



## COMUNE DI ORBETELLO

### INDAGINI IDROLOGICHE IDRAULICHE DI SUPPORTO AL REGOLAMENTO URBANISTICO DEL COMUNE DI ORBETELLO AI SENSI DEL REGOLAMENTO DI ATTUAZIONE N.26/R DELL' ART. 62 DELLA LEGGE REGIONALE 1/2005

ELABORATO	TXT02
SCALA	-----
DATA	Febbraio 2011
REVISIONE	01

OGGETTO

ALLEGATO 1:  
MODELLISTICA IDROLOGICA-IDRAULICA

PROGETTISTA:

ING. ANDREA BENVENUTI  
VIA CLAUDIO MONTEVERDI 40  
50144 FIRENZE

COMMITTENTE:

COMUNE DI ORBETELLO

REV.	DESCRIZIONE	REDATTO	DATA	VERIFICATO	DATA	APPROVATO	DATA
00	PRIMA EMISSIONE	A.BENVENUTI	MARZO '10	A.BENVENUTI	MARZO '10	A.BENVENUTI	MARZO '10
01	SECONDA EMISSIONE	A.BENVENUTI	FEBBRAIO '11	A.BENVENUTI	FEBBRAIO '11	A.BENVENUTI	FEBBRAIO '11

## INDICE

<b>1</b>	<b>MODELLISTICA IDROLOGICA</b> .....	<b>2</b>
1.1	MODELLI DI INFILTRAZIONE .....	2
1.1.1	<i>Metodo dell'Infiltrazione a Soglia</i> .....	2
1.1.2	<i>Metodo del Curve Number</i> .....	3
1.2	MODELLI DI FORMAZIONE DELL'ONDA DI PIENA .....	5
1.2.1	<i>Metodo della Corrivazione</i> .....	5
1.2.2	<i>Modello di Nash e GIUH</i> .....	5
<b>2</b>	<b>MODELLISTICA IDRAULICA</b> .....	<b>7</b>
2.1	MODELLISTICA IDRAULICA DI MOTO PERMANENTE.....	7
2.2	MODELLISTICA IDRAULICA DI MOTO VARIO.....	9

# 1 Modellistica idrologica

## 1.1 MODELLI DI INFILTRAZIONE

### 1.1.1 METODO DELL'INFILTRAZIONE A SOGLIA

La modellistica idrologica per la determinazione dell'idrogramma di piena in una o più sezioni fluviali di un bacino idrografico deve significativamente rappresentare tutte le fasi che si hanno a partire dalla distribuzione delle piogge insistenti sul bacino, fino alla valutazione dell'onda di piena.

La trasformazione da pioggia al suolo a portata nella sezione di chiusura avviene secondo una cascata di processi. L'ingresso principale al modello è costituito da una serie di misurazioni di pioggia, di tipo puntuale (registrazioni pluviometriche) sull'area d'interesse, che dovranno essere, in generale, interpolate per ottenere l'andamento delle precipitazioni lorde al suolo nello spazio e nel tempo, in termini di afflussi per unità di area. La quota parte di tali precipitazioni che andrà in scorrimento superficiale, detta anche precipitazione efficace (netta), viene valutata con un opportuno *modello di trasformazione afflussi-deflussi*, per la stima della produzione di deflusso idealmente in ciascun punto del bacino, avente le dimensioni di una portata per unità di area. Infine, il processo di concentrazione dei deflussi nel reticolo idrografico e di trasferimento lungo questo fino alla sezione di chiusura verrà rappresentato tramite un opportuno *modello di formazione dell'onda di piena*.

La metodologia alla base degli studi effettuati mira ad un'agevole caratterizzazione degli eventi in termini di tempi di ritorno; conseguenza diretta, la possibilità di definire i livelli di rischio in funzione della probabilità di accadimento. Ciò si ottiene facilmente attraverso una procedura semplificata di generazione di eventi sintetici, che si basa sulle seguenti ipotesi:

- eventi meteorici sintetici uniformemente distribuiti sul bacino;
- isofrequenza fra evento meteorico e portata in alveo ( $Tr$  evento di pioggia =  $Tr$  idrogramma di piena).

La determinazione degli idrogrammi di piena non può prescindere dai parametri, ormai generalmente utilizzati e condivisi, della procedura di *Regionalizzazione delle Portate di Piena della Regione Toscana*. Tale procedura parte dalla teoria dell'*Idrogramma Istantaneo Unitario (Instantaneous Unit Hydrograph, IUH)*, dove i parametri in gioco sono stati ricavati dalle caratteristiche geomorfologiche del bacino, ottenendo così un *Idrogramma Istantaneo Unitario Geomorfologico* di cui vengono riportate di seguito le linee principali. Il modello di formazione dell'onda di piena adottato è quello proposto da *Nash*.

L'input meteorico è rappresentato da uno "*ietogramma sintetico ad intensità costante*" con il quale si assume che l'intensità di precipitazione sia costante durante l'intera evoluzione del fenomeno e pari al valor medio fornito dalle curve di possibilità climatica (o pluviometrica, di seguito *CPP*) illustrate in seguito. Tale ietogramma consente la determinazione della portata al colmo di assegnato tempo di ritorno sulla base del metodo dell'*evento critico*, individuando la durata di pioggia efficace che massimizza il valore al colmo dell'onda di piena fornita dal modello di trasformazione afflussi - deflussi.

