



PROVINCIA DI GENOVA
DIREZIONE 4 - Lavori pubblici e Manutenzioni
Sezioni Progettazione e Manutenzione Viabilità ed Idraulica

A.T.I. :



LOCALITA':

Comuni di:
Chiavari e Lavagna

COMMESSA:

DSU 135-171

TITOLO:

Interventi di mitigazione del rischio idraulico del bacino del Fiume
Entella relativamente al tratto terminale
1° lotto dalla foce al P.te Maddalena - 1° stralcio funzionale
Progetto Definitivo

SCALE

Revisione generale a seguito del parere del C.T.B. regionale del
08/03/2012 e delle indicazioni emerse in sede di Conferenza dei Servizi

| PROGETTISTI | | OGGETTO: <i>RELAZIONE IDROLOGICA</i> | ELABORATO N° <i>RR02</i> |
|----------------------|--|---|---------------------------------|
| Massimo Parravicini | SGI Studio Galli Ingegneria | | |
| Alberto Galli | SGI Studio Galli Ingegneria | | |
| Vincenzo Marsala | SGI Studio Galli Ingegneria | | |
| Ugo Majone | Studio Maione Ingg. Assoc. | | |
| Denis Cerlini | Studio Maione Ingg. Assoc. | | |
| Manuela Sciutto | PROJENIA - Engineering & Consulting Services | | |
| Maurizio Spallarossa | PROJENIA - Engineering & Consulting Services | | |
| Marco Gonella | MED Ingegneria | | |

| <i>Elaborato</i> | <i>Verificato</i> | <i>Regolarità tecnica</i> | <i>Data</i> | <i>Rev.</i> |
|-------------------|-------------------|---------------------------|--------------|-------------|
| Elena Bocciarelli | Denis Cerlini | | Ottobre 2012 | 5 |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |

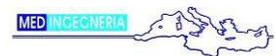
NOME FILE:



INDICE

| | |
|--|-----------|
| 1. PREMESSA..... | 3 |
| 2. STUDI PREGRESSI | 4 |
| 2.1 FIUME ENTELLA | 4 |
| 2.1.1 <i>La curva inviluppo delle portate al colmo di piena.....</i> | 4 |
| 2.1.2 <i>Caratterizzazione delle precipitazioni intense e delle portate di piena per i bacini liguri. Studio del C.I.M.A. (1999)</i> | 5 |
| 2.1.3 <i>Rapporto sulla valutazione delle piene nel bacino padano e nella Liguria tirrenica (VA.Pl. – 1999)</i> | 6 |
| 2.1.4 <i>Piano di Bacino stralcio sul rischio idrogeologico – Ambito 16 (2007).....</i> | 10 |
| 2.1.5 <i>Progetto preliminare degli interventi di adeguamento idraulico del tratto terminale del torrente Entella (2004).....</i> | 11 |
| 2.1.6 <i>Pubblicazioni: “L’Acqua”, rivista dell’Associazione Idrotecnica Italiana</i> | 12 |
| 2.1.7 <i>Sintesi delle portate dell’Entella ricavate in studi pregressi.....</i> | 13 |
| 2.2 RIVI MINORI | 14 |
| 2.2.1 <i>Piano di Bacino stralcio sul rischio idrogeologico – Ambito 16 (2003).....</i> | 14 |
| 2.2.2 <i>Progetto preliminare degli interventi di adeguamento idraulico del tratto terminale del torrente Entella (2004).....</i> | 15 |
| 2.2.3 <i>Lavori di ampliamento del polo ospedaliero di Lavagna (2006)</i> | 16 |
| 3. PORTATE DI PROGETTO FIUME ENTELLA..... | 17 |
| 4. ANALISI IDROLOGICA DEL RETICOLO MINORE | 18 |
| 4.1 DESCRIZIONE DEL RETICOLO MINORE | 18 |
| 4.2 STIMA DELLA PORTATA DI PROGETTO | 23 |
| 4.2.1 <i>Linee segnalatrici di possibilità pluviometrica.....</i> | 23 |
| 4.2.2 <i>Modello cinematico</i> | 28 |
| 4.2.3 <i>Modello CN-SCS.....</i> | 29 |
| 4.2.4 <i>Metodo C.I.M.A. per bacini di piccole dimensioni.....</i> | 30 |
| 4.2.5 <i>Metodo del PRRA per i bacini urbani</i> | 31 |

A.T.I.:

STUDIO GALLI
INGEGNERIAprojenia
ENGINEERING & CONSULTING SERVICES



| | | |
|-----------|---|-----------|
| 4.2.6 | Analisi dei risultati e definizione delle portate di progetto..... | 33 |
| 5. | CONCOMITANZE TRA LE PIENE DEL RETICOLO MINORE E QUELLE DELL'ENTE LLA | 35 |
| 5.1 | GENERALITÀ | 35 |
| 5.2 | RICHIAMI DI STATISTICA..... | 35 |
| 5.3 | ANALISI DI DETTAGLIO..... | 36 |

A.T.I.:



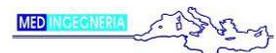
**STUDIO GALLI
INGEGNERIA**



**STUDIO MAIONE
INGEGNERI ASSOCIATI**



projenia
ENGINEERING & CONSULTING SERVICES



MED INGEGNERIA



1. PREMESSA

Nell'ambito della Progettazione e attività di direzione lavori degli “*Interventi di mitigazione del rischio idraulico del bacino del fiume Entella relativamente al tratto terminale*” affidata dalla Provincia di Genova all'Associazione Temporanea di Imprese SGI Studio Galli Ingegneria Spa – Studio Maione Ingegneri Associati - Projenia - Med Ingegneria S.r.l., è stata richiesta una revisione al progetto definitivo di 1 lotto 1 stralcio a seguito del parere del Comitato di Bacino Regionale del 08/03/2012 e delle indicazioni emerse in sede di Conferenza dei Servizi. La presente relazione ne costituisce il contributo idrologico.

Il presente lavoro è svolto con l'obiettivo di approfondire rispetto al Piano di Bacino l'idrologia di piena del fiume Entella nel tratto terminale nonché di effettuare un'analisi idrologica dei rivi minori con sbocco in Entella per il tratto di interesse.

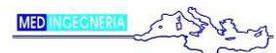
Questa analisi, già svolta in fase di progettazione preliminare è stata in questa sede affinata per quanto concerne le portate dei rivi minori e la concomitanza delle piene tra Entella e reticolo minore.

Per lo svolgimento dell'analisi idrologica sono stati dapprima raccolti ed analizzati tutti gli studi pregressi riguardanti l'idrologia di piena dell'Entella, al fine supportare l'analisi idrologica. Particolare attenzione è stata posta nell'analisi degli elaborati del Piano di Bacino, che rappresenta lo strumento normativo vigente relativo alla pianificazione delle misure e degli interventi di prevenzione del rischio idrogeologico e le cui direttive costituiscono un punto di riferimento essenziale nello studio idrologico-idraulico dei corsi d'acqua e nella conseguente progettazione delle opere di difesa idraulica del territorio.

È stata, poi effettuata la stima delle portate al colmo di piena per i corsi d'acqua del reticolo minore confrontando i risultati ottenuti con le usuali metodologie di letteratura con i valori di portata al colmo riportati nel Piano di Bacino Stralcio sul Rischio Idrogeologico.

Infine, è stata studiato statisticamente l'evento congiunto “piena del Fiume Entella/piena dell'affluente” al fine di determinare il tempo di ritorno di riferimento per le analisi idrologiche ed idrauliche lungo i corsi d'acqua del reticolo minore, una volta fissato il tempo di ritorno dell'evento congiunto in funzione del quale si intendono verificare e/o progettare le opere di difesa idraulica del territorio.

A.T.I.:





2. STUDI PREGRESSI

2.1 Fiume Entella

Nel presente capitolo vengono sinteticamente descritti gli studi pregressi inerenti l'idrologia di piena del bacino dell'Entella.

2.1.1 La curva inviluppo delle portate al colmo di piena

Una metodologia per la stima delle portate al colmo di piena, spesso impiegata negli studi pregressi analizzati con finalità di confronto, è quella basata sulla *curva inviluppo*, costituita dall'inviluppo di tutte le portate unitarie (cioè per unità di superficie del bacino) storicamente registrate nel compartimento idrografico di Genova e dintorni.

Questo metodo lega le massime portate di piena all'area del bacino sotteso, parametrizzando tale legame nella forma pseudo-iperbolica della (2.1), che descrive abbastanza bene l'andamento del contributo unitario di piena al variare della superficie di bacino idrografico sotteso:

$$q = q_0 + b \cdot S^{-n} \quad (2.1)$$

dove q_0 , b ed n sono tre parametri arbitrari, la cui stima si effettua imponendo alla (2.1) di assumere, per tre valori di superficie sottesa, i valori dei contributi unitari desunti dalle osservazioni.

Nel caso dei bacini liguri con foce al litorale tirrenico, la curva inviluppo di riferimento è quella formulata dall'Ing. Cati (1970), che, utilizzando i dati relativi alle piene dell'Ottobre 1970 in alcuni bacini della Liguria, ha aggiornato la curva precedente, ferma agli eventi alluvionali del 1953. In particolare, la (2.1) risulta particolarizzata dalla (2.2):

$$\begin{aligned} q &= 7.92 + 82.92 \cdot S^{-0.66} && \text{per } S = 10 \div 160 \text{ km}^2 \\ q &= -70.10 + 108 \cdot S^{-0.056} && \text{per } S > 160 \text{ km}^2 \end{aligned} \quad (2.2)$$

dove q è espresso in $\text{m}^3/\text{s Km}^2$ e la superficie S in Km^2 .

La Tabella 2.1 riporta i valori ricavati alle sezioni di interesse localizzate lungo il corso dell'Entella con il metodo della curva inviluppo.



Tabella 2.1: Portate al colmo ricavate col metodo della curva inviluppo

| Corso d'acqua | S [kmq] | Q [mc/s] |
|----------------------------------|---------|----------|
| Entella valle confl. Graveglia | 362.8 | 2735.31 |
| Entella a Panesi | 364.0 | 2739.13 |
| Entella al Ponte della Maddalena | 369.9 | 2757.65 |
| Entella alla Foce | 371.1 | 2761.41 |

Nonostante il suo uso consolidato nella pratica idrologica, va osservato però come la curva inviluppo presenti notevoli limitazioni, sia strutturali che concettuali. Senza considerare le incertezze relative ai dati in base ai quali è ricavata, due limitazioni in particolare suggeriscono un uso cauto di questo metodo di valutazione. La prima riguarda il limite inferiore di validità della (2.1), che fornisce valori irrealistici al diminuire della superficie contribuyente S, soprattutto, quindi, per i bacini più piccoli. La seconda, non meno significativa, riguarda l'impossibilità di assegnare alla curva inviluppo, per come viene derivata, un significato statistico e, quindi, un livello di frequenza caratteristico degli eventi con essa calcolati, che possono, per un assegnato tempo di ritorno, tendere ora a sovrastimare il valore delle portate di piena, ora a sottostimarle, a seconda delle osservazioni storiche alla base della costruzione della curva; ciononostante, tenuto conto di quanto riportato in letteratura, nella pratica idrologica alla curva d'inviluppo viene associato, per l'area genovese, un tempo di ritorno prossimo ai 200 anni.

2.1.2 *Caratterizzazione delle precipitazioni intense e delle portate di piena per i bacini liguri. Studio del C.I.M.A. (1999)*

Lo studio idrologico effettuato dal C.I.M.A. utilizza un'analisi statistica regionale per definire le curve di possibilità pluviometrica dei bacini liguri non strumentati, attraverso i dati raccolti nelle sezioni strumentate localizzate su tutto il territorio regionale. Vengono così determinati gli eventi di precipitazione critici, al variare del tempo di ritorno, per le diverse aree liguri.

Dall'evento di precipitazione si passa all'evento di piena, caratterizzato da una data portata al colmo, utilizzando un modello di trasformazione afflussi-deflussi di tipo semidistribuito, definendo, per ogni sito di interesse, una *portata indice*, corrispondente ad un tempo di ritorno T pari a 2.9 anni.

La modellazione del deflusso si basa sulla caratterizzazione geomorfologica della risposta del bacino a partire da un modello digitale del terreno a risoluzione 225x225 m e dalle mappe di uso del suolo e litologia a risoluzione 100x100 m. Attraverso il DEM viene individuato il reticolo di drenaggio per l'intero territorio ligure ed ogni singola

A.T.I.:



STUDIO GALLI
 INGEGNERIA





cella viene definita come “cella-canale” o “cella-versante”. Viene quindi determinato il tempo di corrivazione relativo ad ogni cella e l’idrogramma istantaneo unitario.

A partire da queste informazioni e dalle piogge depurate con la metodologia del Soil Conservation Service (SCS-CN), l’ultimo modulo del modello effettua la convoluzione degli idrogrammi unitari per ottenere l’idrogramma alla sezione di chiusura.

Nota la portata indice, vengono successivamente valutate le portate al colmo di piena per assegnato tempo di ritorno attraverso l’utilizzo della *curva di crescita delle portate*, ottenuta applicando il modello probabilistico TCEV ai dati delle serie storiche disponibili relative alle stazioni idrometriche dislocate sul territorio ligure.

