



**REGIONE AUTONOMA DELLA SARDEGNA**

PRESIDENZA  
Direzione Generale Agenzia Regionale del  
Distretto Idrografico della Sardegna



**UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI CAGLIARI**

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DEL TERRITORIO  
Sezione di Ingegneria Idraulica

## Accordo di collaborazione scientifica

tra il Dipartimento di Ingegneria del Territorio dell'Università degli Studi di Cagliari e  
la Direzione generale Agenzia Regionale del distretto Idrografico della Sardegna

**Analisi modellistica per la definizione del franco idraulico da  
utilizzare nella progettazione, realizzazione e manutenzione delle  
infrastrutture a rete o puntuali – Art. 21 comma 1 e comma 2 lettera  
d. delle Norme di Attuazione del Piano stralcio per l'Assetto  
Idrogeologico della Regione Autonoma della Sardegna**

### RELAZIONE FINALE

#### **Responsabili Scientifici Università di Cagliari**

*Prof. Giovanni Maria Sechi*

*Prof. Giorgio Querzoli*

Collaboratori

*Ing. Saverio Liberatore*

*Ing. Simone Ferrari*

#### **Responsabili Scientifici Agenzia di Distretto Idrografico**

*Ing. Roberto Maurichi*

*Ing. Andrea Lazzari*



**REGIONE AUTONOMA DELLA SARDEGNA**

PRESIDENZA  
Direzione Generale Agenzia Regionale del  
Distretto Idrografico della Sardegna



**UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI CAGLIARI**

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DEL TERRITORIO  
Sezione di Ingegneria Idraulica

**Analisi modellistica per la definizione del franco idraulico da utilizzare nella progettazione, realizzazione e manutenzione delle infrastrutture a rete o puntuali – Art. 21 comma 1 e comma 2 lettera d. delle Norme di Attuazione del Piano stralcio per l'Assetto Idrogeologico della Regione Autonoma della Sardegna**

## **RELAZIONE FINALE**

### **1. Premesse**

Con il termine "*franco idraulico*" in letteratura usualmente si intende indicare quella parte della sezione trasversale del corso d'acqua, al di sopra della superficie del pelo libero, che deve essere lasciata libera dalla corrente in condizioni di verifica del dimensionamento con il massimo deflusso prevedibile (portata di piena di progetto). Con tale termine è quindi usuale riferirsi al *franco di progetto* utilizzato nella verifica del dimensionamento delle sezioni nelle situazioni di maggiore criticità. Per i corsi d'acqua naturali questa fase di verifica avviene, ovviamente, dopo la stima dell'idrogramma di piena, valutato con un tempo di ritorno coerente con le prescrizioni date nelle Norme del PAI della Regione Sardegna e in seguito alla definizione della geometria del canale. Anche ipotizzando una corretta quantificazione della geometria del canale con la realtà di esercizio, il *franco idraulico* ha lo scopo di introdurre un margine di sicurezza sulla stima delle altezze idriche che possono essere differenti da quelle di progetto, per effetto di fenomeni spesso non riprodotti nella modellazione di dimensionamento e per tener conto della presenza di oscillazioni (onde) nella corrente. Inoltre, il *franco idraulico* è utilizzato sia per cautelarsi dalle incertezze che in genere esistono nella



**REGIONE AUTONOMA DELLA SARDEGNA**

PRESIDENZA  
Direzione Generale Agenzia Regionale del  
Distretto Idrografico della Sardegna



**UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI CAGLIARI**

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DEL TERRITORIO  
Sezione di Ingegneria Idraulica

determinazione della scabrezza del contorno bagnato, le quali modificano le reali entità delle perdite di carico, sia nella difficile stima del trasporto solido, per gli effetti che questo ha sul deflusso idrico nel canale. La varietà dei fenomeni che possono essere associati alla definizione del *franco idraulico* ha come conseguenza che, nei manuali usualmente utilizzati nella progettazione, non vi sia una indicazione di tipo generale dell'entità da attribuire a questa grandezza a completamento della fase di verifica del dimensionamento.

Nella fase di dimensionamento il *franco idraulico* viene, quindi, generalmente stabilito con riferimento a semplici criteri prudenziali ma con il contestuale obiettivo della limitazione della spesa di realizzazione delle opere (*De Marchi et al. 1977*). In alcune tipologie di opera (ad es. attraversamenti stradali) è stato demandato alle Normative di settore il compito di indicare alcuni riferimenti per la sua determinazione, contestualmente con la definizione dei criteri di assunzione del tempo di ritorno per la valutazione della massima portata da adottare nel dimensionamento, coerentemente con i criteri di affidabilità generale delle opere.

Nel paragrafo successivo sarà fornita una elencazione sintetica dei criteri più frequentemente utilizzati per la determinazione del *franco idraulico* sia nel contesto nazionale che internazionale.

Per quanto riguarda l'ambito regionale, l'Art. 21 delle Norme di attuazione PAI fa riferimento alla necessità di definire “*disposizioni e norme tecniche che tendono a stabilire principi generali e prescrizioni per le attività di progettazione, realizzazione e manutenzione delle infrastrutture ai fini di prevenzione verso l'insorgere di pericoli idrogeologici*”. Pertanto, le Norme richiamano la necessità che sia preso in esame, nel contesto del corretto dimensionamento, anche il mantenimento della funzionalità nel tempo dell'infrastruttura. In via preliminare, al punto d) dell'art. 21 delle Norme, è indicato che le attività di progettazione, realizzazione e manutenzione devono “*garantire un franco sul livello della portata di progetto pari al massimo tra l'altezza cinetica della corrente ed un metro*”. In



**REGIONE AUTONOMA DELLA SARDEGNA**

PRESIDENZA  
Direzione Generale Agenzia Regionale del  
Distretto Idrografico della Sardegna



**UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI CAGLIARI**

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DEL TERRITORIO  
Sezione di Ingegneria Idraulica

termini generali, tali valori si possono considerare cautelativi rispetto a quelli che usualmente compaiono nelle normative e disposizioni sulla determinazione del franco idraulico, come è sinteticamente illustrato nel paragrafo seguente. L'eccessiva cautela di tale determinazione, conseguente alla stima suggerita in via preliminare dalle Norme PAI, è risultata evidente all'Agenzia di Distretto Idrografico in occasione di recenti progettazioni, in particolare per sistemazioni di alvei montani a forte pendenza. In queste situazioni, l'elevata velocità della corrente può determinare valori molto elevati del termine cinetico nella stima del *franco idraulico* ed influire in modo molto significativo nel dimensionamento delle sistemazioni idrauliche.

L'oggetto della presente relazione riguarda, pertanto, lo studio di criteri e prescrizioni che si inseriscono nella dichiarata necessità, precedentemente richiamata nelle Norme di attuazione PAI, di definire norme tecniche per la determinazione del *franco idraulico* nelle attività di progettazione e verifica funzionale delle infrastrutture di sistemazione idraulica dei corsi d'acqua.



**REGIONE AUTONOMA DELLA SARDEGNA**

PRESIDENZA  
Direzione Generale Agenzia Regionale del  
Distretto Idrografico della Sardegna



**UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI CAGLIARI**

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DEL TERRITORIO  
Sezione di Ingegneria Idraulica

## **2. Illustrazione dei criteri di stima adottati in ambito nazionale ed internazionale**

Come precedentemente accennato, non esiste un criterio generale ed universalmente adottato per la stima del *franco idraulico*. Esistono, tuttavia, anche in ambito nazionale, norme di settore che forniscono alcuni riferimenti per la sua determinazione, coerentemente con i criteri di affidabilità generale delle opere esaminate.

Per la progettazione dei canali alimentati dalle acque meteoriche, la normativa è spesso codificata dalle Autorità Idrauliche locali e dagli Enti di gestione delle strutture idrauliche nei propri manuali tecnici. In generale, si riscontra la condivisione nella definizione del *franco idraulico* inteso come *l'altezza verticale aggiuntiva da considerare in fase di dimensionamento della sezione di deflusso rispetto al livello idrico corrispondente alla portata di progetto*.

L'ambito di utilizzazione del termine è molto ampio e in tutte le categorie di opere idrauliche vi si fa riferimento ma, nel seguito, non saranno considerate le opere di sbarramento dei corsi d'acqua e le opere sulle aree litorali o portuali. Queste ultime, come noto, sono influenzate dalle escursioni di livello connesso alle condizioni meteo-marine e per tali speciali opere la quantificazione del franco è stabilita nelle norme tecniche con procedure applicabili in ambito diverso rispetto a quelle previste nel presente studio<sup>1</sup>.

