

EROSIONI DI FONDO A VALLE DI UNO SCARICO (*)

DOTT. ING. ALESSANDRO VERONESE

S. Hoffmann.
*Annali dei Lavori
Pubblici, Vol. 75, No 9
pp. 717-726, 1937.*

SOMMARIO: *La nota compendia lo studio e i risultati di due serie di esperienze, eseguite in laboratorio, sulle erosioni del fondo mobile a valle di uno scarico (modello). A conferma del grado di attendibilità del metodo seguito e dei risultati finali, le formule dedotte vengono applicate alle erosioni di fondo riscontrate in due casi su opere costruite. Per ultimo si espongono alcune norme da seguire nelle esperienze in modello per analoghe ricerche.*

A valle di un manufatto di scarico il fondo naturale è, generalmente, costituito da materiale incoerente (sabbia, ghiaia, ciottoli) di dimensioni e peso specifico variabili.

Tra la corrente all'uscita dallo scarico e quella a valle, a causa della variazione di velocità e di sezione, si produce un urto e conseguente formazione di vortici che danno luogo a scalzamenti di fondo, mentre il materiale scavato viene trasportato a valle. Il movimento del materiale nell'escavo ha perciò due componenti: una in senso verticale (sollevamento del materiale) ed una in senso orizzontale (trascinamento).

La differenza di energia posseduta dalla corrente a monte e da quella a valle viene dissipata in parte nell'urto tra le due masse d'acqua e dei materiali fra loro, e in parte dal lavoro di sollevamento del materiale. L'approfondamento nell'escavo però ha un limite, quando il cuscinio d'acqua che si è venuto formando ha profondità sufficiente per dissipare da sé tutta la differenza di energia predetta.

Poiché alla formazione del vortice che produce l'escavo influiscono non solo le condizioni idrauliche allo scarico (portata, velocità, altezza di caduta, ecc.), ma anche la disposizione costruttiva del manufatto e il peso specifico del materiale a valle, ne deriva che i casi che in pratica si presentano hanno tutti caratteristiche proprie molto dissimili fra loro, per cui non è possibile generalizzare il problema; mentre d'altro canto la trattazione

teorica del problema stesso (che in ogni modo riguarderebbe sempre casi particolari) è di notevole difficoltà.

Generalmente il costruttore in mancanza di elementi di giudizio e di calcolo, e volendo in ogni caso cautelarsi contro ogni eventualità, preventiva le opere di difesa del manufatto (taglione di guardia) in modo da raggiungere e oltrepassare la zona che vien comunemente denominata banco sodo o banco roccioso, e predispone provvedimenti in modo da evitare scalzamenti immediatamente a valle dell'opera. Ciò non ostante però è di grande interesse e in molti casi necessario conoscere preventivamente l'entità degli scavi e in particolare il loro approfondamento massimo e la distanza dal piede dell'opera del punto di massimo scavo.

La conoscenza di quanto sopra quindi non può che derivare da esperienze acquisite su opere costruite o da esperienze di laboratorio su modelli in scala ridotta.

PRIMA SERIE DI ESPERIENZE.

Scopo delle esperienze eseguite, su modello, nel Laboratorio di Idraulica della R. Università di Padova e i cui risultati vengono in appresso riassunti, fu quello di seguire in due casi, notevolmente differenti fra loro, l'anda-

(*) Studio compiuto sotto gli auspici del Comitato per l'Ingegneria del Consiglio Nazionale delle Ricerche, presso il Centro di Ricerche Idrauliche nella R. Università di Padova.

mento dei fenomeni di trascinamento e scavo, fissarne i risultati e trarne le conseguenze dalle quali, con qualche approssimazione, dedurre quale corrispondenza esista tra i fenomeni riscontrati in modello e quelli dell'originale.

Il primo esempio è costituito da uno scarico che proviene da un canale rettangolare *A* avente larghezza *b* e altezza d'acqua *h* (fig. 1). Esso versa in un bacino *B* relativamente

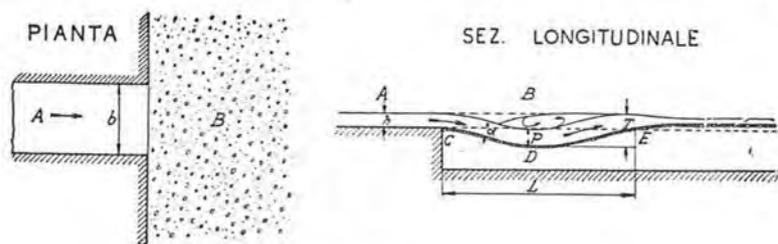


Fig. 1. — Disposizione schematica dell'installazione per la prima serie di esperienze

ampio, in modo che è trascurabile la velocità residua in esso. In tale bacino venne, di volta in volta, stesa della ghiaia di *varie dimensioni* in modo da costituire sempre il fondo a valle inizialmente alla stessa quota del fondo dello scarico a monte. Inoltre a valle il pelo liquido veniva regolato in modo da avere nel bacino *B* durante il funzionamento la stessa quota che a monte in *A*. Dello scarico furono fatti diversi modelli con varie scale comprese nel rapporto da 1/1 a 1/6,35.

Per ogni serie di esperienze, su ciascun modello, furono adoperate rispettivamente ghiaie del diametro medio di mm. 14,2; 9,1; 6; 4. Per ogni tipo di ghiaia vennero esaminati vari modelli nei quali i valori di *Q*, *b*, *h*, *v*, erano stabiliti in modo da rispettare la legge di similitudine (in relazione al rapporto λ fra le dimensioni lineari); per $\lambda = 1$ si pose:

<i>Q</i> = (portata in l/sec)	31,50
<i>b</i> = (larghezza in cm.)	32 =
<i>h</i> = (altezza d'acqua in cm.)	6,2
<i>v</i> = (velocità media all'uscita in m/sec)	1,59

Data la disposizione del modello in Fig. 1, la corrente all'uscita si disponeva radente al fondo mentre si veniva a formare un vortice principale superiore a senso di rotazione antiorario (corrente proveniente da sinistra).

La corrente erodeva il fondo fino ad un certo limite oltre il quale il fondo si stabilizzava; allora si poteva sospendere l'immissione dell'acqua e in seguito si eseguivano rilievi di fondo in modo da identificare l'escavo prodotto.

