epoca storica

data dell'evento	livello di piena	data dell'evento	livello di piena
2 novembre 1928	196,81 m/slm	1939	196,23 m/slm
1935	195,64 m/slm	1940	195,84 m/slm
1937	195,72 m/slm	1942	196,21 m/slm

**Tabella 3 (segue):** *eventi di piena registrati sul lago Maggiore in epoca storica*

### 3.1.2 Dati raccolti all'idrometro di Sesto Calende

Per avere dati raccolti in maniera sistematica, e quindi utilizzabili ai fini statistici, si deve attendere fino al 1829, quando ebbe inizio la lettura quotidiana del livello idrico presso l'idrometro di Sesto Calende, posto in corrispondenza del centro abitato (circa 2,7 km a valle della sezione convenzionalmente indicata come sezione di origine del fiume). Nel 1934, la procedura di raccolta dei dati venne ulteriormente perfezionata, allorquando l'idrometro venne dotato di uno strumento registratore.

Il campione di registrazioni da esaminare non può però comprendere l'intero insieme dei dati registrati. Le letture eseguite prima del 1868, per esempio, non possono essere utilizzate, in quanto la rovinosa piena che occorre nell'ottobre di quell'anno comportò una notevole erosione del fondo, nella zona di transizione tra il lago ed il fiume, modificando in maniera significativa il comportamento del sistema lago Maggiore - fiume Ticino. Allo stesso modo, le registrazioni eseguite anche in tempi più recenti possono contenere lacune più o meno evidenti, tali da impedire la lettura che ai nostri fini deve essere considerato il dato principale: il massimo valore annuo del livello idrico a Sesto Calende (o, in alternativa, della portata media giornaliera nella medesima sezione). In altri casi, i dati risultano non disponibili semplicemente perché non pubblicati.

Tenuto conto di quanto sopra, i dati registrati a Sesto ed utilizzabili per le successive elaborazioni statistiche sono limitati al periodo compreso fra il 1921 ed il 1997 (assommando i dati pubblicati rispettivamente a cura del Servizio Idrografico e del Consorzio del Ticino), periodo per il quale sono disponibili i massimi annuali delle portate medie giornaliere, dai quali si possono agevolmente ricavare, se mancanti, i rispettivi valori di massima portata al colmo, attraverso semplici passaggi matematici (si veda oltre).

anno	portata (mc/s)	tipologia di dato	fonte di pubblicazione
1921	771	massimo annuale della portata media giornaliera	Servizio Idrografico
1922	766	massimo annuale della portata media giornaliera	Servizio Idrografico
1923	1220	massimo annuale della portata media giornaliera	Servizio Idrografico
1924	1350	massimo annuale della portata media giornaliera	Servizio Idrografico
1925	1160	massimo annuale della portata media giornaliera	Servizio Idrografico
1926	1910	massimo annuale della portata media giornaliera	Servizio Idrografico
1927	1100	massimo annuale della portata media giornaliera	Servizio Idrografico
1928	2130	massimo annuale della portata media giornaliera	Servizio Idrografico
1929	612	massimo annuale della portata media giornaliera	Servizio Idrografico

**Tabella 4:** *massimi annuali di portata registrati all'idrometro di Sesto Calende*



anno	portata (mc/s)	tipologia di dato	fonte di pubblicazione
1930	1050	massimo annuale della portata media giornaliera	Servizio Idrografico
1931	701	massimo annuale della portata media giornaliera	Servizio Idrografico
1932	1180	massimo annuale della portata media giornaliera	Servizio Idrografico
1933	1230	massimo annuale della portata media giornaliera	Servizio Idrografico
1934	977	massimo annuale della portata al colmo	Servizio Idrografico
1935	1510	massimo annuale della portata al colmo	Servizio Idrografico
1936	1180	massimo annuale della portata al colmo	Servizio Idrografico
1937	1220	massimo annuale della portata al colmo	Servizio Idrografico
1938	911	massimo annuale della portata al colmo	Servizio Idrografico
1939	1700	massimo annuale della portata al colmo	Servizio Idrografico
1940	1350	massimo annuale della portata al colmo	Servizio Idrografico
1941	1150	massimo annuale della portata al colmo	Servizio Idrografico
1942	1500	massimo annuale della portata al colmo	Servizio Idrografico
1943	770	massimo annuale della portata al colmo	Servizio Idrografico
1944	935	massimo annuale della portata al colmo	Servizio Idrografico
1945	1050	massimo annuale della portata al colmo	Servizio Idrografico
1946	997	massimo annuale della portata al colmo	Servizio Idrografico
1947	758	massimo annuale della portata al colmo	Servizio Idrografico
1948	1320	massimo annuale della portata al colmo	Servizio Idrografico
1949	804	massimo annuale della portata al colmo	Servizio Idrografico
1950	826	massimo annuale della portata al colmo	Servizio Idrografico
1951	1900	massimo annuale della portata al colmo	Servizio Idrografico
1952	864	massimo annuale della portata al colmo	Servizio Idrografico
1953	1370	massimo annuale della portata al colmo	Servizio Idrografico
1954	1260	massimo annuale della portata al colmo	Servizio Idrografico
1955	1120	massimo annuale della portata al colmo	Servizio Idrografico
1956	1210	massimo annuale della portata al colmo	Servizio Idrografico
1957	1330	massimo annuale della portata al colmo	Servizio Idrografico
1958	985	massimo annuale della portata al colmo	Servizio Idrografico
1959	830	massimo annuale della portata al colmo	Servizio Idrografico
1960	1530	massimo annuale della portata al colmo	Servizio Idrografico
1961	809	massimo annuale della portata al colmo	Servizio Idrografico
1962	644	massimo annuale della portata al colmo	Servizio Idrografico
1963	1690	massimo annuale della portata al colmo	Servizio Idrografico
1964	862	massimo annuale della portata al colmo	Servizio Idrografico
1965	1480	massimo annuale della portata al colmo	Servizio Idrografico
1966	1110	massimo annuale della portata al colmo	Servizio Idrografico
1967	946	massimo annuale della portata al colmo	Servizio Idrografico
1968	1870	massimo annuale della portata al colmo	Servizio Idrografico

**Tabella 4 (segue):** massimi annuali di portata registrati all'idrometro di Sesto Calende

anno	portata (mc/s)	tipologia di dato	fonte di pubblicazione
1969	1010	massimo annuale della portata al colmo	Servizio Idrografico
1970	733	massimo annuale della portata al colmo	Servizio Idrografico
1971	723,05	massimo annuale della portata media giornaliera	Consorzio del Ticino
1972	991,5	massimo annuale della portata media giornaliera	Consorzio del Ticino
1973	1222,5	massimo annuale della portata media giornaliera	Consorzio del Ticino
1974	594	massimo annuale della portata media giornaliera	Consorzio del Ticino
1975	1291	massimo annuale della portata media giornaliera	Consorzio del Ticino
1976	1515	massimo annuale della portata media giornaliera	Consorzio del Ticino
1977	1859,5	massimo annuale della portata media giornaliera	Consorzio del Ticino
1978	1125	massimo annuale della portata media giornaliera	Consorzio del Ticino
1979	1941,5	massimo annuale della portata media giornaliera	Consorzio del Ticino
1980	688	massimo annuale della portata media giornaliera	Consorzio del Ticino
1981	2072	massimo annuale della portata media giornaliera	Consorzio del Ticino
1982	1010	massimo annuale della portata media giornaliera	Consorzio del Ticino
1983	1761	massimo annuale della portata media giornaliera	Consorzio del Ticino
1984	897,5	massimo annuale della portata media giornaliera	Consorzio del Ticino
1985	952,5	massimo annuale della portata media giornaliera	Consorzio del Ticino
1986	1651	massimo annuale della portata media giornaliera	Consorzio del Ticino
1987	1419	massimo annuale della portata media giornaliera	Consorzio del Ticino
1988	1467	massimo annuale della portata al colmo	Consorzio del Ticino
1989	855	massimo annuale della portata al colmo	Consorzio del Ticino
1990	756	massimo annuale della portata al colmo	Consorzio del Ticino
1991	1582	massimo annuale della portata al colmo	Consorzio del Ticino
1992	960	massimo annuale della portata al colmo	Consorzio del Ticino
1993	2416	massimo annuale della portata al colmo	Consorzio del Ticino
1994	1161	massimo annuale della portata al colmo	Consorzio del Ticino
1995	710	massimo annuale della portata al colmo	Consorzio del Ticino
1996	1527	massimo annuale della portata al colmo	Consorzio del Ticino
1997	1172	massimo annuale della portata al colmo	Consorzio del Ticino

**Tabella 4 (segue):** *massimi annuali di portata registrati all'idrometro di Sesto Calende*

Sono inoltre reperibili sul web ([www.laghi.net/Ticino/index.asp?Disp=idrometro](http://www.laghi.net/Ticino/index.asp?Disp=idrometro)) i dati relativi ai livelli di picco registrati annualmente all'idrometro di Sesto Calende, per il periodo compreso fra il 2004 ed il 2010.

anno	data	lettura all'idrometro (cm)	lettura all'idrometro (m/slm)	fonte di pubblicazione
2004	03.11	287,10	195,89	Consorzio del Ticino
2005	01.01	133,80	194,35	Consorzio del Ticino
2006	09.12	159,10	194,61	Consorzio del Ticino
2007	16.06	182,40	194,84	Consorzio del Ticino
2008	07.11	236,60	195,38	Consorzio del Ticino
2009	30.04	204,90	195,07	Consorzio del Ticino
2010	14.05	201,20	195,03	Consorzio del Ticino

**Tabella 5:** massimi annuali di livello registrati all'idrometro di Sesto Calende (periodo 2004 – 2010)

### 3.1.3 Dati raccolti all'idrometro di Locarno

Il periodo compreso fra il 1997 ed il 2003 (periodo di grande significato, in quanto comprendente due eventi di piena - ottobre 2000 e novembre 2002 – di grandissimo interesse statistico) può essere rappresentato utilizzando i massimi livelli annui registrati a Locarno e pubblicati a cura del già citato Ufficio Federale delle Acque e della Geologia. Vengono assunti, a scopo di confronto con quanto riportato nella tabella precedente, anche i dati relativi al periodo 2004 – 2010.