La necessità di considerare il *franco idraulico* è attribuita alle opere di convogliamento delle acque (fiumi, canali, ecc) per preservare la funzionalità delle infrastrutture civili (strade, ferrovie, ponti, fabbricati, ecc.). Secondo alcuni

---

<sup>1</sup> Ad esempio si vedano le Norme Tecniche per la progettazione e la costruzione delle dighe (D.M. LLPP 22.03.1983 e successive integrazioni).



**REGIONE AUTONOMA DELLA SARDEGNA**

PRESIDENZA  
Direzione Generale Agenzia Regionale del  
Distretto Idrografico della Sardegna



**UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI CAGLIARI**

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DEL TERRITORIO  
Sezione di Ingegneria Idraulica

Regolamenti<sup>2</sup>, il *franco idraulico* può non considerarsi nel dimensionamento di opere temporanee come quelle provvisorie dei cantieri.

In fase di dimensionamento delle opere, la determinazione dell'altezza idrica in una sezione può essere eseguita sia in modo semplificato (ad es. utilizzando le relazioni valide in moto uniforme), che con metodi più complessi come la simulazione, eseguita mediante procedure di calcolo che risolvono le equazioni del moto su un dominio monodimensionale (1D) o multidimensionale (2D, etc) in condizioni di moto permanente o vario. Tali ultimi metodi sono ormai considerati affidabili dagli Enti che amministrano i distretti idrografici e forniscono soluzioni che possono essere considerate più rigorose se utilizzati in contesti di validità dei requisiti richiesti e se opportunamente calibrati.

Tuttavia, si vuole porre in evidenza che le procedure contenute nella normativa per la valutazione del *franco idraulico* non partono da presupposti di medesimo rigore metodologico per la determinazione del profilo della corrente idrica.

### ***Norme Internazionali***

In ambito internazionale, la normativa francese imposta la valutazione della *revanche hydraulique* (termine che indica il franco idraulico) in modo differenziato nei diversi distretti fluviali e le Autorità di protezione civile indicano una quota di sicurezza ottenuta aggiungendo l'altezza del *franco idraulico* rispetto alla quota idrica massima della piena di riferimento centenaria (*cote de référence*) o dell'evento più gravoso conosciuto se di portata maggiore. Per esempio, nel Dipartimento della Gironda<sup>3</sup> tale altezza prescritta è di +50 cm. Il metodo di calcolo della quota di riferimento varia da zona a zona ed è soggetta quasi ovunque ad un incremento a favore della sicurezza (tipicamente circa 30 cm) per tenere conto delle

---

<sup>2</sup> Si veda, ad esempio, su FHWA - U. S. Federal Highway Administration

<sup>3</sup> PPRi della Direction Départementale de l'Équipement de la GIRONDE



**REGIONE AUTONOMA DELLA SARDEGNA**

PRESIDENZA  
Direzione Generale Agenzia Regionale del  
Distretto Idrografico della Sardegna



**UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI CAGLIARI**

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DEL TERRITORIO  
Sezione di Ingegneria Idraulica

incertezze della modellazione idraulica e delle fluttuazioni del livello idrico dovuto alle perturbazioni al moto e alle possibili occlusioni delle sezioni<sup>4</sup>.

Negli Stati Uniti, la FHWA prescrive un *franco idraulico* (*freeboard*) in relazione alla pendenza e al regime di moto della corrente. Per le correnti veloci (ovvero in canali per i quali si fornisce indicativamente una pendenza > 10%), che sono soggette a perturbazioni e frangimenti del pelo libero con variazioni cospicue e repentine di profondità, in fase di progetto il *franco idraulico* (indicato come  $\delta h$ ) da adottarsi è almeno pari alla stessa profondità della corrente. Pertanto, nei canali con elevate pendenze si ha che  $\delta h = y$ , essendo  $y$  la profondità della corrente uniforme.

Per correnti lente, il *franco idraulico* minimo è di 0.5 ft (circa 15 cm).

Tali prescrizioni sono relative a tratti rettilinei dei canali. Nei tratti in curva, per l'effetto del cambiamento di direzione, il franco aggiuntivo rispetto al valore normalmente utilizzato per i tratti rettilinei (secondo la regola appena citata), è dato dalla relazione seguente:

$$\delta h = \frac{V^2}{g \cdot r} B$$

essendo  $V$  la velocità media della corrente,  $r$  il raggio di curvatura del tracciato e  $B$  la larghezza del pelo libero, mentre  $g$  è l'accelerazione di gravità.

Si osserva per inciso che, sempre riguardo alle correnti entro canali in curva, il Benini<sup>5</sup> riporta una relazione simile nella forma:

$$\delta h = 2.3 \frac{V^2}{g} (\log r_2 - \log r_1)$$

essendo  $r_1$  ed  $r_2$  i raggi di curvatura della sponda interna e di quella esterna.

Sempre la FHWA, in presenza di dispositivi di dissipazione nel fondo dei canali (rostri), il valore del franco da considerare per le sponde è dato dalla relazione seguente:

---

<sup>4</sup> PPRi - Plan de prevention des risques d'inondation de la LOUE dans le département du Doubs .

<sup>5</sup> Benini G. - Sistemazioni idraulico-forestali. Utet (1990)



**REGIONE AUTONOMA DELLA SARDEGNA**

PRESIDENZA  
Direzione Generale Agenzia Regionale del  
Distretto Idrografico della Sardegna



**UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI CAGLIARI**

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DEL TERRITORIO  
Sezione di Ingegneria Idraulica

$$\delta h = h + y_A + \frac{0.5(V_A \sin \varphi)^2}{g}$$

ove  $h$  è l'altezza sul fondo dei dissipatori;  $y_A$  e  $V_A$  indicano, rispettivamente, la profondità idrica e la velocità della corrente a monte dei dissipatori;  $\varphi$  è una funzione del numero di Froude e del rapporto  $y_A/h$ .

L'agenzia governativa US-UDFCD<sup>6</sup>, per il dimensionamento dei canali rivestiti di calcestruzzo, prescrive un franco totale calcolato mediante la relazione:

$$\delta h = 2.0 + 0.025V\sqrt[3]{y} + \Delta h_b \quad (\text{ft})$$

essendo  $h$  la profondità,  $V$  la velocità della corrente e  $\Delta h_b$  il sovrizzo relativo al tratto in curva per le correnti lente. Il valore minimo prescritto è di 2 ft (circa 61 cm) per i canali rivestiti, valore che scende a 1 ft per quelli a fondo e pareti in terra.

Ulteriori incrementi del *franco idraulico* sono prescritti, tuttavia in modo generico, per tenere conto delle ondulazioni del pelo libero per cause perturbatorie prevedibili. Nel caso di correnti veloci, l'Ente proibisce l'adozione in fase di progetto di tracciati dotati di curve.

Il Bureau of Reclamation del U.S. Dept. of the Interior, indica la necessità di adozione di un franco in relazione al rischio connesso all'insufficienza. Nei documenti tecnici viene riportato, tra i tipici casi di insufficienza, quello legato al mutamento delle condizioni di esercizio previste nella fase progettuale (ad esempio è indicata la vegetazione e la manutenzione fluviale in genere). Pertanto, nella stima del franco si fa riferimento alla esperienza derivante dall'osservazione su elementi idrici studiati in presenza di diversa tipologia e densità di vegetazione, effettuando simulazioni idrauliche calibrate sugli eventi di piena osservati.

Il problema della valutazione del *franco idraulico* viene dunque spostato sulla

---

<sup>6</sup> Urban Drainage and Flood Control District - Drainage criteria manual (2008) - Denver, CO





**REGIONE AUTONOMA DELLA SARDEGNA**

PRESIDENZA  
Direzione Generale Agenzia Regionale del  
Distretto Idrografico della Sardegna



**UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI CAGLIARI**

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DEL TERRITORIO  
Sezione di Ingegneria Idraulica

corretta valutazione del coefficiente di scabrezza (ad es. coefficiente di Manning).  
Il valore minimo da adottare per il *franco idraulico* è comunque di 1 ft (30.48 cm).  
In altri casi, per canali rivestiti, si adotta una dipendenza del franco dalle perturbazioni potenzialmente presenti nel pelo libero, suggerendo la relazione seguente:

$$\delta h = \sqrt[3]{k \cdot y}$$

essendo  $y$  la profondità della corrente indisturbata (oppure il valore medio della profondità della corrente, se perturbata) e  $k$  un coefficiente variabile tra 0.8 e 1.4 per portate variabili rispettivamente tra 0.5 e 85 m<sup>3</sup>/s.

In India, il *franco idraulico* suggerito dal CBIP<sup>7</sup> è fornito dalla tabella seguente e per le portate indicate:

*Tabella 1 - Valori di franco idraulico  $\delta h$  suggeriti dal CBIT*

Portata (m <sup>3</sup> /s)	<0.75	0.75÷1.5	1.5÷85	>85
$\delta h$ (m)	0.45	0.60	0.75	0.90

**Norme italiane**

Come in ambito internazionale così in quello nazionale italiano non esiste un criterio generale adottato per la stima del *franco idraulico*. Alcune norme di settore forniscono solamente i riferimenti per la sua determinazione coerentemente con i criteri di affidabilità generale delle opere da progettare.

Le "Norme Tecniche per le Costruzioni", aggiornate dal D.M. del 24 gennaio 2008, recano le istruzioni per l'applicazione del franco nei ponti (sia stradali che ferroviari), il quale dovrà essere aggiunto alla massima quota idrometrica relativa ad un evento di piena bicentenario, tenendo conto sia del trasporto solido "di fondo"

<sup>7</sup> Ranga Rayu, K.G., Flow through open channels, Tata McGraw Hill, India (1983) - Central Board of Irrigation & Power - New Delhi



**REGIONE AUTONOMA DELLA SARDEGNA**

PRESIDENZA  
Direzione Generale Agenzia Regionale del  
Distretto Idrografico della Sardegna



**UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI CAGLIARI**

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DEL TERRITORIO  
Sezione di Ingegneria Idraulica

sia del trasporto di materiale flottante. Tuttavia nessuna indicazione è fornita per la determinazione analitica del *franco idraulico*.

Nelle “*Istruzioni relative alla normativa tecnica dei ponti stradali*”<sup>8</sup>, come indicazione dei criteri per il franco minimo da applicarsi, si fa riferimento al livello idrico alla piena di progetto e alla tipologia dell'opera d'arte, da considerarsi nel contesto ambientale inteso in senso ampio. Nel caso di intersezione con corsi d'acqua arginati, una prescrizione prevede che la quota di sottotrave dell'impalcato sia maggiore o uguale alla quota della sommità arginale, rimandando implicitamente a quest'ultima la determinazione dell'altezza della luce libera da assumersi in fase di progetto.

L'ANAS, per il dimensionamento degli attraversamenti, indica un legame funzionale tra la sicurezza idraulica e quella dei trasporti e, nel rimandare alle citata Legge quadro sulle costruzioni, auspica una valutazione della compatibilità idraulica della struttura di attraversamento espressa in termini di analisi costi-benefici piuttosto che di semplice applicazione di coefficienti di sicurezza. L'attuale indirizzo della Direzione Centrale Progettazione è diversificato in funzione delle sezioni tipo stradali, rimanendo comunque allineato verso i massimi richiesti dalle norme: Per le infrastrutture di caratteristiche autostradali, classificate come Tipo A nel D.M. 05/11/2001, il franco minimo del ponte è assunto pari al massimo valore tra 1 metro sul livello idrico e l'altezza cinetica della corrente, con riferimento ad un evento di piena avente tempo di ritorno di 500 anni, per i corsi d'acqua principali, e di 200 anni, per i corsi d'acqua secondari. Per le infrastrutture extraurbane principali, classificate come Tipo B nel D.M. 05/11/2001, il franco minimo del ponte è assunto pari al massimo valore tra 1 metro sul livello idrico e l'altezza cinetica della corrente, con riferimento ad un evento di piena avente tempo di ritorno di 200 anni. Sui corsi d'acqua principali si richiede comunque che il

---

<sup>8</sup> Circ. n. 34233 del 25 febbraio 1991 del Ministero LL.PP. Art.2 :*"La quota idrometrica e il franco dovranno essere posti in correlazione con la piena di progetto, anche in considerazione della tipologia dell'opera e delle situazioni ambientali."*



**REGIONE AUTONOMA DELLA SARDEGNA**

PRESIDENZA  
Direzione Generale Agenzia Regionale del  
Distretto Idrografico della Sardegna



**UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI CAGLIARI**

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DEL TERRITORIO  
Sezione di Ingegneria Idraulica

livello di massima piena corrispondente ad un evento con tempo di ritorno di 500 anni non raggiunga la quota di intradosso dell'opera. Per le infrastrutture extraurbane secondarie, classificate come Tipo C nel D.M. 05/11/2001, il franco minimo del ponte è assunto pari al massimo valore tra 1 metro sul livello idrico e l'altezza cinetica della corrente, con riferimento ad un evento di piena avente tempo di ritorno di 200 anni.

L'Autorità di Bacino del Po, nel formulare le direttive per la riduzione del rischio idraulico stabilisce "*l'accettabilità del rischio idraulico*" considerando un franco minimo non inferiore a 0.5 volte l'altezza cinetica della corrente e, comunque, non inferiore a 1.00 m.

Per quanto riguarda le opere di protezione, l'applicazione di tale indicazione, da considerarsi in riferimento alla piena di progetto, viene però confrontata con il *franco effettivo* registrato nel "Catasto delle Arginature", documentazione redatta dall'Autorità di Bacino che riporta sia i massimi livelli delle piene osservate che la misura dell'entità del *franco idraulico* rispetto alla quota di piena (v. l'esempio di Tabella 2).

Per le infrastrutture di attraversamento, sempre l'Autorità di Bacino del Po, considera il citato criterio per esprimere la compatibilità idraulica, aggiungendo che il valore del franco deve essere assicurato per almeno 2/3 della larghezza della luce libera. Nel caso di corsi d'acqua arginati, il franco minimo tra la quota idrometrica relativa alla piena di progetto e la quota di sommità del rilevato di accesso al ponte (piano viabile) deve essere non inferiore a 0.5 volte l'altezza cinetica della corrente e comunque non inferiore a 1.00 m.

Si osserva infine che, in ambito normativo, nella tematica della valutazione del franco idraulico, non compaiono in nessun caso gli aspetti legati alla affidabilità delle elaborazioni idrologiche alla base delle verifiche idrauliche.



**REGIONE AUTONOMA DELLA SARDEGNA**

PRESIDENZA

Direzione Generale Agenzia Regionale del  
Distretto Idrografico della Sardegna



**UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI CAGLIARI**

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DEL TERRITORIO  
Sezione di Ingegneria Idraulica

*Tabella 2: Autorità Bacino Po - Catasto delle Arginature. Esempio di compilazione*

ARGINATURA SINISTRA									distanze progressive alveo
franco piena simpo82	franco piena PAI Tr=200	franco piena 2000	n. sezione rilievo 1999	n. sezione rilievo AIPO 2004 - 2005	somm. arg. rilievo AIPO 2004-2005	livello piena ottobre 2000	livello piena PAI Tr=200 anni	località	
0.56	-0.32	0.78	39E	S39E	27.260	26.48	27.58		457671.00
0.38	-0.43	0.74	39D	S39D	27.280	26.54	27.71	CAVALLARA	455936.00
0.51	-0.24	0.70	39C	S39C	27.600	26.90	27.84		454301.00
0.55	-0.15	0.78	39B	S39B	27.780	27.00	27.93	VILLASTRADA	453070.00
0.61	-0.05	0.82	39A	S39A	27.970	27.15	28.02	CSABBIONI	451941.00
1.11	0.49	1.22	39	S39	28.600	27.38	28.11	DORSOLO	450653.00
1.27	0.62	1.38	38E	S38E	28.900	27.52	28.28		449443.00
1.26	0.58	1.32	38D1	S38D_1	29.000	27.68	28.42	PONTE	448458.00
1.26	0.62	1.30	38D	S38D	29.100	27.80	28.48		447925.00
1.22	0.66	1.16	38C	S38C	29.240	28.08	28.58	CORREGGIOVERDE	447014.00
0.83	0.36	0.91	38B	S38B	29.060	28.15	28.70		446045.00

### **Letteratura scientifica**

La comunità scientifica internazionale studia il problema della determinazione del *franco idraulico* da adottarsi nei canali a sezione di forma comunque definita, inquadrandolo in quello più generale del dimensionamento ottimale della sezione trasversale.

Pur riscontrandosi varie specificità tra le differenti metodologie proposte dagli Autori per la soluzione del problema, il franco idraulico è considerato come una variabile incognita esplicita del problema. Proprio riguardo a quest'ultimo aspetto, si possono individuare almeno due differenti forme funzionali che sono spesso adottate nelle argomentazioni proposte: una è quella che considera il franco dipendente dal valore della portata, la quale è assunta come dato del problema. Un'altra ipotesi considera invece il franco dipendente in modo diretto dalla profondità della corrente,  $y$ , secondo la relazione funzionale  $\delta h = \varepsilon \cdot y^\Delta$  con  $\varepsilon$  costante e  $\Delta$  dipendente dalla portata.

Sempre più spesso, inoltre, il problema è affrontato con metodi di ottimizzazione per la determinazione del valore della sezione di costo minimo e con l'ausilio di metodi probabilistici per la determinazione del rischio di insufficienza, con



**REGIONE AUTONOMA DELLA SARDEGNA**

PRESIDENZA  
Direzione Generale Agenzia Regionale del  
Distretto Idrografico della Sardegna



**UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI CAGLIARI**

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DEL TERRITORIO  
Sezione di Ingegneria Idraulica

metodologie che appaiono non prestarsi ad una immediata applicazione pratica. Tali ricerche, infatti, sono spesso indirizzate allo studio di relazioni analitiche relative a sezioni geometriche aventi forme teoriche (ad es. paraboliche o circolari), dunque differenti da quelle tipicamente utilizzate nell'idraulica delle bonifiche e fluviale, ragione per la quale appaiono ancora difficilmente applicabili direttamente ai casi reali.

Dall'analisi degli elementi considerati sia in ambito normativo (sotto forma di prescrizioni, raccomandazioni o anche soltanto buone pratiche) che di letteratura scientifica, è stato possibile rilevare che gli aspetti (ovvero le grandezze) che intervengono nella scelta dell'entità da attribuire al *franco idraulico* in un corso d'acqua, sono principalmente i seguenti:

- a) il raggio di curvatura del tracciato planimetrico;
- b) la pendenza longitudinale del tracciato;
- c) il rivestimento (scabrezza, tipologia);
- a) la vegetazione;
- b) la portata;
- c) la profondità della corrente;
- d) la presenza di opere trasversali (salto, sbarramento, dissipazione, attraversamento).

Altri fattori che sono considerati nella sintesi sopra riportata, e che provengono soprattutto dalla letteratura scientifica, riguardano aspetti di gestione della rete idrografica e del territorio interessato dalle sistemazioni fluviali. Questi fattori possono incidere sulla possibilità di una variazione del quadro di riferimento progettuale della rete e sulla definizione del rischio nelle aree limitrofe. Più precisamente si possono riportare i seguenti elementi:

- e) il rischio di frana individuato nelle aree prossime alle sponde;
- f) il programma di manutenzione fluviale;
- g) la potenzialità di oscillazioni di livello o di rigurgito da valle;



**REGIONE AUTONOMA DELLA SARDEGNA**

PRESIDENZA  
Direzione Generale Agenzia Regionale del  
Distretto Idrografico della Sardegna



**UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI CAGLIARI**

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DEL TERRITORIO  
Sezione di Ingegneria Idraulica

- h) le potenziali alterazioni del reticolo idrografico a monte e del regime delle portate in arrivo.



**REGIONE AUTONOMA DELLA SARDEGNA**

PRESIDENZA  
Direzione Generale Agenzia Regionale del  
Distretto Idrografico della Sardegna



**UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI CAGLIARI**

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DEL TERRITORIO  
Sezione di Ingegneria Idraulica

### **3. Alcune considerazioni preliminari alla definizione del franco idraulico**

Alcune indicazioni precedentemente illustrate sulla determinazione del *franco idraulico* prendono spunto dalla valutazione dei numerosi fattori di incertezza insiti nella fase di progettazione e implicano spesso la stima di parametri di difficile determinazione.

Una prima considerazione riguarda, pertanto, la natura dei fattori di incertezza che si vogliono considerare nel determinare il *franco idraulico*. È necessario che, allorquando non siano considerati fattori di incertezza nella determinazione del livello idrico, con maggiore rigore non ci si dovrebbe riferire al termine “franco idraulico” per assumere un adeguato livello di affidabilità dell’opera mentre le indicazioni dovrebbero discendere da una analisi più dettagliata dei reali fenomeni nei quali è insita l’incertezza, utilizzando strumenti di calcolo e modellazione adeguati. È, ad esempio, più corretta un’analisi del rischio legato all’incertezza nella determinazione delle portate di piena, allorquando ci si voglia cautelare da un possibile sotto-dimensionamento delle opere dovuto all’accadimento di eventi idrologici più critici. Così come dovrebbe essere prevista una verifica della funzionalità delle opere di dreno anche in condizioni non corrispondenti alla situazione di “opere appena realizzate”, prevedendo ad esempio un certo livello di possibile interrimento delle sezioni a causa del materiale depositato o di variazione nel tempo delle scabrezze. Quest’ultimo approccio, peraltro usuale in ambito acquedottistico (verifica a tubi usati, verifica con rotture, ecc.), non trova ancora sistematica diffusione nella verifica del dimensionamento delle opere di dreno e delle sistemazioni idrauliche.

Una seconda considerazione preliminare deriva dal fatto che nelle Norme di



**REGIONE AUTONOMA DELLA SARDEGNA**

PRESIDENZA  
Direzione Generale Agenzia Regionale del  
Distretto Idrografico della Sardegna



**UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI CAGLIARI**

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DEL TERRITORIO  
Sezione di Ingegneria Idraulica

Attuazione del PAI della Regione Sardegna è formulata la dipendenza del franco dall'altezza cinetica, oltre all'assunzione del valore minimo di un metro. Conseguentemente la definizione del franco è legata alla corretta determinazione delle condizioni di deflusso e della velocità della corrente. A tale proposito è però da osservare che la velocità, in situazioni di pendenza elevata, tipica dei bacini montani, andrebbe limitata a valori ammissibili in relazione alle caratteristiche della sezione, ai materiali costruttivi ed alle reali condizioni di deflusso.

Sulla velocità ammissibile della corrente (mediata tra quella della sezione principale e delle eventuali aree golenali) le indicazioni di attribuzione non sono univoche. Ad esempio, in *Supino (1965)* le velocità della corrente di piena per i canali in progetto sono formulate in base alla pendenza, indicando un valore massimo ammissibile per impedire l'erosione del fondo e delle sponde. Tali valori, in relazione al tipo di materiale trasportato in sospensione, sono riportati dall'Autore per "canali assestati". Per i canali rivestiti la velocità limite assume valori superiori, partendo da circa 2 m/s per quelli inerbiti. Anche se non detto esplicitamente, l'Autore parla di velocità medie della corrente in canali artificiali. Da molti altri Autori, le medesime indicazioni di progetto vengono riprese ed ampliate per i canali rivestiti in calcestruzzo, per i quali sono indicate velocità massime di 2-3 m/s e per i cunettoni rivestiti in roccia dura nei quali si trovano indicazioni fino a velocità massime anche di 8-10 m/s.

Tuttavia, come è noto, solo nel caso di correnti lineari, l'analisi idraulica eseguita con le usuali relazioni, che legano la profondità della corrente alla portata e alle caratteristiche dell'alveo, non presenta difficoltà. Tali relazioni, sono, di fatto, utilizzabili per le pendenze che usualmente si riscontrano nei canali di bonifica e nei tratti di pianura dei corsi d'acqua naturali. Nel caso dei tratti più montani invece le condizioni del moto si modificano radicalmente e vengono a perdere di validità le ipotesi che rendevano applicabili i metodi di determinazione dei battenti idrici con pendenze modeste. Inoltre, all'aumentare della pendenza si ha la comparsa di fenomeni di auto-aerazione della corrente liquida la quale, durante il moto, assorbe





**REGIONE AUTONOMA DELLA SARDEGNA**

PRESIDENZA  
Direzione Generale Agenzia Regionale del  
Distretto Idrografico della Sardegna



**UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI CAGLIARI**

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DEL TERRITORIO  
Sezione di Ingegneria Idraulica

notevoli quantitativi di aria. Il moto avviene quindi interessando una emulsione di aria e acqua (oltre che i detriti) che occupa un volume molto più grande della sola fase liquida e le velocità nella sezione trasversale hanno valori molto diversi allontanandosi dal fondo (*Viparelli, 1958; Ferro, 2002*). Ne deriva una imprecisione nella determinazione dei battenti idrici, essendo indistinguibile la fase liquida da quella gassosa.

In relazione alla portata e alla pendenza del fondo, inoltre, il moto potrebbe avvenire per onde di traslazione con formazione di treni d'onde, presentando aspetti che allontanano ulteriormente da quelli presi in considerazione nella trattazione delle correnti lineari.

In situazioni particolarmente critiche, laddove intervengono fattori di limitazione delle velocità con salti e dissipatori, sono state realizzate verifiche sperimentali delle condizioni di moto per avere un riscontro delle ipotesi di dimensionamento (*Pagliara et al., 2002, Da Deppo et al., 2004*).



**REGIONE AUTONOMA DELLA SARDEGNA**

PRESIDENZA  
Direzione Generale Agenzia Regionale del  
Distretto Idrografico della Sardegna



**UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI CAGLIARI**

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DEL TERRITORIO  
Sezione di Ingegneria Idraulica

#### **4. Criteri generali per la definizione franco idraulico**

Le considerazioni preliminari esposte nel paragrafo precedente ribadiscono come sia necessario che siano correttamente considerati i diversi fattori di incertezza nella determinazione del livello idrico, non riferendoli in ogni caso al termine di *franco idraulico*, per assumere un adeguato livello di affidabilità dell'opera di sistemazione idraulica.

Si ritiene che il valore del *franco idraulico di riferimento*, per alvei regolarizzati e in condizioni ordinarie di moto uniforme, possa essere stimato con la relazione riportata da *Chow (1959)* ed utilizzata dall'US Bureau of Reclamation. Riportata in unità metriche, l'equazione per ricavare il franco  $\delta h_f$  può essere scritta:

$$\delta h_f = 0.87\sqrt{y} \quad (1)$$

nella quale con  $y$  si intende la profondità media del corso d'acqua. Il coefficiente 0.87 deriva dal considerare l'espressione proposta dall'US Bureau of Reclamation con portate superiori a 3000 piedi cubi al secondo, ossia circa 85 m<sup>3</sup>/s.

Tuttavia, è necessario puntualizzare che il valore del franco può essere calcolato con la (1) solo quando la dimensione dell'alveo regolarizzato rimane nell'ambito delle dimensioni usuali dei canali per i quali tale formula fu inizialmente proposta. Si può conseguentemente assumere il valore  $y_{\max} = 3$  metri come limite di applicazione della espressione (1). In corrispondenza di tale valore si ricava:

$$\delta h_{f_{\max}} = 0.87 \sqrt{y_{\max}} \approx 1.50 \text{ m.}$$

Oltre a ricavare il *franco idraulico di riferimento* in condizioni ordinarie, le analisi e gli approfondimenti qui sviluppati, coerentemente a quanto richiesto all'Art. 21 delle Norme di Attuazione del PAI, sono stati suddivisi in tre principali filoni che analizzano problemi per molti aspetti complementari tra loro:



**REGIONE AUTONOMA DELLA SARDEGNA**

PRESIDENZA  
Direzione Generale Agenzia Regionale del  
Distretto Idrografico della Sardegna



**UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI CAGLIARI**

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DEL TERRITORIO  
Sezione di Ingegneria Idraulica

1. Corretta determinazione della scabrezza del contorno bagnato della sezione idraulica, anche in relazione all'influenza del trasporto solido sulle altezze di deflusso conseguente alle entità e dimensioni degli elementi che lo compongono.
2. Analisi delle correnti in corsi d'acqua montani caratterizzati da alvei molto pendenti e velocità di deflusso elevate, sistemazioni che prevedono la realizzazione di gradinate o scalinate che determinano correnti che includono notevoli quantitativi di aria.
3. Analisi delle situazioni in cui deve essere tenuta in conto la possibilità che una perturbazione, generata più a valle, determini una transizione brusca alla corrente lenta attraverso un risalto idraulico, con un conseguente innalzamento del livello idrometrico.

L'analisi dei processi di moto è stata sviluppata considerando gli strumenti modellistici che sono dati come riferimento nel PAI in modo da consentire l'individuazione di criticità che possono essere trasferite nel *franco di progetto* anche in relazione alla incertezza sulla aderenza del modello. L'analisi è stata sviluppata sia in termini generali sia con riferimento ad un insieme predefinito di situazioni, definite di concerto con l'Agenzia Regionale del Distretto Idrografico, in modo da verificare numericamente le criticità. Sempre per via modellistica può essere valutata la criticità sulle altezze di deflusso conseguenti a modifiche nelle ipotesi di scabrezza e ad ipotesi di parziale interrimento della sezione dovuta al deposito in una sequenza con forte e debole pendenza dell'alveo.

Nel seguito sono analizzati gli aspetti precedentemente richiamati che intervengono nella definizione di termini aggiuntivi rispetto al *franco idraulico di riferimento*, definito tramite la espressione (1), arrivando, infine, alla determinazione del *franco idraulico* come valore massimo tra criteri alternativi di calcolo.



**REGIONE AUTONOMA DELLA SARDEGNA**

PRESIDENZA  
Direzione Generale Agenzia Regionale del  
Distretto Idrografico della Sardegna



**UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI CAGLIARI**

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DEL TERRITORIO  
Sezione di Ingegneria Idraulica

#### **4.1 Analisi per la scelta della scabrezza d'alveo ed influenza del trasporto solido sul deflusso**

Un importante elemento di incertezza nella valutazione della altezza della corrente, che viene spesso riportato al *franco idraulico*, è relativo alla scelta della scabrezza del perimetro bagnato. In un alveo naturale il coefficiente di scabrezza è una misura globale delle resistenze al moto e dipende, oltre che dalla distribuzione e granulometria del materiale dell'alveo e dalla presenza di vegetazione, dalle irregolarità dell'alveo. Infatti, in assenza di movimento del materiale solido sul fondo, di cui si dirà nel seguente punto, il coefficiente di scabrezza dovrà tener conto di due diversi processi dissipativi: uno imputabile alla dimensione e disposizione degli elementi che determinano le resistenze al moto, l'altro ad ulteriori effetti dissipativi imputabili a macrovortici generati dalla separazione del flusso idrico nei bruschi cambiamenti di direzione e di forma delle sezioni trasversali (*Bray, 1987; Ferro, 2002*). Il calcolo idraulico si svolge usualmente decomponendo la sezione in zone omogenee (aree golenali, area centrale, ecc.) ed assegnando scabrezze e coefficienti di resistenza diversi per le diverse parti della sezione. Questa approssimazione è usualmente accettata pur essendovi conoscenza del fatto che un tale stato di separazione del moto non si possa produrre nella realtà del deflusso.

Ovviamente, la presenza di ulteriori fattori dissipativi determina l'innalzamento del livello idrico. Fatto salvo il limite dato dalla valutazione di  $\delta h$  con la (1), si ritiene quindi che particolare attenzione debba essere posta nella stima dei coefficienti di scabrezza. A titolo esemplificativo si richiama l'espressione proposta da *Cowan (1954)*, per il calcolo del coefficiente  $n$  di *Manning*:

$$n = (n_0 + n_1 + n_3 + n_4) m_5 \quad (2)$$

nella quale  $n_0$  è il valore di  $n$  attribuito ad un corso d'acqua ideale, cilindrico,



**REGIONE AUTONOMA DELLA SARDEGNA**

PRESIDENZA  
Direzione Generale Agenzia Regionale del  
Distretto Idrografico della Sardegna



**UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI CAGLIARI**

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DEL TERRITORIO  
Sezione di Ingegneria Idraulica

regolare ed affetto dalla sola scabrezza corrispondente al materiale di costruzione, mentre gli altri termini tengono conto della irregolarità della superficie di fondo e delle sponde ( $n_1$ ), delle variazioni di forma e dimensioni della sezione trasversale ( $n_2$ ) degli ostacoli presenti sul fondo dell'alveo ( $n_3$ ), della vegetazione ( $n_4$ ) e dei meandri ( $m_5$ ). In alternativa, il valore della scabrezza dovrà essere adeguatamente innalzato per tener conto dei fattori dissipativi ulteriormente presenti oltre quelli strettamente legati alla scabrezza dell'alveo.

Per le parti più montane del corso d'acqua, una relazione che assegna il valore del coefficiente  $K_s$  di *Gauckler-Strickler* (e quindi  $1/n$  di *Manning*) è la seguente:

$$K_s = 26/d_{90}^{1/6} \quad (3)$$

nella quale  $d_{90}$  è il diametro (in metri) cui corrisponde in una analisi granulometrica del materiale d'alveo un passante (in peso) pari al 90% del campione. In alcune formulazioni, al coefficiente 26 è sostituito 24. La formula parte dal presupposto che la resistenza al moto sia principalmente determinata dal materiale trasportato d'alveo, piuttosto che dal materiale di costruzione del manufatto. Questo principio è diffusamente argomentato da *Majone (1964)* che riporta numerose sperimentazioni effettuate su canali con fondo fisso con trasporto solido per il calcolo delle resistenze al moto. Sperimentalmente si è dimostrato che per il calcolo delle resistenze al moto può essere applicata la formula di *Colebrook*, purché si assumano opportuni valori per la scabrezza  $\varepsilon$  che dipendono dalle caratteristiche della corrente e dal materiale trasportato; in particolare la dipendenza è assunta con il diametro medio  $d_m$  del materiale trasportato. Nel caso di correnti miste liquido-solido in condizioni di trasporto limite sono proposte le seguenti espressioni che legano la scabrezza idraulica  $\varepsilon$  alle caratteristiche della corrente (pendenza del fondo  $i$ , raggio idraulico  $R_s$ , pesi specifici  $\gamma$  e  $\gamma_s$ ) ed al diametro medio del materiale trasportato  $d_m$ :

$$\frac{\varepsilon}{d_m} = 3.3 \frac{\gamma R_s i}{\gamma_s d_m} \quad \text{valida nel campo: } 0 < \frac{\gamma R_s i}{\gamma_s d_m} < 0.2 \quad (4)$$



**REGIONE AUTONOMA DELLA SARDEGNA**

PRESIDENZA  
Direzione Generale Agenzia Regionale del  
Distretto Idrografico della Sardegna



**UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI CAGLIARI**

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DEL TERRITORIO  
Sezione di Ingegneria Idraulica

$$\frac{\varepsilon}{d_m} = 0.444 \left( \frac{\gamma R_s i}{\gamma_s d_m} \right)^{0.5} \quad \text{valida nel campo:} \quad \frac{\gamma R_s i}{\gamma_s d_m} \geq 0.2 \quad (5)$$

dalle quali, per sostituzione nella formula di *Colebrook*, si ottengono i valori di  $\frac{1}{\sqrt{\lambda}}$

e conseguentemente si ricava il coefficiente di  $K_s$  di *Gauckler-Strickler*:

$$K_s = \sqrt{g \frac{8}{\lambda}} \frac{1}{R_s^{1/6}} \quad (6)$$

Pertanto, nelle analisi di progetto, oltre a considerare le scabrezze dei materiali utilizzati nella sistemazione idraulica dei canali, si dovrà realizzare una accurata analisi del trasporto solido e modificare conseguentemente la scabrezza nelle verifiche idrauliche del dimensionamento.

In conclusione, fatto salvo quanto sarà esposto nei paragrafi seguenti per i canali a forte pendenza ed elevata velocità, il valore del franco sarà calcolato con le espressioni (1), o quelle di seguito proposte, avendo valutato i valori di  $y$  conseguenti all'adozione di adeguati indici di scabrezza.



**REGIONE AUTONOMA DELLA SARDEGNA**

PRESIDENZA  
Direzione Generale Agenzia Regionale del  
Distretto Idrografico della Sardegna



**UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI CAGLIARI**

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DEL TERRITORIO  
Sezione di Ingegneria Idraulica

## **4.2 Analisi delle correnti in alvei molto pendenti e con velocità di deflusso elevate**

In un alveo molto pendente nel determinare il profilo della corrente a pelo libero si deve considerare che, pur mantenendo le sue caratteristiche di linearità, non si può più ammettere che le sezioni trasversali, ancora piane, siano comunque verticali. Conseguentemente l'equazione differenziale del moto permanente dovrà essere modificata:

$$(i - J) = \frac{d}{ds} \left( y \cos \alpha + \frac{V^2}{2g} \right). \quad (7)$$

È inoltre noto che negli alvei ad elevata pendenza si verificano due fenomeni particolari: il processo di aereazione e la formazione di treni di onde (*Montuori, 1984, 1986; Ferro, 2002; Lippe, 1984*).

Con valori elevati di velocità le correnti assorbono durante il moto notevoli quantitativi di aria, la superficie libera perde la sua continuità e le bolle d'aria sono trascinate all'interno della corrente. La corrente è pertanto costituita da una miscela di acqua e di aria, con una aliquota di quest'ultima che cresce dal fondo alla superficie. In alcune correnti molto veloci si ha inoltre la formazione di onde di traslazione molto veloci. Questi treni di onde (*roll waves*) si presentano come intumescenze spumeggianti che si presentano ad intervalli regolari. In queste condizioni viene a mancare la chiara definizione della superficie libera e conseguentemente la possibilità di una precisa definizione delle sponde del canale. Il dimensionamento delle opere con regime di corrente areata dovrà anche essere utilizzato in presenza di opere a scalinata o gradinata, frequentemente utilizzate nelle sistemazioni montane di corsi d'acqua a forte pendenza. Questo tipo di opere è realizzato tramite gradini più o meno allungati con salti di fondo alle estremità. I



**REGIONE AUTONOMA DELLA SARDEGNA**

PRESIDENZA  
Direzione Generale Agenzia Regionale del  
Distretto Idrografico della Sardegna



**UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI CAGLIARI**

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DEL TERRITORIO  
Sezione di Ingegneria Idraulica

regimi di moto che si possono verificare sono due: regime di vena (*nappe flow*), e regime di corrente aerata (*skimming flow*). Nel primo caso, la corrente forma un risalto idraulico su ciascun gradino che si comporta come una piccola vasca di dissipazione, il secondo caso si verifica invece per le portate e le pendenze più elevate, quando i gradini si comportano come asperità che producono vortici al di sotto della superficie limite che raccorda il deflusso sulla gradinata. Le esperienze (*Pagliara ed al. 2002*) hanno mostrato che le condizioni affinché si verifichi il regime di vena sono che sia  $h/l < 0.20$  e  $y_c/h < 0.33$ , dove  $h$  ed  $l$  sono l'altezza e la larghezza del gradino ed  $y_c$  l'altezza critica della corrente. Nello *skimming flow*, corrente aereata, il moto dell'acqua determina invece la sommersione dei gradini. La condizione perché si verifichi questo regime è che l'altezza critica della corrente risulti superiore al valore critico caratteristico  $y_{cc}$  definito dall'equazione (*Becciu e Paoletti, 2010*):

$$\frac{y_{cc}}{h_g} = 1.057 - 0.465 \frac{h_g}{l} \quad (8)$$

(valida per  $0.2 \leq h_g/l \leq 1.25$ ) dove con  $l$  si indica la lunghezza e con  $h_g$  l'altezza della gradinata.

In queste situazioni la concentrazione media d'aria nelle correnti areate può superare il 70% ( $m^3_{\text{aria}} / m^3_{\text{miscela}}$ ) quando l'angolo della rampa rispetto all'orizzontale è di  $75^\circ$  (*Becciu e Paoletti e 2010*).

In definitiva, riguardo all'introduzione di criteri di definizione del *franco idraulico* in correnti a forte pendenza ed elevata velocità, fatti salvi i criteri di limitazione delle velocità determinate dalle caratteristiche dei materiali di rivestimento dell'alveo, si ritiene che nelle Norme PAI sia necessario introdurre un valore discriminante di velocità, assunto in 5 m/s, al di sopra del quale l'altezza complessiva del *franco idraulico* debba essere determinata come somma di due termini:

$$\delta h_2 = \delta h_1 + \alpha y' \quad (9)$$





**REGIONE AUTONOMA DELLA SARDEGNA**

PRESIDENZA  
Direzione Generale Agenzia Regionale del  
Distretto Idrografico della Sardegna



**UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI CAGLIARI**

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DEL TERRITORIO  
Sezione di Ingegneria Idraulica

dove  $\delta h_1$  è il *franco idraulico di riferimento* dato dalla (1) e con  $y'$  si intende l'altezza dello strato superiore della corrente interessata dalla presenza di aria in miscela con l'acqua. Il coefficiente  $\alpha$  è quindi introdotto per tener conto che la vena areata può portare a significativi innalzamenti della corrente. Il valore di  $\alpha$  è dunque uguale a 0 per velocità inferiori o uguali a 5 m/s, mentre il valore di  $\alpha$  è uguale ad 1 per velocità uguali o superiori a 15 m/s e varia linearmente tra 0 ed 1 nel campo di velocità comprese tra 5 e 15 m/s.

Con riferimento a quanto attualmente adottato in via provvisoria dalle Norme di attuazione PAI, si nota che ad una velocità di 5 m/s corrisponde una altezza cinetica  $v^2/2g$  uguale a 1.27 m. Questa stima del franco è eguagliata da  $\delta h_1$  con  $y = 2.13$  m, mentre il secondo termine della (9) è nullo in quanto  $\alpha = 0$  poiché la velocità è al suo valore limite  $v = 5$  m/s. Per una velocità di 10 m/s si ottiene dalle Norme PAI l'altezza cinetica  $v^2/2g$  uguale a 5.10 m, valore notevolmente elevato per una stima verosimile del *franco idraulico*. Anche ipotizzando  $y'=y$  tale valore si otterrebbe dalla (9) per profondità della corrente  $y$  uguale a circa 6 m.

Tuttavia, sulla base di quanto riportato nella letteratura scientifica precedentemente citata, si può ritenere che l'emulsione della corrente idrica, che quindi risulta costituita da una miscela di aria ed acqua, possa significativamente interessare soltanto lo strato superficiale della corrente e nella (9) si può assumere  $y'_{max} = 2$  metri.



**REGIONE AUTONOMA DELLA SARDEGNA**

PRESIDENZA  
Direzione Generale Agenzia Regionale del  
Distretto Idrografico della Sardegna



**UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI CAGLIARI**

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DEL TERRITORIO  
Sezione di Ingegneria Idraulica

### 4.3 Transizione attraverso un risalto

Quando le condizioni di progetto sono di corrente veloce, oltre agli elementi descritti nei paragrafi precedenti, va tenuta in conto la possibilità che una perturbazione, generata a valle della sezione che si sta considerando, determini una transizione brusca alla corrente lenta attraverso un risalto idraulico. In questo fenomeno, una parte dell'energia cinetica della corrente veloce viene trasformata in battente, mentre un'altra parte viene dissipata attraverso il risalto.

Le equazioni di bilancio della quantità di moto, applicate ad una striscia di corrente delimitata da due piani verticali e paralleli all'asse della corrente, permettono di valutare l'innalzamento,  $\delta h_3$ , della profondità a valle del risalto, in funzione della velocità  $v$  e della profondità  $y$  della corrente veloce di monte (si veda, ad esempio, *Marchi e Rubatta, 1981*):

$$\delta h_3 = \frac{-3 + \sqrt{1 + 8 \frac{v^2}{gy}}}{2} y \quad (10)$$

Naturalmente, questa non è la massima profondità teoricamente raggiungibile dalla corrente perché essa può essere aumentata indefinitamente, per effetto dell'aumento del livello della corrente di valle. Cionondimeno, va considerata tra le possibili perturbazioni significative di una corrente veloce. La natura stessa del risalto suggerisce di considerare l'energia cinetica tra i parametri; rimane aperta la questione di quale sia la frazione di energia cinetica da utilizzare come franco idraulico. Nella Figura 1 è riportato l'aumento di profondità,  $\delta h^*$ , e dovuto ad un eventuale risalto, in funzione della velocità della corrente. Sono inoltre riportate le curve corrispondenti a diverse frazioni dell'energia cinetica per unità di peso della corrente (aliquote pari a 0.5, 0.7 ed 1.0 di  $v^2/2g$ ) e le curve che rappresentano i valori di franco  $\delta h_2$ ,  $\delta h_3$ ,  $\delta h_4$  per diverse profondità comprese tra 0.5 m e 10.0 m.

Il confronto effettuato nell'intervallo di valori considerato nella Figura 1 mette in



**REGIONE AUTONOMA DELLA SARDEGNA**

PRESIDENZA  
Direzione Generale Agenzia Regionale del  
Distretto Idrografico della Sardegna



**UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI CAGLIARI**

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DEL TERRITORIO  
Sezione di Ingegneria Idraulica

evidenza come sia richiesta una frazione pari al 70% dell'energia cinetica affinché il franco idraulico sia sempre cautelativo rispetto ad una possibile transizione a corrente lenta. Si vuole evidenziare, infine, come il valore del 100% dell'altezza cinetica risulti sempre superiore, in quanto non tiene conto della dissipazione energetica che avviene attraverso il risalto.



**REGIONE AUTONOMA DELLA SARDEGNA**

PRESIDENZA  
Direzione Generale Agenzia Regionale del  
Distretto Idrografico della Sardegna



**UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI CAGLIARI**

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DEL TERRITORIO  
Sezione di Ingegneria Idraulica

## 5. Analisi di sintesi e conclusioni

Riprendendo sinteticamente la discussione sviluppata nei paragrafi precedenti, per la determinazione del franco idraulico, sono stati considerati i seguenti elementi:

- a) scabrezza del contorno bagnato e trasporto solido;
- b) aerazione delle correnti molto veloci;
- c) transizione a corrente lenta attraverso un risalto idraulico;
- d) un valore minimo, cautelativo, indipendente da ogni parametro.

L'analisi di questi elementi ha portato all'individuazione dei criteri di definizione del franco idraulico sinteticamente riportati di seguito:

### **Criterio 1:**

Il punto a) suggerisce il calcolo del franco idraulico secondo una legge del tipo dell'equazione (1) (Chow 1959):

$$\delta h_1 = 0.87\sqrt{y} \quad (11)$$

nella quale, per il calcolo della profondità  $y$ , si dovrà utilizzare un coefficiente di scabrezza che, oltre all'effettiva rugosità dei materiali, tenga in conto, quando opportuno, dell'eventualità di trasporto solido secondo quanto previsto nelle espressioni fornite nel paragrafo (4.1). La scabrezza del contorno bagnato utilizzata non deve fare riferimento a quella dei materiali appena messi in opera ma, piuttosto, deve essere quella raggiunta in condizioni di normale esercizio, tenendo conto dell'eventuale presenza di vegetazione o materiale trasportato, se prevedibilmente presente nella tipologia del tratto di alveo in considerazione.

Come precisato nel paragrafo (4), l'ambito di applicazione della (11) è limitato a profondità  $y \leq y_{\max} = 3 \text{ metri}$ . Al di sopra di tale valore di profondità si mantiene

$$\delta h_{1\max} = 1.50 \text{ m.}$$



**REGIONE AUTONOMA DELLA SARDEGNA**

PRESIDENZA  
Direzione Generale Agenzia Regionale del  
Distretto Idrografico della Sardegna



**UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI CAGLIARI**

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DEL TERRITORIO  
Sezione di Ingegneria Idraulica

### **Criterio 2:**

Il punto b) suggerisce di tener conto dell'aerazione mediante una correzione della relazione precedente, in caso di correnti molto veloci, secondo l'equazione (9), qui riportata:

$$\delta h_2 = \delta h_1 + \alpha y' \quad (12)$$

Essendo  $y'$  la profondità della corrente aerata. Per quanto precisato ai punti precedenti, si può considerare:  $\delta h_{1\max} = 1.5 \text{ m}$ , ed  $y'_{\max} = 2 \text{ m}$ , mentre  $\alpha$  è un coefficiente che varia linearmente tra 0 e 1 quando la velocità varia tra 5 m/s e 15 m/s.

### **Criterio 3:**

Il punto c), ovvero la possibile transizione a corrente lenta attraverso un risalto, può essere tenuta in conto considerando un franco pari ad una quota del 70% dell'energia cinetica della corrente:

$$\delta h_3 = 0.7 \frac{v^2}{2g} \quad (13)$$

In questo caso, il criterio di prudenza suggerisce di considerare la condizione più critica, utilizzando la scabrezza inferiore tra quelle prevedibili durante l'esercizio dell'opera (quindi senza considerare l'invecchiamento durante l'esercizio, la vegetazione, o altre possibili cause di incremento rispetto ai materiali appena posti in opera).

### **Criterio 4:**

Secondo il punto d), per tenere conto di tutte le incertezze inerenti alla valutazione dei parametri in gioco, e di altri fattori, il franco idraulico non deve comunque essere inferiore ad un valore prefissato:

$$\delta h_4 = 1.0 \text{ m} \quad (14)$$



**REGIONE AUTONOMA DELLA SARDEGNA**

PRESIDENZA  
Direzione Generale Agenzia Regionale del  
Distretto Idrografico della Sardegna



**UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI CAGLIARI**

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DEL TERRITORIO  
Sezione di Ingegneria Idraulica

### **Determinazione del franco idraulico**

Poiché le opere idrauliche delle sistemazioni fluviali comprendono una casistica molto ampia di condizioni diverse tra loro, non è possibile sapere a priori quale, tra i criteri sopra illustrati, sia più rilevante in uno specifico caso: ***quindi il franco idraulico che è opportuno adottare corrisponderà, di volta in volta, al massimo tra i valori calcolati con i criteri descritti in precedenza***, e conseguentemente:

$$F = \max \{ \delta h_i ; i = 2, 4 \} \quad (15)$$

Nella Tabella 3 sono riportati i valori di  $\delta h_i$  ottenuti per le più usuali condizioni del moto ed è valutato il franco idraulico  $F$  come massimo tra i  $\delta h_i$ , seguendo il criterio (15).

### **Limitazioni**

Riprendendo quanto esposto in precedenza, la verifica delle opere andrebbe prescritta anche in condizioni di “opere dopo un prolungato esercizio”, considerando fenomeni come l'interrimento, le variazioni di scabrezza ecc., insorgenti con il tempo.

Velocità elevate della corrente costituiscono un elemento critico sia dal punto di vista strutturale che idraulico, e ***dovrebbero essere previste limitazioni specifiche alla velocità massima di progetto che, non dovrebbe superare gli 8 m/s***. Al di sopra di questi valori, le criticità che emergono non sono, in effetti, gestibili tramite la semplice prescrizione di un franco.

In caso di velocità elevate (al di sopra di 8 m/s), e/o nel caso in cui la corrente non sia, localmente, gradualmente variata (per esempio, nel caso di configurazioni particolarmente complesse, come curve secche, brusche variazioni di sezione, piano-altimetriche, ecc.) è ***opportuno prescrivere una specifica relazione idraulica***, basata su strumenti modellistici in grado di rappresentare realisticamente i fenomeni in gioco (modelli fisici o numerici almeno 2D), allo scopo di valutare



**REGIONE AUTONOMA DELLA SARDEGNA**

PRESIDENZA  
Direzione Generale Agenzia Regionale del  
Distretto Idrografico della Sardegna



**UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI CAGLIARI**

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DEL TERRITORIO  
Sezione di Ingegneria Idraulica

l'effetto di (prescritte) possibili variazioni dei parametri fondamentali. Si ritiene opportuno che la relazione idraulica suddetta preveda l'esame delle conseguenze della presenza di corpi flottanti e trasportati dalle acque, ove ricorra detta possibilità, e delle conseguenze di possibili ostruzioni delle luci, specie se queste possono creare invasi anche temporanei a monte. In situazioni particolarmente complesse può essere opportuno supportare lo studio con l'ausilio di modelli idraulici sperimentali.

E' inoltre da rimarcare che i criteri sopra definiti sono riferiti ad alvei con sezioni cilindriche o prismatiche di forma compatta e continua. Non sono quindi considerate situazioni con singolarità, quali potrebbero aversi per variazioni non trascurabili di scabrezza o di forma per la presenza, ad esempio, di ampie zone golenali. Una stima del franco idraulico in tali situazioni potrà realizzarsi considerando nelle espressioni (11-13) i valori medi della profondità e della velocità nella sezione composta ma, come già detto al punto precedente, questi casi richiedono analisi specifiche.

Sono, infine, esclusi dalla presente discussione tutti quei casi soggetti a Norme specifiche, quando queste ultime risultino più restrittive come, ad esempio, gli attraversamenti stradali, sbarramenti dei corsi d'acqua e le opere in aree litorali o portuali, o di sbarramento.

Cagliari, Dicembre 2011



**REGIONE AUTONOMA DELLA SARDEGNA**

PRESIDENZA  
Direzione Generale Agenzia Regionale del  
Distretto Idrografico della Sardegna



**UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI CAGLIARI**

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DEL TERRITORIO  
Sezione di Ingegneria Idraulica

**Responsabili Scientifici Università di Cagliari**

*Prof. Giovanni Maria Sechi*

*Prof. Giorgio Querzoli*

Collaboratori

*Ing. Saverio Liberatore*

*Ing. Simone Ferrari*

**Responsabili Scientifici Agenzia di Distretto Idrografico**

*Ing. Roberto Maurichi*

*Ing. Andrea Lazzari*





**REGIONE AUTONOMA DELLA SARDEGNA**

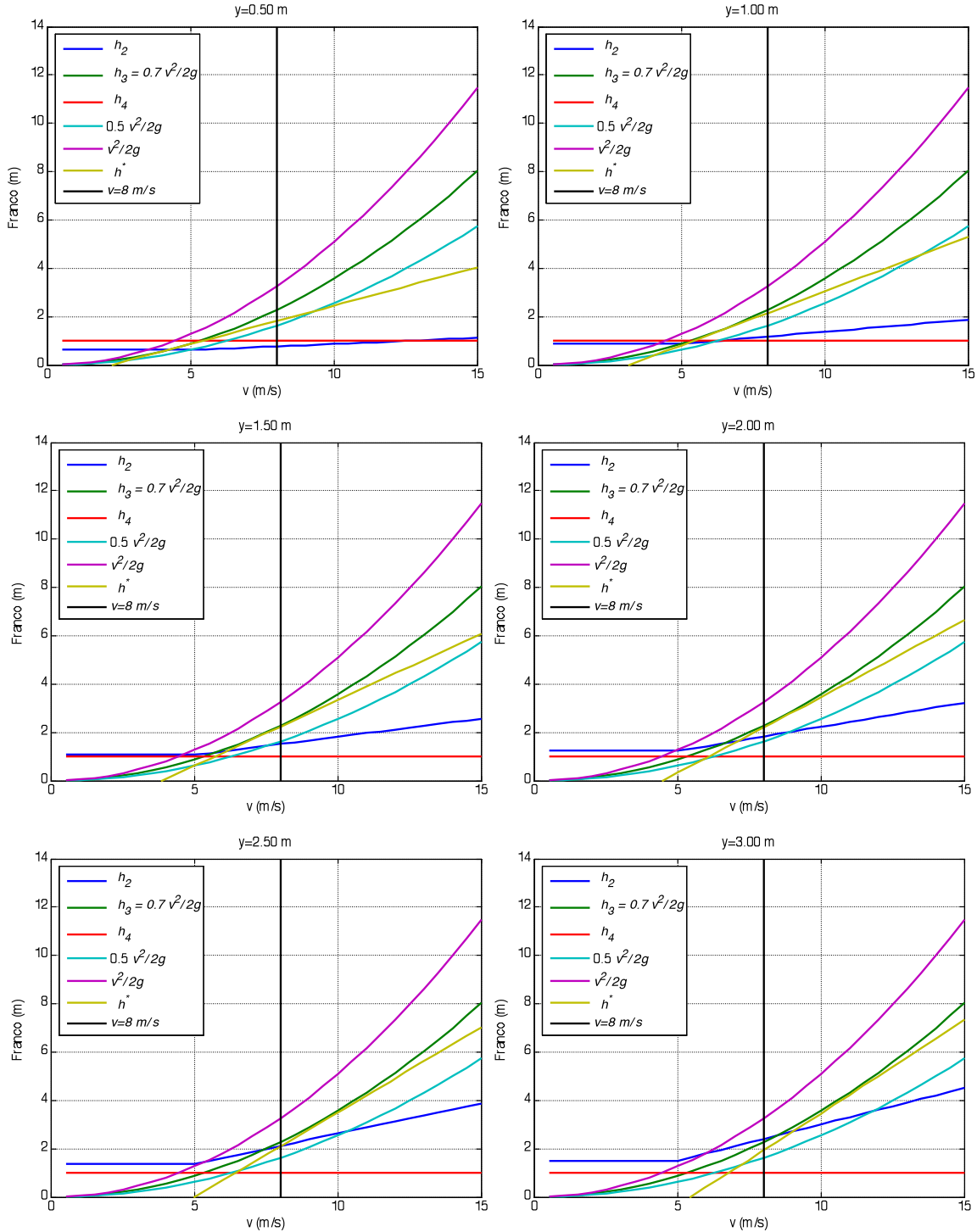
PRESIDENZA

Direzione Generale Agenzia Regionale del  
Distretto Idrografico della Sardegna



**UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI CAGLIARI**

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DEL TERRITORIO  
Sezione di Ingegneria Idraulica





REGIONE AUTONOMA DELLA SARDEGNA

PRESIDENZA

Direzione Generale Agenzia Regionale del  
Distretto Idrografico della Sardegna



UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI CAGLIARI

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DEL TERRITORIO  
Sezione di Ingegneria Idraulica

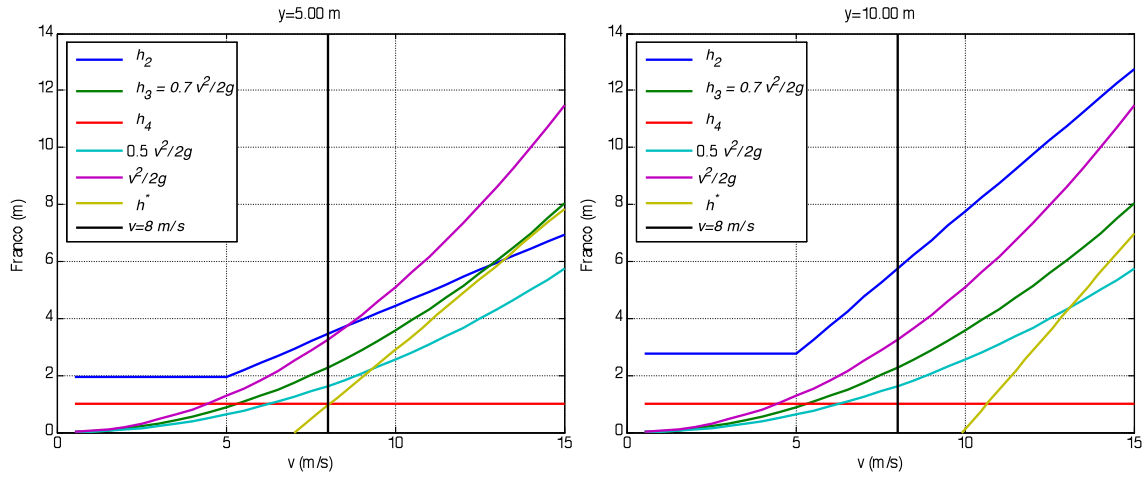


Figura 1 – Confronto di valori di franco idraulico  $\delta h_2$   $\delta h_3$   $\delta h_4$ , del valore  $\delta h^*$  valutato come differenza tra quota di valle e quella di monte di un risalto, e delle frazioni 0.5, 0.7 e 1.0 dell'energia cinetica.