Si constatò che per ogni tipo di ghiaia a mano a mano che diminuivano i valori di *Q*, *h*, *b*, *v* (cioè di modello in modello) si arrivava ad un limite oltre il quale non si aveva alcun movimento di materiale in tal caso la velocità $v = v_0$ corrispondeva a quella *limite* di trascinamento. A tale valore limite corrispondeva un'altezza *h* d'acqua indicata con T_0 .

Quindi per ogni esperienza in cui la larghezza ha il valore indicato con *b*, se in luogo di avere la corrispon-



Fig. 2. — Installazione per la prima serie di esperienze

dente altezza d'acqua h e la velocità media v , si fosse avuto l'altezza T_o e la velocità v_o , la portata risultante Q_o ($Q_o = b T_o v_o$) non avrebbe dato luogo ad alcun movimento a valle.

Se ora si cerca un legame tra i valori di Q di ogni modello e il valore di T relativo allo stesso modello, a parità di d si può porre una relazione del tipo :

$$Q = k T^n$$

Si nota però che ponendo in diagramma, in coordinate logaritmiche, i valori corrispondenti di Q e T essi non si dispongono su una retta ma su una curva, e la curvatura di questa risulta tanto più accentuata quanto maggiore è il diametro del materiale e quanto più i valori di Q sono prossimi a quelli di Q_o .

Se invece si mettono in relazione i valori di $(Q - Q_o)$ con quelli di $(T - T_o)$ essi vengono a trovarsi su una retta (fig. 3).

Si riesce in tal modo a discriminare l'energia posseduta dalla Q_o (diretta al trascinamento = movimento in senso orizzontale) da quella $(Q - Q_o)$ (diretta all'escavo = movimento in senso verticale) e così pure la T_o (altezza cui corrisponde la v_o minima di trascinamento) dalla $(T - T_o)$ (altezza effettiva di scavo).

La seguente tabella riproduce i dati rilevati :

Colonna 1 = Valori del rapporto di similitudine.

Colonna 2 = Valori in l/sec. della portata Q .

Colonna 3-4 = Valori in cent. della larghezza b e dell'altezza h .

Colonna 5 = Valori in cent. dello scavo effettivo p .

Colonna 6 = Valori in m/sec. della velocità media di uscita.

Colonna 7 = Valori in cent. della profondità massima T del vortice.

Colonna 8-9-10-11 = Valori in cent. e l/sec. di T_o , Q_o , $(T - T_o)$ e $(Q - Q_o)$.

Nell'ipotesi che la legge che lega fra loro i valori di $(Q - Q_o)$, $(T - T_o)$, e d abbia la seguente espressione :

$$(Q - Q_o) = k d^m (T - T_o)^n$$

si è anzitutto ricavato il valore di n ponendo

in diagramma logaritmico (fig. 3), in relazione, fra loro i valori di $(Q - Q_o)$ come ascisse ed espressi in mc/sec., e quelli di $(T - T_o)$ come ordinate ed espressi in metri. È risultato che (per ogni valore di d) :

$$\log. (Q - Q_o) = 2,37 \log. (T - T_o)$$

cioè $n = 2,37$.

Per ricercare il valore di m esponente di d , posto $(T - T_o) = 1$ metro, si sono messi in relazione i valori di $(Q - Q_o)$ in mc/sec. (ascisse) e quelli di d (ordinate) espressi in millimetri. Si ricava :

$$\log. (Q - Q_o) = 1,56 \log. d$$

ossia :

$$m = 1,56.$$

Finalmente per $d = 1$ mm. risulta $k = 0,0345$.

Per cui in definitiva :

$$(Q - Q_o) = 0,0345 d^{1,56} (T - T_o)^{2,37} \quad (1_a)$$

oppure :

$$(T - T_o) = \frac{4,12}{d^{0,66}} (Q - Q_o)^{0,422} \quad (1_b)$$

È da notarsi però il fatto che mentre i punti $A = B = C$ del diagramma che mette in relazione il diametro d colla portata $(Q - Q_o)$ sono allineati fra loro, non lo è più il punto D corrispondente al diametro di 4 mm., esso è inferiore all'allineamento $A = B = C$.

Difatti in tali esperimenti come in altri del genere eseguiti nel nostro laboratorio si constata che l'approfondamento aumenta col diminuire del diametro del materiale, ma fino ad un certo limite, oltre il quale diminuendo ulteriormente il diametro del materiale esso rimane pressochè costante ⁽¹⁾. Tale diametro minimo varia però caso per caso. In quello in esame può ritenersi eguale a 5 mm. Quindi per d eguale o inferiore a tale limite la formula (1_b) si riduce alla seguente :

$$(T - T_o) = 1,43 (Q - Q_o)^{0,422} \quad (2)$$

⁽¹⁾ Tale fatto, riscontrato in precedenti esperimenti dal Prof. E. SCIMEMI, è stato da lui applicato come criterio di valutazione dell'escavo massimo per quelle applicazioni in cui non era possibile modificare le scale del modello mentre venivano adottate ghiaie di diametro successivamente diminuente.

Tale fatto osservato è di notevole importanza. Infatti nelle esperienze eseguite, mentre i materiali fino a 6 mm. si muovevano per la massima parte *rotolando* lungo il fondo quelli di diametro inferiore venivano *sollevati* dal vortice. Perciò quando i materiali sono di diametro tale che essi *rotolano* sul fondo la maggiore o minore difficoltà che si oppone al movimento determina la differenza tra

l'entità degli scavi, quando invece essi sono *sollevati* dal vortice il lavoro di innalzamento del materiale (a parità di peso specifico) è lo stesso qualunque sia il diametro del materiale, ciò che approssimativamente dà luogo a scavi di eguale entità.

Tale osservazione dà a pensare che logicamente quando in natura si abbiano valori di Q per cui il vortice che si forma abbia po-

$$q = Q/b$$

ESPERIENZE CON GHIAIA DA 14,2 mm.

