

SULLA POSSIBILITA' DI MODERARE LE PIENE CON I SERBATOI ESISTENTI

*Applicazione degli studi di Giulio Supino*²

ABOUT FLOOD PEAK REDUCTION USING THE EXISTING RESERVOIRS

An application of Giulio Supino's studies

Giulio Supino sviluppò un procedimento basato sul metodo dell'invaso, per progettare i serbatoi destinati a moderare le piene nelle reti idrografiche. Lo stesso procedimento può essere impiegato anche per verificare le opportunità offerte dai serbatoi esistenti. Dopo una sintetica illustrazione dei principi che regolano il metodo dell'invaso applicato ai serbatoi, le formule risolutive di Supino vengono applicate ai casi dei serbatoi di Ravedis e di Pieve di Cadore; questo offre l'opportunità di discutere criticamente la funzionalità delle luci di sfioro ed a battente nei serbatoi e di fornire degli esempi di laminazione della piena del novembre 1966.

Parole chiave: *Supino, Laminazione, Luci di scarico, Diga di Ravedis, Diga di Pieve di Cadore.*

Giulio Supino developed an application of the Italian "metodo dell'invaso" (i.e. storage-volume method) to the design of the reservoirs for peak flood reduction in the hydrographic networks. Supino's studies are also useful to verify the opportunities offered by operating reservoirs. After a brief description of the principles of the Italian storage-volume method applied to the reservoirs, Supino's formulas are applied, to the reservoirs of "Ravedis" and "Pieve di Cadore", located in the North-East of Italy; this gives also the opportunity to critically discuss the operation with spillways and bottom outlet gates, as well as to provide some examples of flood storage-routing, using the November 1966 flood data.

Keywords: *Supino, Flood-peak reduction, Outlet gates, Ravedis dam, Pieve di Cadore dam.*

1. INTRODUZIONE

Tutti i serbatoi, anche quando si trovano alla quota di massima regolazione, esercitano un'azione moderatrice sulle piene; questa azione si esplica con l'attenuazione del colmo dell'onda e con la redistribuzione del volume dell'onda su un orizzonte temporale più lungo.

E' di evidente e di generale interesse l'opportunità di sfruttare al meglio questa azione – cosiddetta – di *laminazione*, a vantaggio della sicurezza idraulica delle aste fluviali sottese dai serbatoi (D'Alpaos 2016 e Da Deppo 2016); questo può avvenire operando in due modi, classificabili come: *laminazione statica e l. dinamica*.

Con la *laminazione statica*, una parte di volume del serbatoio, viene destinata ad invasare le piene e pertanto – almeno in certi periodi dell'anno – è mantenuta vuota. Questo modo di operare è tipico dei bacini di

¹ M. Baldin, Collegio degli Ingegneri di Venezia, Via Bruno Maderna, 7 - 30174 Venezia Mestre.

² Giulio Supino (1898–1978) si laureò in ingegneria (1921) ed in matematica (1923) all'Università di Bologna. Fu professore di Costruzioni, di Ponti e di Idraulica nello stesso Ateneo, ricoprendo anche gli incarichi di Prorettore Vicario (1962) e di Preside della Facoltà di Ingegneria (1965). Nel mondo accademico e professionale. Il suo ricordo è legato alla formulazione del cosiddetto "Metodo dell'invaso" al il calcolo delle reti idrauliche a pelo libero (Supino, 1965), un'applicazione degli studi di Fantoli ("Memorie idrauliche", 1904) e di Puppini ("Il calcolo dei canali di bonifica", 1923); a questo metodo si ispira anche questa sua particolare applicazione ai serbatoi destinati a moderare le piene fluviali.

laminazione e delle aree di espansione presenti nelle reti idrografiche e non richiede necessariamente la conoscenza preventiva o in itinere dell'evento di piena. Nel caso dei serbatoi creati per altri scopi – industriale, irriguo, potabile, ... – la modalità di laminazione statica comporta un danno per l'esercente, a causa del mancato utilizzo del volume immobilizzato. Il valore da assegnare al volume sottratto all'esercizio, dipende sia dall'evento di progetto, sia dalle opere di scarico del serbatoio; a parità di evento, il volume che è necessario immobilizzare, risulta tanto maggiore, quanto minore è la portata massima scaricabile. Sotto questo aspetto, l'impiego delle luci di sfioro per moderare le piene appare dunque preferibile rispetto alle luci a battente.

Con la *laminazione dinamica*, al preannuncio della piena, segue uno svaso preventivo del serbatoio. Non necessariamente però, infatti lo svaso può essere fatto solo quando si preveda che la piena incombente abbia caratteristiche tali da costituire un potenziale pericolo per la rete idrografica. In questo caso è necessaria la conoscenza anticipata dell'evento, o almeno la capacità di prevederlo in itinere, per programmare lo svaso in tempo utile e per limitare la perdita di volume a quella strettamente necessaria per moderare la piena affluente ad un valore compatibile con l'officiosità della rete idrografica.

In ogni caso, quando il serbatoio è in servizio per scopi differenti da quelli della sicurezza idraulica, si opera in modo tale che, dopo le operazioni di svaso e di invaso, questo ritorni alla quota di esercizio precedente l'evento, per non penalizzare oltre lo stretto necessario i legittimi interessi del gestore.

La maggior parte dei grandi serbatoi esistenti in Italia, è stata costruita per le esigenze idroelettriche, tra l'inizio e la metà del secolo scorso; sono pochi i grandi serbatoi che svolgono un servizio differente, per lo più irriguo e potabile e ancor meno numerosi quelli per il servizio di piena.

Nel caso dei serbatoi idroelettrici, la possibilità di eseguire svassi preventivi in occasione delle piene, è una strada difficilmente percorribile. Questi serbatoi, si trovano in prevalenza nei tratti montani delle aste fluviali, dove la pendenza longitudinale dell'alveo è elevata e dove i bacini imbriferi hanno una superficie modesta. Di conseguenza, i tempi di corrivazione delle piene, sono molto brevi e non è affatto facile eseguire tempestivamente le manovre di svaso richieste dalla *laminazione dinamica*, anche in presenza di reti idro e pluviometriche di segnalazione e di allertamento.

2. IL METODO DELL'INVASO PER I BACINI DI LAMINAZIONE

Anche se in materia, non mancano precedenti autorevoli (*Marzolo & altri* 1959, *Marone* 1964) e anche qualche realizzazione efficace (*Miliani* 1939)³, dell'impiego sistemico dei volumi di invaso temporaneo per moderare le piene nelle reti idrografiche, si cominciò a parlare concretamente solo dopo la drammatica alluvione del novembre 1966 (*Supino* 1969 II, *De Marchi* 1970).

In questo contesto Supino, che oltre a presiedere la *seconda sottocommissione* che si occupava della *sistemazione idraulica dei bacini idrografici*, presiedeva anche il quarto gruppo di lavoro, che si occupava del bacino dell'Arno, pervenne alla definizione di un piano – noto appunto come “*Piano Supino*” – che, per il bacino dell'Arno, prevedeva la realizzazione di ben 23 tra serbatoi e volumi di accumulo temporaneo, 17 dei quali a monte della città di Firenze, per una capacità utile complessiva di circa 240 milioni di m³ (*Supino*, 1970).

Supino illustrò l'applicazione del metodo dell'invaso ai serbatoi, in una serie di articoli apparsi tra il 1967 ed il 1974 (*XVIII Convegno di Idraulica*, 1982).

Nel contesto in cui si trovò ad operare la Commissione Interministeriale, il problema da risolvere era sostanzialmente di progetto: stabilita l'ubicazione del serbatoio e noto l'evento critico di progetto, bisognava determinare quali fossero il volume e la dimensione delle luci di scarico, per massimizzare l'effetto di moderazione delle piene.

Se, seguendo l'impostazione di Supino, si assume che ad un serbatoio destinato a moderare le piene, affluisca la portata p (m³/s) e che da esso defluisca la portata q (m³/s), e se si ipotizza che la portata affluente sia generata da una pioggia di intensità i (m/giorno) costante nel tempo, si ha:

$$p = 11,57 \cdot \varphi \cdot i \cdot A \quad [1]$$

³ Nel 1927, a Montebello Vicentino, entrò in servizio un bacino di laminazione per moderare le piene dell'Agno-Guà; costruito dal Magistrato alle Acque di Venezia, questo bacino ha un volume di 5 milioni di m³ ed è alimentato da 12 sifoni tipo Gregotti. E' tutt'ora in servizio.

dove: φ (adimensionale) è il coefficiente di deflusso, A (km^2) è la superficie del bacino imbrifero e $11,57$ è la costante dimensionale per convertire le unità di misura, in m^3/s . L'intensità di precipitazione i (m/giorno), può essere espressa con la curva segnalatrice di possibilità pluviometrica:

$$i = a \cdot t^{n-1} \quad [2]$$

nella quale a ed n sono costanti e t (giorni) è la durata dell'evento.

Il volume invasato in un serbatoio, varia in funzione della sua quota idrometrica; la relazione che lega volume invasato V (m^3) all'altezza idrometrica y (m), riferita alla quota di soglia della luce di scarico, tipicamente, è:

$$V = b \cdot y^m \quad [3]$$

nella quale, b ed m sono costanti.

Per una data altezza idrometrica y (m), la portata effluente q (m^3/s), dipende dal tipo e dalle dimensioni della luce di scarico: in generale, si può scrivere:

$$q = c \cdot y^d \quad [4]$$

dove l'esponente d assume i valori di $1,5$ per una luce di sfioro e di $0,5$ per una luce a battente; y (m) è sempre l'altezza idrometrica nel serbatoio, riferita alla soglia della luce e c è una costante dimensionale.

Risolvendo la [4] in funzione dell'altezza idrometrica e sostituendola nella [3], si ottiene:

$$V = b \cdot \left(\frac{q}{c} \right)^{\frac{m}{d}} \quad [5]$$

Relazione che lega la portata scaricata dal serbatoio al volume invasato.

Supposta la costanza della portata affluente p (m^3/s) per tutta la durata dell'evento, l'equazione differenziale di continuità dei serbatoi, $p \cdot dt - q \cdot dt = dV$, può essere riscritta in funzione delle sole variabili t (giorni) e q (m^3/s):

$$(p - q) \cdot dt = \frac{\frac{m}{d} \cdot b}{c^{\frac{m}{d}}} \cdot q^{\frac{m}{d}-1} dq \quad [6]$$

In sintesi, integrando la [6] nell'ipotesi che inizialmente il volume invasabile sia tutto disponibile e che, in seguito, la piena affluente lo esaurisca, Supino pervenne, analogamente a quanto fatto per le reti idrauliche a superficie libera (Supino 1947 e 1969 III, Pianese & altri 2015), all'espressione di un coefficiente udometrico u (m^3/m^2 al giorno) associabile ai serbatoi:

$$u = f \cdot \frac{(\varphi \cdot a)^{\frac{1}{n}}}{v^{\frac{1}{n}-1}} \quad [7]$$

In questa relazione, v (m) è il volume specifico, rapporto tra il volume di laminazione V (m^3) e la superficie del bacino A (m^2) ed f è un parametro dimensionale.