Per le sezioni diverse da quelle considerate nello studio è possibile determinare la portata al colmo attraverso la seguente legge monomia:

$$Q = K_T \cdot c(T_{indice}) \cdot A^{0.75} \quad (2.3)$$

dove A , misurato in km^2 , è la superficie del bacino chiuso alla sezione di interesse, K_T è il fattore di frequenza relativo al tempo di ritorno e $c(T_{indice})$ è un parametro tabellato, che varia a seconda del tratto di corso d’acqua considerato.

Attraverso questa metodologia è possibile determinare il valore di portata al colmo per qualunque sezione dei corsi d’acqua compresi nello studio e qualunque tempo di ritorno.

La Tabella 2.2 riporta i valori di portata al colmo di piena determinati in tale studio relativamente alle sezioni dell’Entella.

Tabella 2.2: Valori di portata al colmo [mc/s] dello studio CIMA

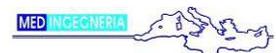
| Corso d’acqua | Q ₃₀ | Q ₅₀ | Q ₁₀₀ | Q ₂₀₀ | Q ₅₀₀ |
|---|-----------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|
| Entella valle confl. Graveglia* | 1959.3 | 2345.1 | 2872.1 | 3392.5 | 4081.6 |
| Entella a Panesi* | 1964.2 | 2350.9 | 2879.2 | 3400.9 | 4091.7 |
| Entella al Ponte della Maddalena* | 1988.0 | 2379.3 | 2914.1 | 3442.1 | 4141.3 |
| Entella alla Foce | 1990.0 | 2380.0 | 2920.0 | 3440.0 | 4140.0 |
| * Sezioni per cui si applica la formula monomia | | | | | |

2.1.3 Rapporto sulla valutazione delle piene nel bacino padano e nella Liguria tirrenica (VA.PI. – 1999)

Per i bacini liguri con foce sul litorale tirrenico è stato pubblicato un Rapporto Regionale soltanto in forma di prima bozza, pertanto nel seguito, come indicato anche dal CNDCI nel suo “Rapporto di sintesi”, si farà riferimento al rapporto sulla “Valutazione delle Piene nel Bacino Padano e nella Liguria Tirrenica” di De Michele & Rosso [1999].

I modelli regionali VA.PI. elaborati dal Gruppo Nazionale per la Difesa dalle Catastrofi Idrogeologiche del Consiglio Nazionale delle Ricerche si basano sul metodo della

A.T.I.:





portata indice, ossia sull'ipotesi di esistenza di regioni compatte e idrologicamente omogenee all'interno delle quali le portate di colmo normalizzate rispetto ad una portata di riferimento – la portata indice appunto – siano descrivibili da una stessa distribuzione di probabilità, denominata *curva di crescita*.

La portata al colmo di piena è quindi ricavabile tramite la (2.4):

$$Q = Q_{indice} \cdot K_T \tag{2.4}$$

dove Q_{indice} è la portata indice espressa in m³/s e K_T è la curva di crescita.

Quale distribuzione di probabilità cumulata (DPC) del coefficiente di crescita del massimo annuale delle portate al colmo di piena è stata adottata la distribuzione generalizzata del valore estremo (GEV):

$$P(K) = \exp \left[- \left(1 - \frac{k}{\alpha} \cdot (K - \varepsilon) \right)^{1/k} \right] \tag{2.5}$$

dove ε è il parametro di posizione, α il parametro di scala e k il parametro di forma.

Nota la relazione che lega la probabilità di superamento $P(x)$ al tempo di ritorno T , $P(K) = 1 - 1/T$, invertendo la (2.5) e fissato un valore T del tempo di ritorno in anni, si ricava il corrispondente valore del coefficiente di crescita K_T :

$$K_T = \varepsilon + \frac{\alpha}{k} \cdot \left(1 - e^{-k \cdot y_T} \right) \tag{2.6}$$

dove y_T indica la variabile ridotta di Gumbel, pari a $y_T = -\ln \left(\ln \frac{T}{T-1} \right)$.

La Tabella 2.3 riporta i valori dei parametri della (2.6) validi per la zona omogenea cui appartiene il bacino dell'Entella (Zona omogenea C: Appennino nord-occidentale e bacini liguri tirrenici); tali parametri sono stati ricavati attraverso un'analisi al secondo livello su un campione di numerosità N pari a 753, costituito dalle massime portate annue registrate fino al 1993 nei bacini idrografici appartenenti alla zona omogenea C.

Tabella 2.3: Parametri della curva di crescita per i bacini liguri con foce al Tirreno

| α | ε | k |
|----------|---------------|--------|
| 0.377 | 0.643 | -0.276 |

La portata indice, che particolarizza la legge di previsione per il generico sito fluviale di interesse, è assunta pari al valore medio annuo della portata al colmo di piena istantanea



$m(Q)$, e può essere valutata applicando diverse metodologie, in ragione dell'informazione idrometrica disponibile.

Nei casi in cui si debba calcolare la portata di piena in un sito fluviale dotato di stazione idrometrica o prossimo a una stazione idrometrica, la stima della portata indice va senz'altro condotta con il metodo diretto, ossia stimando il valore di Q_{indice} dalla media osservata dei massimi annuali di portata al colmo, con l'avvertenza che, per i siti prossimi a stazioni idrometrografiche, la media osservata va riscalata rispetto all'area del bacino idrografico sotteso.

Nei casi in cui si debba calcolare la portata di piena in un sito fluviale di un bacino privo di stazioni idrometriche, la stima della portata indice va invece condotta con metodi indiretti.

Il rapporto VA.PI. riporta, tra i metodi indiretti:

- il modello geomorfoclimatico, che si basa sulla derivazione in probabilità della portata al colmo a partire dalle caratteristiche stocastiche del campo di pioggia e dalle caratteristiche fisiche del bacino esaminato;
- i metodi di simulazione idrologica, che prevedono la costruzione di modelli idrologici di piena tarati su eventi reali e in grado di descrivere i fenomeni di trasformazione afflussi-deflussi;
- le formule empiriche che sintetizzano le relazioni tra Q_{indice} e le caratteristiche fisiche dei corsi d'acqua tramite formule che, in linea generale, contemplano, quali variabili esplicative, indici di piovosità, di composizione geolitologica o geopedologica, di copertura vegetale, di geomorfologia fluviale e di carico antropico.

Per i bacini dell'Italia Nord-Occidentale sono state tarate diverse formule empiriche con il metodo della regressione statistica, espresse nella forma (2.7) e di cui la Tabella 2.4 riassume i parametri:

$$Q_{indice} = c_0 \cdot S^{c_1} \cdot a^{c_2} \cdot H_{med}^{c_3} \cdot \frac{S^{c_4}}{L} \quad (2.7)$$

dove le grandezze hanno il significato di seguito riportato:

- S superficie del bacino [km²];
- a coefficiente pluviale orario [mm/oraⁿ];
- H_{med} quota media del bacino sotteso [m slm];
- S/L fattore di forma del bacino.

Tabella 2.4: Parametri della formula empirica per la stima della portata indice

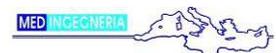
A.T.I.:



STUDIO GALLI
INGEGNERIA



projenia
ENGINEERING & CONSULTING SERVICES





| | c_0 | c_1 | c_2 | c_3 | c_4 | R^2 |
|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Caso 1 | 5.20 | 0.750 | | | | 0.63 |
| Caso 2 | 2.62 | 0.807 | | 0.626 | | 0.65 |
| Caso 3 | 2.51 | 0.874 | | 0.717 | 0.265 | 0.71 |
| Caso 4 | 0.21 | 0.897 | 0.678 | 0.686 | 0.285 | 0.78 |

La Tabella 2.5 riporta i valori di portata ricavati per l’Entella a Panesi con il metodo VA.PI. assumendo per la portata indice il valore della media locale pubblicato nell’articolo “*Un modello statistico per la stima indiretta delle portate di piena dei corsi d’acqua italiani*” (Majone, Pessarelli, Tomirotti, 1999). La Tabella 2.6 e la Tabella 2.7 derivano invece dall’applicazione del metodo VA.PI. in cui la portata indice è stata stimata rispettivamente mediante formule empiriche che legano tale grandezza alla superficie del bacino (formula (2.7) associata ai parametri “caso 1” di Tabella 2.4: è stata utilizzata solo questa formulazione poiché per le sezioni di interesse l’unica grandezza geomorfologica nota è la superficie) e secondo la formula (2.8) ricavata nell’ambito della definizione del modello di regionalizzazione MG (vedi Paragrafo 2.1.6).

Tabella 2.5: Portate al colmo [mc/s] ricavate col metodo VA.PI. (determinazione della Q_{indice} con metodi diretti)

| Corso d’acqua | Q_{10} | Q_{20} | Q_{30} | Q_{50} | Q_{100} | Q_{200} | Q_{500} |
|------------------|----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|
| Entella a Panesi | 1090.34 | 1425.21 | 1650.24 | 1970.23 | 2481.06 | 3097.96 | 4115.97 |

Tabella 2.6: Portate al colmo [mc/s] ricavate col metodo VA.PI. (determinazione della Q_{indice} con metodi indiretti – formula empirica)

| Corso d’acqua | Q_{10} | Q_{20} | Q_{30} | Q_{50} | Q_{100} | Q_{200} | Q_{500} |
|----------------------------------|----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|
| Entella valle confl. Graveglia | 786.32 | 1027.82 | 1190.10 | 1420.87 | 1789.26 | 2234.15 | 2968.31 |
| Entella a Panesi | 788.27 | 1030.37 | 1193.05 | 1424.40 | 1793.70 | 2239.69 | 2975.67 |
| Entella al Ponte della Maddalena | 797.81 | 1042.85 | 1207.50 | 1441.65 | 1815.42 | 2266.82 | 3011.71 |
| Entella alla Foce | 799.77 | 1045.40 | 1210.46 | 1445.18 | 1819.87 | 2272.37 | 3019.10 |

Tabella 2.7: Portate al colmo [mc/s] ricavate col metodo VA.PI. (determinazione della Q_{indice} con metodi indiretti – formula MG)

| Corso d’acqua | Q_{10} | Q_{20} | Q_{30} | Q_{50} | Q_{100} | Q_{200} | Q_{500} |
|----------------------------------|----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|
| Entella valle confl. Graveglia | 931.40 | 1217.46 | 1409.68 | 1683.03 | 2119.39 | 2646.36 | 3515.98 |
| Entella a Panesi | 933.58 | 1220.31 | 1412.99 | 1686.98 | 2124.36 | 2652.58 | 3524.23 |
| Entella al Ponte della Maddalena | 944.28 | 1234.30 | 1429.19 | 1706.32 | 2148.71 | 2682.98 | 3564.63 |
| Entella alla Foce | 946.47 | 1237.17 | 1432.51 | 1710.28 | 2153.70 | 2689.21 | 3572.90 |

A.T.I.:



STUDIO GALLI
INGEGNERIA





2.1.4 Piano di Bacino stralcio sul rischio idrogeologico – Ambito 16 (2007)

Il Piano di Bacino Stralcio del Fiume Entella (ambito regionale di bacino 16), approvato con D.C.P. n° 3 del 29/01/2003, e modificato con DGP n° 476 del 19/12/2006 si basa sulla documentazione prodotta nell'ambito degli "Studi Propedeutici al Piano di Bacino Stralcio del T. Sturla e del F. Entella - Rev. 0 del Dicembre 1999" relativi alle caratteristiche del territorio e alle problematiche del bacino, affidati dalla Provincia di Genova al gruppo interdisciplinare di professionisti facenti capo alla Società D'Appolonia.

La Relazione generale del Piano di Bacino riporta sia le metodologie applicate per la determinazione del regime delle precipitazioni intense nel territorio di interesse, sintetizzato, come noto, nelle cosiddette Linee Segnalatrici di Possibilità Pluviometrica (LSPP), sia le metodologie impiegate per la valutazione del rischio idrologico (stima della portata di piena per assegnato tempo di ritorno).

In particolare, la stima dell'altezza di pioggia viene effettuata attraverso le usuali elaborazioni statistiche sui massimi annuali di precipitazione in assegnata durata registrati alle stazioni di misura interne o prossime al bacino di interesse, applicando sia il modello scala-invariante che il modello lognormale dissipativo.

Il rischio idrologico nel bacino dello Sturla-Entella è stato valutato applicando il *modello probabilistico geomorfoclimatico*. Con questo procedimento, i momenti del secondo ordine (media μ e varianza σ^2) della variabile portata al colmo di piena vengono ricavati a partire dalle proprietà statistiche della precipitazione e dalle caratteristiche del bacino sotteso dalla sezione in esame; note, quindi, le statistiche della portata di piena Q_p è sufficiente specificare la forma della funzione di probabilità dei massimi annuali delle portate al colmo per ottenere la relazione funzionale tra Q_p e il tempo di ritorno corrispondente ad assegnati livelli di probabilità di superamento. Nel caso del bacino dello Sturla-Entella la legge del massimo annuale dei colmi di piena corrisponde ad una distribuzione del valore estremo del secondo tipo (EV2), altrimenti nota come distribuzione di Frèchet, mentre la taratura del modello è stata effettuata sulla base della serie storia di portate al colmo misurate nella stazione di Vignolo sul Torrente Graveglia.