TAB. I

λ	Q	b	h	p	v	T	T_0	Q_0	$T-T_0$	$Q-Q_0$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1 —	31,50	32 —	6,2	9,5	1,59	15,7	3,04	10,80	12,66	20,70
1,23	18,60	26 —	5 —	8,5	1,43	13 —	"	8,77	9,96	9,83
1,44	12,60	22 —	4,3	6 —	1,33	10,3	"	7,42	7,26	5,18
1,80	7,20	17,7	3,4	3,5	1,49	6,9	"	5,97	3,86	1,23
2,04	5,30	15,7	3,04	—	1,11	3,04	"	5,30	0	0

ESPERIENZE CON GHIAIA DA 9,1 mm.

1 —	31,50	32 —	6,2	15,5	1,59	21,7	1,9	5,35	19,8	26,15
1,23	18,60	26 —	5 —	12 —	1,43	17,5	"	4,34	15,6	14,26
1,44	12,60	22 —	4,3	10,5	1,35	14,8	"	3,67	12,9	8,93
1,80	7,20	17,7	3,4	8 —	1,49	11,4	"	2,96	9,5	4,24
2 —	5,60	16 —	3,1	7 —	1,13	10,1	"	2,68	8,2	2,92
2,16	4,64	14,8	2,9	6 —	1,08	8,9	"	2,47	7 —	2,17
2,46	3,30	13 —	2,5	4,5	1,01	7 —	"	2,17	5,1	1,13
2,92	2,15	11 —	2,1	2,8	0,93	4,9	"	1,84	3 —	0,31
3,28	1,66	9,9	1,9	0	0,88	1,9	"	1,66	0	0

ESPERIENZE CON GHIAIA DA 6 mm.

1,23	18,60	26 —	5 —	17 —	1,43	22 —	1,3	2,47	20,7	16,13
1,44	12,60	22 —	4,3	14 —	1,33	18,3	"	2,09	17 —	10,51
1,80	7,20	17,7	3,4	11 —	1,49	14,4	"	1,68	13,1	5,52
2 —	5,60	16 —	3,1	10 —	1,13	13,1	"	1,52	11,8	4,08
2,16	4,64	14,8	2,9	9 —	1,08	11,9	"	1,40	10,6	3,24
2,46	3,30	13 —	2,5	8 —	1,01	10,5	"	1,23	9,2	2,07
2,92	2,15	11 —	2,1	6 —	0,93	8,6	"	1,04	7,3	1,11
3,57	1,35	9,7	1,9	4 —	0,84	5,9	"	0,92	4,6	0,43
4,75	0,65	6,8	1,3	0	0,73	1,5	"	0,65	0	0

ESPERIENZE CON GHIAIA DA 4 mm.

1,80	7,20	17,7	3,4	14 —	1,49	17,4	0,9	1,00	16,5	6,20
2 —	5,60	16 —	3,1	12,5	1,13	15,6	"	0,91	14,7	4,69
2,16	4,64	14,8	2,9	11 —	1,08	13,9	"	0,84	13 —	3,80
2,46	3,30	13 —	2,5	9,5	1,01	12 —	"	0,74	11,1	2,56
2,92	2,15	11 —	2,1	8 —	0,93	10,1	"	0,62	9,2	1,53
3,57	1,55	9,7	1,9	7 —	0,84	8,9	"	0,55	8 —	1 —
6,35	0,28	4,9	0,9	0	0,63	0,9	"	0,28	0	0

tenza tale da sollevare tutto il tipo (o quasi) di materiale che è deposto sul fondo una relazione come la

$$(T - T_0) = k' d^{m'} (Q - Q_0)^{n'}$$

non si possa applicare, ma si debba prendere per valore di d quello *limite* (nel nostro caso $d = 5$ mm.).

La formula (1_b) quindi ha valore solo quando ha luogo rotolamento del materiale; mentre

per il modello

$$t = k' q^{0,422} \quad (4_b)$$

ed essendo per legge di similitudine $Q = \lambda^{2,5} q$ la (4_a) si può scrivere:

$$T = k \lambda^{1,055} q^{0,422}$$

da cui

$$T = \lambda^{1,055} t. \quad (5)$$

Ossia se ne deduce che nel caso in esame (a parità di peso specifico del materiale) il valore dello scavo nell'originale è quello ricavato

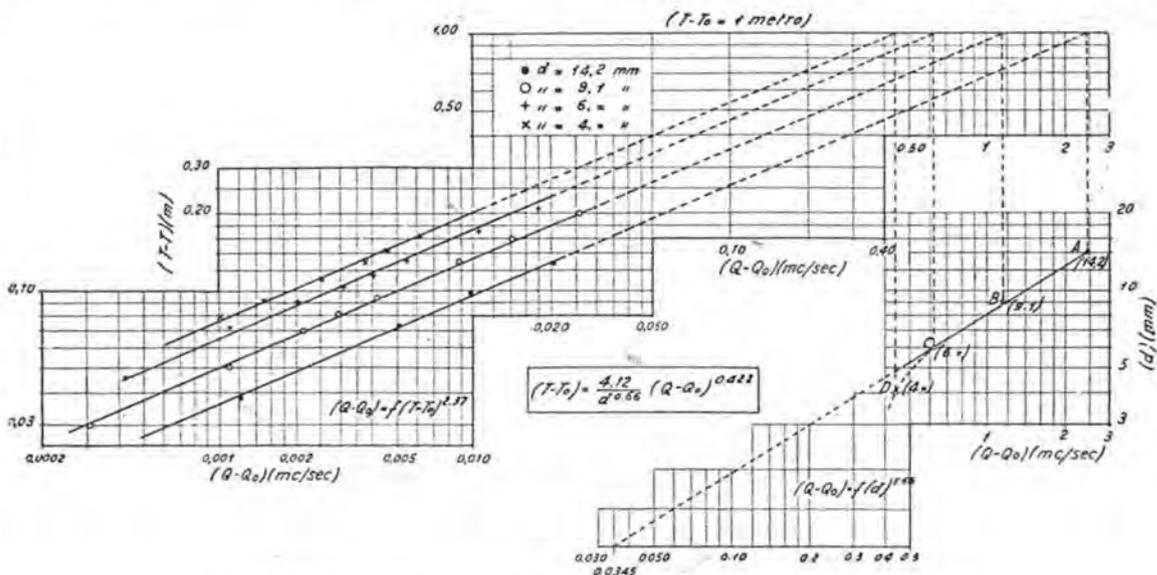


Fig. 3. — Grafico riassuntivo della relazione fra $(T - T_0)$, $(Q - Q_0)$ e d

quando ha luogo il sollevamento vale una espressione del tipo

$$(T - T_0) = k' (Q - Q_0)^{n'}$$

Riprendendo in esame la formula (1_b) quando T_0 e Q_0 sono trascurabili di fronte a T e Q essa diventa

