

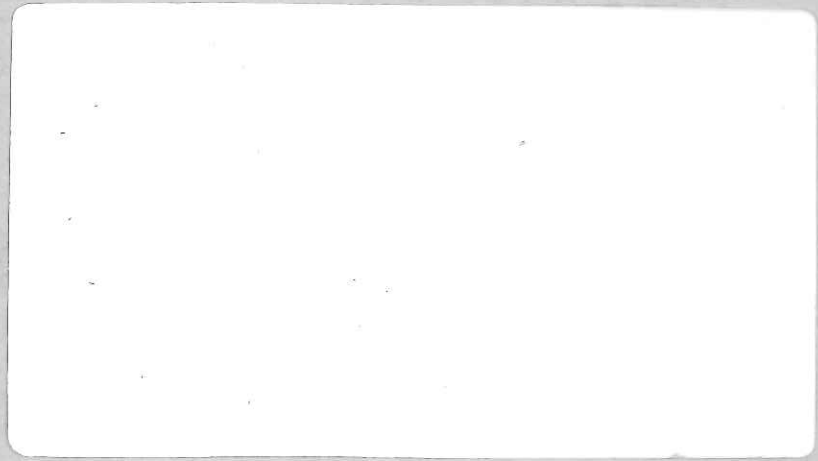
$\frac{42}{418}$

ENEL

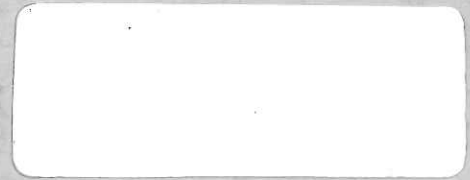
DIREZIONE STUDI E RICERCHE
CENTRO DI RICERCA IDRAULICA E STRUTTURALE



$\frac{42}{418}$



A1-10
A1/1



A 2

DIGA DI VALMORTA
CALCOLO DELL'ONDA DI SOMMERSIONE
CONSEQUENTE ALL'IPOTETICO COLLASSO DELL'OPERA
DI RITENUTA AI SENSI DELLA CIRCOLARE
DEL MINISTERO DEI LAVORI PUBBLICI N. 352
DEL 4 DICEMBRE 1987

Il presente studio e' stato svolto per conto del SPT/SOIC di MILANO
I calcoli sono stati effettuati dall'ISMES. Il CRIS ha provveduto alla loro
verifica ed approvazione.

	<i>Leonardo Mancusi</i>	<i>D. Maione</i>	<i>P. Molinaro</i>	<i>G. Giuseppetti</i>	<i>M. Fanelli</i>	
	L. Mancusi (ISMES)	D. Maione (ISMES)	P. Molinaro (ENEL-CRIS)	G. Giuseppetti (ENEL-CRIS)	M. Fanelli (ENEL-CRIS)	
Rev. N.	Redatto da	Rivisto da		Approvato da	Approvato per il rilascio	Data Rilascio

Luglio 1991
4258 PM

DIGA DI VALMORTA

CALCOLO DELL'ONDA DI SOMMERSIONE
CONSEQUENTE ALL'IPOTETICO COLLASSO DELL'OPERA DI RITENUTA
AI SENSI DELLA CIRCOLARE DEL MINISTERO DEI LAVORI PUBBLICI
N. 352 DEL 4 DICEMBRE 1987

I N D I C E

1. INTRODUZIONE
 - 1.1 Motivazioni del calcolo
 - 1.2 Ipotesi di calcolo
2. CARATTERISTICHE DEL SERBATOIO ARTIFICIALE
 - 2.1 Opera di ritenuta
 - 2.2 Invaso
 - 2.3 Opere di scarico
3. CARATTERISTICHE DELLE ZONE INTERESSATE
 - 3.1 Geometria
 - 3.2 Costituzione fisica
4. IDROGRAMMA DI PIENA IN USCITA DAL SERBATOIO
 - 4.1 Ipotesi di rottura della diga
 - 4.2 Metodo di calcolo dell'idrogramma di piena
5. METODO DI CALCOLO DELLA PROPAGAZIONE DELL'ONDA
 - 5.1 Equazioni di base
 - 5.2 Soluzione numerica
 - 5.3 Condizione iniziale e condizioni al contorno
 - 5.4 Approssimazioni del calcolo

6. RISULTATI

Riferimenti Bibliografici

Tabelle

Figure

Planimetrie

ELENCO DELLE FIGURE

1. Sezione della diga
2. Curva dell'invaso
3. Idrogramma di piena
4. Profilo fondo valle
5. Profilo livello massimo
6. Profilo portata massima
7. Profilo altezza massima
8. Profilo velocità massima
9. Tempo di arrivo del fronte

ELENCO PLANIMETRIE

Planimetria d'insieme delle aree inondabili TAV. I

Planimetrie scala 1:25000 delle aree inondabili TAV. II - TAV. IV

1. INTRODUZIONE

1.1 Motivazioni del calcolo

Il presente calcolo è stato svolto per conto dell'ENEL-SPT-SOIC di Milano, in ottemperanza alle prescrizioni della Circolare del Ministero dei Lavori Pubblici, n. 352 del 4.12.1987, e riguarda l'onda di sommersione che conseguirebbe all'ipotetico crollo della diga di Valmorta.

Il calcolo non mette in alcun modo in discussione la stabilità della suddetta opera, la quale è stata progettata a norma di legge.

1.2 Ipotesi di calcolo

Le ipotesi da adottare nel calcolo non sono precisate in dettaglio nella Circolare di cui sopra. Tuttavia esse possono essere desunte dal rapporto finale della Commissione interministeriale per la pianificazione degli interventi di protezione civile in caso di collasso di opere di sbarramento, del 19.11.1986, nonché da analoghi documenti di organismi governativi di altri Paesi.