I risultati ottenuti dal modello geomorfoclimatico sono stati successivamente confrontati con la curva di crescita regionale di tipo GEV i cui parametri derivano dalla regionalizzazione delle piene nella Liguria tirrenica.

La curva regionale GEV, ottenuta utilizzando quale portata indice la media dei massimi annuali delle portate al colmo osservate, mostra, infatti, un andamento assai simile a quello del modello EV2 geomorfoclimatico, risultando in generale di poco riscalata verso valori più elevati a parità di frequenza.

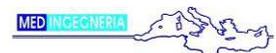
A.T.I.:



STUDIO GALLI
INGEGNERIA



projenia
ENGINEERING & CONSULTING SERVICES





Il modello probabilistico geomorfoclimatico, quindi, permette di ricavare una stima della portata al colmo di piena per assegnato tempo di ritorno in qualunque sezione della rete idrografica, tenendo conto dei caratteri geomorfoclimatici propri del bacino sotteso dalla sezione stessa.

La Tabella 2.8 riporta i risultati ottenuti nell’ambito del Piano di Bacino attraverso l’applicazione del metodo sopra descritto.

Tabella 2.8: Valori di portata al colmo [mc/s] del Piano di Bacino

| ID. | Corso d’acqua | S | Q ₅₀ | Q ₁₀₀ | Q ₂₀₀ | Q ₅₀₀ |
|-----|-------------------|-------|-----------------|------------------|------------------|------------------|
| | | [kmq] | [mc/s] | [mc/s] | [mc/s] | [mc/s] |
| EE1 | Entella alla foce | 371.1 | 1559 | 2067 | 2739 | 3971 |
| EE3 | Entella a Panesi | 364.0 | 1535 | 2036 | 2698 | 3911 |

2.1.5 Progetto preliminare degli interventi di adeguamento idraulico del tratto terminale del torrente Entella (2004)

Nell’ambito del “Progetto preliminare degli interventi di adeguamento idraulico del tratto terminale del Torrente Entella nei comuni di Carasco, Cogorno, Chiavari e Lavagna”, affidato dalla Provincia di Genova, Area 06 – Difesa del Suolo, Opere Ambientali e Piani di Bacino al Raggruppamento Temporaneo di Imprese ENEL HYDRO S.p.A., S.T.I. S.r.l., MED Ingegneria S.r.l., è stato condotto uno studio idrologico-idraulico di dettaglio finalizzato alla definizione delle portate (e degli idrogrammi) di progetto.

Le analisi idrologiche contenute nello studio sopra citato riprendono in gran parte le indicazioni contenute nel Piano Stralcio di Bacino per il Rischio Idrogeologico (Ambito 16 Sturla–Entella).

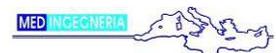
Il calcolo degli idrogrammi di progetto associati ad un determinato tempo di ritorno è stato effettuato ricorrendo al modello di trasformazione delle piene a parametri concentrati HEC–HMS della US Army Corps of Engineers.

Il procedimento adottato consiste nel valutare le sollecitazioni idrologiche per assegnati periodi di ritorno e nel determinare i corrispondenti deflussi mediante le classiche metodologie di trasformazione afflussi-deflussi presenti in letteratura e fornite dal modello.

Lo studio adotta, in linea di massima, tutta l’informazione di carattere geomorfoclimatica che risulta dal modello probabilistico geomorfoclimatico indicato dal Piano di Bacino.

In sintesi, la procedura per il calcolo degli idrogrammi di piena si può riassumere schematicamente nei seguenti punti:

A.T.I.:





1. schematizzazione del bacino idrografico in macrobacini;
2. calcolo nel baricentro di ciascun macrobacino, considerato come teorico centro di scroscio, degli ietogrammi di tipo Chicago;
3. depurazione della pioggia attraverso il metodo del Curve Number proposto dal Soil Conservation Service del Dipartimento dell'Agricoltura degli Stati Uniti, assumendo un CN pari a quello riportato dallo studio geomorfoclimatico adottato nel Piano Stralcio di Bacino per il Rischio Idrogeologico;
4. modello di risposta della rete idrografica per ciascun macrobacino attraverso il metodo S.C.S.;
5. modello di propagazione tipo Muskingum a parametri non lineari per la traslazione lungo le aste dei fiumi Sturla, Lavagna ed Entella;
6. individuazione della durata dell'evento di piena in funzione di eventi pregressi registrati dal Servizio Mareografico e Idrografico Italiano;
7. determinazione della durata critica dell'evento idrometeorico e dei relativi idrogrammi di piena associati ad un determinato tempo di ritorno.

Le portate di progetto ricavate per l'Entella a Panesi nel progetto preliminare del 2003 e riportate in Tabella 2.9 confermano i risultati ottenuti nell'ambito del Piano di Bacino.

Tabella 2.9: Portate [mc/s] ricavate nell'ambito del progetto preliminare del 2004

| Sezione | T = 30 anni | T = 50 anni | T = 100 anni | T = 200 anni |
|------------------|-------------|-------------|--------------|--------------|
| Entella a Panesi | 1300 | 1500 | 2100 | 2700 |

2.1.6 Pubblicazioni: "L'Acqua", rivista dell'Associazione Idrotecnica Italiana

L'articolo "Un modello statistico per la stima indiretta delle portate di piena dei corsi d'acqua italiani" (Majone, Pessarelli, Tomirotti, 1999), pubblicato sulla rivista dell'Associazione Idrotecnica Italiana, *L'Acqua*, riporta i valori di portata al colmo calcolati lungo alcuni corsi d'acqua italiani nell'ambito delle elaborazioni idrologiche condotte per la definizione del modello MG.

In particolare, in corrispondenza di tre valori del tempo di ritorno (T=100, 200 e 500 anni) vengono riportati i valori di portata al colmo di piena calcolati con le seguenti metodologie:

1. stima locale a partire dall'elaborazione delle serie storiche attraverso la distribuzione di probabilità di Gumbel, calcolando i parametri con il metodo dei momenti;
2. stima locale a partire dall'elaborazione delle serie storiche attraverso la distribuzione di probabilità di GEV, calcolando i parametri con il metodo dei momenti pesati in probabilità;

A.T.I.:



STUDIO GALLI
INGEGNERIA



projenia
ENGINEERING & CONSULTING SERVICES





3. modello MG e MG semplificato (MGs) in cui i parametri $\mu(Q)$ e $\sigma(Q)$ derivano dalle serie storiche disponibili;
 4. modello MG e MG semplificato (MGs) in cui i parametri $\mu(Q)$ e $\sigma(Q)$ derivano sono stati calcolati sulla base delle formule multiregressive presentate nell'articolo.
- La Tabella 2.10 riporta i valori di portata al colmo per la sezione di Entella a Panesi, ricavati dall'articolo citato con le diverse metodologie esposte:

Tabella 2.10: Valori di portata [mc/s] riportati dall'articolo pubblicato sul L'Acqua, 1999

| T [anni] | Gumbel | GEV | MG | MGs | MG | MGs |
|----------|--------|------|---------------------------|------|------------------------------|------|
| | | | parametri da stima locale | | parametri da stima indiretta | |
| 100 | 1628 | 1810 | 1746 | 1924 | 1561 | 1737 |
| 200 | 1805 | 2122 | 1902 | 2065 | 1707 | 1864 |
| 500 | 2040 | 2592 | 2101 | 2252 | 1893 | 2032 |

Ulteriori studi, condotti a partire dalle serie storiche delle portate al colmo massime annue registrate in oltre 7000 stazioni idrometrografiche appartenenti ad aree geografiche di differenti continenti, hanno condotto ad una nuova e più aggiornata formulazione del modello MG, pubblicata nell'articolo "A Trans-national regional frequency analysis of peak flood flows, Majone et al., L'Acqua 2/2004 e 4/2005, espressa dalla (2.8).

$$\frac{Q}{\mu} = 1 + (0.37 + 0.8 \cdot \ln T) \cdot CV^{1.33} \tag{2.8}$$

Applicando la nuova formulazione aggiornata del modello MG, ma utilizzando per le statistiche $\mu(Q)$ e $\sigma(Q)$ i valori derivanti da stime dirette ed indirette riportati nell'articolo citato del 1999, si ricavano, la sezione di Entella a Panesi, i valori di portata al colmo riportati in Tabella 2.11:

Tabella 2.11: Valori di portata [mc/s] calcolati con MG 2004

| T [anni] | Statistiche da stima locale | Statistiche da stima indiretta |
|----------|-----------------------------|--------------------------------|
| 100 | 1696.6 | 1506.1 |
| 200 | 1846.7 | 1645.4 |
| 500 | 2045.1 | 1829.5 |

2.1.7 Sintesi delle portate dell'Entella ricavate in studi progressi

Di seguito (Tabella 2.12) si riporta una sintesi dei valori di portata ricavati negli studi progressi analizzati per la sezione di Entella a Panesi per i tempi di ritorno di riferimento per la progettazione delle opere di sistemazione e difesa idraulica del territorio (T=100 e 200 anni).

A.T.I.:



STUDIO GALLI
INGEGNERIA





Tabella 2.12: Sintesi dei risultati ottenuti in studi pregressi per la sezione di Entella a Panesi

| Metodologia | Q [mc/s] per T=100 anni | Q [mc/s] per T=200 anni |
|---|-------------------------|-------------------------|
| Curva inviluppo | - | 2739 ¹ |
| Metodo CIMA | 2879 | 3401 |
| Modello VAPI: | | |
| Q _{indice} da stima locale | 2481 | 3098 |
| Q _{indice} da stima indiretta (formule VAPI) | 1794 | 2240 |
| Q _{indice} da stima indiretta (formule MG) | 2124 | 2652 |
| Progetto Preliminare 2004 | 2100 | 2700 |
| Piano di Bacino | 2036 | 2698 |
| Pubblicazione “L’Acqua”: | | |
| Gumbel | 1628 | 1805 |
| GEV | 1810 | 2122 |
| MG 1999, parametri da stima locale | 1746 | 1902 |
| MG 1999, parametri da stima indiretta | 1561 | 1707 |
| MG 2004, parametri da stima locale | 1697 | 1847 |
| MG 2004, parametri da stima indiretta | 1506 | 1645 |

2.2 Rivi minori

Di seguito vengono sinteticamente descritti gli studi pregressi esistenti relativi all'idrologia di piena del reticolo minore, confrontando i risultati ottenuti in detti studi con i valori di portata al colmo calcolati nel presente lavoro.

2.2.1 Piano di Bacino stralcio sul rischio idrogeologico – Ambito 16 (2003)

La Relazione generale del Piano di Bacino Stralcio del Fiume Entella (ambito regionale di bacino 16), non fornisce alcuna indicazione metodologica in merito alla stima delle portate al colmo di piena del reticolo idrografico minore.

L'unica indicazione procedurale è contenuta nell'Allegato 2 alle Norme Tecniche di Attuazione del Piano secondo le quali, laddove il Piano non indichi il valore della portata duecentennale, “per i corsi d'acqua minori, salvo diversa indicazione prevista nel Piano, si assume una portata massima ottenuta utilizzando il contributo unitario ricavabile dalla tabella seguente (Tabella 2.13)”:

¹ Assegnazione di T=200 anni convenzionale



Tabella 2.13: Coefficiente udometrico fornito dal Piano di Bacino

| Area | Contributo unitario |
|--------------|---------------------|
| fino a 2 kmq | 40 mc/s kmq |
| da 2 a 3 kmq | 36 mc/s kmq |
| da 3 a 4 kmq | 35 mc/s kmq |
| da 4 a 5 kmq | 34 mc/s kmq |
| da 5 a 6 kmq | 32 mc/s kmq |
| da 6 a 7 kmq | 31 mc/s kmq |
| da 7 a 8 kmq | 30 mc/s kmq |

Il contributo unitario di Tabella 2.13 è ricavato dalla curva inviluppo dell’Ing. Cati (vedi paragrafo 2.1.1).

Con riferimento alle sezioni di chiusura dei bacini idrografici extraurbani e alle relative caratteristiche geomorfologiche indicate al capitolo 4, moltiplicando il coefficiente di Tabella 2.13 per la superficie del bacino si ricavano le portate di progetto duecentennali riportate in Tabella 2.14:

Tabella 2.14: Portate duecentennali calcolate con la metodologia del Piano di Bacino

| Codice | Corso d'acqua | S [kmq] | Q ₂₀₀ [mc/s] |
|--------|---|---------|-------------------------|
| SMi | Rio in località S. Michele | 0.43 | 17.39 |
| RiB | Rio in località Ri Basso | 0.45 | 18.18 |
| Ram | Rio Ramella | 0.37 | 14.99 |
| Mog | Rio in località Moggia | 0.13 | 5.32 |
| RZ1 | Rio Rezza - valle confluenza con il rio Beichetta | 1.43 | 57.28 |
| RZ2 | Rio Rezza - sbocco in Entella | 1.61 | 64.40 |

2.2.2 Progetto preliminare degli interventi di adeguamento idraulico del tratto terminale del torrente Entella (2004)

Il “Progetto preliminare degli interventi di adeguamento idraulico del tratto terminale del Torrente Entella nei comuni di Carasco, Cogorno, Chiavari e Lavagna”, citato al paragrafo precedente riporta le analisi idrologiche condotte su alcuni corsi d’acqua appartenenti al reticolo minore.