$$T = \frac{4,12}{d^{0,66}} Q^{0,422} \quad (3)$$

Allora quando in due casi, simili al precedente, e simili fra loro (es. tra modello e originale), e supposto lo stesso diametro d , fra modello ed originale, oppure supposto che in entrambi i casi (del modello e dell'originale) il materiale venga ad essere nelle quasi totalità sollevato si può scrivere (esprimendo in lettere maiuscole i valori relativi all'originale e in minuscole quelli relativi al modello),

per l'originale

$$T = k' Q^{0,422} \quad (4_a)$$

dal modello moltiplicato per il rapporto delle dimensioni elevato a 1.055.

Per ciò che riguarda la distanza del punto di massimo scavo si è notato che la tangente dell'angolo di escavo α a valle rimane pressochè costante al variare di Q per ogni tipo di materiale sperimentato, mentre varia col diametro di esso, e precisamente il valore della tangente aumenta col diminuire del diametro medio del materiale. Se ne deduce che a parità di diametro medio di materiale valgono le leggi di similitudine, mentre il valore della funzione di α rispetto a d è risultata nel suo valore numerico di incerta determinazione.

Per ultimo è necessario osservare che l'estesa L dello scavo (fig. 1) dipende anche dal tempo di funzionamento, cioè mentre i punti C e D raggiungono la loro stabilizzazione assai presto, il punto E ha tendenza di spostarsi verso valle (sia pur lentamente) a mano a mano che procede il lavoro di erosione mentre

rimane costante la quota massima raggiunta dallo scavo.

Le deduzioni numeriche a cui si è giunti non possono riguardare che il caso particolare scelto (fig. 1). Esse non si possono generalizzare, tutt'al più potranno avere un valore indicativo qualora si abbiano condizioni poco discoste dal caso esaminato le cui principali sono :

Rapporto tra la larghezza dello scarico e l'altezza d'acqua eguale a 5,2.

Corrente veloce allo scarico.

Soglia allo scarico orizzontale.

Quota del fondo a valle eguale a quella a monte.

Velocità quasi nulla a valle.

SECONDA SERIE DI ESPERIENZE.

In questa seconda serie di esperienze si sono studiati gli scavi prodotti da una vena tracimante libera nell'aria, versante in un canale di larghezza eguale a quello di provenienza, e riempito di ghiaia sistemata in piano orizzontale (fig. 4).

Il canale di arrivo a monte e quello di scarico a valle avevano la larghezza di m. 0,50, l'altezza di caduta poteva essere variata entro certi limiti come pure la quota del piano delle ghiaie e la quota d'acqua allo scarico.

Le ghiaie avevano il diametro medio di 36,2 ; 21 ; 14,2 ; 9 mm.

precedente esaminato, esisteva per ogni tipo di ghiaia, una portata Q_0 ed un'altezza di acqua a valle T_0 per cui il movimento del ma-

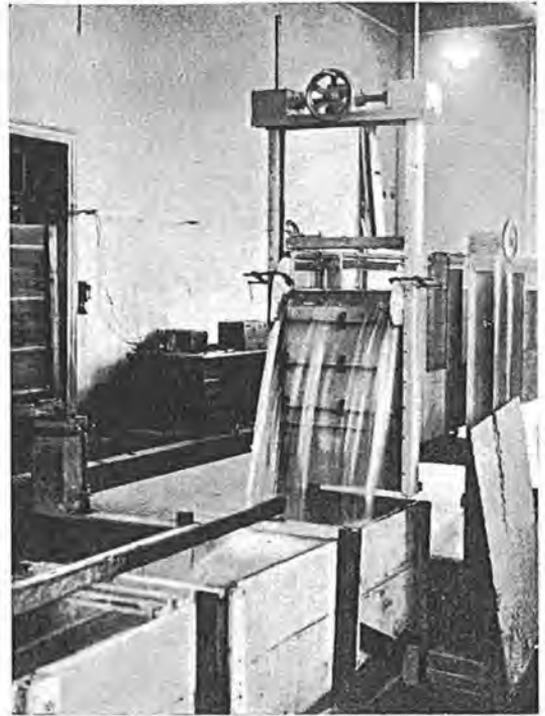


Fig. 5. — Installazione per la seconda serie di esperienze

PIANTA

SEZ. LONGITUDINALE

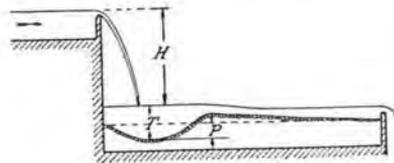
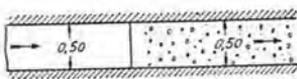


Fig. 4. — Disposizione schematica dell'installazione per la seconda serie di esperienze

Il primo gruppo di esperienze fu eseguito con $H = 1$ metro e con diverse portate ed eseguendo per ognuna di esse rilievi durante e dopo il funzionamento, che si faceva cessare non appena raggiunto il regime nell'entità dello scavo.

Si ebbe ad osservare che, come nel caso

teriale era nullo e quindi nullo lo scavo, cosa che si ebbe a verificare variando anche l'altezza d'acqua iniziale mediante rigurgito prodotto a valle dello scarico. Anche in tal caso quindi in luogo di mettere fra loro in relazione le quantità T e Q vennero messi in relazione (per ogni valore di d) i valori di $(Q - Q_0)$ e $(T - T_0)$.

I risultati delle esperienze sono raccolti nella seguente tabella in cui si ha :

Colonna 1 = 2 Valori della portata e $Q (Q - Q_0)$

in l/sec./ml.

Colonna 3 Valori della profondità di scavo in cm.

Colonna 4 = 5 Valori di T e $(T - T_0)$ in cm.