Secondo il rapporto citato, la rottura dell'opera di ritenuta è da considerarsi di tipo graduale se l'opera è in materiale sciolto, e di tipo istantaneo se l'opera è invece in muratura.

La quota di pelo libero nel serbatoio, al momento della rottura, viene assunta pari a quella di massimo invaso di cui al Decreto del Ministero dei Lavori Pubblici del 24.3.82.

2. CARATTERISTICHE DEL SERBATOIO ARTIFICIALE

2.1 Opera di ritenuta

L'opera di ritenuta a cui si riferisce lo studio è la diga di Valmorta. Essa è situata nel Comune di Valbondione, provincia di Bergamo, Regione Lombardia, ed intercetta le acque del fiume Serio, appartenente al bacino idrografico del fiume Po. La struttura è a gravità massiccia in calcestruzzo con pietrame annegato.

Nella Fig. 1 è rappresentata la sezione longitudinale della diga.

Alcuni dati di interesse sono:

-	Quota piano di coronamento:	1806.00 m s.m.
-	Sviluppo del coronamento:	150.00 m
-	Altezza dello sbarramento:	18.00 m

2.2 Invaso

L'invaso creato dall'opera di ritenuta ha per finalità la produzione di energia elettrica.

Alcuni dati di interesse sono:

-	Quota massima di regolazione	1801.75 m s.m.
-	Quota di massimo invaso	1803.00 m s.m.
-	Volume utile di regolazione	$0.13 \times 10^6 \text{ m}^3$
-	Volume totale di invaso	$0.13 \times 10^6 \text{ m}^3$

Nella Fig.2 è rappresentata la curva dei volumi dell'invaso.

2.3 Opere di scarico

L'invaso è munito delle seguenti opere di scarico:

a) Sfiatore a soglia fissa

- Tipo di sfioratore: ciglio sfiorante
- Quota della soglia: 1801.75 m s.m.
- Portata massima
(alla quota di massimo invaso): 94.00 m³/s

b) Scarico di fondo

- Quota della soglia: 1790.50 m s.m.
- Portata massima
(alla quota di massimo invaso): 12.00 m³/s
- Portata massima
(alla quota massima di regolazione): 11.38 m³/s

3. CARATTERISTICHE DELLE ZONE INTERESSATE

3.1 Geometria

Le caratteristiche geometriche delle zone interessate sono state dedotte dalle carte topografiche I.G.M. in scala 1:25000. In particolare sono state rilevate le curve di livello della valle, e attraverso queste sono state determinate le sezioni trasversali utilizzate poi nel calcolo. Queste sezioni sono indicate sulle planimetrie allegate.

Tale rappresentazione della geometria dell'alveo è da ritenersi globalmente adeguata agli scopi del presente studio [8], [10]. D'altra parte è bene sottolineare che ad essa possono sfuggire dettagli di un certo rilievo per il deflusso locale dell'onda di piena.

3.2 Costituzione fisica

Per costituzione fisica delle zone interessate si intende la natura dei vari terreni e delle loro diverse coperture, che possono essere rappresentate dalla vegetazione o dalle varie infrastrutture presenti. Alle diverse nature e coperture dei terreni corrispondono diverse caratteristiche di scabrezza idraulica, determinanti ai fini della propagazione dell'onda da rottura della diga.

La scabrezza degli alvei naturali viene espressa attraverso il parametro di Manning. Seguendo una metodologia di uso corrente in Francia, tale coefficiente viene stimato attraverso un esame delle carte topografiche disponibili, nonché servendosi anche della conoscenza diretta o indiretta delle caratteristiche del terreno.

Per tener conto delle diverse caratteristiche idrauliche della valle del fiume Serio, sono stati attribuiti al coefficiente di scabrezza di Manning i valori di seguito riportati:

- n = 0.035 dalla diga di Valmorta alla frazione di Beltrame;
- n = 0.060 da Beltrame a Sud di Bondione;
- n = 0.035 da Bondione alla località Mola;
- n = 0.040 da Mola alla frazione di Bettuno;
- n = 0.060 da Bettuno fino al comune di Gromo;
- n = 0.045 da Gromo alla località Ponte Nuovo;
- n = 0.050 da Ponte Nuovo ad Ardesio;
- n = 0.040 da Ardesio alla frazione Ludrigno.

4. IDROGRAMMA DI PIENA IN USCITA DAL SERBATOIO

4.1 Ipotesi di rottura della diga

In considerazione del tipo di struttura, e tenendo presenti le conclusioni di un'indagine sui casi reali di rottura dighe [1], si è ipotizzata una rottura istantanea e totale della diga.

4.2 Metodo di calcolo dell'idrogramma di piena

L'idrogramma di piena in uscita dal serbatoio costituisce la condizione al contorno di monte per il calcolo della propagazione dell'onda nella valle sottostante.

Ai fini del calcolo di tale idrogramma è necessario disporre della curva dei volumi del serbatoio (vedi Fig.2).

Per quanto riguarda l'efflusso attraverso la sezione della diga, si fa l'ipotesi che esso avvenga in condizioni critiche.

La legge che fornisce la portata effluente in funzione della quota di pelo libero nel serbatoio si ottiene seguendo la procedura di seguito delineata.

Detto h il generico tirante della corrente critica nella sezione della diga si ha:

- velocità critica nella sezione della diga:

$$V = (gA/B)^{1/2}$$

dove:

- g = accelerazione di gravità;
- A = area della sezione bagnata per l'altezza h ;
- B = larghezza superficiale per l'altezza h ;

- portata critica:

$$Q = A V$$

- carico totale nel serbatoio:

$$H = Z_f + h + \frac{v^2}{2g}$$

dove:

Z_f = quota di fondo nella sezione della diga.