I livelli corrispondenti al colmo, anno per anno, vengono indicati nella tabella che segue.

anno	livello al colmo (m/slm)
1998	194,44
1999	194,95
2000	197,57
2001	194,46
2002	196,31
2003	194,15
2004	195,65
2005	194,00
2006	194,30
2007	194,55
2008	195,17
2009	194,82
2010	194,75

**Tabella 6:** massimi livelli annuali (valore di colmo) registrati all'idrometro di Locarno

L'impiego di tali dati deve però essere operato con grande cautela, a motivo di quanto indicato nei punti che seguono:

- 1) i livelli misurati in territorio elvetico fanno riferimento al sistema topografico in uso in quel Paese, che pone la sua base primaria al caposaldo della "Pietra Nera", presso Ginevra: per poter essere confrontati con i livelli misurati in territorio italiano, è necessario confrontare e livellare fra loro il sistema di riferimento elvetico e quello italiano;
- 2) i livelli misurati a Locarno possono essere utilizzati per rappresentare il livello medio del lago, nell'ipotesi che la superficie del pelo d'acqua sia perfettamente pianeggiante, e che non risenta delle oscillazioni di massa connesse alla propagazione delle onde di piena; al contrario, i livelli registrati a Sesto Calende sono sistematicamente più bassi del pelo d'acqua rilevato in corrispondenza del lago, in quanto risentono degli abbassamenti connessi all'incremento di velocità della corrente e delle perdite, per attrito, nel primo tratto dell'alveo fluviale;
- 3) per omogeneità con gli altri dati del campione, è infine necessario che i livelli registrati a Locarno, modificati per tenere conto delle differenze connesse al sistema topografico di riferimento e delle diminuzioni dovute al trasferimento della corrente dal lago alla sezione di misura, vengano trasformati in portata.

Il primo ed il terzo punto sono relativamente agevoli da affrontare, con semplice ricorso alla letteratura scientifica pubblicata sull'argomento. Il secondo punto, invece, richiede la formulazione di un modello matematico del comportamento del primo tratto dell'asta fluviale, secondo i criteri illustrati in Appendice. Le questioni qui poste verranno illustrate nei paragrafi che seguono.

### 3.1.3.1 Relazione tra i livelli del pelo libero misurati in Italia ed in Svizzera, secondo i rispettivi sistemi di riferimento

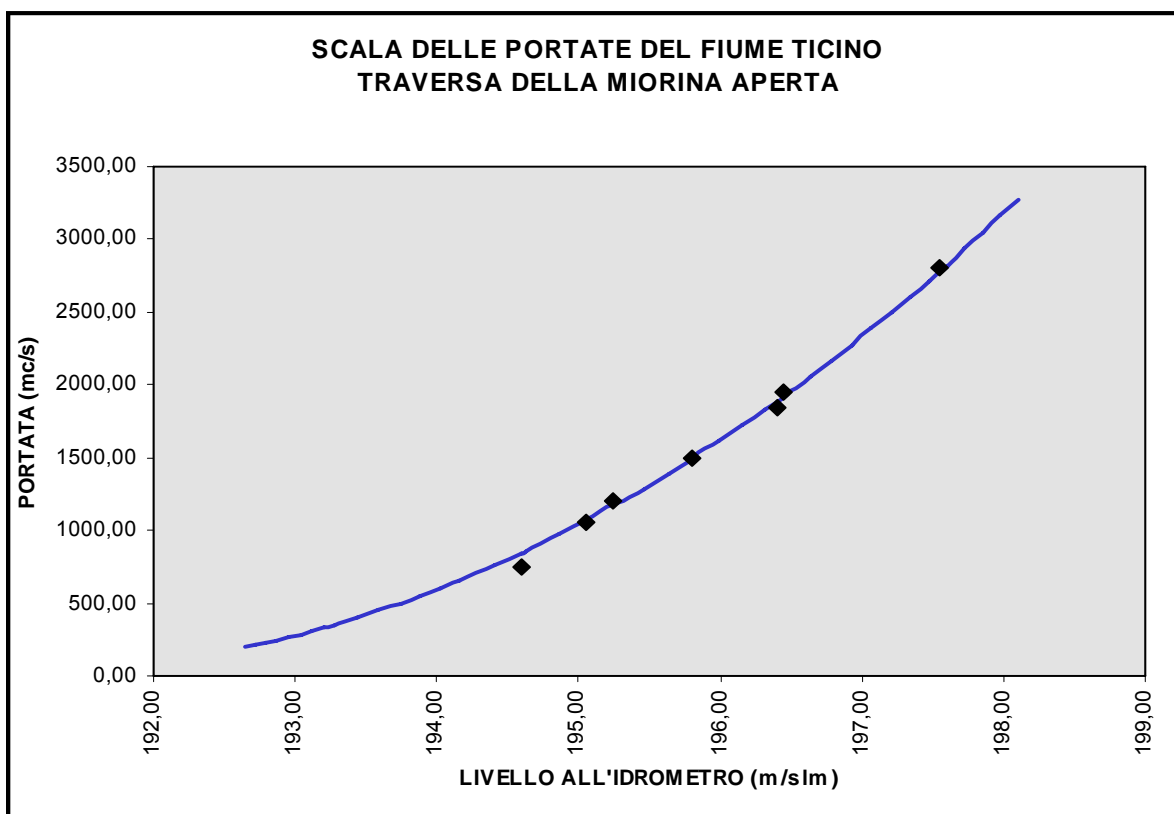
Lo zero dell'idrometro di Sesto Calende fu fissato alla quota di 193,016 m/slm sin dalla data della "Conferenza dei delegati tecnici svizzeri ed italiani per l'esame del progetto di sistemazione del lago Maggiore" (1938). Secondo l'orizzonte svizzero, tale quota risultava più bassa di 35,2 cm (192,664 m/slm). Una recente indagine, commissionata dalla Sezione Economia delle Acque di Bellinzona e condotta dallo studio Geoter di Verbania, allo scopo di livellare i capisaldi I.G.M. e quelli collegati al caposaldo principale della livellazione elvetica presenti nell'area del Verbano, ha fissato in 34,45 cm il dislivello fra i due orizzonti.

Per rapportare all'orizzonte italiano le letture idrometriche effettuate in territorio elvetico è quindi sufficiente elevare tali letture di circa 35 cm.

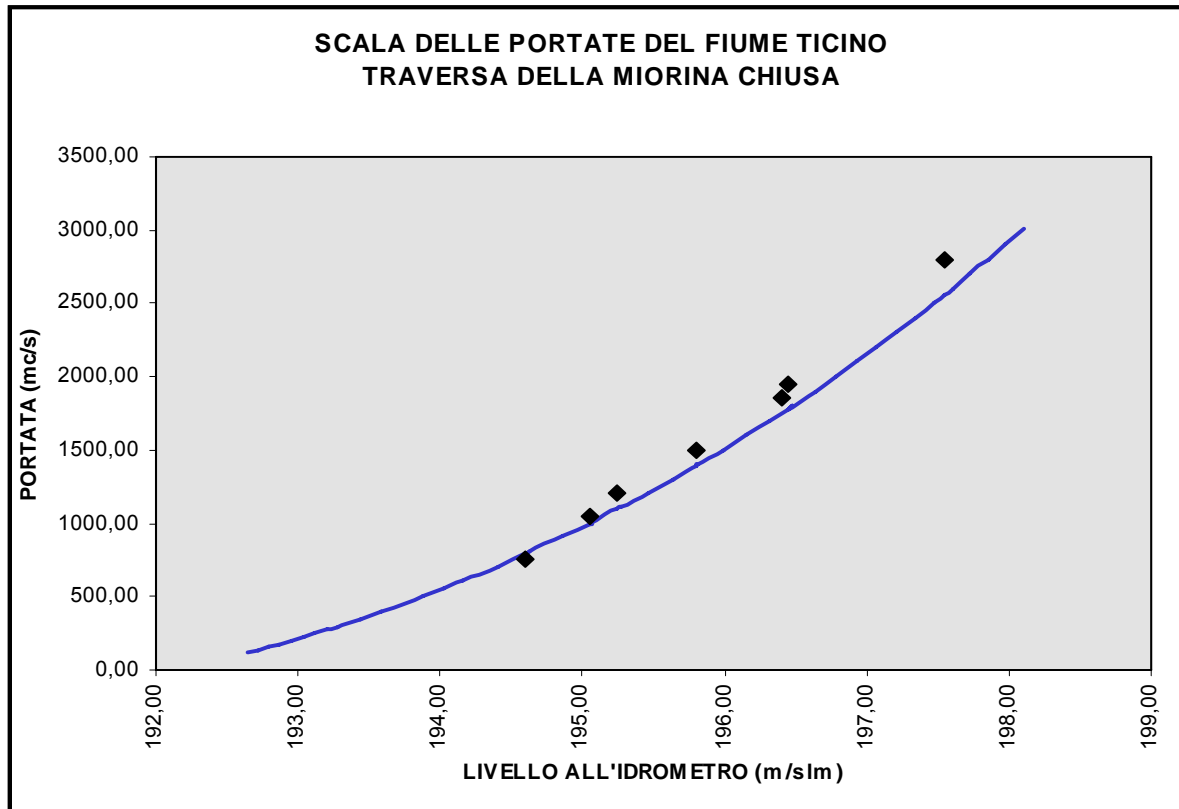
### 3.1.3.2 Definizione della "scala delle portate" del Ticino in corrispondenza dell'idrometro di Sesto Calende