Anche nel caso esaminato in questa seconda serie di esperienze, la legge che lega

TAB. II

fra loro i valori di $(Q - Q_0)$, $(T - T_0)$, d e H viene espressa dalla seguente relazione:

$$(Q - Q_0) = k d^m H^n (T - T_0)^n$$

che per $H = 1$ metro (primo gruppo di esperienze) si riduce alla:

$$(Q - Q_0) = k d^m (T - T_0)^n$$

Per la determinazione dei valori di n , m , k venne eseguito lo stesso procedimento grafico del caso precedente per cui mettendo in relazione in diagramma logaritmico i valori di $(Q - Q_0)$ (mc/sec/ml) e di $(T - T_0)$ (m.) della precedente tabella si ottiene (fig. 6).
 $\log. (Q - Q_0) = 1,85 \log. (T - T_0)$
 $n = 1,85$

Posto poi $(T - T_0) = 1$ metro si sono messi in relazione fra loro i valori di $(Q - Q_0)$ e d , da cui risulta:

$$\log. (Q - Q_0) = 0,78 \log. d \quad m = 0,78$$

In fine per $d = 1$ mm. risulta $k = 0,09$

Per cui in definitiva si ha:

$$(Q - Q_0) = 0,09 d^{0,78} H^n (T - T_0)^{1,85} \quad (6_a)$$

oppure:

$$(T - T_0) = \frac{3,68}{d^{0,42}} H^n (Q - Q_0)^{0,54} \quad (6_b)$$

Per la ricerca del valore dell'esponente n' di H vennero eseguite esperienze con ghiaia da 14,2 mm. facendo variare l'altezza di caduta H e rilevando i valori che (a parità di portata) si ricavano per $(T - T_0)$ in funzione dei diversi valori di H .

I risultati sono compendati nella seguente tabella n. 3:

TAB. III

ESPERIENZE CON GHIAIA DA 14,2 mm.

1	2	3	4	5
8 —	0	—	10 —	0
22,50	14,15	99 —	22 —	12 —
33,15	25,14	98 —	27 —	17 —
47,30	39,30	96 —	32 —	22 —
60,10	52,10	96 —	35 —	25 —
22,50	14,50	133 —	23 —	13 —
33,15	25,15	132 —	29 —	19 —
47,30	39,30	130 —	33 —	23 —
60,10	52,10	130 —	37 —	27 —
22,50	14,50	69 —	21 —	11 —
33,15	25,20	67 —	27 —	17 —
47,30	40,60	65 —	30 —	20 —
60,10	52,70	65 —	33 —	23 —

$H = 1 m$
 $\frac{Q}{B}$
 13507m

*misurata
 diretta
 sul luogo*

ESPERIENZE CON GHIAIA DA 36,2 mm.

Q	Q-Q ₀	p	T	T-T ₀
1 24 —	0	0	9 —	0
2 37,40	13,40	6,5	16,5	7,5
3 51,60	27,60	6 —	20,5	11,5
4 62 —	38 —	7 —	23 —	14 —
5 74,40	50,40	8 —	27 —	18 —
6 27 —	0	0	19 —	0
7 42 —	15 —	6 —	27,5	8,5
8 55 —	28 —	8,5	30 —	11 —
9 64,60	37,60	10 —	32,5	13,5
10 74 —	47 —	11 —	34,5	15,5
11 82,80	55,80	12 —	35,5	16,5

ESPERIENZE CON GHIAIA DA 21 mm.

11 14 —	0	0	16 —	0
12 30 —	16 —	5,5	26,5	10,5
13 47,20	33,20	10 —	32 —	16 —
14 59,60	45,60	10,5	34,5	18,5
15 65,80	51,80	11 —	36 —	20 —
16 74,10	60,10	12 —	37 —	21 —
17 10 —	0	0	5 —	0 —
18 21,60	11,60	5 —	14,2	9,2
19 36,40	26,40	6,5	19,5	14,5
20 47,40	37,40	8 —	21,5	16,5
21 57 —	47 —	9 —	25 —	20 —
22 65 —	55 —	12 —	26 —	21 —
23 74,60	64,60	14 —	28 —	23 —

ESPERIENZE CON GHIAIA DA 14,2 mm.

24 8	0	0	10 —	0
25 22,40	14,80	5,5	22 —	12 —
26 37,60	29,60	9,5	28 —	18 —
27 51,20	43,20	11 —	31,5	21,5
28 64,60	56,40	14 —	36 —	26 —
29 3 —	0	0	3 —	0
30 12,30	9,30	8 —	13 —	10 —
31 22,10	19,10	10 —	17 —	14 —
32 33,10	30,10	12 —	21,5	18,5
33 42,80	39,80	13 —	23 —	20 —
34 51,20	48,20	17 —	27 —	24 —
35 57,80	54,80	18 —	28 —	25 —
36 65 —	62 —	20 —	29 —	26 —

ESPERIENZE CON GHIAIA DA 9,1 mm.

37 1 —	0	0	2 —	0
38 22,90	21,90	10 —	20 —	18 —
39 29 —	28 —	12 —	22 —	20 —
40 44 —	43 —	16 —	29 —	27 —
41 53,60	52,60	18 —	30 —	28 —
42 60,70	59,70	22 —	34 —	32 —

Ook in deze serie proeven moet men in acht nemen dat voor grond digmeters kleiner dan een zekere limiet (ca 5 mm) de "uitgraving" bijna dezelfde waarde heeft Verminderen van de grond dimensie 724 -

Gys
Hoffmans

- Colonna 1-2 Valori di Q e $(Q - Q_0)$ in l/sec./ml.
- " 2 " di H in cent.
- " 3-4 " di $(T - T_0)$ in cent.

valle dello scavo stesso, che risulta perciò funzione del tempo di immissione dell'acqua (1).

Nel diagramma logaritmico in fig. 7 vengono posti in relazione i valori ottenuti di $(T - T_0)$ (ordinate = in m) con quelli di H (ascisse = in m.) e ne risulta:

CONFRONTO TRA I RISULTATI DI ESPERIENZE SU MODELLI E I DATI RICAVATI SULL'ORIGINALE IN CASI DI SCARICHI ANALOGHI A QUELLI PRECEDENTEMENTE STUDIATI.