La portata al colmo è stata calcolata applicando la formula razionale nella quale il tempo di corrivazione t_c viene calcolato mediante la formula (2.9), mentre la precipitazione lorda viene calcolata mediante il metodo lognormale dissipativo, con riferimento ai dati pluviometrici della stazione di Chiavari.

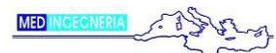
A.T.I.:



STUDIO GALLI
INGEGNERIA



projenia
ENGINEERING & CONSULTING SERVICES





$$t_c = 0.914 \cdot L^{1.5} \cdot \Delta H^{-0.38} \quad (2.9)$$

La tabella seguente riporta i risultati ottenuti nell’ambito di tale progetto per un tempo di ritorno pari a 200 anni:

Tabella 2.15: Portate duecentennali calcolate nel progetto preliminare del 2004

| Corso d'acqua | S [kmq] | Q ₂₀₀ [mc/s] |
|-------------------------------|---------|-------------------------|
| Rio Ramella | 0.34 | 12.65 |
| Rio in località Moggia | 0.13 | 7.47 |
| Rio in località Ri Basso | 0.48 | 22.83 |
| Rio Rezza - sbocco in Entella | 1.52 | 41.15 |

2.2.3 Lavori di ampliamento del polo ospedaliero di Lavagna (2006)

Nell’ambito dei “Lavori di ampliamento del polo ospedaliero ubicato in via Don Bobbio 25 - Lavagna”, commissionato dall’Azienda Sanitaria Locale n° 4 Chiavarese (Regione Liguria) nel 2006, l’Ing. Pietro Misurale ha condotto uno studio idrologico-idraulico finalizzato all’analisi del rischio idraulico cui erano soggette le aree di interesse connesso alla presenza del Rio Rezza.

In particolare, lo studio idraulico ha riguardato il tratto di Rio Rezza in corrispondenza dell’area dell’ospedale, compreso fra la passerella pedonale che collega il parcheggio pubblico, ubicato in sponda destra, al Polo Ospedaliero e una sezione posta circa 115 m a monte della confluenza con il Rio Beichetta, per una lunghezza complessiva di 235 m circa. Al fine di valutare le caratteristiche del deflusso delle portate di massima piena e verificare l’inondabilità o meno delle aree oggetto di intervento è stata effettuata la verifica idraulica di dettaglio attraverso il calcolo del profilo di rigurgito in moto permanente gradualmente variato del tratto di Rio Rezza in studio. Il calcolo è stato effettuato con i valori di portata al colmo duecentennale risultanti dal Piano di Bacino. La Tabella 2.16 riporta i valori di portata di progetto utilizzati per lo studio idraulico in esame calcolati con la metodologia di Piano esposta al paragrafo precedente:

Tabella 2.16: Valori di portata desunti dallo studio idraulico allegato al progetto di ampliamento del polo ospedaliero

| Corso d'acqua | S [kmq] | Q ₂₀₀ [mc/s] |
|---|---------|-------------------------|
| Rio Rezza a monte della confluenza con il Rio Beichetta | 1.32 | 53 |
| Rio Rezza a valle della confluenza con il Rio Beichetta | 1.50 | 60 |
| Rio Beichetta a monte della confluenza con il Rio Rezza | 0.15 | 6 |

A.T.I.:



STUDIO GALLI
INGEGNERIA



projenia
ENGINEERING & CONSULTING SERVICES





3. PORTATE DI PROGETTO FIUME ENTELELLA

Considerata l'elevata variabilità delle portate ricavate con i diversi metodi riportati al precedente capitolo 2, si è ritenuto opportuno considerare come portata di dimensionamento delle opere in progetto, quella fornita dal Piano di Bacino avendo questa ad oggi carattere di ufficialità.

Nella tabella seguente sono quindi riepilogate le portate di progetto dell'Entella per i diversi tempi di ritorno.

Tabella 3.1: Valori di portata al colmo [mc/s] del Piano di Bacino prese a riferimento per la progettazione delle opere

| ID. | Corso d'acqua | S | Q ₅₀ | Q ₁₀₀ | Q ₂₀₀ | Q ₅₀₀ |
|-----|-------------------|-------|-----------------|------------------|------------------|------------------|
| | | [kmq] | [mc/s] | [mc/s] | [mc/s] | [mc/s] |
| EE1 | Entella alla foce | 371.1 | 1559 | 2067 | 2739 | 3971 |
| EE3 | Entella a Panesi | 364.0 | 1535 | 2036 | 2698 | 3911 |

A.T.I.:





4. ANALISI IDROLOGICA DEL RETICOLO MINORE

Nell'ambito della *Progettazione e attività di direzione lavori degli interventi di mitigazione del rischio idraulico del bacino del fiume Entella relativamente al tratto terminale*, la Provincia di Genova ha commissionato, contestualmente allo studio idrologico del Fiume Entella, anche l'analisi dell'idrologia di piena dei rivi minori aventi sbocco in Entella nel medesimo tratto.

Nei paragrafi seguenti verranno riportati i risultati dell'analisi conoscitiva e dello studio idrologico condotti e verranno descritte le metodologie impiegate per la definizione delle portate di progetto.

Si vuole sottolineare che, per quanto riguarda i tempi di ritorno di interesse, nelle sezioni di chiusura che sottendono bacini naturali, la stima della portata di piena è stata effettuata per tutti i tempi di ritorno di interesse nella pratica idrologica (T=2, 5, 10, 50, 100, 200 e 500 anni), mentre nel caso dei sottobacini urbani la determinazione delle portate di progetto è stata effettuata con riferimento ai tempi di ritorno per i quali vengono dimensionate le reti fognarie (T=2, 5, 10 anni).

4.1 Descrizione del reticolo minore

In questa fase del lavoro sono stati, dapprima, individuati i corsi d'acqua di interesse appartenenti al reticolo idrografico minore e, successivamente, sono stati tracciati i relativi bacini idrografici chiusi in prossimità della sezione di confluenza del corso d'acqua di interesse in Entella (solo per il Rio Rezza, oltre alla sezione di sbocco in Entella, è stata individuata una seconda sezione di chiusura localizzata immediatamente a valle della confluenza tra il Rio Rezza e il Rio Beichetta), utilizzando come cartografia di base la Carta Tecnica Regionale in scala 1:10.000.

Sono stati inoltre delimitati alcuni sottobacini a contributo prevalentemente urbano all'interno dei quali le acque meteoriche raccolte vengono recapitate in Entella o a mare solo attraverso le reti fognarie meteoriche. I limiti dei sottobacini urbani sono stati tracciati quindi, oltre che con riferimento alla cartografia di base (rilievo aerofotogrammetrico e CTR in scala 1:10.000), soprattutto sulla base delle informazioni relative alla rete fognaria bianca e mista di Chiavari e Lavagna (tracciato dei collettori, interconnessione tra più tratti, funzionamento di scarichi e sfioratori, etc).

La Tabella 4.1 riporta per ciascuna sezione di chiusura individuata il codice della sezione stessa, il corso d'acqua sul quale è localizzata e una sintetica descrizione; per l'ubicazione delle sezioni di chiusura in cui è stato effettuato il calcolo della portata e per la delimitazione dei bacini extraurbani e dei sottobacini urbani si faccia riferimento alla tavola CO01 Corografia generale.

A.T.I.:



STUDIO GALLI
INGEGNERIA



projenia
ENGINEERING & CONSULTING SERVICES

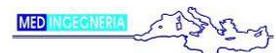




Tabella 4.1: Sezioni di chiusura di interesse

| Codice | Corso d'acqua | Descrizione |
|--------|--|--|
| SMi | Rio in località S. Michele | sezione di chiusura della sola porzione extraurbana del bacino del Rio in località S. Michele, posta in corrispondenza dell'inizio del tratto tombinato del rio |
| RiB | Rio in località Ri Basso | sezione di chiusura della sola porzione extraurbana del bacino del Rio in località Ri Basso, posta in corrispondenza dell'inizio del tratto tombinato del rio |
| Ram | Rio Ramella | sezione di chiusura posta immediatamente a monte della confluenza del rio in Entella |
| Mog | Rio in località La Moggia | sezione di chiusura della sola porzione extraurbana del bacino del Rio in località La Moggia |
| RZ1 | Rio Rezza | sezione di chiusura posta immediatamente a valle della confluenza tra il Rio Rezza e il Rio Beichetta |
| RZ2 | Rio Rezza | sezione di chiusura posta in corrispondenza di Via dei Fieschi. |
| Urb1 | Sottobacino urbano (fognatura di Chiavari) | sottobacino urbano afferente al tratto tombinato del Rio in località S. Michele; ad oggi si immette nel collettore fognario di viale Kasman |
| Urb2 | Sottobacino urbano (fognatura di Chiavari) | sottobacino urbano compreso tra gli spartiacque dei bacini del Rio in località S. Michele e del Rio in località Ri Basso; ad oggi si immette nel collettore fognario di viale Kasman |
| Urb3 | Sottobacino urbano (fognatura di Chiavari) | sottobacino urbano afferente al tratto tombinato del Rio in località Ri Basso; ad oggi si immette nel collettore fognario di viale Kasman |
| Urb4 | Sottobacino urbano (fognatura di Chiavari) | sottobacino urbano compreso tra lo spartiacque del bacini del Rio in località Ri Basso e la linea di costa; ad oggi lo scarico è direttamente in Entella |
| Urb5 | Sottobacino urbano (fognatura di Lavagna) | sottobacino urbano drenante la porzione più ampia del territorio indagato in comune di Lavagna; ad oggi si immette in Entella |
| Urb6 | Sottobacino urbano (fognatura di Lavagna) | sottobacino urbano afferente al collettore di Corso Genova; ad oggi si immette in Entella |
| Urb7 | Sottobacino urbano (fognatura di Lavagna) | sottobacino urbano afferente al collettore di Via Previati; ad oggi si immette in Entella |
| Urb8 | Sottobacino urbano (fognatura di Lavagna) | sottobacino urbano afferente al collettore di Via dei Devoto; ad oggi si immette in Entella |
| Urb9 | Sottobacino urbano (fognatura di Lavagna) | sottobacino urbano compreso tra il Rio Ramella e il ponte della Maddalena |

Per i bacini in studio sono state definite tutte le grandezze geomorfologiche caratteristiche necessarie per le successive fasi della progettazione; in particolare sono stati definiti i seguenti parametri:

- Superficie del bacino S [km²];
- Altezza massima H_{max} [m s.l.m.];
- Altezza minima in corrispondenza della sezione di chiusura H_0 [m s.l.m.];
- Altezza media H_{med} [m s.l.m.];

A.T.I.:



STUDIO GALLI
INGEGNERIA



projenia
ENGINEERING & CONSULTING SERVICES





- Lunghezza dell'asta L [km];
- Tempo di corrvazione t_c [ore];
- coefficiente di deflusso ϕ ;
- Curve number CN .

Per quanto riguarda i parametri morfometrici S , H_{max} , H_0 , H_{med} , L appare superfluo alcun approfondimento metodologico; per quanto riguarda invece il tempo di corrvazione t_c del bacino, esso può essere definito come l'intervallo di tempo dall'inizio della precipitazione oltre al quale tutto il bacino contribuisce al deflusso nella sezione terminale.

Tale grandezza è stata calcolata per tutti i bacini naturali tramite la formula empirica di Giandotti (4.1), valida per bacini montani e collinari, dove le grandezze assumono il significato visto, ad eccezione del parametro L che rappresenta la lunghezza del percorso più lungo del bacino misurata in km; mentre per i sottobacini urbani il tempo di corrvazione è stato calcolato con la formula di Viparelli (4.2) nella quale t_i , rappresenta il tempo di ingresso in rete, assunto pari a 15 minuti, L è la lunghezza dell'asta e v , misurato in m/s, è la velocità media di percorrenza dell'asta, assunta pari a 1.0 m/s.

$$t_c = \frac{4\sqrt{S} + 1,5L}{0,8\sqrt{H_{med} - H_0}} \quad (4.1)$$

$$t_c = \frac{L}{v} + t_i \quad (4.2)$$

Il coefficiente di deflusso ϕ tiene conto in forma implicita di tutti i fattori che intervengono a determinare la relazione che intercorre tra la portata al colmo e l'intensità media di pioggia.