La relazione tra altezze di corrente all'idrometro di Sesto e portate in transito è stata ottenuta con ricorso al modello dell'alveo sviluppato da Maione e Mignosa (1995) sulla base delle misure di portata sperimentali eseguite durante le piene dell'ottobre 1991 e dell'ottobre 1993, e considerando 57 sezioni trasversali dell'alveo, disponibili a seguito del rilievo commissionato nel 1990 dalla Sezione Economia delle Acque di Bellinzona (figure nn. 1 e 2)

Fra le assunzioni di base del modello, si rammenta quella secondo la quale il legame fra livello e portata, una volta fissate le condizioni al contorno, è biunivoco: a ciascun livello idrometrico corrisponde soltanto un valore di portata. L'assunzione può essere ritenuta accettabile soltanto trascurando il fenomeno noto come "cappio di piena", operazione lecita se si considera l'entità dell'effetto di laminazione che il lago opera sul primo tratto del corso del Ticino, e la conseguente gradualità degli incrementi di livello che possono essere attesi nel fiume.



**Figura 1:** scala delle portate del fiume Ticino, all'idrometro di Sesto Calende, con opere di sbarramento alla Miorina completamente aperte



**Figura 2:** scala delle portate del fiume Ticino, all'idrometro di Sesto Calende, con opere di sbarramento alla Miorina completamente chiuse

Il modello produce due differenti relazioni, da utilizzare rispettivamente nel caso le paratoie mobili dello sbarramento della Miorina siano aperte o chiuse, il cui andamento è illustrato nei grafici di seguito riportati. Come si può notare da questi, per valori di portata elevati il diverso stato dello sbarramento di valle non comporta differenze di rilievo nei valori di portata in transito. In ogni caso, nel corso del presente studio, ogni simulazione è stata condotta nell'ipotesi di sbarramento completamente aperto (e questa d'altronde è la condizione che viene imposta qualora il livello del lago si avvicini ai valori di guardia).

Le curve di interpolazione che rappresentano il legame fra portata defluente ( $Q$ , in  $m^3/s$ ) e livello idrometrico a Sesto Calende ( $I$ , in  $m/slm$ ) possono essere rappresentate dalle equazioni che seguono, rispettivamente riferite a situazione con traversa alla Miorina completamente aperta e completamente chiusa:

$$Q = 0,505623 \cdot I^3 - 229,919115 \cdot I^2 + 32501,018944 \cdot I - 1343115,961412 \quad [1]$$

$$Q = 1,708596 \cdot I \cdot I^3 - 947,507474 \cdot I^2 + 175098,173601 \cdot I - 10783223,461334 \quad [2]$$

### 3.1.3.3 Relazione tra i livelli del pelo libero misurati a Sesto Calende (fiume Ticino) e quelli misurati direttamente a lago

Come già in precedenza anticipato, il livello idrico misurato a Sesto Calende risente dell'esistenza di due fenomeni:

- 1) la perdita di quota necessaria per produrre una accelerazione della corrente (nell'ipotesi, abbastanza vicina alla realtà, che la corrente complessiva nel lago abbia velocità media nulla);
- 2) la perdita di energia della corrente (con corrispondente perdita di quota del pelo libero) dovuta all'attrito contro le sponde ed il fondo del letto fluviale.

Per la quantificazione dei due contributi è necessario ricorrere alle tecniche di calcolo del profilo del pelo libero dei corsi d'acqua, sommariamente illustrate in calce alla presente relazione.

Nella fattispecie, il calcolo può essere eseguito soltanto in maniera semplificata, ricorrendo ad alcune delle già citate sezioni topografiche rilevate nel 1990, (per le quali però non sono disponibili i profili topografici completi, ma soltanto le quote di fondo alveo, le rispettive larghezze e le distanze progressive, misurate a partire dalla punta di S. Anna, secondo quanto riportato nella tabella che segue). In assenza di più precise indicazioni, è inoltre stato trascurato l'effetto della presenza delle pile del ponte stradale e ferroviario di Sesto (linea FS Milano - Domodossola e S.S. n. 33). Tale approssimazione viene in ogni caso compensata in sede di taratura del modello. Alla sezione passante per la punta di S. Anna è assegnato il n 100; alla sezione posta in corrispondenza dell'idrometro di Sesto Calende, il numero 10 (tabella n. 7, a pagina seguente).

A causa della carenza di dati topografici, nell'esecuzione dei calcoli, in luogo del profilo topografico reale viene introdotto un profilo fittizio, a forma pressoché rettangolare, introducendo con ciò un errore che non inficia in alcun modo la validità dell'analisi condotta.

Il calcolo viene svolto in due fasi.

In una prima fase, di taratura del modello, l'obiettivo delle elaborazioni è la determinazione del valore di scabrezza che meglio si adatta alla descrizione del tratto di alveo in esame. Per fare ciò, ci si è avvalsi degli studi a suo tempo condotti da Citrini (1973), il quale effettuò una serie di misure contemporanee di livello presso l'idrometro di Sesto e direttamente a lago. Il risultato di questa prima elaborazione è un coefficiente di scabrezza variabile con la portata in transito, secondo

l'espressione che segue:

$$n (Manning) = -0,0000000151 \cdot Q^2 + 0,0004908 \cdot Q + 0,0330213577 \quad [3]$$

(per Q minore di 2.700 mc/s), e

$$n (Manning) = 0,057 \quad [4]$$

per i rimanenti valori di portata.

Nella fase successiva, si utilizza il modello tarato come sopra descritto imponendo diversi valori per il livello del pelo libero all'idrometro di Sesto, allo scopo di ottenere uno spettro sufficientemente ampio di valori per il dislivello cercato.

sezione (secondo la numerazione adottata originariamente)	distanza progressiva verso monte (km)	larghezza della sezione (m)	quota assoluta di fondo alveo (m/slm)
10	0,000	210	187,08
9	0,235	170	183,64
8	0,367	220	188,46
7	0,638	280	182,10
6	0,848	220	183,64
5	1,028	160	182,21
4	1,288	270	185,40
3	1,612	240	180,23
2	1,872	550	176,39
1	2,361	210	177,09
100	2,712	310	180,20

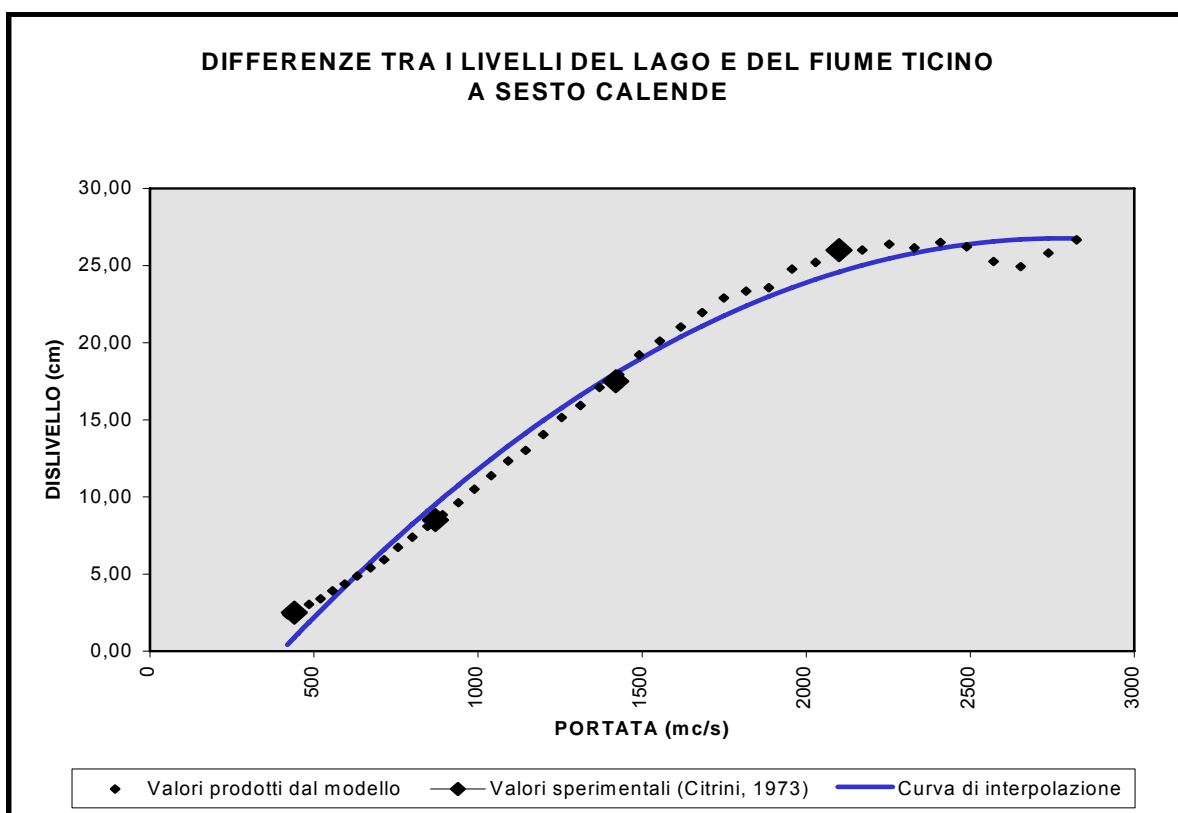
**Tabella 7:** dati caratteristici delle sezioni del fiume Ticino rilevate nel 1990 per conto della Sezione Economia delle Acque di Bellinzona