$\log. (T - T_0) = 0.225 \log. H \quad r' = 0.225$
 Si ha perciò in definitiva:

$(T - T_0) = \frac{3,68}{d^{0,42}} H^{0,225} (Q - Q_0)^{0,54} \quad (7_a)$

espressione che per T_0 e Q_0 trascurabili di fronte a T e Q diventa:

$T = \frac{3,68}{d^{0,42}} H^{0,225} Q^{0,54} \quad (7_b)$

1. Nel 1935 in questo Laboratorio fu preso in esame uno scarico di impianto industriale (3° Salto Pescara. S. M. E.) schematicamente indicato in fig. 8. Con una portata di piena di 685 mc/sec. si erano prodotti sull'opera originale gli scavi massimi indicati in figura.

Anche in questa serie di esperienze si ebbe ad osservare che per diametri della ghiaia inferiori ad un certo limite (circa 5 mm.) l'escavo ha approssimativamente la stessa entità al diminuire delle dimensioni della ghiaia.

Di tale scarico venne eseguito in quell'epoca un modello in scala 1/60 ($Q = 27.886 \text{ g}$), nel quale, con portata di mc/sec. $685/27886 = 0.026$ e adoperando ghiaia da 10 mm. di diametro medio si verificarono gli scavi indicati nella stessa figura 8.

Valgono quindi le osservazioni precedentemente fatte e riguardanti i risultati della prima serie di esperienze; perciò quando il materiale è sollevato dal vortice nella quasi sua totalità la (7_b) diventa

Il predetto caso in esame può essere messo a confronto con quello analogo della Prima Serie di Esperienze, però occorre riferirsi ad una porzione di larghezza minore (tanto per l'originale come per il suo modello) in modo che il rapporto tra tale larghezza ridotta e l'altezza d'acqua (m. 6,60 nell'originale e m. 0,11 nel modello) risulti eguale a 5,2 come fu assunto in tutti i casi esaminati nella Prima Serie di Esperienze. Perciò in luogo della larghezza di m. 55 (nell'originale) dato che l'altezza d'acqua è m. 6,60, si deve considerare una larghezza ridotta di metri $6,60 \times 5,2 = \text{m. } 34.30$ e di conseguenza

$T = 1,90 H^{0,225} Q^{0,54} \quad (8)$

Per casi simili alla serie esaminata indicando con λ il rapporto di similitudine e quando sieno trascurabili T_0 e Q_0 rispetto a T e Q (a parità di d) si può scrivere:

$T = k H^{0,225} Q^{0,54}$

$t = k h^{0,225} q^{0,54}$

essendo $H = \lambda h$ e $Q = \lambda^{1,5} q$

(1) Esperienze analoghe a quelle della seconda serie delle nostre ricerche furono eseguite dal Prof. SCHOKLITSCH di Bruna (Die Wasserwirtschaft - 1932, pag. 14). Gli esperimenti furono condotti con ghiaie del diametro medio di 0,5; 1,5; 3,2; 4,7; 5; 10; 15 mm. e si ricavò la seguente espressione in cui i simboli hanno lo stesso significato e le stesse dimensioni di quelli da noi adottati:

risulta: $T = \lambda^{1,035} t$

$T = \frac{4,75}{d^{0,32}} H^{0,2} Q^{0,57}$

Nel caso in esame si deduce perciò che (a parità di peso specifico del materiale) il valore dello scavo nell'originale può essere ricavato da quello risultante in modello moltiplicato per il rapporto delle dimensioni elevato a 1.035.

nella quale i valori numerici del coefficiente ed esponenti non differiscono molto da quelli sopra ricavati] la differenza molto probabilmente è in parte da attribuirsi al diverso valore dei tiranti a valle che ha notevole influenza sull'entità degli scavi.

Anche in tali esperienze si ebbe a constatare che dopo breve tempo di funzionamento il punto di massimo scavo (sua quota e distanza dal piede dell'opera) si stabilizza, mentre lentamente tende ad aumentare l'ampiezza a

Daarom worden voorgaande gedane opmerkingen/waarnemingen en terugkykend naar de resultaten v.d. 1^e serie proeven: Daarom wordt 7b wanneer het materiaal bijna geheel door de kolk is opgehoofd
 $T = 1,90 H^{0,225} Q^{0,54}$

* Soortgelijke onderzoeken als in de 2^e serie zijn uitgevoerd door Prof. van Bruna (Die Wasserwirtschaft - 1932 pag 14)

De experimenten werden gedaan met grind van 'n diameter van gemiddeld 0,5 1,5 3,2 4,7 5, 10 en 15 mm. Men verkreeg de volgende uitdrukking in welke de symbolen dezelfde betekenis ~~hadden~~ en dimensies hadden als de door ons ingevoerde

$$T = \frac{4,75}{d^{0,32}} H^{0,2} Q^{0,57}$$

In welke de cyferwaarden van de coëfficiënt en exponent niet veel verschillen van die welke boven zijn afgeleid

Colonna 1-2 Valori di Q e $(Q - Q_0)$ in l/sec./ml.
 » 2 » di H in cent.
 » 3-4 » di $(T - T_0)$ in cent.

Nel diagramma logaritmico in fig. 7 vengono posti in relazione i valori ottenuti di $(T - T_0)$ (ordinate = in m) con quelli di H (ascisse = in m.) e ne risulta:

$$\log. (T - T_0) = 0,225 \log. H \quad r' = 0.225$$

Si ha perciò in definitiva:

$$(T - T_0) = \frac{3,68}{d^{0,42}} H^{0,225} (Q - Q_0)^{0,54} \quad (7_a)$$

espressione che per T_0 e Q_0 trascurabili di fronte a T e Q diventa:

$$T = \frac{3,68}{d^{0,42}} H^{0,225} Q^{0,54} \quad (7_b)$$

Anche in questa serie di esperienze si ebbe ad osservare che per diametri della ghiaia inferiori ad un certo limite (circa 5 mm.) l'escavo ha approssimativamente la stessa entità al diminuire delle dimensioni della ghiaia.

Valgono quindi le osservazioni precedentemente fatte e riguardanti i risultati della prima serie di esperienze; perciò quando il materiale è sollevato dal vortice nella quasi sua totalità la (7_b) diventa

$$T = 1,90 H^{0,225} Q^{0,54} \quad (8)$$

Per casi simili alla serie esaminata indicando con λ il rapporto di similitudine e quando sieno trascurabili T_0 e Q_0 rispetto a T e Q (a parità di d) si può scrivere:

$$T = k H^{0,225} Q^{0,54}$$

$$t = k h^{0,225} q^{0,54}$$

essendo $H = \lambda h$ e $Q = \lambda^{1,5} q$

risulta: $T = \lambda^{1,035} t$

Nel caso in esame si deduce perciò che (a parità di peso specifico del materiale) il valore dello scavo nell'originale può essere ricavato da quello risultante in modello moltiplicato per il rapporto delle dimensioni elevato a 1.035.