Un indicazione dei valori da attribuire al fattore di trattenuta del terreno è fornita dalla letteratura scientifica come di seguito riportato:

A.T.I.:

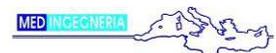




Tabella 4.2: Coefficiente di deflusso raccomandati da American Society of Civil Engineers

| Caratteristiche del bacino | ϕ |
|--------------------------------------|-----------|
| Superfici pavimentate o impermeabili | 0.70-0.95 |
| Suoli sabbiosi a debole pendenza | 0.05-0.10 |
| Suoli sabbiosi a media pendenza | 0.10-0.15 |
| Suoli sabbiosi a elevata pendenza | 0.15-0.20 |
| Suoli argillosi a debole pendenza | 0.13-0.17 |
| Suoli argillosi a media pendenza | 0.18-0.22 |
| Suoli argillosi a elevata pendenza | 0.25-0.35 |

La stima del valore appropriato del coefficiente di deflusso richiede la conoscenza del tipo di suolo e del suo uso, integrata ove possibile da dati e osservazioni sperimentali su eventi di piena nella regione idrologica di interesse.

Nel caso in esame, per i bacini extraurbani, il coefficiente di deflusso è stato calcolato come rapporto tra la precipitazione netta e il corrispondente afflusso meteorico lordo, secondo la metodologia proposta dal Soil Conservation Service (SCS) riportata al paragrafo 4.2.3; per i bacini urbani, visto l'elevato grado di urbanizzazione delle aree drenate attuali, si è assunto un valore di ϕ pari a 0.8.

Nell'ambito della metodologia SCS l'indice *CN* è un numero adimensionale compreso tra 0 e 100 che caratterizza la natura del suolo, il tipo di copertura vegetale e le condizioni di umidità del suolo antecedenti la precipitazione. Per la definizione del valore di *CN* vengono utilizzate le tabelle riportate di seguito, fornite dal SCS, in funzione della natura del suolo, del tipo di copertura vegetale e delle condizioni di umidità del suolo antecedenti all'evento.

Tabella 4.3: Valori di CN in funzione delle diverse tipologie di uso del suolo

| Tipologie di uso del suolo | Tipo di suolo | | | |
|---|---------------|-------|-------|-------|
| | A | B | C | D |
| Suoli coltivati | 62-72 | 71-81 | 78-88 | 81-91 |
| Pascoli | 39-68 | 61-79 | 74-86 | 80-89 |
| Prati | 30 | 58 | 71 | 78 |
| Boschi e foreste con copertura modesta | 45 | 66 | 77 | 83 |
| Boschi e foreste con buona copertura dall'erosione e sottobosco | 25 | 55 | 70 | 77 |
| Aree a parco di fruizione ricreativa: con copertura erbacea superiore al 75% | 39 | 61 | 74 | 80 |
| con copertura erbacea da 5% al 75% | 49 | 69 | 79 | 84 |
| Aree commerciali (impermeabili per l'85%) | 89 | 92 | 94 | 95 |
| Aree industriali (impermeabili per il 72%) | 81 | 88 | 91 | 93 |
| Aree residenziali con percentuale media | | | | |

A.T.I.:



STUDIO GALLI
INGEGNERIA



projenia
ENGINEERING & CONSULTING SERVICES





| Tipologie di uso del suolo | Tipo di suolo | | | |
|--|---------------|----|----|----|
| | A | B | C | D |
| impermeabile: | 77 | 85 | 90 | 92 |
| 65% | 61 | 75 | 83 | 87 |
| 38% | 57 | 72 | 81 | 86 |
| 30% | 54 | 70 | 80 | 85 |
| 25% | 51 | 68 | 79 | 84 |
| 20% | | | | |
| Parcheggi, aree coperte (impermeabili) | 98 | 98 | 98 | 98 |
| Strade | | | | |
| Asfaltate | 98 | 98 | 98 | 98 |
| Inghiaiate | 76 | 85 | 89 | 91 |

Tipo di suolo:
A: elevata infiltrazione, per suoli con strati sabbiosi profondi (diametro 0.002÷0.05 mm);
B: infiltrazione moderata, per suoli con tessitura da moderatamente fine a moderatamente grossolana, quali limi sabbiosi;
C: infiltrazione lenta, per suoli a tessitura fine, quali argille limose, deboli strati di limo sabbioso, suoli con debole contenuto organico;
D: infiltrazione molto lenta, per argille plastiche e compatte.

Dall'esame delle caratteristiche di uso del suolo dei terreni che costituiscono l'area in esame si è ricavato un valore cautelativo di CN da assumere per i bacini extraurbani pari a 90 e per quelli urbani pari a 95.

Le caratteristiche geomorfologiche calcolate per i bacini idrografici in studio sono riportate in Tabella 4.4:

Tabella 4.4: Caratteristiche geomorfologiche dei bacini del reticolo minore

| Codice | S | L | H ₀ | H _{med} | t _c | φ | CN |
|--------|-------|------|----------------|------------------|----------------|------|-------|
| | [kmq] | [km] | [m.s.m.] | [m.s.m.] | [ore] | [-] | [-] |
| SMi | 0.435 | 1.36 | 9.00 | 115.29 | 0.57 | 0.65 | 90.00 |
| RiB | 0.454 | 0.66 | 5.50 | 59.03 | 0.71 | 0.66 | 90.00 |
| Ram | 0.375 | 1.33 | 8.00 | 104.68 | 0.57 | 0.63 | 90.00 |
| Mog | 0.133 | 0.51 | 6.50 | 69.93 | 0.37 | 0.62 | 90.00 |
| RZ1 | 1.432 | 2.23 | 13.30 | 167.17 | 0.91 | 0.65 | 90.00 |
| RZ2 | 1.610 | 2.83 | 5.00 | 147.58 | 1.07 | 0.67 | 90.00 |
| Urb1 | 0.236 | 1.08 | - | - | 0.55 | 0.80 | 95.00 |
| Urb2 | 0.198 | 0.92 | - | - | 0.51 | 0.80 | 95.00 |
| Urb3 | 0.150 | 0.69 | - | - | 0.44 | 0.80 | 95.00 |
| Urb4 | 0.356 | 1.17 | - | - | 0.58 | 0.80 | 95.00 |
| Urb5 | 0.740 | 1.78 | - | - | 0.74 | 0.80 | 95.00 |
| Urb6 | 0.061 | 0.75 | - | - | 0.46 | 0.80 | 95.00 |
| Urb7 | 0.071 | 1.05 | - | - | 0.54 | 0.80 | 95.00 |
| Urb8 | 0.087 | 1.03 | - | - | 0.54 | 0.80 | 95.00 |
| Urb9 | 0.180 | 0.83 | - | - | 0.48 | 0.80 | 95.00 |

A.T.I.:



STUDIO GALLI
INGEGNERIA





4.2 Stima della portata di progetto

La stima delle portate al colmo di piena in assegnato tempo di ritorno è stata effettuata per i corsi d'acqua del reticolo minore attraverso metodologie di stima indiretta basate sull'analisi statistica delle osservazioni pluviometriche relative al bacino idrografico sotteso dalla sezione di interesse e sul successivo impiego di modelli di trasformazione afflussi-deflussi per la definizione delle portate.

L'applicazione di tali modelli necessita quindi della conoscenza del regime delle precipitazioni di forte intensità nel territorio di interesse. Come è noto tale regime si sintetizza nelle cosiddette Linee Segnalatrici di Possibilità Pluviometrica (LSPP).

Nei paragrafi seguenti sono descritte le metodologie impiegate per la stima delle LSPP, i modelli utilizzati per la stima delle portate al colmo e i risultati ottenuti.

4.2.1 Linee segnalatrici di possibilità pluviometrica

Le LSPP, rappresentative del regime delle precipitazioni intense, esprimono il legame esistente tra l'altezza di pioggia h e la sua durata d , per assegnato tempo di ritorno T , attraverso l'espressione (4.3)

$$h = a_T \cdot d^n \quad (4.3)$$

dove a_T ed n sono parametri che vengono stimati a partire dalle elaborazioni di serie storiche dei valori massimi annuali delle altezze di precipitazione di durata assegnata.

Di seguito viene riportata la metodologia statistica utilizzata nel presente lavoro per la definizione delle LSPP puntuali per le stazioni pluviometriche più prossime all'area di interesse, in particolare si sono considerate le stazioni di Panesi e Chiavari di cui la Tabella 4.5 riassume alcune caratteristiche principali.

Tabella 4.5: Caratteristiche delle stazioni pluviometriche considerate

| Stazione | Bacino | Tipo strumento | Quota [m s.l.m.] | Anno inizio osservazioni | Numerosità del campione |
|----------|------------------------|--------------------------|------------------|--------------------------|-------------------------|
| Panesi | Entella | pluviometro registratore | 25.0 | 1933 | 47 |
| Chiavari | fra Bisagno ed Entella | pluviometro registratore | 5.0 | 1884 | 47 |

La metodologia impiegata utilizza come informazione idrologica di base i massimi annuali delle precipitazioni di diversa durata, pertanto il primo passo per la determinazione delle LSPP è stato il reperimento delle serie storiche delle massime



altezze annue di pioggia di assegnata durata ($d=1, 3, 6, 12, 24$ ore) pubblicate sugli Annali Idrologici per le stazioni pluviometriche di Panesi e Chiavari.

Le serie dei massimi annuali in assegnata durata così ottenute si possono considerare come campioni di dimensione N (con N pari al numero di anni di osservazione) di una variabile casuale e pertanto, attraverso le tecniche delle inferenze statistiche, si può ricercare la funzione di probabilità più adatta ad interpretarli e stimarne i parametri. Per il caso in esame è stata utilizzata la distribuzione di probabilità di Gumbel che interpreta in maniera soddisfacente le osservazioni campionarie.

Per il calcolo dei coefficienti a_T e n si utilizza quindi la seguente procedura:

1. Calcolo della media (μ_d) e dello scarto quadratico medio (σ_d) della serie storica:

Per ogni durata di pioggia vengono calcolate le statistiche delle serie storiche; tali grandezze risultano necessarie per la stima dei due parametri della distribuzione.

2. Calcolo dei parametri caratteristici della distribuzione di Gumbel:

Tra i parametri che definiscono la distribuzione di probabilità di Gumbel e i parametri statistici relativi alla serie storica (μ_d e σ_d), sussistono le seguenti relazioni:

$$\alpha_d = \frac{1.283}{\sigma_d} \quad (4.4)$$

$$u_d = \mu_d - 0.45 \cdot \sigma_d$$

3. Calcolo dell'altezza di pioggia $h_d(T)$:

Nel caso in cui si ipotizzi che la distribuzione di probabilità delle altezze di pioggia h sia, per tutte le durate, quella di Gumbel, come accade nel caso in esame, è possibile scrivere una relazione diretta che esprima h in funzione della durata e del tempo di ritorno. Secondo tale legge l'altezza di precipitazione $h_d(T)$ di durata d è legata al tempo di ritorno T dalla relazione:

$$h_d(T) = u_d - \frac{1}{\alpha_d} \cdot \ln \left[\ln \left(\frac{T}{T-1} \right) \right] \quad (4.5)$$

4. Determinazione della curva di possibilità climatica:

Come si è detto in precedenza, la curva di possibilità climatica lega l'altezza h , la durata d della pioggia e il tempo di ritorno T tramite l'espressione:

$$h_d(T) = a_T \cdot d^n \quad (4.6)$$

o equivalentemente:



$$\log h_d(T) = \log a_T + n \cdot \log d \quad (4.7)$$

con $h_d(T)$ altezza di precipitazione espressa in mm, corrispondente alla durata d (ore) e al tempo di ritorno T (anni).

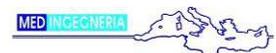
Considerando quindi, per ogni tempo di ritorno, le 5 coppie di valori $[d, h_d]$ per $d = 1, 3, 6, 12, 24$ ore si calcolano le corrispondenti coppie $[\log d, \log h_d]$ e con il metodo dei minimi quadrati si individua la retta interpolante i punti sperimentali; tale retta ha per coefficiente angolare il parametro n e ordinata all'origine $\log a$, da cui si ricava il valore del parametro a .

