

SULL'ONDA DI PIENA CHE SEGUIREBBE AL CROLLO DELLA DIGA DI CANCANO

PROVE SU MODELLO PER IL TRONCO FLUVIALE DALLA DIGA A PONTE CEPINA — CALCOLO PER IL TRONCO DA PONTE CEPINA A TIRANO

(L'Energia Elettrica, Vol. XXII, agosto-settembre-ottobre 1945)

Premesse.

Rende conto il presente studio di una indagine compiuta due anni addietro al fine di determinare le presumibili caratteristiche dell'onda di piena che percorrerebbe l'alta valle dell'Adda, fino a Tirano, nella eventualità di un crollo della diga di Cancano.

È noto che ogni determinazione di tal genere, comunque condotta, comporta incertezze sostanziali e arbitrarietà inevitabili, per quanto non tutte evidenti nè tutte adeguatamente considerate nei calcoli che sono stati condotti in passato con analogo scopo. E invero, durante il passaggio dell'onda vanno sommerse zone più o meno estese dei terreni latitanti, che sono di regola coperte di vegetazione. Arduo è tradurne in cifre il comportamento idraulico, come è praticamente impossibile di applicare le equazioni consuete dell'Idraulica al fondo sempre irregolare, talora irregolarissimo delle vallate montane, e tanto meno a tronchi ripidi, con fianchi dirupati, come quello fra la diga e Bormio. Il passaggio della imponente massa liquida, animata da velocità elevatissima, provocherebbe inoltre inevitabilmente erosioni e frane in taluni tronchi, depositi in altri: fatti, tutti, dei quali non si saprebbero prevedere nè la entità, nè le conseguenze idrauliche. Oltre a ciò, le modalità con le quali avverrebbe lo scarico dell'acqua sopra le rovine della diga non sono assegnabili in modo del tutto fondato. L'ipotesi comune che assimila tale scarico al semplice vuotamento di un bacino attraverso uno stramazzo, che si comporti in ogni istante secondo la legge che ne regolerebbe il funzionamento a regime, attendibile quando la breccia abbia dimensioni modeste, richiede qualche adeguata conferma prima di essere applicata a squarci imponenti come quelli prevedibili in conseguenza di offese belliche.

Lo svolgimento di qualunque calcolo comporta, d'altra parte, da un canto, delle semplificazioni sostanziali nelle equazioni che reggono il moto vario delle correnti, equazioni che occorre ridurre a soli pochissimi termini fondamentali; dall'altro, una schematizzazione

brutale delle caratteristiche geometriche dell'irregolarissimo alveo naturale, al quale devesi sostituire la successione di un numero discreto di tronchi cilindrici o prismatici, che ne ripeta, o si ritenga atta a ripeterne, le peculiarità idrauliche. Il calcolo viene, cioè, riferito ad un alveo schematizzato che si procura di rendere idraulicamente equivalente a quello naturale; e, poichè deve procedere per differenze finite, riesce lungo, laborioso, e sfugge a qualunque concreta verifica.

Per tutte queste ragioni le arbitrarietà sono inevitabili, e l'attendibilità dei risultati si riduce, fino a diventare pressochè illusoria.

Fu, quindi, esclusa la convenienza di ridurre l'indagine a un calcolo di tal genere, e fu, invece, segnalata la possibilità di conferirle una base sperimentale che ne limitasse arbitrarietà ed incertezze: e si ritenne che tale base potesse ritrarsi da prove sopra un modello in opportuna scala.

Atteso il lungo sviluppo della vallata dell'Adda, dalla diga a Tirano, sviluppo che raggiunge i 45 chilometri, la riproduzione completa della vallata stessa avrebbe reso necessario o un modello di dimensioni proibitive, oppure una scala molto piccola, con la quale le misure sarebbero riuscite disagevoli e poco precise e, ciò che conta anche di più, i fenomeni idraulici non avrebbero trovato una riproduzione sufficientemente fedele; in causa della eccessiva riduzione delle sezioni trasversali della corrente, sarebbero, infatti, resa sensibile l'influenza delle azioni di viscosità e capillarità, che non ne hanno invece alcuna sul processo reale.

D'altra parte il tronco interessato, dalla diga a Tirano, si presenta, anche ad una osservazione superficiale (fig. 1), come suddiviso in due parti distinte: dalla diga fino allo sbocco

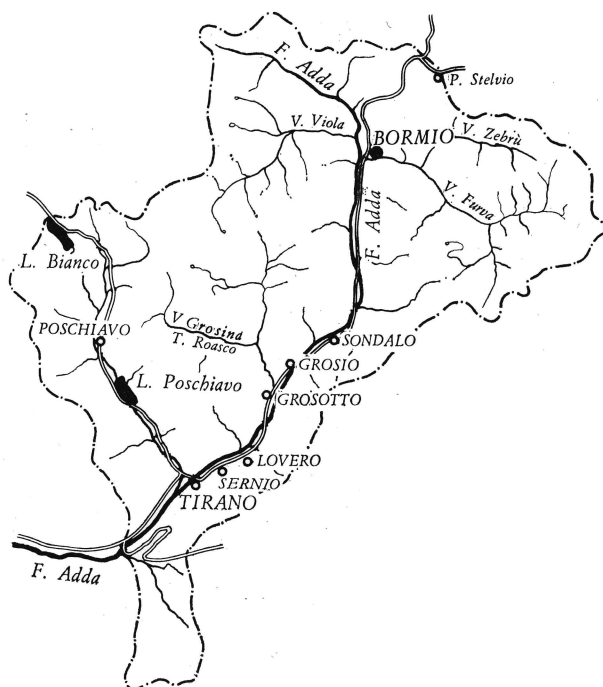


Fig. 1.

nella piana di Bormio il torrente precipita lungo un irregolarissimo alveo montano, che non sembra possa formare oggetto di alcun calcolo idraulico. Inferiormente alla piana di Bormio, la vallata assume invece una configurazione assai meno tormentata, come assai minori ne sono le pendenze; i metodi di calcolo per differenze finite potrebbero trovare

qui delle applicazioni non prive di attendibilità, purchè fossero attendibili gli elementi iniziali, cioè le caratteristiche dell'onda di piena all'uscita dalla stessa piana.

Si ritenne perciò che il modello, ove ne fosse stato deciso l'allestimento, avrebbe potuto limitarsi al solo tratto superiore della vallata, dal serbatoio incluso, fino alla piana di Bormio, del pari inclusa, e all'imbocco della susseguente vallata. Anche così limitato, esso avrebbe consentito di conseguire diversi utili risultati.

In primo luogo, avrebbe dato modo di sottoporre a facile esperimento diverse modalità di crollo dell'opera di sbarramento, dalla formazione di breccie localizzate di varie lunghezze e profondità fino alla completa asportazione del massiccio murario: eventualità, quest'ultima, che pur uscendo dal campo delle presumibili possibilità reali, poteva tuttavia essere interessante di conoscere, almeno nel significato di eventualità limite.

Sul modello, inoltre, sarebbe stato facile determinare, per ogni tipo di crollo, le zone della piana ed eventualmente dell'abitato di Bormio soggette a sommersione. Il calcolo, con le inevitabili schematizzazioni che comporta, in particolare con l'ammettere che in ogni sezione trasversale il pelo liquido si mantenga orizzontale, non sarebbe stato atto a fornire delle indicazioni attendibili a questo riguardo.

Ma, soprattutto, le prove sul modello avrebbero dato il modo di far partire il calcolo della propagazione dell'onda di piena lungo la vallata, fino a Tirano, da un diagramma sperimentale dell'onda medesima all'imbocco della valle, anzichè dai risultati di dubbie calcolazioni svolte per il tronco a monte.

Con mia viva soddisfazione il direttore dell'Azienda Elettrica Municipale milanese, ing. Mario CATTANEO, che qui mi è gradito ringraziare, accettò la mia proposta, e dispose per la diretta costruzione del modello per parte della stessa A.E.M. Nella realtà, oltre al conseguimento degli scopi anzidetti, il modello offerse anche il modo di valutare sperimentalmente l'entità numerica, sia pure nell'ordine medio di grandezza, del termine d'invaso, che compare nella equazione posta a base del calcolo per differenze finite. Il calcolo stesso poté quindi essere appoggiato a valori aventi una base sperimentale, anzichè ad assunzioni che, per quanto ragionevolmente fatte, sarebbero state però sempre arbitrarie nella sostanza.

Nel suo insieme l'indagine venne così a risultare suddivisa in due parti, vale a dire:

a) parte essenzialmente sperimentale, comprendente l'allestimento della installazione sperimentale e la esecuzione delle prove, per il tronco superiore della valle, dal serbatoio fino alla località di Ponte Cepina, allo sbocco dalla piana di Bormio;

b) calcolo analitico-grafico per differenze finite della propagazione dell'onda a valle di Ponte Cepina, prendendo le mosse dalle caratteristiche dell'onda medesima, rilevate sperimentalmente in tale sezione. Questo calcolo, in realtà, fu poi fermato, come diremo, qualche chilometro a monte di Tirano, all'inizio dell'arginatura.

Le prove sul modello sono state eseguite dall'ing. Aldo MARCHETTI, il quale ha collaborato anche allo sviluppo del calcolo, e a tutta l'indagine svolta.

PARTE I

INDAGINE SPERIMENTALE

1. - Modello e prove su di esso eseguite.

Come già detto, il modello è stato allestito e montato in opera nel Laboratorio del Politecnico Milanese, a cura dell'Azienda Elettrica Municipale.

Si è per esso adottata la scala di riduzione $\lambda = l : L = 1 : 500$, alla quale corrispondono i seguenti altri rapporti di riduzione, per le velocità e per i tempi:

$$v : V = t : T = \sqrt{\lambda} = 1 : 22,4,$$

e per le portate:

$$q : Q = \lambda^{5/2} = 1 : 5,6 \cdot 10^6.$$

Il modello (fig. 2) riproduce il fondo della vallata, dal serbatoio incluso (salvo la estremità verso monte, della quale venne riprodotto solo il volume, non l'esatta configurazione) fino a Ponte Cepina, e le gronde fino a 50 m almeno sopra il fondo del torrente.



Fig. 2. - Il modello visto da valle.

Esso è stato realizzato in calcestruzzo di cemento; ne fu resa artificialmente scabra la superficie, con l'intendimento di riprodurre la naturale scabrezza del suolo coperto dalla vegetazione, o della nuda roccia onde l'alveo è prevalentemente costituito nel tratto più propriamente alpino, sopra Bormio.

Il modello fu ultimato e montato nel luglio 1943; e su di esso vennero subito eseguite alcune determinazioni preliminari. Le prove dovettero poi essere temporaneamente sospese nel periodo delle rovinose incursioni dell'agosto 1943, in conseguenza delle quali il Laboratorio subì qualche danno: e non poterono essere riprese se non verso la fine di settembre.