Anche in tali esperienze si ebbe a constatare che dopo breve tempo di funzionamento il punto di massimo scavo (sua quota e distanza dal piede dell'opera) si stabilizza, mentre lentamente tende ad aumentare l'ampiezza a

valle dello scavo stesso, che risulta perciò funzione del tempo di immissione dell'acqua (1).

CONFRONTO TRA I RISULTATI DI ESPERIENZE SU MODELLI E I DATI RICAVATI SULL'ORIGINALE IN CASI DI SCARICHI ANALOGHI A QUELLI PRECEDENTEMENTE STUDIATI.

1. Nel 1935 in questo Laboratorio fu preso in esame uno scarico di impianto industriale (3° Salto Pescara. S. M. E.) schematicamente indicato in fig. 8. Con una portata di piena di 685 mc/sec. si erano prodotti sull'opera originale gli scavi massimi indicati in figura.

Di tale scarico venne eseguito in quell'epoca un modello in scala 1/60 ($Q = 27.886 q$), nel quale, con portata di mc/sec. $685/27886 = 0.026$ e adoperando ghiaia da 10 mm. di diametro medio si verificarono gli scavi indicati nella stessa figura 8.

Il predetto caso in esame può essere messo a confronto con quello analogo della Prima Serie di Esperienze, però occorre riferirsi ad una porzione di larghezza minore (tanto per l'originale come per il suo modello) in modo che il rapporto tra tale larghezza ridotta e l'altezza d'acqua (m. 6,60 nell'originale e m. 0,11 nel modello) risulti eguale a 5,2 come fu assunto in tutti i casi esaminati nella Prima Serie di Esperienze. Perciò in luogo della larghezza di m. 55 (nell'originale) dato che l'altezza d'acqua è m. 6,60, si deve considerare una larghezza ridotta di metri $6,60 \times 5,2 = m. 34.30$ e di conseguenza

(1) Esperienze analoghe a quelle della seconda serie delle nostre ricerche furono eseguite dal Prof. SCHOKLITSCH di Bruna (Die Wasserwirtschaft - 1932, pag. 14). Gli esperimenti furono condotti con ghiaie del diametro medio di 0,5; 1,5; 3,2; 4,7; 5; 10; 15 mm. e si ricavò la seguente espressione in cui i simboli hanno lo stesso significato e le stesse dimensioni di quelli da noi adottati:

$$T = \frac{4,75}{d^{0,32}} H^{0,2} Q^{0,57}$$

nella quale i valori numerici del coefficiente ed esponenti non differiscono molto da quelli sopra ricavati; la differenza molto probabilmente è in parte da attribuirsi al diverso valore dei tiranti a valle che ha notevole influenza sull'entità degli scavi.

assumere come valore della portata nell'originale $Q = 685 (34.30 : 55) = 685 \times 0,6233 = 427 \text{ mc/sec.}$

In modello adoperando ghiaia da 10 mm. si ottenne uno scavo massimo $t = 0.143$ metri essendo ed $q_0 = 0.010 \times 0.6233 = 0.0062$

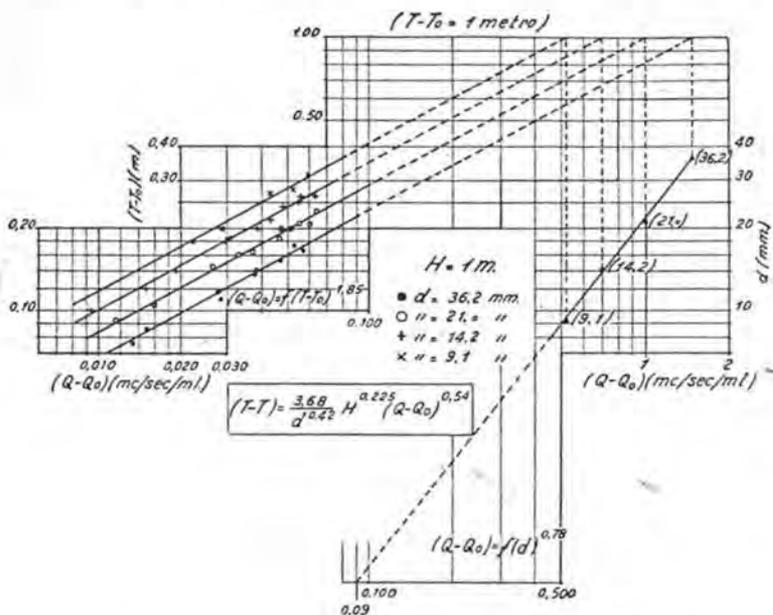


Fig. 6. — Grafico riassuntivo della relazione fra $(T - T_0)$, $(Q - Q_0)$ e d

mc/sec. e $t_0 = 0,04$ metri applicando la (1)_b si ottiene:

$$(t - t_0) = \frac{4,12}{10^{0,11}}$$

$(0.0162 - 0.0062)^{0,422} = 0,130 \text{ m.}$ da cui:

$$t = 0,13 + 0,04 = 0,17 \text{ in luogo di } 0,143$$

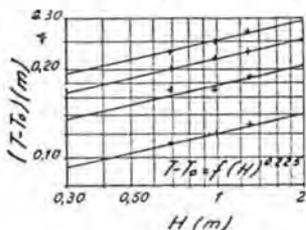


Fig. 7. — Grafico riassuntivo della relazione fra $(T - T_0)$ e H

risultati fra loro poco diversi. Adoperando in seguito ghiaia da 5 mm. si ottennero risultati quasi eguali ai precedenti; ciò significa che nel particolare caso esaminato il diametro di 10 mm. era il diametro limite per cui vale l'espressione

$$T = \frac{4,12}{10^{0,66}} Q^{0,422} = 0.90 \times Q^{0,422}$$

Nell'originale, il fondo a valle dello scarico è costituito da sabbia mista a ghiaia le cui dimensioni arrivano fino a 50 mm. Si trovano inoltre ciottoli di maggiori dimensioni. Data la natura del fondo così costituito si ha motivo da ritenere che il materiale per la massima parte venga appunto sollevato durante la piena, per cui applicando la precedente espressione risulta:

$$T = 0,90 \times 427^{0,422} = 11,70 \text{ m.}$$

in luogo di m. 9,10 misurati nell'originale.