Il risultato dell'elaborazione viene illustrato nel grafico riportato in figura n. 3, sul quale sono indicati:

- 1) le misure sperimentali del Citrini;
- 2) i risultati prodotti dal modello, ottenuti utilizzando valori di scabrezza variabili con la portata in transito, come indicato in precedenza;
- 3) la curva di interpolazione dei risultati, utile in questo caso ad eliminare le anomalie localmente generate dal modello.

La relazione rappresentata nel grafico di figura n. 3 tra il livello all'idrometro di Sesto (I, espressi in m/slm) ed il livello misurato direttamente sul lago (L, sempre in m/slm) risulta ottimamente interpolato dalla seguente espressione:

$$I = 0,005227 \cdot L^2 - 1,111 \cdot L + 212,78 \quad [5]$$



**Figura 3:** relazione tra il dislivello che si crea fra i livelli del lago e del Ticino in corrispondenza dell'idrometro di Sesto, in funzione della portata in uscita dal lago

#### 3.1.3.4 Valori di portata al colmo desunti dai dati registrati a Locarno

Facendo uso delle relazioni di interpolazione ricavate nei paragrafi precedenti, è quindi possibile riportare i dati di livello registrati a Locarno a valori di portata, completando quindi i dati raccolti nella precedente tabella n. 4.

Nel dettaglio:

- la lettura di livello viene corretta per omogeneità con lo zero di riferimento del sistema topografico italiano;
- con impiego della relazione [5], la lettura di livello viene ricondotta dal lago all'idrometro di Sesto Calende;
- la lettura idrometrica viene convertita in portata facendo uso della relazione [1], nell'ipotesi che al colmo annuo di portata defluente corrisponda la completa apertura delle paratoie mobili dello sbarramento della Miorina.

Tenuto conto della quantità di approssimazioni via via introdotte nel calcolo, appare peraltro opportuno che le elaborazioni descritte vengano precedute da una sessione di prova, condotta utilizzando i valori relativi agli anni compresi fra il 2004 ed il 2010, finalizzata alla validazione dello schema di calcolo adottato.

I risultati dell'elaborazione condotta sono rappresentati nella seguente tabella n. 8, dalla quale si rileva una differenza media di 4 cm fra i livelli idrometrici calcolati a partire dalle letture dei livelli



del lago eseguite a Locarno e quelli misurati direttamente all'idrometro di Sesto.

In ragione di ciò, ed in favore di sicurezza, tutti i valori calcolati a partire dai dati registrati a Locarno verranno innalzati di 4 cm (tabella n. 9)

anno	livello del lago al colmo (misura rispetto al sistema topografico Svizzero) (m/slm)	livello del lago al colmo (misura rispetto al sistema topografico I.G.M.) (m/slm)	livello del fiume Ticino in corrispondenza dell'idrometro di Sesto Calende (valore calcolato) (m/slm)	livello del fiume Ticino in corrispondenza dell'idrometro di Sesto Calende (valore registrato) (m/slm)
2004	195,65	196,00	195,82	195,89
2005	194,00	194,35	194,29	194,35
2006	194,30	194,65	194,57	194,61
2007	194,55	194,90	194,80	194,84
2008	195,17	195,52	195,38	195,38
2009	194,82	195,17	195,05	195,07
2010	194,75	195,10	194,98	195,03

**Tabella 8:** valori di portata al colmo desunti dalle rilevazione effettuate presso la stazione di misura di Locarno

In applicazione di quanto sopra indicato, i dati relativi al colmo annuale del livello del lago registrati a Locarno sono stati trasformati in valori di portata come indicato nella tabella seguente.

anno	livello del lago al colmo (misura rispetto al sistema topografico Svizzero) (m/slm)	livello del lago al colmo (misura rispetto al sistema topografico I.G.M.) (m/slm)	livello del fiume Ticino in corrispondenza dell'idrometro di Sesto Calende, corretto (m/slm)	portata defluente dal fiume Ticino (mc/s)
1998	194,44	194,79	194,74	909,81
1999	194,95	195,30	195,21	1150,27
2000	197,57	197,92	197,68	2897,46
2001	194,46	194,81	194,76	918,66
2002	196,31	196,66	196,49	1946,78
2003	194,15	194,45	194,47	786,71

**Tabella 9:** valori di portata al colmo desunti dalle rilevazione effettuate presso la stazione di misura di Locarno

### 3.2 Definizione del campione di osservazioni da sottoporre ad analisi statistica

Prima di dare luogo alle elaborazioni statistiche necessarie per la determinazione della probabilità che un certo valore di portata transiti dinanzi all'idrometro di Sesto (e che, di conseguenza, un certo livello idrico si instauri nel Verbano), è necessario ricondurre all'omogeneità i dati di portata sinora selezionati.

I dati a disposizione comprendono infatti:

- 1) alcuni valori corrispondenti alla massima portata giornaliera rilevata nell'arco dell'anno, e valutata come media sulle 24 ore, pubblicati dal Servizio Idrografico e dal Consorzio del Ticino;
- 2) alcuni valori corrispondenti al picco massimo di portata rilevato nell'arco dell'anno, pubblicati dal Servizio Idrografico e dal Consorzio del Ticino;
- 3) alcuni valori di portata corrispondenti al massimo livello annuo (valore di picco) rilevato sul lago, pubblicati dal Ufficio Federale delle Acque e della Geologia (UFAEG).

Sebbene la differenza fra valore massimo della portata media giornaliera e valore massimo della portata istantanea possa essere ritenuta di lieve entità, le elaborazioni condotte senza tenere conto di tale distinzione risultano praticamente prive di rilievo statistico. Per ricondurre tutti i dati ad un valore di colmo annuo di portata, al quale possa essere in seguito associato un valore di picco del livello raggiunto dal lago, possono essere utilizzate le relazioni ottenute nel corso di recenti studi condotti presso l'Università di Pavia contestualmente alla redazione del Piano Provinciale di Previsione e Prevenzione di Protezione Civile. Tali relazioni vengono espresse separatamente per i dati pubblicati dal Servizio Idrografico e dal Consorzio del Ticino, per tenere conto delle differenti modalità di calcolo adottate dai due Enti. Si rileva, per inciso, che tale operazione non è invece necessaria per i valori di portata stimati a partire dai dati registrati a Locarno, in quanto, in tal caso, tutti i dati presi in esame corrispondevano già in partenza ad un valore di colmo, anziché al valore massimo annuo del livello medio giornaliero.

#### 3.2.1 Relazione tra massimo annuale del valore di portata media giornaliera, e massimo annuale della portata al colmo, per i valori pubblicati dal Servizio Idrografico

L'analisi della correlazione tra i due valori di portata ( $Q_p$  - valore annuo di picco della portata istantanea - e  $Q$  - massimo valore annuo della portata media giornaliera) ha condotto alla definizione della relazione che segue:

$$Q_p = 0,904 \cdot Q^{1,016} \quad [6]$$

#### 3.2.2 Relazione tra massimo annuale del valore di portata media giornaliera, e massimo annuale della portata al colmo, per i valori pubblicati dal Consorzio del Ticino

Per il caso dei dati pubblicati dal Consorzio del Ticino, la relazione cercata assume la seguente espressione:

$$Q_p = 1,006 \cdot Q + 31,33 \quad [7]$$

#### 3.2.3 Campione di dati analizzato

L'applicazione delle trasformazioni sopra indicate dà luogo alla definizione di un campione di dati

comprendente 90 valori consecutivi (relativi al periodo compreso fra il 1921 ed il 2010) del massimo annuale della portata al colmo, rilevati sulla base dei dati registrati agli idrometri di Sesto Calende e di Locarno, pubblicati e parzialmente rielaborati dal Consorzio del Ticino, dal Servizio Idrografico e dall'Ufficio Federale delle Acque e della Geologia, ed infine sottoposti ad una nuova parziale rielaborazione da parte dello scrivente. Il campione risultante viene integralmente riportato nella tabella che segue. Accanto a ciascun dato, vengono indicati la fonte di pubblicazione e l'indicazione delle eventuali rielaborazioni condotte.