La Tabella 4.6 riporta i valori dei parametri delle LSPP calcolati con la metodologia esposta per le stazioni pluviometriche di Panesi e Chiavari per i tempi di ritorno di interesse della pratica idrologica:

Tabella 4.6: Valori dei parametri delle LSPP per le stazioni di interesse

| Stazione | Valori di a [mm] per i seguenti tempi di ritorno T [anni] | | | | | | | n |
|----------|---|-------|-------|--------|--------|--------|--------|-------|
| | 2 | 5 | 10 | 50 | 100 | 200 | 500 | |
| Panesi | 35.37 | 49.69 | 59.17 | 80.03 | 88.85 | 97.64 | 109.24 | 0.318 |
| Chiavari | 42.24 | 61.23 | 73.80 | 101.47 | 113.17 | 124.83 | 140.20 | 0.263 |

A.T.I.:



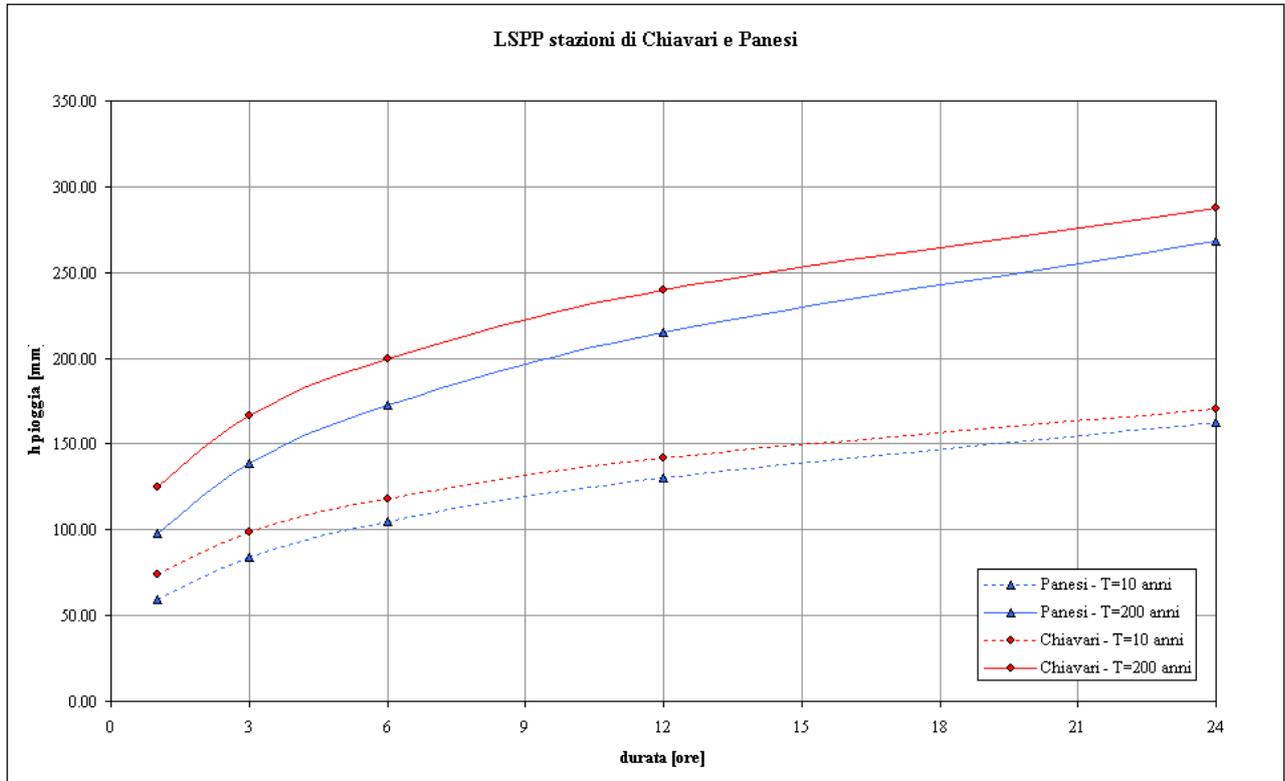


Figura 4.1: LSPP alle stazioni di Panesi e Chiavari per T=10 e 200 anni

Le misure di precipitazione utilizzate per la determinazione delle LSPP si riferiscono al punto in cui è situato lo strumento, pertanto anche i valori di a ed n ricavati nei paragrafi precedenti hanno significato puntuale.

La pioggia di progetto, da introdurre nei modelli di trasformazione afflussi-deflussi per il calcolo delle portate, deve essere per contro riferibile all'intero bacino idrografico.

Ciò si ottiene individuando le aree di influenza delle singole stazioni pluviometriche, assumendo che ogni stazione pluviometrica sia rappresentativa del regime pluviometrico di una porzione di superficie circostante la stazione, che è sempre la stessa, quale che sia l'intervallo di tempo che si considera, e che non sempre ricade per intero nel bacino idrografico considerato.

Queste aree di influenza vengono in genere calcolate con il metodo dei *poligoni di Thiessen* o topoi.

A.T.I.:



STUDIO GALLI
INGEGNERIA



projenia
ENGINEERING & CONSULTING SERVICES





Il metodo consiste nell'unire con segmenti tutte le stazioni tra loro contigue situate all'interno del bacino o nelle sue vicinanze, così da ottenere un reticolo a maglie triangolari, e nel tracciare poi le mediane ad ogni lato dei triangoli così individuati; le perpendicolari formano poligoni irregolari di cui le stazioni stanno approssimativamente al centro.

Note le aree di influenza delle diverse stazioni pluviometriche considerate, e noti per ciascuna sezione di chiusura di interesse i pluviometri la cui area di influenza ricade tutta o in parte all'interno del relativo bacino, viene effettuato il calcolo della media pesata dei parametri a ed n delle LSPP.

Detta A_{ij} l'area di influenza dell' i -esima stazione di misura in funzione del bacino idrografico chiuso alla j -esima sezione, il suo peso p_{ij} viene calcolato mediante la formula:

$$p_{ij} = \frac{A_{ij}}{\sum_{i=1}^n A_{ij}} \quad (4.8)$$

I nuovi valori dei parametri a ed n pesati delle LSPP vengono calcolati, per le diverse sezioni di chiusura, mediante la formula:

$$\begin{aligned} n &= \sum_{i=1}^n n_i \cdot p_{ij} \\ a &= \sum_{i=1}^n a_i \cdot p_{ij} \end{aligned} \quad (4.9)$$

dove il pedice i indica l' i -esima stazione di misura di cui le grandezze n_i (a_i) e p_i rappresentano rispettivamente i parametri delle LSPP e il peso.

Nel caso in esame, per tutti i bacini considerati si è fatto riferimento alle LSPP calcolata alla stazione pluviografica di Chiavari, ad eccezione del Rio Rezza che risulta influenzato da entrambe le stazioni considerate; la

Tabella 4.7 riporta i valori dei parametri delle LSPP validi per i singoli sottobacini considerati:

A.T.I.:



STUDIO GALLI
INGEGNERIA



projenia
ENGINEERING & CONSULTING SERVICES





Tabella 4.7: Valori dei parametri delle LSPP per le sezioni di chiusura di interesse

| Codice sezione | Valori di a [mm] per i seguenti tempi di ritorno T [anni] | | | | | | | n |
|----------------|---|-------|-------|--------|--------|--------|--------|-------|
| | 2 | 5 | 10 | 50 | 100 | 200 | 500 | |
| SMi | 42.24 | 61.23 | 73.80 | 101.47 | 113.17 | 124.83 | 140.20 | 0.263 |
| RiB | 42.24 | 61.23 | 73.80 | 101.47 | 113.17 | 124.83 | 140.20 | 0.263 |
| Ram | 42.24 | 61.23 | 73.80 | 101.47 | 113.17 | 124.83 | 140.20 | 0.263 |
| Mog | 42.24 | 61.23 | 73.80 | 101.47 | 113.17 | 124.83 | 140.20 | 0.263 |
| RZ1 | 38.87 | 55.57 | 66.62 | 90.96 | 101.24 | 111.49 | 125.01 | 0.290 |
| RZ2 | 39.24 | 56.19 | 67.42 | 92.12 | 102.56 | 112.97 | 126.69 | 0.287 |
| Urb1 | 42.24 | 61.23 | 73.80 | - | - | - | - | 0.263 |
| Urb2 | 42.24 | 61.23 | 73.80 | - | - | - | - | 0.263 |
| Urb3 | 42.24 | 61.23 | 73.80 | - | - | - | - | 0.263 |
| Urb4 | 42.24 | 61.23 | 73.80 | - | - | - | - | 0.263 |
| Urb5 | 42.24 | 61.23 | 73.80 | - | - | - | - | 0.263 |
| Urb6 | 42.24 | 61.23 | 73.80 | - | - | - | - | 0.263 |
| Urb7 | 42.24 | 61.23 | 73.80 | - | - | - | - | 0.263 |
| Urb8 | 42.24 | 61.23 | 73.80 | - | - | - | - | 0.263 |
| Urb9 | 42.24 | 61.23 | 73.80 | - | - | - | - | 0.263 |

4.2.2 Modello cinematico

Tra le diverse metodologie utilizzate per la stima della portata al colmo di piena di assegnato tempo di ritorno T è stata utilizzata la formula razionale:

$$Q(T) = \phi \cdot S \cdot i_c(T) \tag{4.10}$$

dove $Q(T)$, S e $i_c(T)$ indicano rispettivamente la portata al colmo di piena di tempo di ritorno T , l'area del bacino e l'intensità della precipitazione relativa al centro di scroscio di durata pari al tempo τ_c critico del bacino; $\phi = \phi_1 \phi_2 \phi_3$ è un coefficiente minore di 1 che tiene conto delle perdite per infiltrazione (ϕ_1), del ragguaglio delle piogge all'area (ϕ_2) e dell'effetto di laminazione del bacino (ϕ_3).

La formula razionale può essere giustificata concettualmente assumendo uniforme nello spazio e nel tempo l'intensità di precipitazione e schematizzando il fenomeno di trasformazione afflussi–deflussi con un particolare modello cinematico.

I valori di portata al colmo per assegnato tempo di ritorno T ottenuti con il modello cinematico sono riportati in Tabella 4.8:

A.T.I.:



STUDIO GALLI
INGEGNERIA





Tabella 4.8: Valori di portata calcolati con il modello cinematico

| Codice | Portate al colmo Q [mc/s] per i seguenti tempi di ritorno T [anni]: | | | | | | |
|--------|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 2 | 5 | 10 | 50 | 100 | 200 | 500 |
| SMi | 5.02 | 7.28 | 8.78 | 12.07 | 13.46 | 14.85 | 16.68 |
| RiB | 4.53 | 6.56 | 7.91 | 10.88 | 12.13 | 13.38 | 15.03 |
| Ram | 3.92 | 5.63 | 6.77 | 9.26 | 10.31 | 11.36 | 12.75 |
| Mog | 2.01 | 2.91 | 3.50 | 4.82 | 5.37 | 5.93 | 6.66 |
| RZ1 | 10.81 | 15.46 | 18.54 | 25.31 | 28.17 | 31.02 | 34.78 |
| RZ2 | 11.18 | 16.01 | 19.21 | 26.24 | 29.22 | 32.18 | 36.09 |
| Urb1 | 3.45 | 5.00 | 6.02 | - | - | - | - |
| Urb2 | 3.08 | 4.47 | 5.38 | - | - | - | - |
| Urb3 | 2.58 | 3.73 | 4.50 | - | - | - | - |
| Urb4 | 5.02 | 7.28 | 8.77 | - | - | - | - |
| Urb5 | 8.64 | 12.52 | 15.10 | - | - | - | - |
| Urb6 | 1.01 | 1.47 | 1.77 | - | - | - | - |
| Urb7 | 1.04 | 1.51 | 1.83 | - | - | - | - |
| Urb8 | 1.28 | 1.86 | 2.24 | - | - | - | - |
| Urb9 | 2.92 | 4.24 | 5.11 | - | - | - | - |

4.2.3 Modello CN-SCS

Il metodo del Curve Number (CN) del Soil Conservation Service (SCS) si basa egualmente sulla formula di corrivazione, ma nel calcolo delle perdite si fa riferimento al parametro CN, indice della capacità del terreno di trattenere l’afflusso meteorico.

Il modello si basa sulla seguente formula per il calcolo della pioggia netta:

$$P_{net} = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} \quad (4.11)$$

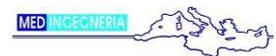
dove P è la pioggia lorda caduta fino all’istante temporale considerato, S è il massimo volume specifico che il terreno può trattenere in condizioni di saturazione ed I_a è il valore limite di pioggia che il terreno può trattenere senza che si abbia produzione di deflusso.

Il parametro I_a (misurato in millimetri) può essere stimato con la relazione:

$$I_a = 0.2 \cdot S \quad (4.12)$$

mentre S (misurato in millimetri) può essere determinato in base al valore di CN:

A.T.I.:





$$S = 254 \cdot \left(\frac{100}{CN} - 1 \right) \quad (4.13)$$

Per la definizione del valore di CN sono state utilizzate le tabelle fornite dal SCS, in funzione della natura del suolo, del tipo di copertura vegetale e delle condizioni di umidità del suolo antecedenti all’evento riportate al paragrafo 4.1; il valore di CN assunto per i corsi d’acqua di interesse è riportato in Tabella 4.4.

I valori di portata al colmo per assegnato tempo di ritorno T ottenuti con il modello SC-SCS sono riportati in Tabella 4.9:

Tabella 4.9: Valori di portata calcolati con il modello CN-SCS

| Codice | Portate al colmo Q [mc/s] per i seguenti tempi di ritorno T [anni]: | | | | | | |
|--------|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 2 | 5 | 10 | 50 | 100 | 200 | 500 |
| SMi | 3.42 | 6.28 | 8.30 | 12.96 | 14.97 | 17.00 | 19.71 |
| RiB | 3.15 | 5.71 | 7.51 | 11.64 | 13.43 | 15.23 | 17.62 |
| Ram | 2.61 | 4.81 | 6.36 | 9.96 | 11.53 | 13.10 | 15.20 |
| Mog | 1.31 | 2.46 | 3.29 | 5.20 | 6.03 | 6.87 | 7.99 |
| RZ1 | 7.51 | 13.40 | 17.55 | 27.07 | 31.20 | 35.35 | 40.87 |
| RZ2 | 7.90 | 13.98 | 18.25 | 28.01 | 32.23 | 36.47 | 42.10 |
| Urb1 | 2.85 | 4.67 | 5.90 | - | - | - | - |
| Urb2 | 2.52 | 4.15 | 5.25 | - | - | - | - |
| Urb3 | 2.08 | 3.43 | 4.35 | - | - | - | - |
| Urb4 | 4.17 | 6.82 | 8.62 | - | - | - | - |
| Urb5 | 7.36 | 11.95 | 15.06 | - | - | - | - |
| Urb6 | 0.82 | 1.35 | 1.71 | - | - | - | - |
| Urb7 | 0.86 | 1.41 | 1.79 | - | - | - | - |
| Urb8 | 1.06 | 1.74 | 2.20 | - | - | - | - |
| Urb9 | 2.38 | 3.92 | 4.96 | - | - | - | - |

4.2.4 Metodo C.I.M.A. per bacini di piccole dimensioni

Per bacini con superfici inferiori a 2 km² è possibile anche utilizzare la metodologia fornita dal C.I.M.A.

