



U N I V E R S I T A D I N A P O L I
F A C O L T A D I I N G E G N E R I A
I S T I T U T I I D R A U L I C I

CARLO MONTUORI

LA FORMAZIONE SPONTANEA DEI TRENI D'ONDE
SU CANALI A PENDENZA MOLTO FORTE

CARLO MONTUORI

La formazione spontanea dei treni d'onde su canali a pendenza molto forte (*) (**)

S o m m a r i o

Una larga serie di osservazioni relative alla presenza di treni d'onde su canali a forte pendenza, eseguita negli ultimi anni in Russia, fornisce lo spunto per una sintesi degli studi attinenti a tale fenomeno, compiuti finora sia in campo teorico, sia in campo sperimentale.

I risultati delle teorie vengono poi utilizzati per mettere in evidenza, nella discussione dei risultati sperimentali, due parametri, che regolano l'apparizione e la entità dei treni d'onde.

I. - GENERALITÀ.

È noto che le correnti defluenti in canali a pendenza molto forte possono presentare dei particolari fenomeni, che conferiscono ad esse un aspetto sensibilmente diverso da quello delle correnti lente o veloci, defluenti in canali poco inclinati: ci si riferisce al fenomeno della aerazione spontanea (correnti « rapide ») e a quello della formazione, senza cause perturbatrici apparenti, di intumescenze, che per il loro caratteristico aspetto, si indicheranno come « treni d'onde ».

Per lo studio dell'aerazione, or sono circa dieci anni, fu intrapresa a Napoli una ricerca sperimentale e teorica, condotta dal prof. M. Viparelli e portata a termine recentemente; con essa si è riusciti a penetrare il meccanismo della aerazione spontanea delle correnti « rapide », e si è ora in grado di conoscere, in un moto uniforme, la distribuzione della portata totale tra vari punti di una sezione. I risultati di tale ricerca sono stati già pubblicati su questa Rivista [1].

Oggetto del presente studio è il secondo dei fenomeni

anzidetti: la formazione dei treni d'onde, noti nella letteratura inglese col nome *roll-waves*.

Questi si presentano, in genere, ad una certa distanza dall'imbocco, come delle intumescenze più o meno spumeggianti, susseguentisi ad intervalli piuttosto regolari, che danno al profilo della corrente un aspetto caratteristico a denti di sega (fig. 1).



Fig. 1. - Treni d'onde sul T.te Grunnbach [13].

Percorrendo il profilo di un dente da valle a monte (fig. 2) si riscontra prima l'intumescenza, seguita da un tratto concavo verso l'alto, nel quale la corrente può essere priva di schiuma e che tende a disporsi parallelo al fondo del canale, cui fa seguito un'altra intumescenza.

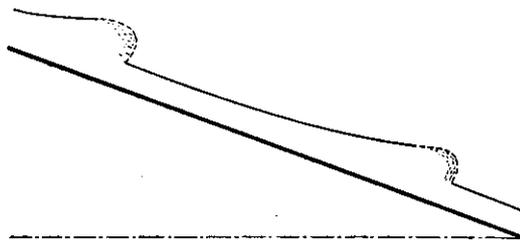


Fig. 2. - Aspetto schematico dei treni d'onde.

(*) Ricerca compiuta sotto gli auspici dell'ANIDEL.

(**) Nella redazione di questo articolo mi sono avvalso del materiale bibliografico raccolto e riordinato in collaborazione con l'ing. Mario Gramignani, con il quale avevamo in programma di compilare una nota, che riferisse, in sintesi, delle ricerche finora compiute sul fenomeno dei treni d'onde. Tra l'altro l'ing. Gramignani aveva contribuito alla preparazione del materiale contenuto nel paragrafo descrittivo delle indagini sperimentali, ma soprattutto, avvalendosi della conoscenza della lingua, aveva reso possibile l'interpretazione dei testi russi.

Ringrazio qui il collega Gramignani, che per impegni sopravvenuti non ha potuto proseguire nella collaborazione, di aver voluto mettere a mia disposizione il suo contributo.

Talvolta l'altezza idrica nella coda dell'onda raggiunge valori molto bassi, fino a dare l'illusione di una pressochè totale interruzione della corrente.

Si è detto che, spesso, le onde si succedono con una certa regolarità: tuttavia celerità ed altezze sono diverse da un'intumescenza all'altra, per cui accade che una di esse raggiunga la precedente, assorbendola e, in certa guisa, sommandosi a questa. Comunque sembra che il succedersi delle onde sia più regolare man mano che ci si sposta verso valle.



Fig. 3. - Effetti dell'arrivo di una intumescenza al dissipatore.
(per gentile concessione della CIS).

Il formarsi di treni d'onde non è certamente nè incompatibile con l'aerazione della corrente, nè subordinato alla presenza di essa, nel senso che tali onde sono state riscontrate, sia in correnti aerate, sia in correnti prive di aerazione.

In genere l'aumento della portata produce una riduzione dell'entità del fenomeno fino alla sua totale scomparsa. Per questo motivo la presenza dei treni d'onde difficilmente produce esondamenti lungo lo scivolo, in quanto le altezze idriche massime raggiunte dalle intumescenze, anche se superano le altezze del moto uniforme per la massima portata per la quale era stata proporzionata l'opera, sono in genere di entità tale da essere facilmente contenute nel franco delle sponde ⁽¹⁾, che, anche per le modeste entità delle altezze idriche, è sempre relativamente molto grande.

Inconvenienti, invece, possono derivarne alle opere a valle dello scivolo e, in particolare, al dissipatore e al

⁽¹⁾ Solo recentemente [1] la conoscenza del meccanismo di aerazione di una corrente molto veloce ha consentito di precisare il concetto di altezza idrica in una corrente aerata: pertanto i franchi venivano, di solito, fissati con larghezza.

primo tronco di canale a pendenza debole che eventualmente segua il dissipatore. Può avvenire, infatti, che il dissipatore, pur funzionando regolarmente per la massima portata, si riveli, per le piccole portate, insufficiente a spegnere la energia sovrabbondante della corrente pulsante di monte, consentendo sia la propagazione del moto ondoso nella corrente lenta di valle, sia addirittura l'esondazione dell'acqua all'arrivo di ogni intumescenza al piede dello scivolo (figg. 3 e 4).

La possibilità dell'insorgere di treni d'onde era nota da più di mezzo secolo (G. Maw [2] 1884). Ciò nonostante, e per quanto mi risulti, le constatazioni speri-



Fig. 4. - Effetti dell'arrivo di una intumescenza al dissipatore
(per gentile concessione della CIS).

mentali furono limitate in seguito ad alcune osservazioni su canali di opere, in cui, tra l'altro, quasi mai si era avuta la possibilità di misurare le portate: ciò probabilmente per le difficoltà derivanti dal fatto che il maggior numero di canali a pendenze molto forti funziona solo sporadicamente e per tempi molto brevi.

Recentemente in Russia [3] il largo impiego di canali fortemente inclinati, sia negli scarichi di superficie, sia nelle opere di adduzione per impianti irrigui, ha, ad un tempo, sollecitato gli studiosi di quel paese a ricercare dei criteri, che permettano di progettare canali siffatti, senza che in essi si stabilisca il moto ondoso in parola, ed è stato spunto per una serie notevolmente estesa di osservazioni sulle opere già costruite.

D'altra parte la teoria, attraverso lo studio del moto vario in correnti gradualmente variate, condotto da alcuni AA. con procedimenti formalmente diversi, era giunta subordinatamente ad alcune ipotesi limitative, a dimostrare che, in particolari condizioni, l'esaltazione di onde comunque piccole, rende, per così dire, instabile un moto uniforme in canali a pendenze molto forti. Il risultato è subordinato al verificarsi di una relazione che lega la

velocità di moto uniforme al numero di Froude e ad un parametro di forma, secondo un coefficiente di proporzionalità dipendente dalla formula di resistenza adottata.

Di qui alla conclusione che il sorgere dei treni d'onde sia da attribuirsi alla dimostrata esaltazione di piccole onde, il passo è breve.

I due sperimentatori russi, Fedorov [4], [5], e Arseniscvili [6], [7], richiamandosi appunto a tale interpretazione, hanno ritenuto, a conclusione delle loro ricerche sperimentali, che il risultato della teoria sia insufficiente a prevedere il formarsi o meno dei treni d'onde. Essi hanno fornito, perciò, due criteri empirici che, a loro parere, permettono di realizzare, nell'ambito delle pratiche applicazioni, canali che non siano sede di treni d'onde, assegnando ad essi sezioni idriche, cui corrispondano opportuni valori di alcuni parametri geometrici.

Nei paragrafi che seguono, prima si cercherà di puntualizzare quanto è stato finora fatto sull'argomento sia dalla ricerca teorica, sia da quella sperimentale, discutendone i risultati. Al termine della nota, poi, si mostrerà che, contrariamente a quanto ritenuto dagli sperimentatori citati, una interpretazione dei risultati della teoria permette di inquadrare in essa, con soddisfacente accordo, i risultati sperimentali.

2. - ESALTAZIONE DI PICCOLE ONDE ALLA STREGUA DEI RISULTATI TEORICI.

La propagazione di un'onda in una corrente in moto gradualmente variato, o lineare, viene studiata di norma in base a leggi di due diversi tipi, a seconda che possa ritenersi che il passaggio dell'onda invalidi o meno la gradualità preesistente.

Nel primo caso sono le stesse equazioni del moto lineare che vengono direttamente elaborate, in quanto il passaggio dell'onda può guardarsi come un particolare fenomeno di moto vario gradualmente variato.

Nel secondo caso, ad esempio per onde a fronte ripido, si ricorre a due equazioni [8], derivanti dalla applicazione dell'equazione globale dell'equilibrio dinamico e di quella di continuità ad un breve tronco di corrente, che racchiude il fronte d'onda, e limitato tra due sezioni, in cui si può ritenere di nuovo valida l'ipotesi di gradualità.

Il problema è stato oggetto di studio da parte di una foltissima schiera di ricercatori, che lo hanno affrontato nei molteplici aspetti che esso presenta. Particolarmente interessanti ai fini di questa nota, sono alcune conclusioni cui giungono D. Bonvicini [9], P. Massé [10], V. V. Vedernikov [11], che esaminano il caso in cui il moto della corrente si conservi lineare al passaggio dell'onda; A. Craya [12], il quale, invece, esamina lo schema di intumescenza a fronte ripido, discutendo in particolare il caso in cui l'altezza di essa sia molto piccola in confronto alle altezze idriche.

Più precisamente il Massé, il Vedernikov ed il Craya si riferiscono ad un moto vario che si sostituisca ad un moto uniforme; i primi due studiando la variazione con il tempo, e quindi con l'ascissa, della pendenza superficiale nel punto di passaggio dall'uno all'altro tipo di moto (fronte d'onda) (fig. 5); il terzo studiando la varia-

zione dell'altezza dell'intumescenza piccolissima da lui considerata (fig. 6). Il Bonvicini, invece, si riferisce ad un moto vario che possa essere considerato come la sovrapposizione di un moto ondoso di legge sinusoidale ed ampiezza iniziale molto piccola, e determina in esso

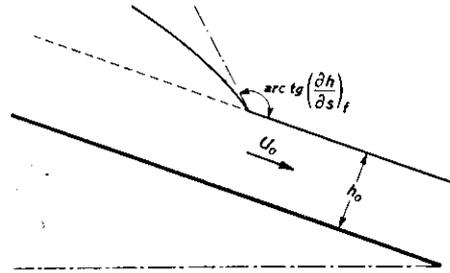


Fig. 5. - Schema di intumescenza a fronte inclinato.

la variazione con il tempo, e quindi con l'ascissa, dell'altezza delle onde (2).

Il Vedernikov considera l'inverso della pendenza superficiale sul fronte d'onda $\left(\frac{\partial s}{\partial h}\right)_f$, che è uguale al prodotto della larghezza l in superficie per la derivata $\left(\frac{\partial s}{\partial \sigma}\right)_f$. L'elaborazione delle equazioni del moto gradualmente variato, per canali cilindrici di forma qual-

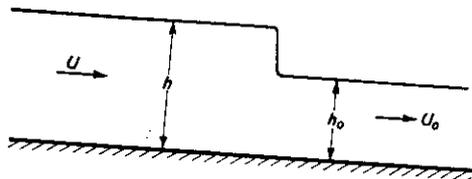


Fig. 6. - Schema di intumescenza a fronte ripido.

siasi, permette all'A. di scrivere la legge di variazione nel tempo della $\left(\frac{\partial s}{\partial \sigma}\right)_f$, che, nel caso di onde discendenti, propagantisi cioè con celerità maggiore della velocità media, si scrive:

$$(1) \quad \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial s}{\partial \sigma} \right)_f = \frac{3}{2} \sqrt{\frac{g}{\sigma_0 l_0}} \cdot N_0 + g \left(\frac{\partial s}{\partial \sigma} \right)_f \frac{i}{U_0} \left[\frac{p}{2} - \frac{m M_0 U_0}{\sqrt{g \frac{\sigma_0}{l_0}}} \right].$$

Nella (1) si è indicato con M la quantità $M = 1 - R \frac{d\chi}{d\sigma}$ e con N la quantità $N = 1 - \frac{1}{3} \frac{\sigma}{l} \frac{dl}{d\sigma}$, che dipendono dalla forma della sezione; in particolare N assume valori positivi per tutte le sezioni aperte o chiuse comunemente adoperate (3).

(2) Le ipotesi assunte ed alcune fasi dei procedimenti sono espone ed esaminate in maggior dettaglio in una nota dal medesimo titolo della presente da pubblicare sugli Atti dell'ANIDEL.

(3) Per i simboli vedasi anche elenco alla fine dell'articolo.

La discussione della (1), fatta per onda discendente positiva, permette al Vedernikov di concludere che l'acclività della superficie libera sul fronte cresce certamente con il tempo, se la velocità di moto uniforme U_0 è maggiore di una velocità U_c'' , data dalla seguente espressione:

$$(2) \quad U_c'' = \frac{p}{2 m M_0} \sqrt{g \frac{\sigma_0}{l_0}}.$$

Il Massé, che si riferisce allo stesso schema meccanico considerato in seguito dal Vedernikov, determina, con procedimenti matematici sensibilmente diversi, delle relazioni analoghe alle (1) e (2), valide per canali larghissimi, e che risultano un caso particolare di queste.

Il Craya, invece, studiando un'onda a fronte ripido di altezza molto piccola, determina la seguente espressione:

$$(3) \quad \frac{\sqrt{h} - \sqrt{h_0}}{\sqrt{h_{s=0}} - \sqrt{h_0}} = e^{-\frac{A_1}{U_0 + \sqrt{g h_0}} \cdot s},$$

che dà l'altezza h a monte del fronte ad un'ascissa s , in funzione del valore $h_{s=0}$ di detta altezza ad un'ascissa iniziale $s = 0$, di U_0 , h_0 e del parametro A_1 definito da:

$$A_1 = \frac{g i}{U_0} \left(1 - \frac{U_0}{2 \sqrt{g h_0}} \right).$$

La discussione della (3) permette di determinare, analogamente a quanto fatto dal Vedernikov con la (1), la espressione di una velocità limite U_c'' :

$$(4) \quad U_c'' = 2 \sqrt{g h_0},$$

tale che, per $U_0 > U_c''$, l'altezza sul fronte aumenta con l'ascissa s e con il tempo t .

L'espressione (4), così come quella dedotta del Massé, fornisce lo stesso valore di U_c'' dato dalla (2), per il caso particolare di sezione larghissima e formula di resistenza di Chézy.

Il Bonvicini, infine, nella discussione dei risultati delle sue elaborazioni, eseguite nella ipotesi di onde molto piccole, determina una condizione cui corrisponde un aumento con il tempo, e quindi con l'ascissa, dell'ampiezza del moto ondoso; condizione che, per canali rettangolari di larghezza finita e nel caso che la legge di resistenza sia espressa dalla formula di Gaukler-Strickler, risulta praticamente l'equivalente della (2).

I risultati teorici qui richiamati vengono da alcuni AA., e tra questi il Craya e il Vedernikov, messi in connessione con il manifestarsi dei treni d'onde. Questi potrebbero trovare la propria origine nelle perturbazioni, sia pure di piccolissima entità, che nascendo all'imbocco del canale, o lungo di esso, si accentuerebbero verso valle, invece di attenuarsi come in una comune corrente.

Tale interpretazione permetterebbe di dire che, se la velocità U_0 di moto uniforme è maggiore della U_c'' data

dalla (2), se cioè:

$$U_0 > \frac{p}{2 m M_0} \sqrt{g \frac{\sigma_0}{l_0}},$$

ovvero, introducendo il numero di Froude $F_r = \frac{U}{\sqrt{g l}}$, se risulta:

$$(5) \quad \frac{2 m M_0}{p} \cdot F_{r_0} > 1,$$

qualsiasi onda, sia pur piccolissima, che nasca nella corrente, è destinata ad accrescersi nel suo percorso, fino a dare luogo alla formazione di onde di notevole entità.

Il rapporto:

$$(6) \quad V = \frac{U_0}{U_c''} = \frac{2 m M_0}{p} F_{r_0}$$

è stato definito dagli AA. russi: « Numero di Vedernikov ». Tenuto conto della (6), la condizione di esaltazione delle onde, espressa dalla (5) può quindi scriversi in forma sintetica:

$$(5') \quad V > 1.$$

Ritornando alla relazione (3) ovvero alla relazione equivalente a questa, che può facilmente trarsi dalla integrazione della (1) nella funzione incognita $\left(\frac{\partial s}{\partial \sigma} \right)_f$, esse dovrebbero permettere di determinare per ogni istante t , ciò che è lo stesso, per ogni ascissa, rispettivamente il valore dell'altezza h a monte dell'intumescenza, o della pendenza superficiale sul fronte d'onda. In seguito si ritornerà sui limiti di applicabilità di dette relazioni, limiti che derivano dalle ipotesi in base a cui esse sono state ricavate. Nel caso dei treni d'onde, tuttavia, anche ammettendo che tali relazioni rimangano valide quando onde piccolissime si siano esaltate, la pratica determinazione dei parametri che caratterizzano i fronti d'onda, e cioè, con riferimento all'uno o all'altro schema, la determinazione dell'altezza idrica h a monte dell'intumescenza a fronte ripido, ovvero della pendenza superficiale sul fronte, è subordinata alla conoscenza dei valori iniziali che le grandezze $\sqrt{h} - \sqrt{h_0}$ nel primo caso, e $\left(\frac{\partial s}{\partial \sigma} \right)_f$ o $\left(\frac{\partial s}{\partial h} \right)_f$ nel secondo caso assumono all'imbocco del canale, o in prossimità di esso: e di questi valori iniziali nulla si può dire se non che essi sono, in valore assoluto, gli uni molto piccoli, gli altri molto grandi.

3. - OSSERVAZIONI SPERIMENTALI.

Le prime osservazioni sperimentali sui treni d'onde risalgono, come si è detto, a più di cinquanta anni or sono quando G. Maw [2] comunicava di aver osservato su di un torrente sfociante nel lago di Thun, sulle Alpi svizzere, un moto ondoso in luogo del moto permanente,

che la costanza della portata di alimentazione avrebbe potuto far prevedere. L'alveo, rivestito di pietrame, aveva una sezione trapezia larga alla base 4,70 m e pendenze variabili da circa 0,11 nel tratto superiore a 0,08 nel tratto inferiore. Allo sbocco gli intervalli di tempo fra un'onda e l'altra variavano da 1/2 s a 3 s. Meno regolari erano distanze ed intervalli di tempo fra un'onda e l'altra nel tronco di monte del torrente.

Nel 1904 un Comitato per lo studio di onde di superficie riferì alla British Association [13] di osservazioni fatte sui due torrenti Guntenbach e Grunnbach (fig. 1) sfocianti nello stesso lago di Thun, e propose di dare il nome *roll-waves* alle onde che si stabiliscono, senza alcuna causa perturbatrice apparente, sui canali a pendenza molto forte: con tale denominazione o con l'altra di *slug-flow*, il fenomeno viene tuttora indicato nella letteratura di lingua inglese. Lo stesso comitato mise in evidenza che il fenomeno è proprio di correnti di piccole altezze e di grandi velocità e ne dedusse che l'elevata scabrosità delle pareti, aumentando le altezze idriche, ostacola la formazione dei treni d'onde.

Nello stesso anno P. Forchheimer [14] eseguì delle osservazioni sul tronco terminale del torrente Schmittenbach in Zell lungo 730 m con una pendenza di circa 0,05, misurando gli intervalli di tempo fra i passaggi di due onde successive (variabili tra i 4 s e i 20 s) e le distanze tra di esse, che risultarono, in tal caso, anche esse molto variabili.

Lo stesso Forchheimer dà notizia di osservazioni fatte sul torrente Zvironjak presso Cattaro. Il tronco terminale di esso, definito a monte da una soglia posta a 760 m dallo sbocco nel mare, ha pendenze decrescenti verso valle da 0,08 a 0,025 e una sezione rivestita di forma trapezia con larghezza di base di 2 m. Il moto ondoso fu osservato con inizio a 80 ÷ 40 m dalla soglia, per altezze medie variabili, a monte dai 5 ai 25 cm, a valle dai 10 ai 50 cm: per altezze maggiori e minori di quelle indicate il fenomeno non si presentava.

Osservazioni più complete (nel corso delle quali si misurarono anche le portate) furono fatte nel 1913 da Rümelin e Angerez [15] sullo scivolo del Rützwirk. Si tratta di un canale di calcestruzzo lungo circa 80 m con pendenza $i = \sin \alpha = 0,60$, cui segue un tronco di raccordo all'orizzontale lungo circa 60 m; la sezione è indicata nella fig. 7.

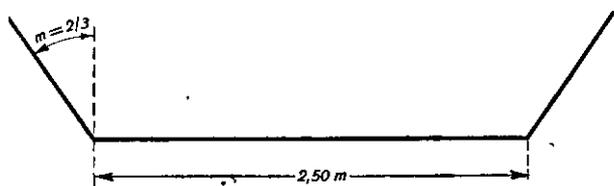


Fig. 7. → Sezione dello scivolo del Rützwirk.

Le osservazioni sperimentali furono fatte per portate di 0,5 m³/s; 0,8 m³/s e 3,4 m³/s. Per le prime due il fenomeno ondoso era nettamente sviluppato e la corrente, tra un'intumescenza e l'altra, non presentava fenomeni di aerazione: le altezze idriche variavano da qualche cen-

timetro a 10 ÷ 20 cm sull'intumescenza; per la portata di 0,8 m³/s l'apparizione delle onde avveniva a circa 40 ÷ 50 m dall'imbocco. Per 3,4 m³/s il fenomeno ondoso non si verificava se non nel tronco di valle e, anche qui, con onde appena sviluppate e succedentisi molto rapidamente.

Le constatazioni sperimentali, che hanno condotto alla enunciazione dei criteri empirici del Fedorov e dello Arseniscvili e nel corso delle quali si cercò di controllare la validità del criterio espresso dalle (5), furono eseguite principalmente a cura dell'Istituto Caucasicco Tecnico-Scientifico per l'Economia delle Acque (Zac NIIVX) (Fedorov, 1937-38), del TNISGEI (Fedorov, 1952) [4], [5], e infine dal Laboratorio Idrotecnico di Gruz (NIIG e M) (Arseniscvili, 1952-53) [6], [7], su canali sia di laboratorio che di opere idrauliche.

Purtroppo le memorie, in cui i due AA. riferiscono delle ricerche compiute, difettano di descrizioni particolareggiate sulle caratteristiche qualitative delle correnti osservate, in particolare di cenni sull'eventuale presenza di aerazione di esse, sulle modalità delle misure delle velocità medie e delle altezze idriche, e infine sulle caratteristiche degli imbocchi dei canali. Tali esperienze sono, tuttavia, di un interesse notevole, in quanto costituiscono la prima serie sistematica di osservazioni, fatte, tra l'altro, per pendenze, forme di sezioni e lunghezze sensibilmente diverse fra di loro.

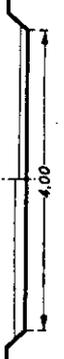
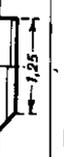
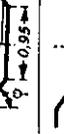
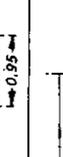
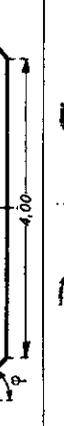
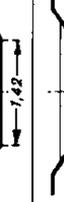
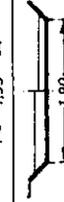
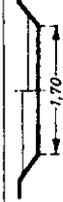
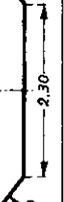
I risultati delle osservazioni riportati dal Fedorov sono raccolti nelle colonne 1, 3, 5, 6 e 7 della tab. I, per i canali numerati dal n. 1 al n. 22. In tale tabella sono indicati: nella colonna 1 le altezze idriche h_0 , misurate in sezioni a monte della zona in cui si aveva la comparsa del moto ondoso, e in cui, almeno a quanto si intende dall'A., si erano raggiunte condizioni di moto uniforme; nella colonna 3 le velocità medie U_0 ; nella colonna 5 le altezze delle onde, nei casi in cui queste furono riscontrate; nella colonna 6 il rapporto V tra la U_0 e la velocità U_c'' definita dalla (2) e nella colonna 7 i rapporti h_0/R_0 tra le altezze misurate h_0 e i corrispondenti raggi idraulici R_0 . Le portate Q , i coefficienti K di Strickler e i rapporti h_0/χ_0 , che non appaiono tra i dati del Fedorov, sono stati calcolati dalle grandezze precedenti, e riportati nelle colonne 2, 4 e 8 della tab. I.

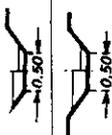
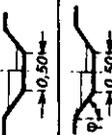
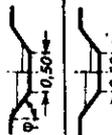
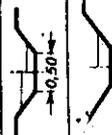
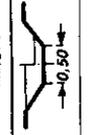
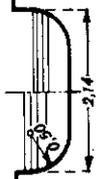
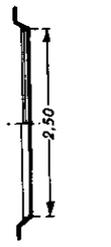
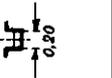
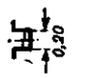
In sostanza si può osservare che delle 41 correnti esaminate e defluenti in 22 canali diversi, in 17 di esse sono stati riscontrati treni d'onde, mentre in 24 casi il moto è risultato permanente.

Il rapporto espresso dalla (6) (v. colonna 6) risultava, invece, maggiore dell'unità in 34 casi: particolarmente in tutti i 17 casi in cui l'esperienza ha confermato l'esistenza di correnti con moto ondoso, e in altri 17 casi per cui, invece, nelle esperienze, il moto si è conservato permanente. Cioè dei 24 casi di moto permanente il numero U_0/U_c'' è risultato maggiore della unità in 17 casi e minore dell'unità negli altri 7.

Il Fedorov riporta anche risultati di rilievi di velocità in canali a pendenze molto forti eseguiti, nei casi di esistenza di roll-waves, a monte della zona di apparizione di queste. Nella fig. 8 sono riportati i rilievi eseguiti in sette sezioni, di cui quelle indicate con i numeri I, III, IV e V corrispondono ai canali indicati nella tab. I rispetti-

TABELLA I.

CARATTERISTICHE DEL CANALE		1	2	3	4	5	6	7	8
N.		h_0 m	Q m ³ /s	U_0 m/s	K	Altezza delle onde m	$\frac{U_0}{U_c}$	$\frac{h_0}{R_0}$	$\frac{h_0}{\lambda_0}$
1	 tg $\varphi = 1,5$ $L = 150$ m $i = 0,003$ Legno	0,04 0,12	1,0 5,8	10,00 17,90	111 100	0,15 0,03	10,20 9,75	1,01 1,09	0,015 0,041
2	 tg $\varphi = 1,5$ $L = 60$ m Calcestruzzo ben liscio	0,08 0,12	1,1 2,1	7,15 8,85	82 80	0,02 —	4,84 4,67	1,09 1,12	0,038 0,054
3	 tg $\varphi = 1,0$ $L = 115,8$ m $i = 0,148$ Calcestruzzo ben liscio	0,08 0,12	2,2 4,3	6,80 8,65	97 96	0,18 0,27	4,89 4,98	1,04 1,05	0,019 0,028
4	 tg $\varphi = 1,0$ $L = 200$ m Calcestruzzo ben liscio	0,06 0,13	0,8 1,0	5,00 8,00	87 86	0,065 0,02	4,13 4,28	1,04 1,09	0,020 0,044
5	 tg $\varphi = 1,0$ $L = 200$ m Calcestruzzo ben liscio	0,06 0,10	0,40 0,85	5,15 6,57	92 87	0,05 —	4,06 3,80	1,09 1,14	0,043 0,007
6	 tg $\varphi = 1,5$ $L = 115$ m $i = 0,133$ Muratura	0,04 0,09	0,10 0,38	2,37 3,95	56 60	0,01 0,02	2,28 2,30	1,00 1,18	0,037 0,071
7	 tg $\varphi = 1,5$ $L = 97$ m $i = 0,203$ Muratura	0,04 0,09	0,13 0,42	3,28 4,62	62 57	0,01 0,02	3,15 2,68	1,00 1,18	0,037 0,071
8	 tg $\varphi = 1,14$ $L = 670$ m $i = 0,046$ Calcestruzzo non ben liscio	0,12 0,22 0,32	1,6 4,8 8,5	3,25 5,10 6,05	65 69 66	0,08 0,11 —	1,87 2,06 1,94	1,06 1,10 1,14	0,027 0,047 0,064
9	 tg $\varphi = 1,5$ $L = 220$ m $i = 0,055$ Calcestruzzo non ben liscio - Alghe	0,10 0,15	0,39 0,80	2,50 3,23	54 55	— —	1,45 1,74	1,14 1,19	0,056 0,077
10	 tg $\varphi = 1,5$ $L = 260$ m $i = 0,034$ Calcestruzzo non ben liscio - Alghe	0,14	0,43	1,85	41	—	0,86	1,18	0,072
11	 tg $\varphi = 1,5$ $L = 220$ m $i = 0,022$ Calcestruzzo non ben liscio - Alghe	0,15	0,40	1,50	40	—	0,68	1,18	0,072
12	 tg $\varphi = 1,0$ $L = 100$ m $i = 0,053$ Calcestruzzo non ben liscio	0,10 0,15	0,66 1,3	3,30 4,30	71 72	0,02 0,01	1,91 1,91	1,09 1,13	0,046 0,005
13	 tg $\varphi = 1,3$ $L = 320$ m $i = 0,029$ Calcestruzzo non ben liscio	0,12 0,20	0,38 0,82	1,70 2,10	44 40	— —	0,83 0,78	1,13 1,20	0,057 0,085
14	 tg $\varphi = 1,0$ $L = 500$ m $i = 0,04$ Muratura	0,02 0,05	0,009 0,048	0,90 1,75	64 71	0,04	1,25 1,39	1,07 1,17	0,036 0,078
15	 tg $\varphi = 1,5$ $L = 240$ m $i = 0,044$ Calcestruzzo non ben liscio	0,09	0,23	1,92	66	—	1,54	1,06	0,028
16	 tg $\varphi = 1,5$ $L = 950$ m $i = 0,032$ Calcestruzzo non ben liscio	0,42	6,7	5,45	65	—	1,63	1,30	0,11

17		tg $\varphi = 1,5$ Muratura	L = 90 m	i = 0,103	0,06 0,14	0,11 0,41	3,00 4,13	60 52	— —	2,06 1,64	1,22 1,43	0,084 0,138
18		tg $\varphi = 1,5$ Muratura	L = 176,5 m	i = 0,068	0,06 0,16	0,10 0,47	2,87 4,00	82 67	— —	1,97 1,55	1,22 1,46	0,084 0,162
19		tg $\varphi = 1,5$ Lastre di calcestruzzo	L = 240 m	i = 0,068	0,08 0,14	0,14 0,34	2,83 3,47	69 63	— —	1,61 1,38	1,27 1,43	0,102 0,138
20		tg $\varphi = 1,5$ Lastre di calcestruzzo	L = 490 m	i = 0,014	0,10 0,18	0,14 0,37	2,13 2,68	99 91	— —	1,05 0,91	1,33 1,49	0,116 0,157
21		tg $\varphi = 1,5$ Muratura	L = 30 m	i = 0,017	0,15 0,28	0,25 0,73	2,26 2,85	78 71	— —	0,86 0,75	1,44 1,64	0,144 0,186
22		tg $\varphi = 1,5$ Lastre di calcestruzzo	L = 93 m	i = 0,042	0,10 0,24	0,22 0,83	3,30 4,04	90 70	— —	1,62 1,16	1,33 1,59	0,116 0,178
23		Calcestruzzo	L = 900 m	i = 0,21	0,30 0,40 0,49 0,57	5,60 9,20 12,90 16,00	10,37 12,27 13,72 14,28	60 60 60 60	treni d'onde » » —	3,30 3,20 2,95 2,75	1,28 1,34 1,55 1,45	0,13 0,16 0,18 0,20
23 b					0,24 0,315 0,385 0,44	5,60 9,20 12,90 16,00	13,33 16,14 17,92 18,82	90 90 90 90	treni d'onde » » —	4,95 4,90 4,75 4,51	1,24 1,29 1,32 1,29	0,11 0,14 0,16 0,18
24		tg $\varphi = 2/3$ Calcestruzzo	L = 79,6 m	i = 0,602	0,038 0,050 0,122	0,50 0,80 3,40	5,21 6,32 10,80	60 60 60	treni d'onde » —	5,40 5,50 5,70	1,01 1,02 1,03	0,015 0,020 0,047
24 b					0,030 0,039 0,094	0,50 0,80 3,40	6,61 8,02 14,11	90 90 90	treni d'onde » —	7,75 8,10 8,60	1,14 1,01 0,84	0,012 0,015 0,036
25		Legno	L = 23,7 m	i = 0,1552	0,040 0,064 0,068 0,072	2,58 4,48 5,23 7,62	10,10 11,70 12,20 12,50	116 98 98 98	— — — —	10,62 9,63 9,73 9,67	1,93 1,01 1,02 1,03	0,006 0,01 0,011 0,012
26		Fondo artificialmente scabro	L = 10,61 m	i = 0,198	0,019 0,025 0,029	0,02 0,03 0,04	4,00 4,70 5,30	127 123 130	— — —	6,08 6,19 6,44	1,12 1,25 1,26	0,08 0,10 0,11
27		Fondo artificialmente scabro	L = 10,61 m	i = 0,198	0,023 0,029 0,037	0,02 0,03 0,04	3,40 4,10 4,30	93 97 87	— — —	4,66 4,99 4,58	1,21 1,26 1,43	0,09 0,11 0,14
28		L = 10,61 m	i = 0,198	0,016 0,019 0,026	0,02 0,03 0,04	4,00 5,10 5,20	4,00 4,70 5,30	161 158 135	— — —	5,74 6,43 5,61	1,23 1,12 1,30	0,07 0,08 0,10
29		L = 13,60 m	i = 0,399	0,013 0,017 0,021	0,02 0,03 0,04	5,30 6,00 6,60	5,30 6,00 6,60	150 147 136	— — —	8,86 8,50 8,08	1,08 1,22 1,31	0,09 0,07 0,09
30		L = 13,60 m	i = 0,707	0,011 0,014 0,017	0,02 0,03 0,04	6,10 6,40 7,50	6,10 6,40 7,50	146 133 135	— — —	11,00 10,10 10,48	1,22 1,17 1,13	0,05 0,06 0,07

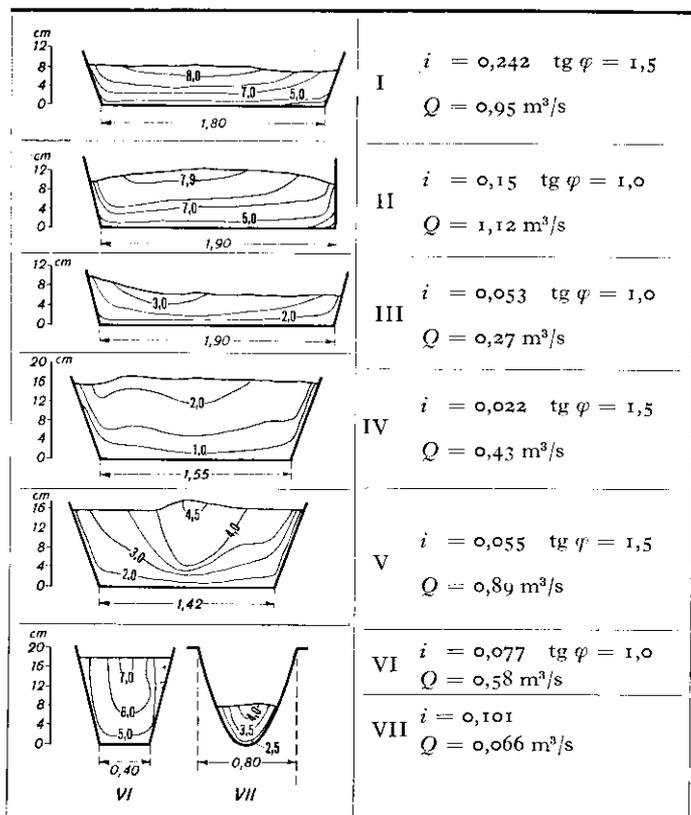


Fig. 8. - Rilievi di velocità in canali a pendenza molto forte (da Fedorov [5]).

vamente con i numeri 2, 12, 11 e 9. Nei casi I, II e III fu riscontrato un moto vario con roll-waves, negli altri casi moto permanente. Dall'esame delle curve di ugual velocità, il Fedorov osserva che il moto ondoso è favorito quando, nel moto uniforme (o permanente) preesistente, il solido di velocità presenti delle sezioni longitudinali costituite da curve molto allungate, se fatte mediante piani verticali e, nello stesso tempo, da curve molto appiattite, se fatte mediante piani paralleli al fondo; ciò che equivale a dire che le isotachie sono costituite, per la parte centrale della corrente, da linee di piccola curvatura molto ravvicinate fra di loro.

Le esperienze eseguite dall'Arseniscvili, che misurò anche lui le grandezze medie del moto a monte della zona di eventuale apparizione delle roll-waves, sono purtroppo descritte con minor completezza che non quelle del Fedorov.

Il ricercatore ha compiuto osservazioni su sei canali per lunghezze da un minimo di 78 m ad un massimo di 1113 m e per pendenze variabili da 0,025 a 0,58, eseguendo complessivamente diciassette prove con portate comprese fra 0,02 m³/s e 16,5 m³/s; inoltre egli ha sperimentato su di un canale di laboratorio lungo circa 30 m con pendenza di 0,15 e con sezioni di forma rettangolare, trapezoidale, circolare e triangolare (fig. 9).

Per tutte le prove riportate (complessivamente 34) il rapporto tra velocità U_0 , a monte della zona della eventuale comparsa del moto ondoso, e la velocità U_c'' risultava maggiore della unità; in ventiquattro casi, invece, non sono stati riscontrati treni d'onde, ciò che dimostra

la eccessiva cautela che comporterebbe il voler prevedere la formazione dei treni d'onde in base alla sola valutazione del rapporto U_0/U_c'' .

A conclusione dei loro esperimenti i due AA. hanno perciò ritenuto che il risultato della teoria sia inadatto a prevedere la formazione delle roll-waves, e sono stati da ciò indotti ad enunciare, ciascuno per suo conto, due criteri di carattere empirico che sostituissero quello espresso dalle (5). Precisamente, il Fedorov considera il rapporto h_0/R_0 fra altezza idrica h_0 e raggio idraulico R_0 nel moto

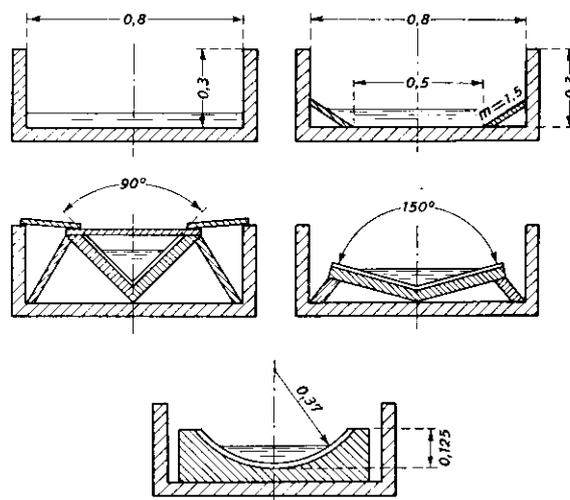


Fig. 9. - Sezioni del canale sperimentale dell'Arseniscvili [7].

uniforme che si stabilirebbe in un canale in assenza di treni d'onde (colonna 7 della tab. I); ed osserva che per pendenze di fondo maggiori di 0,02 ÷ 0,025, il rapporto h_0/R_0 assume di norma valori di circa 1,1 ÷ 1,2 e più raramente 1,3 ÷ 1,4 nelle correnti sede di treni d'onde. Ciò ritiene di poter affermare che per:

$$(7) \quad h_0/R_0 > 1,4$$

non si ha mai il prodursi delle roll-waves; per valori di tale rapporto minori di 1,4 la superficie libera potrebbe essere sia frastagliata dalle roll-waves, sia priva di irregolarità.

Invece l'Arseniscvili [6], [7] afferma, alla stregua dei risultati delle sue esperienze, che la presenza di treni d'onde è da escludersi sempre che, per pendenze fra 0,02 e 0,30, risulti verificata la relazione:

$$(8) \quad \frac{h_0}{\chi_0} > 0,10,$$

dove h_0 e χ_0 sono l'altezza idrica e il perimetro bagnato in moto uniforme (4).

Sia il Fedorov che l'Arseniscvili, infine, alla stregua

(4) Purtroppo i dati riportati negli articoli dell'Arseniscvili non sono completi: si può però dire che il fatto che l'A. pone come limite superiore della pendenza, ai fini della validità della sua regola, il valore 0,30, lascia pensare che in alcune delle esperienze che egli ha certamente eseguite per valori superiori a 0,30, il limite 0,10 per h/χ non fu riscontrato valido.

delle (7) e (8) consigliano di adottare, per canali molto inclinati all'orizzontale, sezioni o triangolari o circolari o anche trapezie e rettangolari, ma di piccola base: in modo comunque che il parametro h_0/R_0 , o quello h_0/χ_0 risultino, anche per portate piccole, abbastanza grandi. Ove si prevedano escursioni di portata notevoli, si potranno adottare sezioni mistilinee come quelle indicate dal Fedorov e riportate nella fig. 10.

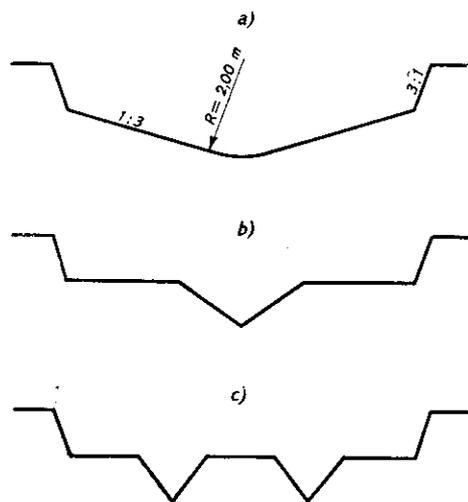


Fig. 10. - Sezioni consigliate dal Fedorov [5].

A completare la rassegna dei risultati forniti dalle osservazioni sperimentali, sono da ricordare ancora le prove eseguite sullo scivolo della vasca di carico dell'impianto 3° Salto Sangro della Comunità Impianti Sangro, SME-Terni. Le prove, i cui risultati non erano stati finora pubblicati, furono eseguite in sede di collaudo dall'ing. Alfredo Giancotti nel 1952⁽⁵⁾.

Le caratteristiche delle opere di scarico del 3° Salto Sangro sono descritte esaurientemente nel n. 8 volume XXVIII, 1951 de « L'Energia Elettrica ».

Qui basterà dire che lo scivolo, alimentato da un lungo pozzo a caduta libera presenta un primo tronco lungo 200 m con pendenza di 0,045, un secondo lungo 200 m con pendenza di 0,24, un terzo lungo 900 m con pendenza di 0,21, ed un quarto ed ultimo tronco lungo 160 m con pendenza di 0,27. A valle, infine, seguono un tronco a pendenza relativamente piccola, 0,024, e un dissipatore, per una lunghezza complessiva di circa 100 m. Le sezioni del canale sono rappresentate in fig. 11 a) e b): la prima è relativa ai primi due tronchi, la seconda agli altri due.

Le osservazioni furono eseguite per portate di 5,6; 9,2; 12,9 e 16 m³/s. Le portate immesse a monte, che non potevano essere misurate direttamente, furono valutate come differenze tra le portate affluenti alla vasca di carico dell'impianto e quelle derivate alle turbine; sia le une che le altre con apparecchiature certamente atte a dare una precisione sufficiente agli scopi delle prove.

Per le tre portate inferiori fu riscontrato il caratteri-

stico moto ondoso, specie nei tronchi di valle dello scivolo, con conseguenti ondate al dissipatore che davano luogo a getti alti 5 ÷ 6 m (figg. 3 e 4). Le altezze idriche nel tronco centrale dello scivolo raggiungevano, al momento dei passaggi delle creste d'onda, dei valori massimi dell'ordine di 0,9 ÷ 1 m. Per portate superiori a 13 m³/s il moto ondoso tendeva ad attenuarsi: per 16 m³/s esso era sostituito da un moto permanente.

Tutti i risultati sperimentali qui illustrati, sono raccolti nella tab. I, insieme con i dati relativi alla canaletta sperimentale usata a Napoli per la ricerca su correnti rapide, e ad alcuni dati relativi allo scivolo russo di Gizeldon e tratti dalla già ricordata nota di M. Viparelli [1].

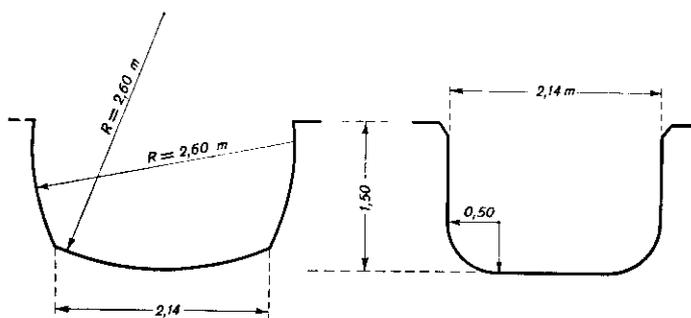


Fig. 11. - Impianto 3° salto Sangro. Sezioni dello scivolo dello scarico.

I criteri seguiti nella valutazione delle grandezze non direttamente misurate variano caso per caso.

Per il canale dello scarico del 3° Salto Sangro, formato da diverse livellette, si è presa in considerazione solo la livelletta centrale lunga 900 m, che costituisce la parte principale dello scivolo. Note le portate e data l'incertezza del valore da attribuirsi al coefficiente K della formula di Gaukler-Strickler, assunta per il calcolo delle altezze h_0 , sono riportati nella tabella i valori di h_0 e U_0 , desunti per valori di K pari a 60 e a 90. Non si è poi tenuto conto di fenomeni di aerazione, per omogeneità con i dati dei ricercatori russi.

Analogamente si è proceduto per lo scivolo del Rützwirk, la cui cattiva alimentazione produceva, secondo la descrizione del Rümelin, una notevole asimmetria nella corrente: per esso, d'altra parte, è da considerare anche che, per un certo tratto abbastanza lungo del canale, la corrente risultava ancora accelerata.

Le velocità medie U_0 e le altezze h_0 relative allo scivolo di Gizeldon e alla canaletta sperimentale di Napoli derivano, invece, dalla conoscenza del solido di velocità rilevato per punti: secondo lo schema adottato da M. Viparelli i valori sono dedotti assumendo per h_0 l'altezza del punto cui corrisponde il valore massimo della lettura ad una canna pitometrica: di conseguenza la portata effettivamente attraversante la sezione considerata, e indicata nella colonna 2, è maggiore del prodotto $U_0 \cdot h_0 \cdot l$, di una quantità pari alla portata corrispondente allo strato superiore della corrente, costituito prevalentemente da gocce d'acqua viaggianti nell'aria. Nella colonna 4 della tabella sono indicati i valori del coefficiente K di Strickler: essi sono stati dedotti dalle velocità medie e

⁽⁵⁾ Colgo l'occasione per ringraziare i Dirigenti della CIS, che hanno consentito la pubblicazione dei risultati.

dalle altezze, nei casi in cui queste furono fornite dagli sperimentatori; negli altri casi, invece, in cui erano noti solo la portata e le caratteristiche del canale, essi costituiscono i valori assunti per la determinazione di h_0 ed U_0 . Per tutte le prove prese in considerazione, infine, sono stati calcolati e riportati nelle colonne 6, 7 ed 8 rispettivamente i rapporti U_0/U_c'' , h_0/R_0 e h_0/χ_0 .

4. - ALCUNE OSSERVAZIONI SUI RISULTATI SPERIMENTALI E SULLE APPLICAZIONI DEI CRITERI EMPIRICI.

I risultati sperimentali raccolti nella tab. I, consentono di fare delle considerazioni, sia sull'andamento qualitativo del fenomeno, sia sull'attendibilità e precisione dei criteri proposti dagli AA. russi.

È da notare, in primo luogo, che le esperienze confermano quanto già noto dai primi ricercatori: al crescere delle portate in un canale, il fenomeno ondoso tende a scomparire, per dar luogo ad un moto permanente⁽⁶⁾.

Dagli sperimentatori russi non si fa cenno a fenomeni di aerazione della corrente: è da pensare, invece, che in molte delle correnti osservate, una apprezzabile aerazione doveva essere sviluppata, essendo le pendenze dei canali molto forti. Non è da escludersi quindi, che, in questi casi, le altezze effettive delle correnti, le altezze cioè dello strato d'acqua e bolle d'aria che, in una corrente rapida, è sormontato da gocce d'acqua staccate viaggianti nell'aria, fossero inferiori a quelle misurate. In tal caso gli indici h_0/R_0 e h_0/χ_0 , riportati dagli AA., sarebbero superiori a quelli che competono effettivamente alla corrente idrica.

Comunque, i risultati sui canali indicati con i numeri dal 23 al 30 confermano quanto osservato dal Fedorov e dall'Arseniscvili, riguardo alla impossibilità di prevedere in base alla valutazione del rapporto U_0/U_c'' il formarsi dei treni d'onde. Anche qui, infatti su 26 correnti esaminate, per le quali tutte il rapporto U_0/U_c'' era molto maggiore dell'unità, si sono avuti numerosi casi, precisamente venti, in cui non è stata riscontrata la presenza di treni d'onde.

Riguardo ai criteri empirici, l'esame dei risultati forniti dal Fedorov (canali 1 ÷ 22), dai quali questi ha tratto il suo criterio, mostra che effettivamente la maggior parte delle correnti, in cui erano presenti treni d'onde, è caratterizzata da rapporti h_0/R_0 pari a circa 1,1 ÷ 1,2 e che mai dalla tabella risulta un tale moto ondoso in correnti per le quali fosse $h_0/R_0 > 1,4$.

È da notare tuttavia che si possono riconoscere facilmente, tra quelle indicate dal Fedorov, numerose correnti per le quali, pur essendo $h_0/R_0 < 1,2$, il moto ondoso non è stato riscontrato. E tale osservazione assume maggior rilievo dall'esame dei risultati sul canale 15 e sul canale 25 (Gizeldon) l'uno di pendenza $i = 0,044$

e l'altro $i = \text{sen } \alpha = 0,552$, per i quali, pur essendo $h/R < 1,1$, la corrente si è presentata priva di treni d'onde.

Il controllo del criterio dell'Arseniscvili, eseguito dal confronto con i dati sperimentali del Fedorov, mostra che, nel campo del rapporto h_0/χ_0 compreso fra 0,04 e 0,08 esistono numerosi casi sia di correnti permanenti sia di correnti con treni d'onde; mentre per $h_0/\chi_0 > 0,08$ le esperienze del Fedorov indicano tutte correnti prive di roll-waves. Dal confronto con i risultati della seconda parte della tabella, risulta, invece, che possono annoverarsi casi di correnti con treni d'onde per valori di h/χ maggiori di 0,10, fino ad un valore di 0,16 e, viceversa, casi di correnti senza treni d'onde per valori di h/χ minori di 0,10 fino ad un valore minimo di 0,01 (Gizeldon).

La non netta corrispondenza fra il tipo di moto osservato e i valori dei parametri assunti non meraviglia, in quanto rapporti tra grandezze geometriche di una sezione idrica, come quelle qui prese in considerazione, non possono certo caratterizzare una corrente; tra l'altro la scomparsa del fenomeno ondoso in parola per pendenze inferiori a 0,02 ÷ 0,025 lascia pensare che le pendenze, e quindi le velocità, debbano avere la loro influenza.

D'altra parte è noto che i treni d'onde appaiono sempre ad una certa distanza dall'imbocco. Lo stesso Fedorov accenna chiaramente al fatto che nei canali in cui l'aumento di portata causava la scomparsa dei treni d'onde, tale scomparsa era dapprima limitata al tronco iniziale del canale, per poi interessare, al crescere della portata, dei tronchi di lunghezze via via crescenti. È da ritenere, perciò, che la lunghezza dello scivolo possa essere determinante riguardo alla presenza di essi, cioè che, sovente, sia proprio la brevità dello scivolo a consentire un deflusso in moto praticamente permanente su tutta la sua lunghezza, in quanto le onde non avranno avuto il tempo di esaltarsi al punto tale, da rendere vistosa la loro presenza.

Poichè, d'altra parte, la teoria mostra l'influenza, sulla esaltazione dell'onda, sia della pendenza di fondo, sia della progressiva s , misurata a partire dal punto di apparizione di onde piccolissime, punto che può ritenersi praticamente coincidente con l'imbocco del canale, sembra opportuno riprendere la trattazione teorica, onde esaminare in maggior dettaglio il significato delle ipotesi assunte e dei risultati che ne conseguono.

5. - SIGNIFICATO DEI RISULTATI TEORICI.

Le teorie passate in rassegna conducono, come si è detto, a espressioni delle velocità limiti, che possono considerarsi equivalenti fra di loro, se si prescinde dalle lievi differenze, derivanti dai diversi tipi di formule adottate nei vari sviluppi per esprimere le resistenze. Non sembra, tuttavia, che tale equivalenza possa costituire elemento per concludere che il risultato assuma una validità generale, al di là dei limiti stabiliti con le ipotesi fatte volta per volta. Se le espressioni della velocità limite sono praticamente le stesse, non altrettanto può dirsi per il significato di essa. Innanzitutto, il termine

(6) Le osservazioni sul torrente Zvironjak costituiscono l'unico caso in cui treni d'onde non furono riscontrati per le portate minime; ciò è probabilmente da attribuirsi alla forte irregolarità del fondo che, per piccole altezze, produceva il frangimento di ogni piccola onda sin dal suo nascere.

esaltazione dell'onda è inteso dal Bonvicini e dal Craya nel senso di aumento della sua altezza, dal Massé e dal Vedernikov nel senso di aumento di acclività sul fronte d'onda. Inoltre, secondo i risultati del Bonvicini e del Craya le onde discendenti si attenuano o si esaltano a seconda che la velocità U_0 è maggiore o minore di U_c'' , mentre il risultato di Massé e di Vedernikov non esclude che per $U_0 < U_c''$ le onde discendenti possano esaltarsi.

Comunque è da porre in evidenza che le ipotesi fatte dagli AA. considerati limitano il risultato ad onde, o di altezza molto piccola, o di inclinazione superficiale, rispetto al fondo, molto piccola sul fronte: tale è il significato del processo di linearizzazione, cui ricorre il Bonvicini nei suoi sviluppi, e nel quale si trascurano termini contenenti i quadrati delle variazioni di h e U , e del procedimento del Craya, che trascura anche i termini lineari dipendenti dalle variazioni di h ed U ; tale è infine il significato dell'ipotesi del Massé e del Vedernikov, che il moto possa ritenersi gradualmente variato sul fronte, ipotesi che risulterebbe certo inammissibile, ove si considerasse un fronte sensibilmente ripido sulla linea di fondo.

Tuttavia è da osservare che, quando in una corrente gradualmente variata l'entità di onde piccolissime, per le particolarità che emergono dalla teoria, sia divenuta tale da far cadere in difetto la teoria stessa, niente esclude che esse possano continuare ad esaltarsi. In tal caso i parametri, che regolano l'esaltazione di onde piccolissime, conserverebbero la loro importanza ai fini dell'apparizione di onde di una certa entità.

Sulla scorta di queste considerazioni, e avvalendosi dei risultati sperimentali illustrati in precedenza, si è controllato, perciò, se l'apparizione dei treni d'onde, intumescenze a fronte ripido e di altezze finite, fosse regolato dagli stessi parametri, che reggono il fenomeno, quale è schematizzato dalle teorie esposte. Limitando le considerazioni che seguono al caso di onde discendenti, si osservi che la (1) può essere scritta nella seguente forma:

$$(1'') \quad \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial s}{\partial \sigma} \right)_f = A \left(\frac{\partial s}{\partial \sigma} \right)_f + B,$$

avendo posto:

$$A = \frac{g i}{U_0} \frac{p}{2} \left(1 - \frac{2 m M_0}{p} \cdot F_{r_0} \right);$$

$$B = \frac{3}{2} \sqrt{\frac{g}{\sigma_0 l_0}} \cdot N_0.$$

L'integrazione della (1'') dà:

$$\ln \frac{A \left(\frac{\partial s}{\partial \sigma} \right)_f + B}{A \left[\left(\frac{\partial s}{\partial \sigma} \right)_f \right]_{t=0} + B} = A \cdot t,$$

ovvero, poichè sul fronte d'onda

$$s = \left(U_0 + \sqrt{g \frac{\sigma_0}{l_0}} \right) \cdot t,$$

$$(9) \quad \frac{A \left(\frac{\partial s}{\partial \sigma} \right)_f + B}{A \left[\left(\frac{\partial s}{\partial \sigma} \right)_f \right]_{s=0} + B} = e^{\frac{A}{U_0 + \sqrt{g \frac{\sigma_0}{l_0}}} \cdot s}.$$

Nella (9) il secondo membro è sostanzialmente equivalente all'inverso del secondo membro della (3) (Craya).

Comunque, se si pone che la funzione esponenziale espressa dalla (9) ha un valore costante ε , tenuta presente la definizione di A , si ha dopo facili passaggi:

$$(10) \quad \ln \varepsilon = \frac{1 - V}{1 + \frac{1}{F_{r_0}}} \cdot \frac{p}{2} \cdot \frac{g i}{U_0^2} \cdot s,$$

essendo V il numero definito dalla (6).

La (10) può essere rappresentata nel piano di coordinate $\frac{p}{2} \cdot \frac{g i}{U_0^2} \cdot s$, V da una serie di curve per ogni forma di sezione.

Nella fig. 12 è riportata, come esempio, la funzione espressa dalla (10), dando ad ε i valori 10^{-2} ; 10^{-4} ; 10^{-6} . Le curve sono tracciate assumendo la formula di resistenza di Gaukler-Strickler, ponendo cioè $m = 2/3$ e $p = 2$. Nell'espressione di V si è posto, per ogni valore di ε , una volta $M = 1$, e un'altra volta $M = 0,3$, valori che coprono ampiamente il campo di variabilità di M per sezioni adoperate in pratica (?).

Si vede che le curve risultano, a pari ε , abbastanza vicine fra di loro, in modo che nel loro tracciamento possa ritenersi trascurabile l'influenza di M , che dipende dalla forma della sezione, e che, con la presenza del numero di Froude al denominatore della (10), compare implicitamente in questa.

Riguardo al significato della posizione

$$(10') \quad \frac{A \left(\frac{\partial s}{\partial \sigma} \right)_f + B}{A \left[\left(\frac{\partial s}{\partial \sigma} \right)_f \right]_{s=0} + B} = \varepsilon = \text{cost},$$

si può osservare che, se si indica con y la funzione

$$\left(\frac{\partial s}{\partial \sigma} \right)_f = \frac{1}{l} \left(\frac{\partial s}{\partial h} \right)_f,$$

(?) Risulta per es.

$M = 1,0$ per sezione rettangolare larghissima;
 $M = 0,5$ per sezione rettangolare con $h/l = 0,5$;
 $M = 0,5$ per sezione triangolare con angolo di 90° .

la (10') diventa:

$$(10'') \quad \frac{Ay + B}{Ay_{s=0} + B} = \varepsilon,$$

cioè

$$Ay + B = \varepsilon \cdot Ay_{s=0} + B\varepsilon,$$

e, trascurando $B \cdot \varepsilon$ rispetto agli altri termini,

$$(10''') \quad \frac{y}{y_{s=0}} = \varepsilon - \frac{B}{Ay_{s=0}}.$$

porre che i due membri della (9) sono uguali ad una costante ε , si ponesse nella formula (3), trovata dal Craya, che i due membri sono uguali ad $1/\varepsilon$. La curva, che nel piano $\frac{g^i}{U_0^2} s, F_{r0}/2$, corrisponde a tale posizione, non differisce molto da quella che, a pari ε , è stata tracciata per canali larghissimi in fig. 12, e le lievi differenze dipendono dal fatto che il Craya ha assunto costante il coefficiente della formula di Chézy. Quanto al significato fisico, tale posizione equivale a dire che all'ascissa s la differenza $\sqrt{h} - \sqrt{h_0}$ fra le radici quadrate delle altezze idriche a monte e a valle dell'intumescenza a fronte

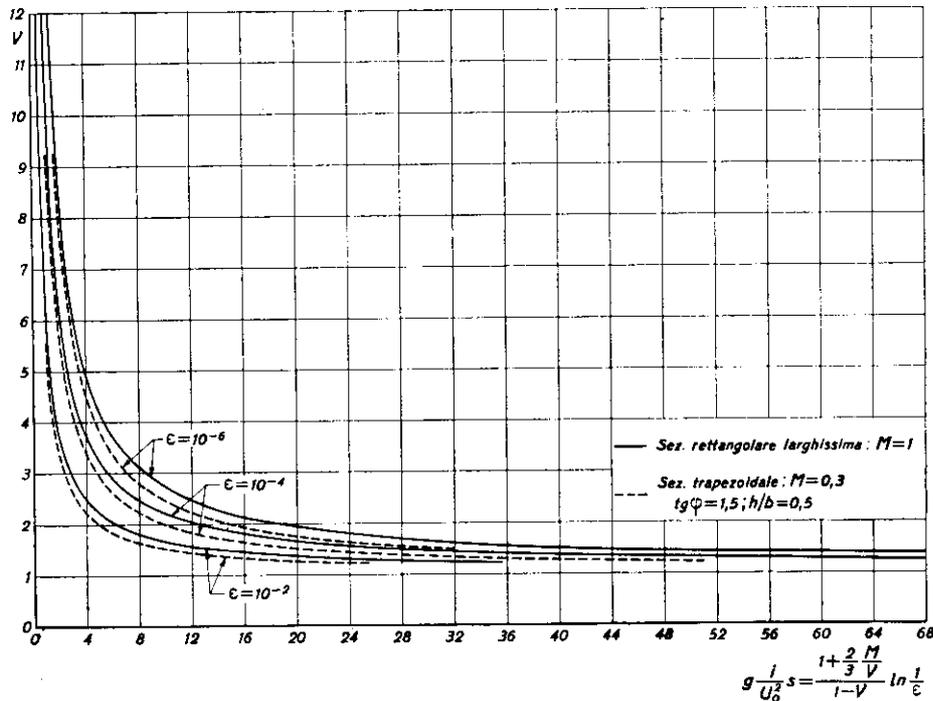


Fig. 12. - Curve di equazione (10) per diversi valori di M e di ε .

La (10) equivale, cioè, alla condizione che il rapporto tra gli inversi delle pendenze superficiali rispetto al fondo $\left(\frac{\partial s}{\partial h}\right)_f / \left[\left(\frac{\partial s}{\partial h}\right)_f\right]_{s=0}$ sia pari ad ε meno una quantità $\frac{B}{Ay_{s=0}}$, positiva per $V > 1$, la quale, poichè $y_{s=0}$ è certamente molto grande in valore assoluto, può essere trascurata rispetto ad ε , a condizione che A non sia molto piccolo, che cioè V non sia molto vicino all'unità.

Se ci si riferisce, ai valori assoluti delle pendenze superficiali, invece che agli inversi di esse, si può cioè dire che la (10) consente, nelle approssimazioni messe in evidenza, di determinare quell'ascissa s , cui corrisponde un aumento del valore assoluto della pendenza superficiale sul fronte pari ad $1/\varepsilon$. Le curve, tracciate per vari valori di ε in fig. 12, consentono, cioè, di valutare il valore della ascissa, cui corrisponde una prefissata esaltazione di una onda iniziale piccolissima.

E il risultato non cambierebbe di molto se, anzichè

ripido è divenuta $1/\varepsilon$ volte l'analoga differenza che compete alla onda piccolissima considerata.

Ciò premesso, nel diagramma cartesiano di fig. 13 di coordinate $g \frac{Li}{U_0^2}, V$, coordinate, che corrispondono a quelle della fig. 12, se in questa si pone $s = L$, essendo L la lunghezza del canale, si sono riportati i valori calcolati dei risultati sperimentali esposti in precedenza. Ai fini della successiva discussione, i gruppi di punti relativi ad alcuni canali, risultando particolarmente significativi, sono segnati, nella fig. 13, con i numeri d'ordine tratti dalla tab. I.

Il diagramma mostra l'evidente influenza che i due parametri riportati sugli assi esercitano sulla formazione dei treni d'onde; nel senso che, per $V > 1$, la presenza di essi è favorita, sia dall'aumento di V che da quello di $g \frac{Li}{U_0^2}$.

Sul diagramma è anche riportata una delle curve di

fig. 12, e precisamente quella relativa ad $\varepsilon = 10^{-4}$ e canale larghissimo: essa conserva alla sua sinistra, solo punti corrispondenti a correnti senza treni d'onde, ove si prescindano da quelli del canale n. 12. Alla sua destra si osservano, invece, in prossimità di essa, sia casi di correnti con roll-waves, sia casi di correnti praticamente permanenti; a maggiori distanze, solo correnti con roll-waves.

Per quanto riguarda i punti relativi al canale n. 12 è da mettere in evidenza anzitutto che l'alimentazione di tale canale non doveva essere certamente regolare, come è mostrato dalla asimmetria della superficie libera risul-

diversi da quelli di moto uniforme. Tuttavia, il fatto che la corrente accelera per buona parte della lunghezza L , fa discostare sensibilmente il caso presente dallo schema assunto finora e che prevede una corrente in moto uniforme fin dall'inizio. E, in genere, tale osservazione va fatta per tutti i canali molto brevi presi in considerazione, per i quali, cioè, la lunghezza del tronco seguente l'imbocco, in cui la corrente accelera, costituisce una quota abbastanza rilevante della lunghezza totale del canale,

La presenza di correnti senza treni d'onde alla destra della curva di fig. 13 è, infine, da mettersi ancora in relazione con l'effetto negativo che l'aerazione della cor-

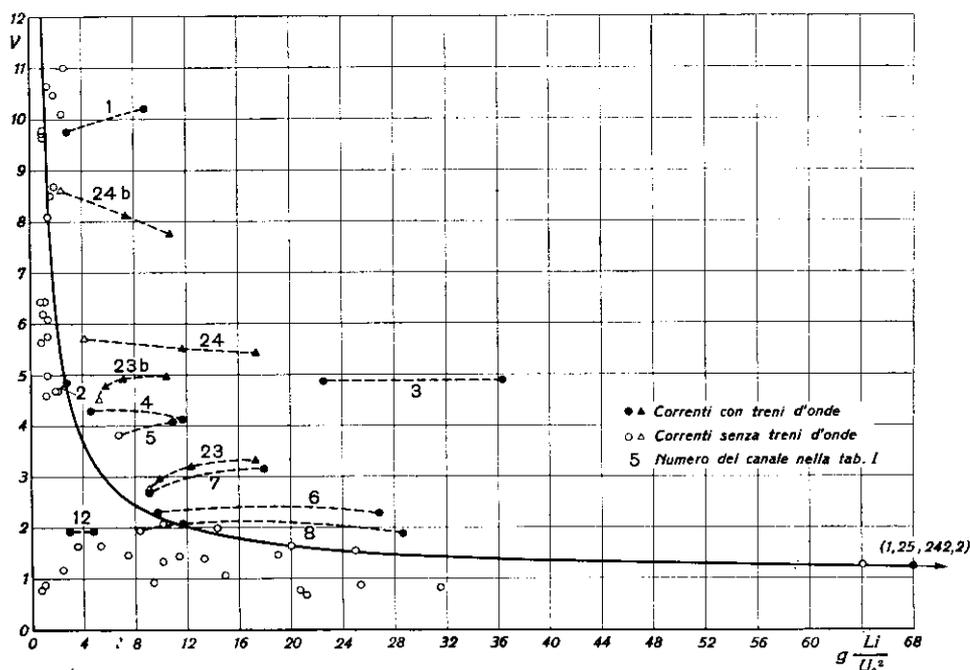


Fig. 13. - Punti sperimentali e curva di equazione (10), corrispondente ad $M = 1$ ed $\varepsilon = 10^{-4}$.

tante dalla fig. 8, dove nel caso III è riportato appunto un rilievo di velocità fatto sul canale n. 12 per una portata di $0,27 \text{ m}^3/\text{s}$.

È da notare, inoltre, che secondo l'interpretazione data, il fatto che una corrente sia rappresentata da un punto alla sinistra della curva tracciata, non significa che in essa non possano esserci delle onde, ma piuttosto che l'esaltazione di onde piccolissime non ha raggiunto una notevole entità. Ove si rifletta che le onde segnalate sul canale 12 avrebbero avuto altezze di 1 o 2 cm su 10 o 15 cm di altezza idrica media, e che, come si è detto, l'alimentazione non doveva essere regolare, sembra lecito escludere i due punti da quelli relativi a correnti con treni di onde.

Quanto ai punti relativi alla canaletta sperimentale di Napoli con angolo all'orizzontale di 45° , è da osservare che su di essa non furono raggiunte con sicurezza le condizioni di moto uniforme: benchè, probabilmente, i valori di V e di $g \frac{Li}{U_0^2}$, calcolati in base alle grandezze misurate al piede della canaletta, non siano sensibilmente

rente probabilmente ha sull'esaltazione delle onde, o, almeno, sulla vistosa apparizione di esse in superficie.

Il diagramma di fig. 13 conferma comunque l'importanza del rapporto $V = U_0/U_0''$: la riscontrata assenza di treni d'onde in alcune correnti cui competono valori di $V > 1$, trova la sua spiegazione nella brevità del canale. Inoltre il diagramma mostra che a pari V ed L , la presenza dei treni d'onde sotto forma vistosa, dipende dal valore del rapporto i/U_0^2 , rapporto che, peraltro, se si assume la formula di Gaukler-Strickler, è pari a $\frac{1}{K^2 R^{4/3}}$.

L'aumento dell'altezza, a pari V , ostacola, quindi, la formazione dei treni d'onde.

Più interessante sembra l'osservazione che all'aumentare della portata, in genere, anche se il rapporto $V = U_0/U_0''$ cresce alquanto, i valori di i/U_0^2 possono diminuire tanto da causare lo spostamento del punto rappresentativo della corrente da una all'altra delle parti in cui è stato suddiviso il diagramma, e precisamente da quella corrispondente ai treni d'onde a quella corrispondente al moto permanente.

Le curve tracciate per i canali nn. 1, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 23, 24 mostrano quanto sopra. La sparizione del fenomeno al crescere della portata è dovuta, cioè, più che ad una diminuzione di V , diminuzione che non sempre si riscontra quando aumenta Q , ad una riduzione di $1/U_0^2$, dovuta all'aumento della velocità: cioè all'aumentare della portata, sempre che $U_0/U_c'' > 1$, la diminuzione di $1/U_0^2$ può far sì che la lunghezza dello scivolo diventi insufficiente per una notevole esaltazione delle onde.

Se si fa caso a tale particolarità, emerge dal diagramma ancora qualche osservazione sull'influenza che può avere la forma della sezione. In effetti se si passa, a pari portata e pendenza, da una sezione larga alla base ad una più stretta, ciò corrisponde quasi sempre ad un aumento delle velocità di moto uniforme, almeno per gradi di riempimento non molto alti: ciò confermerebbe la convenienza, dedotta dagli sperimentatori russi per via

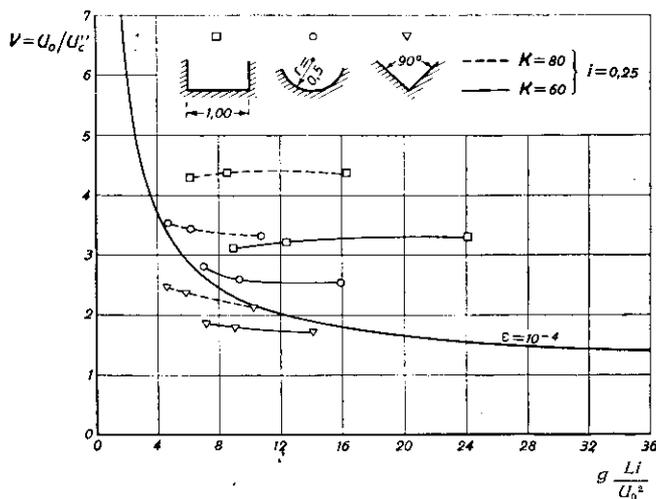


Fig. 14. - Valori di V e di $g \frac{Li}{U_0^2}$ calcolati per tre portate defluenti in canali di forma e scabrezza diverse.

empirica, di impiegare delle sezioni strette verso il basso quali quelle circolari o triangolari o anche trapezoidali di base piccola.

A titolo di esempio sono riportate nella fig. 14 le curve che danno le variazioni di V in funzione di $g \frac{Li}{U_0^2}$ al variare della portata, per tre canali di uguale pendenza $i = \sin \alpha = 0,25$ e di uguale lunghezza $L = 150$ m; ma di sezioni rispettivamente rettangolare, circolare e triangolare. Le coordinate dei punti segnati con cerchietti sono state calcolate, per tre valori della portata, con l'ausilio della formula di Gaukler-Strickler, per valori di K pari a 60 e a 80. A pari scabrezza, la posizione delle curve mostra il netto vantaggio, ai fini dell'eliminazione o della riduzione dei treni d'onde, che deriva, secondo l'interpretazione data, dall'uso delle sezioni strette ed alte, e comunque del miglioramento che consegue all'uso di sezioni circolari od ovoidali.

Non confermata è, infine, l'influenza della scabrezza. Si è detto, a proposito dello scivolo del Rützwirk e di quello del III Salto Sangro, che, per l'incertezza sul valore della scabrezza, si era ritenuto opportuno eseguire i confronti per due valori del K di Strickler. Sia per l'uno che per l'altro canale, il diagramma di fig. 13, mostra che la posizione delle curve 23 e 23 b, 24 e 24 b rispetto alla curva di separazione corrispondente ad $\epsilon = 10^{-4}$ ivi tracciata, non varia sensibilmente al variare di K dal valore 60 al valore 90. E tale effetto è riscontrato anche per le sezioni di fig. 14.

Al diminuire della scabrezza, e a pari portata, la riduzione dell'altezza idrica che ne consegue, produce l'aumento sia del rapporto $V = U_0/U_c''$, sia della velocità U_0 e tali aumenti esercitano effetti antagonisti nei riguardi della formazione dei treni d'onde, in quanto, come si è detto, il primo facilita l'esaltazione delle onde, il secondo rende minore l'esaltazione nel tronco che intercorre tra imbocco e termine del canale.

L'influenza della scabrezza può, invece, essere notevole per valori di V non molto diversi dall'unità. In tal caso, infatti, la riduzione o l'aumento della scabrezza possono provocare il passaggio di V da valori inferiori all'unità a valori maggiori, e viceversa. E poichè l'esperienza non ha mai indicato presenza di treni d'onde per $V < 1$, tale passaggio potrebbe provocare nell'un caso la comparsa dei treni d'onde, nell'altro la loro sparizione.

6. - CONCLUSIONI.

L'elaborazione dei risultati teorici e sperimentali ha consentito di porre in evidenza l'importanza che, sulla presenza dei treni d'onde in canali a pendenze molto forti, rivestono il numero $V = U_0/U_c''$, in cui U_0 è la velocità media della corrente uniforme, e U_c'' è definita dalla (2); e il numero $g \frac{Li}{U_0^2}$, in cui L ed i sono lunghezza e pendenza del canale.

Pur essendo buona parte del gruppo dei risultati sperimentali presi in considerazione derivante da osservazioni fatte su canali di opere industriali o agricole, e soggetta quindi alle incertezze che a tale tipo di osservazioni sono connesse, lo studio di tali numerosi risultati, ha permesso di tracciare, nel piano $V = U_0/U_c''$, $g \frac{Li}{U_0^2}$, una curva, che limita alla sua sinistra la zona cui corrispondono correnti, nelle quali non fu riscontrata presenza di treni d'onde. Poichè i parametri su definiti sono gli stessi che, secondo la teoria, regolano l'esaltazione di onde piccolissime, ciò sembra confermare che la formazione di treni d'onde è provocata, in correnti, cui compete un valore $V = U_0/U_c'' > 1$, appunto dall'esaltazione di onde piccolissime che, per ragioni diverse, sempre si generano nella corrente stessa. L'esistenza di correnti in moto praticamente permanente per $V = U_0/U_c'' > 1$, va interpretata come una conseguenza del fatto che, per i valori della pendenza i e della velocità U_0 , che competono ad esse, la lunghezza L del canale non è sufficiente a rendere vistosa l'esaltazione di piccole onde.

Nella progettazione di canali a pendenze molto forti, nei quali occorra evitare l'insorgere di treni d'onde, l'adozione di sezioni, cui corrispondono, anche per piccole portate, altezze idriche non molto piccole rispetto alle larghezze, facilita il passaggio nella zona di sicurezza del diagramma U_0/U_c^2 , $g \frac{Li}{U_0^2}$ di fig. 13.

ELENCO E SIGNIFICATO DEI SIMBOLI USATI:

- h altezza idrica della corrente.
- U velocità media.
- σ, l, χ rispettivamente sezione idrica, larghezza in superficie e perimetro bagnato.
- R raggio idraulico.
- s, t ascissa, misurata lungo la linea di fondo, e tempo.
- i pendenza di fondo.
- J forza resistente per unità di peso della corrente, espressa, in genere, da una relazione del tipo $J = \frac{U^p}{K^2 R^{2m}}$.
- K, p, m , costanti caratteristiche della suddetta espressione di J .
- M parametro definito da $M = 1 - R \frac{d\chi}{d\sigma}$.
- N parametro definito da $N = 1 - \frac{1}{3} \frac{\sigma}{l} \frac{dl}{d\sigma}$.

Si sono indicate, infine, con l'indice zero al piede le grandezze che si riferiscono a condizioni di moto uniforme.

Napoli, maggio 1960.

BIBLIOGRAFIA

- [1] M. VIPARELLI: *Correnti rapide*. - « L'Energia Elettrica », n. 7, vol. XXXV, 1958.
- [2] « The Engineer », vol. LVIII, Londra 1884, II, pag. 294.
- [3] G. IPPOLITO: *Modelli di correnti rapide*. - Atti del Convegno di Venezia, Acc. Naz. dei Lincei, ottobre 1955.
- [4] E. P. FEDOROV: *Ob obrazovanii voln na bistrotokach*. - « Gidrotechniceskoje Stroitelstvo », n. 3, 1954, pagg. 29 a 32.
- [5] E. P. FEDOROV: *Pricini volnoobrazovania na bistrotokach i meropriatia po evu predupregdeniu*. - « Gidrotechniceskoje Stroitelstvo », n. 6, 1956, pagg. 49-51.
- [6] K. J. ARSENEVICI: *Izucenie vozdeistava nabegaiuš voln na gidrotechniceskoje soorugenia*. - « Gidrotechniceskoje Stroitelstvo », n. 1, 1955, pagg. 34-37.
- [7] K. J. ARSENEVICI: *Kriterii volnoobrazovanii v kanalach s bolsim uklonam*. - « Gidrotechniceskoje Stroitelstvo », n. 3, 1956, pagg. 41-44.
- [8] G. DE MARCHI: *Nozioni di Idraulica con particolare riguardo alle bonifiche*. - « Edizioni Agricole », Bologna, pag. 142 e segg.
- [9] D. BONVICINI: *Sulla propagazione delle perturbazioni di regime nei corsi a pelo libero*. - « L'Elettrotecnica », ottobre 1934, pag. 652.
- [10] P. MASSÉ: *Le problème du mascaret*. - « Revue Générale de l'Hydraulique », n. 9, 1936, pag. 489.
- [11] V. V. VEDERNIKOV, J. V. MASTIZII, M. V. POTAPOV: *Neustanovivšiesia dvigenie vodnogo potoka v otkrytom rusle*. - « A.N. U.R.S.S. » Mosca, 1947, pagg. 35 e segg.
- [12] A. CRAYA: *Calcul graphique des régimes variables dans les canaux*. - « La Houille Blanche », marzo 1946, pag. 128.
- [13] *Report of British Association for the Advancement of Science*. - Londra 1905, pag. 301.
- [14] P. FORCHHEIMER: *Hydraulik*. - II ediz., Berlino, 1924, pagg. 201 a 203.
- [15] TH. RÜMELIN: *Wie bewegt sich fließendes Wasser?*. - Dresden, 1913, pagg. da 83 a 92.

RECAPITO DELL'AUTORE

DOTT. ING. CARLO MONTUORI - Istituto di Idraulica e Costruzioni Idrauliche dell'Università di Napoli, via Mezzocannone, 16.