anno	portata (mc/s)	fonte	anno	portata (mc/s)	fonte
1921	775,20	Servizio Idrografico, rielaborato	1951	1900,00	Servizio Idrografico
1922	770,10	Servizio Idrografico, rielaborato	1952	864,00	Servizio Idrografico
1923	1235,69	Servizio Idrografico, rielaborato	1953	1370,00	Servizio Idrografico
1924	1369,58	Servizio Idrografico, rielaborato	1954	1260,00	Servizio Idrografico
1925	1173,97	Servizio Idrografico, rielaborato	1955	1120,00	Servizio Idrografico
1926	1948,49	Servizio Idrografico, rielaborato	1956	1210,00	Servizio Idrografico
1927	1112,30	Servizio Idrografico, rielaborato	1957	1330,00	Servizio Idrografico
1928	2176,72	Servizio Idrografico, rielaborato	1958	985,00	Servizio Idrografico
1929	613,07	Servizio Idrografico, rielaborato	1959	830,00	Servizio Idrografico
1930	1060,95	Servizio Idrografico, rielaborato	1960	1530,00	Servizio Idrografico
1931	703,75	Servizio Idrografico, rielaborato	1961	809,00	Servizio Idrografico
1932	1194,54	Servizio Idrografico, rielaborato	1962	644,00	Servizio Idrografico
1933	1245,98	Servizio Idrografico, rielaborato	1963	1690,00	Servizio Idrografico
1934	977,00	Servizio Idrografico, rielaborato	1964	862,00	Servizio Idrografico
1935	1510,00	Servizio Idrografico, rielaborato	1965	1480,00	Servizio Idrografico
1936	1180,00	Servizio Idrografico, rielaborato	1966	1110,00	Servizio Idrografico
1937	1220,00	Servizio Idrografico, rielaborato	1967	946,00	Servizio Idrografico
1938	911,00	Servizio Idrografico, rielaborato	1968	1870,00	Servizio Idrografico
1939	1700,00	Servizio Idrografico, rielaborato	1969	1010,00	Servizio Idrografico
1940	1350,00	Servizio Idrografico, rielaborato	1970	733,00	Servizio Idrografico
1941	1150,00	Servizio Idrografico, rielaborato	1971	758,72	Consorzio del Ticino, rielaborato
1942	1500,00	Servizio Idrografico, rielaborato	1972	1028,78	Consorzio del Ticino, rielaborato
1943	770,00	Servizio Idrografico	1973	1261,17	Consorzio del Ticino, rielaborato
1944	935,00	Servizio Idrografico	1974	628,90	Consorzio del Ticino, rielaborato
1945	1050,00	Servizio Idrografico	1975	1330,08	Consorzio del Ticino, rielaborato
1946	997,00	Servizio Idrografico	1976	1555,42	Consorzio del Ticino, rielaborato
1947	758,00	Servizio Idrografico	1977	1901,99	Consorzio del Ticino, rielaborato
1948	1320,00	Servizio Idrografico	1978	1163,08	Consorzio del Ticino, rielaborato
1949	804,00	Servizio Idrografico	1979	1984,48	Consorzio del Ticino, rielaborato
1950	826,00	Servizio Idrografico	1980	723,46	Consorzio del Ticino, rielaborato

**Tabella 10:** valori di portata al colmo desunti dalle rilevazioni effettuate presso le stazioni di misura di Sesto Calende e di Locarno - periodo 1921 - 2010

Anno	portata (mc/s)	fonte	anno	portata (mc/s)	fonte
1981	2115,77	Consorzio del Ticino, rielaborato	1996	1527,00	Consorzio del Ticino
1982	1047,39	Consorzio del Ticino, rielaborato	1997	1172,00	Consorzio del Ticino
1983	1802,90	Consorzio del Ticino, rielaborato	1998	909,81	UFAEG, rielaborato
1984	934,22	Consorzio del Ticino, rielaborato	1999	1150,27	UFAEG, rielaborato
1985	989,55	Consorzio del Ticino, rielaborato	2000	2897,46	UFAEG, rielaborato
1986	1692,24	Consorzio del Ticino, rielaborato	2001	918,66	UFAEG, rielaborato
1987	1458,85	Consorzio del Ticino, rielaborato	2002	1946,78	UFAEG, rielaborato
1988	1467,00	Consorzio del Ticino	2003	786,71	UFAEG, rielaborato
1989	855,00	Consorzio del Ticino	2004	1547,50	Consorzio del Ticino, rielaborato
1990	756,00	Consorzio del Ticino	2005	734,94	Consorzio del Ticino, rielaborato
1991	1582,00	Consorzio del Ticino	2006	850,23	Consorzio del Ticino, rielaborato
1992	960,00	Consorzio del Ticino	2007	959,57	Consorzio del Ticino, rielaborato
1993	2416,00	Consorzio del Ticino	2008	1243,64	Consorzio del Ticino, rielaborato
1994	1161,00	Consorzio del Ticino	2009	1075,86	Consorzio del Ticino, rielaborato
1995	710,00	Consorzio del Ticino	2010	1055,13	Consorzio del Ticino, rielaborato

**Tabella 10 (segue):** valori di portata al colmo desunti dalle rilevazioni effettuate presso le stazioni di misura di Sesto Calende e di Locarno - periodo 1921 - 2010

### 3.3 Distribuzione probabilistica dei massimi annuali delle portate al colmo del Ticino a Sesto Calende

#### 3.3.1 Ipotesi ed elaborazioni preliminari

Il campione di osservazioni indicato in tabella 6 è stato trattato con le tecniche usuali dell'analisi statistica. Ai fini dell'individuazione della distribuzione probabilistica che meglio descrive il comportamento del campione, sono state prese in esame tre leggi di probabilità:

- 1) la legge di Gumbel;
- 2) la legge log-normale a due parametri;
- 3) la legge Gamma a due parametri.

Una volta ricavati i principali parametri statistici del campione (media e scarto quadratico medio campionari), si è proceduto alla stima dei parametri delle tre leggi, per poi verificare, tramite l'esecuzione di un test di adattamento (test di Pearson), quale legge di distribuzione sia in grado di descrivere meglio il comportamento della popolazione del campione.

L'analisi viene condotta nell'ipotesi che l'intero campione appartenga alla medesima popolazione statistica. A priori, quest'ultima ipotesi potrebbe anche venire rigettata, in quanto non si può escludere che un evento quale l'entrata in esercizio della diga di regolazione della Miorina (1942) possa avere dato luogo a consistenti cambiamenti nel comportamento del lago. Nella fattispecie, la validità dell'ipotesi è però già stata verificata dal gruppo di lavoro del Dipartimento di Ingegneria

Idraulica ed Ambientale dell'Università di Pavia incaricato della redazione del Piano Provinciale di Previsione e Prevenzione di Protezione Civile (1998), al quale si rimanda per qualsiasi approfondimento.

### 3.3.2 Legge di distribuzione di Gumbel

L'espressione matematica che descrive la distribuzione di Gumbel è la seguente:

$$P(q) = e^{-e^{-\alpha(q-u)}} \quad [8]$$

nella quale:

- $P(q)$  indica la probabilità che il massimo valore annuo di portata al colmo  $Q_P$  non superi il valore numerico  $q$  ( $\text{Prob}[Q_P \leq q]$ )
- $\alpha$  e  $u$  sono parametri della distribuzione, legati alla media  $\mu(Q_P)$  ed allo scarto quadratico medio  $\sigma(Q_P)$  dalle espressioni:

$$\alpha = \frac{\pi}{\sigma(Q_P) \cdot \sqrt{6}} \quad [9]$$

$$u = \mu(Q_P) \cdot \frac{\gamma \cdot \sqrt{6}}{\pi} \quad [10]$$

ove  $\gamma$  corrisponde alla costante di Eulero (0,5772157...).

Applicata al campione di portate al colmo in esame, la legge che descrive la distribuzione assume la seguente espressione:

$$P(q) = e^{-e^{-0,002935 \cdot (q-1013,897)}} \quad [10]$$

### 3.3.3 Legge di distribuzione log-normale

La distribuzione log-normale si riconduce agevolmente ad una distribuzione statistica gaussiana introducendo la variabile trasformata

$$y = \ln(q) \quad [11]$$

i cui parametri statistici sono legati a quelli della variabile originaria  $Q_P$  dalle seguenti relazioni:

$$\mu(y) = \ln[\mu(Q_P)] - \frac{1}{2} \cdot \ln \left[ 1 + \frac{\sigma^2(Q_P)}{\mu^2(Q_P)} \right] \quad [12]$$

$$\sigma^2(y) = \ln \left[ 1 + \frac{\sigma^2(Q_P)}{\mu^2(Q_P)} \right] \quad [13]$$

La probabilità di non superamento viene espressa in generale dalla relazione che segue:

$$Prob[Q_p \leq q] = P(y) = \int_{-\infty}^y \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \frac{1}{\sigma(y)} \cdot \exp\left\{-\frac{1}{2} \cdot \frac{[y - \mu(y)]^2}{\sigma^2(y)}\right\} dy \quad [14]$$

e nella fattispecie dalla seguente espressione:

$$Prob[Q_p \leq q] = P(y) = 1,139888 \cdot \int_{-\infty}^y \exp\left\{-\frac{1}{2} \cdot \frac{[y - \mu(y)]^2}{\sigma^2(y)}\right\} dy \quad [15]$$

