

3 Teoria e Normativa.

Il concetto di invarianza idraulica presuppone la realizzazione, nelle aree che subiranno una perdita di permeabilità in seguito alle trasformazioni in progetto, di interventi il cui scopo è quello di mantenere invariata la portata superficiale defluente verso l'esterno. Questo risultato si può ottenere agevolando l'infiltrazione nel terreno dei volumi idrici in eccesso, rispetto alle condizioni pre-trasformazione, o laminando le portate. In quest'ultimo caso si opera praticamente realizzando vasche di accumulo temporaneo, la cui funzione è quella di trattenerne l'acqua che defluisce in superficie durante gli eventi meteorici, per rilasciarla quindi gradualmente con una portata prestabilita, non superiore a quella caratteristica dell'area prima della trasformazione.

Le tipologie d'intervento per ottenere l'invarianza idraulica sono principalmente quattro:

1. vasche di laminazione impermeabili;
2. aree verdi ribassate;
3. trincee drenanti;
4. pozzi filtranti.

In alcuni casi, in presenza di volumi idrici da smaltire non eccessivi, si può operare in alternativa con un sovradimensionamento della rete fognaria.

3.1.Determinazione della pioggia di progetto.

Le curve che descrivono l'altezza delle precipitazioni (h) in funzione della loro durata (t) prendono il nome di *curve segnalatrici di possibilità climatica o pluviometrica (CPP)*. L'equazione che collega queste due variabili ha la seguente forma:

$$h \text{ (mm)} = a t^n = a_1 w_T t^n$$

dove a_1 = altezza di precipitazione con t=1 ora e tempo di ritorno T=1 anno;

PROGRAM GEO –InvIdra ver.1.0 per Windows

w_T = fattore di frequenza in funzione del tempo di ritorno T scelto;

n = fattore di scala in funzione della durata dell'evento meteorico.

Per il dimensionamento delle vasche di laminazione e delle aree verdi ribassate, dove il volume d'infiltrazione non superi il 50% del volume idrico totale, solitamente si fa riferimento a un tempo di ritorno delle piogge di 50 anni. Per il dimensionamento di pozzi filtranti, trincee drenanti e aree verdi ribassate, in questo caso quando i volumi infiltrati superano il 50% del totale, si utilizzano tempi di ritorno più elevati, solitamente 100 anni nelle aree collinari e 200 anni in pianura.

3.2. Dimensionamento di vasche di laminazione impermeabili.

Si tratta di vasche, generalmente in calcestruzzo, dotate di un tubo di scarico sul fondo. L'acqua superficiale, durante l'evento meteorico, viene convogliata nella vasca e rilasciata gradualmente attraverso il condotto di scarico in un corpo idrico superficiale. Il dimensionamento della vasca viene eseguito nella pratica attraverso la stima del suo volume minimo, tenendo in considerazione oltre alla portata in entrata anche quella in uscita dal tubo di scarico.

3.2.1. Metodo semplificato.

Si basa su una formula speditiva, inserita in alcune normative regionali, per la stima cautelativa del volume d'invaso specifico:

$$(1) W(mc/ha) = w_0 \left(\frac{c_{a2}}{c_{a1}} \right)^{\frac{1}{1-n}} - 15I - w_0 P$$

dove:

$w_0(mc/ha)$	= volume specifico disponibile naturalmente per la laminazione;
c_{a2}	= coefficiente di afflusso dopo la trasformazione dell'area;
c_{a1}	= coefficiente di afflusso prima della trasformazione dell'area;
n	= parametro n della curva di possibilità pluviometrica;

PROGRAM GEO –InvIdra ver.1.0 per Windows

15	= volume specifico disponibile per la laminazione dopo la trasformazione;
I	= percentuale di superficie trasformata (in forma decimale);
P	= percentuale di superficie non trasformata (in forma decimale).

Il volume massimo d'invaso della vasca di laminazione si ottiene moltiplicando W per la superficie totale dell'area soggetta alla trasformazione (A), espressa in ettari (ha):

$$W_{lam} (mc) = WA$$

I coefficienti di afflusso delle aree soggette a trasformazione si ottengono calcolando la media pesata dei coefficienti di afflusso delle superfici permeabili (A_p) e impermeabili (A_i). Per le parti permeabili si usa un valore di c_a uguale a 0,2 ($c_{ap}=0,2$), per le parti impermeabili un c_a uguale a 0,9 ($c_{ai}=0,9$).

$$(2) c_a = \frac{c_{ai} A_i + c_{ap} A_p}{A_i + A_p}$$

La relazione (1) è stata pensata per aree sub-pianeggianti, quindi se ne sconsiglia l'uso in aree con pendenza non trascurabile, dove i volumi specifici di laminazione disponibili naturalmente possono essere significativamente più bassi.

3.2.2. Metodo razionale.

L'applicazione di questo metodo comporta l'adozione di un processo di trasformazione afflussi-deflussi basato su un modello di tipo cinematico. Si parte dal presupposto che la portata uscente dal bacino cresca gradualmente, dall'inizio della precipitazione meteorica, fino a raggiungere un valore massimo al tempo t_c . Questa grandezza prende il nome di tempo di corrivazione e, fisicamente, indica l'intervallo di tempo necessario perché una particella idrica, partendo dal punto più distante del bacino, possa giungere alla sezione di chiusura. Da l'istante t_c in poi alla portata defluente

PROGRAM GEO -InvIdra ver.1.0 per Windows

Q contribuisce tutto il bacino e quindi Q assume il suo valore massimo. La portata rimane quindi costante fino al momento in cui si esaurisce l'evento piovoso.

Il tempo di corrivazione può essere stimato con la relazione proposta da Boyd per aree sub-pianeggianti di limitata estensione:

$$t_c (\text{ore}) = t_0 + t_r$$

dove:

$$t_r = \frac{\sqrt{1,5A}}{v} \text{ e } t_0 = kA^d$$

in cui:

A(kmq) = area della superficie trasformata;

k = 2,51

d = 0,38

v = 1,00

Nell'applicazione del metodo razionale per il dimensionamento delle vasche di laminazione si fanno solitamente due ipotesi:

1. che la precipitazione meteorica netta abbia intensità costante (ietogramma rettangolare);
2. che lo svuotamento della vasca di laminazione avvenga a portata costante ($Q_u = \text{cost}$).

Partendo da queste due ipotesi semplificatrici, all'istante t il volume accumulato nella vasca di laminazione, dato dalla differenza fra il volume idrico entrante e quello uscente, può essere descritto dalla seguente relazione:

$$(3) W(mc) = c_a A a t^n + t_c Q_u^2 \frac{t^{1-n}}{c_a A a} - Q_u t - Q_u t_c$$

in cui:

c_a	= coefficiente di afflusso;
A	= superficie dell'area trasformata;
a	= parametro a della curva di possibilità pluviometrica;

PROGRAM GEO -InvIdra ver.1.0 per Windows

n	= parametro n della curva di possibilità pluviometrica.
---	---

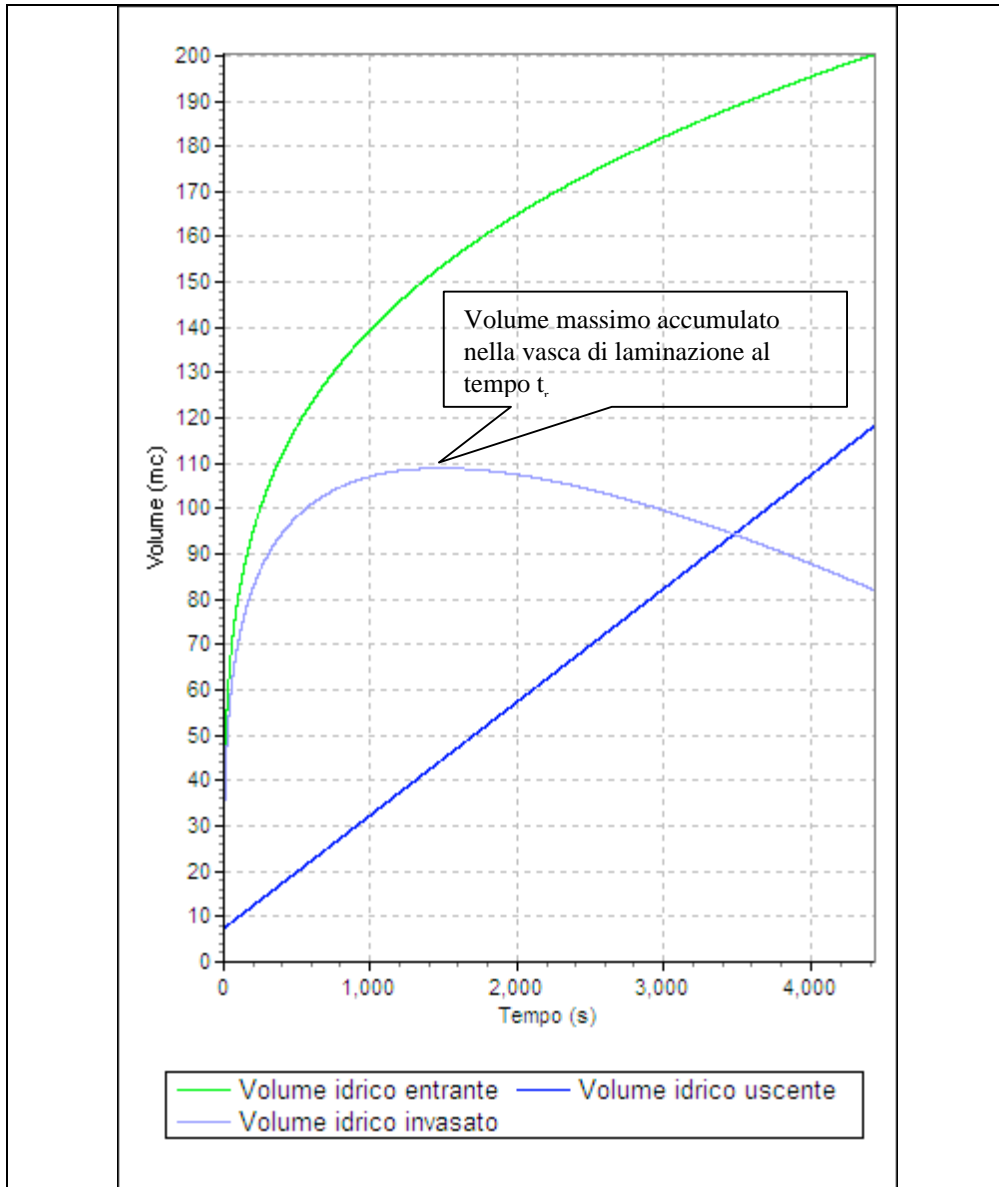
La durata di pioggia che genera un volume massimo d'invaso (t_r =durata critica) si ottiene derivando la (3) rispetto al tempo e ponendola uguale a zero:

$$(4) n c_a A a t_r^{n-1} + (1-n) t_c Q_u^2 \frac{t_r^{-n}}{c_a A a} - Q_u = 0$$

Inserendo quindi il valore di t_r ricavato nella (3) si calcola il volume d'invaso massimo.

Si tratta del metodo di calcolo in generale più utilizzato.

PROGRAM GEO -InvIdra ver.1.0 per Windows



3.2.3. Metodo delle sole piogge.

Nell'applicare questo metodo si considerano trascurabili gli effetti del processo di trasformazione afflussi-deflussi. Si parte quindi dal presupposto che contemporaneamente all'inizio dell'evento meteorico si abbia la massima portata di afflusso.

Nell'applicazione del metodo delle sole piogge per il dimensionamento delle vasche di laminazione si fanno solitamente due ipotesi:

3. che la precipitazione meteorica netta abbia intensità costante (ietogramma rettangolare);
4. che lo svuotamento della vasca di laminazione avvenga a portata costante ($Q_u = \text{cost}$).

Partendo da queste due ipotesi semplificatrici, all'istante t il volume accumulato nella vasca di laminazione, dato dalla differenza fra il volume idrico entrante e quello uscente, può essere descritto dalla seguente relazione:

$$(5) W(mc) = c_a A a t^n - Q_u t$$

in cui:

c_a	= coefficiente di afflusso;
A	= superficie dell'area trasformata;
a	= parametro a della curva di possibilità pluviometrica;
n	= parametro n della curva di possibilità pluviometrica.

La durata di pioggia che genera un volume massimo d'invaso (t_r =durata critica) si ottiene con la seguente relazione:

$$(6) t_r = \left(\frac{Q_u}{A c_a a n} \right)^{\frac{1}{n-1}}$$

Inserendo quindi il valore di t_r ricavato nella (5) si calcola il volume d'invaso massimo.

3.2.4. Metodo dell'invaso.

Con il metodo dell'invaso si parte dal presupposto che il bacino a monte si comporti come un invaso lineare

Nell'applicazione del metodo dell'invaso lineare per il dimensionamento delle vasche di laminazione si fanno solitamente due ipotesi:

5. che la precipitazione meteorica netta abbia intensità costante (ietogramma rettangolare);
6. che lo svuotamento della vasca di laminazione avvenga a portata costante ($Q_u = \text{cost}$).

La portata critica del bacino a monte si ottiene dalla relazione:

$$(7) Q_c (mc/s) = c_a A a D k^{n-1}$$

in cui:

c_a	= coefficiente di afflusso;
A	= superficie dell'area trasformata;
a	= parametro a della curva di possibilità pluviometrica;
k	= costante d'invaso del bacino.

La grandezza D si ottiene dalla formula:

$$(8) D = C^{n-1} (1 - e^{-C})$$

in cui:

$$(9) n = \frac{1 + C - e^C}{1 - e^C}$$

La durata di pioggia che genera un volume massimo d'invaso ($t_r = \text{durata critica}$) si ottiene con la seguente relazione:

$$(10) t_r = kF$$

PROGRAM GEO -Invidra ver.1.0 per Windows

dove F si ottiene dalla risoluzione della seguente equazione:

$$(11) nF + (1-n) \ln \left(\frac{\frac{m}{D} F^{n-1}}{\frac{m}{D} F^{n-1} - 1} \right) - \frac{D}{m} F^{2-n} = 0$$

La grandezza m è definita dal rapporto Q_c/Q_u ($m = Q_c/Q_u$).

Il volume d'invaso massimo si ricava invece dalla:

$$(12) W(mc) = kQ_c G$$

dove G si ottiene dalla risoluzione della seguente equazione:

$$(13) G = \frac{F^n}{D} - \frac{F^{n-1}}{D} \ln \left(\frac{\frac{m}{D} F^{n-1}}{\frac{m}{D} F^{n-1} - 1} \right) - \frac{F}{m} - \frac{1}{m} \ln \left[\left(\frac{m F^{n-1}}{D} - 1 \right) (1 - e^{-F}) \right]$$

3.2.5. Dimensionamento del tubo di scarico e calcolo dell'area della vasca.

Stimato il volume minimo della vasca di laminazione, si può procedere con il dimensionamento del tubo di scarico e con la stima della area in pianta della vasca. Il diametro del condotto di scarico è funzione del battente idraulico massimo all'interno della vasca e può essere calcolato con la seguente formula (Giorgi, 2004):

$$Q = 0,6\pi\left(\frac{D}{2}\right)^2 \sqrt{2gh}$$

dove:

- Q(m³/s) = portata uscente dal tubo di scarico;
- D(m) = diametro del tubo;
- h(m) = altezza del battente idraulico;
- g(m/s²) = accelerazione di gravità = 9,81.

La portata uscente dal tubo è nota, quindi la relazione può essere usata:

- per stimare D, fissata l'altezza h del battente idraulico;
- per stimare h, fissato il diametro D del tubo di scarico.

Determinato il valore dell'altezza massima del battente idraulico, l'area in pianta della vasca è data semplicemente dal rapporto fra il volume minimo della vasca e l'altezza h:

$$A = \frac{W}{h}$$

3.3.Dimensionamento di aree verdi ribassate.

Si tratta di aree ribassate rispetto al piano campagna in cui il fondo non è impermeabilizzato. L'acqua superficiale, durante l'evento meteorico, viene convogliata nell'area ribassata, dove in parte s'infiltra nel terreno e in parte viene rilasciata gradualmente, attraverso il condotto di scarico, in un corpo idrico superficiale. Il dimensionamento dell'area verde ribassata viene eseguito nella pratica attraverso la stima del suo volume minimo, tenendo in considerazione oltre alla portata in entrata anche quella in uscita per infiltrazione e attraverso il tubo di scarico.

3.3.1 Stima dell'afflusso superficiale.

Il calcolo dell'afflusso superficiale può essere condotto con uno dei metodi visti nel paragrafo precedente e, in particolare, con il metodo razionale e delle sole piogge, che consentono di descrivere l'andamento dei volumi idrici di superficie con il tempo. Il valore della durata critica dell'evento meteorico (t_r), quella cioè per la quale si ottiene il massimo volume d'invaso, viene calcolato, a favore della sicurezza, partendo dalla condizione di infiltrazione nulla. Poiché in realtà ai volumi idrici in uscita dal tubo di scarico si sommano quelli dovuti all'infiltrazione nel terreno, il valore reale di t_r risulterà sempre inferiore a quello calcolato.

3.3.2 Stima del tasso d'infiltrazione potenziale.

Con il termine tasso d'infiltrazione potenziale (f) s'intende la quantità massima di acqua superficiale che può infiltrarsi nel terreno, posto che tale quantità sia disponibile. Il tasso d'infiltrazione reale potrà quindi essere inferiore a quello potenziale nell'ipotesi in cui la quantità d'acqua presente in superficie, dovuta, per esempio, ad una precipitazione piovosa, non sia sufficiente. Non potrà in ogni caso essere superiore.

Il tasso d'infiltrazione potenziale dipende essenzialmente dalla permeabilità del terreno e dal grado di saturazione iniziale dello stesso. Maggiore è la permeabilità, maggiore è il tasso potenziale di infiltrazione. Maggiore è il grado di saturazione, minore è il tasso potenziale di infiltrazione. Il valore di

PROGRAM GEO -InvIdra ver.1.0 per Windows

f può variare da diverse decine di mm all'ora in terreni molto permeabili e asciutti fino a meno di un mm all'ora per terreni poco permeabili e saturi.

Un modello per la stima di f molto usato nella pratica è quello di Green e Ampt. Si immagina che il fronte di saturazione si sposti verso il basso nel tempo, dividendo in maniera netta il volume di terreno già saturato, in cui il contenuto di umidità è quindi uguale alla porosità (η), da quello, più profondo, non ancora raggiunto, in cui il contenuto di umidità è uguale a quello iniziale (θ).

Ad un determinato tempo t dopo l'inizio del processo d'infiltrazione, l'infiltrazione cumulata F, cioè la quantità d'acqua che si è infiltrata fino a quel momento, può essere espressa con la seguente relazione:

$$F(t)(mm) = Kt + \Delta\theta(h_0 + \psi)\ln\left(1 + \frac{F(t)}{\Delta\theta(h_0 + \psi)}\right)$$

dove:

K(m/h) = permeabilità verticale del terreno, che può essere posta, in prima approssimazione uguale alla metà di quella orizzontale;

t(h) = tempo di calcolo dall'inizio del processo d'infiltrazione;

ψ (mm) = carico di suzione;

h_0 (mm) = altezza del battente idraulico rispetto al fondo dell'area verde ribassata;

$\Delta\theta$ = $\eta - \theta$;

Poiché la grandezza F compare in ambedue i membri dell'equazione, la soluzione va cercata con un procedimento iterativo, imponendo un primo valore di F nel secondo membro, calcolando il nuovo valore di F, risolvendo l'equazione, e sostituendolo al secondo membro. Il calcolo andrà ripetuto fino a quando la differenza fra i valori di F nei due membri sia sotto un valore minimo prestabilito (per esempio 0,001).

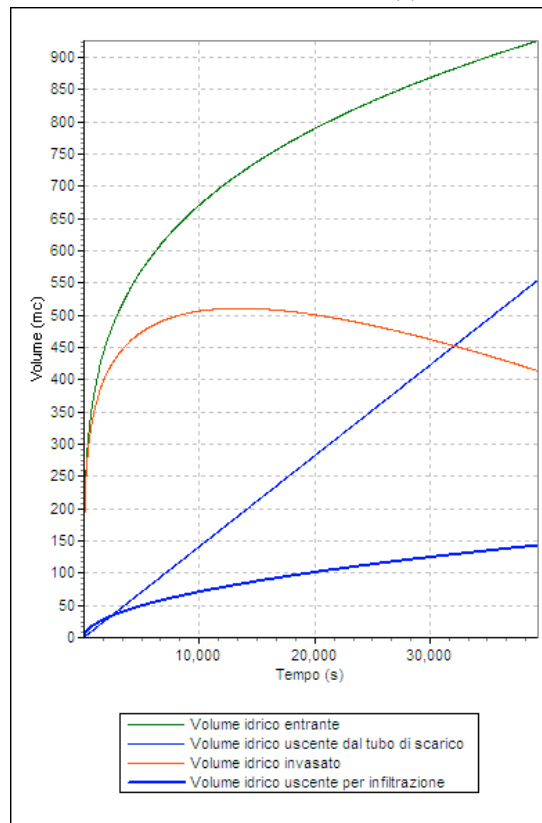
Il parametro di più difficile determinazione è il carico di suzione, che può essere definito come l'altezza di risalita dell'acqua in un terreno non saturo per via delle tensioni capillari. In linea di massima è inversamente proporzionale alla permeabilità del terreno e indicativamente può essere dedotto dalla seguente tabella (dove H corrisponde a ψ):

PROGRAM GEO -InvIdra ver.1.0 per Windows

Tipo terreno	H (m)
Ghiaia	0,05-0,30
Sabbia grossa	0,03-0,80
Sabbia media	0,12-2,40
Sabbia fine	0,30-3,50
Limo	1,50-12,0
Argilla	>10,0

Stimata l'infiltrazione cumulata, il tasso d'infiltrazione potenziale è ricavabile dalla relazione:

$$f(t)(mm/h) = K \frac{F(t) + \Delta\theta(h_0 + \psi)}{F(t)}$$



PROGRAM GEO –InvIdra ver.1.0 per Windows

A favore della sicurezza si suppone che l'infiltrazione avvenga esclusivamente sul fondo dell'area ribassata e non lateralmente.

3.4.Dimensionamento di trincee drenanti.

Si tratta di scavi a sezione più o meno ristretta in cui il fondo non è impermeabilizzato. L'acqua superficiale, durante l'evento meteorico, viene convogliata nella trincea dove s'infiltra nel terreno. Il dimensionamento della trincea drenante viene eseguito nella pratica attraverso la stima del suo volume minimo, tenendo in considerazione oltre alla portata in entrata anche quella in uscita per infiltrazione.

3.4.1 Stima dell'afflusso superficiale.

Il calcolo dell'afflusso superficiale può essere condotto con uno dei metodi visti nel paragrafo 3.2 e, in particolare, con il metodo razionale e delle sole piogge, che consentono di descrivere l'andamento dei volumi idrici di superficie con il tempo. Il valore della durata critica dell'evento meteorico (t_c) non è valutabile direttamente e può essere ricavato solo procedendo per tentativi, facendo variare la durata dell'evento meteorico fino a individuare il volume massimo. La durata totale della simulazione può essere posta indicativamente uguale a due volte la durata della pioggia di riferimento.

3.4.2 Stima del tasso d'infiltrazione potenziale.

Si procede come nel caso precedente (paragrafo 3.3.2), ipotizzando, a favore della sicurezza che l'infiltrazione avvenga esclusivamente sul fondo della trincea.

3.5.Dimensionamento di pozzi filtranti.

Si tratta di pozzi a sezione circolare in cui il fondo non è impermeabilizzato. L'acqua superficiale, durante l'evento meteorico, viene convogliata nei pozzi dove s'infiltra nel terreno. Il dimensionamento dei pozzi filtranti viene eseguito nella pratica attraverso la stima del suo volume minimo, tenendo in considerazione oltre alla portata in entrata anche quella in uscita per infiltrazione.

3.5.1 Stima dell'afflusso superficiale.

Si prendono in considerazione due casi:

- portata di afflusso costante;
- portata di afflusso variabile nel tempo.

Il primo caso si può verificare quando i pozzi filtranti sono collegati a una vasca di laminazione impermeabile. In questo caso il tubo di scarico invece di far defluire le acque accumulate nella vasca in corpo idrico superficiale le convoglia verso i pozzi filtranti, dove vengono disperse per infiltrazione.

Il secondo caso si ha quando l'afflusso superficiale viene inviato direttamente ai pozzi, in assenza di vasche di accumulo.

Nell'ipotesi di portata variabile nel tempo, il calcolo dell'afflusso superficiale può essere condotto con uno dei metodi visti nel paragrafo 3.2 e, in particolare, con il metodo razionale e delle sole piogge, che consentono di descrivere l'andamento dei volumi idrici di superficie con il tempo. Il valore della durata critica dell'evento meteorico (t_r) non è valutabile direttamente e può essere ricavato solo procedendo per tentativi, facendo variare la durata dell'evento meteorico fino a individuare il volume massimo. La durata totale della simulazione può essere posta indicativamente uguale a due volte la durata della pioggia di riferimento.

3.5.2 Calcolo del volume minimo dei pozzi.

Il dimensionamento di pozzi filtranti consiste nella determinazione del volume minimo che devono possedere per essere in grado di smaltire le acque meteoriche. Il pozzo deve quindi consentire l'infiltrazione in

PROGRAM GEO -InvIdra ver.1.0 per Windows

profondità delle acque defluenti in superficie e permettere l'invaso dell'afflusso in eccesso fino all'esaurimento dell'evento piovoso.

Trascurando l'evaporazione, poco significativa durante la precipitazione meteorica, la relazione alla base del dimensionamento dei pozzi è la seguente:

$$(a) (Q_p - Q_f) \Delta t = \Delta W$$

in cui:

- $Q_p(\text{mc/h})$ = portata dell'afflusso meteorico al tempo t ;
- $Q_f(\text{mc/h})$ = portata che s'infiltra nel terreno al tempo t ;
- $\Delta t(\text{h})$ = passo di calcolo temporale;
- $\Delta W(\text{mc})$ = volume invasato nel pozzo.

Il termine ΔW , ovviamente, tenderà a crescere fino a raggiungere un valore massimo in corrispondenza dell'esaurirsi dell'evento piovoso.

Fissato un passo temporale di calcolo Δt , il termine Q_p può essere posto costante (portata di afflusso costante) o variabile in funzione di t a seconda del metodo di calcolo degli afflussi superficiali scelto (portata di afflusso variabile). La grandezza Q_f viene fornita invece dalla relazione (Sieker, 1984):

$$(b) Q_f = \frac{k}{2} \left(\frac{L+h}{L+\frac{h}{2}} \right) A_f$$

dove:

- $L(\text{m})$ = profondità della falda misurata dal fondo del pozzo;
- $h(\text{m})$ = altezza della colonna d'acqua nel pozzo;
- $k(\text{m/s})$ = permeabilità del terreno saturo;
- $A_f(\text{mq})$ = superficie drenante = $\pi(0,5d+0,5h)^2 - \pi d^2/4$
- $d(\text{m})$ = diametro del pozzo

PROGRAM GEO -InvIdra ver.1.0 per Windows

Infine il termine ΔW si ricava con la relazione:

$$(c) \Delta W = A_p h$$

in cui:

$$A_p(\text{mq}) = \text{area della sezione del pozzo} = \pi d^2/4$$

Essendo l'incognita h presente nei due membri dell'equazione, la (a) va risolta con un procedimento a passi. In pratica si pone inizialmente $h=0$, cioè $Q_f=0$, e, in corrispondenza del primo passo temporale di calcolo, si risolve la (a). Il primo valore di h si ottiene quindi con la relazione:

$$h = \frac{\Delta W_1}{A_p}$$

Utilizzando il valore di h ricavato, si calcola Q_f e la s'introduce nella (c). Il nuovo valore di h , per il tempo $2\Delta t$, si ottiene risolvendo nuovamente la (a):

$$\Delta W_2 = \Delta W_1 + (Q_p - Q_f) \Delta t$$

Il procedimento deve essere ripetuto fino ad un tempo almeno uguale alla durata dell'evento meteorico, tempo in cui h assume il suo massimo valore.