Si provvide allora a predisporre l'esatto rilievo dell'onda all'imbocco della vallata, sotto Bormio, cioè al termine del modello (sezione 3 della fig. 3), mediante la determinazione dei diagrammi delle portate istantanee e dei corrispondenti livelli nella sezione di Ponte Cepina. Dei due diagrammi soltanto il primo venne in realtà impiegato, come diremo, per il calcolo della successiva propagazione dell'onda fino a Tirano.

In un secondo tempo si procedette anche al rilievo dell'onda in due altre sezioni a monte della precedente, l'una disposta sotto Premadio, allo sbocco del fiume nella piana di Bormio (sezione distinta col numero 23 nel modello), l'altra immediatamente a valle della diga; le posizioni delle tre sezioni appaiono dallo schema della fig. 3.

I due diagrammi delle portate alla diga e sotto Premadio dovevano servire, come effettivamente servirono, a dare la misura della deformazione subita dall'onda, e particolarmente della attenuazione del colmo, lungo il tronco montano e in conseguenza del-

l'attraversamento della piana. Inoltre, dal confronto tra il diagramma rilevato sperimentalmente a Ponte Cepina e quello stabilito per la stessa località applicando invece il procedimento per differenze finite a partire dal diagramma rilevato sotto Premadio, si trasse il valore da assegnare al coefficiente correttivo dell'invaso, come si spiegherà più avanti.

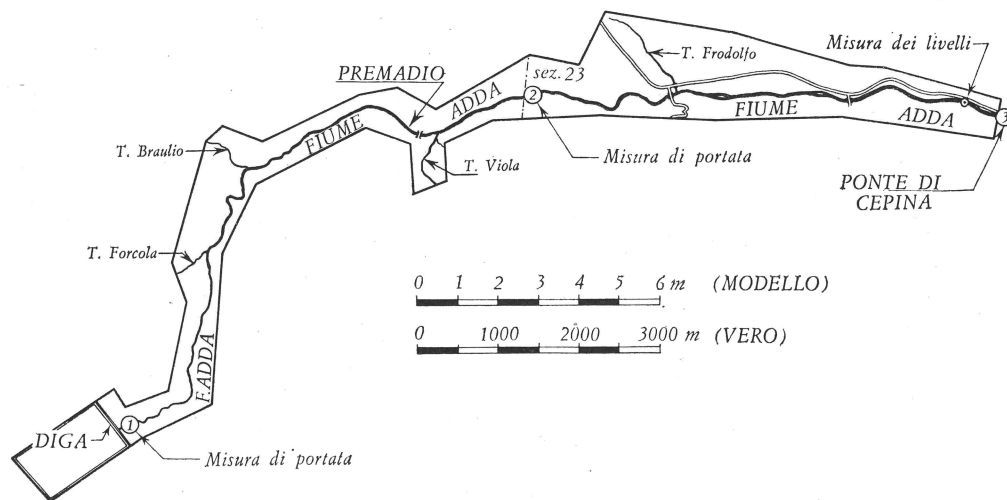


Fig. 3. - Pianta schematica del modello con indicazione delle sezioni di misura.

Per quanto riguarda la effettiva esecuzione dei vari rilievi, diremo che per i diagrammi delle portate si è prescelto — dopo qualche tentativo condotto secondo direttive diverse — il procedimento di ricavarli da quelli di riempimento di una vasca appositamente tarata. Il dispositivo si vede chiaramente nella fotografia della fig. 2, ove in primo piano sono riprodotti la vasca entro la quale veniva condotta a scaricare la corrente da misurare, e l'apparato registratore, azionato da apposito galleggiante. Le registrazioni avvenivano direttamente in scala naturale; l'ampia sezione orizzontale del galleggiante conferiva all'apparato una buona sensibilità, certo sufficiente in relazione alla lentezza delle variazioni del livello. L'escursione massima nella vasca non superava i 25 cm, e alla portata di 1 l/s (pari a 5600 m³/s nell'originale) corrispondeva la escursione di circa 2 millimetri al secondo. Al fine, poi, di attenuare l'urto iniziale ed evitare ogni formazione d'onda sullo specchio liquido entro la vasca, l'immissione della corrente avveniva in forma di pioggia, ottenuta grazie alla interposizione di una rete metallica.

Per ottenere la registrazione delle portate nella sezione di Ponte Cepina, posta al termine del modello, bastò immettere nella vasca le portate scaricate dal modello medesimo: per quella nelle due altre sezioni (sotto Premadio e a valle della diga) si provvide di volta in volta ad aprire nel fondo cementizio del modello e trasversalmente all'alveo fluviale, una fessura attraverso la quale la corrente cadesse nella vasca tarata che veniva di volta in volta collocata in posizione opportuna per raccoglierla.

In un primo tempo si era pensato di poter registrare anche i livelli liquidi in una sezione circa 1 m a monte di Ponte Cepina, dove la corrente è raccolta fra sponde poco discoste; a tal uopo si era installato un registratore con il galleggiante collocato in apposita vasca, comunicante con il fondo fluviale di quella sezione a mezzo di ampio condotto (facente capo nella posizione indicata in fig. 3 ad una lamina forata, che assicurava la continuità del fondo medesimo). Senonchè si constatò che le vicende del livello nella vasca non corrispondevano a quelle del pelo liquido nel fiume, e che il sistema di registrazione a galleggiante non era sufficientemente sensibile in relazione alla rapidità e alla limitata entità delle variazioni del livello (3 cm nelle prove di crollo parziale, 8 cm al massimo in quelle di crollo

completo della diga). In mancanza di mezzi più idonei, i diagrammi delle altezze a monte di Ponte Cepina dovettero essere ricavati per letture dirette a una asta graduata, che venivano ripetute con la maggior frequenza possibile, praticamente di 5 in 5 secondi, da una coppia di operatori, l'uno dei quali dava i tempi, mentre l'altro leggeva i livelli e ne prendeva nota.

I diagrammi delle portate istantanee vennero dedotti mediante semplice derivazione grafica da quelli di riempimento della vasca tarata, forniti dal registratore. In generale, però, ogni prova di crollo, parziale o totale, fu ripetuta più volte, riproducendo ogni volta alla diga lo stesso evento; i corrispondenti diagrammi dei livelli nella vasca risultarono sempre abbastanza concordi fra loro, come appare dalla fig. 4, che riproduce quelli ottenuti per una

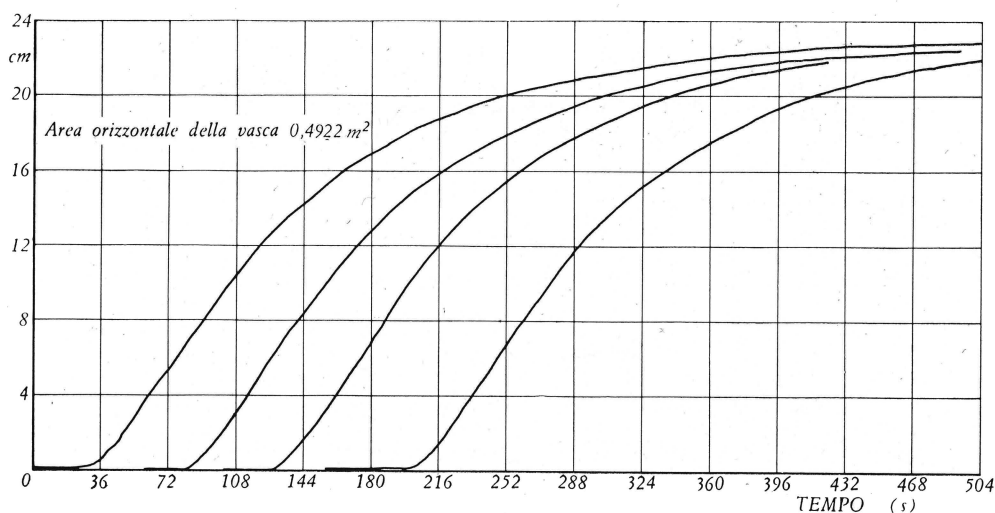


Fig. 4. - Esempi di diagrammi di riempimento della vasca tarata.

prova di rottura parziale. La derivazione grafica di ognuno di essi fornì pure diagrammi abbastanza concordi delle portate istantanee; nella fig. 5 le spezzate stanno a indicare quelli ottenuti per la sezione di Ponte Cepina da quattro prove successive di crollo parziale (mentre la curva continua rappresenta il diagramma medio, convenientemente regolarizzato).

Nel corso di talune fra le prove ora dette, o in prove speciali, vennero inoltre misurati i tempi impiegati dalla testa dell'onda⁽¹⁾ a raggiungere successivamente le varie sezioni di misura, da quella prossima alla diga, a quella presso Ponte Cepina. Si ebbe così il modo di collegare fra loro nel tempo i diagrammi delle portate raccolti per le sezioni stesse.

Ci interessa precisare, ai fini del confronto con i risultati del calcolo, che la misura dei tempi di avanzamento si riferiva al passaggio della testa dell'onda, testa che costituiva la manifestazione istantanea più chiaramente individuabile dell'onda medesima nel modello. Non altrettanto facile sarebbe stata l'individuazione diretta del colmo, che durava in ogni sezione per un intervallo di tempo piuttosto lungo e doveva essere dedotto dai diagrammi. È da notare però che, nell'attraversamento della grande varice costituita dalla piana di Bormio, soggetta a sommersione per parte delle acque esondanti, la testa dell'onda, avanzando lungo l'alveo del torrente, accelerava rispetto a queste acque; la sua celerità risultava perciò superiore a quella media del fronte dell'onda, media che sola compare nei calcoli.

⁽¹⁾ Per chiarezza, e in analogia alla distinzione oramai consueta in questo campo, abbiamo chiamato *fronte dell'onda* la parte iniziale di essa, fino al colmo (massimo di portata, che nelle condizioni considerate risulta, almeno praticamente, contemporaneo in ogni sezione col massimo di profondità), e *corpo* dell'onda la parte susseguente, molto più lunga, fino all'esaurimento. *Testa* dell'onda abbiamo chiamato, infine, il primo inizio del fronte.

Ultimo rilievo condotto sul modello fu quello inteso alla delimitazione della zona soggetta a sommersione durante il passaggio dell'onda di piena, per ognuna delle modalità di crollo considerate. La zona stessa, nel modello, risultava posta in chiara evidenza dalla tinta più scura che assumeva a manteneva per qualche tempo la superficie cementizia, per tutte le parti che l'acqua aveva temporaneamente raggiunto e inumidito (fig. 6).

2. - Modalità esecutive e risultati delle prove.

D'accordo con il direttore dell'A.E.M. ing. CATTANEO, l'attenzione fu soprattutto fissata sopra il caso di crollo parziale della diga, che provocasse l'apertura di una breccia nell'opera muraria di dimensioni paragonabili alle maggiori verificate nelle dighe tedesche che qualche mese innanzi all'inizio della ricerca erano state colpite da offesa aerea e parzialmente demolite. Si ammise, quindi, che la breccia fosse dovuta alla asportazione di un tratto della cresta della diga lungo 60 m, e fino alla profondità di 20 m sotto il livello di massimo invaso. A questa profondità, importa notare, lo spessore orizzontale del massiccio murario è già dell'ordine di 14 metri.

Le prove sono state condotte ammettendo che la massa muraria sovrastante venisse

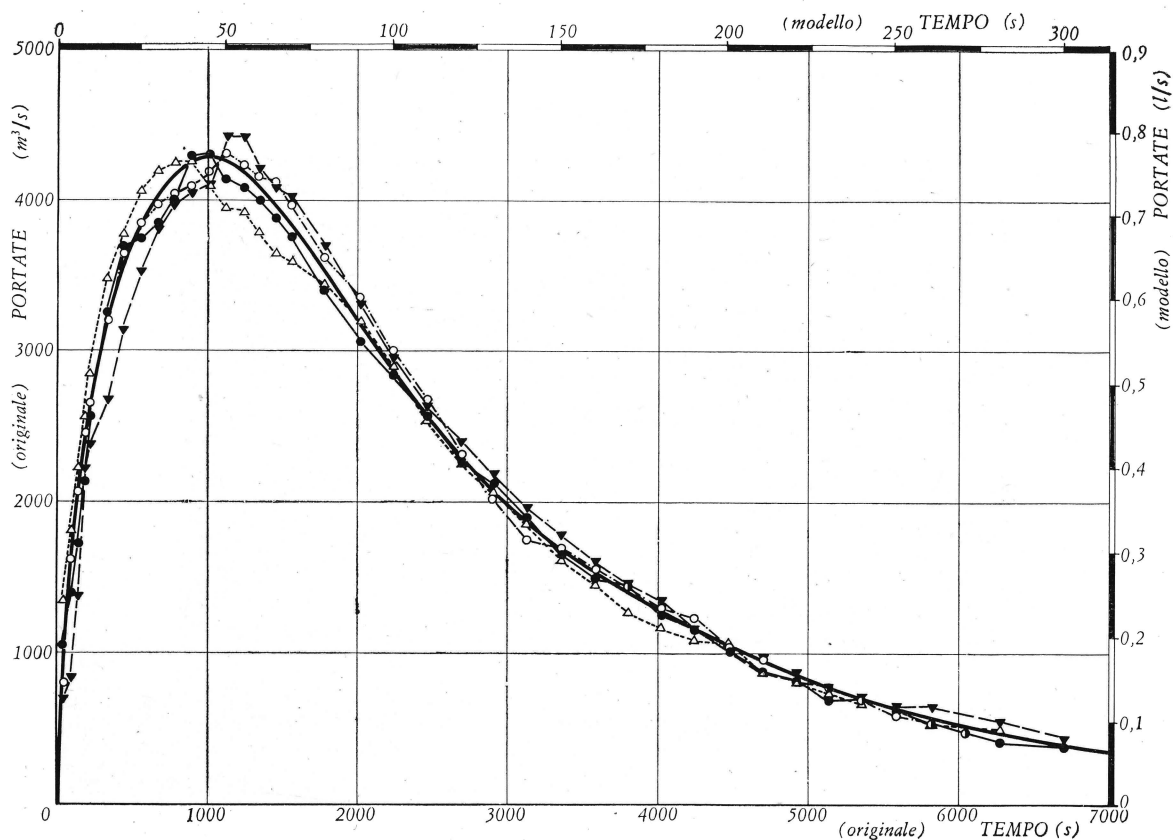


Fig. 5. - Diagrammi della portata in funzione del tempo a P. Cepina ricavati per derivazione grafica dai diagrammi di riempimento (caso di crollo parziale con breccia di 60 × 20 m).

istantaneamente e totalmente asportata; nella realtà l'apertura della breccia, per quanto rapida, richiederebbe sempre un certo tempo. La breccia fu preventivamente preparata, nel modello dell'opera di sbarramento (una semplice tavola trasversale), e quindi fu chiusa con un tappo di legno, che veniva tolto molto rapidamente al momento della prova.

L'onda conseguente formò oggetto di tutti i rilievi che abbiamo descritto.

Ma, oltre alla eventualità del crollo parziale, fu considerata, come già detto, anche quella di una istantanea e completa asportazione dell'intero massiccio murario, che liberasse totalmente l'alveo del torrente. Come notato sopra, siffatta eventualità esce dal campo dei fatti da ritenere praticamente verificabili, anche nelle ipotesi più pessimistiche. Abbiamo ritenuto di esaminarla, al fine di ritrarne la delimitazione della massima estensione che, in circostanze assolutamente catastrofiche, potrebbe raggiungere la zona soggetta a sommersione nella piana di Bormio. Le località non incluse in tale zona sono in modo assoluto al riparo da qualunque pericolo.

I risultati ottenuti dalle prove sono posti in evidenza dalle serie delle figg. 4, 5, già citate, e dalla fig. 7 (linee grosse).

La fig. 4 fornisce esempi dei diagrammi di riempimento della vasca tarata, raccolti dall'apparato registratore.

Nella fig. 5 sono raccolti i diagrammi sperimentali della portata in funzione del tempo rilevati nella sezione di Ponte Cepina per il caso di apertura istantanea della breccia di 60×20 m nel corpo della diga. Questa prova fu ripetuta quattro volte, e dai quattro diagrammi di riempimento della vasca tarata si ricavarono per derivazione grafica quelli che sono riprodotti in figura con linee spezzate sottili; ad essi è stato sovrapposto, con linea continua più grossa, il diagramma opportunamente regolarizzato delle medie aritmetiche di ogni quaterna di portate per uno stesso istante, diagramma che fu assunto a rappresentare le vicende della portata durante il passaggio dell'onda attraverso la sezione di Ponte Cepina e, come tale, introdotto nel calcolo della successiva propagazione a valle.

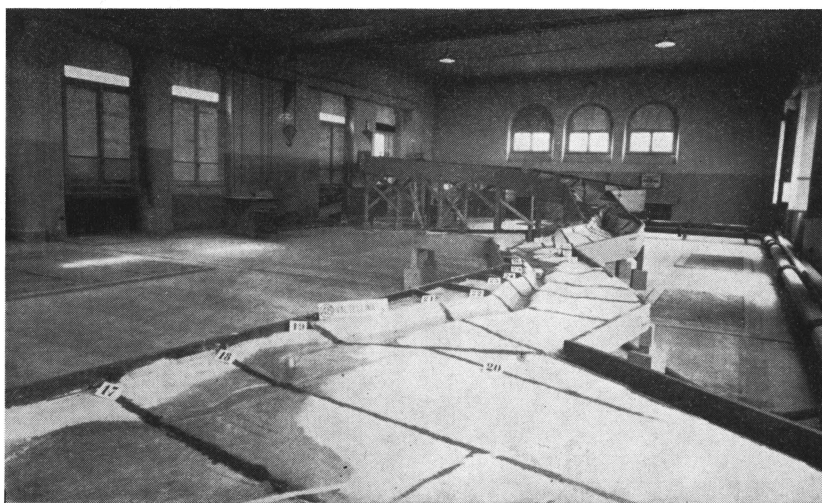


Fig. 6. - Veduta parziale del modello (dalla piana di Bormio) immediatamente dopo il passaggio dell'onda di piena conseguente alla rottura parziale della diga (breccia di 60×20 m).

Nella fig. 7 le tre curve tracciate con linee grosse rappresentano i diagrammi delle portate istantanee alle tre sezioni indicate — subito a valle della diga, sotto Premadio, di Ponte Cepina — come rilevati durante il passaggio dell'onda conseguente all'apertura della breccia di 60×20 m. Per chiarezza vi sono indicate ambedue le scale, del modello e dell'originale.

La figura dà luogo a diverse interessanti constatazioni. In primo luogo, il diagramma delle portate subito a valle della diga ha l'andamento asintotico rispetto all'asse dei tempi, che è tipico delle curve di vuotamento attraverso stramazzo. Il massimo cade nell'origine stessa dei tempi, risultando, almeno praticamente, contemporaneo alla apertura della breccia.

Il suo valore è risultato di $9400 \text{ m}^3/\text{s}$ circa: notiamo però che la derivazione grafica dei diagrammi di riempimento ammette qualche inevitabile incertezza, che si rende più sensibile all'inizio, dove i diagrammi stessi sono meno regolari in conseguenza dell'avviamento del galleggiante e dell'apparato registratore.