Tale metodologia la cui trattazione teorica è già stata riportata al par.2.1.2, per bacini di dimensione inferiore a 2 km², suggerisce di adottare un contributo unitario costante pari a quello ottenuto con riferimento a superfici scolanti aventi area drenata pari a 2 km². In questo caso il valore di portata è pari a

A.T.I.:





$$Q = K_T \cdot c(A = 2) \cdot A \tag{4.14}$$

dove A , misurato in km^2 , è la superficie del bacino chiuso alla sezione di interesse, K_T è il fattore di frequenza relativo al tempo di ritorno e $c(A=2)$ è il contributo unitario di portata per aree di superficie drenata pari a 2 km^2 e variabile al variare del tipo di bacino in esame. Per i rivi minori si è considerata una tipologia di bacino C (CN=75) “bacini caratterizzati da un basso grado di urbanizzazione . Estensione delle aree impermeabili compresa tra 5% e 30 %” mentre le aree urbane di Chiavari e Lavagna sono state inserite nella classe A (CN=92) “Bacini di tipo residenziale, industriale o commerciale caratterizzati da un elevato grado di urbanizzazione: Estensione delle aree impermeabili superiori al 60%”.

La Tabella 4.10: Valori di portata calcolati con il modello CIMA per piccoli bacini riporta i valori di portata al colmo di piena determinati in tale studio relativamente alle sezioni dell’Entella.

Tabella 4.10: Valori di portata calcolati con il modello CIMA per piccoli bacini

| Codice | Portate al colmo Q [mc/s] per i seguenti tempi di ritorno T [anni]: | | | | | |
|--------|---|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 5 | 10 | 50 | 100 | 200 | 500 |
| SMi | 3.32 | 4.61 | 8.93 | 11.63 | 12.92 | 15.54 |
| RiB | 3.47 | 4.82 | 9.33 | 12.16 | 13.50 | 16.25 |
| Ram | 2.86 | 3.97 | 7.70 | 10.03 | 11.13 | 13.40 |
| Mog | 1.02 | 1.41 | 2.73 | 3.56 | 3.95 | 4.76 |
| RZ1 | 10.94 | 15.18 | 29.42 | 38.32 | 42.56 | 51.21 |
| RZ2 | 12.30 | 17.06 | 33.07 | 43.08 | 47.85 | 57.57 |
| Urb1 | 2.83 | 3.92 | 7.60 | 9.90 | 11.00 | 13.23 |
| Urb2 | 2.37 | 3.29 | 6.38 | 8.31 | 9.23 | 11.11 |
| Urb3 | 1.80 | 2.49 | 4.83 | 6.30 | 6.99 | 8.42 |
| Urb4 | 4.25 | 5.90 | 11.44 | 14.90 | 16.55 | 19.92 |
| Urb5 | 8.85 | 12.28 | 23.80 | 31.01 | 34.44 | 41.44 |
| Urb6 | 0.73 | 1.01 | 1.95 | 2.54 | 2.82 | 3.40 |
| Urb7 | 0.85 | 1.17 | 2.28 | 2.97 | 3.30 | 3.96 |
| Urb8 | 1.04 | 1.44 | 2.78 | 3.63 | 4.03 | 4.85 |
| Urb9 | 2.17 | 3.02 | 5.85 | 7.62 | 8.46 | 10.18 |

4.2.5 Metodo del PRRA per i bacini urbani

A titolo di confronto, il calcolo delle portate meteoriche drenate dai sottobacini urbani è stato effettuato anche in base alle formulazioni proposte dal Piano di Risanamento Regionale delle Acque della Regione Lombardia (PRRA), basato sulla formula razionale.

A.T.I.:



STUDIO GALLI
 INGEGNERIA





Il PRRA fornisce una tabella (riportata nella Tabella 4.11 della presente relazione) per la valutazione del rapporto u/a tra il coefficiente udometrico u in caso di perdite nulle e il parametro a delle LSPP, in funzione della costante temporale K del bacino sotteso e dell'esponente n della curva di possibilità pluviometrica, rappresentativa del regime pluviometrico della zona in esame.

Tabella 4.11: Valori di u/a [l/s ha mm]: rapporto tra il coefficiente udometrico u espresso in [l/s ha] in caso di perdite nulle ($\phi=1$) e la costante a espressa in [mm] della curva delle piogge.

| K [min] | n1 = 0,40 n2 = 0,20 | n1 = 0,50 n2 = 0,30 | n1 = 0,60 n2 = 0,40 |
|--------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| 10 | 5.8 | 5.1 | 4.4. |
| 20 | 4.1 | 3.7 | 3.4 |
| 30 | 2.9 | 2.7 | 2.5 |
| 40 | 2.3 | 2.2 | 2.2 |
| 50 | 2.0 | 1.9 | 1.9 |
| 60 | 1.6 | 1.6 | 1.6 |
| 90 | 1.1 | 1.1 | 1.1 |

NOTE:

I valori del coefficiente u/a di tabella sono stati ricavati adottando uno ietogramma sintetico ad intensità variabile (tipo Chicago) ed il modello dell'invaso lineare con valore K della costante temporale.

Per le aree sottese di maggiori dimensioni, caratterizzate da valori di $K \geq 30$ min, i valori di u/a della tabella tengono già conto dei normali coefficienti di ragguaglio delle precipitazioni in funzione dell'area.

Nel caso di aree sottese di grandi dimensioni, il modello considerato può perdere di validità in considerazione della disuniforme distribuzione sul bacino dei fenomeni idrologici e del comportamento propagatorio della piena, sempre meno assimilabile ad un funzionamento sincrono. Tuttavia si ritiene che i valori della tabella siano comunque adottabili in sede di pianificazione.

I simboli n_1 ed n_2 rappresentano il parametro n delle Linee Segnatrici di possibilità Pluviometrica (LSPP), rispettivamente per durate inferiori e superiori all'ora. Nel caso in esame si è fatto riferimento ai valori dei parametri delle LSPP ricavare al paragrafo 4.2.1 per il pluviometro di Chiavari per durate superiori all'ora.

Il tempo di ritorno di riferimento è pari a 10 anni, valore normalmente utilizzato per il dimensionamento delle opere di fognatura.

La durata di riferimento d è pari al tempo critico del bacino in esame, t_c , calcolato per i bacini urbani come somma del tempo di ingresso in rete e del tempo di corrivazione della rete di drenaggio, in linea con le indicazioni del PRRA.

La costante K del bacino viene assunta pari al 70% del tempo di corrivazione, mentre per la determinazione del coefficiente di afflusso ϕ si è tenuto conto solo in parte delle indicazioni del PRRA, infatti è stato assunto un valore di ϕ pari a 0.80 in luogo del massimo indicato pari a 0.6.

A.T.I.:



STUDIO GALLI
INGEGNERIA



projenia
ENGINEERING & CONSULTING SERVICES





I risultati ottenuti con il metodo del PRRA sono riportati nella tabella seguente.

Tabella 4.12: Valori di portata calcolati con il metodo del PRRA per T=10 anni

| Sezione | U_{10} [l/s ha] | Q_{10} [mc/s] |
|---------|-------------------|-----------------|
| Urb1 | 250.2 | 4.73 |
| Urb2 | 264.1 | 4.19 |
| Urb3 | 288.0 | 3.46 |
| Urb4 | 242.3 | 6.90 |
| Urb5 | 194.7 | 11.53 |
| Urb6 | 280.5 | 1.36 |
| Urb7 | 252.9 | 1.43 |
| Urb8 | 254.2 | 1.76 |
| Urb9 | 271.4 | 3.95 |

4.2.6 Analisi dei risultati e definizione delle portate di progetto

In Tabella 4.13 si riportano, per T=200 anni, tempo di ritorno di riferimento per la progettazione delle opere di difesa idraulica del territorio, così come indicato dall'Autorità di Bacino competente, i valori di portata al colmo di piena nelle sezioni di interesse dei bacini extraurbani calcolati con la metodologia indicata dal Piano di Bacino (applicabile ai soli bacini extraurbani poiché derivata dalla curva inviluppo), con il metodo C.I.M.A. per piccoli bacini e con i modelli di trasformazione afflussi-deflussi proposti, al fine di confrontare i risultati ottenuti con le diverse metodologie esposte.

La

Tabella 4.14 riporta invece, per i sottobacini urbani, i valori di portata calcolati per T=10 anni con le diverse metodologie esposte.

Tabella 4.13: Portate calcolate per i bacini extraurbani con diverse metodologie per T=200 anni

| Sezione | Modello cinematico | Modello CN-SCS | Modello C.I.M.A. | Metodologia del Piano di Bacino |
|---------|--------------------|----------------|------------------|---------------------------------|
| SMi | 14.85 | 17.00 | 12.92 | 17.39 |
| RiB | 13.38 | 15.23 | 13.50 | 18.18 |
| Ram | 11.36 | 13.10 | 11.13 | 14.99 |
| Mog | 5.93 | 6.87 | 3.95 | 5.32 |
| RZ1 | 31.02 | 35.35 | 42.56 | 57.28 |
| RZ2 | 32.18 | 36.47 | 47.85 | 64.40 |



Tabella 4.14: Portate calcolate per i bacini urbani con diverse metodologie per T=10 anni

| Sezione | Modello cinematico | Modello CN-SCS | Modello C.I.M.A. | Metodologia del PRRA |
|---------|--------------------|----------------|------------------|----------------------|
| Urb1 | 6.02 | 5.90 | 3.92 | 4.73 |
| Urb2 | 5.38 | 5.25 | 3.29 | 4.19 |
| Urb3 | 4.50 | 4.35 | 2.49 | 3.46 |
| Urb4 | 8.77 | 8.62 | 5.90 | 6.90 |
| Urb5 | 15.10 | 15.06 | 12.28 | 11.53 |
| Urb6 | 1.77 | 1.71 | 1.01 | 1.36 |
| Urb7 | 1.83 | 1.79 | 1.17 | 1.43 |
| Urb8 | 2.24 | 2.20 | 1.44 | 1.76 |
| Urb9 | 5.11 | 4.96 | 3.02 | 3.95 |

In conclusione, per le sezioni di interesse drenanti bacini a carattere prevalentemente extraurbano la portata di progetto sarà assunta pari a quella indicata dal CIMA, mentre per i sottobacini urbani, la portata di progetto verrà assunta come media dei valori ottenuti con il modello cinematico e CN-SCS. Poiché per questa tipologia di bacini le portate stimate con il metodo C.I.M.A. appaiono in generale sottostimare l'effettiva portata prodotta dal bacino rispetto alle altre metodologie, non si è tenuto conto di questa metodologia nel calcolo della portata di progetto.

A.T.I.:





5. CONCOMITANZE TRA LE PIENE DEL RETICOLO MINORE E QUELLE DELL'ENTELELLA

5.1 Generalità

Le verifiche idrauliche sui corsi d'acqua del reticolo minore, verranno svolte considerando come condizione al contorno di valle del modello matematico di simulazione del deflusso idrico due diversi scenari:

- livelli di piena in Entella che non provocano rigurgito lungo l'asta dell'affluente;
- livelli di piena in Entella che condizionano lo scarico dell'affluente.

Nel primo caso la modellazione idraulica lungo i corsi d'acqua affluenti dell'Entella può essere effettuata indipendentemente dalle condizioni di deflusso in Entella, ipotizzando come condizione al contorno di valle una relazione Q/h in corrispondenza dell'ultima sezione di calcolo del reticolo d'acqua minore.

Nel secondo caso risulta, invece, necessaria la valutazione idrologica dell'evento congiunto "piena dell'Entella" e "piena dell'affluente".

Nel presente capitolo verrà studiata la concomitanza tra le piene dell'Entella e quelle dei suoi affluenti, al fine di individuare il tempo di ritorno di riferimento per la verifica idraulica dei corsi d'acqua del reticolo minore con foce in Entella, una volta fissato il tempo di ritorno per il quale si intendono analizzare, progettare e verificare gli interventi di difesa idraulica del territorio.

5.2 Richiami di statistica

Sia dato un evento casuale E_1 , che può consistere, ad esempio, nel fatto che una data variabile x assuma un valore assegnato o sia ad esso superiore.