### 3.3.4 Legge di distribuzione Gamma

Per il caso della distribuzione Gamma, la probabilità di non superamento del valore q è espressa dalla relazione

$$P(q) = \int_0^q \frac{\alpha^\gamma q^{\gamma-1} e^{-\alpha q}}{\Gamma(\gamma)} dq \quad [16]$$

ove  $\alpha$  e  $\gamma$  sono parametri della distribuzione, legati alla media  $\mu(Q_p)$  ed allo scarto quadratico medio  $\sigma(Q_p)$  dalle espressioni:

$$\alpha = \frac{\mu(Q_p)}{\sigma^2(Q_p)} \quad [17]$$

$$\gamma = \frac{\mu^2(Q_p)}{\sigma^2(Q_p)} \quad [18]$$

ed il simbolo  $\Gamma(\gamma)$  rappresenta la cosiddetta "funzione Gamma":

$$\Gamma(\gamma) = \int_0^{\infty} e^{-t} t^{\gamma-1} dt \quad [19]$$

Operate le dovute sostituzioni, l'espressione della probabilità di non superamento diviene:

$$P(q) = \int_0^q \frac{0,006339^{7,674226} \cdot q^{6,674226} \cdot e^{-0,006339 \cdot q}}{2632,496} dq \quad [20]$$

### 3.3.5 Il test di Pearson

Per l'esecuzione del test di Pearson, il campione di valori sotto esame viene suddiviso in un certo numero di intervalli, avendo cura che all'interno di ciascun intervallo ricada mediamente un numero

di osservazioni non inferiore a 5. Nella definizione dei limiti degli intervalli, si segue generalmente la cosiddetta "legge dell'equiprobabilità di Gumbel": si tende cioè a fare in modo che la probabilità teorica che un elemento appartenga ad un certo intervallo di valori sia costante per tutti gli intervalli. Poiché tale probabilità dipende dalla distribuzione prescelta, ne consegue che i limiti degli intervalli dovranno necessariamente variare con la funzione di distribuzione sottoposta al test.

Una volta definiti gli intervalli, si calcola la grandezza detta " $\chi^2$ ", definita come

$$X^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(N_i - N \cdot p_i)^2}{N \cdot p_i} \quad [21]$$

nella quale:

- k indica il numero di intervalli;
- N indica la dimensione complessiva del campione;
- $N_i$  indica il numero di osservazioni appartenenti all'i-esimo intervallo;
- $p_i$  indica la probabilità che un'osservazione estratta a caso dalla popolazione ricada nell'i-esimo intervallo.

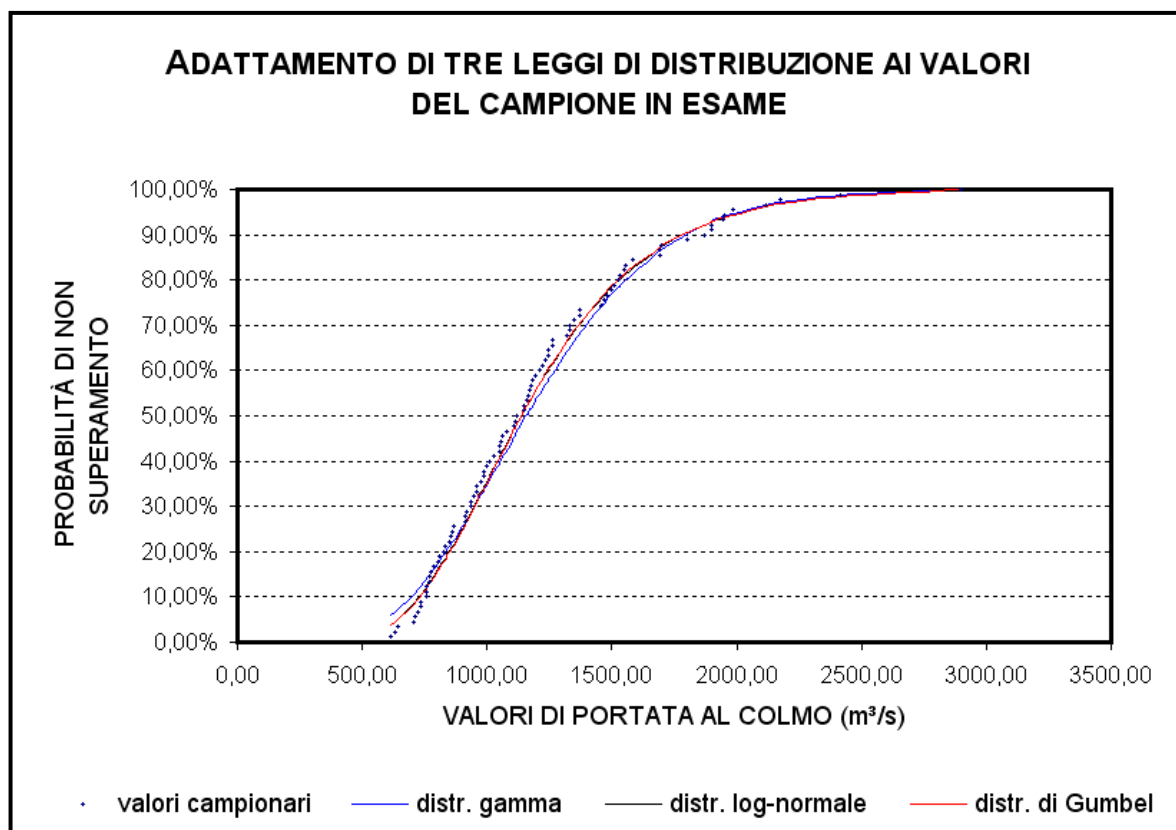
Si noti che la quantità a numeratore indica il quadrato della differenza fra il numero di osservazioni appartenenti a ciascun intervallo ed il numero di osservazioni teoricamente appartenenti al medesimo intervallo nel caso la popolazione del campione segua perfettamente la funzione di distribuzione ipotizzata.

Statisticamente, la variabile casuale " $\chi^2$ ", funzione del campione in esame, tende a distribuirsi secondo una funzione di distribuzione compresa fra quella del "*chi-quadro*" a  $(k - 1)$  gradi di libertà, e quella del "*chi-quadro*" a  $(k - s - 1)$  gradi di libertà (ove con  $s$  si indica il numero dei parametri della funzione di distribuzione sottoposta al test). Ricorrendo ancora alla distribuzione del "*chi-quadro*", la probabilità teorica di superamento del valore del " $\chi^2$ " risultante dal test può essere assunta quale massimo livello di significatività al quale l'ipotesi che la popolazione da cui proviene il campione sia distribuita secondo la legge considerata possa essere considerata valida.

I risultati ottenuti suddividendo il campione in 17 intervalli, e tenendo conto del fatto che in tutte le distribuzioni ipotizzate vi sono due parametri da stimare, vengono riportati nella tabella che segue. La legge di distribuzione che meglio si adatta alla descrizione della popolazione di provenienza del campione è la distribuzione log-normale, con livello di significatività decisamente elevato (70%).

legge di distribuzione probabilistica	valore del $\chi^2$	livello di significatività
distribuzione gamma	13,51111	0,560908
distribuzione log-normale	11,62222	0,703081
distribuzione di Gumbel	12,00000	0,675141

**Tabella 11:** risultati del test di Pearson



**Figura 4:** visualizzazione del grado di sovrapposizione fra tre leggi di distribuzione probabilistica ed il campione di osservazioni disponibile

È peraltro opportuno rilevare che anche le altre due distribuzioni offrono nella fattispecie un adattamento più che sufficiente alla distribuzione del campione, come può essere rilevato sia esaminando i valori di significatività ottenuti dal test di Pearson (costantemente superiori al 50%, mentre di norma una ipotesi statistica viene rigettata qualora il livello di significatività scenda al di sotto del 5%), sia esaminando il grafico riportato in fig. 4, nel quale le tre leggi probabilistiche ipotizzate vengono sovrapposte graficamente ai dati appartenenti al campione di osservazioni. In particolare, le leggi di distribuzione di Gumbel e log-normale appaiono sovrapposte quasi per l'intero campo dei valori di portata osservati.

### 3.4 Determinazione dei livelli del lago Maggiore occorrenti con i tempi di ritorno prefissati

Nota che sia la legge di probabilità che descrive la distribuzione dei massimi annui di portata al colmo, i valori di portata attesi con i tempi di ritorno  $T$  prefissati possono essere agevolmente ricavati dalla funzione inversa della legge di distribuzione, tenendo inoltre conto del legame esistente tra probabilità di non superamento  $P$  e tempo di ritorno  $T$ :

$$P = \frac{T-1}{T} \quad [22]$$

I valori di portata al colmo così ricavati vengono utilizzati per la stima dei livelli idrici attesi in



corrispondenza dell'idrometro di Sesto Calende (sfruttando la scala delle portate descritta nel precedente paragrafo 3.1.3.2., nella consueta ipotesi che la traversa della Miorina sia completamente aperta) e direttamente a lago (con applicazione del modello illustrato nel paragrafo 3.1.3.3.).

L'esecuzione dei calcoli qui menzionati dà luogo ai risultati indicati nella tabella che segue.

tempo di ritorno (anni)	portata al colmo (m <sup>3</sup> /s)	livello all'idrometro (m/slm)	livello del lago (m/slm)
10	1783	196,25	196,45
50	2336	197,01	197,25
100	2570	197,30	197,56
200	2805	197,58	197,85

**Tabella 12:** livelli assunti per la determinazione delle aree di potenziale esondazione del lago.

Si rileva che i valori di portata desunti dal calcolo condotto come sopra descritto danno luogo a valori di portata decisamente più alti rispetto agli analoghi valori raccomandati dall'Autorità di Bacino (la quale, per il fiume Ticino alla traversa di Miorina, nella tabella n. 8 allegata alla "Direttiva sulla piena di progetto da assumere per le progettazioni e le verifiche di compatibilità idraulica" indica, in corrispondenza del tempo di ritorno di 200 anni, un valore di portata di 2000 m<sup>3</sup>/s). Si può quindi affermare che, dal punto di vista della stima delle portate in transito, i calcoli condotti secondo quanto descritto conducano a risultati estremamente cautelativi.

### 3.5 Determinazione dei tiranti idrici da assumere in corrispondenza dell'intervento in progetto

Con riferimento alle sezioni trasversali dell'alveo menzionate in § 3.1.3.3 (tabella n. 7), l'area Marna interessata dall'intervento di recupero si situa appena a valle della sezione contrassegnata dal n. 6, mentre il centro abitato si estende nel tratto a valle di questa, sino all'idrometro (sezione n. 10).

I livelli idrici attesi nell'area possono essere agevolmente stimati, ricorrendo ai metodi di analisi delle correnti a pelo libero descritti in Appendice e già utilizzati nel corso del presente studio (§ 3.1.3.2).

Il calcolo, sviluppato a partire dai dati raccolti in tabella n. 12 e con riferimento all'evento caratterizzato da un tempo di ritorno di 200 anni, produce, per il tratto di interesse, i risultati riportati nella tabella che segue (tabella n. 13), ove tutti i livelli calcolati fanno riferimento alla quota assegnata, ai fini del presente studio, allo zero idrometrico dell'idrometro di Sesto (193,016 m/slm).

Nel dettaglio, in corrispondenza dell'area Marna si evincono i valori che seguono:

- tirante idrico nell'area di intervento: 14,10 m;
- massimo livello raggiunto dal pelo libero: 197,74 m/slm;
- velocità media di transito della corrente: 0,94 m/s.

sezione	tirante idrico (m)	livello idrometrico (m/slm)	velocità di corrente (m/s)
sezione 10	10,50	197,58	1,32
sezione 9	13,99	197,63	1,22
sezione 8	9,17	197,63	1,43
sezione 7	15,67	197,77	0,66
sezione 6	14,10	197,74	0,94
sezione 5	15,51	197,72	1,18
sezione 4	12,36	197,76	0,87
sezione 3	17,56	197,79	0,69
sezione 2	21,42	197,81	0,25
sezione 1	20,71	197,80	0,67
sezione 100	17,61	197,81	0,53

**Tabella 13:** livelli idrometrici calcolati lungo la sponda del lago.

#### 4 Descrizione dei risultati

Come già sommariamente indicato in premessa, le quote sopra calcolate sono state utilizzate per la determinazione cartografica delle aree potenzialmente raggiunte dal lago in occasione delle piene attese rispettivamente con cadenza pari a 200 anni. I limiti di esondazione del lago sono stati individuati su base topografica in scala 1:2.000 fornita dall'Amministrazione Comunale. Per assicurare la corrispondenza fra le quote ivi indicate ed i riferimenti assoluti utilizzati nel corso delle elaborazioni, ottenuti a loro volta fissando il caposaldo di 193,016 m/slm per la quota dello zero idrometrico dell'idrometro di Sesto, sono state tracciate dieci sezioni trasversali della sponda del lago, nell'area di studio, integrate con due sezioni supplementari nell'area dell'abitato di Sesto.

I limiti delle aree di esondazione sono stati tracciati nell'ipotesi che il livello del lago si mantenga perfettamente orizzontale a monte della frazione di sant'Anna, e che subisca poi un progressivo abbassamento del pelo libero della corrente a valle di questa, conseguente come già indicato all'aumento della velocità ed all'attrito contro le pareti ed il fondo dell'alveo.

Ai fini del tracciamento dei limiti indicati, quale prima operazione si è cercato di riportare i risultati dello studio, riferiti alla quota dello zero idrometrico di 193,016 m/slm, alle quote della base utilizzata dai tecnici incaricati dall'Amministrazione per rappresentare, con rilievo topografico di dettaglio, l'area del Circolo Sestese, rilevando che i due sistemi di quote differenziano di circa 16 cm. A seguito di tale osservazione, il livello di piena assunto è stato innalzato dalla quota di 197,74 m/slm, coerente con il sistema assoluto utilizzato nei calcoli, alla quota di 197,90 m/slm, coerente con il sistema utilizzato per la rappresentazione di dettaglio dell'area.

Ciò fatto, si è provveduto ad individuare i limiti dell'area interessata dalle possibili esondazioni, con i risultati descritti nei grafici allegati.

Per quanto riguarda l'area del Circolo Sestese, si osserva che le parti soggette a potenziale allagamento si estendono lungo via Barbieri, dal sottopasso della S.S. n. 33 sino all'ingresso del parcheggio di piazzale Rovelli, e da qui per tutta l'area depressa delimitata, verso monte, dai terrapieni di via Roma e piazza Cesare da Sesto.

Scendendo lungo il corso del fiume, l'area potenzialmente raggiunta dalla piena risulta compresa fra viale Italia, a valle, e le vie Roma e Mercato, a monte, interessando parte dei vicoli compresi fra tali due assi viari (ruga del Pozzo, ruga del Marazzo, ruga della Rivetta, ruga del Porto Vecchio), nonché piazza De Cristoforis, con parte della vicina piazza Garibaldi.

Per l'illustrazione di dettaglio della situazione rispettivamente stimata in corrispondenza dell'area del Circolo Sestese e delle restanti parti del centro edificato si rimanda alle serie di grafici esplicativi singolarmente dedicati ai due specifici ambiti.

Gornate Olona, aprile 2012

il professionista incaricato  
dott. ing. Giorgio Amolari

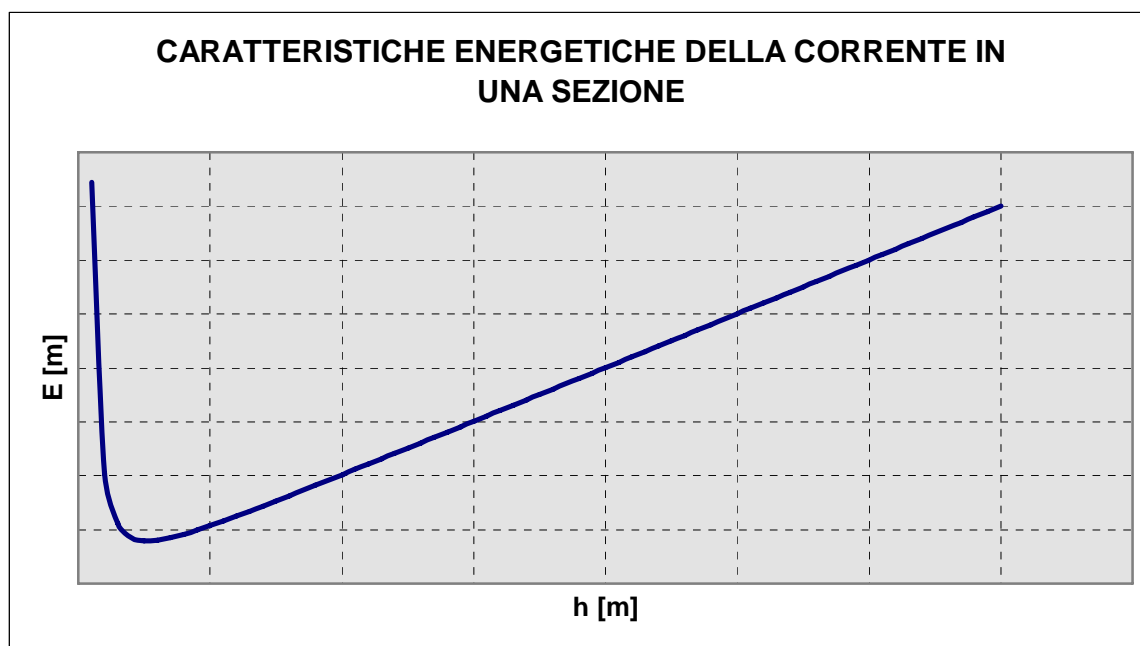


## APPENDICE: CALCOLI IDRAULICI

### 1 Principi teorici per la trattazione delle correnti a pelo libero

Le altezze di corrente vengono stimate sulla base delle teorie che illustrano i principi del moto a pelo libero della corrente, secondo le quali le principali grandezze che caratterizzano le condizioni di moto (altezza e velocità di corrente) possono essere desunte da considerazioni relative all'energia complessiva posseduta dalla corrente in transito nell'alveo, composta dalla somma dei termini di energia potenziale (correlata alla quota assoluta del fondo alveo), energia di pressione (legata all'altezza del pelo libero sul fondo) ed energia cinetica (legata alla velocità di transito della corrente nella sezione).