Confrontando in fine l'escauo massimo prodotto in natura (m. 9,10) da quello ottenuto in modello (m. 0.143) si ha: $9,10/0.143 = 64$ ed essendo il valore di $\lambda = 60$ risulta $T = \lambda^{1,016} t$

II. Altro esempio che si crede opportuno riportare è fornito dagli scalzamenti a valle della Diga della Rocchetta (Torrente Noce) di cui

è riportato schematicamente l'impianto in fig. 9.

La diga ad arco è sfiorante ed ha uno sviluppo in sommità di circa m. 35 cui corrisponde una corda di circa m. 25 (1). In seguito alla piena del 30 giugno 1933 in cui l'acqua si elevò di circa m. 1,50 sul ciglio della diga si ebbero gli scalzamenti massimi indicati in figura e dovuti ad una portata di circa mc/sec. 160 sfioranti sopra la diga.

Lo scavo massimo T in corrispondenza del piede della diga risultò approssimativamente di m. 8.

Applicando la (8) per le erosioni a valle della diga si ha $Q =$ portata in mc/sec. per ml. $= 160/25 = 6,4 \text{ mc/sec/ml.}$

$H =$ Altezza di caduta $= \text{m. } 11,40.$

$T = 1,90 \times 9,40^{0,225} \times 6,4^{0,54} = \text{m. } 8,60$ in luogo di m. 8 ricavati dai rilievi. Perciò

(1) LUIGI MILIANI: *Esperienze su modelli idraulici per lo studio delle opere di sistemazione del bacino del Noce in località « Rocchetta »*, (Trento) in « Annali dei Lavori Pubblici » 1931, fasc. 10.

praticamente coincidono i dati rilevati con quelli ricavati dalla (8).

In natura il materiale ha un diametro medio di circa 100 mm. Se tale cifra fosse stata posta nella formula (7_b) in luogo di ottenere gli scavi riscontrati in natura si sarebbero ottenuti risultati molto minori, mentre applicando le espressioni che tengono conto del diametro limite si è quasi ottenuta la corrispondenza tra il valore calcolato e quello rilevato, il che significa che, presumibilmente, a valle della diga tutto il materiale sotto l'azione del vortice viene sollevato durante la piena.

riguardo alla quota d'acqua a valle, quota che ha notevole influenza sull'entità degli scavi.

c) Eseguire gli esperimenti in condizioni che sieno le più lontane possibili da quelle limiti.

d) Identificare la posizione e il senso

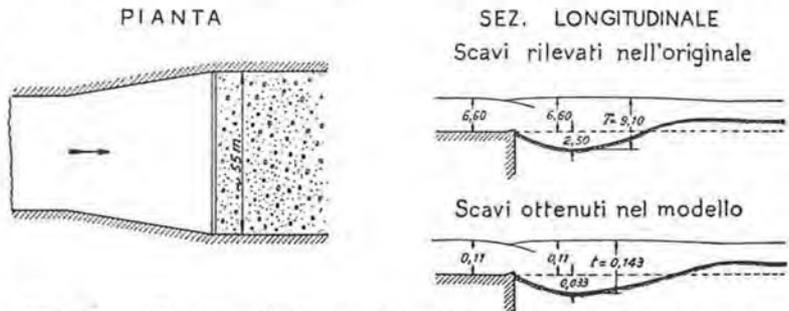


Fig. 8. — Rappresentazione schematica degli escavi verificatisi in originale e in modello dello scarico 3° Salto Pescara (S. M. E.)

CONCLUSIONI.

Da quanto esposto e dalle risultanze dei rilievi riportati risulta che le formule (2) e (8) direttamente applicate potrebbero dare, in casi analoghi a quelli schematizzati nel presente studio, risultati che si approssimano alla realtà, non solo, ma che sono cautelativi al

di rotazione del vortice principale e dei secondari a valle dello scarico, nonché la zona percorsa dalla corrente principale in modo da poterne individuare azioni ed effetti. Allo scopo sarà utile che una delle pareti verticali del modello a valle sia costituita in vetro, in modo da poter osservare il movimento dei materiali durante le esperienze.

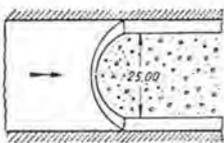
e) Eseguire serie di esperienze con ghiaie di volta in volta di diverso diametro e con portate diverse, in modo da ricavare il valore di d minimo e l'esponente da assegnare a λ per il trasferimento dei risultati dello scavo dal modello all'originale.

f) Adoperare materiale mobile vagliato da quello del corso d'acqua in esame, in modo da non aver dubbi nei riguardi della eguaglianza del peso specifico del materiale esaminato in modello e quello dell'originale.

g) Conoscere se in natura, nelle condizioni che interessano, il materiale è al limite o meno di venir sollevato dal vortice erodente.

h) Se i risultati delle esperienze condotte in una sola scala non sono conclusive, ripetere le esperienze in scale diverse.

PIANTA



SEZ. LONGITUDINALE

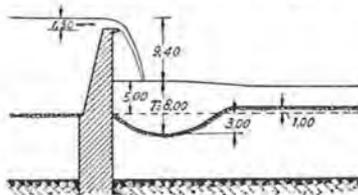


Fig. 9. — Rappresentazione schematica degli escavi verificatisi a valle della diga della Rocchetta

riguardo. Una conoscenza più precisa non può però essere fornita che da particolari esperimenti eseguiti su modelli.

Al fine però che i risultati ottenuti sperimentalmente abbiano corrispondenza col'originale in modo da ricavare dati quantitativi che sieno approssimativamente attendibili, è bene tener presenti le seguenti norme:

a) Adoperare un rapporto di similitudine (λ) che sia il minimo possibile, compatibilmente colle possibilità di installazione ($\lambda \leq 50$).

b) Riprodurre l'originale, in modello, in modo esatto anche nei particolari, con speciale