Le *CPP* consentono di rappresentare il regime delle piogge di breve durata e forte intensità in una certa zona. Per la loro determinazione è necessaria un'analisi delle serie pluviometriche disponibili dalla rete di telemisura presente sul territorio a partire dall'esame dei topoi, o poligoni di Thiessen. Dall'analisi statistica delle precipitazioni estreme, in adattamento alla distribuzione *TCEV*, si perviene appunto alla determinazione delle *CPP*, che stabiliscono un legame tra le altezze di pioggia e la durata dell'evento piovoso, in funzione della probabilità di accadimento dell'evento stesso.

Il valore della pioggia lorda deve essere depurato delle perdite. La trasformazione afflussi-deflussi adottata prevede l'adozione di un "approccio asintotico a soglia" che richiede la stima di due parametri: la *perdita iniziale*, schematizzata introducendo un *volume unitario di perdita iniziale* (indicato con  $I_a$ ), che il terreno assorbe completamente durante i primi istanti di precipitazione (dall'inizio dell'evento  $t=0$  all'istante  $t=t_a$ ), e la perdita per infiltrazione nel suolo durante l'evento, schematizzata con una *infiltrazione cumulata costante a saturazione* (indicata con  $K_s$ ).

$$\begin{cases} I_a(t) = I_a(0) + \int_0^{t_a} (P(\tau) - K_s) d\tau \\ P_n(t) = 0 \end{cases} \quad \text{per } t < t_a$$

$$\begin{cases} I_a(t) = I_a \\ P_n(t) = P(t) - K_s \end{cases} \quad \text{per } t \geq t_a$$

dove:

$P(t)$  intensità di precipitazione lorda sul bacino [mm/h];

$P_n(t)$  intensità di precipitazione netta sul bacino [mm/h];

$I_a(t)$  volume unitario di perdita iniziale all'istante  $t$  dell'evento [mm];

$I_a = I_a(t_a)$  volume di perdita iniziale per unità di area [mm];

$K_s$  velocità di infiltrazione a saturazione [mm/h].

I valori di  $I_a$  e  $K_s$ , nel lavoro di regionalizzazione, sono calcolati in funzione dell'uso del suolo e dalla geologia dei bacini, resi indipendenti dalle dimensioni del bacino idrografico.

Osservando sperimentalmente le piogge intense è possibile affermare che, all'interno di una certa area, l'intensità di precipitazione durante l'evento piovoso varia da punto a punto, anche in maniera sensibile, e questa variazione è tanto maggiore quanto maggiore è l'estensione dell'area considerata. Per questo alla precipitazione lorda, calcolata rispetto alla sezione di calcolo, è stato applicato un coefficiente di ragguaglio dipendente dall'area del bacino e dalla durata dell'evento, in linea con la trattazione riportata nella Regionalizzazione delle Portate di Piena della Regione Toscana, secondo la seguente formulazione:

$$K_r = 1 - \exp(\alpha t^\beta) + \exp(\alpha t^\beta - \gamma A)$$

dove  $t$  è la durata dell'evento,  $A$  è l'area del bacino sotteso e  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  sono parametri dipendenti dal bacino considerato.

### 1.1.2 METODO DEL CURVE NUMBER

Il metodo del *Curve Number* è un modello di rifiuto del terreno sviluppato dal *Soil Conservation Service* (di seguito) degli Stati Uniti. Si tratta di un modello empirico che stima la predisposizione dei suoli a contribuire ai deflussi di piena mediante l'analisi di tre fattori: le caratteristiche di permeabilità dei terreni superficiali e degli strati geologici immediatamente sottostanti, l'uso del suolo e la copertura vegetale, lo stato di imbibizione del terreno all'inizio della sollecitazione meteorica.

La relazione fondamentale per la stima della precipitazione efficace è la seguente:

$$\begin{cases} P_{eff} = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} & P \geq I_a \\ P_{eff} = 0 & P < I_a \end{cases}$$

dove  $P_{eff}$  è la precipitazione efficace cumulata al tempo  $t$ ,  $I_a$  è la precipitazione totale cumulata allo stesso istante,  $I_a$  è la perdita iniziale ed  $S$  è il fattore di ritenzione potenziale, ovvero il massimo volume specifico di acqua che il terreno può trattenere in condizioni di saturazione.

Con l'introduzione di  $I_a$  si vuol tenere conto di quel complesso di fenomeni, quali l'intercettazione da parte della vegetazione e l'accumulo nelle depressioni superficiali del terreno, che ritardano il verificarsi del deflusso superficiale.

I due parametri  $I_a$  ed  $S$  si dovranno determinare mediante operazioni di taratura del modello. Dall'analisi di risultati ottenuti dall'SCS in numerosi bacini sperimentali americani, è stata proposta una relazione empirica che lega i due parametri:

$$I_a = cS$$

con  $c$  posto pari a 0.2.

In questo modo è possibile definire il deflusso netto in funzione dell'afflusso meteorico, una volta fissato il valore di  $S$ .

Il parametro  $S$  dipende: dalla possibilità di infiltrazione dell'acqua in condizioni di terreno già saturato, dall'insieme delle condizioni del suolo (uso, trattamento della superficie, drenaggio) e dal contenuto di umidità iniziale dello stesso ( $AMC$ , *Antecedent Moisture Condition*).

L'effetto di tutti questi fenomeni viene rappresentato globalmente introducendo un parametro adimensionale, il *Curve Number* ( $CN$ ), legato ad  $S$  tramite la relazione:

$$S = S_0 \left( \frac{100}{CN} - 1 \right)$$

dove  $S_0$  è una costante di scala dimensionale, che riflette l'unità di misura adottata. Nel sistema metrico,  $S_0 = 254$  mm.

Il parametro  $CN$  è un numero adimensionale che varia da 100, per corpi idrici, a circa 30, per suoli permeabili con elevati tassi di infiltrazione.

Il valore di  $CN$  dipende, innanzitutto, dalle caratteristiche idrologiche del suolo (struttura, tessitura e permeabilità). Per identificare il tipo idrologico di suolo bisogna analizzare le caratteristiche geopedologiche del bacino. L'SCS ha classificato il suolo in quattro gruppi:

- > Gruppo A: suoli aventi scarsa potenzialità di deflusso. Comprende sabbie profonde con scarsissimo limo e argilla, ghiaie profonde molto permeabili. Capacità di infiltrazione molto elevata.
- > Gruppo B: suoli aventi moderata potenzialità di deflusso. Comprende la maggior parte dei suoli sabbiosi meno profondi che nel gruppo A e con maggiore aliquota di argilla e limo. Elevate capacità di infiltrazione anche in condizioni di saturazione.
- > Gruppo C: suoli aventi potenzialità di deflusso moderatamente alta. Suoli contenenti considerevoli quantità di argilla e colloidali. Scarsa capacità di infiltrazione.
- > Gruppo D: suoli con potenzialità di deflusso molto elevata. Argille con elevata capacità di rigonfiamento, suoli sottili con orizzonti pressoché impermeabili in vicinanza della superficie. Scarsa capacità di infiltrazione a saturazione.

Una volta individuato il tipo idrologico di suolo, per determinare il CN occorre analizzare la tipologia di uso del suolo stesso.

Nelle tabelle seguenti si riportano i valori caratteristici del parametro CN, che si ottengono per combinazione delle caratteristiche idrologiche del suolo, secondo i 4 tipi idrologici A-B-C-D a permeabilità decrescente, e delle caratteristiche di uso prevalente del suolo stesso.

Uso del suolo	TIPO DI COPERTURA		TIPO DI SUOLO			
	Trattamento o pratica	Condizione idrologica	A	B	C	D
Maggese	a solchi diritti	-	77	86	91	94
Colture a solchi	a solchi diritti	cattiva	72	81	88	91
	a solchi diritti	buona	67	78	85	89
	a reggipoggio	cattiva	70	79	84	88
	a reggipoggio	buona	65	75	82	86
	a re. e terrazze	cattiva	66	74	80	82
	a re. e terrazze	buona	62	71	78	81
Grani piccoli	a solchi diritti	cattiva	65	76	84	88
	a solchi diritti	buona	63	75	83	87
	a reggipoggio	cattiva	63	74	82	85
	a reggipoggio	buona	61	73	81	84
	a re. e terrazze	cattiva	61	72	79	82
	a re. e terrazze	buona	59	70	78	81
Legumi seminati folti o prati in rotazione	a solchi diritti	cattiva	66	77	85	89
	a solchi diritti	buona	58	72	81	85
	a reggipoggio	cattiva	64	75	83	85
	a reggipoggio	buona	55	69	78	83
	a re. e terrazze	cattiva	63	73	80	83
	a re. e terrazze	buona	51	67	76	80
Pascoli	-	cattiva	68	79	86	89
	-	discreta	49	69	79	84
	-	buona	39	61	74	80
	a reggipoggio	cattiva	47	67	81	88
	a reggipoggio	discreta	25	59	75	83
	a reggipoggio	buona	6	35	70	79
Prati	-	buona	30	58	71	78
Boschi	-	cattiva	45	66	77	83
	-	discreta	36	60	73	79
	-	buona	25	55	70	77
	-	-	25	55	70	77
Aziende agricole	-	-	59	74	82	86
Strade sterrate	-	-	72	82	87	89
Strade pavimentate	-	-	74	84	90	92

Tabella 1-1: Valori del parametro CN per diverse combinazioni di suolo e copertura (SCS,1986)

TIPO DI COPERTURA		TIPO DI SUOLO			
		A	B	C	D
Aree residenziali					
Area media dei lotti:	Area impermeabile (%)				
1/8 acro o meno	65	77	85	90	92
1/4 acro	38	61	75	83	87
1/3 acro	30	57	72	81	86
1/2 acro	25	54	70	80	85
1 acro	20	51	68	79	84
Parcheggi pavimentati, tetti, viali d'accesso		98	98	98	98
Strade urbane ed extraurbane					
Pavimentate, a dorso di mulo e con fognatura		98	98	98	98
in ghiaia		76	85	89	91
sterrate		72	82	87	89
Aree commerciali e professionali (impermeabili per l'85%)		89	92	94	95
Distretti industriali (impermeabili per il 72%)		81	88	91	93
Spazi aperti, prati, parchi, campi da golf, cimiteri					
in buone condizioni: copertura erbosa sul 75% o più		39	61	74	80
in discrete condizioni: copertura erbosa sul 50-75%		49	69	79	84

Tabella 1-2: Valori del parametro CN per diverse combinazioni di suolo e copertura (SCS,1986)

Per quanto riguarda l'influenza dello stato iniziale di imbibimento del suolo all'inizio dell'evento meteorico, l'SCS individua tre classi caratterizzate da differenti condizioni iniziali (*AMC*, *Antecedent Moisture Condition*) a seconda del valore assunto dall'altezza di pioggia caduta nei cinque giorni precedenti l'evento meteorico:

- *AMC I*: potenziale di scorrimento superficiale minimo. Suolo asciutto.
- *AMC II*: potenziale di scorrimento medio. Suolo mediamente umido.
- *AMC III*: potenziale di scorrimento massimo. Suolo saturo.

La categoria a cui fare riferimento si può individuare in base alla precipitazione totale dei 5 giorni precedenti quello dell'evento meteorico ed in base alla stagione, vegetativa o non vegetativa.

I valori di *CN* ricavati dalle tabelle appena riportate si riferiscono a condizioni di saturazione del terreno medie (*AMC II*).

## 1.2 MODELLI DI FORMAZIONE DELL'ONDA DI PIENA

### 1.2.1 METODO DELLA CORRIVAZIONE

Il modello cinematico o metodo della corrivazione è un modello lineare basato sulle seguenti ipotesi:

- la formazione della piena è dovuta unicamente al trasferimento della massa liquida;
- ogni singola goccia di pioggia si muove sulla superficie del bacino seguendo un percorso immutabile che dipende soltanto dalla posizione del punto in cui è caduta;
- la velocità di ogni goccia non è influenzata dalla presenza di altre gocce;
- la portata defluente si ottiene come somma delle portate elementari provenienti dalle singole aree del bacino che si presentano allo stesso istante alla sezione di chiusura.

Qualora l'evento meteorico sintetico prescelto, opportunamente ragguagliato al bacino, sia rappresentato da un ietogramma a intensità costante e durata pari al tempo di corrivazione, uniformemente distribuito sul bacino, la portata al colmo  $Q$  è proporzionale al prodotto fra intensità di pioggia ragguagliata  $i_R$  e area del bacino  $A$ , attraverso un coefficiente di proporzionalità  $C$  che comprende l'effetto delle perdite.

La forma dell'idrogramma di piena dipende in maniera determinante sia dalla distribuzione spaziale e temporale della pioggia, sia dalla distribuzione delle aree comprese tra isocorive (luogo geometrico dei punti del bacino caratterizzati dal medesimo tempo di corrivazione) successive.

Ipotizzando che la curva tempi-aree, che lega il tempo con le aree del bacino caratterizzate da un tempo di corrivazione non superiore a quello considerato, sia rettilinea, si ottiene nell'intervallo  $(0, t_c)$  un *Idrogramma Istantaneo Unitario*  $h(t)$  costante, dato da:

$$h(t) = \frac{1}{t_c}$$

dove  $t_c$  è il tempo di corrivazione del bacino idrografico.

### 1.2.2 MODELLO DI NASH E GIUH

L'*Idrogramma Istantaneo Unitario* (IUH) rappresenta l'idrogramma di piena causato da un evento impulsivo di pioggia di volume unitario e durata tendente a zero. Ipotizzando un comportamento del sistema bacino idrografico lineare e stazionario, la risposta  $Q(t)$  ad una sollecitazione meteorica di intensità  $p(t)$ , supposta costante su tutti i punti del bacino (approccio di tipo integrato), è data dall'integrale di convoluzione fra ietogramma di pioggia efficace e IUH:

$$Q(t) = \int_0^t U(\tau) p(t - \tau) d\tau$$

dove:

$Q(t)$  è la portata defluente;

$p(t) = A i(t)$ , con  $A$  area del bacino e  $i(t)$  intensità di pioggia netta ragguagliata sul bacino;

$U(t)$  è l'idrogramma unitario

$$\begin{cases} U(0) = 1 \\ U(t > 0) = 0 \end{cases} \quad \int_0^{\infty} U(t) dt = 1$$

La caratterizzazione di un modello di formazione della piena basato su tale principio consiste quindi essenzialmente nella determinazione della forma della funzione  $U(t)$ , che può essere stimata fissandone la struttura sulla base di considerazioni teoriche, e stimandone i parametri o per taratura, utilizzando dati sperimentali contemporanei di afflussi sul bacino e deflussi nella sezione di chiusura, o sulla base di caratteristiche geomorfologiche del bacino. Uno dei più diffusi modelli concettuali utilizzati per determinare

la forma della funzione  $U(t)$  è quello basato sull'ipotesi che il bacino idrografico si comporti come un insieme di  $n$  serbatoi lineari disposti in serie. L'espressione dell'idrogramma istantaneo unitario che ne deriva per un singolo serbatoio lineare è:

$$U(t) = \frac{1}{k} \cdot e^{-\frac{t}{k}}$$

dove  $k$  è la costante del serbatoio che rappresenta il tempo caratteristico di svuotamento del serbatoio.

Supponendo che il bacino si comporti come una serie di  $n$  serbatoi, ciascuno con uguale tempo caratteristico  $k$ , la portata in uscita dall'intero bacino come risposta ad un input impulsivo distribuito sul bacino rappresenterà l'idrogramma istantaneo unitario del bacino alla sua chiusura, nota come *Idrogramma Istantaneo Unitario di Nash*:

$$U(t) = \frac{1}{k\Gamma(n)} \left(\frac{t}{k}\right)^{(n-1)} e^{-\left(\frac{t}{k}\right)}$$

dove la funzione  $\Gamma(n)=(n-1)!$ .

Il momento di primo ordine dell'IUH rispetto all'origine viene detto *tempo di ritardo (lag) Tl* ed è dato da:

$$Tl = \int_0^{\infty} U(t)t dt$$

In questo schema il tempo di ritardo è dato dal prodotto  $nk$  (pari proprio alla media dell'idrogramma unitario). I parametri  $n$ ,  $k$  dell'IUH di Nash sono stati ricavati sulla base delle caratteristiche geomorfologiche del reticolo idrografico, mediante le seguenti espressioni:

$$n = 3.29(Rb/Ra)^{0.78} RI^{0.07}$$

$$k = 0.7(Ra/(Rb \cdot RI))^{0.48} Lc/v$$

in unità congruenti, dove:

$R_b$  = rapporto di biforcazione;

$R_l$  = rapporto di lunghezza;

$R_a$  = rapporto di area;

$L_c$  = lunghezza del canale principale (dalla sorgente alla sezione di interesse);

$v$  = fattore cinematico legato alla velocità della piena ("media spazio-temporale di scorrimento dell'acqua o di propagazione dell'onda di piena").

I parametri geomorfologici sopra elencati permettono di rappresentare lo sviluppo della rete idrografica mediante una descrizione gerarchica e possono quindi essere calcolati, una volta ordinato il reticolo idrografico secondo il metodo di gerarchizzazione e classificazione geomorfologica di Horton e Strahler.

La gerarchizzazione di una rete idrografica si esegue attribuendo un ordine a ciascun segmento fluviale; un'asta che non nasce dalla confluenza di altre due è di primo ordine; un'asta di ordine  $n$  e un'asta di ordine  $n-1$  congiungendosi danno origine a un'asta di ordine  $n$ ; due aste di ordine  $n$  congiungendosi danno origine a un'asta di ordine  $n+1$ . Per ogni bacino idrografico esiste una relazione fra il numero dei rami fluviali aventi un certo ordine e l'ordine stesso: in genere, il valore del primo diminuisce all'aumentare del secondo.

L'organizzazione della rete idrografica e quindi il suo grado di gerarchizzazione possono essere espressi mediante parametri quantitativi che definiscono la geometria del reticolo idrografico e il suo grado di organizzazione gerarchica. Il parametro di base è il rapporto di biforcazione  $R_b$ , che esprime il rapporto fra il numero di segmenti fluviali di un certo ordine ed il numero dei segmenti dell'ordine immediatamente successivo. Considerando invece la lunghezza media delle aste di un certo ordine si ottiene il rapporto fra le lunghezze,  $R_l$ . Analogamente, si definisce anche il rapporto fra le aree,  $R_a$ .

I tre parametri appena descritti vengono determinati sulla base delle seguenti relazioni:

$$N_u = R_b^{\omega-u}$$

$$\bar{L}_u = \bar{L}_1 R_l^{u-1}$$

$$\bar{A}_u = \bar{A}_1 R_a^{u-1}$$

dove

$\omega$  è l'ordine massimo del reticolo;

$N_u$  il numero delle aste di ordine  $u$ , con  $u=1, 2, 3\dots$ ;

$\bar{L}_u$  la lunghezza media delle aste di ordine  $u$ , con  $u=1, 2, 3\dots$ ;

$\bar{A}_u$  l'area media sottesa da aste di ordine  $u$ , con  $u=1, 2, 3\dots$ .

Lo studio di Regionalizzazione delle Portate di Piena, attraverso la taratura sistematica dei dati relativi ad eventi registrati nei 42 bacini strumentati dal Servizio Idrografico, ha fornito una relazione fra i valori di  $Tl$  ed i parametri geomorfologici:

$$Tl = 0.42 \left(\frac{Rb}{Ra}\right)^{0.3} RI^{-0.41} \frac{Lmc}{A^{0.075}} \quad [h]$$

dove  $A$  è l'area del bacino espressa in  $[kmq]$  e  $L_{mc}$  la lunghezza del reticolo in  $[km]$ , calcolata come cumulata delle lunghezze medie per i vari ordini gerarchici.

## 2 Modellistica idraulica

### 2.1 MODELLISTICA IDRAULICA DI MOTO PERMANENTE

La modellistica idraulica di moto permanente consente di trasformare le portate associate agli eventi di piena, definiti nella fase di modellazione idrologica, in livelli idrometrici nelle sezioni fluviali.

Per la trasformazione delle portate in livelli idrometrici viene utilizzato il software *HEC-RAS 4.0* (*Hydrologic Engineering Center's River Analysis System*), prodotto e reso disponibile gratuitamente dall'*USACE* (*United States Army Corps of Engineering*).

La procedura di calcolo si basa sulla risoluzione, con un metodo alle differenze finite, dell'equazione di moto permanente gradualmente variato, ricavata dal bilancio dell'energia secondo lo schema monodimensionale. Tale equazione è espressa dalla seguente forma differenziale:

$$\frac{dH}{dx} = -S_f$$

con:

$$H = z + y + \frac{\alpha V^2}{2g}$$

in cui:

- $H$  è il carico totale della corrente nella sezione generica di ascissa  $x$ , misurato rispetto ad un riferimento orizzontale;
- $S_f$  è la perdita di carico unitaria dovuta alle resistenze continue;
- $z$  è la quota del fondo alveo rispetto ad un riferimento orizzontale;
- $y$  è la profondità della corrente misurata dal fondo dell'alveo;
- $V$  è la velocità media della corrente nella sezione generica di ascissa  $x$ ;
- $\alpha$  è il coefficiente di ragguglio delle altezze cinetiche;
- $g$  è l'accelerazione di gravità.

Passando alle differenze finite, l'equazione del profilo liquido tra due sezioni distanti  $\Delta x$  diventa:

$$H_2 - H_1 = -S_{fm} \cdot \Delta x$$

in cui:

- $H_1$  è il carico totale della corrente nella sezione iniziale;
- $H_2$  è il carico totale della corrente nella sezione finale;
- $S_{fm}$  è la perdita di carico unitaria dovuta alle resistenze continue media tra le due sezioni.

Quindi, per sostituzione, si ottiene:

$$z_1 + y_1 + \frac{\alpha V_1^2}{2g} - z_2 - y_2 - \frac{\alpha V_2^2}{2g} + \frac{J_1 + J_2}{2} \cdot \Delta x = 0$$

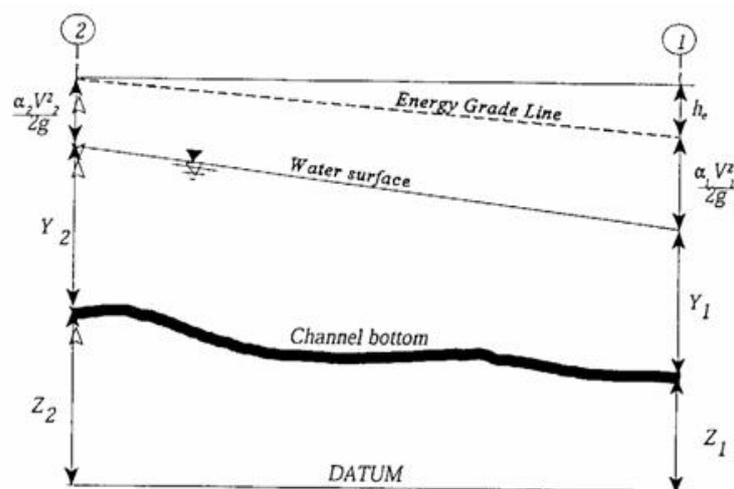
ovvero:

$$z_1 + y_1 + \frac{Q^2}{2gA_1^2} - z_2 - y_2 - \frac{Q^2}{2gA_2^2} + \frac{1}{2} \left( \frac{Q^2 n^2}{A_1^2 R_1^{4/3}} + \frac{Q^2 n^2}{A_2^2 R_2^{4/3}} \right) \cdot \Delta x = 0$$

dove:

- $Q$  è la portata;
- $A_1$  è l'area liquida della corrente nella sezione iniziale;
- $A_2$  è l'area liquida della corrente nella sezione finale;
- $n$  è il coefficiente di scabrezza di Manning;
- $R$  è il raggio idraulico della sezione (rapporto tra area liquida ed contorno bagnato).

I termini del bilancio energetico fra due sezioni trasversali del corso d'acqua sono schematicamente rappresentati nella seguente figura.



Essendo le caratteristiche geometriche di una data sezione funzione della sola altezza liquida, l'equazione non lineare appena trovata permette di determinare la quota liquida nella sezione terminale di un tratto di corrente di lunghezza  $\Delta x$  una volta che sia nota la quota liquida in corrispondenza della sezione iniziale o viceversa (*condizione al contorno*).

La determinazione del profilo liquido di moto permanente relativo ad un tronco fluviale richiede quindi:

- la suddivisione il tronco di interesse in una successione finita di tratti delimitati da sezioni di cui sia nota la geometria;
- l'immissione del valore di portata liquida in ingresso alla sezione di monte ed eventuali variazioni dovute a immissioni localizzate o distribuite;
- l'imposizione delle condizioni al contorno nelle sezioni estreme del tronco in esame.

A partire dunque dalle condizioni al contorno, l'applicazione reiterata dell'equazione dell'energia permette di determinare la quota del pelo liquido in ogni sezione. In particolare, il modello consente di adottare uno dei seguenti schemi di calcolo:

- Corrente lenta (*subcritical flow*), applicabile quando la corrente è ovunque lenta, ossia con un'altezza liquida superiore alla critica in ogni sezione di calcolo; in tal caso la condizione al contorno è richiesta in corrispondenza dell'estremo di valle del tronco fluviale considerato.
- Corrente veloce (*supercritical flow*), applicabile quando la corrente è ovunque veloce, ossia in presenza di un'altezza liquida inferiore alla critica in tutte le sezioni di calcolo; in tal caso la condizione al contorno va imposta sulla sezione di monte del tratto in esame.
- Corrente mista (*mixed flow*), utilizzata quando all'interno del tronco esaminato si verificano transizioni da un tipo di corrente all'altro (es. risalito idraulico), che danno luogo ad una successione di tratti con differenti caratteristiche di moto. Tale schema richiede una condizione al contorno in corrispondenza di entrambe le sezioni estremità (monte e valle).

Va inoltre osservato che, per la soluzione dell'equazione monodimensionale dell'energia, le perdite di carico sono dovute alla *scabrezza*, quindi determinate tramite l'equazione di Manning, e in corrispondenza di brusche variazioni di velocità, dovute ad irregolarità d'alveo, tramite appositi coefficienti di *espansione/contrazione* della vena fluida moltiplicatori della variazione di energia cinetica.

Le irregolarità idrauliche (salti di fondo, confluenze, sbarramenti, etc...) nelle quali si viene a determinare un brusca variazione nel profilo del pelo libero della corrente, sono modellate attraverso la conservazione della spinta totale (equazione dei momenti).

In definitiva, i dati da inserire per la costruzione e la successiva implementazione della modellistica idraulica di moto permanente con il software HEC-RAS sono riassunti di seguito.

- 1 *Dati geometrici* relativi alle sezioni trasversali ed alle eventuali strutture presenti (ponti, traverse, sfioratori);
- 2 *Coefficiente di scabrezza* di Manning e *coefficienti di contrazione/espansione*, per il calcolo delle perdite energetiche, rispettivamente, distribuite e concentrate, in corrispondenza di ogni sezione fluviale. Dall'attendibilità di questi dati, definiti sulla base di sopralluoghi e confronti diretti con i valori riportati in letteratura, dipende il grado di risoluzione della simulazione. Le disposizioni tecniche individuano nel testo di Ven Te Chow il riferimento per la scelta delle scabrezze idrauliche in funzione delle caratteristiche della sezione. Tale testo tratta la determinazione del coefficiente di scabrezza in

- modo esaustivo, descrivendo i fattori che influenzano i coefficienti, e presentando una serie di valori plausibili per sezioni idrauliche con differenti caratteristiche;
- 3 *Portata liquida in ingresso* alla sezione di monte ed eventuali contributi dovuti a *immissioni laterali* sulla base dei risultati della modellistica idrologica.
  - 4 *Condizioni al contorno* per le sezioni estreme del tronco in esame, secondo lo schema di calcolo adottato. Le scelte possibili comprendono:
    - *Known Water Surface Elevation*, per cui si immette un valore noto dell'altezza d'acqua;
    - *Critical depth*, si assume il valore di altezza critica calcolato dal programma;
    - *Normal depth*, prevede la definizione del valore della cadente della linea dei carichi totali, che in prima approssimazione può essere approssimabile con la pendenza del tratto di canale;
    - *Rating curve*, che permette la definizione per punti della scala di deflusso.

Attraverso la discretizzazione dell'equazione di moto nel dominio spaziale, la soluzione viene definita solo in corrispondenza delle sezioni trasversali in cui il corso d'acqua è stato schematizzato e non con continuità su tutto il dominio. Il grado di risoluzione conseguibile deriva quindi dalla densità delle sezioni fluviali rilevate.

Dall'esame dei battenti idrici risultanti dalla modellistica idraulica di moto permanente si evidenziano le eventuali sezioni fluviali insufficienti.

## 2.2 MODELLISTICA IDRAULICA DI MOTO VARIO

La *modellistica idraulica di moto vario* consente di trasformare le portate, associate agli eventi di piena definiti nella fase di modellazione idrologica, in livelli idrometrici nelle sezioni fluviali. Nel caso in cui l'alveo inciso e le aree golenali risultino insufficienti al transito dell'onda di piena, la modellistica adottata deve consentire la stima dei volumi tracimati, utile alla definizione del livello di *rischio idraulico* nei territori interessati dalle esondazioni del corso d'acqua.

Per la trasformazione delle portate in livelli viene utilizzato il software *HEC-RAS 4.0 (Hydrologic Engineering Center's River Analysis System)*, prodotto e reso disponibile gratuitamente dall'USACE (*United States Army Corps of Engineering*).

Nella simulazione di moto vario il software utilizza il motore di calcolo UNET (Unsteady NETWORK model), che risolve le equazioni complete di De S. Venant, discretizzando le equazioni nel dominio spazio-temporale mediante uno schema di risoluzione implicito alle differenze finite. La soluzione viene definita solo nei punti di discretizzazione e non con continuità su tutto il dominio. Tali punti sono rappresentati dalle sezioni trasversali (discretizzazione spaziale) e dalla scansione temporale utilizzata nella rappresentazione dei fenomeni (discretizzazione temporale). Il grado di risoluzione che si ottiene deriva quindi dalla densità delle sezioni rilevate e dal passo temporale adottato.

Si ipotizza che il moto sia *gradualmente variato*, ovvero che, in corrispondenza di ciascuna sezione, vi sia una distribuzione idrostatica delle pressioni. In prossimità di singolarità, dove il moto diventa rapidamente variato (improvvisi variazioni spaziali, ponti, etc.), il programma utilizza in automatico, invece dell'equazione dell'energia, l'equazione dell'equilibrio delle spinte o altre equazioni empiriche.

Si ricorda che le *equazioni di De S. Venant* descrivono il flusso non stazionario monodimensionale delle correnti a superficie libera e vengono utilizzate per descrivere i fenomeni di trasferimento e laminazione dell'onda di piena. Si riportano rispettivamente l'equazione di continuità per fluidi incomprimibili e l'equazione del moto per le correnti gradualmente variate,

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} - q(x) = 0$$

$$\frac{\partial H}{\partial x} = -\frac{1}{g} \frac{\partial U}{\partial t} - J$$

in cui:

- $A$  è l' area della sezione liquida [m<sup>2</sup>];
- $Q$  la portata [m<sup>3</sup>/s];
- $q(x)$  la portata laterale (positiva se entrante) [m<sup>2</sup>/s];
- $H$  il carico totale della corrente [m];
- $g$  l'accelerazione di gravità [m/s<sup>2</sup>];
- $U$  la velocità media della corrente [m/s];
- $J$  le perdite di carico effettivo per unità di lunghezza;
- $x$  l'ascissa corrente lungo l'alveo [m];
- $t$  il tempo [s].

La soluzione delle equazioni di moto monodimensionale gradualmente variato presenta talvolta problemi di stabilità, specialmente in presenza di passaggi da corrente lenta a veloce e viceversa. I principali fattori che contribuiscono all'instabilità della soluzione sono:

- brusche variazioni delle caratteristiche delle sezioni;
- brusche variazioni di pendenza longitudinale;
- caratteristica dell'onda di piena;
- opere come argini, soglie sfioranti, luci a battente, sfioratori che provocano variazioni brusche nella geometria dell'alveo o delle condizioni del moto.

La prima equazione ha subito per questo ulteriori affinamenti al fine di rendere le soluzioni più stabili. In particolare, si vanno ad aggiungere opportune equazioni per la stima delle dissipazioni energetiche, sia di carattere concentrato che distribuito. Assumendo la gradualità spazio-temporale del fenomeno, la perdita di carico effettivo distribuita può essere stimata con un'equazione analoga a quella adottata per il moto uniforme:

$$J = \frac{U|U|}{gC^2 R}$$

ove, oltre ai simboli già noti,  $R$  è il raggio idraulico e  $C$  il coefficiente di resistenza esprimibile nella forma:

$$C = \frac{KsR^{\frac{1}{6}}}{\sqrt{g}}$$

ove  $Ks [m^{\frac{1}{3}}s^{-1}]$  è il coefficiente dimensionale di Gauckler-Strickler.

Per includere nel modello gli effetti dissipativi indotti da variazioni di sezione, quali allargamenti o restringimenti, si valutano le perdite di carico effettivo addizionali,  $\Delta H$ , mediante la formula:

$$\Delta H = \frac{Q^2}{2g} \xi \Delta (\alpha / A^2)$$

ove  $\alpha$  è il coefficiente di ragguaglio della energia cinetica e  $\xi$  può assumere valori compresi tra 0.1 e 0.8 maggiori nel caso di allargamento della sezione e minori nel caso di restringimento.

I dati da inserire per la costruzione del modello idraulico in HEC-RAS sono: i dati geometrici relativi alle sezioni trasversali ed alle eventuali strutture aggiuntive (ponti, traverse, sfioratori). Per ogni sezione devono essere immessi inoltre i valori del *coefficiente di scabrezza di Manning*, per il calcolo delle perdite energetiche distribuite, e dei *coefficienti di contrazione/espansione* per quelle concentrate, definiti sulla base di sopralluoghi e confronti diretti con i valori riportati in letteratura. Dall'attendibilità di questi dati dipende maggiormente il grado di risoluzione della simulazione.

Al fine di implementare le simulazioni idrauliche, devono essere definite le *condizioni al contorno* (Boundary Conditions), di monte e di valle, del sistema esaminato. La condizione al contorno di *monte* è nota dalla modellazione idrologica; il software HEC-RAS consente di inserire:

- un idrogramma delle portate;
- un idrogramma dei livelli idrometrici;
- una condizione mista costituita dall'andamento temporale di livelli e portate.

Come condizione al contorno di *valle* possono essere inserite, oltre alle tre precedenti:

- una scala di deflusso;
- un'altezza di moto uniforme.

Una stima accettabile della condizione di valle può essere ricavata attraverso la modellistica idraulica in moto permanente; scelto un set di portate significativo ed avendo a disposizione ulteriori sezioni a valle del tratto di studio, è possibile implementare un modello in moto permanente che consenta di definire, seppure in condizioni stazionarie, la relazione livelli-portate in alveo per la sezione di interesse.

Infine l'implementazione del codice di calcolo necessita della conoscenza delle *condizioni iniziali* del sistema, in termini di portata liquida, mediante le quali il programma avvia la simulazione in moto vario.

Una volta parametrizzato l'intero tronco fluviale di interesse, si può passare all'implementazione delle procedure necessarie alla perimetrazione delle aree allagate.

La schematizzazione dei processi di propagazione dell'idrogramma di piena comunemente adottata è quella *quasi-bidimensionale*, del tipo proposto da Cunge; ad un modello idraulico non stazionario, è associata una rappresentazione "a celle d'accumulo" delle *Aree di Potenziale Esondazione, APE*, adiacenti al corso d'acqua.

Si definiscono APE tutte quelle aree potenzialmente soggette a fenomeni esondativi, per le quali risulta prevalente il processo di invaso rispetto a quello di trasporto. La caratterizzazione geometrica delle APE si attua secondo i seguenti criteri:

- individuazione delle aree di potenziale esondazione su base cartografica;
- suddivisione delle aree di potenziale esondazione in celle elementari;
- caratterizzazione morfologica delle aree di potenziale esondazione, mediante una legge di riempimento volumi-quote d'inondazione  $V = V(H)$ ;
- definizione delle connessioni idrauliche alveo-cella e cella-cella, attraverso le quali avviene il trasferimento dei volumi trascinati, secondo la legge di stramazzo.

Dal punto di vista strettamente numerico, l'associazione allo schema di moto vario di una rappresentazione a celle di accumulo, comporta lo studio di fenomeni non stazionari di propagazione ed accumulo attraverso la sola legge di invaso:

$$A_{ck} \frac{\partial h_k}{\partial t} = \sum_i Q_{ki}(h_k, h_i)$$

ove  $A_{ck}$  e  $h_k$  rappresentano rispettivamente l'area e il livello idrico della cella k-esima,  $h_i$  il livello idrico nella generica cella i-esima circostante, e  $Q_{ki}$  la portata scambiata con detta cella.

Per ogni tempo di ritorno, vengono quindi simulati i processi di propagazione dell'onda di piena, ottenendo un output nei punti della discretizzazione spazio-temporale adottata. Dall'analisi dei battenti idraulici emersi dalla verifica idraulica di moto vario si evidenziano le sezioni fluviali insufficienti ed i volumi di esondazione; dalla caratterizzazione morfologica delle aree adiacenti il corso d'acqua, è possibile simulare il comportamento idraulico dei volumi esondati. In particolare essi potranno essere di transito o di ristagno.