Per una migliore comprensione dei termini successivamente utilizzati, si illustrano brevemente i principi basilari della teoria, senza ovviamente pretendere di esaurire la materia né di addentrarsi nella discussione puntuale delle formulazioni matematiche che la compendiano.



**Figura 5:** grafico per l'illustrazione del rapporto fra energia specifica ed altezza di corrente, a portata costante

Fissati un valore di portata, un valore dell'energia totale della corrente (indicata con  $H$ ) ed una sezione (e fissata, di conseguenza, una quota assoluta del fondo), il termine legato all'energia cinetica della corrente deve decrescere al crescere dell'altezza del pelo libero (poiché all'aumentare dell'altezza cresce la sezione attraverso cui passa la corrente, e ciò comporta una diminuzione della velocità di transito). Viceversa, il termine legato alla pressione cresce, come è ovvio, con l'aumentare del livello del pelo libero.

La somma dei due termini, che esprime il legame tra altezza e velocità, assume pertanto valori

estremamente grandi sia per altezze molto basse, prossime allo zero, sia per altezze molto alte. La forma della relazione esistente tra questa somma (di norma indicata con il simbolo E - energia specifica rispetto al fondo dell'alveo) ed h (altezza di corrente) deve essere del tipo di quella indicata nella figura riportata (fig. 5), con due rami ascendenti ed un punto di minimo. Al punto di minimo corrisponde quello che in idraulica è definito come "stato critico", che può essere definito come la situazione di minima energia totale necessaria ad una corrente per transitare attraverso una certa sezione. Se l'energia totale a disposizione della corrente è inferiore al valore E, è necessario che a monte della sezione la corrente recuperi energia, tramite un meccanismo denominato "risalto", che verrà più oltre sommariamente illustrato, fino a raggiungere il valore minimo richiesto per il passaggio in condizioni "critiche". In tale stato, tanto la velocità quanto l'altezza di corrente assumono la denominazione di "critica".

I due rami ascendenti verso sinistra e verso destra della curva rappresentata in fig. A.2.1 rappresentano rispettivamente le correnti "veloci" (quelle nelle quali l'altezza del pelo libero è inferiore all'altezza critica, e nelle quali di conseguenza l'energia cinetica prevale rispetto a quella legata alla pressione) e le correnti "lente" (nelle quali, al contrario, il termine cinetico è secondario).

La differenza fondamentale fra i due tipi di corrente sta nelle modalità con cui esse reagiscono di fronte ad ostacoli che perturbino il deflusso regolare verso valle della corrente stessa. In caso di corrente "veloce", la velocità di corrente è maggiore della velocità di propagazione verso monte delle onde prodotte dall'ostacolo, per cui gli effetti della perturbazione possono essere avvertiti soltanto a valle dell'ostacolo. Viceversa, in caso di correnti "lente", la velocità è minore della velocità di propagazione verso monte delle onde, e l'effetto della presenza di un ostacolo può essere avvertito sia verso monte che verso valle. In altre parole, una corrente "veloce" è condizionata soltanto da ciò che avviene nelle sezioni di monte; una corrente "lenta" è condizionata anche da ciò che accade a valle. Questa importante differenza verrà ripresa in seguito, per illustrare le modalità di calcolo seguite nello studio.

## 2 Calcolo delle condizioni di moto per alvei cilindrici

Chiarite le condizioni energetiche di una corrente in una sezione, il calcolo delle condizioni di moto in una sezione successiva viene operato con applicazione del principio di conservazione dell'energia, considerando l'energia potenziale ceduta dalla corrente nel moto verso il basso (e trasformata in energia cinetica o di pressione) e l'energia persa per attrito contro le pareti dell'alveo.

L'espressione matematica dell'energia totale della corrente è la seguente:

$$H = z + h + \alpha \cdot \frac{V^2}{2g} \quad [23]$$

nella quale tutti gli addendi hanno le dimensioni di una lunghezza, ed  $\alpha$  indica il cosiddetto "coefficiente di ragguglio dell'energia cinetica", introdotto per tenere conto delle differenze esistenti fra la velocità massima della corrente, in centro all'alveo, e la velocità media della stessa..

Il principio di conservazione dell'energia fra due sezioni successive poste a distanza reciproca  $\Delta L$  si esprime tramite la seguente relazione:

$$H_1 = H_2 + Jmed\Delta L \quad [24]$$

ove si è introdotta la nuova grandezza J, denominata cadente piezometrica, che indica la perdita di energia per unità di lunghezza dell'alveo, dovuta all'attrito contro pareti dell'alveo stesso. La cadente piezometrica in ciascuna sezione viene espressa utilizzando la formula di Manning, definendo preventivamente la "capacità di portata dell'alveo", K, come

$$K = A \cdot \frac{R^{2/3}}{n} \quad [25]$$

ove A è l'area della sezione di passaggio della corrente, R il raggio idraulico della sezione (rapporto fra area e contorno bagnato) ed n un coefficiente di scabrezza, ed esprimendo successivamente la cadente come

$$J = \frac{Q^2}{K^2} \quad [26]$$

Tramite K, la cadente è quindi una funzione univoca dell'altezza h. La cadente media nel tratto compreso fra due sezioni successive è banalmente stimata come valore medio fra esse.

Tenuto presente tutto ciò, note che siano le condizioni di moto nella sezione 1, la precedente relazione che esprime il principio di conservazione dell'energia può scriversi come

$$z_1 + h_1 + \alpha \cdot \frac{V_1^2}{2g} \cdot \frac{Q^2}{K(h_1)^2} \cdot \frac{\Delta L}{2} - z_2 = h_2 + \alpha \cdot \frac{V_2^2}{2g} \cdot \frac{Q^2}{K(h_2)^2} \cdot \frac{\Delta L}{2} \quad [27]$$

Tutti i termini a sinistra dell'uguale sono noti, mentre tutti i termini a destra, incogniti, possono essere espressi in funzione dell'altezza di corrente nella sezione 2.

Applicando in modo iterativo questo metodo di calcolo, è sufficiente assegnare le condizioni di moto in una sezione, per poter calcolare per passi successivi le condizioni di moto della medesima portata in tutte le rimanenti sezioni.

Notiamo, inoltre, che il processo di calcolo può avvenire indifferentemente procedendo da monte verso valle (a partire dalla conoscenza delle condizioni di moto nella sezione 1) o, viceversa, da valle verso monte, supponendo note le condizioni nella sezione 2. Ricordando quanto detto a proposito delle diverse reazioni alle perturbazioni proprie ai due tipi di corrente, osserviamo che un calcolo rigoroso comporterebbe un procedimento da monte verso valle per il caso di correnti "veloci", e da valle verso monte per il caso di correnti "lente". Nella pratica, i calcoli vengono di norma eseguiti da valle verso monte, ipotizzando sempre condizioni di moto proprie delle correnti "lente". Oltre ad essere un processo appropriato nella maggior parte dei casi (poiché di norma nei tratti pianeggianti, più facilmente interessati da esondazioni, le correnti di piena transitano con velocità inferiore alla velocità "critica"), ai fini del calcolo delle aree esondabili ciò corrisponde all'introduzione di un fattore di sicurezza, in quanto si è già illustrato come, a parità di portata, una corrente "lenta" abbia un'altezza di moto superiore ad una corrente "veloce". Qualora il calcolo produca, in una sezione di monte, condizioni di moto caratteristiche di una corrente "veloce", il livello viene automaticamente innalzato sino al valore "critico", introducendo un errore trascurabile ed in favore di sicurezza.

## BIBLIOGRAFIA

Ciampittiello, M.: "I livelli del lago Maggiore", Verbania - Intra, Lions Club (circoli di Arona - Stresa, Laveno Mombello - S. Caterina del Sasso, Locarno, Luino, Sesto Calende - Somma Lombardo, Verbania) - C.N.R. (Istituto Italiano di Idrobiologia di Verbania - Pallanza) - Alberti Libraio Editore, 1999

Citrini, D.: "Le piene del lago Maggiore e del Ticino emissario nel primo trentennio di regolazione", Pubblicazione n. 14, Milano, Consorzio del Ticino, 1973

Citrini, D.; Nosedà, G.: "Idraulica", Milano, Casa Editrice Ambrosiana, 1982

Maione, U.; Mignosa, P.: "Conseguenza di una modifica dell'incile del lago Maggiore sugli alti livelli lacuali e sulle portate di piena del Ticino emissario", Pubblicazione n. 20, Milano, Consorzio del Ticino, novembre 1997

Maione, U.; Mignosa, P.: "Il funzionamento idraulico dell'incile del lago Maggiore: modello matematico del lago allo sbarramento di Porto della Torre e ricostruzione delle piene dell'autunno 1991 e 1993", Pubblicazione n. 19, Milano, Consorzio del Ticino, giugno 1995

Maione, U.; Moisello, U.: "*Elementi di statistica per l'idrologia*", Pavia, La Goliardica Pavese, 1993

Moisello, U. et al.: "Rischio idraulico e rischio dighe", *Piano Provinciale di Previsione e Prevenzione di Protezione Civile della Provincia di Varese*, Pavia, Dipartimento di Ingegneria Idraulica ed Ambientale dell'Università di Pavia, 1998