In questo modo viene costruita una tabella che dà la portata Q effluente dal serbatoio in funzione del livello H nello stesso.

La legge di svuotamento del serbatoio si ottiene risolvendo l'equazione di continuità:

$$\frac{dW}{dt} = -Q_e$$

dove W è il volume d'acqua contenuto in ogni istante nel serbatoio, Q_e è la portata in efflusso, calcolata secondo il procedimento sopra descritto.

L'equazione differenziale precedente, nel presente caso è stata risolta per via numerica utilizzando il codice di calcolo denominato INVASO, le cui caratteristiche principali e modalità di impiego sono illustrate in [2].

Nella Fig. 3 è riportato l'idrogramma di piena ottenuto dal calcolo.

5. METODO DI CALCOLO DELLA PROPAGAZIONE DELL'ONDA

Il calcolo della propagazione dell'onda di sommersione è stato effettuato mediante il codice di calcolo STREAM, in grado di simulare una corrente a superficie libera unidimensionale in condizioni di moto vario. Di tale modello è disponibile un'ampia documentazione [3 - 5].

5.1 Equazioni di base

Il modello si basa sulle equazioni di Saint Vénant, che derivano dall'applicazione dei due principi di conservazione della massa e della quantità di moto ad un tratto elementare di corrente. Le suddette equazioni vengono risolte nella seguente forma:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + (u-\hat{u}) \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{A}{B} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{u}{B} \left(\frac{\partial A}{\partial x} \right) h - \frac{q}{B} = 0$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + (u-\hat{u}) \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} [(\beta-1) A u^2] + g \frac{\partial z}{\partial x} +$$

$$+ g S_f + (u-w) \frac{q}{A} - \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} \left(A \nu \frac{\partial u}{\partial x} \right) = 0$$

con il seguente significato dei simboli:

h = altezza della corrente (m);

u = velocità media della corrente (m/s);

x = ascissa lungo l'asse della valle (m);

t = tempo (s);

\hat{u} = velocità del sistema di riferimento locale (m/s);

A = area della sezione trasversale della corrente (m²);

B = larghezza di superficie della corrente (m);

q = afflusso laterale per unità di lunghezza della corrente (m²/s);

β = coefficiente di distribuzione del flusso di quantità di moto, noto come coefficiente di Boussinesq (adim.);

z = quota del pelo libero (m s.m.);

g = accelerazione di gravità (m/s^2);

S_f = termine di resistenza (adim.), secondo la formula di Manning

$$S_f = n^2 |u| u / R^{4/3};$$

n = parametro di resistenza di Manning ($s/m^{1/3}$);

R = raggio idraulico (m);

w = componente secondo l'asse della corrente della velocità dell'afflusso laterale q (m/s);

ν = viscosità cinematica turbolenta (m^2/s).

Le ipotesi principali alla base delle equazioni di Saint Vénant sono:

- piccola curvatura della traiettoria delle particelle d'acqua, a cui corrisponde una distribuzione della pressione di tipo idrostatico;
- limitata pendenza del fondo (< 20%);
- resistenze idrauliche al contorno pari a quelle di moto uniforme.

L'introduzione nelle equazioni di base di un sistema di riferimento locale mobile è conveniente per il trattamento di problemi in cui le due sezioni terminali della corrente sono suscettibili di movimento, come nel caso della propagazione di un'onda di sommersione su di un alveo inizialmente asciutto. Inoltre la presenza nell'equazione di conservazione della quantità di moto di un termine di viscosità consente di poter studiare correnti nelle quali siano presenti onde a fronte ripido mobili o stazionarie.

5.2 Soluzione numerica

Le equazioni di Saint Vénant vengono risolte numericamente mediante una tecnica agli elementi finiti, per la discretizzazione nello spazio, ed un algoritmo di Runge-Kutta a tre stadi del terzo ordine, per l'integrazione nel tempo.

La scelta del passo di integrazione temporale viene effettuata automaticamente in modo da rispettare le condizioni di stabilità teoriche caratteristiche del problema.

Il reticolo di discretizzazione spaziale copre istante per istante la sola parte della valle occupata dall'onda di sommersione (dalla sezione di monte fino al fronte); esso quindi si allunga con l'avanzamento dell'onda. I nodi del reticolo si muovono con velocità u variabile linearmente tra il valore della velocità della coda dell'onda e quello del suo fronte. Allo scopo di mantenere il passo spaziale di discretizzazione entro limiti prefissati, vengono automaticamente aggiunti al reticolo nuovi nodi man mano che l'onda si allunga.

5.3 Condizione iniziale e condizioni al contorno

La condizione iniziale assunta nel calcolo è quella che il fondo della valle sia asciutto prima dell'arrivo dell'onda.

La condizione al contorno di monte è costituita dall'idrogramma di piena riportato nella Fig.3, calcolato secondo il procedimento illustrato nel paragrafo 4.2.

La condizione al contorno di valle è quella di altezza costantemente nulla, man mano che il fronte dell'onda avanza lungo l'alveo; questa condizione è coerente con l'ipotesi assunta di alveo inizialmente asciutto.

Grazie alle sue caratteristiche, che consistono nell'adozione di un sistema di riferimento locale mobile, il modello utilizzato consente di trattare molto semplicemente la propagazione dell'onda su di un alveo asciutto. Basta imporre in questo caso che il fronte dell'onda si muova con la stessa velocità delle particelle d'acqua, e che nel contempo la pressione idrostatica sia nulla sul fronte stesso. La validità delle suddette condizioni è stata verificata confrontando la celerità del fronte dell'onda data dal modello numerico sia rispetto a soluzioni analitiche che a dati sperimentali di letteratura [5, 6].