Supino fornì due formule per calcolare il parametro f , in funzione degli esponenti n (della curva segnalatrice di possibilità pluviometrica, [2]) e m (della curva dei volumi del serbatoio, [3]) (Supino 1967, e 1969 I); queste formule si differenziano per la modalità di efflusso dalla luce di scarico:

$$\text{per luce di sfioro: } f = \frac{37 \cdot n + 0,8 \cdot (1 - m)}{34 + 6 \cdot m} \quad \text{e per luce a battente: } f = \frac{32 \cdot n - 2}{35 + 5 \cdot m}$$

Nel caso di una precipitazione di intensità tale da esaurire tutto il volume del serbatoio, la portata massima effluente dalla luce di scarico, Q (m^3/s), può essere calcolata con una delle due formule seguenti:

$$\text{per una luce di sfioro: } Q = 11,57 \cdot A \cdot \frac{37 \cdot n + 0,8 \cdot (1 - m)}{34 + 6 \cdot m} \cdot \frac{(\varphi \cdot a)^{\frac{1}{n}}}{v^{\frac{1}{n}-1}} \quad (\text{m}^3/\text{s}) \quad [8]$$

e per una *luce a battente*:
$$Q = 11,57 \cdot A \cdot \frac{32 \cdot n - 2}{35 + 5 \cdot m} \cdot \frac{(\varphi \cdot a)^n}{v^{\frac{1}{n}-1}} \quad (\text{m}^3/\text{s}) \quad [9]$$

Dato un serbatoio di caratteristiche note e data la curva delle precipitazioni critiche del bacino tributario, Supino mostrò che impiegando le formule [8] (efflusso da luce a battente) e [9] (efflusso da luce di sfioro), si poteva dimensionare la luce di scarico del serbatoio in modo da esaurire il volume invasabile; ma queste formule consentono di verificare anche quale contributo può dare un serbatoio esistente, alla moderazione delle piene lungo un'asta fluviale.

Infatti, nota la portata massima che questo serbatoio può scaricare quando si trova alla quota di massimo invaso, impiegando la [8] e la [9] è possibile determinare il tempo di ritorno delle precipitazioni critiche, che esauriscono il volume invasabile.

3. CRITERI GENERALI DI VERIFICA

La misura dell'attitudine di un serbatoio a moderare le piene con le formule di Supino [8] e [9], richiede la conoscenza della curva dei volumi di invaso [3] e della scala di deflusso dello scarico [4].

Per quanto riguarda il *volume invasabile nel serbatoio*, sono stati adottati i criteri seguenti:

- per la *laminazione con luce di sfioro*, è considerato volume invasabile, quello compreso tra le quote di sfioro e di massimo invaso del serbatoio.
- per la *laminazione con luce a battente*, è considerato volume invasabile, quello compreso tra le quote di minima e di massima regolazione del serbatoio.

Le figure seguenti (Figg. 1 e 2), che riguardano la diga di Santa Caterina sul torrente Ansiei (Piave), ad Auronzo di Cadore (BL) (ANIDEL, 1961), esemplificano i due casi predetti.

Per quanto riguarda le *equazioni delle luci di scarico* [4], la costante moltiplicativa *c* è stata calcolata in base al valore della portata dichiarata alla quota di massimo invaso, mentre per l'esponente è stato adottato rispettivamente il valore di 0,5 o di 1,5, per i casi di scarico da luce a battente o da luce di sfioro.

Per le *precipitazioni critiche* e le *curve segnalatrici di possibilità pluviometrica* [2] ad esse collegate, sono state adottate quelle fornite dall'Autorità di Bacino per pluviometri prossimi al serbatoio esaminato e quanto ai *tempi di ritorno*, sono stati presi in considerazione soltanto i tempi di 50, 200 e 500 anni, che l'art. 6 del D.Lgs. n°49 del febbraio 2010⁴ definisce rappresentativi degli scenari di rischio frequente, poco frequente e raro.

Per la trasformazione afflussi-deflussi, Supino suggerì di impiegare per il *coefficiente di deflusso* φ della [1], un valore costante compreso tra il 50 ed il 70%⁵, calcolato in base all'evento critico di progetto.

Nel seguito, a titolo di esempio, le equazioni [8] e [9] di Supino, verranno applicate allo studio di due serbatoi, costruiti in epoche diverse con differenti criteri di progetto⁶: il serbatoio di Ravedis sul torrente Cellina, entrato in servizio nel 2014, concepito per il servizio di piena, e il serbatoio di Pieve di Cadore sul fiume Piave, entrato in servizio nel 1954, concepito per l'impiego idroelettrico.

⁴ Decreto Legislativo 23 febbraio 2010, n° 49: "Attuazione della direttiva 2007/60/CE relativa alla valutazione e alla gestione dei rischi di alluvioni".

⁵ Supino: "Laminazione delle piene con due serbatoi in serie, scarichi a battente ed a stramazzo". *Giornale del Genio Civile*, fasc. 1 e 2, pag. 1 – 20, 1969; tuttavia, nel calcolo del volume da assegnare al serbatoio del Bilancino (Sieve, FI), Supino – in via cautelativa - adottò un coeff. di deflusso del 70%.

⁶ Per questo studio, le formule di Supino sono state applicate anche ai casi dei serbatoi del Bilancino (Sieve, FI), di Santa Caterina di Auronzo (Ansiei, BL) e del Comelico (Piave, BL) in Italia, e inoltre al serbatoio di Volta Grande (Rio Grande, PA) in Brasile. Con esclusione del serbatoio del Bilancino, in tutti gli altri casi, si tratta di serbatoi idroelettrici.

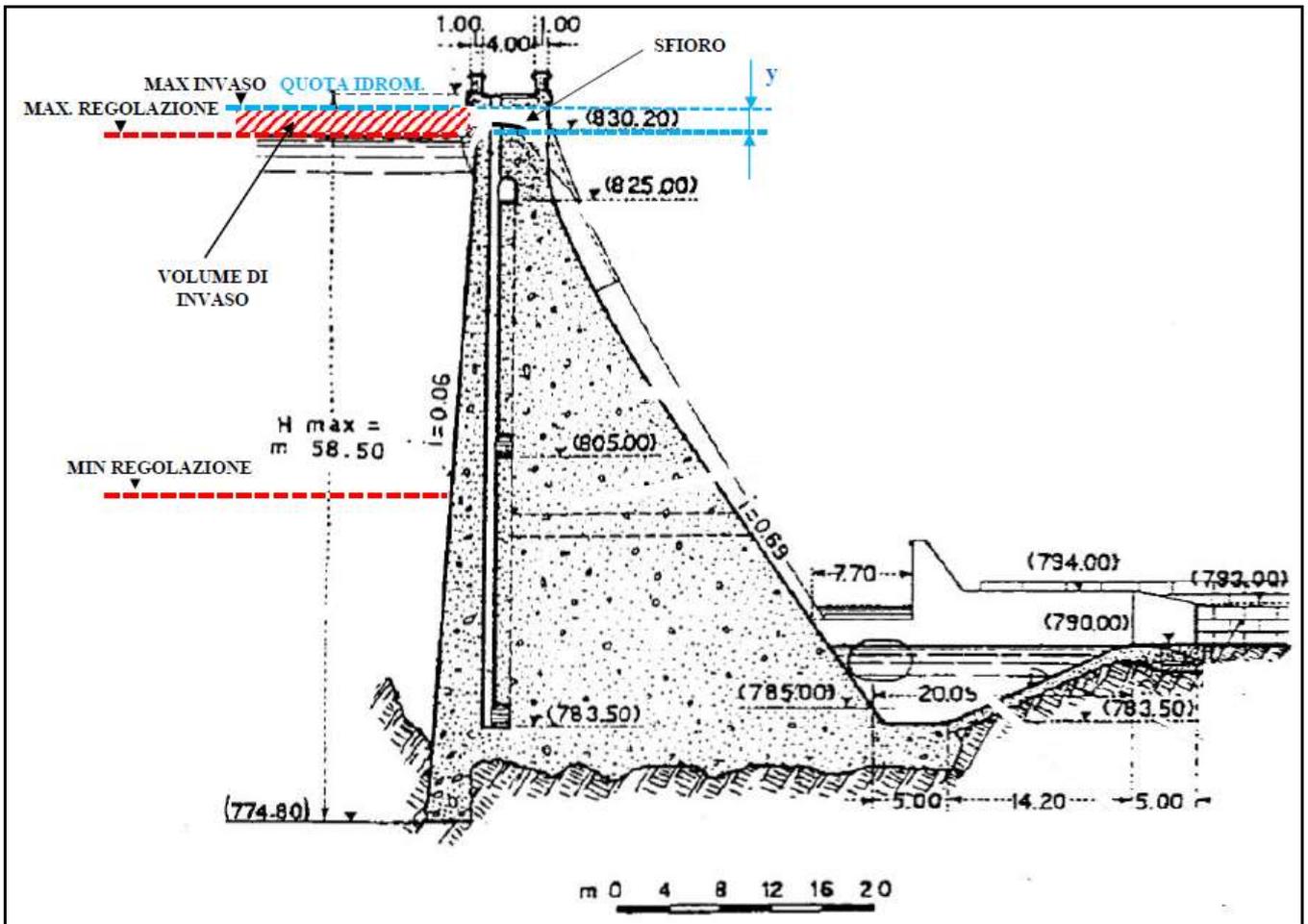


Fig. 1 – Volume invasabile (rosso) nel caso di laminazione con luce di sfioro

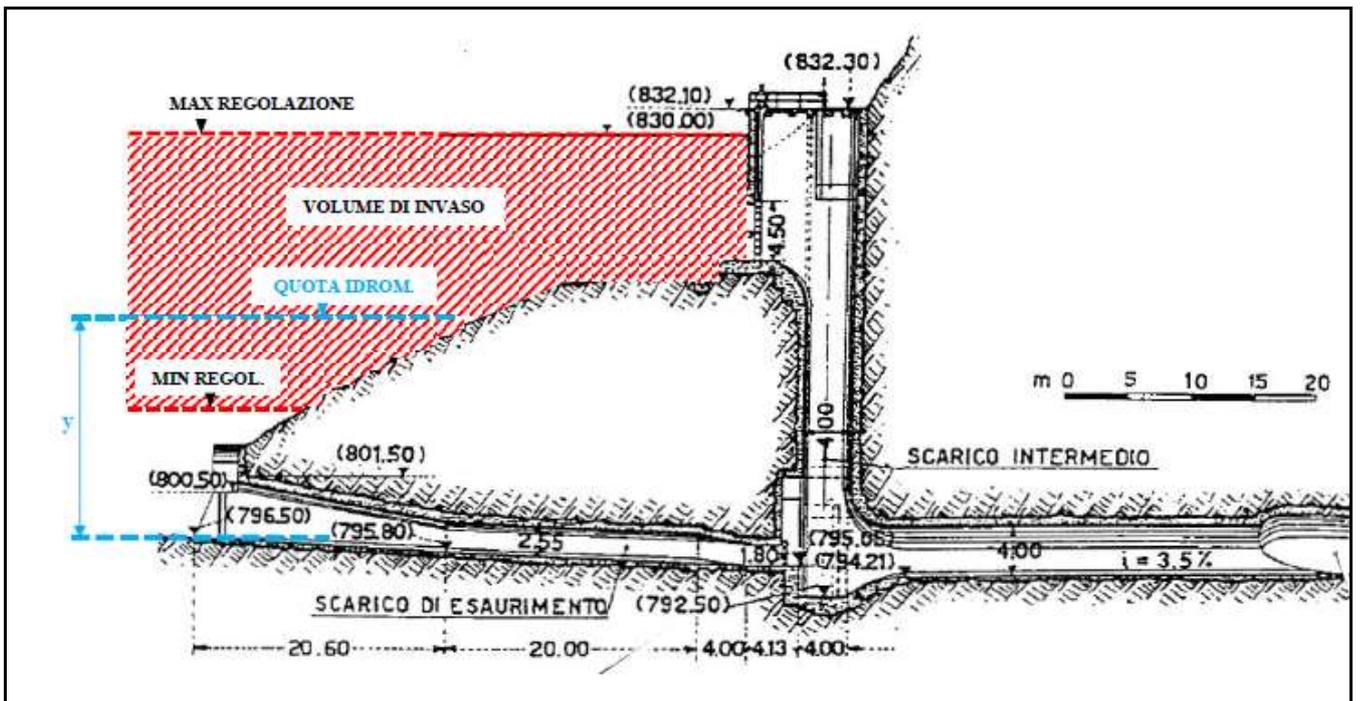


Fig. 2 – Volume invasabile (rosso) nel caso di laminazione con luce a battente

4. IL SERBATOIO DI RAVEDIS

4.1. Dati caratteristici

I primi studi di fattibilità per un serbatoio nella stretta di Ravedis, alla chiusa del bacino montano del torrente Cellina, risalgono al secondo dopoguerra; a quel tempo, i motivi che spingevano a realizzare opere di accumulo lungo il torrente Cellina, erano prevalentemente irrigui. I magredi alluvionali dell'alta pianura friulana, soggetti a precipitazioni intense, ma irregolari e concentrate nei periodi dell'anno meno produttivi, per essere coltivati con profitto, avevano bisogno di irrigazione di soccorso durante i mesi estivi; ma le amministrazioni ed i consorzi locali, poveri di risorse economiche, non potevano sostenere i costi di costruzione delle opere di invaso necessarie (Pinamonti, 2008).



Foto 1 – Diga e serbatoio di Ravedis (PN).

(Fonte: Consorzio di Bonifica Cellina Meduna, Pordenone 2014)

Napoleone Aprilis⁷, lungimirante e intraprendente presidente del consorzio di Bonifica Cellina Meduna, riuscì a coinvolgere nell'iniziativa la Società Adriatica di Elettricità (SADE), che disponeva dei mezzi finanziari necessari; in tal modo, alle primitive finalità irrigue, si sommarono quelle idroelettriche.

Un primo serbatoio – Barcis – formato dalla diga di Ponte Antoi, venne realizzato dalla SADE nel 1955; a questo avrebbe dovuto seguire un secondo più a valle, nella stretta di Ravedis (il progetto preliminare è del 1959), ma la tragedia del Vajont (1963) e le polemiche che seguirono, qui – come altrove – fecero soprassedere all'iniziativa.

Le drammatiche piene del settembre 1965 e del novembre 1966, che allagarono parte del Friuli e del Veneto orientale, riportarono d'attualità l'esigenza di disporre di un volume di accumulo a Ravedis, questa volta però, principalmente per moderare le piene del Cellina.

Nel 1967, nell'ambito Commissione Interministeriale “De Marchi”, lo studio dei provvedimenti per la messa in sicurezza del bacino del fiume Livenza, venne affidato ad un gruppo di lavoro coordinato da

⁷ *Napoleone Aprilis (1887–1966), ingegnere idraulico e politico, per due legislature Deputato al Parlamento del Regno d'Italia; fu sindaco di Azzano Decimo (PN) e presidente del Consorzio di Bonifica “Cellina Meduna”.*

Augusto Ghetti ⁸. Ghetti suggerì la costruzione di cinque serbatoi di laminazione, tre sul t. Cellina e due sul t. Meduna (Ghetti 1974); tra i tre del Cellina, appunto quello di Ravedis.

Il progetto esecutivo venne completato 1974, ma i lavori di costruzione della diga, iniziati nel 1986, si conclusero soltanto nel 2014.

La diga di Ravedis (Foto 1) è uno sbarramento in calcestruzzo a gravità massiccia, lungo 170 m, alto 95 m, con la sommità a quota 343,00 m s.l.m. L'invaso occupa una superficie di circa 120 ha, ha una profondità variabile da 10 a 30 m e un volume totale di 25,8 milioni di m³. La quota di massimo vaso è 341,00 m s.l.m., mentre quelle di massima e di minima regolazione sono rispettivamente: 338,50 e 308,00 m s.l.m. (Tab. 1) (Pasqualis 1991).

Tab. 1 – Quote idrometriche e volume totale di vaso

(Fonte: Regione Friuli Venezia Giulia, Protezione Civile)

Serbatoio di Ravedis	QUOTA IDROM. m s.l.m.	VOLUME TOTALE m ³ × 10 ⁶
Minima regolazione =	308.00	3.0
Massima regolazione (Sfioro) =	338.50	23.6
Massimo vaso =	341.00	25.8
Coronamento diga =	343.00	27.6

Per verificare la capacità di moderare le piene del Cellina con le formule di Supino, sono state utilizzate le curve di possibilità pluviometrica di Tab. 2, calcolate con i valori delle piogge intense di durata oraria registrate dal pluviometro di Claut (563 m s.l.m.) (Autorità di bacino 2008 I).

Tab. 2 – Curve di possibilità pluviometrica della stazione di Claut (PN)

(Fonte: Autorità di Bacino, Venezia 2008)

T _R = 50 anni	T _R = 200 anni	T _R = 500 anni
$h \cdot_{50} = 0,29 \cdot t^{0,58}$	$h \cdot_{200} = 0,39 \cdot t^{0,59}$	$h \cdot_{500} = 0,49 \cdot t^{0,60}$

h_{T_R} (m) è l'altezza di precipitazione avente tempo di ritorno T_R (anni) e t (giorni) la sua durata.

Per l'applicazione delle formule di Supino, il *coefficiente di deflusso* φ (adim.) del bacino del t. Cellina tributario del serbatoio (446 km²), è stato calcolato con l'evento alluvionale del novembre 1966.

Dal 4 al 5 novembre, l'altezza di precipitazione totale, riferita al bacino imbrifero del torrente Cellina alla confluenza con il Meduna (449 km²), fu di 579,1 mm (De Marchi e Dorigo 1969), corrispondente ad un volume meteorico di 260 milioni di m³. Nello stesso periodo, il volume affluito al serbatoio di Barcis (392 km²) fu di circa 110 milioni di m³ (Tonini 1967). Il rapporto tra deflusso e afflusso, ragguagliato alla superficie del bacino del torrente Cellina alla confluenza con il Meduna, dà come risultato un coefficiente di deflusso medio del 50%.

4. 2. Laminazione delle piene con lo scarico di superficie

Lo scarico di superficie della diga di Ravedis (Pasqualis 1991) è composto da cinque luci di sfioro da 15 m di larghezza realizzate nel corpo della diga (Foto 2) e da due sfioratori laterali indipendenti, sagomati a "becco d'anatra", posti su sponde opposte (Foto 3); per tutte le luci, la quota di sfioro è 338,50 m s.l.m..

⁸ Anche il gruppo di lavoro che si occupò della sistemazione del bacino del fiume Livenza rientrava nell'ambito della sottocommissione presieduta da Supino. Augusto Ghetti (1914-1992), professore di Idraulica dell'Università di Padova, svolse un ruolo determinante nella definizione degli interventi risolutivi per il Livenza.



Foto 2 – Diga di Ravedis – Scarico di superficie
(Vista da monte)



Foto 3 – Diga di Ravedis – Scarico laterale sinistro

Alla quota di massimo invaso (341,00 m s.l.m.), con uno sviluppo totale di 265 m, lo scarico di superficie è in grado di evacuare una portata complessiva di 1950 m³/s (Pasqualis 1991).

La scala di deflusso dello scarico di superficie, viene pertanto rappresentata con l'equazione seguente:

$$Q = 493,2 \cdot (H - 338,5)^{1,50} \quad [10]$$

nella quale, Q (m³/s) è la portata totale sfiorata e H (m s.l.m.) è la quota idrometrica del serbatoio.

Tra le quote di sfioro e di massimo invaso, il serbatoio di Ravedis dispone di 2,2 milioni di m³ di invaso (Tab. 5) con un'escursione di livello di 2,5 m; tra queste quote, il volume di invaso V (m³×10³) è dato da:

$$V = 1040 \cdot (H - 338,5) \quad [11]$$

La relazione [5] che lega volume invasato V (m³×10³) e portata complessiva sfiorata Q (m³/s), diventa:

$$V = 16,7 \cdot Q^{0,667} \quad [12]$$

Il sistema costituito dalle curve parametriche di equazione [8] (Supino) e dall'equazione [12], fornisce i valori massimi di portata sfiorata e di volume invasato, in funzione del tempo di ritorno, operando con i soli scarichi di superficie.

Nella Tab. 3, sono riportati i risultati ottenuti per i tempi di ritorno di 50, 200 e 500 anni: il volume massimo invasato V (m³×10⁶), la quota idrometrica massima H (m s.l.m.) raggiunta nel serbatoio e la portata massima Q (m³/s) sfiorata. Il calcolo si presta ad essere rappresentato efficacemente nella forma grafica di Fig. 3.

Con il serbatoio inizialmente alla quota di sfioro, operando con il solo scarico di superficie, non è possibile invasare tutti gli eventi critici possibili, senza superare la quota di massimo invaso. Infatti (Fig. 3 e Tab. 3), con qualunque tempo di ritorno, sarebbe necessario invasare un volume massimo superiore a quello che il serbatoio di Ravedis può mettere a disposizione tra le quote di massima regolazione (o sfioro) e di massimo invaso (2,6 milioni di m³).

4. 3. Laminazione delle piene con lo scarico di fondo

Lo scarico di fondo della diga di Ravedis (Pasqualis, 2014) è costituito da due gallerie del diametro di 8 metri, intercettate ciascuna da una coppia di paratoie piane regolanti. Le gallerie hanno uno sviluppo di 500 m e attraversano le spalle della diga mantenendosi approssimativamente alla quota di 292 m s.l.m. . In totale le gallerie, alla quota di massimo invaso, possono scaricare la portata massima di 1400 m³/s.

Con riferimento alla quota di minima regolazione, la scala di deflusso delle due luci di fondo, è dunque rappresentata dall'equazione seguente:

$$Q = 253,5 \cdot (H - 308,0)^{0,50} \quad [13]$$

con Q (m³/s) portata complessiva delle due gallerie e H (m s.l.m.) quota idrometrica del serbatoio.

Tra le quote di massimo invaso e di minima regolazione, il serbatoio di Ravedis dispone di un volume di 22,8 milioni di m³ (Tab. 3); in questo ambito, il volume del serbatoio V (m³×10³) è, con buona approssimazione, calcolabile con la:

$$V = 242,0 \cdot (H - 308,0)^{1,30} \quad [14]$$

La relazione [5] che lega volume utile V (m³×10³) e portata totale scaricata per mezzo delle due gallerie, Q (m³/s), è pertanto la seguente:

$$V = (0,034 \cdot Q)^{2,60} \quad [15]$$

Tab. 3 – Serbatoio di Ravedis – Valori massimi di volume invaso, di quota idrometrica e di portata scaricata, operando con le luci di sfioro della diga.

	T _R (anni)	V m ³ 10 ⁶	H m s.l.m.	Q m ³ /s
A	50	3.9	> 341.0	3,167
B	200	4.7	> 341.0	4,236
C	500	5.4	> 341.0	5,194

Tab. 4 – Serbatoio di Ravedis – Valori massimi di volume invaso, di quota idrometrica e di portata, scaricata, operando con le luci di fondo della diga.

	T _R (anni)	V m ³ 10 ⁶	H m s.l.m.	Q m ³ /s
A	50	11.1	326.9	1,102
B	200	16.9	334.2	1,297
C	500	23.2	341.4	1,430

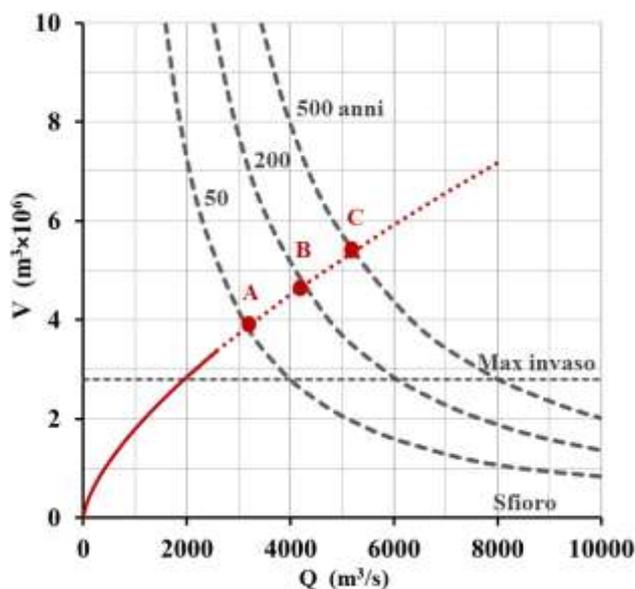


Fig. 3 – Serbatoio di Ravedis – Valori massimi di volume invaso e di portata scaricata, operando con le sole luci di sfioro della diga.

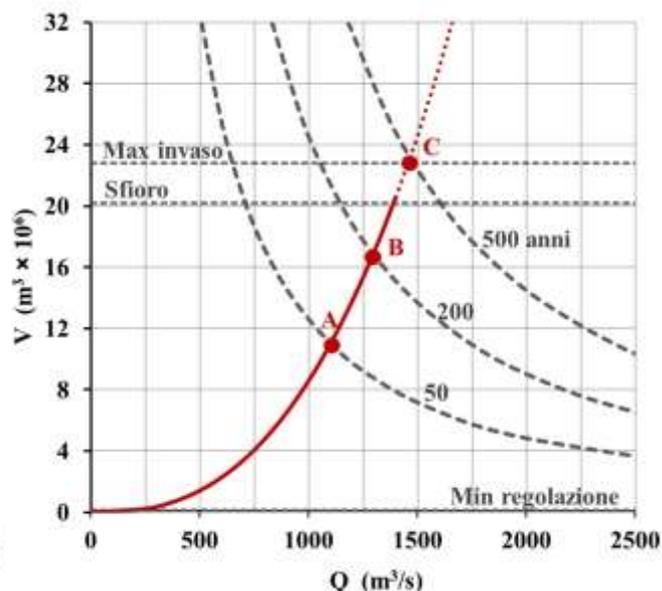


Fig. 4 – Serbatoio di Ravedis – Valori massimi di volume invaso e di portata scaricata, operando con le sole luci di fondo della diga.

La soluzione del sistema costituito dalle curve parametriche di equazione [9] (Supino) e [15], mostra che, potendo disporre inizialmente di tutto il volume compreso tra le quote di minima e di massima regolazione, operando con le sole gallerie, è possibile invasare tutti gli eventi critici con tempi di ritorno di oltre 200 anni, senza superare la quota di sfioro (Tab. 4 e Fig. 4).

La Fig. 5 rappresenta le curve di involuppo dei valori massimi di volume invaso V (m³ × 10⁶) in funzione della durata di precipitazione critica t (ore); i punti A, B e C, corrispondono ai tre massimi di Tab. 4. Si osserva che con il tempo di ritorno di 500 anni, il volume disponibile tra le quote di minima e di massima regolazione, non è sempre sufficiente per contenere il livello del serbatoio sotto la quota di sfioro. Al

superamento di questa quota⁹ però, intervengono le luci di sfioro che, sommandosi alle gallerie, evitano il superamento della quota di massimo invaso (curva rossa continua di Fig. 5).

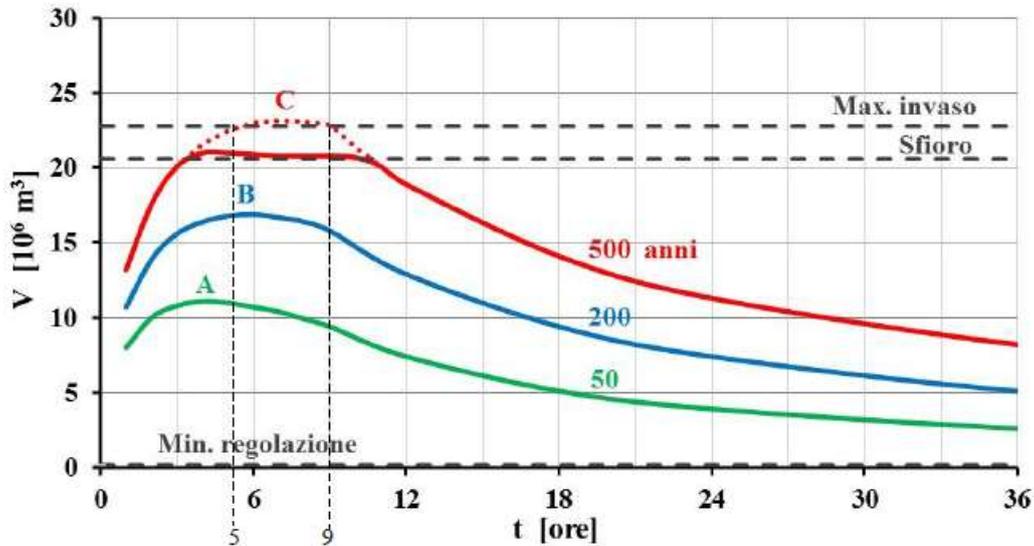


Fig. 5 – Serbatoio di Ravedis – Curve di involucro dei valori massimi di volume invasato, in funzione della durata di precipitazione, per assegnati tempi di ritorno.

4. 4. Considerazioni sull'impiego del serbatoio di Ravedis per moderare le piene.

Per esemplificare le modalità operative a Ravedis e, particolarmente, per verificare la portata massima scaricata dalle luci di fondo, viene utilizzato l'evento di piena del novembre 1966. L'onda di piena entrante è stata costruita partendo dalla portata scaricata dalla diga di Barcis (Tonini, 1967)¹⁰, che sbarrava il torrente Cellina a monte della stretta di Ravedis. Il volume d'acqua che affluì al serbatoio di Barcis dal 4 al 5 novembre 1966, fu di circa 110 milioni di m³ (Tonini, 1967); basandosi sulle curve di possibilità pluviometrica della stazione meteo di Claut (Tab. 6) ed applicando il coefficiente di deflusso del 50%, a questo evento è attribuibile un tempo di ritorno di circa 200 anni.

Ipotizzando che il serbatoio di Ravedis, si trovi inizialmente alla quota di minima regolazione (308,00 m s.l.m.), risulterebbe disponibile un volume invasabile di circa 20,6 milioni di m³. In questo caso, con la piena del novembre 1966, il serbatoio raggiungerebbe la quota idrometrica massima di 338,10 m s.l.m., invaserebbe un volume di 23,2 – 3 = 20,2 milioni di m³ e scaricherebbe la portata massima di 1390 m³/s (Tab. 5 e Fig. 6). Questa modalità operativa è assimilabile alla *laminazione statica*.

In termini di portata massima scaricata e di volume massimo invasato, questi risultati confermano sostanzialmente quelli del sistema di equazioni [8] (Supino) e [12], per il tempo di ritorno di 200 anni (Tab. 4, caso B).

L'esercizio di un serbatoio concepito per il servizio di piena, è condizionato da rigidi protocolli operativi stabiliti dalle Autorità; prescindendo da tali vincoli, quando non è nota né l'entità, né l'evoluzione della piena, il criterio operativo più convincente, appare quello di invasare solo le portate superiori ad un valore di soglia compatibile con l'ufficiosità della rete idrografica¹¹.

⁹ In assenza di sfioro, le piogge di durata compresa tra 5 e 9 ore e tempo di ritorno 500 anni, provocherebbero il superamento della quota di massimo invaso (punto C delle Figg. 4 e 5).

¹⁰ Per generare l'onda di piena di calcolo a Ravedis, le portate scaricate dalla diga di Barcis nei giorni 3, 4 e 5 novembre 1966, sono state incrementate del rapporto tra le aree dei bacini tributari (rispettivamente: 446 e 392 km²).

¹¹ La gestione del serbatoio di Ravedis in condizioni di piena, è stata studiata dalla società di ingegneria Beta Studio S.r.l. di Ponte S. Nicolò (PD), con l'ausilio di modelli matematici di generazione, moderazione e propagazione delle piene, committente il Consorzio di Bonifica Cellina Meduna di Pordenone.

Partendo con il serbatoio alla quota di esercizio (328,00 m s.l.m.¹²) e assumendo – per esempio – come valore limite la portata media giornaliera che si verifica in occasione delle piene maggiori (circa 600 m³/s), inizialmente il serbatoio dovrebbe venire svasato.

Tab. 5 – Serbatoio di Ravedis: risultati della simulazione del transito della piena del Novembre 1966 con le quote idrometriche iniziali di 308,00 (laminazione statica) e 328,00 m s.l.m.

	QUOTA IDROMETRICA			VOLUME TOTALE			PORTATA MASSIMA	
	INIZIALE m s.l.m.	MINIMA m s.l.m.	MASSIMA m s.l.m.	INIZIALE m ³ × 10 ⁶	MINIMO m ³ × 10 ⁶	MASSIMO m ³ × 10 ⁶	AFFLUITA m ³ /s	DEFLUITA m ³ /s
Fig. 6	308.00	308.00	338.10	3.0	3.0	23.2	1,950	1,390
Fig. 7	328.00	317.00	338.30	14.9	7.2	23.4	1,950	1,395

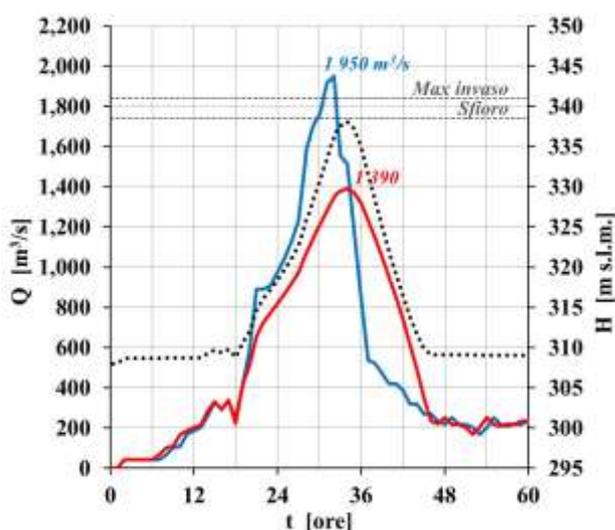


Fig. 6 – Serbatoio di Ravedis: simulazione del transito della piena del Novembre 1966 con il serbatoio inizialmente a quota 308,00 m s.l.m. (esempio di laminazione di tipo statico).

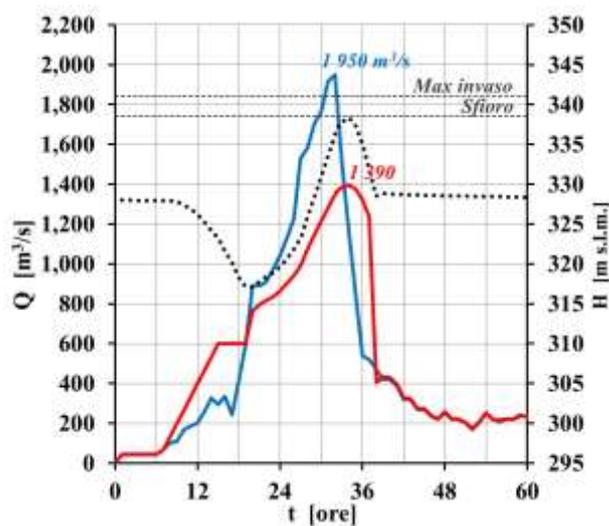


Fig. 7 – Serbatoio di Ravedis: simulazione del transito della piena del Novembre 1966 con il serbatoio inizialmente a quota 328,00 m s.l.m. (esempio di laminazione di tipo dinamico).

Questa manovra di svaso preventiva, da eseguire mediante la graduale apertura delle luci di fondo¹³ fino al raggiungimento della portata limite prefissata, ha lo scopo di liberare un volume sufficiente per moderare, durante la successiva fase di invaso, il colmo della piena affluente.

Nell'esempio di Fig. 7, con la piena del novembre 1966, dopo il graduale svaso iniziale a quota 317,10 m s.l.m., in seguito il serbatoio raggiungerebbe la quota idrometrica massima di 338,30 m s.l.m., invaserebbe un volume di $23,4 - 7,2 = 16,2$ milioni di m³ e scaricherebbe la portata massima di 1395 m³/s (Tab. 5).

Questo modo di operare, è assimilabile alla *laminazione dinamica*.

Alla ricostruzione della piena del novembre 1966 affluente a Ravedis, è attribuibile un colmo di 1950 m³/s pertanto, in entrambi i casi (statico e dinamico), si conseguirebbe una moderazione del 30%, con la differenza che, mentre la laminazione statica richiede la disponibilità iniziale del massimo volume invasabile (20,6 ML mc), quella dinamica richiede un volume inferiore (16,2 ML mc) senza interferire sostanzialmente con l'esercizio del serbatoio.

¹² La quota idrometrica di 328,00 m s.l.m. è quella massima attualmente autorizzata per l'esercizio del serbatoio; ad essa corrisponde un volume utile di 11,7 milioni di m³.

¹³ In questo esempio, applicato al serbatoio di Ravedis, si è ipotizzato di passare da 0 a 600 m³/s in 12 ore.

5. IL SERBATOIO DI PIEVE DI CADORE

5. 1. Dati caratteristici

La diga di Pieve di Cadore (BL), costruita a partire dal 1943 ed entrata in servizio nel 1950, costituisce il principale volume di invaso dell'impianto idroelettrico Piave-Boite-Maè-Vajont, che fa capo alla centrale di Soverzene (BL) (*Semenza* 1955). Il serbatoio copre una superficie di 2,5 km², con un volume totale di regolazione di 68 milioni di m³ ed è alimentato dall'alto bacino del fiume Piave che, alla diga, raggiunge l'estensione di 818,5 km² (*ANIDEL* 1961).

La diga (Foto 4) è una struttura ad arco gravità alta 112 m che, al coronamento, ha uno sviluppo di 410 m (Foto 3). Inferiormente, fino a quota 630 m s.l.m., è costituita da un blocco di fondazione massiccio che ostruisce una forra scavata dal Piave, profonda 57 m.

Superiormente, è costituita da una struttura ad arco che sbarra l'intera valle e si eleva fino a quota 685 m s.l.m. basandosi, in destra, sul blocco di fondazione artificiale e, in sinistra, sul terrazzo roccioso di Pian delle Ere (*Pancini* 1954).

La quota di massimo invaso è 685,00 m s.l.m. e coincide con il coronamento della diga¹⁴; le quote di massima e di minima regolazione sono rispettivamente: 683,50 e 625,50 m s.l.m. (Tab. 6) (*ANIDEL* 1961).

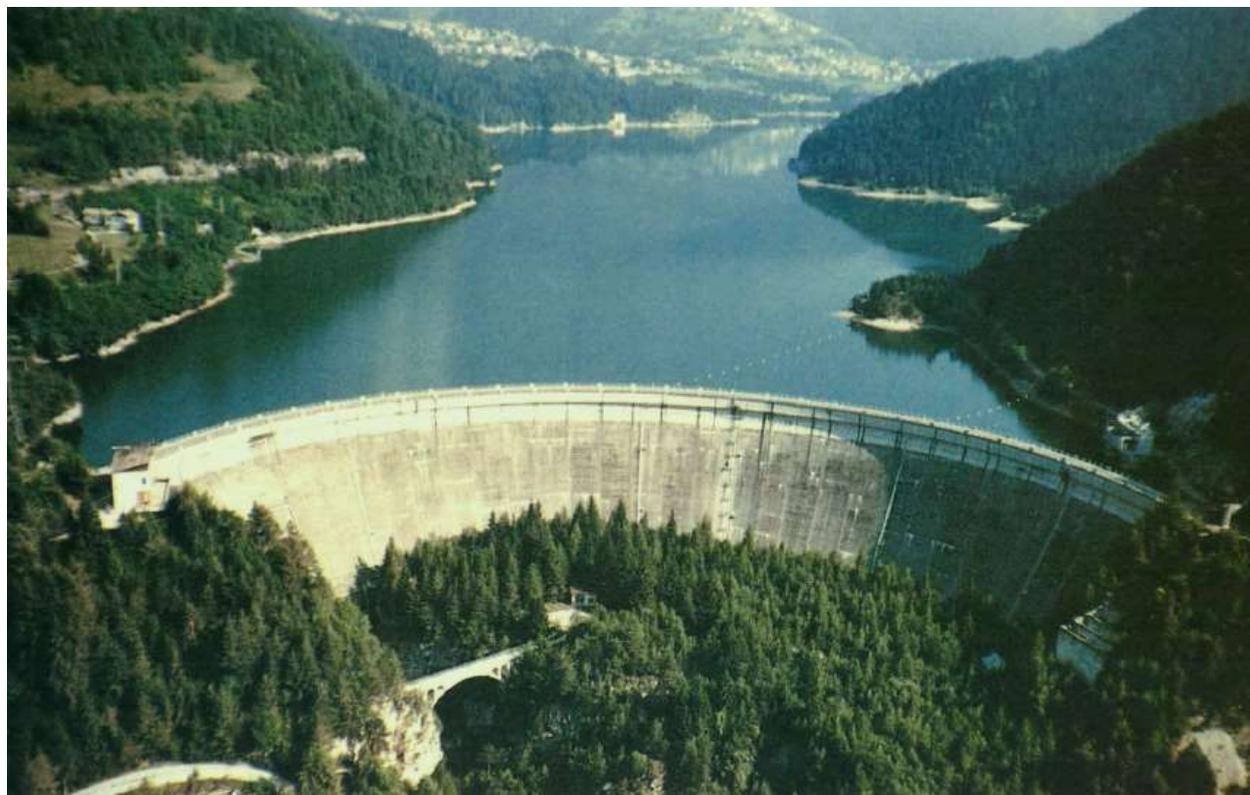


Foto 4 – Diga di Pieve di Cadore e lago di Centro Cadore (BL)
(Fonte: ENEL S.p.A. – DPT, Vittorio Veneto 2000)

¹⁴ Secondo il progettista, Carlo Semenza, in condizioni eccezionali, la diga avrebbe potuto anche tracimare (*Pancini* 1954).

Tab. 6 – Quote idrometriche e volume del serbatoio
(Fonte: ANIDEL, 1961)

Serbatoio di Pieve di Cadore	QUOTA IDROM. m s.l.m.	VOLUME TOTALE m ³ × 10 ⁶
Minima regolazione =	625.50	4.00
Soglia di sfioro =	676.90	52.00
Massima regolazione =	683.50	68.00
Massimo invaso =	685.00	73.00

Per questo studio, sono state utilizzate le curve di possibilità pluviometrica fornite dall’Autorità di Bacino (Tab. 10), risultanti dall’analisi di distribuzione spaziale delle precipitazioni orarie intense dell’alto bacino del fiume Piave (Autorità di Bacino, 2008).

Tab. 7 – Curve segnalatrici di possibilità pluviometrica per l’alto bacino del f. Piave
(Fonte: Autorità di Bacino, Venezia)

T _R = 50 anni	T _R = 200 anni	T _R = 500 anni
$h \cdot_{50} = 0,15 \cdot t^{0,43}$	$h \cdot_{200} = 0,18 \cdot t^{0,43}$	$h \cdot_{500} = 0,20 \cdot t^{0,43}$

h_{T_R} (m) è l’altezza di precipitazione avente tempo di ritorno T_R (anni) e t (giorni) la sua durata.

Per le formule di Supino, il coefficiente di deflusso ϕ (adim.) è stato calcolato con l’evento alluvionale del novembre 1966. Tra il 4 ed il 5 novembre, i pluviometri di Auronzo di C., S. Stefano di C. e Lorenzago, registrarono rispettivamente 200.4, 230.9 e 246.0 mm di pioggia¹⁵ che, in base alle rispettive aree di competenza, per l’intero bacino tributario del serbatoio, corrispondono ad un volume meteorico di 183 milioni di m³. Nello stesso periodo, il volume affluito al serbatoio di Pieve di Cadore fu di circa 90 milioni di m³ (Tonini, 1967) e questo porta a stimare un coefficiente di deflusso medio del 50%.



Foto 5 – Diga di Pieve di C. – Vista da valle



Foto 6 – Diga di Pieve di C. – Scarico di superficie

¹⁵ Min. LLPP Ufficio Idrografico del Magistrato alle Acque di Venezia, Annali Idrologici, Anno 1966, Parte I.

5. 2. Laminazione delle piene con lo scarico di superficie

Lo scarico di superficie della diga di Pieve di Cadore è costituito da due luci di sfioro (Foto 6) poste sulla spalla sinistra, a monte della diga, con soglia a quota 676,90 m s.l.m. Le luci sono intercettate da paratoie piane di sezione $9,0 \times 6,6$ m, con ventola sovrapposta da 1,20 m di altezza (Ghetti & altri 1956).

Alla quota di massimo invaso, lo scarico di superficie è in grado di evacuare la portata massima di $846 \text{ m}^3/\text{s}$ (Ghetti & altri 1956); la scala di deflusso delle luci di sfioro è rappresentata dall'equazione:

$$Q = 36,70 \cdot (H - 676,90)^{1,50} \quad [16]$$

con H (m s.l.m.) quota idrometrica del lago.

Tra le quote di sfioro e di massimo invaso, il volume del lago V ($\text{m}^3 \times 10^3$), è dato dalla:

$$V = 2524 \cdot (H - 676,90) \quad [17]$$

La relazione [5] che lega volume invasato V ($\text{m}^3 \times 10^3$) e portata sfiorata Q (m^3/s), è la seguente:

$$V = 228,6 \cdot Q^{0,67} \quad [18]$$

Il sistema costituito dalle curve parametriche di equazione [8] (Supino) e dall'equazione [18], fornisce i valori massimi di portata sfiorata e di volume invasato, in funzione del tempo di ritorno (Tab.8 e Fig. 5).

Tra le quote di sfioro e di massimo invaso, il serbatoio di Pieve di C. dispone di un volume di 21 milioni di m^3 (Tab. 6); ma questo volume risulta insufficiente per invasare tutte le piene affluenti senza superare la quota di massimo invaso¹⁶, anche per un tempo di ritorno di soli 50 anni (Fig. 8 e Tab. 8).

Con il serbatoio inizialmente alla quota di sfioro (676,90 m s.l.m.), operando con il solo scarico di superficie, non è possibile invasare tutti gli eventi critici possibili, senza tracimare la diga¹⁷. Infatti (Fig. 8 e Tab. 8), con qualunque tempo di ritorno, sarebbe necessario invasare un volume massimo superiore a quello che il serbatoio di Pieve di C. può mettere a disposizione tra le quote di massima regolazione (o sfioro) e di massimo invaso (21 milioni di m^3).

5. 3. Laminazione delle piene con gli scarichi di fondo

Due gallerie realizzate in sinistra, nella roccia di fondazione della diga e, in fase di costruzione, impiegate come diversivi, vennero adibite: l'una a scarico di fondo, con imbocco a quota 588,47 m s.l.m., diametro di 4 m e lunghezza di 360 m, e l'altra a scarico di mezzofondo, con imbocco a quota 613,50 m s.l.m., diametro di 5 m e lunghezza di 250 m (Pancini 1954).

Alla quota di massimo invaso (685 m s.l.m.), le luci di mezzofondo e di fondo, sono dichiarate rispettivamente, per le portate massime di 190 e di $183 \text{ m}^3/\text{s}$ (Ghetti & altri 1956).

Per la luce di mezzofondo, la scala di deflusso è rappresentata dall'equazione:

$$Q = 22,47 \cdot (H - 613,50)^{0,50} \quad [19]$$

per la luce di fondo, è invece rappresentata dall'equazione:

$$Q = 18,63 \cdot (H - 588,50)^{0,50} \quad [20]$$

con H (m s.l.m.) quota idrometrica del serbatoio.

Con riferimento alla soglia della luce di mezzofondo, il volume di invaso V ($\text{m}^3 \times 10^3$) è dato da:

$$V = 8,8 \cdot (H - 613,50)^{2,10} \quad [21]$$

¹⁶ Le luci di scarico della diga di Pieve di Cadore (superficie + mezzo-fondo + fondo), vennero calcolate per la portata massima complessiva, di $1130 \text{ m}^3/\text{s}$; all'epoca, a tale valore si attribuiva una "ricorrenza" di 100 anni (Ghetti & altri 1956). Era ammesso altresì che, con eventi più gravosi, la diga potesse tracimare, anche se questo danneggiava il manufatto stradale che, ancor oggi, corre sul coronamento (Pancini 1954 e Ghetti & altri 1956).

¹⁷ Le luci di scarico della diga di Pieve di Cadore, vennero calcolate per la portata massima complessiva, di $1130 \text{ m}^3/\text{s}$; all'epoca, a tale valore si attribuiva una "ricorrenza" – implicitamente quindi, il tempo di ritorno – di 100 anni (Ghetti & altri, 1956). Era inoltre ammesso che, con eventi più gravosi, la diga potesse tracimare, anche se questo andava a danneggiare il manufatto stradale che, ancor oggi, corre sul coronamento (Pancini, 1954 e Ghetti & altri, 1956).

La relazione [5] che lega volume invasato V ($m^3 \times 10^3$) e portata scaricata dalla luce di mezzofondo Q (m^3/s), è:

$$V = 0,0185 \times 10^{-3} \cdot Q^{-4,2} \quad [22]$$

Tra le quote della luce di mezzofondo e di massima regolazione, il serbatoio di Pieve di C. dispone di un volume di invaso di 66 milioni di m^3 (Tab. 6); tuttavia, utilizzando solo la luce di mezzofondo, è possibile invasare le piene solo fino ad un tempo di ritorno poco superiore a 50 anni (Tab. 9 e Fig. 9).

Sempre dal grafico di Fig. 9, si vede altresì come l'intervento dello scarico di fondo, in aggiunta a quello di mezzofondo (somma delle curve di equazione [19] e [20]), consenta invece di invasare le piene con tempo di ritorno anche superiore a 500 anni, mantenendo il livello nel serbatoio sotto la quota di massimo invaso.

Tab. 8 – Serbatoio di Pieve di C.: valori massimi di volume, di quota idrometrica e di portata scaricata, operando con le luci di sfioro della diga.

	T_R (anni)	V $m^3 \times 10^6$	H m s.l.m.	Q m^3/s
A	50	23.6	> 685	1,052
B	200	27.3	> 685	1,306
C	500	29.7	> 685	1,482

Tab. 9 – Serbatoio di Pieve di C.: valori massimi di volume, di quota idrometrica e di portata scaricata, operando con la luce di mezzofondo.

	T_R (anni)	V $m^3 \times 10^6$	H m s.l.m.	Q m^3/s
A	50	63.0	682.3	186
B	200	81.9	> 685	198
C	500	95.4	> 685	205

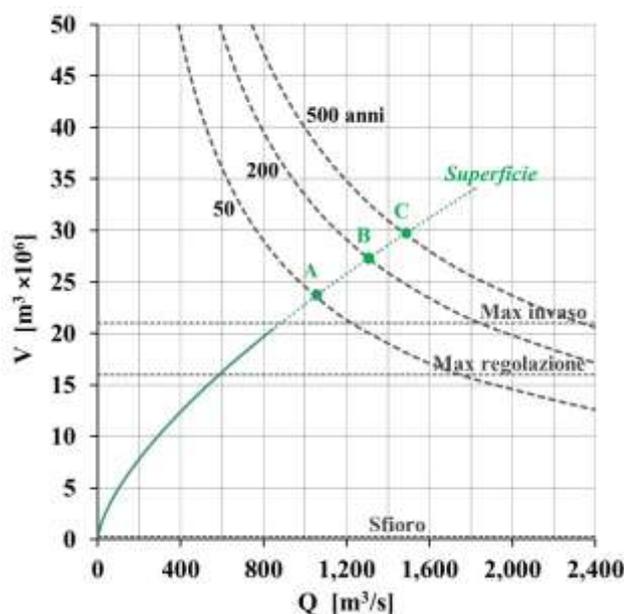


Fig. 8 – Serbatoio di Pieve di C.: valori massimi di volume e di portata scaricata, operando con le luci di sfioro della diga.

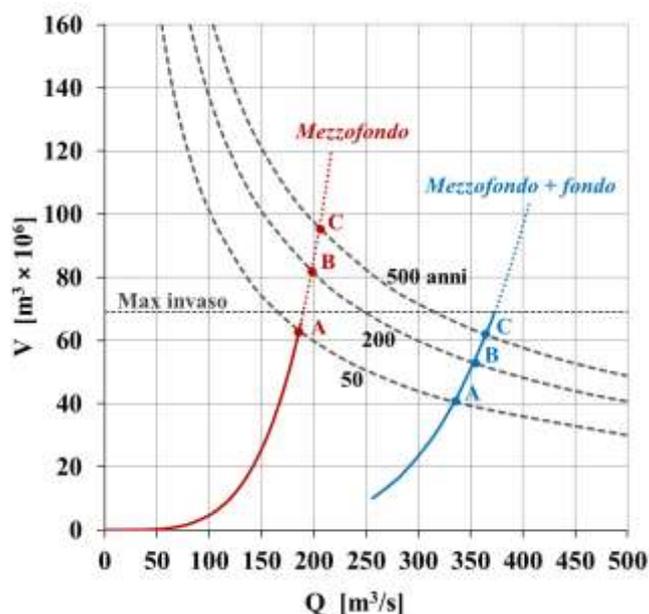


Fig. 9 – Serbatoio di Pieve di C.: valori massimi di volume e di portata scaricata, operando con le luci di mezzo-fondo e di fondo della diga.

5. 4. Considerazioni sull'impiego del serbatoio di Pieve di C. per moderare le piene

Per esemplificare le modalità operative del serbatoio di Pieve di Cadore, è stata usata la registrazione dell'evento del novembre 1966 (Tonini 1967) a cui, per confronto delle curve di Tab. 7 con i dati di pioggia misurati in tale occasione, è possibile attribuire un tempo di ritorno di circa 200 anni.

L'esercizio di un serbatoio idroelettrico, è vincolato dal *foglio condizioni* della diga¹⁸ che, in certi periodi dell'anno, può imporre un limite alla quota di esercizio e riservare il volume eccedente per laminare le piene; in caso di piena, il criterio operativo generalmente osservato, consiste nel conservare vuoto il più a lungo possibile tale volume, riservandolo alla fase di colmo.

Per Pieve di Cadore, questo criterio si traduce: inizialmente, nel mantenere in funzione le luci di sfioro per tutta la durata dell'evento e, contemporaneamente, nell'aprire progressivamente le luci di mezzofondo e di fondo per scaricare – fin quando è possibile – una portata uguale a quella affluente e infine, durante la fase di crescita dell'invaso, nello scaricare la portata massima possibile (Susin 2017).

Questo “modus operandi” è esemplificato nella Fig. 7, dove è stata ipotizzata la quota di invaso iniziale di 667,00 m s.l.m.¹⁹, a cui corrisponde un volume utile di $73,0 - 37,5 = 35,5$ milioni di m³ (Tab. 6).

Così facendo, il serbatoio raggiunge la quota idrometrica massima di 683,50 m s.l.m., invasa un volume $66,0 - 37,5 = 28,5$ milioni di m³ e scarica la portata massima di 990 m³/s (Tab. 10 e Fig. 10).

Tab. 10 – Serbatoio di Pieve di Cadore: risultati della simulazione del transito della piena del Novembre 1966 con le quote di invaso iniziali di 676,90 e 683,25 m s.l.m.

	QUOTA IDROMETRICA			VOLUME TOTALE			PORTATA MASSIMA	
	INIZIALE	MINIMA	MASSIMA	INIZIALE	MINIMO	MASSIMO	AFFLUITA	DEFLUITA
	m s.l.m.	m s.l.m.	m s.l.m.	m ³ × 10 ⁶	m ³ × 10 ⁶	m ³ × 10 ⁶	m ³ /s	m ³ /s
Fig. 7	667,00	667,00	683,50	37,5	37,5	66,0	1,270	990
Fig. 8	683,50	683,50	684,68	68,7	68,7	71,6	1,270	1,170

6.

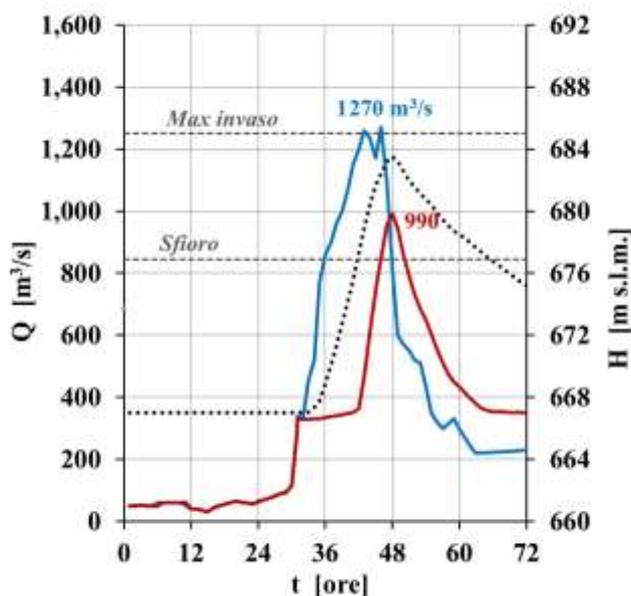


Fig. 10 – Serbatoio di Pieve di C.: simulazione del transito della piena del Novembre 1966 con il serbatoio inizialmente sotto la quota di sfioro (667,00 m s.l.m.)

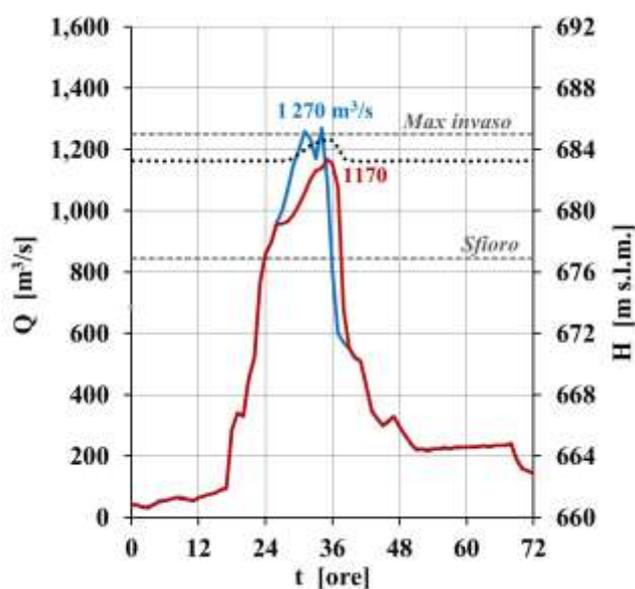


Fig. 11 – Serbatoio di Pieve di C.: simulazione del transito della piena del Novembre 1966 con il serbatoio inizialmente prossimo alla quota di massimo invaso (683,25 m l.m.)

In genere però, nei serbatoi idroelettrici, le luci di fondo non sono adeguate per il servizio di piena: hanno un'efficienza modesta, non sono provviste di paratoie regolanti, sono soggette a occlusione per il materiale sedimentato e non sono idonee ad operare sotto flusso con velocità elevate. In questi infatti, la gestione delle piene normalmente avviene con gli scarichi di superficie.

¹⁸ “Foglio condizioni per l'esercizio e la manutenzione della diga”, circolare del Ministero LL.PP. 4 dicembre 1987, n°352.

¹⁹ E' la quota di esercizio massima consentita dal foglio condizioni all'invaso del serbatoio di Pieve di Cadore, dal 15 settembre al 30 novembre di ogni anno.

In queste condizioni, partire con una quota idrometrica inferiore a quella di sfioro, per disporre di un rilevante volume invasabile, non comporta sostanziali vantaggi perché, nella fase iniziale è possibile scaricare solo attraverso le luci di fondo, che risultano poco efficienti. In altre parole, il maggiore volume invasabile, rischia di essere impegnato troppo presto rispetto all'istante di colmo, vanificando così il beneficio atteso.

Al contrario, partire con il serbatoio a una quota idrometrica superiore a quella di sfioro, consente di operare sin dal primo istante della piena con lo scarico di superficie – che ha un'efficienza superiore – e inoltre consente di avere a disposizione un battente maggiore sulle luci di fondo, incrementando – per quello che è possibile – la loro efficacia.

In questo modo, è possibile scaricare una portata uguale a quella entrante per un tempo maggiore e pertanto conservare vuoto più a lungo un volume invasabile minore, riservandolo alla fase di colmo.

Tutto questo è esemplificato nella Fig. 11, dove per il serbatoio di Pieve di C. è stata ipotizzata la quota iniziale di 683,25 m s.l.m.²⁰, a cui corrisponde un volume invasabile di $73 - 68,7 = 4,3$ milioni di m³.

Così facendo, senza operare svassi preventivi, con una piena uguale a quella del novembre 1966, il serbatoio raggiunge la quota idrometrica massima di 684,68 m s.l.m., invasa un volume di $71,6 - 68,7 = 2,9$ milioni di m³ e scarica la portata massima di 1170 m³/s (Tab. 10 e Fig. 11)²¹.

Questi due modi di operare, sono entrambi classificabili come casi di *laminazione statica*; il secondo però, dal punto di vista del gestore, è meno penalizzante perché richiede la disponibilità di un volume di invaso molto inferiore (4,3 milioni di m³, invece di 28,5) e determina nel serbatoio un'escursione di livello minore.

6. CONCLUSIONI

In alcuni articoli apparsi tra il 1967 ed il 1971, Giulio Supino presentò un procedimento basato sul metodo dell'invaso per calcolare il volume da assegnare ai serbatoi destinati a moderare le piene nelle reti idrografiche.

Dato un serbatoio di caratteristiche note e data la curva delle precipitazioni critiche del bacino tributario, Supino mostrò che impiegando le formule [8] (per le luci a battente) e [9] (per le luci di sfioro), si poteva dimensionare la luce di scarico, in modo tale da esaurire il volume invasabile.

Le formule proposte da Supino, risultano utili anche per verificare qual è il livello di sicurezza che un serbatoio esistente – qualunque sia la sua funzione – può offrire alla rete idrografica sottesa.

Utilizzando come esempi rappresentativi i serbatoi di Ravedis e di Pieve di Cadore, si è visto che, facendo sistema tra le curve di equazione [8] o [9] – funzioni parametriche del tempo di ritorno – e l'equazione che lega volume invasato e portata scaricata [5] è stato possibile verificare con quale tempo di ritorno il serbatoio esaurisce il volume invasabile operando con le luci di sfioro o con quelle a battente e qual è il corrispondente valore della portata massima scaricata.

Si può dunque cercare di generalizzare questi risultati, puntualizzando alcuni aspetti importanti.

Laminazione statica o dinamica ?

E' indubbio che la modalità di laminazione dinamica appaia più efficace di quella statica perché richiede la disponibilità di un volume inferiore, da liberare con lo svasso preliminare e da invasare durante la fase finale di crescita, quando il suo impegno risulta più efficace. In questo caso, l'escursione di livello nel serbatoio è quella minima richiesta per moderare la piena.

Per contro, la laminazione dinamica richiede che le condizioni della rete idrografica a valle del serbatoio consentano di scaricare per un certo tempo (durante la fase di crescita), una portata superiore a quella entrante; inoltre, per operare con tempestività, richiede di prevedere con un certo anticipo e poi di seguire in itinere l'evento critico; ma la cosa non è sempre agevole, anche potendo disporre di una rete di allertamento, a causa dei ridotti tempi di corrivazione delle piene.

La laminazione dinamica è una modalità operativa che richiede iniziativa e capacità decisionale autonoma (con le conseguenti responsabilità) oppure l'adozione di procedure e protocolli operativi, con il coinvolgimento di Enti e di Amministrazioni pubbliche e private, che obbediscono a logiche differenti e che tutelano interessi diversi, talvolta in contrasto.

²⁰ La quota di 683,25 m s.l.m. è quella alla quale si trovava il serbatoio di Pieve di Cadore la mezzanotte del giorno 3 novembre 1966. Il 4 novembre 1966, la portata massima defluita fu di 1070 m³/s (Tonini, 1967).

²¹ Con uno svasso preventivo (laminazione dinamica) la portata massima scaricata potrebbe venire ridotta a 900 m³/s.

E' per questo motivo che viene generalmente preferita la modalità di laminazione statica che, sebbene sia più penalizzante per i gestori dei serbatoi, tuttavia appare di più agevole applicazione, bastando stabilire una opportuna quota di massimo invaso ed il periodo durante il quale questo limite non deve essere superato.

Luce di sfioro o luce a battente ?

Per moderare le piene con un serbatoio, sarebbe preferibile utilizzare una luce di sfioro presidiata perché, a parità di evento, questa richiede un volume invasabile inferiore a quello di una luce a battente²².

Si è visto però, che questa via non è facilmente praticabile quando la luce di sfioro è libera, anche quando il serbatoio è concepito per il servizio di piena (come Ravedis); questo perché, alla quota di sfioro, le escursioni di livello ammissibili sono in genere modeste e le strette valli alpine, non consentono al serbatoio di disporre di volume invasabile sufficiente, senza superare la quota di massimo invaso (Fig. 3 e 8).

Ma d'altra parte, neppure l'impiego di una luce a battente è sempre efficace perché, nei serbatoi idroelettrici le luci di fondo e di mezzo-fondo hanno scarsa officiosità e richiedono grandi volumi invasabili, che comportano escursioni di livello molto ampie in tempi molto ridotti (Fig. 4 e 9).

Quale criterio operativo ?

In concreto, prescindendo dai vincoli contingenti imposti dai fogli condizioni delle dighe, il criterio operativo più convincente per i serbatoi idroelettrici esistenti, richiede di predeterminare il volume massimo invasabile e di conservarlo vuoto il più a lungo possibile durante l'evento, operando solo con scarichi di fondo regolanti provvisti di grande officiosità, riservando allo scarico di superficie il compito di limitare l'invaso nella fase di colmo per impedire il superamento della quota di massimo invaso.

E' fuor di dubbio infatti che, per i serbatoi idroelettrici esistenti, non è affatto utile riservare grandi volumi di invaso per moderare le piene; infatti mantenere stabilmente vuota la gran parte di un serbatoio in previsione di una piena, se questo non ha scarichi di fondo e mezzo-fondo di officiosità adeguata – come accade sempre nei serbatoi idroelettrici esistenti – produce un danno economico per il gestore senza conseguire un risultato decisivo, perché il volume invasabile rischia di venire impegnato troppo in anticipo rispetto all'istante di colmo, vanificandone l'efficacia.

7. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

Miliani L., 1939. “*Le piene dei fiumi Veneti e i provvedimenti di difesa*”. Min. LL.PP., Magistrato alle Acque di Venezia, Ed. Felice Le Monier.

Supino G., 1947. “Osservazioni sul metodo del volume di invaso, per la determinazione del coefficiente udometrico”, da L'Acqua, n°1-6, pp. 3-8.

Pancini M., 1954. “*Descrizione della diga di Pieve di Cadore ed organizzazione dei cantieri*”, da L'Energia Elettrica.

Semenza C., 1955. “*Impianto idroelettrico Piave-Boite-Maè-Vajont, criteri generali della progettazione e dell'esecuzione*”, da L'Energia Elettrica, Vol. XXXII, pag. 97.

Ghetti L., Sabbadini Q., 1956. “*Dispositivi di manovra, organi di chiusura e di sicurezza applicati ai serbatoi e alle condotte in pressione dell'Impianto Piave-Boite-Maè-Vajont*”. Da “L'impianto idroelettrico Piave-Boite-Maè-Vajont”, pp. 308-327, SADE, Ufficio Studi, Venezia.

Marzolo F. e Semenza C., 1959. “*The operation of reservoirs in connection with flood control*”, da Athens Preceedings of International Union of Conservation of Nature and Nature Resources (I.U.C.N.), Vol. 2, Pag. 225.

Marzolo F., 1959. “*Per un maggior impegno di serbatoi a scope multiple nelle sistemazioni fluviali*”. Energia Elettrica, n°4/1959, pp. 318-322.

ANIDEL, 1961. Associazione Nazionale Imprese Produttrici di Energia Elettrica (ANIDEL): “*Le dighe di ritenuta degli impianti idroelettrici italiani. Diga di Pieve di Cadore*”, Vol. 4, N°7, Pagg. 65-81.

Marone V., 1964. “*Calcolo di massima dell'effetto di laminazione di un serbatoio sulle piene*”. L'Energia Elettrica, n°10/1964, pag. 693.

Supino G., 1965. “*Le reti idrauliche*”, ed. Patron, Bologna.

²² A questo proposito si confrontino i casi di laminazione esemplificati nelle Figg. 7 e 8.

- Tonini M., 1967.** “*La piena dei fiumi veneti del novembre 1966*”. ENEL, Compartimento di Venezia, Direzione Studi e Ricerche, Servizio Idrologico.
- Supino G., 1967.** “*Il metodo del volume di invaso e la moderazione delle piene nelle reti idrografiche*”. Giornale del Genio Civile.
- Pianese D. e Rossi F., 1968.** “*Curve di possibilità di laminazione delle piene*”. Giornale del Genio Civile.
- De Marchi G. e Dorigo L., 1969.** “*L’evento alluvionale del novembre 1966. I bacini del Veneto*”. Ministero LL.PP. Commissione Interministeriale per lo Studio della Sistemazione Idraulica e della Difesa del Suolo (Art. 14 della Legge n°632 del 27 luglio 1967). Poligrafico dello Stato.
- Supino G., 1969 (I).** “*Laminazione delle piene con due serbatoi in serie*”, dal Giornale del Genio Civile, vol. 1-2, pp. 1-20.
- Supino G., 1969 (II).** “*L’idraulica fluviale dopo le alluvioni*”, L’Energia Elettrica, n° 9, pp. 597-601.
- Supino G., 1969 (III).** “*The storage volume method and the flood control in the hydraulic network*”. Accademia Nazionale dei Lincei, Quaderno n°169/1969, Roma.
- Senato della Repubblica, 1969.** Dagli atti della Commissione Parlamentare: “*Indagine conoscitiva sulla difesa del suolo*”. Verbale dell’audizione del Prof. Giulio Supino. Roma, 26 giugno 1969.
- Supino G., 1970 e 1974.** “*Sistemazione idraulica del bacino idrografico dell’Arno*”. Commissione interministeriale per lo studio della sistemazione idraulica e della difesa del suolo, Vol. I (1970) e Vol. II (1974).
- De Marchi G., 1970.** “*Commissione interministeriale per lo studio della sistemazione idraulica e della difesa del suolo*”, Vol. I, Relazione conclusiva, Roma.
- Marone V., 1971.** “*Calcolo di massima di un serbatoio di laminazione*”. L’Energia Elettrica, N° 9, pp. 561-567
- Ghetti A., 1974.** “*Commissione interministeriale per lo studio della sistemazione idraulica e della difesa del suolo*”, Vol. II P. I, “*Il bacino del fiume Livenza*”, pp. 105-162, Roma.
- Pasqualis T., 1991.** “*La diga di Ravedis sul torrente Cellina*”. Articolo pubblicato dalla rivista specializzata “*Quarry and Construction*”.
- Zin L., 1997.** “*Uomini e acque*”. Vol. II “*il Cellina*”. Consorzio di Bonifica Cellina Meduna, Pordenone 1997.
- Miotto F., Laio F. e Claps P., 2006.** “*Metodologie speditive per la valutazione dell’effetto di laminazione dei serbatoi*”. XXX Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche.
- Autorità di Bacino dei fiumi Isonzo, Tagliamento, Livenza, Piave e Brenta-Bacchiglione, 2008.** “*Piano stralcio per la sicurezza idraulica del fiume Livenza. Sottobacino Cellina-Meduna*”. Relazione generale, Venezia 2008.
- Autorità di Bacino dei fiumi Isonzo, Tagliamento, Livenza, Piave e Brenta-Bacchiglione, 2008.** “*Bacino del fiume Piave, piano stralcio per la sicurezza idraulica del medio e basso corso*”, Roma dicembre 2008.
- Pinamonti P., 2008.** “*Con l’acqua del Cellina*”. Comune di monte reale V. e Università di Udine, Ed. Forum, Cormons (GO).
- Susin G.M., 2017.** “*Le criticità nei serbatoi idroelettrici con funzioni di controllo delle piene. Il caso del serbatoio di Pieve di Cadore, del sistema nord-est del Piave*”. L’Acqua, n°1/2017, pp. 65-76.
- Pianese D., Covelli C. e Cozzolino L., 2015.** “*About the Italian Method of the Volume di Invaso*”; conference paper 2012, da Research Gate: <https://researchgate.net/publication/275347614>
- D’Alpaos L., 2016.** “*Un giorno, ospite inatteso, arrivò l’alluvione. Ricordi di un ingegnere su una battaglia perduta, 1966-2016*”, istituto Veneto di Scienze, Lettere ed Arti.
- Da Deppo L., 2016.** “*L’alluvione del 3-4 novembre 1966 nelle Tre Venezie. Considerazioni (malinconiche) dopo 50 anni*”, da L’Acqua, n°4-5/2016, pp. 9-50.