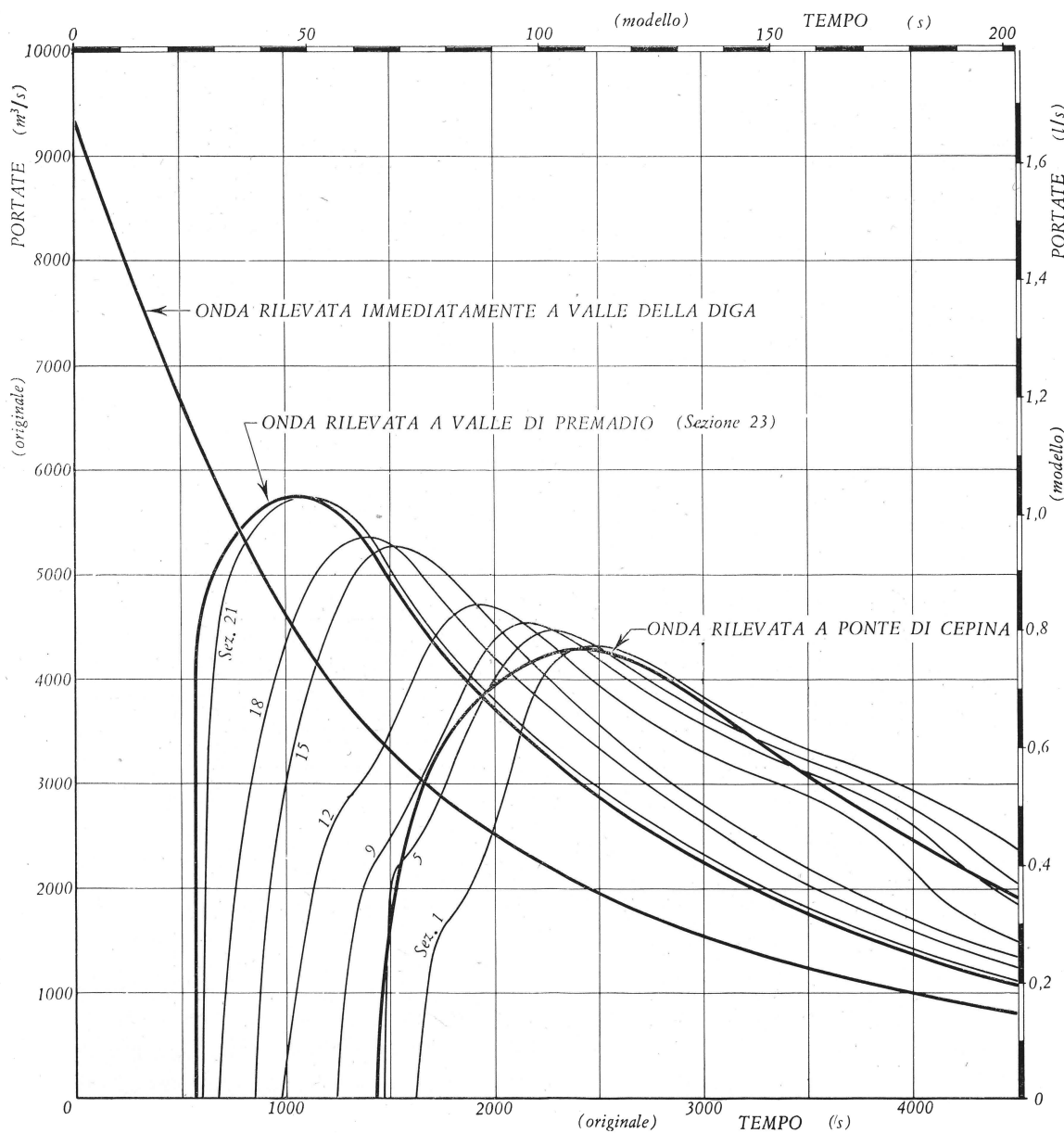


Fig. 7. - Onda conseguente al crollo parziale con breccia di $60 \times 20 \text{ m}$. - Diagrammi sperimentali delle portate subito a valle della diga, sotto Premadio (sez. 23) e a P. Cepina.

Alla sezione 23, sotto Premadio, la testa dell'onda arriva dopo 550 secondi (velocità media di avanzamento poco meno di 15 m/s) e la portata di colmo risulta ridotta già a meno di due terzi del valore precedente, cioè a $5700 \text{ m}^3/\text{s}$. Il colmo segue la testa col ritardo di 500 s , di modo che la sua celerità media risulta dell'ordine di 8 m/s .

L'attraversamento della varice di Bormio è lento, la testa dell'onda vi impiega 850 s , onde la sua celerità media risulta dell'ordine di $6,3 \text{ m/s}$ soltanto; una ulteriore depressione

subisce la portata di colmo, che si riduce a $4300 \text{ m}^3/\text{s}$, cioè a meno della metà del valore iniziale, mentre presenta un allungamento marcato il fronte dell'onda. Il tempo che intercorre fra l'arrivo della testa e il passaggio del colmo nella sezione di Ponte Cepina sale infatti a 1000 secondi: fra Premadio e Ponte Cepina la velocità media di avanzamento del colmo si riduce quindi a $3,8 \text{ m/s}$ soltanto. A Ponte Cepina il colmo è raggiunto 2400 s dopo il crollo.

Per la sezione indicata in fig. 3, situata circa 500 m a monte di Ponte Cepina, è stato rilevato per punti, mediante lettura diretta, anche il diagramma dei livelli durante il passaggio dell'onda. Tale diagramma si vede riprodotto nella fig. 8, nella quale è riportato dalla fig. 5 anche il diagramma delle portate in funzione del tempo. Dai due è stato dedotto, facendo i rapporti fra i valori contemporanei delle portate e delle aree bagnate nella sezione dell'idrometro, il diagramma delle velocità medie dell'acqua, pure riportato nella fig. 8.

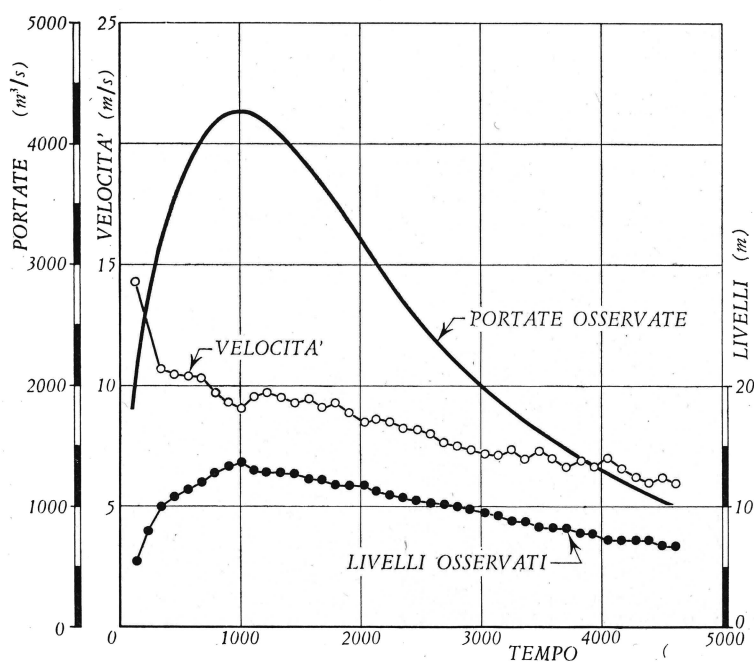


Fig. 8. - Crollo parziale con breccia di $60 \times 20 \text{ m}$. - Diagrammi dei livelli liquidi e della velocità media dell'acqua a P. Cepina durante il passaggio dell'onda.

Attesi i limitatissimi valori delle profondità di acqua nel modello (al massimo $2,7 \text{ cm}$), l'esattezza delle letture di livello non poteva essere molto grande; delle velocità occorre accettare quindi essenzialmente gli ordini di grandezza, avendo presente che per le profondità dell'ordine del centimetro le azioni di capillarità bastavano presumibilmente a falsare le letture del 15-20%, in meno.

Dalla fig. 8 appare che i due diagrammi, delle portate e dei livelli, hanno colmi affatto contemporanei. Questo dimostra che — come si è ammesso nei calcoli esposti nella parte II — le variazioni della pendenza superficiale durante il passaggio dell'onda non hanno ripercussioni apprezzabili sul movimento attraverso la sezione. Tali ripercussioni, infatti, qualora sussistessero, si paleserebbero con l'anticipo del colmo di portata rispetto a quello di livello.

Il diagramma sperimentale delle velocità dell'acqua risulta invece tutto decrescente, da un massimo iniziale dell'ordine di 15 m/s , fino a circa 9 m/s in corrispondenza dei colmi contemporanei, di portata e di livello, e a valori dell'ordine di 6 m/s circa un'ora dopo il

passaggio di tali colmi. I valori elevatissimi della velocità nei primi istanti possono in parte essere conseguenza di lettura inesatta del livello, rapidamente variabile e, in quegli istanti, soggetto all'azione ritardatrice della capillarità. Sta però il fatto che, se anche l'errore si ritenesse del 20% (in meno nei livelli, e quindi in più nelle velocità), le velocità risulterebbero sempre nettamente superiori ai 10 m/s, e assai più elevate, quindi, di quelle verificate durante il passaggio del colmo.

La fig. 9 riproduce i tre diagrammi delle portate in funzione del tempo raccolti nelle tre sezioni di misura, per il caso di crollo e asportazione totale del massiccio murario. Come

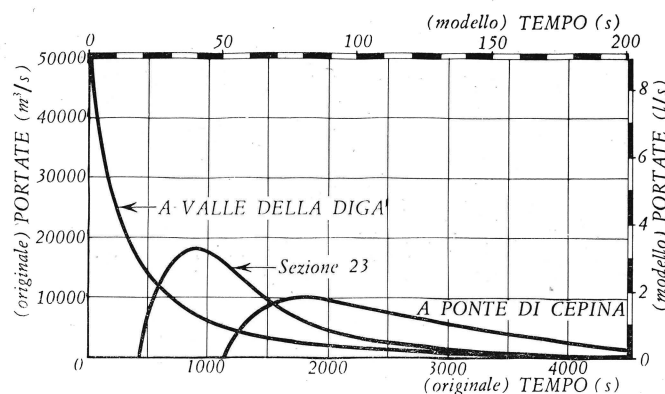


Fig. 9. - Crollo dell'intera diga. - Diagrammi sperimentali della portata subito a valle della diga, sotto Premadio (sez. 23) e a P. Cepina.

era facilmente prevedibile, le portate raggiungono valori ben più imponenti: da un massimo iniziale superiore ai 50.000 m³/s subito a valle della diga, a un colmo di circa 18.000 m³/s alla sezione 23, a uno di 10.000 m³/s a Ponte Cepina. All'aumento dei massimi corrisponde una maggiore celerità dell'onda, la cui testa impiega solo 430 s a raggiungere la sez. 23 (velocità di avanzamento circa 19 m/s) e 1140 s a raggiungere Ponte Cepina (celerità media nel percorso attraverso la piana 7,6 m/s). I colmi seguono il crollo col ritardo di 860 s nella sezione 23, di 1800 s a Ponte Cepina.

Nella planimetria della fig. 10 si vedono delimitate, infine, le zone che nell'una e nell'altra eventualità sarebbero raggiunte e sommerse dalle acque fra Premadio e Ponte Cepina.

PARTE II

CALCOLO DELLA PROPAGAZIONE DELL'ONDA DA PONTE CEPINA A TIRANO

1. - Concetto informatore.

Il concetto informatore del calcolo è sostanzialmente quello che fu a suo tempo indicato dal FANTOLI nella memoria « Sul passaggio dell'onda di piena nella supposta rotta di un serbatoio » (*Annali delle Acque Pubbliche*, 1925).

Esso, ricordiamo, presuppone che in ogni sezione si mantenga applicabile, durante il passaggio dell'onda, la stessa equazione che reggerebbe il *moto uniforme* (profilo liquido

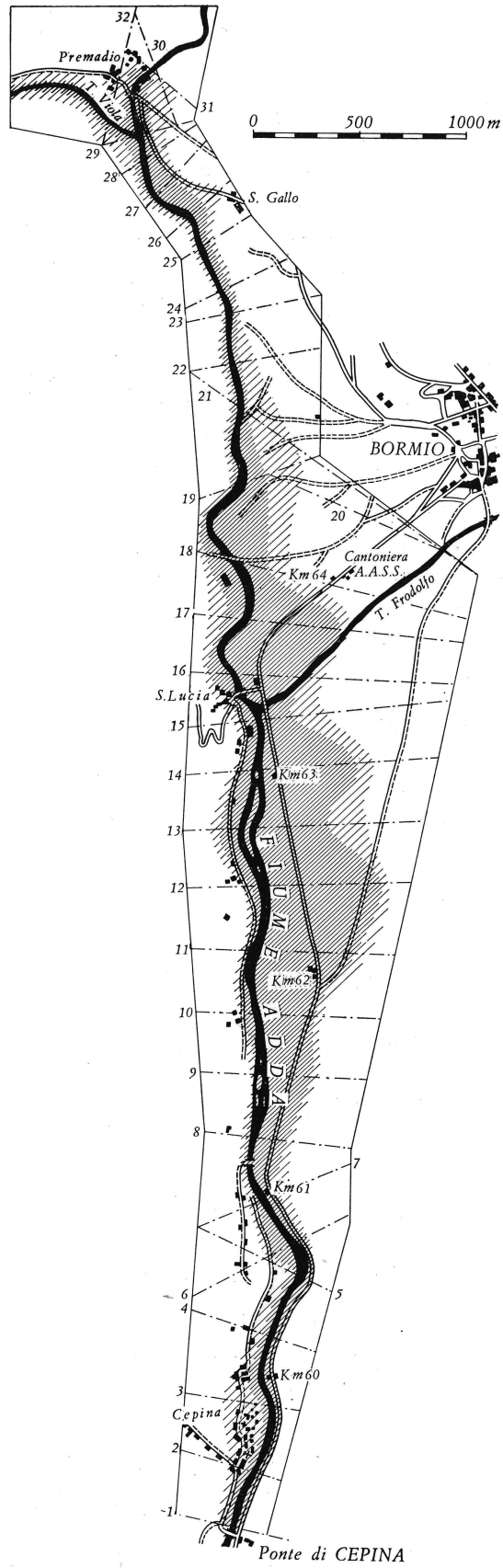


Fig. 10. - Zone soggette a sommersione nella piana di Bormio in caso di crollo parziale con breccia di 60×20 m e in caso di crollo totale della diga.

parallelo al fondo) in un canale prismatico o cilindrico indefinito di pari sezione e con pendenza uguale a quella, che indicheremo genericamente con i , ivi presentata dall'alveo. Si ritiene così che, rispetto alla detta pendenza i , risultino trascurabili sia la $\partial h/\partial s$, che mette in conto la variazione longitudinale della profondità h della corrente, sia i termini d'inerzia (locale $(1/g)\partial V/\partial t$ e convettiva $(1/2g)\partial V^2/\partial s$).

Nel tronco fluviale che formò oggetto di calcolo (dalla sezione 23, sotto Premadio, fino all'inizio dell'arginatura, prima di Tirano), la pendenza del fondo è generalmente compresa fra il 2% e il 3%, riducendosi solo per qualche breve tratto a valori dell'ordine dell'1%. In tali condizioni era certo ammissibile trascurare i tre termini anzidetti per il *colmo* e per il *corpo* dell'onda, in corrispondenza dei quali si verificano le maggiori portate e i livelli più elevati, e più vaste diventano le estensioni sommerse. Poteva invece riuscire discutibile l'opportunità di farlo nei rapporti della *testa*, il cui avanzamento comporta variazioni particolarmente rapide della velocità e della profondità: ma questa fase non riveste un particolare interesse in rapporto allo scopo pratico dell'indagine, che era quello di fornire indicazioni sopra i più elevati livelli raggiungibili dal pelo liquido nelle varie sezioni durante il passaggio dell'onda.

Trascurati i termini anzidetti, il processo del movimento risulta definito dalla equazione del moto uniforme e da quella della continuità.

La prima fornisce, per ogni sezione, con ovvio significato dei simboli:

$$q = \chi \sigma \sqrt{R i}, \quad (1)$$

dove χ , coefficiente di Chézy, σ , area della sezione bagnata ed R , raggio medio, sono altrettante funzioni della profondità h . Ritenerne la (1) valevole anche per le condizioni di moto vario significa, notiamo, ammettere che sezione bagnata, velocità e portata varino di conserva, e quindi che i loro massimi si verifichino tutti nello stesso istante per ogni sezione.

L'equazione della continuità traduce il fatto che il volume liquido entrato attraverso la sezione iniziale di un generico tronco durante un generico intervallo di tempo Δt deve corrispondere alla somma del volume uscito durante lo stesso intervallo attraverso la sezione terminale del tronco e della variazione ΔW contemporaneamente intervenuta nel volume W invasato fra le due sezioni. Abbiamo ammesso che l'invaso W sia in ogni istante determinato dal valore dell'area bagnata σ_2 nella sezione terminale ⁽²⁾, e possa essere espresso

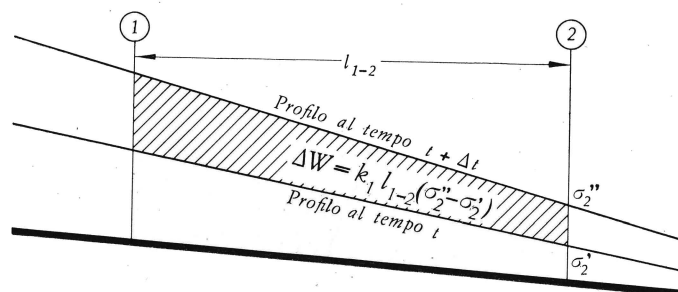


Fig. 11.

dal prodotto $lk\sigma_2$ della lunghezza l del tronco per l'area bagnata σ_2 di questa sezione, moltiplicata per un fattore maggiorativo k , significato e valore del quale specificheremo più avanti. Distinti allora con l'indice 1 (v. fig. 11) gli elementi relativi alla sezione iniziale

⁽²⁾ Riteniamo, per quanto la memoria ricordata sopra non contenga una esplicita indicazione in questo senso, che tale sia anche stato il procedimento seguito dal FANTOLI, il quale ad esso si era già attenuto nel notissimo suo metodo per la verifica delle reti di fognatura. L'ipotesi, in ogni modo, è certamente attendibile quando l'onda è in fase di decrescenza nella sezione iniziale del tronco, o in ambedue le sezioni, iniziale e finale di esso; lo è meno quando l'onda è in fase ascendente nelle due sezioni. Non è attendibile, e può essere accettata solo in mancanza di meglio, per il periodo iniziale, durante il quale la testa dell'onda percorre il tronco e non ha ancora raggiunto la sezione finale di esso.

del tronco, con l'indice 2 quelli relativi alla sezione finale, con gli apici ' e '' i valori relativi rispettivamente all'inizio e alla fine dell'intervallo Δt , cioè agli istanti t e $t + \Delta t$, il volume liquido entrato nel tronco di lunghezza l_{12} limitato fra le due sezioni 1 e 2 durante Δt è approssimativamente espresso da $(q'_1 + q''_1) \Delta t/2$, e la condizione di continuità fornisce:

$$\frac{1}{2} (q'_1 + q''_1) \Delta t = \frac{1}{2} (q'_2 + q''_2) \Delta t + kl_{12} (\sigma''_2 - \sigma'_2), \quad (2)$$

ove le σ e le q sono per ogni sezione funzioni note della profondità h , le q essendo definite dalla equazione (1) del moto uniforme.

Date le caratteristiche dell'onda nella sezione iniziale del tronco, cioè, assegnato il diagramma $q_1(t)$ delle q_1 in funzione del tempo, la precedente consente di stabilire il diagramma $q_2(t)$ delle q_2 , pure in funzione del tempo, cioè di determinare le caratteristiche dell'onda nella sezione terminale. La determinazione si conduce per punti, come segue: fissato l'intervallo Δt , dal diagramma $q_1(t)$ si deducono i valori q'_1 e q''_1 che spettano alla portata entrante all'inizio t e alla fine $t + \Delta t$ dell'intervallo. Ammesso, quindi, di conoscere i valori q'_2 e σ'_2 della portata uscente attraverso la sezione terminale del tronco e della relativa area bagnata per l'istante t , iniziale di Δt , la (2) fornisce:

$$\frac{1}{2} q''_2 \Delta t + kl_{12} \sigma''_2 = \left[\frac{1}{2} (q'_1 + q''_1) - \frac{1}{2} q'_2 \right] \Delta t + kl_{12} \sigma'_2,$$

dove il secondo membro è completamente noto. Nel primo membro i valori q''_2 e σ''_2 sono ambedue incogniti, ma fra loro legati dalla equazione del moto uniforme: essi possono essere determinati o procedendo per tentativi, come ha fatto FANTOLI, oppure, come abbiamo preferito fare noi, ed è senza dubbio più rapido, tracciando preliminarmente la curva ausiliaria dei valori:

$$q_2 + 2 \frac{kl_{12} \sigma_2}{\Delta t} = \sigma_2 \left[\chi_2 \sqrt{R_2 i_2} + 2 \frac{kl_{12}}{\Delta t} \right],$$

in funzione della profondità h_2 .

Ad agevolare e nel contempo a rendere più sollecito lo svolgimento del calcolo sarebbe naturalmente convenuto di poter adottare per ogni sezione un solo valore dell'intervallo Δt , e quindi una sola curva ausiliaria valevole per tutte le portate q_2 . E infatti nei primi calcoli istituiti si era scelto Δt costante e uguale a 100 secondi: si riconobbe però che, per la fase di decrescenza, caratterizzata da variazioni graduali della portata col tempo, tale intervallo era troppo breve, e poteva senza danno, anzi con forte risparmio di tempo essere elevato a 500s.

Così, nei calcoli definitivi furono predisposte due curve ausiliarie per ogni sezione, ma il tracciamento di quella con $\Delta t = 500s$ fu limitato ai valori della portata inferiori ai due terzi circa del colmo.

Veniamo ora al fattore maggiorativo degli invasi, indicato col simbolo k . È chiaro che all'istante $t + \Delta t$, cioè al termine dell'intervallo Δt , l'invaso entro il tronco lungo l_{12} risulterebbe rappresentato dal prodotto $l_{12} \sigma_2$, σ_2 essendo l'area della sezione bagnata terminale nel detto istante, soltanto se il tronco avesse forma cilindrica o prismatica, e il pelo liquido vi fosse parallelo al fondo. La sostituzione di una successione di siffatti tronchi prismatici discontinui all'alveo reale non avrebbe, d'altronde, pratiche ripercussioni sui risultati, rientrando le conseguenti inesattezze fra quelle inevitabili nei procedimenti per diffe-

renze finite, se i tronchi fossero abbastanza brevi e la sezione trasversale del fiume variasse gradualmente e con continuità lungo il corso. Senonchè nella realtà gli alvei dei torrenti e le gronde latitanti presentano sempre una conformazione oltremodo irregolare, con frequenti diramazioni alle influenze degli affluenti minori, con insenature e bassure, ove l'acqua si raccoglie, defluendo solo più tardi, e che in gran parte sfuggono ai rilievi per sezioni trasversali, o vi trovano una rappresentazione affatto incompleta. Perciò, come ha giustamente notato il FANTOLI, il volume liquido effettivamente speso per raggiungere un certo livello risulta sempre maggiore di quello, che chiameremmo di *invaso apparente*, rappresentato dal prodotto della lunghezza del tronco per l'area della sua sezione terminale. Lo stesso FANTOLI, nel calcolo di cui dà conto la memoria sopra ricordata, ha assunto $k = 2$, ammettendo che l'*invaso* effettivo fosse *doppio* di quello apparente (o, come egli scrive, che la sezione viva fosse metà di quella effettiva).

Questa assunzione non è confortata, che io sappia, da alcun dato di fatto, mentre ha ripercussioni vistose, per non dire decisive, sul risultato finale, che comporterebbe portate di colmo assai più elevate, se si ponesse invece, ad esempio, $k = 1$.

Abbiamo cercato, se non di eliminare totalmente, almeno di attenuare codesta arbitrarietà, col procurare di ritrarre dalle prove sul modello un valore sperimentale di k . Queste prove ci avevano fornito (fig. 7) i diagrammi delle portate in funzione del tempo tanto sotto Premadio, a monte della varice di Bormio, quanto a Ponte Cepina, a valle della varice medesima, alla distanza di circa 5,5 km contata lungo il torrente. Poichè possedevamo anche un numero adeguato di sezioni trasversali intermedie, abbiamo procurato di stabilire quale diagramma sarebbe stato ottenuto per la seconda delle due sezioni (Ponte Cepina), qualora il procedimento per differenze finite fosse stato applicato al tronco intermedio, partendo dal diagramma stabilito sperimentalmente per la prima (sotto Premadio). A tal fine il tronco stesso fu suddiviso in un numero opportuno di tratti secondari (otto in tutto). Il calcolo fu eseguito successivamente con i due valori 1,25 e 1,50 di k . Poichè per $k = 1,25$ il diagramma ricavato per la sezione di Ponte Cepina presentava un colmo di 4470 m³/s, più elevato di 170 m³/s rispetto a quello sperimentale di 4300 m³/s, si concluse che con tale coefficiente l'*invaso* risultava sottovalutato. Invece per $k = 1,5$ il colmo del diagramma calcolato risultò di 4180 m³/s, nettamente in difetto rispetto a quello sperimentale. Una semplice interpolazione ci fornì quindi come valore presumibilmente appropriato del coefficiente maggiorativo k per il tronco fra Premadio e Ponte Cepina quello di 1,4.

Nella fig. 7 già citata si vedono tracciati con linee sottili i diagrammi delle portate ottenuti per le singole sezioni intermedie, e in fine per quella di Ponte Cepina, appunto con $k = 1,4$. Ne appare chiaramente che le due portate, osservata e calcolata per il colmo in tale sezione, sono pressochè coincidenti, e cadono praticamente nello stesso istante.

Questa coincidenza ci sembrò sufficiente per poter concludere che fra Premadio e Ponte Cepina l'*invaso* che chiameremmo *efficiente* ai fini della propagazione dell'onda di piena, fosse adeguatamente rappresentabile tratto per tratto dall'*invaso apparente* $l\sigma$ moltiplicato per 1,4.

La stessa espressione dell'*invaso efficiente* ci sentimmo autorizzati ad adottare anche per i singoli tratti della vallata sotto Ponte Cepina, fino a Tirano. Con essa, la relazione risolutiva diventò:

$$q_2'' + 2,8 \frac{l_{12} \sigma_2''}{\Delta t} = (q_1' + q_1'') - q_2' + 2,8 \frac{l_{12} \sigma_2'}{\Delta t} . \quad (3')$$

A completare la esposizione del concetto informatore del calcolo svolto, e prima di riferirne i risultati, resta da dire qualche parola sui punti seguenti: espressione prescelta per il coefficiente di Chézy; valore assunto in tale espressione per la scabrezza; infine, pro-

cedimento seguito tronco per tronco, per l'avviamento del calcolo. L'applicazione della (3') è ovvia, infatti, per gli intervalli di tempo successivi all'arrivo della testa dell'onda nella sezione di valle, per i quali sono diversi da zero q'_2 e σ'_2 : occorre invece precisare come sia da procedere nei riguardi dell'intervallo di tempo, che risultò sempre superiore a 100 s, durante il quale la testa dell'onda percorre il tronco, spostandosi dalla sezione iniziale a quella finale.

Nei rapporti del coefficiente χ , in un primo tempo avevamo ritenuto di poterci attenere alla direttiva seguita già dal FANTOLI, di ammetterlo costante e con valore 20 ($m^{1/2}/s$), tale ordine di grandezza sembrandoci atto a rappresentare in modo plausibile le condizioni medie dell'alveo occupato dalla corrente di piena. Ma dovemmo successivamente notare che tale ipotesi, comportando un aumento della scabrezza con la radice quadrata del raggio medio, se ci si riferisce alla espressione di Kutter o di Bazin, oppure con la potenza due terzi dello stesso raggio medio, se si adotta invece quella di Gauckler-Strickler, portava per i livelli più alti e per le maggiori portate, a valori della scabrezza inconciliabili con quelli risultanti per livelli e portate minori. Fatto riferimento, ad es., alla formula di Kutter, al valore $\chi = 20$ corrisponde $m = 4$ per $R = 1$ metro; $m = 8$ per $R = 4$ metri, e $m = 12$ per $R = 9$ metri. Un leggero aumento della scabrezza media può concepirsi quando, diventando il letto naturale insufficiente a dare ricetto alla corrente, questa esonda sui terreni latitanti ricoperti di vegetazione e perciò più scabri, ma variazioni di codesta entità non sono in alcun modo pensabili. Ci parve quindi più conforme alla realtà dei fatti di ritenere la scabrezza costante, mettendo in conto nel modo consueto la dipendenza di χ dal raggio medio. E poichè per tutti i calcoli avevamo adottata la espressione di Strickler: $\chi = c R^{1/6}$, vi abbiamo assunto $c = 20$, (il che, per $R = 1$ m, comporta appunto $\chi = 20$, mentre per $R = 4$ m, fornisce $\chi = 25,2$).

Le scale di portata delle singole sezioni sono state pertanto calcolate con la relazione $q = 20 \sigma R^{2/3} i^{1/2}$, i designando la pendenza dell'alveo in corrispondenza della sezione (pendenza che veniva dedotta caso per caso dal profilo longitudinale).

Lo svolgimento del calcolo per i singoli tronchi presuppone la conoscenza, tronco per tronco, del tempo τ impiegato dalla testa dell'onda a spostarsi dalla sezione iniziale fino a quella terminale. Il valore di τ venne stabilito caso per caso dividendo la lunghezza del tronco per la presuntiva velocità media di avanzamento della testa dell'onda lungo il tronco medesimo; quanto a questa velocità, si ritenne di poterla uguagliare all'incirca a quella precedentemente determinata per la corrente nella sezione iniziale del tronco in corrispondenza del colmo. Stabilito, cioè, il diagramma $q(t)$ della portata in funzione del tempo per una generica sezione e dedottine i valori q_{\max} e v_{\max} della portata e della velocità nel colmo (il procedimento di calcolo adottato comporta, come già detto, la concomitanza dei tre massimi di portata, di velocità e di sezione bagnata), si poneva $\tau = l/v_{\max}$, l essendo la lunghezza del tronco. Con i valori di l e v_{\max} assunti, τ è risultato sempre superiore a 100 secondi: quindi la (3) non si è potuta applicare per alcun tronco al primo intervallo di 100 secondi, susseguente all'arrivo della testa dell'onda nella sezione iniziale di esso, e in generale nemmeno al secondo. Un bilancio fra afflussi attraverso la sez. 1 d'ingresso, deflussi attraverso la sez. 2 di uscita e le contemporanee variazioni d'invaso poteva, infatti, istituirsi soltanto per l'intero periodo iniziale, costituito da quel minimo multiplo intero dell'intervallo Δt , che superasse τ . Nelle figure 12 e 13 è rappresentato il caso di τ compreso fra $2 \Delta t$ e $3 \Delta t$: la fig. 13 fornisce le successive posizioni assunte dall'onda lungo il tronco alla fine dei successivi intervalli Δt , dal primo al quarto: la fig. 12 i corrispondenti diagrammi degli afflussi $q_1(t)$ attraverso la sezione iniziale 1 del tronco e dei deflussi $q_2(t)$ attraverso la sezione terminale 2. Attraverso quest'ultima il deflusso dell'acqua dura soltanto $3 \Delta t - \tau = \Delta_1 t$, ed il valore suo è dato da $q_2'' \Delta_1 t / 2$ (mentre si ha $q_2' = q_2'' = 0$): l'afflusso attraverso la sezione iniziale nell'intervallo $3 \Delta t$ è invece: $(q_1' + q_1'' + q_1'''/2) \Delta t$. La differenza

(rappresentata dall'area rigata con linee discendenti) corrisponde al volume invasato nel tronco durante $3 \Delta t$; volume che, a norma delle ipotesi di calcolo, si ritiene rappresentato da $k l_{12} \sigma_2''$. Posto quindi $(q_1' + q_1'' + q_1'''/2) \Delta t = q_2''' \Delta t/2 + k l_{12} \sigma_2''$, i valori di q_2''' e σ_2'' venivano dedotti graficamente, o per tentativi.

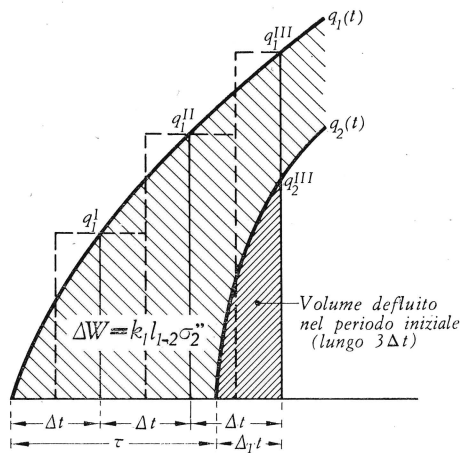


Fig. 12.

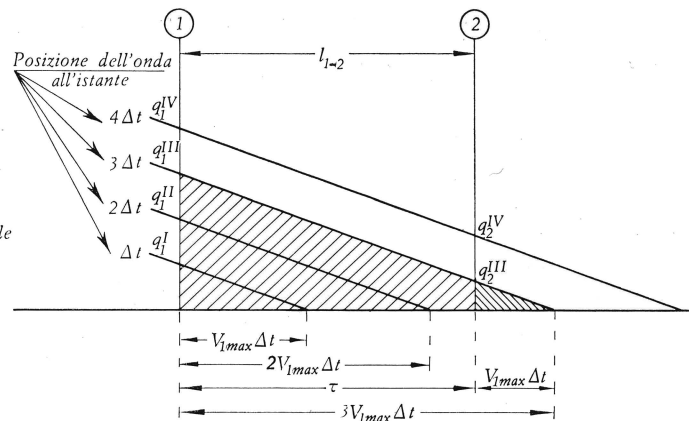


Fig. 13.

Così si è proceduto, in generale, a stabilire per ogni sezione i primi valori di σ_2 e q_2 che fossero diversi da zero, alla fine di un numero intero di intervalli di 100 secondi.

Il procedimento offre il fianco alla facile critica che, durante l'avanzamento del fronte d'onda, l'invaso del tronco non è certamente determinato dalla sola area bagnata σ_2 : facendolo dipendere unicamente da questa, col ritenerlo espresso da $k l_{12} \sigma_2$, si viene in generale a sottovalutarlo, a spese del deflusso attraverso la sezione terminale, che risulta invece sopravvalutato. Di conseguenza, i diagrammi $q(t)$ così ottenuti debbono riuscire più ripidi di quelli che avrebbe fornito un computo più aderente al reale andamento del fenomeno.

Non abbiamo creduto di attribuire gran peso alla differenza: sia perchè, come sarebbe facile riconoscere, essa vale a temperare la inevitabile inesattezza del valore di τ , sia e soprattutto per le limitate ripercussioni sugli elementi di maggior interesse pratico, la portata q_{max} di colmo e il tempo nel quale essa si verifica. La distanza temporale fra testa e colmo, per il caso di crollo parziale considerato, aumenta, a norma del computo, da 1000 secondi a Ponte Cepina, fino a oltre 2500 per la sezione 54, nella quale si inizia l'arginatura a monte di Tirano. Quindi la (3) dovette essere applicata in ogni sezione almeno una decina di volte, prima di arrivare al colmo. Attraverso queste successive numerose applicazioni, l'influenza dei valori iniziali andava progressivamente attenuandosi, fino a diventare minima, mentre si faceva prevalente sul valore q_{2max} nella sezione terminale di ogni tronco, quella dell'andamento del diagramma $q_1(t)$ delle portate affluenti attraverso la sezione iniziale.

Dobbiamo, infine, accennare che i concetti direttivi ora esposti sono stati definiti progressivamente attraverso ripetuti tentativi che furono avviati e in qualche caso condotti a termine secondo direttive differenti. Su questi tentativi, che pur diedero luogo a un lavoro preparatorio non lieve nè breve, non riteniamo meriti di tornare qui: ci basterà dire che il procedimento adottato è l'ultimo e il più attendibile o, per lo meno, il meno criticabile nella serie di quelli effettivamente applicati.

2. - Modalità esecutive del calcolo e suoi risultati.

Per il tratto di fiume da Ponte Cepina a Tirano, di km 32 circa, ci sono state comunicate 58 sezioni trasversali del fondo valle, con distanza media di 550 m da sezione a sezione. Del tratto in parola abbiamo in realtà preso in considerazione solo la parte superiore fino alla sezione 54, situata a poco più di 4 km a monte di Tirano, perchè a valle di essa il fiume scorre entro un alveo sistemato e arginato, capace di 1000 m³/s, o poco più. Questo doveva formare oggetto di studio a sè, ma lo studio, come diremo, si dimostrò poi non necessario, attesa l'entità della portata di colmo ottenuta per la sezione 54.

Abbiamo ritenuto ammissibile, e utile per non accrescere eccessivamente la mole dei computi, di fare riferimento a un numero non troppo grande di tronchi; per lo sviluppo fra Ponte Cepina e le sezione 54 ora detta, ne furono considerati soli 18, che sono compresi fra le sezioni distinte con i numeri indicati sui profili della fig. 15, della quale parleremo fra breve. Tali sezioni furono scelte fra quelle comunicate, come le più significative, e sufficienti a rappresentare le caratteristiche salienti del fondo della vallata, soggetto a sommersione per parte dell'onda.

Per ognuna di dette sezioni venne quindi preparata, sulla base dei disegni comunicatici, una tavola contenente gli elementi grafici e numerici caratteristici, come quella che vedesi riprodotta nella fig. 14, relativa alla sezione 8. A sinistra sono tracciate la curva delle portate, calcolata con la formula di Strickler, e quelle dei corrispondenti valori $q + 2,8 l \sigma / 100$ e $q + 2,8 l \sigma / 500$ delle quali abbiamo già spiegato l'uso (l distanza fra la sezione considerata e quella immediatamente a monte, σ area della sezione bagnata quando defluisce la portata q).

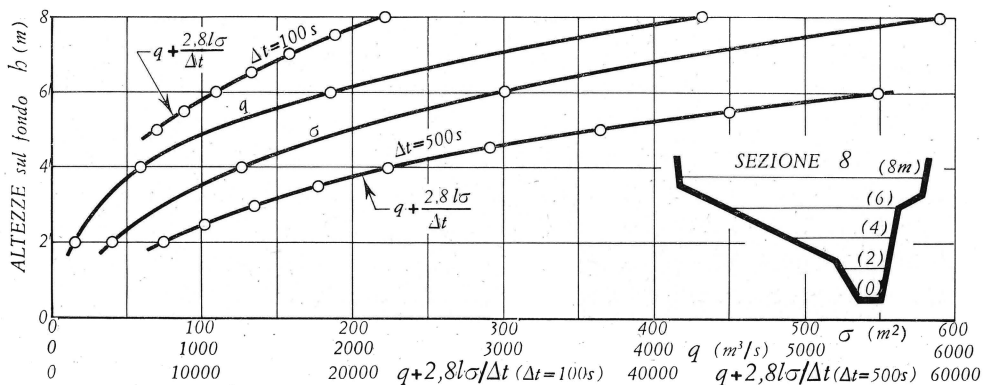


Fig. 14. - Elementi grafici e numerici predisposti per ogni sezione, per lo sviluppo del calcolo della propagazione dell'onda.

Con questi elementi, il calcolo del diagramma della portata in funzione del tempo in una generica delle 18 sezioni considerate, sulla base dell'analogo diagramma stabilito in precedenza per la sezione immediatamente a monte — diagrammi che distingueremo tuttavia con i simboli $q_2(t)$ e $q_1(t)$ rispettivamente — richiedeva la compilazione di una semplice tabella numerica che poteva essere condotta a termine in poco più di un'ora, sicchè tutto il calcolo della propagazione procedeva con una rapidità che riteniamo inusitata in determinazioni del genere. Essa però fu raggiunta solo attraverso lo svolgimento dei numerosi computi preliminari, e grazie al tirocinio imposto dai calcoli stessi.

Il computo dovette naturalmente procedere da monte a valle, a partire dal primo tronco, compreso fra la sezione di Ponte Cepina, assunta come sezione zero, e per la quale il diagramma $q_1(t)$ era quello stabilito sperimentalmente (e riportato nella fig. 7), e la sezione 3, situata 975 m a valle. Determinato il diagramma $q(t)$ per tale sezione 3, si passò al tronco

successivo, fra questa e la sezione 5, stabilendo il diagramma $q(t)$ anche per essa, e così via.

Nella fig. 15 riproduciamo la serie completa dei diagrammi così ottenuti per il caso di crollo parziale della diga, con breccia di 60×20 m.

Da questi diagrammi sono stati ricavati i valori numerici delle portate, dei livelli e delle velocità al passaggio del colmo dell'onda per le singole sezioni.

Per la sezione 54, posta a circa 4 km a monte di Tirano, nella quale si inizia l'arginatura del fiume, la portata di colmo è risultata di circa $1700 \text{ m}^3/\text{s}$.

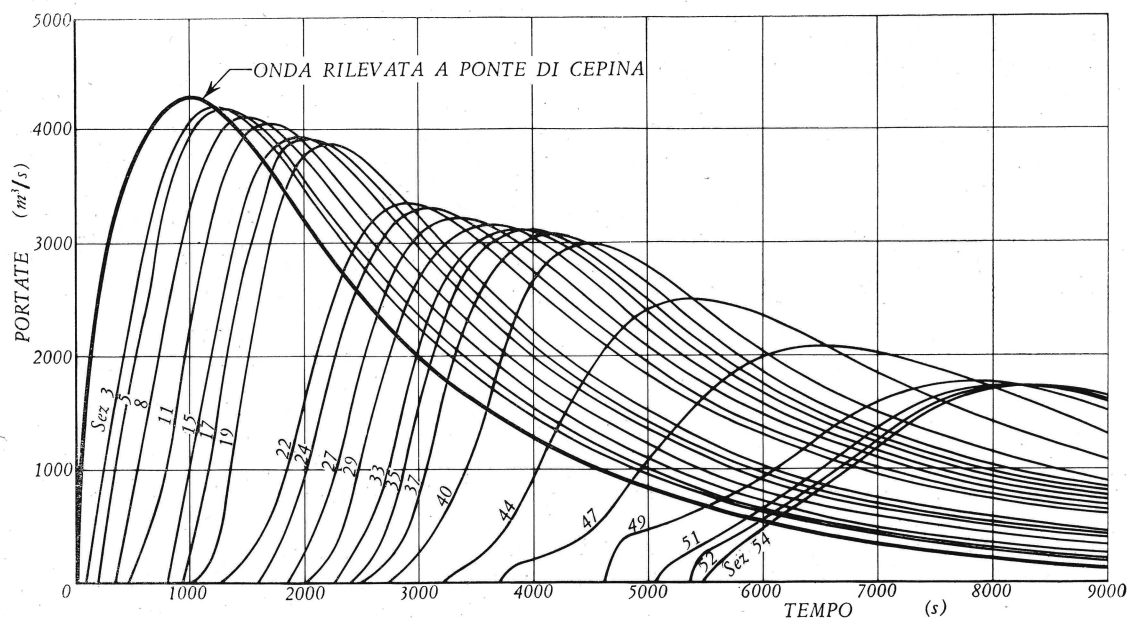


Fig. 15. - Propagazione dell'onda da P. Cepina alla sezione 54, all'inizio dell'arginatura. - Diagrammi delle portate in funzione del tempo dedotti successivamente per singole sezioni, da quello stabilito sperimentalmente per la sezione di P. Cepina.

Siccome la capacità di portata dell'alveo arginato è da ritenere dell'ordine di $1000 \text{ m}^3/\text{s}$, l'alveo stesso, nonchè dare ricetto all'onda conseguente al crollo parziale esaminato, sarebbe atto a contenere al massimo poco più della metà della massima portata di essa. La parte rimanente esonderebbe, dando luogo a sommersione dei terreni latitanti.

Fu appunto in seguito a questa constatazione, e considerata l'entità della portata che dovrebbe trovare sfogo al di sopra o fuori delle arginature, che non si è ritenuto prezzo dell'opera di proseguire il calcolo ulteriormente, fino all'abitato di Tirano.

Nell'insieme, considerati i risultati delle prove, fino a Ponte Cepina e quelli del calcolo, da Ponte Cepina alla sezione 54, le caratteristiche dell'onda conseguente al crollo parziale della diga e all'apertura di una breccia di 60×20 m sono risultate quelle riassunte nel prospetto della pagina seguente.

Per la piana di Bormio il pericolo comincerebbe a manifestarsi 550 secondi dopo il crollo, e la massima sommersione si verificherebbe 450 secondi più tardi. A Ponte Cepina il pericolo si determinerebbe invece solo 1400 secondi dopo il crollo e la massima sommersione si avrebbe dopo altri 1000 secondi. Per Tirano la minaccia si pronuncerebbe circa due ore dopo il crollo della diga, e solo un'altra ora più tardi le esondazioni raggiungerebbero il colmo: perchè è una caratteristica nota, e in certo senso evidente, dell'onda quella di allungarsi e appiattirsi, nel suo avanzamento.

Nella fig. 16 abbiamo segnato, infine, i diagrammi longitudinali delle portate dell'onda lungo la vallata da Ponte Cepina fino all'ultima sezione considerata (n. 54) e per istanti

Sezione	Distanze (km)		Portata di colmo (m ³ /s)	Tempo impiegato (s)		Celerità media lungo i singoli tratti (m/s)	
	parziali	progressive		dalla testa	dal colmo	della testa	del colmo
Diga	0	0	9400	0	0	—	—
Sezione 23 (sotto Premadio) ..	8,1	8,1	5750	550	1000	14,7	8,1
Ponte Cepina (sez. 0)	5,4	13,5	4300	1400	2400	6,3	3,8
Sezione 22	9,0	22,5	3300	2700	4300	6,9	4,7
Sezione 44	13,5	36,0	2500	4600	6800	7,1	5,4
Sezione 54	7,5	43,5	1750	6880	9700	3,3	2,6

sussequenti rispettivamente di 1000 in 1000 secondi dopo l'arrivo della testa a Ponte Cepina. La figura fornisce un quadro evidente del processo di avanzamento dell'onda, lungo la valle, come risulta dal calcolo istituito.

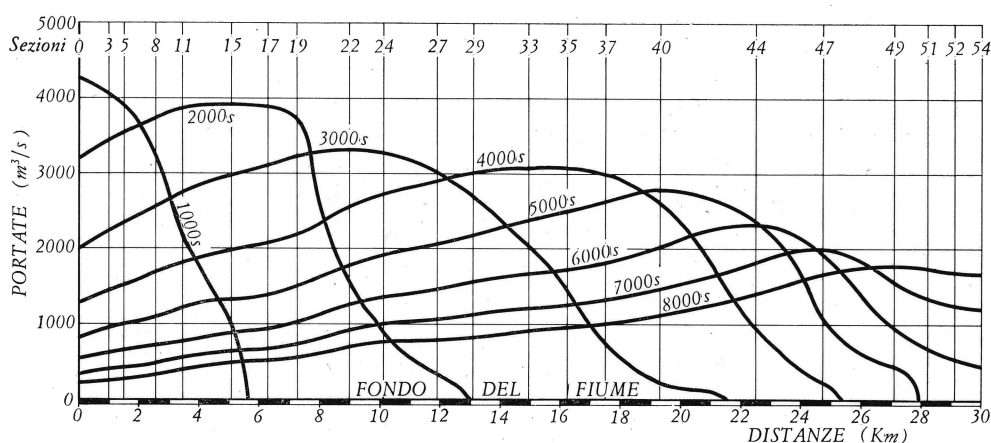


Fig. 16. - Avanzamento dell'onda lungo la vallata. - Diagrammi longitudinali delle portate di 1000 in 1000 secondi dopo l'arrivo della testa nella sezione di P. Cepina.

3. - Attendibilità e approssimazione dei risultati.

Prima di chiudere ci sembra opportuna una parola intorno alla attendibilità dei risultati ottenuti e alla loro presumibile approssimazione.

Le prove sul modello hanno fornito, con i due diagrammi delle portate dell'onda, all'uscita dalla ripida e scoscesa forra montana per la quale l'Adda raggiunge la piana di Bormio, e allo sbocco dalla piana medesima, una base senza confronti più attendibile di quella che sarebbe stato possibile conferire all'indagine per qualunque altra via. Non era pensabile, infatti, di appoggiare uno studio come quello condotto sopra constatazioni dirette.

Altro servizio reso dal modello è stato quello di consentire, attraverso il confronto tra diagrammi osservati e diagrammi in vario modo calcolati, la valutazione dell'invaso efficiente da introdurre nel calcolo per differenze finite, applicato per determinare il processo di propagazione dell'onda a valle di Ponte Cepina. I diagrammi di fig. 7 documentano la attitudine del procedimento di calcolo adottato a fornire dei risultati abbastanza prossimi a quelli osservati: la rispondenza è, possiamo dire, perfetta per ciò che riguarda entità ed epoca del colmo, lo è meno nei riguardi della celerità della testa dell'onda.

Ma altri elementi di giudizio intorno alla rispondenza del metodo adottato si possono ritrarre dal confronto fra i valori della portata e della velocità media dell'acqua nella sezione di Ponte Cepina che sono stati ottenuti sperimentalmente, e sono riprodotti in fig. 8, e quelli ai quali porterebbe invece la applicazione della equazione (1) del moto uniforme. Il metodo presuppone, come ipotesi fondamentale, che l'equazione stessa continui a mantenersi in vigore anche durante il passaggio dell'onda; il confronto doveva dirci se e fino a qual punto tale ipotesi fosse in armonia con i fatti, almeno nella sezione di Ponte Cepina, e nel contempo confermare la rispondenza del valore assunto per la scabrezza nei riguardi del funzionamento del modello.

I risultati sono posti in evidenza nella fig. 17: i diagrammi a linea continua sono sperimentali, e ci danno gli andamenti della portata e della velocità media, come rilevati nel modello (la velocità intesa come rapporto fra la portata rilevata e la sezione bagnata corrispondente alla profondità letta nel modello nell'istante di passaggio della stessa portata). I diagrammi a tratti sono invece stati calcolati: quello della portata, calcolando questa a mezzo dell'equazione del moto uniforme, postovi $c = 20$ e introdotti per la profondità i valori letti nel modello; quello della velocità, calcolando la profondità e quindi la velocità risultante per ogni portata dalla applicazione della medesima equazione del moto uniforme.

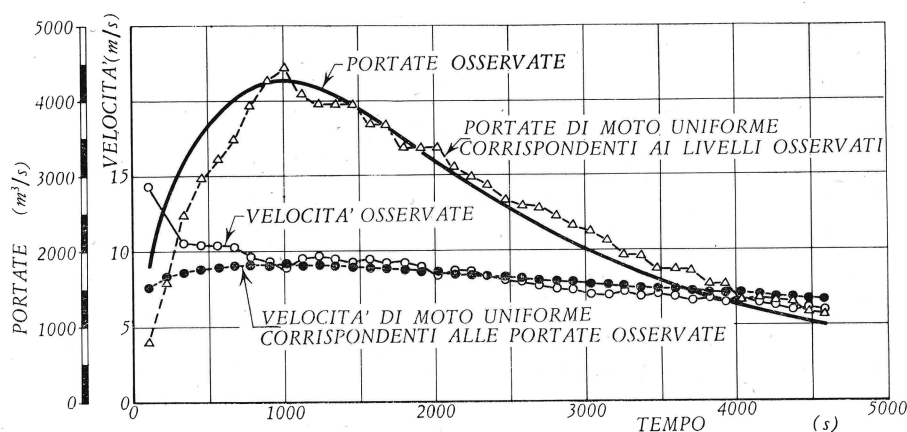


Fig. 17. - Confronto fra i valori osservati e i valori calcolati per le portate e le velocità alla sezione di P. Cepina (crollo parziale).

Fra le due coppie di diagrammi intercede, come dimostra la figura, una corrispondenza che non esiteremmo a dire singolare per ciò che riguarda il colmo e la fase di decrescenza dell'onda; tale rispondenza attesta a un tempo l'attendibilità di trattare per queste fasi il moto come uniforme, e quella del valore 20 assunto per il coefficiente c . Degli scostamenti assai marcati si notano, invece, per la fase ascendente, e tanto più rilevanti quanto minori sono le profondità dell'onda. Essi in parte sono da attribuire alla già notata e inevitabile imprecisione delle letture per le profondità minori: nella fase di rapida ascesa la capillarità interviene nel senso di ridurre le profondità lette, e l'errore conseguente (in meno, per ciò che concerne la portata, in più per ciò che concerne la velocità) poteva arrivare — come già notammo — al 20%, per le minime altezze lette (che furono di circa 1 cm).

La figura segnala degli scostamenti assai superiori; è da ritenere quindi che — come del resto era previsto — il procedimento non fosse atto a rendere fedelmente i caratteri del fronte dell'onda, dove tale fronte fosse molto ripido, come certo accadrebbe a Ponte Cepina. La sua attendibilità probabilmente però aumenta col procedere dell'onda verso valle e in relazione al conseguente progressivo appiattimento di essa.

Comunque, ci sembra che, grazie al sussidio essenziale delle prove sul modello, dai risultati del calcolo svolto emerga una rappresentazione abbastanza attendibile degli aspetti qualitativi dell'ipotetico fenomeno considerato. Meno facile appare il giudizio circa il possibile grado di precisione dei risultati medesimi. Dipende questo, infatti, non solo dalle ipotesi del calcolo e dalle modalità esecutive di esso, nonchè dai coefficienti introduttivi, ma anche dalla corrispondenza fra modello e originale: in merito alla quale non sappiamo che fare delle congetture, mancando in modo assoluto ogni possibilità di controllo. L'elemento che potrebbe suscitare maggiori dubbi al riguardo è la scabrezza, che alla superficie del modello fu conferita, diremmo a sentimento, come a sentimento è stato assunto il valore $c = 20$, introdotto nei calcoli, non avendo alcun modo di valutare la scabrezza effettiva della vallata. Ci sembra però che l'una e l'altra assunzione, pur esercitando una innegabile influenza sui caratteri dell'onda, non possano avere avuto ripercussioni determinanti sui valori di maggior interesse pratico: vogliamo dire sui livelli e sulle portate di colmo stabiliti per le diverse sezioni.

È perciò nostra opinione che i valori stessi siano atti a rappresentare nei loro presumibili ordini di grandezza, se non nelle precise loro entità numeriche, i livelli e le portate effettivamente verificabili in conseguenza dell'evento preso in considerazione.