5.4 Approssimazioni del calcolo

Le principali ipotesi su cui si basano le equazioni di Saint Vénant utilizzate dal modello matematico sono già state richiamate nel paragrafo 5.1. Tali ipotesi

si possono sintetizzare nella condizione che l'onda di sommersione si possa assimilare ad una corrente a pelo libero di tipo lineare.

La suddetta condizione viene a mancare in corrispondenza di curve strette della valle. Per la stima della sopraelevazione del pelo libero, δ , che si ha sulla parte esterna di una curva, si possono utilizzare alcuni metodi empirici.

A tale scopo l'EDF utilizza la formula:

$$\delta = \frac{B}{r} \frac{u^2}{2g}$$

dove il nuovo simbolo r è il raggio medio della curva. La formula precedente si riferisce ad una corrente di tipo lento. La legge che fornisce il valore di δ per una corrente di tipo veloce è più complessa [7].

Un altro metodo seguito da alcuni Autori è di valutare δ ipotizzando che tutta l'energia cinetica della corrente $u^2/2g$ si trasformi in energia potenziale; ciò equivale a porre $B/r = 1$ nella formula impiegata dall'EDF.

Un'altra situazione in cui cade l'ipotesi di linearità dell'onda si verifica in corrispondenza delle brusche variazioni della sezione della valle. L'effetto della variazione di sezione viene interpretato dal modello unidimensionale in modo globale come una perdita di energia localizzata della corrente.

Alcuni Autori considerano in corrispondenza di allargamenti bruschi una perdita di energia pari a tutta l'altezza cinetica della corrente proveniente da monte. Un altro criterio seguito è quello di applicare tra due sezioni, poste a monte e a valle dell'allargamento, le equazioni di conservazione della massa e della quantità di moto nella forma globale.

Il modello utilizzato, grazie alla presenza nell'equazione del moto del termine di diffusione turbolenta, che conserva strettamente la quantità di moto globale della corrente, introduce in modo automatico il giusto livello di dissipazione di energia che si ha in un allargamento brusco di sezione.

Un'altra approssimazione importante del modello deriva dalla formula di Manning, con la quale vengono calcolate le perdite di carico distribuite, ed in particolare dai valori attribuiti al coefficiente di scabrezza n . Quando sia possibile una buona stima del coefficiente n , il modello matematico è in grado di calcolare la propagazione di un'onda di sommersione con una approssimazione accettabile ai fini pratici. In ogni caso una variazione del 30% sul valore di n si ripercuote per non più del 15% sulle altezze d'acqua raggiunte localmente dall'onda di sommersione [8].

Una recente raccolta dei diversi modelli di onda di sommersione, delle loro caratteristiche principali e delle loro limitazioni è riportata in [9].

6. RISULTATI

Nel presente paragrafo si illustrano i risultati ottenuti applicando i codici di calcolo descritti nei paragrafi precedenti, ed utilizzando i dati delle caratteristiche della vallata di cui al paragrafo 3.

In questo caso il calcolo della propagazione dell'onda è stato condotto a partire dalla sezione 2 in quanto il tratto di vallata a monte di tale sezione ha pendenze ben superiori al limite di validità del modello numerico impiegato.

Il codice di calcolo utilizzato per la simulazione della propagazione dell'onda di piena è in grado di fornire, in corrispondenza di tutte le sezioni della valle considerate, i seguenti risultati relativi alle caratteristiche dell'onda:

- livello massimo;
- portata massima;
- altezza massima;
- velocità massima;
- tempo di arrivo del fronte.

I valori delle suddette grandezze sono presentati in forma riassuntiva nella Tabella allegata.

Nella Fig.4 è rappresentato il profilo longitudinale del fondo valle.

Nelle Figg. dalla 5 alla 9 sono presentati i profili lungo l'asse della valle delle caratteristiche dell'onda.

I profili del pelo libero e del fondo alveo sono stati in questo caso fittiziamente sfalsati di 1 cm per consentire una più facile distinzione degli stessi.

Infine, nelle planimetrie (Tavv. I,...,IV) sono evidenziate le aree inondabili dall'ipotetica onda di sommersione. Nella Tav. I è rappresentata la mappa completa di tali aree, mentre nelle tavole successive la mappa è suddivisa nelle Tavole 1:25000 dell'IGM.

Lo studio è stato interrotto alla sezione 15 in quanto la portata derivante dall'ipotetico crollo della diga in esame risulta inferiore alla massima piena naturale ivi registrata.

Riferimenti Bibliografici

[1] ENEL-CRIS

"Sintesi dell'attività del sottogruppo ITCOLD per la individuazione di criteri sulle possibili dinamiche di rottura delle dighe di ritenuta"
Relazione interna n. 3943, 1990

[2] ENEL-CRIS

"Codice INVASO manuale d'uso"

[3] Di Monaco A., Molinaro P.

"Finite element solution of the lagrangian equations of unsteady free-surface flows on dry river beds"
Proceedings of the 4th International Conference on Finite Elements in Water Resources, Hannover, Germany, 1982.

[4] Di Monaco A., Molinaro P.

"Lagrangian finite element model of dam-break wave on dry bed versus experimental data"
Proceedings of the Hydrosoft Conference, Portoroz, Yugoslavia, 1984.

[5] "Modello matematico unidimensionale di onda di sommersione: alcune applicazioni"

Relazione ENEL-CRIS n. 3174, 1984.

[6] Molinaro P.

"Modellazione matematica dell'onda di sommersione: rassegna ed analisi delle soluzioni analitiche più note"
Relazione ENEL-CRIS n.3015, 1982.

[7] Chow V.T.

"Open channel hydraulics"
Mc Graw-Hill Book Co., New York, N.Y., 1959.

- [8] Groupe de Travail du Comité Français des Grands Barrages, "Bases techniques des plans d'alerte destinés a faciliter la protection des populations en aval des barrages".
ICOLD, XIV Congrès, Rio de Janeiro, 1982.
- [9] Molinaro P.
"Rassegna ed analisi dei metodi disponibili per il calcolo dell'onda di piena conseguente alla rottura di una diga."
Gruppo Nazionale per la Difesa dalle Catastrofi Idrogeologiche, Rapporto 1988.
- [10] Borsetto M., Clementel S., Molinaro P.
"Sviluppo di procedure per lo studio del fenomeno del dam-breaking e dei diversi processi decisionali"
Gruppo Nazionale per la Difesa dalle Catastrofi Idrogeologiche, Rapporto 1989.

TABELLE

Tabella riassuntiva dei risultati del calcolo
nelle sezioni trasversali della valle

SEZ.	PROGR. (m)	PORTATE (m ³ /s)	ALTEZZE (m)	LIVELLI (m s.m.)	VELOCITA' (m/s)	TEMPI (s)
2	1243	3811	10.46	1286.76	7.14	0
3	1808	2956	6.80	1201.30	23.62	30
4	2706	2721	6.66	997.29	27.21	63
5	4313	1533	4.70	887.69	12.91	156
6	5306	489	1.94	873.98	2.35	431
7	6684	353	2.18	844.99	4.21	921
8	9246	270	2.26	789.24	4.20	1509
9	11071	266	1.81	743.77	3.81	1972
10	13269	189	2.35	678.46	4.44	2492
11	14446	141	3.31	661.01	4.37	2782
12	15933	127	4.08	634.48	3.70	3144
13	18097	116	2.67	588.97	3.91	3718
14	19716	108	2.30	559.92	2.96	4216
15	21494	97	2.45	531.58	3.38	4793

F I G U R E

DIGA
DI
VALMORTA
—
DIAGRAMMA
DEI VOLUMI

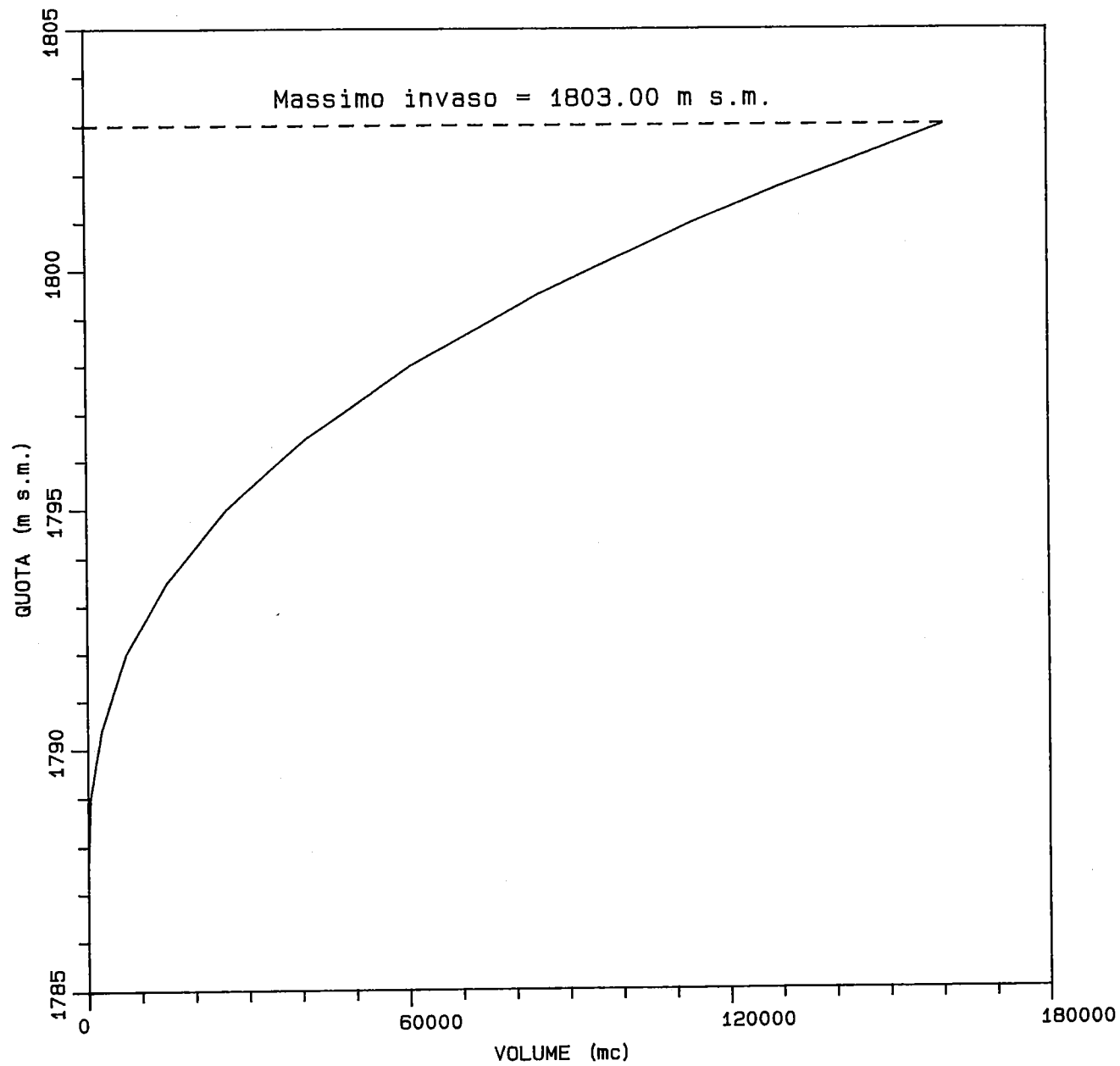
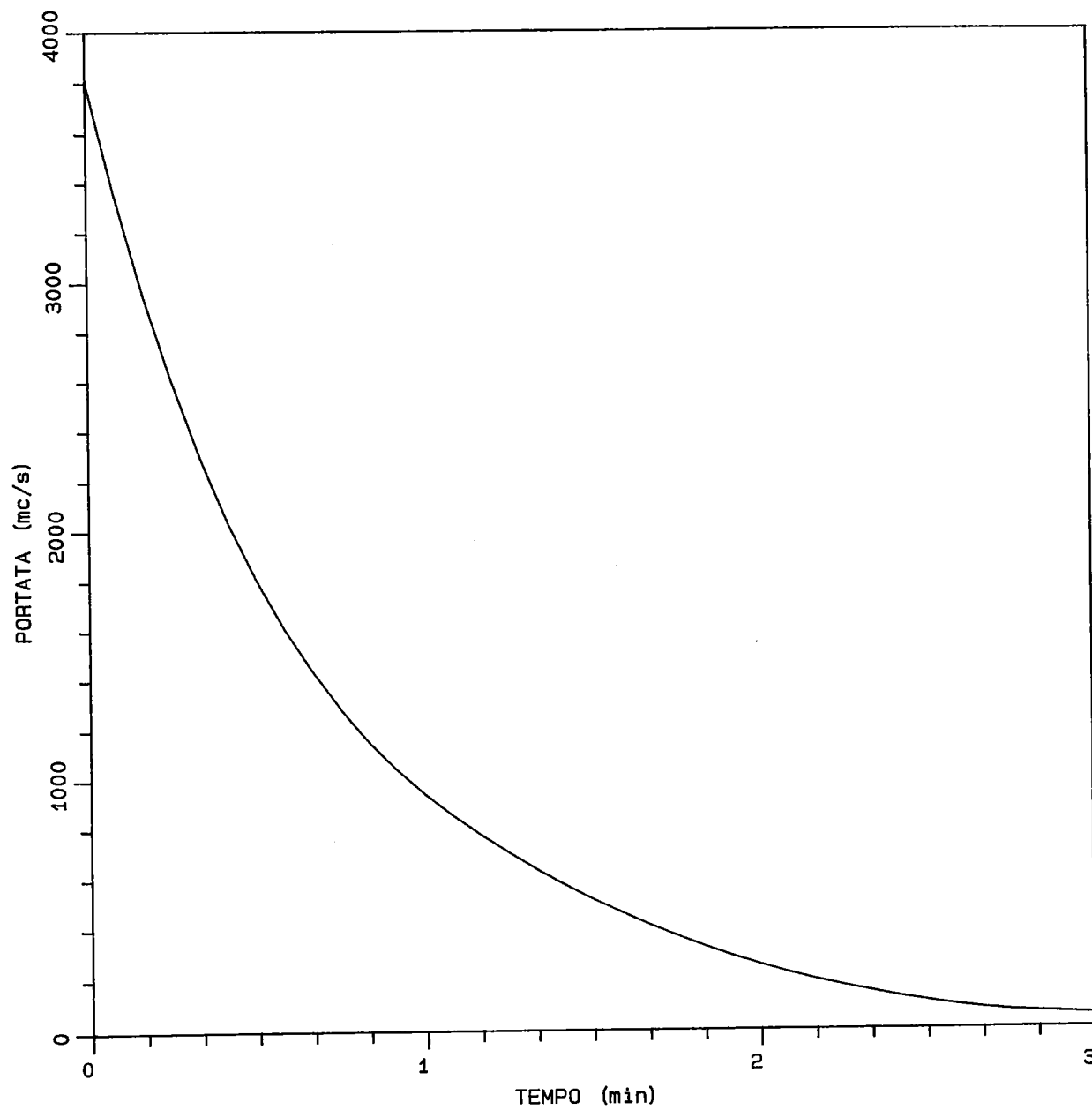
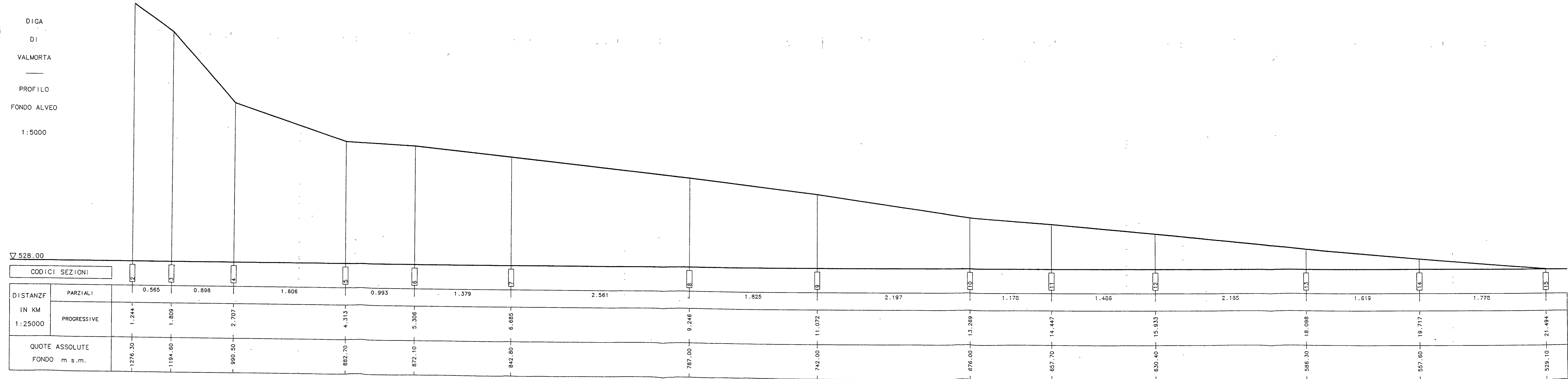


FIG. 3

DIGA
DI
VALMORTA
——
PORTATA
SCARICATA
IN FUNZIONE
DEL TEMPO

$Q_{max} = 3811 \text{ mc/s}$





DIGA
DI
VALMORTA
PROFILO
PELO LIBERO
MASSIMO
1:5000

RIFERIMENTO
PELO LIBERO
▽ 528.00
RIFERIMENTO
FONDO ALVEO
▽ 528.00

CODICI SEZIONI		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Distanze in km 1:25000	PARZIALI	0.565	0.898	1.606	0.993	1.379	2.561	1.825	2.197	1.178	1.486	2.165	1.619	1.778	
	PROGRESSIVE	1.244	1.809	2.707	4.313	5.306	6.685	9.246	11.072	13.269	14.447	15.933	18.098	19.717	21.494
QUOTE DEL PELO LIBERO m s.m.		1286.76	1201.30	997.29	887.69	873.98	844.99	789.24	743.77	678.46	661.01	634.48	588.97	559.93	531.58

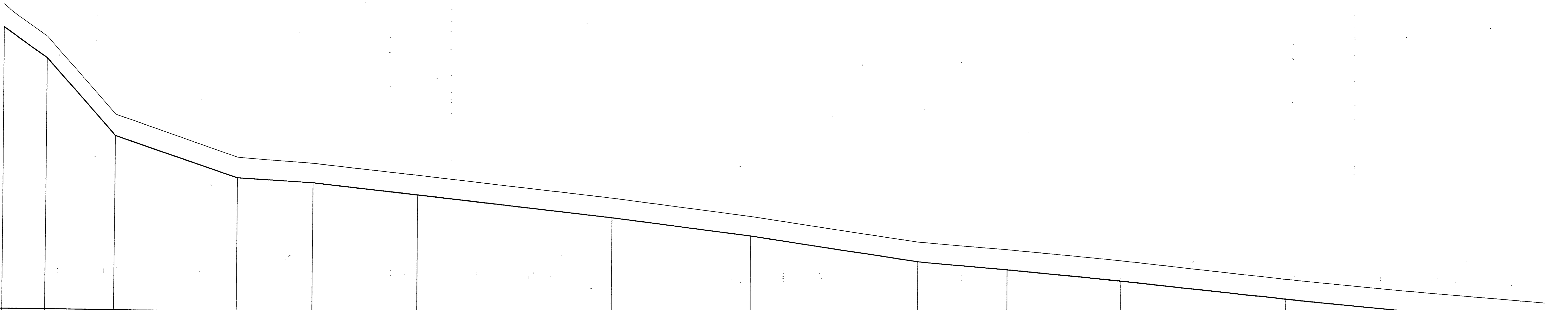


FIG. 6

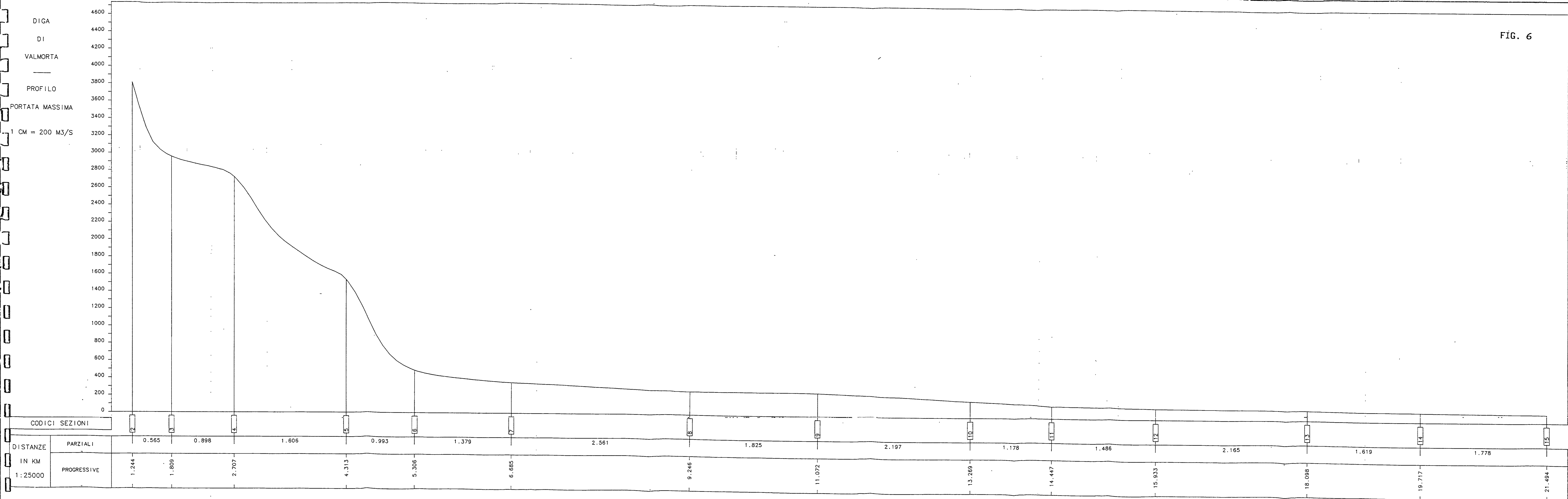
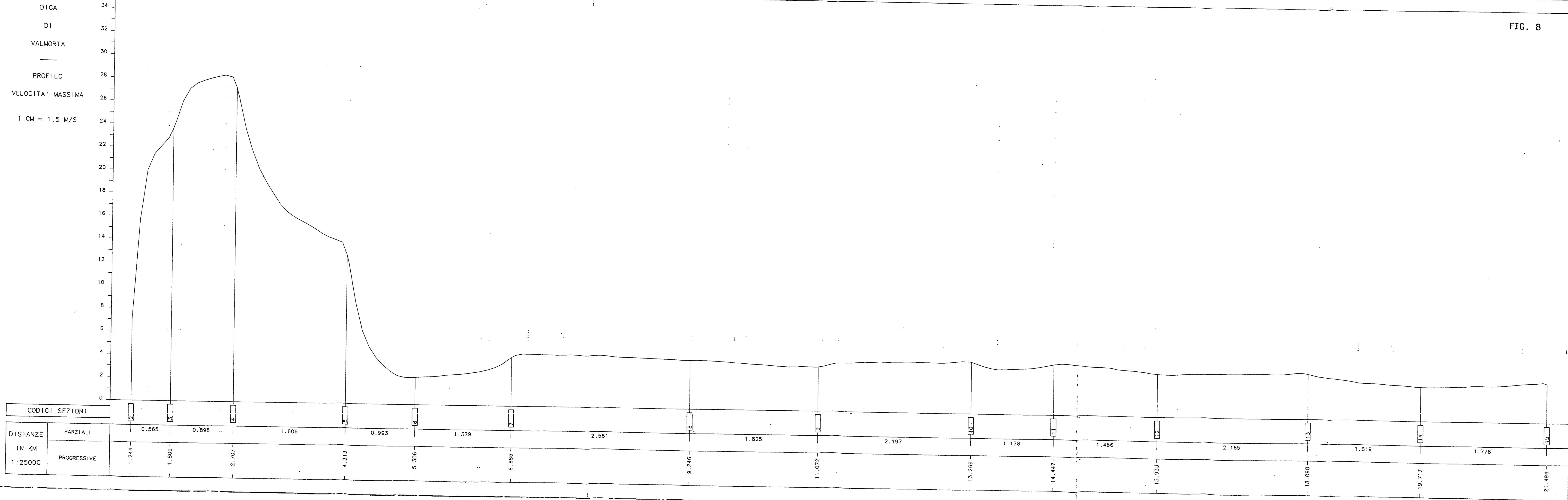
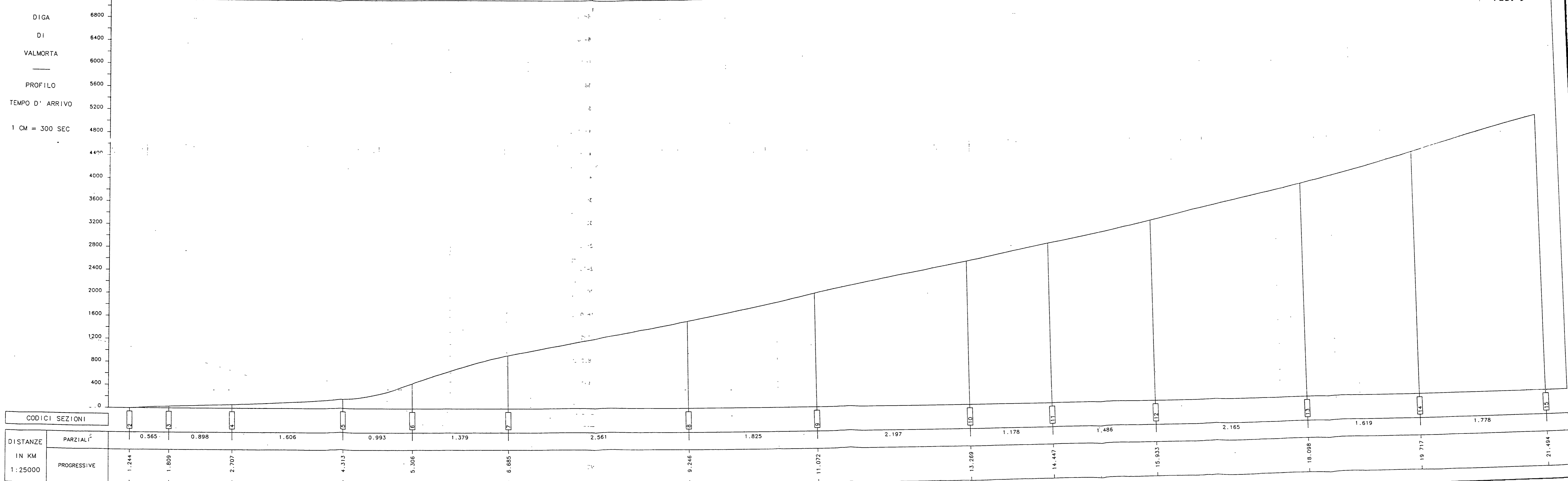


FIG. 8



DIGA
 DI
 VALMORTA
 —
 PROFILO
 VELOCITA' MASSIMA
 1 CM = 1.5 M/S

FIG. 9



P L A N I M E T R I E

DIGA DI VALMORTA

PLANIMETRIA DI INSIEME
DELLE AREE INONDABILI

TAV I

Scala 1:100000