L'evento E_1 si può prendere in esame da due diversi punti di vista: isolatamente, quindi senza tener conto della circostanza che qualche altro evento possa in qualche modo favorirne o meno la realizzazione, oppure in un contesto di cui fanno parte altri eventi, dai quali può in qualche modo dipendere la possibilità che quello considerato si realizzi.

La probabilità che l'evento E_1 accada, indipendentemente dal fatto che qualunque altro evento sia accaduto oppure no, prende il nome di *probabilità incondizionata* o più semplicemente di probabilità dell'evento (intesa come rapporto tra il numero dei casi favorevoli e il numero dei casi possibili) e si indica con il simbolo $p(E_1)$.



Possono però esistere altri eventi che condizionano la probabilità di accadere di E_1 ; la probabilità che l'evento E_1 accada una volta che sia accaduto l'evento E_2 prende il nome di *probabilità condizionata* e si indica con il simbolo $p(E_1|E_2)$.

Si definisce *probabilità composta* dei due eventi E_1 ed E_2 la probabilità che accadano entrambi, e si indica con il simbolo $p(E_1 \cap E_2)$.

Per uno degli assiomi del calcolo delle probabilità, la probabilità composta di due eventi è uguale al prodotto della probabilità incondizionata di uno dei due per la probabilità condizionata dell'altro:

$$p(E_1 \cap E_2) = p(E_1) \cdot p(E_2 | E_1) = p(E_2) \cdot p(E_1 | E_2) \quad (5.1)$$

Se due eventi sono mutuamente indipendenti, ossia se il fatto che uno dei due sia accaduto non influisce sulla probabilità di accadimento dell'altro, la probabilità condizionata di ciascuno coincide con quella incondizionata e la probabilità composta diventa uguale, semplicemente, al prodotto delle loro probabilità:

$$p(E_1 \cap E_2) = p(E_1) \cdot p(E_2) \quad (5.2)$$

5.3 Analisi di dettaglio

Da un punto di vista idrologico, fissato un tempo di ritorno dell'evento congiunto “*piena sul'Entella*” e “*piena su un affluente*”, si vuole determinare il tempo di ritorno associato ai singoli eventi tale per cui la combinazione probabilistica dei due produca un evento congiunto con tempo di ritorno pari a quello fissato.

Indichiamo con E_1 l'evento “*piena dell'Entella superiore ad un valore di soglia*” e con E_2 l'evento “*piena sul bacino dell'affluente*”.

Data la differenza notevole di dimensioni tra il bacino idrografico dell'Entella e i bacini dei corsi d'acqua del reticolo minore e i diversi valori dei parametri idrologici caratteristici dei due bacini, si può ritenere che gli eventi E_1 ed E_2 siano statisticamente indipendenti.

Sotto tale ipotesi la probabilità composta degli eventi, ossia la probabilità che essi accadano contemporaneamente, è data dalla (5.2).

La probabilità composta $p(E_1 \cap E_2)$ è nota una volta fissato il tempo di ritorno di riferimento per le opere di difesa idraulica del territorio. Nel caso in esame, viene fissato un tempo di ritorno di 100 e 200 anni, cui corrisponde una probabilità di superamento dell'evento congiunto $E_1 E_2$ pari rispettivamente a 0.010 e 0.005 ($P = 1/T$).



La probabilità di superamento $p(E_1)$ associata a piene dell'Entella superiori ad un valore di soglia, invece, viene stimata, una volta nota la portata di soglia Q_s , attraverso la curva di durata del corso d'acqua relativa alla stazione idrometrica di Panesi, costruita in questa sede come la media di tutte curve di durata pubblicate sugli Annali Idrologici dal 1934 al 1996.

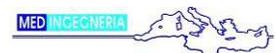
La portata di soglia Q_s è la portata che si registra in Entella nell'istante in cui lo scarico dell'affluente comincia ad essere rigurgitato. Laddove siano presenti dei manufatti di regolazione, la portata di soglia sarà funzione della legge di regolazione dello scarico; in caso contrario (scarico libero) si potrà assumere come portata di soglia quella corrispondente ad un valore del livello idrico in Entella pari all'altezza critica della sezione trasversale dell'affluente in corrispondenza del punto di immissione.

A questo punto, fissata $p(E_1 \cap E_2)$ e nota $p(E_1)$, si ricaverà facilmente la probabilità di superamento $p(E_2)$ relativa a eventi di pioggia intensa sul bacino dell'affluente, e quindi il tempo di ritorno di riferimento per le verifiche idrauliche sul reticolo minore pari a $T = 1/P(E_2)$.

A titolo di esempio, si può assumere per tutti i corsi d'acqua del reticolo minore, una portata di soglia pari a 1000 mc/s, in corrispondenza della quale le golene dell'Entella risultano interessate dal deflusso idrico e quindi lo scarico dei rivi minori risulta quanto meno rigurgitato.

Tale valore di portata di soglia però non risulta "coperto" dalla curva di durata media derivata dagli Annali idrologici; è stato quindi necessario modificare a favore di sicurezza tale curva imponendo che, per almeno un giorno all'anno venisse raggiunta una portata fittizia pari alla portata di soglia (vedi Figura 5.1).

A.T.I.:



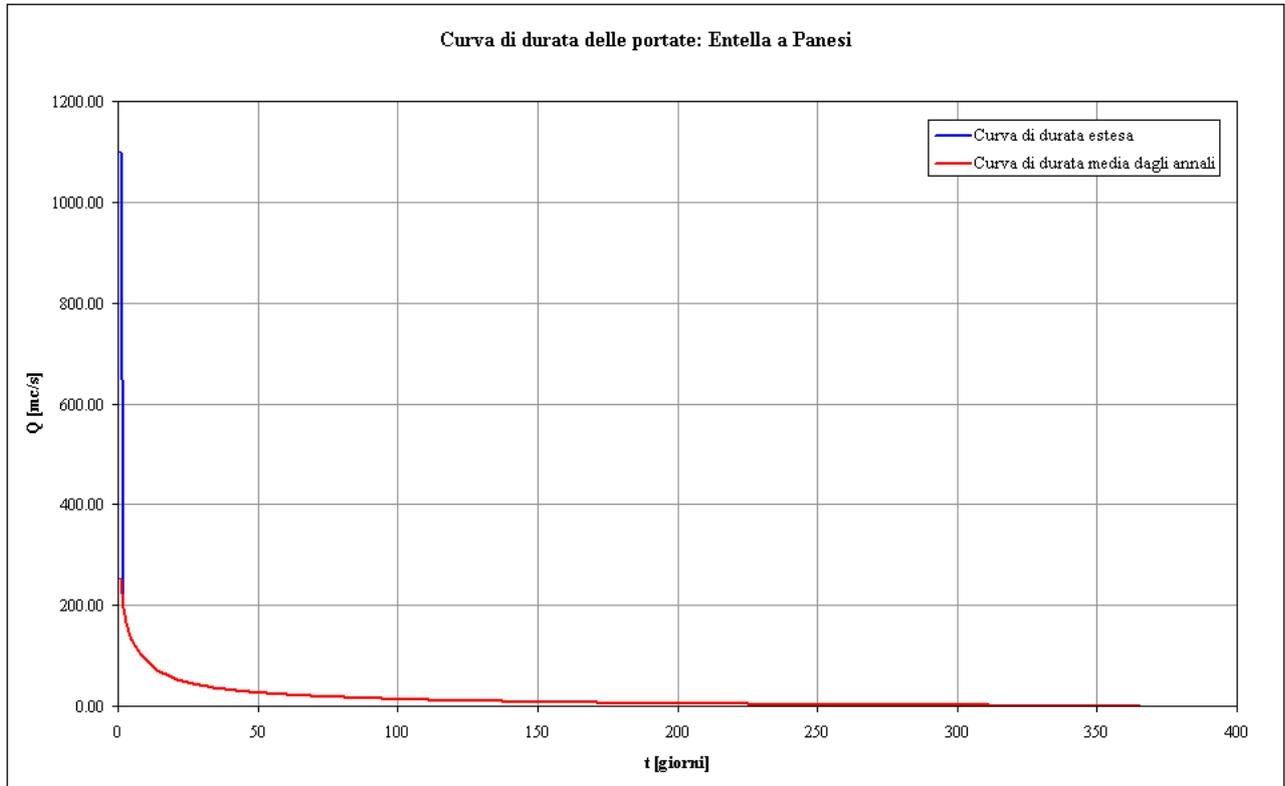


Figura 5.1: Curva di durata dell'Entella a Panesi

Se, quindi, la portata di soglia viene superata un solo giorno l'anno, il valore di $p(E_1)$ sarà pari a 0.0027; fissato un tempo di ritorno di riferimento per l'evento congiunto $T(E_1 \cap E_2)$ pari a 200 anni, dalla (5.2) si ricava agevolmente la probabilità di superamento $p(E_2)$ e di conseguenza il tempo di ritorno di riferimento per l'evento "piena su un affluente" pari, nel caso in esame, a 0.55 anni.

Estendendo ulteriormente la portata fino al valore corrispondente ad eventi di ritorno duecentennali, appare evidente come a maggior ragione il tempo di ritorno sui rivi minori risulti basso.

Per maggiore chiarezza nella tabella seguente si riportano le seguenti grandezze al variare della portata in Entella ($Q_{Entella}$):

- $Tr_{Entella}$ – Tempo di ritorno dell'Entella associato alla $Q_{Entella}$

A.T.I.:

STUDIO GALLI
INGEGNERIAprojenia
ENGINEERING & CONSULTING SERVICES



- *Giorni anno di superamento di Q Entella* - numero di giorni in un anno in cui viene superato il valore di portata *Q Entella*
- *P (Q Entella)* – probabilità associata alla portata *Q (Entella)* data dal rapporto tra il numero di *giorni anno di superamento di Q Entella* e 365 giorni.
- *P (Q rivi minori)* – probabilità dell’evento sul rivo minore in corrispondenza dell’evento congiunto duecentennale. Tale valore è dato dal rapporto tra la probabilità dell’evento congiunto e la probabilità dell’evento sull’Entella e quindi è pari a $1/200 \text{ anni} / P(Q \text{ Entella})$.
- *Tr Rivi minori* – Tempo di ritorno sul rivo minore associato all’evento congiunto. Tale valore è pari a $1/ P (Q \text{ rivi minori})$.

| Q Entella (mc/s) | Tr Entella (Anni) | Giorni/anno di superamento di Q Entella | P(Q Entella) | P (Q Rivi Minori) | Tr Rivi minori (Anni) | Note |
|------------------|-------------------|---|--------------|-------------------|-----------------------|---|
| 2739 | 200 | 1 | 0.003 | 1.00 | <1 | Evento maggiormente critico per Entella |
| 2164 | ≈ 100 | 1.2 | 0.003 | 1.00 | <1 | |
| 1622 | ≈ 50 | 1.5 | 0.004 | 1.00 | <1 | |
| 1281 | ≈ 30 | 1.8 | 0.005 | 0.99 | <1 | |
| 1118 | | 2 | 0.005 | 0.91 | 1 | |
| 990 | ≈ 10 | 2.2 | 0.007 | 0.73 | 1.2 | Portata in Entella che inizia ad esondare in golena a valle del ponte della Maddalena |
| 140 | | 10 | 0.027 | 0.18 | 5 | |
| 17 | | 50 | 0.137 | 0.04 | 27 | |
| 10 | | 75 | 0.205 | 0.02 | 41 | |
| 8 | | 90 | 0.247 | 0.02 | 49 | |
| 5 | | 125 | 0.342 | 0.01 | 68 | |
| 4 | | 150 | 0.411 | 0.01 | 82 | |
| 3 | | 175 | 0.479 | 0.01 | 96 | |
| 3 | | 180 | 0.493 | 0.01 | 99 | |
| 2 | | 225 | 0.616 | 0.01 | 123 | |
| 2 | | 250 | 0.685 | 0.01 | 137 | |
| 2 | | 275 | 0.753 | 0.01 | 151 | |
| 2 | | 300 | 0.822 | 0.01 | 164 | |
| 2 | | 325 | 0.890 | 0.01 | 178 | |
| 1 | <1 | 365 | 1.000 | 0.01 | 200 | Evento maggiormente critico per Rivo minore |

A.T.I.:



STUDIO GALLI
INGEGNERIA





Appare evidente come fino a portate inferiori a 1000 mc/s in Entella poiché il deflusso non interessa significativamente le golene a valle del ponte della Maddalena, il funzionamento dei rivi minori risulta poco influenzato dal livello in Entella. In corrispondenza dell'evento decennale in Entella ($Q \approx 1000$ mc/s) l'evento sui rivi minori che da come evento congiunto quello duecentennale ha tempo di ritorno inferiore ai 2 anni, evento per il quale non si hanno allagamenti sui rivi stessi.

Pertanto gli eventi che risultano maggiormente gravosi per il sistema nel suo complesso sono quelli che corrispondono ad uno dei due eventi estremi, ovvero piena duecentennale su Entella e evento con T molto basso sul rivo o piena duecentennale sul rivo e evento con T molto basso in Entella.

A.T.I.:

