



Società Autostrada Tirrenica p.A.
GRUPPO AUTOSTRADE PER L'ITALIA S.p.A.

**AUTOSTRADA (A12) : ROSIGNANO – CIVITAVECCHIA
LOTTO 3**

**TRATTO: SCARLINO – GROSSETO SUD
PROGETTO DEFINITIVO**

INFRASTRUTTURA STRATEGICA DI PREMINENTE INTERESSE
NAZIONALE LE CUI PROCEDURE DI APPROVAZIONE SONO REGOLATE
DALL' ART. 161 DEL D.LGS. 163/2006

AU – CORPO AUTOSTRADALE

**IDROLOGIA E IDRAULICA
INTERFERENZE IDROGRAFICHE**

Relazione Idrologico – Idraulica

<p>IL RESPONSABILE PROGETTAZIONE SPECIALISTICA Ing. Alessandro Alfì Ord. Ingg. Milano N. 20015</p>	<p>IL RESPONSABILE INTEGRAZIONE PRESTAZIONI SPECIALISTICHE Ing. Alessandro Alfì Ord. Ingg. Milano N. 20015 COORDINATORE GENERALE APS</p>	<p>IL DIRETTORE TECNICO Ing. Maurizio Torresi Ord. Ingg. Milano N. 16492 RESPONSABILE DIREZIONE SVILUPPO INFRASTRUTTURE</p>
---	--	---

RIFERIMENTO ELABORATO					DATA:	REVISIONE		
—	DIRETTORIO			FILE		FEBBRAIO 2011	n.	data
	codice	commessa	N.Prog.	unita'	n. progressivo			
—	12	12	1202	IDR001	—	SCALA:		

	<p>ELABORAZIONE GRAFICA A CURA DI :</p>	
	<p>ELABORAZIONE PROGETTUALE A CURA DI :</p>	
<p>CONSULENZA A CURA DI :</p>	<p>IL RESPONSABILE UFFICIO/UNITA'</p>	<p>Ing. Maurizio Torresi – O.I. Milano N. 16492</p>

<p>RESPONSABILE DI COMMESSA</p>	<p>VISTO DEL COMMITTENTE</p>	<p>VISTO DEL CONCEDENTE</p>
<p>Arch. Mario Canato Ord. Arch.. Venezia N. 1294</p>		
<p>COORDINATORE OPERATIVO DI PROGETTO</p>		

INDICE

1. PREMESSA	2
2. AMBITO DI RIFERIMENTO.....	4
3. INQUADRAMENTO NORMATIVO.....	8
NORMATIVA COMUNITARIA.....	8
NORMATIVA NAZIONALE.....	8
NORMATIVA REGIONALE	10
AUTORITÀ DI BACINO	11
ALTRI STRUMENTI DI PIANIFICAZIONE TERRITORIALI	12
CONSORZI DI BONIFICA.....	12
4. METODOLOGIA OPERATIVA.....	13
5. IDROLOGIA.....	15
IL MODELLO MG.....	17
IL METODO ALTO	28
DATI DI PORTATA FORNITI DAI CONSORZI.....	33
RIEPILOGO PORTATE.....	33
6. IDRAULICA	37
CRITERI DI COMPATIBILITÀ.....	37
COSTRUZIONE DEL MODELLO GEOMETRICO	37
IL CODICE DI CALCOLO HEC-RAS 4.1.0.....	38
RISULTATI DELLE SIMULAZIONI.....	45
7. FENOMENI DI EROSIONE E SCALZAMENTO IN CORRISPONDENZA DELLE OPERE VIARIE	59
GENERALITÀ.....	59
PROGRESSIVA VARIAZIONE DIFFUSA	60
EROSIONE GENERALIZZATA DOVUTA A CONTRAZIONE	60
VALUTAZIONE DELL'EROSIONE GENERALIZZATA DOVUTA A CONTRAZIONE.....	60
<i>Formule empiriche</i>	60
<i>Risultati</i>	61
EROSIONE TRANSITORIA LOCALIZZATA	62
VALUTAZIONE DELL'EROSIONE TRANSITORIA LOCALIZZATA	64
<i>Formule empiriche</i>	64
<i>Risultati</i>	65
8. SISTEMI DI PROTEZIONE CONTRO L'EROSIONE LOCALIZZATA.....	66
GENERALITÀ.....	66
DIMENSIONAMENTO DELLA PROTEZIONE DELLE PILE	67

1. PREMESSA

Nell'ambito della progettazione degli interventi di realizzazione dell'autostrada A12 Rosignano - Civitavecchia, nel tratto compreso tra Scarlino e Grosseto sud, è stato effettuato uno "Studio idrologico e idraulico di dettaglio" finalizzato all'analisi delle interferenze idrografiche ed alla relativa progettazione degli interventi di sistemazione.

La presente relazione illustra quindi tale studio a supporto della progettazione, che si pone l'obiettivo della verifica del funzionamento idraulico dei manufatti di attraversamento esistenti lungo la SS1 Aurelia e il dimensionamento dei manufatti in progetto, tenendo conto anche degli effetti di rigurgito indotti dai manufatti esistenti posti immediatamente a valle del nuovo tracciato autostradale, nei tratti in variante. Lo studio fornisce, in particolare, un'analisi delle interazioni tra le opere viarie e i corsi d'acqua interessati e valuta l'adeguatezza dei manufatti di attraversamento, esistenti e in progetto, sia in termini di sezione idraulica (eccessivo restringimento) sia di franco di sicurezza rispetto all'intradosso del manufatto. Come portata di riferimento per il dimensionamento delle opere è stata considerata la portata con tempo di ritorno duecentennale, in accordo con le elaborazioni condotte dall'autorità di bacino competente.

L'obiettivo raggiunto con la progettazione definitiva è la messa in sicurezza della sede autostradale e, come livello minimo, il mantenimento del grado di rischio attuale del territorio attraversato.

Il grado di approfondimento delle verifiche svolte è stato commisurato alle caratteristiche dei corsi d'acqua e dei loro bacini e alla pericolosità dei corsi d'acqua desunta dalle informazioni raccolte sul territorio.

Nei capitoli successivi, dopo una descrizione dell'ambito di applicazione della presente relazione, verranno esaminati la normativa e gli strumenti di pianificazione vigenti nella zona di interesse, a scala nazionale, regionale e di bacino attinenti le problematiche idrologico-idrauliche.

Successivamente verranno presentati i risultati delle analisi idrologiche condotte sui corsi d'acqua di interesse per la determinazione delle portate al colmo di piena da utilizzare nella successiva fase di modellazione idraulica.

In proposito occorre sottolineare che, laddove il PAI vigente dell’Autorità di bacino competente indichi valori di portata al colmo o metodologie per il calcolo della stessa, tali dati, stante il loro carattere di ufficialità, sono stati utilizzati nelle diverse fasi di verifica e progettazione degli interventi.

Infine, nel prosieguo della presente relazione, verrà effettuata una analisi dei fenomeni idrodinamici e morfologici indotti dall’interazione delle opere di attraversamento, esistenti ed in progetto, con gli alvei, con particolare attenzione a fenomeni di tipo erosivo o di sedimentazione, definendo le tipologie e le dimensioni degli interventi correttivi eventualmente necessari.

2. AMBITO DI RIFERIMENTO

Oggetto dell'analisi è il tratto autostradale A12 in progetto compreso tra gli svincoli di Scarlino e Grosseto Sud.

Da un punto di vista geografico-amministrativo l'ambito di riferimento ricade all'interno della Regione Toscana, nella Provincia di Grosseto.

Il tratto è caratterizzato dalla presenza di numerosi corsi d'acqua di dimensioni molto variabili: sono presenti infatti corsi d'acqua di grandi dimensioni (Fiume Bruna, Torrente Fossa, Fiume Ombrone) e una serie di fossi e impluvi con bacini di piccole dimensioni.

La seguente tabella riporta, per i manufatti di attraversamento in studio, il lotto di intervento e la progressiva autostradale di riferimento, le autorità idrauliche competenti e le dimensioni dei manufatti esistenti.

Tabella 2.1: Corsi d'acqua di interesse

CORSO D'ACQUA	LOTTO	Km	AUTORITÀ DI BACINO	AUTORITÀ IDRAULICA	CONSORZIO	DIM. ATTR. ESISTENTE*
FOSSO DELLA VETRICELLA	3 (parte 1)	1+239.15	AdB Toscana Costa	Pr. di Grosseto	C. B. Alta Maremma	Φ 2.00
FOSSO GRASCETA	3 (parte 1)	1+430.32	AdB Toscana Costa	Pr. di Grosseto	C. B. Alta Maremma	Φ 3.50
AFF. FOSSO GRASCETA	3 (parte 1)	1+790.05	AdB Toscana Costa	Pr. di Grosseto	C. B. Alta Maremma	Φ 1.70
FOSSO PELAGONE	3 (parte 1)	2+183.34	AdB Toscana Costa	Pr. di Grosseto	C. B. Alta Maremma	Φ 2.00
FOSSO CERRETTELLA	3 (parte 1)	2+447.84	AdB Toscana Costa	Pr. di Grosseto	C. B. Alta Maremma	Φ 3.30
FOSSO RICCIO	3 (parte 1)	3+217.63	AdB Toscana Costa	Pr. di Grosseto	C. B. Alta Maremma	Φ 2.00
AFF. FOSSO RICCIO	3 (parte 1)	3+638.95	AdB Toscana Costa	Pr. di Grosseto	C. B. Alta Maremma	Φ 1.00
FOSSO BOTRELLE	3 (parte 1)	4+274.58	AdB Toscana Costa	Pr. di Grosseto	C. B. Alta Maremma	Φ 3.40
FOSSO SANT'ANSANO	3 (parte 1)	4+855.69	AdB Toscana Costa	Pr. di Grosseto	C. B. Alta Maremma	Φ 1.40
AFF. 1 FOSSO RIGIOLATO	3 (parte 1)	5+117.36	AdB Toscana Costa	Pr. di Grosseto	C. B. Alta Maremma	Φ 0.80
AFF. 2 FOSSO RIGIOLATO	3 (parte 1)	5+250.32	AdB Toscana Costa	Pr. di Grosseto	C. B. Alta Maremma	Φ 2.00

AFF. 3 FOSSO RIGIOLATO	3 (parte 1)	5+548.15	AdB Toscana Costa	Pr. di Grosseto	C. B. Alta Maremma	Φ 0.40
AFF. 4 FOSSO RIGIOLATO	3 (parte 1)	5+809.76	AdB Toscana Costa	Pr. di Grosseto	C. B. Alta Maremma	Φ 1.40
AFF. 5 FOSSO RIGIOLATO	3 (parte 1)	5+871.89	AdB Toscana Costa	Pr. di Grosseto	C. B. Alta Maremma	Φ 0.80
AFF. 6 FOSSO RIGIOLATO	3 (parte 1)	6+039.86	AdB Toscana Costa	Pr. di Grosseto	C. B. Alta Maremma	Φ 1.40
FOSSO DEL RIGIOLATO	3 (parte 1)	6+584.82	AdB Toscana Costa	Pr. di Grosseto	C. B. Alta Maremma	Φ 2.00
FOSSO DEL MELO	3 (parte 1)	7+081.92	AdB Toscana Costa	Pr. di Grosseto	C. B. Alta Maremma	Φ 1.70
FOSSO SENZA NOME A	3 (parte 1)	7+311.92	AdB Toscana Costa	Pr. di Grosseto	C. B. Alta Maremma	Φ 4.30
FOSSO SENZA NOME B	3 (parte 1)	7+594.87	AdB Toscana Costa	Pr. di Grosseto	C. B. Alta Maremma	Φ 1.60
FOSSO SENZA NOME C	3 (parte 1)	8+031.02	AdB Toscana Costa	Pr. di Grosseto	C. B. Grossetana	Φ 2.60
FOSSO SENZA NOME D	3 (parte 1)	8+397.96	AdB Ombrone	Pr. di Grosseto	C. B. Grossetana	Φ 2.00
FOSSO SENZA NOME E	3 (parte 1)	8+992.32	AdB Ombrone	Pr. di Grosseto	C. B. Grossetana	Φ 3.30
FOSSO SENZA NOME F	3 (parte 1)	9+265.14	AdB Ombrone	Pr. di Grosseto	C. B. Grossetana	Φ 2.20
FOSSO DI VALLE DI PESCO	3 (parte 1)	9+501.07	AdB Ombrone	Pr. di Grosseto	C. B. Grossetana	Φ 2.10
FOSSO DI VAL MORELLO	3 (parte 1)	10+092.91	AdB Ombrone	Pr. di Grosseto	C. B. Grossetana	Φ 1.50
AFF. TORRENTE SOVATA 1	3 (parte 1)	10+367.36	AdB Ombrone	Pr. di Grosseto	C. B. Grossetana	Φ 2.00
AFF. TORRENTE SOVATA 2	3 (parte 1)	11+101.91	AdB Ombrone	Pr. di Grosseto	C. B. Grossetana	Φ 2.00
AFF. TORRENTE SOVATA 3	3 (parte 1)	11+691.50	AdB Ombrone	Pr. di Grosseto	C. B. Grossetana	Φ 0.40
FOSSO DELLA VALLE	3 (parte 1)	12+744.83	AdB Ombrone	Pr. di Grosseto	C. B. Grossetana	Φ 2.10
FOSSO DEL BOCCHERAI	3 (parte 2)	0+370.88	AdB Ombrone	Pr. di Grosseto	C. B. Grossetana	Φ 1.80
FOSSO DELLA ROVINA	3 (parte 2)	0+814.25	AdB Ombrone	Pr. di Grosseto	C. B. Grossetana	Φ 3.00
AFF. FOSSO DELLA ROVINA	3 (parte 2)	1+069.35	AdB Ombrone	Pr. di Grosseto	C. B. Grossetana	Φ 2.00
FOSSO MOLLARELLA NUOVO	3 (parte 2)	1+449.87	AdB Ombrone	Pr. di Grosseto	C. B. Grossetana	3.60x2.90

AFF. TORRENTE SOVATA 4	3 (parte 2)	2+315.55	AdB Ombrone	Pr. di Grosseto	C. B. Grossetana	Φ 2.00
AFF. TORRENTE SOVATA 5	3 (parte 2)	2+470.73	AdB Ombrone	Pr. di Grosseto	C. B. Grossetana	Φ 2.00
FOSSO MOLLARELLO	3 (parte 2)	3+750.83	AdB Ombrone	Pr. di Grosseto	C. B. Grossetana	Φ 3.00
FOSSO SECCA	3 (parte 2)	3+909.58	AdB Ombrone	Pr. di Grosseto	C. B. Grossetana	Φ 1.40
FIUME BRUNA	3 (parte 2)	1+960.00	AdB Ombrone	Pr. di Grosseto	C. B. Grossetana	Viadotto
FOSSO BECCARELLO	3 (parte 2)	6+017.79	AdB Ombrone	Pr. di Grosseto	C. B. Grossetana	Φ 3.50
IL FOSSONE	3 (parte 2)	6+899.83	AdB Ombrone	Pr. di Grosseto	C. B. Grossetana	Φ 2.10
FOSSO SANSUCOLO	3 (parte 2)	7+425.11	AdB Ombrone	Pr. di Grosseto	C. B. Grossetana	Φ 2.40
TORRENTE FOSSA	3 (parte 2)	8+164.00	AdB Ombrone	Pr. di Grosseto	C. B. Grossetana	Viadotto
FOSSO RIGONI	3 (parte 2)	8+346.81	AdB Ombrone	Pr. di Grosseto	C. B. Grossetana	Φ 3.60
FOSSO RIGO	3 (parte 2)	9+620.24	AdB Ombrone	Pr. di Grosseto	C. B. Grossetana	Φ 2.40
AFF. CANALE ALLACCIANTE DEGLI ACQUISTI SUPERIORE	3 (parte 2)	11+408.41	AdB Ombrone	Pr. di Grosseto	C. B. Grossetana	Φ 1.50
CANALE ALLACCIANTE DEGLI ACQUISTI SUPERIORE	3 (parte 2)	12+151.59	AdB Ombrone	Pr. di Grosseto	C. B. Grossetana	3.00x2.00
AFF. FOSSO BOTTEGONE	3 (parte 2)	14+272.57	AdB Ombrone	Pr. di Grosseto	C. B. Grossetana	2.50x2.50
FOSSO BOTTEGONE	3 (parte 2)	14+440.00	AdB Ombrone	Pr. di Grosseto	C. B. Grossetana	
FOSSO PESCIATINO	3 (parte 2)	15+309.64	AdB Ombrone	Pr. di Grosseto	C. B. Grossetana	4.50x2.50
DIVERSIVO FOSSO PESCIATINO	3 (parte 2)	15+409.47	AdB Ombrone	Pr. di Grosseto	C. B. Grossetana	2.00x3.00
FOSSO SENZA NOME G	3 (parte 2)	17+080.00	AdB Ombrone	Pr. di Grosseto	C. B. Grossetana	
AFF. FOSSO SAN ROCCO	3 (parte 2)	17+680.94	AdB Ombrone	Pr. di Grosseto	C. B. Grossetana	Ponticello L=2m
AFF. CANALE DELLA MOLLA	3 (parte 2)	18+103.25	AdB Ombrone	Pr. di Grosseto	C. B. Grossetana	Ponticello L=2m
CANALE DELLA MOLLA INTERSEZIONE 3	3 (parte 2)	18+598.63	AdB Ombrone	Pr. di Grosseto	C. B. Grossetana	Φ 5.00

CANALE DELLA MOLLA INTERSEZIONE 2	3 (parte 2)	20+660.11	AdB Ombrone	Pr. di Grosseto	C. B. Grossetana	Φ 5.50
FOSSO SALICA	3 (parte 2)	20+660.11	AdB Ombrone	Pr. di Grosseto	C. B. Grossetana	
CANALE DELLA MOLLA INTERSEZIONE 1	3 (parte 2)	22+004.80	AdB Ombrone	Pr. di Grosseto	C. B. Grossetana	
CANALE DIVERSIVO OMBRONE	3 (parte 2)	25+320.00	AdB Ombrone	Pr. di Grosseto	C. B. Grossetana	Viadotto
FIUME OMBRONE	3 (parte 2)	25+540.00	AdB Ombrone	Pr. di Grosseto	C. B. Grossetana	Viadotto
AFF. N.2 FIUME OMBRONE	3 (parte 2)	29+081.99	AdB Ombrone	Pr. di Grosseto	C. B. Grossetana	1.92x1.45
AFF. N.1 FIUME OMBRONE	3 (parte 2)	29+490.93	AdB Ombrone	Pr. di Grosseto	C. B. Grossetana	
AFF. N.3 FIUME OMBRONE	3 (parte 2)	29+721.16	AdB Ombrone	Pr. di Grosseto	C. B. Grossetana	

3. INQUADRAMENTO NORMATIVO

Si riportano nel seguito, accompagnati da un breve stralcio descrittivo, i principali riferimenti normativi e gli strumenti di pianificazione e di tutela presenti sul territorio, a scala nazionale e regionale, al fine di fornire un quadro esaustivo della normativa vigente nel campo idrologico-idraulico, ambientale e di difesa del suolo.

Normativa comunitaria

Di seguito vengono riportate le principali direttive comunitarie legate all'ambito di interesse, accompagnate da un breve stralcio descrittivo.

Direttiva 2000/60/CE

Direttiva del Parlamento europeo e del Consiglio, del 23 ottobre 2000, che istituisce un quadro per l'azione comunitaria in materia di acque (Direttiva acque).

Direttiva 2006/118/CE

Direttiva del Parlamento europeo e Consiglio, del 12 dicembre 2006, sulla protezione delle acque sotterranee dall'inquinamento e dal deterioramento.

Direttiva 2007/60/CE

Direttiva del Parlamento europeo e del Consiglio, del 23 ottobre 2007, relativa alla valutazione e alla gestione dei rischi di alluvioni.

Normativa nazionale

Di seguito vengono riportate le principali leggi nazionali in materia ambientale e di difesa del suolo, accompagnate da un breve stralcio descrittivo.

RD 25/07/1904 n° 523

Testo unico delle disposizioni di legge intorno alle opere idrauliche delle diverse categorie.

Regio Decreto Legislativo 30/12/1923, n° 3267

Riordinamento e riforma della legislazione in materia di boschi e di terreni montani. La legge introduce il vincolo idrogeologico.

DPR 15/01/1972 n° 8

Trasferimento alle Regioni a statuto ordinario delle funzioni amministrative statali in materia di urbanistica e di viabilità, acquedotti e lavori pubblici di interesse regionale e dei relativi personali ed uffici.

L. 64/74

Provvedimenti per le costruzioni con particolari prescrizioni per le zone sismiche.

L. 319/76 (Legge Merli)

Norme per la tutela delle acque dall'inquinamento.

La legge sancisce l'obbligo per le Regioni di elaborare il Piano di risanamento delle acque.

DPR 24/7/1977 n° 616

Trasferimento delle funzioni statali alle Regioni

L. 431/85 (Legge Galasso)

Conversione in legge con modificazioni del decreto legge 27 giugno 1985, n. 312 concernente disposizioni urgenti per la tutela delle zone di particolare interesse ambientale.

L. 183/89

Norme per il riassetto organizzativo e funzionale della difesa del suolo.

Scopo della legge è la difesa del suolo, il risanamento delle acque, la fruizione e la gestione del patrimonio idrico per gli usi di razionale sviluppo economico e sociale, la tutela degli aspetti ambientali ad essi connessi (art. 1 comma 1).

Vengono inoltre individuate le attività di pianificazione, di programmazione e di attuazione (art. 3); vengono istituiti il Comitato Nazionale per la difesa del suolo (art. 6) e l'Autorità di Bacino (art. 12).

Vengono individuati i bacini idrografici di rilievo nazionale, interregionale e regionale (artt. 13, 14, 15, 16) e date le prime indicazioni per la redazione dei Piani di Bacino (artt. 17, 18, 19).

L. 142/90

Ordinamento delle autonomie locali.

DL 04-12-1993 n° 496

Disposizioni urgenti sulla riorganizzazione dei controlli ambientali e istituzione della Agenzia nazionale per la protezione dell'ambiente. (Convertito con modificazioni dalla L. 61/94).

L. 36/94 (Legge Galli)

Disposizioni in materia di risorse idriche.

DPR 14/4/94

Atto di indirizzo e coordinamento in ordine alle procedure ed ai criteri per la delimitazione dei bacini idrografici di rilievo nazionale ed interregionale, di cui alla legge 18 maggio 1989, N. 183.

DPR 18/7/95

Approvazione dell'atto di indirizzo e coordinamento concernente i criteri per la redazione dei Piani di Bacino.

DPCM 4/3/96

Disposizioni in materia di risorse idriche (direttive di attuazione della Legge Galli).

Decreto Legislativo 31/3/1998, n° 112

Conferimento di funzioni e compiti amministrativi dello Stato alle regioni ed agli enti locali, in attuazione del capo I della legge 15 marzo 1997, n. 59

DPCM 29/9/98

Atto di indirizzo e coordinamento per l'individuazione dei criteri relativi agli adempimenti di cui all'art. 1, commi 1 e 2, del decreto-legge 11 giugno 1989, N. 180.

Il decreto indica i criteri di individuazione e perimetrazione delle aree a rischio idrogeologico (punto 2) e gli indirizzi per la definizione delle norme di salvaguardia (punto 3).

L. 267/98 (Legge Sarno)

Conversione in legge del DL 180/98 recante misure urgenti per la prevenzione del rischio idrogeologico ed a favore delle zone colpite da disastri franosi nella Regione Campania.

La legge impone alle Autorità di Bacino nazionali e interregionali la redazione dei Piani Stralcio per la tutela dal rischio idrogeologico e le misure di prevenzione per le aree a rischio (art. 1).

DL 152/99

Disposizioni sulla tutela delle acque dall'inquinamento e recepimento della direttiva 91/271/CEE concernente il trattamento delle acque reflue urbane e della direttiva 91/676/CEE relativa alla protezione delle acque dall'inquinamento provocato dai nitrati provenienti da fonti agricole.

DL 258/00

Disposizioni correttive e integrative del DL 152/99.

L. 365/00 (Legge Soverato)

Conversione in legge del DL 279/00 recante interventi urgenti per le aree a rischio idrogeologico molto elevato ed in materia di protezione civile, nonché a favore delle zone della Regione Calabria danneggiate dalle calamità di settembre e ottobre 2000.

La legge individua gli interventi per le aree a rischio idrogeologico e in materia di protezione civile (art. 1); individua la procedura per l'adozione dei progetti di Piano Stralcio (art. 1-bis); prevede un'attività straordinaria di polizia idraulica e di controllo sul territorio (art. 2).

DLgs 152/2006

Ha riorganizzato le Autorità di bacino introducendo i distretti idrografici. Tale Decreto legislativo disciplina, in attuazione della legge 15 dicembre 2004, n. 308, la difesa del suolo e la lotta alla desertificazione, la tutela delle acque dall'inquinamento e la gestione delle risorse idriche. Istituisce i distretti idrografici nei quali sarà istituita l'Autorità di bacino distrettuale, che va a sostituire la o le Autorità di bacino previste dalla legge n. 183/1989. In forza del recente d.lgs 8 novembre 2006, n. 284, nelle more della costituzione dei distretti idrografici di cui al Titolo II della Parte terza del d.lgs. 152/2006 e della revisione della relativa disciplina legislativa con un decreto legislativo correttivo, le autorità di bacino di cui alla legge 18 maggio 1989, n. 183, sono prorogate fino alla data di entrata in vigore del decreto correttivo che, ai sensi dell'articolo 1, comma 6, della legge n. 308 del 2004, definisca la relativa disciplina. Fino alla data di entrata in vigore del decreto legislativo correttivo di cui al comma 2-bis dell'articolo 170 del decreto legislativo 3 aprile 2006, n. 152, come inserito dal comma 3, sono fatti salvi gli atti posti in essere dalle Autorità di Bacino dal 30 aprile 2006.

Normativa regionale

Come visto, il tratto autostradale di interesse ricade interamente all'interno dei confini amministrativi della Regione Toscana.

Di seguito vengono riportate le principali leggi regionali in materia ambientale e di difesa del suolo, accompagnate da un breve stralcio descrittivo.

LR 81/94

Disposizioni in materia di risorse idriche.

La Regione Toscana, in attuazione della legge Galli ha emanato tale legge con la finalità di recupero e mantenimento della risorsa idrica.

LR 50/94

Interventi strutturali finalizzati alla messa in sicurezza idraulica dei bacini idrografici toscani.

L.R. 5/95

Norme per il governo del territorio

D.C.R. 155/97

Direttive tecniche per l'ingegneria naturalistica

L.R. 91/98

Norme per la difesa del suolo

L.R. 20/2006

In attuazione al D.lgs 152/2006, ha per oggetto la tutela delle acque, tra cui, art.1, comma 1 c), le acque meteoriche e di lavaggio delle aree esterne di cui all'art. 113 del decreto legislativo citato.

Regolamento regionale 8 settembre 2008 n. 46/R

Regolamento di attuazione della legge regionale 31 maggio 2006 n. 20, che disciplina le acque meteoriche dilavanti.

Autorità di bacino

Bacino regionale Toscana Costa, Piano Stralcio Assetto Idrogeologico

Bacino regionale Ombrone, Piano Stralcio Assetto Idrogeologico

Il Piano per l'assetto idrogeologico (PAI) persegue l'obiettivo generale di assicurare l'incolumità della popolazione nei territori dei bacini di rilievo regionale e garantire livelli di sicurezza adeguati rispetto ai fenomeni di dissesto idraulico e geomorfologico in atto o potenziali.

Più in particolare, il Piano, nel rispetto delle finalità generali indicate all'art. 17 della legge 18 maggio 1989 n. 183 per il piano di bacino, ed in attuazione delle disposizioni della L.R. 5/95 e del Piano di indirizzo territoriale (D.C.R. n. 12/2000), si pone i seguenti obiettivi:

- la sistemazione, la conservazione ed il recupero del suolo nei bacini idrografici, con interventi idrogeologici, idraulici, idraulico-forestali, idraulico-agrari, silvo-pastorali, di forestazione, di bonifica, di consolidamento e messa in sicurezza;
- la difesa ed il consolidamento dei versanti e delle aree instabili nonché la difesa degli abitati e delle infrastrutture contro i fenomeni franosi e altri fenomeni di dissesto;
- la difesa, la sistemazione e la regolazione dei corsi d'acqua;
- la moderazione delle piene, anche mediante serbatoi d'invaso, vasche di laminazione, casse di espansione, scaricatori, scolmatori, diversivi o altro, per la difesa dalle inondazioni e dagli allagamenti;
- la riduzione del rischio idrogeologico, il riequilibrio del territorio ed il suo utilizzo nel rispetto del suo stato, della sua tendenza evolutiva e delle sue potenzialità d'uso;
- la riduzione del rischio idraulico ed il raggiungimento di livelli di rischio socialmente accettabili.

Altri strumenti di pianificazione territoriali

Piano di Tutela delle Acque della Toscana

Il Piano di Tutela delle Acque rappresenta lo strumento principale del governo dell'acqua in Toscana. Attraverso il monitoraggio e il quadro conoscitivo dello stato attuale delle risorse idriche, individua le attività e le azioni di governo necessarie a raggiungere gli obiettivi qualitativi e quantitativi prefissati. Il Piano di Tutela delle Acque della Toscana è stato approvato con DELIBERAZIONE del Consiglio Regionale del 25 gennaio 2005, n.6.

Piano di Indirizzo Territoriale (P.I.T.)

Il Piano di Indirizzo Territoriale della Toscana è stato approvato dal Consiglio regionale il 24 luglio 2007 con delibera n. 72. Ai sensi dell'art. 17 della legge regionale 1/2005, l'avviso relativo all'approvazione del Pit è stato pubblicato sul Burt n. 42 del 17 ottobre 2007 e quindi da questa data il piano ha acquistato efficacia.

Il P.I.T. stabilisce gli orientamenti per la pianificazione degli enti locali e definisce gli obiettivi operativi della propria politica territoriale.

Consorzi di bonifica

Gli interventi in esame interessano corsi d'acqua di competenza del Consorzio di Bonifica Alta Maremma (da progressiva 0 a 8+000 del lotto 3 parte 1). I restanti corsi d'acqua del lotto 3 parte 1 e tutti quelli compresi nella parte 2 sono di competenza del Consorzio di Bonifica Grossetana. Laddove disponibili si è fatto riferimento ai valori di portata forniti dal Consorzio.

Nella progettazione si rispettano tutte le specifiche poste dal Consorzio sui corsi d'acqua di propria competenza, in particolare in materia di fasce di rispetto, franchi, e piste per l'accesso e la manutenzione.

4. METODOLOGIA OPERATIVA

Per l'elaborazione del presente studio si sono innanzitutto reperiti dati e studi pregressi relativi all'area oggetto di analisi. In particolare sono stati considerati i Piani di Assetto Idrogeologico (PAI) redatti dalle Autorità di bacino competenti (Toscana Costa e Ombrone) e dati forniti dall'ente competente per la quasi totalità dei corsi d'acqua analizzati.

Per l'analisi delle interferenze si è dapprima determinata l'estensione dei relativi bacini, ottenuti adottando come base il modello digitale del terreno della Regione Toscana.

La determinazione delle portate di riferimento è stata conseguita secondo differenti modalità:

- Adottando i valori di portata forniti dal Consorzio di Bonifica Grossetana, laddove tale dato era disponibile.
- Mediante il modello di regionalizzazione MG (Maione et al. 2009), descritto dettagliatamente nei paragrafi successivi, applicato nei seguenti modi:
 - a partire dall'analisi statistica delle misurazioni dirette di portate per le sezioni dotate di stazione di misura (Fiume Bruna);
 - correlando direttamente il parametro CV alle elaborazioni statistiche dei dati di pioggia di pluviometri prossimi all'area di studio, per bacini inferiori a 15 kmq;
 - desumendo il parametro CV attraverso regressione lineare a partire dalle analisi statistiche dei dati di portata disponibili per numerosi corsi d'acqua toscani.

Le portate sono state acquisite anche attraverso il sistema di regionalizzazione AITo della Regione Toscana (solo per i corsi d'acqua inclusi all'interno del database); il modello, la cui base di taratura è compresa tra 10 e 4000 kmq, risulta non attendibile per bacini di piccole dimensioni. Il metodo MG risulta più affidabile anche per bacini di dimensioni superiori (si veda a tal proposito "Sulla stima delle portate di piena di elevato tempo di ritorno in Toscana e la distribuzione MG" – Milano Valerio 2009). Nei paragrafi successivi si riporta comunque il metodo AITo sebbene le portate da esso ottenute non vengano poi considerate nelle simulazioni

Le portate vengono calcolate per tempi di ritorno di 10-20-50-100-200 anni, utilizzando poi il valore duecentennale come portata di riferimento.

Si effettuano le verifiche idrauliche mediante il modello matematico monodimensionale Hec-ras per simulare il deflusso, in condizioni di moto permanente, di un tratto di corso d'acqua di

lunghezza significativa a monte ed a valle del manufatto di attraversamento autostradale, sia in condizioni di stato di fatto che in condizioni di progetto.

In conclusione si effettua l'analisi dei fenomeni idrodinamici e morfologici indotti dall'interazione dell'alveo con le opere viarie, condotta per i soli corsi d'acqua di maggior rilevanza.

5. IDROLOGIA

Per la determinazione delle portate di progetto, laddove non fornite dal consorzio di bonifica competente, si sono utilizzati due differenti approcci:

- Il modello probabilistico MG, che a partire dall'analisi statistica delle misurazioni dirette di portata in bacini geomorfologicamente e idrologicamente omogenei all'area di interesse, restituisce i valori di portata al colmo per i diversi tempi di ritorno;
- il metodo idrologico ALTO, che a partire dall'elaborazione dei dati di pioggia fornisce, note le caratteristiche dei bacini, l'idrogramma di piena.

Nella tabella 5.1 vengono riportate le caratteristiche geomorfologiche di tutti i corsi d'acqua studiati.

Tabella 5.1: caratteristiche geomorfologiche interferenze idrografiche

Lotto 3	Progressiva A12 [km]	Corso d'acqua	Area bacino [Kmq]	Lungh. asta (Km)	H min (m slm)	H max (m slm)	H media (m slm)	pend. media (-)
Parte 1	1+239.15	Fosso della vetrice	0.23	0.67	37	126	67.24	0.016
Parte 1	1+430.32	Fosso grasceta	2.08	2.87	36	284	127.90	0.0775
Parte 1	1+790.05	Affluente fosso grasceta	0.40	1.69	36	156	75.30	0.0227
Parte 1	2+183.34	Fosso pelagone	0.10	0.42	34	59	42.38	0.0125
Parte 1	2+447.84	Fosso cerrettella	2.80	3.07	34	265	121.53	0.0974
Parte 1	3+217.63	Fosso riccio	0.20	0.67	33	98	57.96	0.035
Parte 1	3+638.95	Affluente fosso riccio	0.79	1.31	34	198	73.16	0.0658
Parte 1	4+274.58	Fosso botrelle	2.09	7.80	39	276	139.37	0.0904
Parte 1	4+855.69	Fosso sant'ansano	0.69	3.50	44	257	114.89	0.008
Parte 1	5+117.36	Affluente 1 fosso rigiolato	0.04	0.08	45	57	48.49	0.000
Parte 1	5+250.32	Affluente 2 fosso rigiolato	0.34	1.55	46	196	74.51	0.1039
Parte 1	5+548.15	Affluente 3 fosso rigiolato	0.22	1.10	48	229	113.02	0.062
Parte 1	5+809.76	Affluente 4 fosso rigiolato	0.05	0.58	51	128	67.83	0.010
Parte 1	5+871.89	Affluente 5 fosso rigiolato	0.02	-	51	63	56.51	0.010

Lotto 3	Progressiva A12 [km]	Corso d'acqua	Area bacino [Kmq]	Lungh. asta (Km)	H min (m slm)	H max (m slm)	H media (m slm)	pend. media (-)
Parte 1	6+039.86	Affluente 6 fosso rigiolato	0.67	1.43	52	255	133.97	0.0667
Parte 1	6+584.82	Fosso del rigiolato	0.58	1.50	62	230	114.76	0.052
Parte 1	7+081.92	Fosso del melo	1.22	1.80	72	241	145.60	0.1173
Parte 1	7+311.92	Fosso senza nome A	0.13	0.39	73	180	107.70	0.0933
Parte 1	7+594.87	Fosso senza nome B	0.09	0.11	74	178	109.14	0.0667
Parte 1	8+031.02	Fosso senza nome C	0.52	1.03	77	180	116.76	0.0963
Parte 1	8+397.96	Fosso senza nome D	0.13	0.45	79	127	96.60	-
Parte 1	8+992.32	Fosso senza nome E	1.16	1.72	71	238	135.06	0.090
Parte 1	9+265.14	Fosso senza nome F	0.10	0.27	69	140	98.82	0.075
Parte 1	9+501.07	Fosso di valle di pesco	0.49	1.05	69	228	123.88	0.115
Parte 1	10+092.91	Fosso di querciona	0.73	1.34	66	228	137.10	0.0973
Parte 1	10+367.36	Aff. Torrente sovata 1	0.35	0.93	58	184	111.28	0.078
Parte 1	11+101.91	Aff. Torrente sovata 2	0.24	0.55	49	151	87.00	0.060
Parte 1	11+691.50	Aff. Torrente sovata 3	0.29	0.55	49	151	95.74	0.1075
Parte 1	12+744.83	Fosso della valle	1.98	2.28	47	229	95.74	0.0877
Parte 2	0+370.88	Fosso del boccheraio	1.81	2.48	26.87	216.35	73.01	0.040
Parte 2	0+841.25	Fosso della rovina	0.95	2.30	24.26	183.67	74.50	0.033
Parte 2	1+069.35	Aff. Fosso della rovina	0.81	1.56	24.50	115.37	47.40	0.023
Parte 2	1+449.87	Fosso mollarella nuovo	0.46	0.62	22.85	65.00	32.57	0.001
Parte 2	2+315.55	Aff. Torrente sovata 4	0.40	0.69	19.78	101.64	38.34	0.018
Parte 2	2+470.73	Aff. Torrente sovata 5	0.09	0.15	18.93	69.15	35.78	0.038
Parte 2	3+750.83	Fosso mollarello	2.96	2.74	17.68	100.03	25.9	0.002
Parte 2	3+909.58	Fosso secca	0.46	1.24	16.16	21.59	18.03	0.001
Parte 2	1+960.00	Fiume bruna	229.00	19.56	15.33	892.98	221.09	0.012
Parte 2	6+017.79	Fosso beccarello	6.33	4.01	14.33	42.71	27.42	0.006
Parte 2	6+899.83	Il fossone	0.87	1.32	14.57	23.71	19.04	0.005
Parte 2	7+425.11	Fosso sansucolo	0.28	0.46	15.46	20.81	17.08	0.004
Parte 2	8+164.00	Torrente fossa	114.83	7.91	15.55	786.64	167.91	0.029
Parte 2	8+346.81	Fosso rigoni	0.48	1.00	17.56	220.74	48.14	0.009
Parte 2	9+620.24	Fosso rigo	0.69	0.94	21.94	212.64	121.77	0.040
Parte 2	11+408.41	Aff. Canale allacciante degli acquisti superiore	0.46	0.73	19.26	180.33	75.54	0.069
Parte 2	12+151.59	Canale allacciante degli acquisti superiore	1.42	0.61	3.81	115.00	32.9	0.066

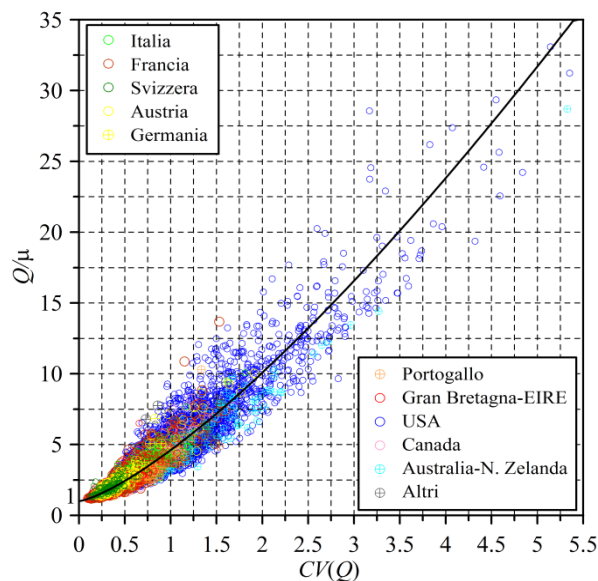
Lotto 3	Progressiva A12 [km]	Corso d'acqua	Area bacino [Kmq]	Lungh. asta (Km)	H min (m slm)	H max (m slm)	H media (m slm)	pend. media (-)
Parte 2	14+272.57	Aff. Fosso bottegone	9.09	4.69	5.47	323.38	82.77	0.023
Parte 2	14+440.00	Fosso bottegone	9.09	4.69	5.47	323.38	82.77	0.023
Parte 2	15+309.64	Fosso pesciatino	14.60	6.19	3.69	203.69	45.92	0.013
Parte 2	15+409.47	Diversivo fosso pesciatino	0.33	1.13	4.19	7.11	5.70	0.002
Parte 2	17+080.00	Fosso senza nome	0.30	0.67	7.04	10.71	9.32	0.004
Parte 2	17+680.94	Aff. Fosso san rocco	0.27	0.75	6.27	10.76	8.88	0.005
Parte 2	18+103.25	Aff. Canale della molla	0.29	0.75	7.21	11.85	8.97	0.001
Parte 2	18+598.63	Canale della molla intersezione 3	15.65	5.77	6.24	23.89	11.89	0.0003
Parte 2	20+660.11	Canale della molla intersezione 2	8.70	3.62	7.90	23.89	15.14	0.0002
Parte 2	20+660.11	Fosso salica	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Parte 2	22+004.80	Canale della molla intersezione 1	5.97	2.34	8.91	24.10	15.38	0.0005
Parte 2	25+320.00	Canale diversivo ombrone	-	-	-	-	-	-
Parte 2	25+540.00	Fiume ombrone	3434.30	130.81	5.89	1737.23	327.05	0.002
Parte 2	29+081.99	Aff. N.2 fiume ombrone	0.29	0.75	20.00	110.08	52.07	0.040
Parte 2	29+490.93	Aff. N.1 fiume ombrone	0.61	1.39	15.14	180.81	73.21	0.060
Parte 2	29+721.16	Aff. N.3 fiume ombrone	0.32	1.14	15.54	121.43	49.90	0.070

Il modello MG

Il modello probabilistico MG è stato sviluppato dagli autori (Majone e al., *Modelli probabilistici per la stima delle portate di piena di elevato tempo di ritorno*, pubblicato sulla rivista L'acqua n. 3/2009) basandosi sull'analisi di serie storiche delle portate al colmo di piena annuali in diverse aree geografiche del mondo, per un totale di circa 12000 stazioni.

Il modello MG si basa sull'osservazione della dispersione dei valori Q_{max}/μ in funzione di CV.

Figura 5.1: Dispersione dei valori Q_{max}/μ nel piano $(CV, Q/\mu)$



Ipotizzando un'interpolazione di tipo monomio si ricava, con il metodo dei minimi quadrati

$$\frac{Q_{max}}{\mu} = 1 + 3.61 \cdot CV^{1.33}$$

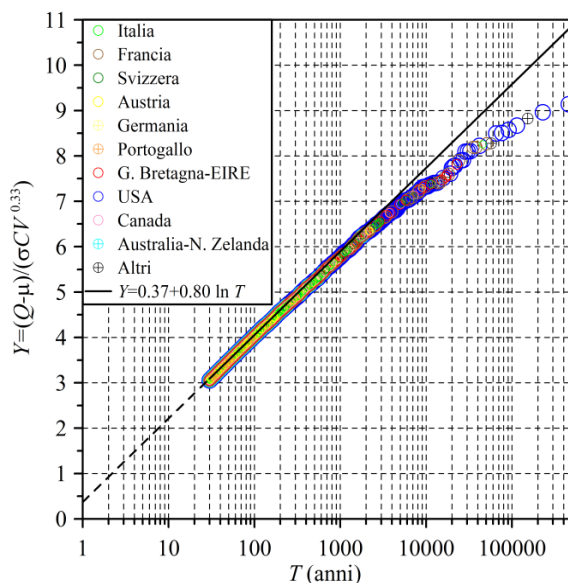
Successivamente, dopo aver verificato che ai valori di Q_{max}/μ forniti da tale curva, corrisponde un tempo di ritorno compreso tra 65 e 70 anni, si è ipotizzato che il quantile della variabile Q/μ corrispondente al generico tempo di ritorno T possa essere espresso da una funzione simile alla relazione sopra riportata nella quale il parametro k risulta funzione di T :

$$\frac{Q}{\mu} = 1 + k(T) \cdot CV^{1.33}$$

La funzione di $k(T)$ è stata quindi ricavata attraverso l'analisi della frequenza della variabile normalizzata:

$$Y = \frac{Q/\mu - 1}{CV^{1.33}} = \frac{Q - \mu}{\sigma CV^{0.33}}$$

Figura 5.2: Frequenze empiriche di non superamento dei valori massimi della variabile Y e funzione interpolante



Il grafico mostra il buon adattamento della funzione interpolante ai dati considerati per tempi di ritorno compresi tra 30 anni (pari circa alla dimensione media dei campioni impiegati) e 4000 anni.

Per un dato bacino, indicando con μ e CV la media e il coefficiente di variazione di una generica serie storica dei massimi annuali delle portate istantanee misurate, il modello MG permette di correlare a tali valori la portata Q relativa al tempo di ritorno T.

$$\frac{Q}{\mu} = 1 + (0.37 + 0.80 \ln T) \cdot CV^{1.33}$$

L'espressione riportata costituisce l'equazione del modello MG nella sua formulazione più recente (Majone et al., 2009).

Studi di vari autori (Milano, Moisello) hanno dimostrato la validità del modello probabilistico MG. In particolare uno studio specifico per la Regione Toscana (Milano, "Sulla stima delle portate di piena di elevato tempo di ritorno in Toscana e la distribuzione MG", pubblicato sulla rivista L'acqua n. 1/2009) ha dimostrato la validità dei metodi di regionalizzazione, tra cui il modello MG fornisce i risultati più affidabili. Tale studio mostra inoltre l'affidabilità del modello MG per tempi di ritorno molto bassi (fino a 8 anni) estendendo il suo campo di applicazione ben oltre il

limite inferiore indicato dagli stessi autori, che individuano un intervallo di affidabilità del metodo compreso tra 30 e 1000 anni.

Per l'applicazione del metodo MG risulta di fondamentale importanza la corretta individuazione dei parametri μ e CV, che risultano desumibili direttamente dall'analisi statistica unicamente per i bacini che dispongono di stazioni di misura.

Per i corsi d'acqua analizzati tale applicazione diretta risulta possibile solo per il fiume Bruna, che dispone di un misuratore di portata in corrispondenza del viadotto SS1-Aurelia (stazione di misura a Lepri).

Tabella 5.1: Parametri statistici per il Fiume Bruna alla stazione di Lepri

Asta fluviale e sezione di chiusura	N° dati	S	$\mu(Q)$	$\sigma(Q)$	CV
		[km ²]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	
Bruna a Lepri	37	229	139.9	89.7	0.641

Per i restanti bacini analizzati nel presente studio non si dispone di misure dirette di portata; è pertanto necessario individuare un metodo di regionalizzazione che permetta di determinare i parametri necessari a partire dai valori noti di bacini limitrofi idrologicamente omogenei.

Si assume che, per regioni idrologicamente omogenee, il contributo di piena μ sia correlabile all'area del bacino S per mezzo di una funzione monomia:

$$\mu = a \cdot S^n$$

Tale assunzione viene estesa anche agli scarti quadratici medi σ delle misure di portata, per le quali si assume un'analoga relazione:

$$\sigma = b \cdot S^m$$

CV è poi facilmente calcolabile mediante la relazione:

$$CV = \frac{\sigma}{\mu}$$

L'area idrologicamente omogenea individuata viene fatta corrispondere alla Regione Toscana; i dati disponibili relativi ai bacini, di seguito riportati, sono estratti dalla pubblicazione "Sulla stima

delle portate di piena di elevato tempo di ritorno in Toscana e la distribuzione MG” (Valerio Milano, 2009).

Tabella 5.2: Parametri statistici per i corsi d’acqua toscani

Asta fluviale e sezione di chiusura	N° dati	S	$\mu(Q)$	$\sigma(Q)$	CV
		[km ²]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	
Magra a Piccatello	22	77	98.14	96.40	0.982
Bagnone a Bagnone	39	51	90.68	84.06	0.927
Tavernone a Licciana	11	79	59.73	16.83	0.282
Magra a Calamazza	40	939	1549	813.1	0.525
Vara a Naseto	28	206	271.5	183	0.674
Vara a Padivarma	10	454	306.4	141.3	0.461
Vara a Piana Battolla	10	563	564.9	314	0.556
Frigido a Carnevara	48	46	321.1	153.8	0.479
Fegana a p.te Bussato	22	29	29.59	25.1	0.848
Lima a Fabbr. Casablanca	19	263	365.68	204.8	0.56
Serchio a Borgo a Mozzano	27	1061	810.7	359.1	0.443
Arno a Stia	36	62	50.72	48.86	0.963
Arno a Subbiano (mod)	66	738	565.6	283.3	0.501
Chiana a P.te Ferrovia	62	1272	242.9	136.3	0.561
Arno a P.te Romito	15	2347	850	296.1	0.348
Sieve a Bilancino	18	150	279.7	130.5	0.466
Sieve a Fornacina	68	831	466.3	203.8	0.437
Arno a Nave di Rosano (mod)	59	4083	1214.6	560.3	0.461
Bisenzio a Praticello	18	54	59.6	27.7	0.465
Bisenzio a Carmiganeto	17	100	133.1	66.8	0.502
Bisenzio a Gamberame	37	150	143.9	74.9	0.52
Brana a Burgianico	25	13	20.06	17.5	0.873
Arno a Brucianese	15	5463	1301	324.8	0.25
Pesa a Sambuceto	27	119	53.1	53	0.998
Elsa a Castelfiorentino	47	806	165.1	116.7	0.707
Nievole a Colonna	34	32.5	19.52	11.9	0.61
Candalla a Molino parlanti	26	0.61	1.387	0.597	0.43
Pescia a Molino Narducci	15	47	48.74	29.4	0.603
Era a Capannoli (mod)	29	337	138.1	105.4	0.764
Arno a S.Giovanni alla Vena (mod)	77	8186	1233.7	619	0.502

Asta fluviale e sezione di chiusura	N° dati	S	$\mu(Q)$	$\sigma(Q)$	CV
		[km ²]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	
Rio sana a Cartiera Valgiano	19	3.1	1.325	0.659	0.497
Cecina a Pte di Monterufoli (mod)	53	634	374.7	242	0.646
Cornia a Frassine	16	97	66.1	59	0.893
Massera a Molino del Balzone	27	58	108	42.3	0.392
Cornia a P.te Montioni	12	195	254.3	174.2	0.685
Milia a Grillandino	16	77	50.5	25	0.495
Cornia a P.te SS Aurelia	43	356	438.6	260.9	0.595
Bruna a Ribolla	10	147	112.8	10.8	0.961
Bruna a Lepri	37	229	139.9	89.7	0.641
Merse a Casa Mallecchi	18	265	275.3	244.5	0.888
Merse a Ornate (mod)	38	483	362.6	249.7	0.689
Farma a P.te di Torniella	41	70	94.7	85.8	0.906
Orcia a M.te Amiata	45	580	311.7	179.7	0.576
Ombrone a Sasd'Ombrone	73	2657	914	573.2	0.626
Albegna a P.te Montemerano	13	192	361.5	269.5	0.745
Rio Pomonte a Pomonte	13	7.54	1.901	1.362	0.716
Rio Vallebuia a La Cavallina	10	5.2	3.676	2.172	0.591
Bovalico a S.Mamiliano	22	6.7	8.198	11.35	1.384

Nei grafici seguenti sono riportati i dati utilizzati per la taratura e le relazioni monomie ottenute.

Figura 5.3: Dispersione dei valori $\mu(Q)$ nel piano logaritmico ($\mu(Q), S$)

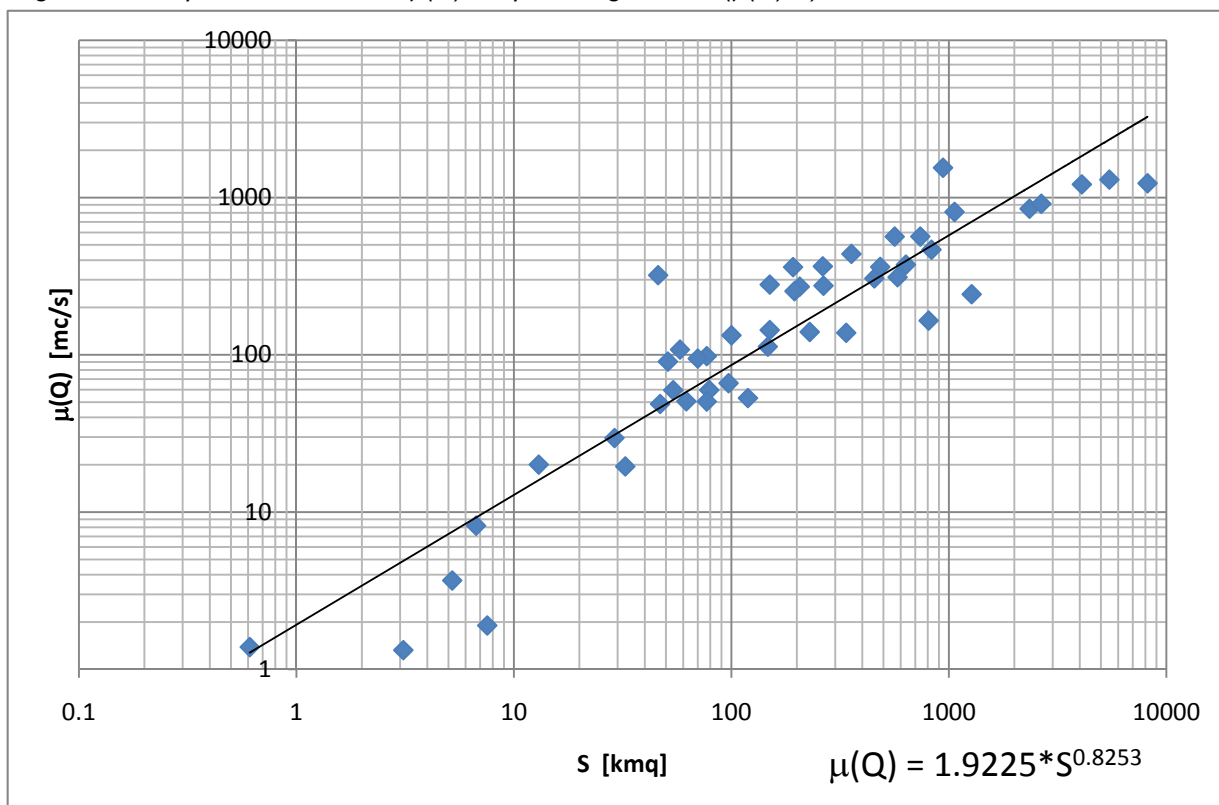
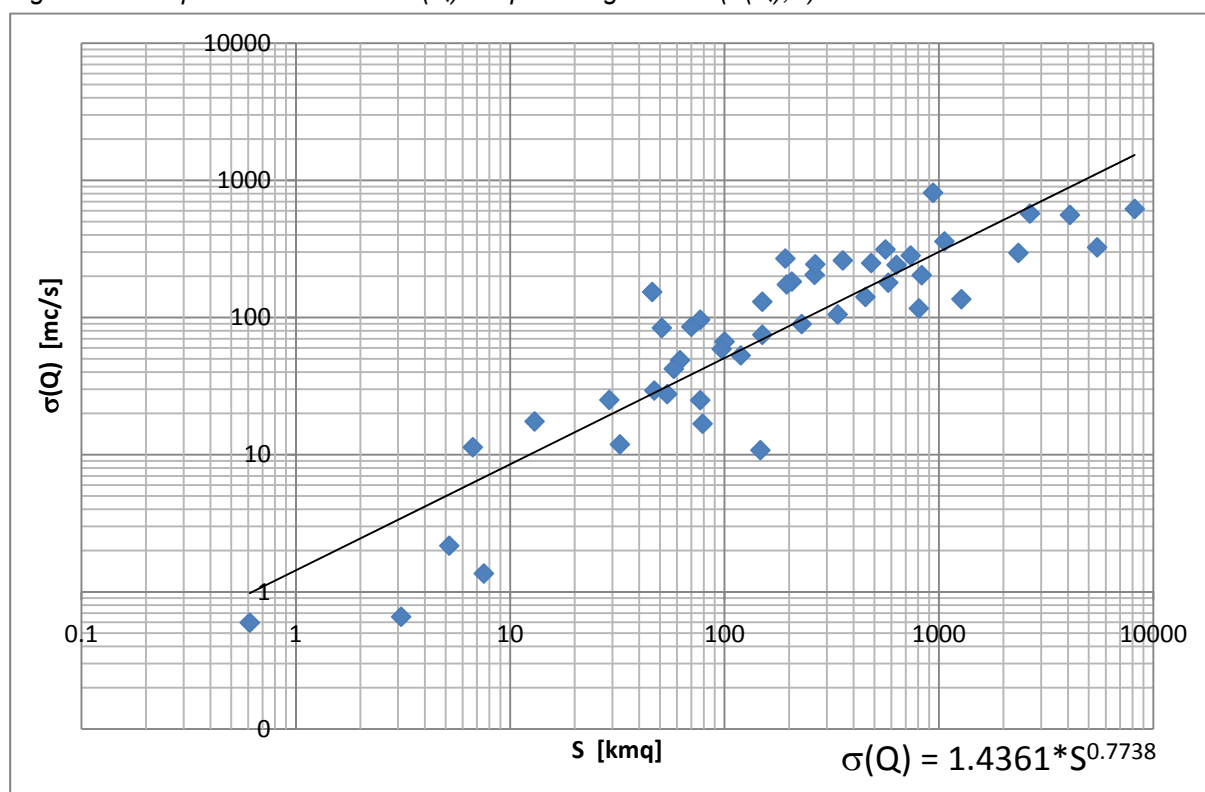


Figura 5.4: Dispersione dei valori $\sigma(Q)$ nel piano logaritmico ($\sigma(Q), S$)



Per i bacini di piccole dimensioni (si prende come limite una superficie di 15 kmq) è lecito assumere una diretta proporzionalità tra la portata e la precipitazione che la provoca; essendo oltretutto più o meno uniforme la distribuzione spaziale delle piogge ne discende che il coefficiente di variazione delle portate poco si discosta da quello delle precipitazioni.

Per questi bacini il parametro CV non viene quindi calcolato secondo la regressione precedentemente espressa ma uguagliata alla media dei CV calcolati sulle precipitazioni misurate in pluviometri prossimi all'area in esame, ad una altitudine comparabile a quella delle sezioni di chiusura (essendo la dimensione del bacino ridotta, la sua altitudine media poco si discosterà da quella della sezione terminale).

I dati dei pluviometri, per piogge di durata 1-3-6-12-24 sono estratti dalla pubblicazione "Sulla regionalizzazione delle piogge di forte intensità in toscana" (L'acqua 1/2010 - V. Milano)

Tabella 5.3: Dati di pioggia per alcuni pluviometri toscani – durata di pioggia 1-3 ore

Cod	Stazione	m slm	1 ora			3 ore		
			h med	σ	CV	h med	σ	CV
2430	Venturina	7	29.4	10.56	0.36	39.4	16.92	0.43
2460	Follonica	5	30.8	13.65	0.44	44.3	20.70	0.47
2480	Montebamboli	160	30.2	13.46	0.45	44.8	24.37	0.54
2520	Castel di Pietra	56	31.4	10.53	0.34	45.6	16.52	0.36
2570	Batignano	168	30.2	12.13	0.40	41.2	17.76	0.43
2580	Acquisti	11	28.5	12.75	0.45	42.2	18.12	0.43
2590	Grosseto	8	28.8	15.04	0.52	39.7	19.73	0.50
2930	Campagnatico	160	27.8	13.97	0.50	38.7	21.14	0.55
2958	Poggio Cavallo	39	29.4	10.76	0.37	37.9	14.62	0.39
2960	Ponte Tura	15	26.6	10.76	0.40	41.2	20.93	0.51
			MEDIA CV			0.42		
						MEDIA CV		
						0.46		

Tabella 5.4: Dati di pioggia per alcuni pluviometri toscani – durata di pioggia 6-12 ore

Cod	Stazione	m slm	6 ore			12 ore		
			h med	σ	CV	h med	σ	CV
2430	Venturina	7	46.2	17.95	0.39	52.3	17.53	0.34
2460	Follonica	5	52.5	24.22	0.46	58.0	24.40	0.42
2480	Montebamboli	160	52.2	24.92	0.48	61.7	24.88	0.40
2520	Castel di Pietra	56	54.4	21.10	0.39	68.1	29.15	0.43
2570	Batignano	168	47.9	18.36	0.38	56.5	26.14	0.46
2580	Acquisti	11	49.3	21.00	0.43	58.2	24.80	0.43
2590	Grosseto	8	45.9	24.38	0.53	54.3	30.55	0.56
2930	Campagnatico	160	44.3	22.98	0.52	50.6	23.51	0.46
2958	Poggio Cavallo	39	43.8	17.76	0.41	49.7	20.53	0.41
2960	Ponte Tura	15	47.9	23.66	0.49	56.0	29.49	0.53
			MEDIA CV			0.45		
						MEDIA CV		
						0.44		

Tabella 5.5: Dati di pioggia per alcuni pluviometri toscani – durata di pioggia 24 ore

Cod	Stazione	m slm	24 ore		
			h med	σ	CV
2430	Venturina	7	61.4	18.36	0.30
2460	Follonica	5	65.0	27.17	0.42
2480	Montebamboli	160	72.1	25.87	0.36
2520	Castel di Pietra	56	81.9	37.03	0.45
2570	Batignano	168	68.5	42.98	0.63
2580	Acquisti	11	68.6	34.66	0.51
2590	Grosseto	8	63.4	40.42	0.64
2930	Campagnatico	160	60.0	25.00	0.42
2958	Poggio Cavallo	39	59.8	22.23	0.37
2960	Ponte Tura	15	68.6	41.96	0.61
			MEDIA CV		
			0.47		

I CV degli eventi di pioggia si attestano tutti attorno ad un valore medio complessivo pari **0.45**, che viene assunto come parametro costante per i bacini di piccole dimensioni.

Nelle tabelle seguenti si riportano per ogni corso d'acqua i parametri della formula MG adottati e la portata ottenuta, per diversi tempi di ritorno

Tabella 5.6: Portate calcolate col metodo MG per i corsi d'acqua del lotto 3 parte 1

Progr.	CORSO D'ACQUA	Bacino	μ	σ	CV	Metodo MG				
						Q10	Q20	Q50	Q100	Q200
[Km]		[Kmq]	[m³/s]	[m³/]		[m³/s]	[m³/s]	[m³/s]	[m³/s]	[m³/s]
1+239.15	Fosso della Vetricella	0.23	0.57	0.46	0.45	1.01	1.12	1.26	1.37	1.48
1+430.32	Fosso Grasceta	2.08	3.52	2.53	0.45	6.20	6.87	7.76	8.43	9.11
1+790.05	Affluente fosso Grasceta	0.40	0.90	0.71	0.45	1.59	1.76	1.99	2.16	2.34
2+183.34	Fosso Pelagone	0.10	0.29	0.24	0.45	0.51	0.56	0.63	0.69	0.74
2+447.84	Fosso Cerrettella	2.80	4.50	3.19	0.45	7.92	8.78	9.92	10.78	11.64
3+217.63	Fosso Riccio	0.20	0.51	0.41	0.45	0.90	0.99	1.12	1.22	1.32
3+638.95	Affluente fosso Riccio	0.79	1.58	1.20	0.45	2.79	3.09	3.49	3.79	4.10
4+274.58	Fosso Botrelle	2.09	3.53	2.54	0.45	6.23	6.90	7.79	8.47	9.14
4+855.69	Fosso sant'Ansano	0.69	1.42	1.08	0.45	2.49	2.76	3.12	3.39	3.66
5+117.36	Affluente 1 fosso Rigiolato	0.04	0.13	0.12	0.45	0.24	0.26	0.30	0.32	0.35
5+250.32	Affluente 2 fosso Rigiolato	0.34	0.79	0.62	0.45	1.39	1.54	1.74	1.89	2.04
5+548.15	Affluente 3 fosso Rigiolato	0.22	0.55	0.44	0.45	0.97	1.08	1.22	1.32	1.43
5+809.76	Affluente 4 fosso Rigiolato	0.05	0.16	0.14	0.45	0.29	0.32	0.36	0.39	0.42
5+871.89	Affluente 5 fosso Rigiolato	0.02	0.08	0.07	0.45	0.13	0.15	0.17	0.18	0.20
6+039.86	Affluente 6 fosso Rigiolato	0.67	1.38	1.05	0.45	2.43	2.70	3.05	3.31	3.58
6+584.82	Fosso del Rigiolato	0.58	1.23	0.94	0.45	2.16	2.40	2.71	2.94	3.17
7+081.92	Fosso del Melo	1.22	2.27	1.67	0.45	3.99	4.43	5.00	5.43	5.86
7+311.92	Fosso senza nome A	0.13	0.36	0.30	0.45	0.63	0.70	0.79	0.86	0.92
7+594.87	Fosso senza nome B	0.09	0.26	0.22	0.45	0.46	0.51	0.58	0.63	0.68
8+031.02	Fosso senza nome C	0.52	1.12	0.87	0.45	1.97	2.19	2.47	2.69	2.90
8+397.96	Fosso senza nome D	0.13	0.36	0.30	0.45	0.63	0.70	0.79	0.86	0.92
8+992.32	Fosso senza nome E	1.16	2.17	1.61	0.45	3.83	4.24	4.79	5.21	5.62
9+265.14	Fosso senza nome F	0.10	0.29	0.24	0.45	0.51	0.56	0.63	0.69	0.74
9+501.07	Fosso di Valle di Pesco	0.49	1.07	0.83	0.45	1.88	2.08	2.35	2.56	2.76
10+092.91	Fosso di Querciona	0.73	1.48	1.13	0.45	2.61	2.90	3.27	3.55	3.84
10+367.36	Aff. Torrente Sovata 1	0.35	0.81	0.64	0.45	1.42	1.58	1.78	1.94	2.09
11+101.91	Aff. Torrente Sovata 2	0.24	0.59	0.48	0.45	1.04	1.16	1.31	1.42	1.53
11+691.50	Aff. Torrente Sovata 3	0.29	0.69	0.55	0.45	1.22	1.35	1.53	1.66	1.79
12+744.83	Fosso della Valle	1.98	3.38	2.44	0.45	5.95	6.60	7.45	8.10	8.74

Tabella 5.7: Portate calcolate col metodo MG per i corsi d'acqua del lotto 3 parte2

Progr.	CORSO D'ACQUA	Bacino	μ	σ	CV	Metodo MG				
						Q10	Q20	Q50	Q100	Q200
[Km]		[Kmq]	[m ³ /s]	[m ³ /s]		[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³ /s]
0+370.88	Fosso del Boccheraio	1.81	3.13	2.27	0.45	5.52	6.12	6.91	7.51	8.10
0+814.25	Fosso della Rovina	0.95	1.85	1.38	0.45	3.26	3.61	4.07	4.43	4.78
1+069.35	Aff. fosso della Rovina	0.81	1.62	1.22	0.45	2.86	3.17	3.58	3.89	4.20
1+449.87	Fosso Mollarella nuovo	0.46	1.01	0.79	0.45	1.78	1.97	2.23	2.42	2.61
2+315.55	Aff. torrente Sovata 4	0.40	0.90	0.71	0.45	1.59	1.76	1.99	2.16	2.33
2+470.73	Aff. torrente Sovata 5	0.09	0.27	0.23	0.45	0.48	0.53	0.60	0.65	0.70
3+750.83	Fosso Mollarello	2.33	3.86	2.76	0.45	6.80	7.54	8.51	9.25	9.99
3+909.58	Fosso Secca	0.46	1.01	0.79	0.45	1.78	1.97	2.23	2.42	2.61
1+960.00	Fiume Bruna*	229.00	139.90	89.70	0.641	311	354	411	454	497
6+017.79	Fosso Beccarello	6.33	8.82	5.99	0.45	15.54	17.22	19.45	21.13	22.82
6+899.83	Il Fossone	0.87	1.71	1.29	0.45	3.01	3.34	3.77	4.10	4.42
7+425.11	Fosso Sansucolo	0.28	0.68	0.54	0.45	1.20	1.33	1.50	1.63	1.76
8+164.00	Torrente Fossa	118.21	98.72	57.68	0.58	205.57	232.35	267.76	294.54	321.33
8+346.81	Fosso Rigoni	0.48	1.05	0.81	0.45	1.85	2.05	2.31	2.51	2.71
9+620.24	Fosso Rigo	0.69	1.41	1.08	0.45	2.49	2.76	3.12	3.39	3.66
11+408.41	Affluente canale Allacciante degli Acquisti superiore	0.46	1.01	0.79	0.45	1.79	1.98	2.24	2.43	2.63
12+151.59	Canale Allacciante degli Acquisti superiore	1.42	2.56	1.88	0.45	4.51	5.00	5.65	6.14	6.63
14+272.57	Aff. fosso Bottegone**	9.09	11.89	7.93	0.45	20.95	23.22	26.23	28.50	30.77
14+440.00	Fosso Bottegone	9.09	11.89	7.93	0.45	20.95	23.22	26.23	28.50	30.77
15+309.64	Fosso Pesciatino	14.60	17.57	11.43	0.45	30.96	34.32	38.75	42.11	45.47
15+409.47	Diversivo fosso Pesciatino	0.33	0.77	0.61	0.45	1.36	1.50	1.70	1.84	1.99
17+080.00	Fosso senza nome G	0.30	0.71	0.57	0.45	1.25	1.39	1.57	1.71	1.84
17+680.94	Affluente fosso san Rocco	0.27	0.66	0.53	0.45	1.16	1.28	1.45	1.58	1.70
18+103.25	Affluente canale della Molla	0.29	0.70	0.55	0.45	1.23	1.36	1.54	1.67	1.80
18+598.63	Canale della Molla int. 3	10.69	13.59	8.98	0.45	23.94	26.54	29.97	32.57	35.16
20+660.11	Fosso Salica	39.47	39.93	24.68	0.62	86.52	98.20	113.64	125.31	136.99
20+660.11	Canale della Molla int. 2	8.70	11.46	7.66	0.45	20.20	22.39	25.28	27.47	29.66
22+004.80	Canale della Molla int. 1	5.97	8.40	5.72	0.45	14.80	16.41	18.53	20.13	21.74
25+320.00	Canale diversivo Ombrone***									
25+540.00	Fiume Ombrone	3434.30	1592.2	782.0	0.49	2960.29	3303.24	3756.60	4099.55	4442.51
29+081.99	Aff. n.2 fiume Ombrone	0.29	0.69	0.55	0.45	1.22	1.35	1.53	1.66	1.79
29+490.93	Aff. n.1 fiume Ombrone	0.61	1.28	0.98	0.45	2.25	2.50	2.82	3.06	3.31
29+721.16	Aff. n.3 fiume Ombrone	0.32	0.75	0.59	0.45	1.32	1.47	1.66	1.80	1.94

* per il Fiume Bruna i parametri sono ottenuti direttamente dalle misurazioni di portata

** trattasi presumibilmente di canale deviatore, si assume il medesimo bacino del corso principale

*** Per il canale diversivo non è possibile determinare il bacino idrologico di monte

Il metodo ALTO

Il programma “ALTO” è composto da un modulo per il calcolo dei parametri idrologici e da un altro modulo che permette la valutazione degli idrogrammi di piena nelle sezioni di interesse del reticolo idrografico considerato.

Idrologia

Le elaborazioni idrologiche sono state condotte secondo la metodologia messa a punto per la “Regionalizzazione delle portate di piena in Toscana”. Il programma prevede, per un dato tempo di ritorno, uno ietogramma di durata fissata e intensità costante. L'intensità dello ietogramma è calcolata noti i parametri della curva di possibilità pluviometrica media del bacino. La curva di possibilità pluviometrica è espressa nella seguente forma:

$$h = a d^n T^m$$

con d durata dell'evento e T tempo di ritorno.

I parametri possono assumere diversi valori per durate superiori o inferiori all'ora. In tal caso la durata limite per l'uso dell'uno o dell'altro set di valori è calcolata con la seguente formula:

$$Dl = \left[\frac{a_1 T^{(m_1-m)}}{a} \right]^{\frac{1}{n-n_1}}$$

dove Dl è la durata limite mentre il pedice 1 sta ad indicare il parametro della curva di possibilità pluviometrica per durate inferiori all'ora.

La variabilità spazio-temporale della precipitazione è messa in conto attraverso un coefficiente di riduzione, K_r , del tipo:

$$K_r = \frac{h_A(A,t)}{h(t)}$$

dove $h_A(A,t)$ è l'altezza di pioggia di durata t ragguagliata all'area A e $h(t)$ l'altezza di pioggia di durata t nel centro di scroscio.

Il valore di K_r dipende da tre fattori:

- l'estensione dell'area investita dalla precipitazione;
- la durata considerata;
- l'altezza di pioggia.

Per la quantificazione di K_r si è fatto riferimento alla formula dell'USWB opportunamente modificata per tenere in conto delle caratteristiche peculiari della Regione Toscana.

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

dove α , β , e γ sono i parametri della formula, $t(h)$ la durata della precipitazione e A (kmq) l'area del bacino.

Per la regione Toscana, nell'ambito dello studio di regionalizzazione, sono stati definiti i seguenti valori per i parametri:

- $\alpha = F_a \cdot a = 0.036 a$, dove a è il parametro della curva di possibilità pluviometrica;
- $\beta = F_b = 0.25$;
- $\gamma = F_c = 0.01$.

Il programma consente anche di utilizzare per il coefficiente di deflusso areale K_a anche l'opzione globale che utilizza la seguente formula:

$$K_a = \frac{K_v A_v - K_m A_m}{A_v - A_m}$$

con:

K_v e K_m = coefficienti di ragguaglio areale rispettivamente per il bacino di valle e di monte;

A_v e A_m = aree dei bacini rispettivamente di valle e di monte.

Il calcolo del deflusso

Il calcolo del deflusso in primo luogo necessita del calcolo della pioggia netta che nel caso specifico viene condotto con un semplice modello di infiltrazione caratterizzato da due parametri: il volume di suolo non saturo all'inizio dell'evento o perdita iniziale (indicata con I_a) che assorbe completamente la precipitazione durante i primi momenti dell'evento (dall'istante iniziale dell'evento $t=0$ sino all'istante $t=t_a$), e la perdita durante l'evento viene schematizzata con una infiltrazione costante a saturazione (indicata con K_s):

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

$$\text{se } t \geq t_a \quad \begin{cases} I_a(t) = 0 \\ P_n(t) = P(t) - K_s \end{cases}$$

dove:

$P(t)$	intensità di precipitazione ragguagliata sul bacino	mm/h
$P_n(t)$	intensità di precipitazione netta sul bacino	mm/h
$I_a(t)$	perdita iniziale all'istante t dell'evento	mm

$I_a = I_a(t_a)$	volume di perdita iniziale per unità di area	mm
K_s	velocità di infiltrazione a saturazione	mm/h

Una volta calcolata la pioggia netta, l'idrogramma di piena viene ricostruito attraverso la convoluzione con l'idrogramma unitario di Nash caratterizzato dai parametri N e K . L'integrale di convoluzione si esprime nella forma:

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

dove $Q(t)$ è la portata al tempo t e $U(t)$ l'idrogramma unitario.

Nella formulazione di Nash l'idrogramma unitario assume la forma:

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

dove n e k sono rispettivamente il parametro di forma e quello di scala.

Portate

Si riporta nel seguito il confronto tra le portate calcolate con MG e con il modello AITo (riportata per tempi di ritorno 20-100-200 anni e per i soli corsi d'acqua compresi nel database.

È possibile notare come il metodo ALTO fornisca generalmente portate notevolmente superiori rispetto al metodo MG. Le diverse pubblicazioni citate dimostrano la maggior affidabilità del modello MG rispetto al metodo ALTO.

Tabella 5.8: Confronto MG-AITo per i corsi d'acqua del lotto 3 parte1

Progr. [Km]	CORSO D'ACQUA	Bacino [Km ²]	MG			AITo		
			Q20 [m ³ /s]	Q100 [m ³ /s]	Q200 [m ³ /s]	Q20 [m ³ /s]	Q100 [m ³ /s]	Q200 [m ³ /s]
1+239.15	Fosso della Vetricella	0.23	1.12	1.37	1.48	7.40	10.98	12.84
1+430.32	Fosso Grasceta	2.08	6.87	8.43	9.11	30.97	46.68	54.56
1+790.05	Affluente fosso Grasceta	0.40	1.76	2.16	2.34	18.56	26.51	30.74
2+183.34	Fosso Pelagone	0.10	0.56	0.69	0.74	8.25	11.56	13.35
2+447.84	Fosso Cerrettella	2.80	8.78	10.78	11.64	38.97	56.77	66.03
3+217.63	Fosso Riccio	0.20	0.99	1.22	1.32	5.87	8.71	10.26
3+638.95	Affluente fosso Riccio	0.79	3.09	3.79	4.10	24.22	32.57	36.93
4+274.58	Fosso Botrelle	2.09	6.90	8.47	9.14	28.07	37.79	42.52
4+855.69	Fosso sant'Ansano	0.69	2.76	3.39	3.66	14.77	19.06	21.25

Progr.	CORSO D'ACQUA	Bacino	MG			AITo		
			Q20	Q100	Q200	Q20	Q100	Q200
[Km]		[Kmq]	[m³/s]	[m³/s]	[m³/s]	[m³/s]	[m³/s]	[m³/s]
5+117.36	Affluente 1 fosso Rigiolato	0.04	0.26	0.32	0.35	1.86	2.39	2.66
5+250.32	Affluente 2 fosso Rigiolato	0.34	1.54	1.89	2.04		33.98	38.12
5+548.15	Affluente 3 fosso Rigiolato	0.22	1.08	1.32	1.43	13.04	17.05	19.11
5+809.76	Affluente 4 fosso Rigiolato	0.05	0.32	0.39	0.42	2.85	3.67	4.09
5+871.89	Affluente 5 fosso Rigiolato	0.02	0.15	0.18	0.20	2.82	3.63	4.05
6+039.86	Affluente 6 fosso Rigiolato	0.67	2.70	3.31	3.58	15.40	20.32	22.84
6+584.82	Fosso del Rigiolato	0.58	2.40	2.94	3.17	15.21	19.67	21.95
7+081.92	Fosso del Melo	1.22	4.43	5.43	5.86	19.34	25.90	29.28
7+311.92	Fosso senza nome A	0.13	0.70	0.86	0.92	9.83	12.73	14.22
7+594.87	Fosso senza nome B	0.09	0.51	0.63	0.68	10.25	13.28	14.84
8+031.02	Fosso senza nome C	0.52	2.19	2.69	2.90	17.44	23.03	25.90
8+397.96	Fosso senza nome D	0.13	0.70	0.86	0.92			
8+992.32	Fosso senza nome E	1.16	4.24	5.21	5.62	23.46	31.19	35.17
9+265.14	Fosso senza nome F	0.10	0.56	0.69	0.74	6.06	8.20	9.31
9+501.07	Fosso di Valle di Pesco	0.49	2.08	2.56	2.76	16.16	21.90	24.87
10+092.91	Fosso di Querciona	0.73	2.90	3.55	3.84	21.99	29.61	33.53
10+367.36	Aff. Torrente Sovata 1	0.35	1.58	1.94	2.09	12.27	16.63	18.86
11+101.91	Aff. Torrente Sovata 2	0.24	1.16	1.42	1.53	11.08	14.82	16.73
11+691.50	Aff. Torrente Sovata 3	0.29	1.35	1.66	1.79	12.36	16.14	18.07
12+744.83	Fosso della Valle	1.98	6.60	8.10	8.74	29.73	39.58	44.62

Tabella 5.9: Confronto MG-AITo per i corsi d'acqua del lotto 3 parte2

Progr.	CORSO D'ACQUA	Bacino	MG			AITo		
			Q20	Q100	Q200	Q20	Q100	Q200
[Km]		[Kmq]	[m³/s]	[m³/s]	[m³/s]	[m³/s]	[m³/s]	[m³/s]
0+370.88	Fosso del Boccheraio	1.81	6.12	7.51	8.10	34.39	45.52	51.16
0+814.25	Fosso della Rovina	0.95	3.61	4.43	4.78	11.82	15.58	17.50
1+069.35	Aff. fosso della Rovina	0.81	3.17	3.89	4.20	26.16	34.16	38.24
1+449.87	Fosso Mollarella nuovo	0.46	1.97	2.42	2.61			
2+315.55	Aff. torrente Sovata 4	0.40	1.76	2.16	2.33	8.12	10.47	11.67
2+470.73	Aff. torrente Sovata 5	0.09	0.53	0.65	0.70			

Progr. [Km]	CORSO D'ACQUA	Bacino	MG			AITo		
		[Kmq]	Q20 [m ³ /s]	Q100 [m ³ /s]	Q200 [m ³ /s]	Q20 [m ³ /s]	Q100 [m ³ /s]	Q200 [m ³ /s]
3+750.83	Fosso Mollarello	2.33	7.54	9.25	9.99	36.89	47.67	53.19
3+909.58	Fosso Secca	0.46	1.97	2.42	2.61			
1+960.00	Fiume Bruna	229.00	354	454	497	470.40	694.95	817.40
6+017.79	Fosso Beccarello	6.33	17.22	21.13	22.82	51.29	68.91	77.85
6+899.83	Il Fossone	0.87	3.34	4.10	4.42	1.23	1.70	1.93
7+425.11	Fosso Sansucolo	0.28	1.33	1.63	1.76	3.87	5.21	5.91
8+164.00	Torrente Fossa	118.21	232.35	294.54	321.33	262.49	384.01	450.28
8+346.81	Fosso Rigoni	0.48	2.05	2.51	2.71			
9+620.24	Fosso Rigo	0.69	2.76	3.39	3.66			
11+408.41	Affluente canale Allacciante degli Acquisti superiore	0.46	1.98	2.43	2.63			
12+151.59	Canale Allacciante degli Acquisti superiore	1.42	5.00	6.14	6.63			
14+272.57	Aff. fosso Bottegone	9.09	23.22	28.50	30.77			
14+440.00	Fosso Bottegone	9.09	23.22	28.50	30.77			
15+309.64	Fosso Pesciatino	14.60	34.32	42.11	45.47			
15+409.47	Diversivo fosso Pesciatino	0.33	1.50	1.84	1.99			
17+080.00	Fosso senza nome G	0.30	1.39	1.71	1.84			
17+680.94	Affluente fosso san Rocco	0.27	1.28	1.58	1.70			
18+103.25	Affluente canale della Molla	0.29	1.36	1.67	1.80			
18+598.63	Canale della Molla int. 3	10.69	26.54	32.57	35.16			
20+660.11	Fosso Salica	39.47	98.20	125.31	136.99			
20+660.11	Canale della Molla int. 2	8.70	22.39	27.47	29.66			
22+004.80	Canale della Molla int. 1	5.97	16.41	20.13	21.74			
25+320.00	Canale diversivo Ombrone							
25+540.00	Fiume Ombrone	3434.30	3303.24	4099.55	4442.51	2149.06	3211.24	3788.50
29+081.99	Aff. n.2 fiume Ombrone	0.29	1.35	1.66	1.79			
29+490.93	Aff. n.1 fiume Ombrone	0.61	2.50	3.06	3.31			
29+721.16	Aff. n.3 fiume Ombrone	0.32	1.47	1.80	1.94			

Dati di portata forniti dai consorzi

Per alcuni corsi d'acqua gestiti dal Consorzio di Bonifica Grossetana vengono forniti i dati di portata alle sezioni di chiusura di interesse.

Le portate vengono generalmente calcolate applicando la ben nota formula razionale, assumendo un coefficiente di deflusso pari a 0.7. I valori ottenuti sono generalmente in linea coi risultati forniti dalla formula MG. I bacini indicati dal consorzio discostano leggermente rispetto a quanto individuato da DTM.

Per alcuni corsi d'acqua, i valori di portata fino ad un dato tempo di ritorno sono pari a 0. Questi canali funzionano probabilmente da scolmatori e pertanto si attivano solo in caso di eventi eccezionali; in questi casi la differenza con le portate calcolate con MG possono essere molto sensibili.

I corsi d'acqua per i quali sono disponibili dati sono tutti compresi nel lotto 3 parte 2

Stante il loro carattere ufficiale, indipendentemente dalle considerazioni idrologiche precedentemente riportate, i valori forniti dal consorzio vengono presi come riferimento.

I dati forniti si riferiscono a tempi di ritorno di 2-30-100-200. Rispetto al set di portate di interesse mancano i dati relativi alle portate con tempo di ritorno 10-20-50 anni; laddove diversi da zero si è quindi mantenuto il valore fornito dalla formula MG

Tabella 5.10: Portate fornite dal Consorzio di Bonifica Grossetana (per tempi di ritorno 100 e 200 anni)

Progr.	CORSO D'ACQUA	Bacino	Metodo MG			Dati C.B Grossetana	
			Q10	Q20	Q50	Q100	Q200
[Km]		[Kmq]	[m³/s]	[m³/s]	[m³/s]	[m³/s]	[m³/s]
3+750.83	Fosso Mollarello	2.96	6.80	7.54	8.51	10.07	11.04
6+017.79	Fosso Beccarello	5.52	15.54	17.22	19.45	19.49	21.37
8+164.00	Torrente Fossa	114.83	205.57	232.35	267.76	287.34	315.58
14+440.00	Fosso Bottegone	2.16	0	0	0	0	1.07
15+309.64	Fosso Pesciatino	7.51	0	0	0	0	2.86
18+598.63	Canale della Molla int. 3	15.65	0	0	0	0	4.89

Riepilogo portate

Si riportano di seguito le tabelle di riepilogo con le portate utilizzate nella modellazione idraulica.

La nota in ultima colonna indica la modalità di calcolo della portata:

- CB dati di portata forniti dal Consorzio di Bonifica
- MG1 portata calcolata col metodo MG a partire dalle misurazioni dirette di portata

- MG2 portata calcolata col metodo MG con CV calcolato da regressione lineare (per bacini superiori a 15 kmq)
- MG3 portata calcolata col metodo MG con CV=0.45 correlato ai dati di pioggia (per bacini inferiori a 15 kmq)
- DIV Canale diversivo Ombrone, per il quale non è determinabile il bacino di riferimento; in mancanza di dati ufficiali si adotta nelle verifiche il massimo valore compatibile con le dimensioni della sezione di deflusso compresa tra le arginature

Tabella 5.11: Riepilogo delle portate per i corsi d'acqua del lotto 3 parte 1

Codice scheda	Progr.	CORSO D'ACQUA	Q10	Q20	Q50	Q100	Q200	Metodo calcolo portata
	[Km]		[m³/s]	[m³/s]	[m³/s]	[m³/s]	[m³/s]	
SI\001	1+239.15	Fosso della Vetricella	1.01	1.12	1.26	1.37	1.48	MG3
SI\002	1+430.32	Fosso Grasceta	6.20	6.87	7.76	8.43	9.11	MG3
SI\003	1+790.05	Affluente fosso Grasceta	1.59	1.76	1.99	2.16	2.34	MG3
SI\004	2+183.34	Fosso Pelagone	0.51	0.56	0.63	0.69	0.74	MG3
SI\005	2+447.84	Fosso Cerrettella	7.92	8.78	9.92	10.78	11.64	MG3
SI\006	3+217.63	Fosso Riccio	0.90	0.99	1.12	1.22	1.32	MG3
SI\007	3+638.95	Affluente fosso Riccio	2.79	3.09	3.49	3.79	4.10	MG3
SI\008	4+274.58	Fosso Botrelle	6.23	6.90	7.79	8.47	9.14	MG3
SI\009	4+855.69	Fosso sant'Ansano	2.49	2.76	3.12	3.39	3.66	MG3
SI\010	5+117.36	Affluente 1 fosso Rigiolato	0.24	0.26	0.30	0.32	0.35	MG3
SI\011	5+250.32	Affluente 2 fosso Rigiolato	1.39	1.54	1.74	1.89	2.04	MG3
SI\012	5+548.15	Affluente 3 fosso Rigiolato	0.97	1.08	1.22	1.32	1.43	MG3
SI\013	5+809.76	Affluente 4 fosso Rigiolato	0.29	0.32	0.36	0.39	0.42	MG3
SI\014	5+871.89	Affluente 5 fosso Rigiolato	0.13	0.15	0.17	0.18	0.20	MG3
SI\015	6+039.86	Affluente 6 fosso Rigiolato	2.43	2.70	3.05	3.31	3.58	MG3
SI\016	6+584.82	Fosso del Rigiolato	2.16	2.40	2.71	2.94	3.17	MG3
SI\017	7+081.92	Fosso del Melo	3.99	4.43	5.00	5.43	5.86	MG3
SI\018	7+311.92	Fosso senza nome A	0.63	0.70	0.79	0.86	0.92	MG3
SI\019	7+594.87	Fosso senza nome B	0.46	0.51	0.58	0.63	0.68	MG3
SI\020	8+031.02	Fosso senza nome C	1.97	2.19	2.47	2.69	2.90	MG3
SI\060	8+397.96	Fosso senza nome D	0.63	0.70	0.79	0.86	0.92	MG3

Codice scheda	Progr.	CORSO D'ACQUA	Q10	Q20	Q50	Q100	Q200	Metodo calcolo portata
	[Km]		[m³/s]	[m³/s]	[m³/s]	[m³/s]	[m³/s]	
SI\021	8+992.32	Fosso senza nome E	3.83	4.24	4.79	5.21	5.62	MG3
SI\022	9+265.14	Fosso senza nome F	0.51	0.56	0.63	0.69	0.74	MG3
SI\023	9+501.07	Fosso di Valle di Pesco	1.88	2.08	2.35	2.56	2.76	MG3
SI\024	10+092.91	Fosso di Querciona	2.61	2.90	3.27	3.55	3.84	MG3
SI\025	10+367.36	Aff. Torrente Sovata 1	1.42	1.58	1.78	1.94	2.09	MG3
SI\026	11+101.91	Aff. Torrente Sovata 2	1.04	1.16	1.31	1.42	1.53	MG3
SI\027	11+691.50	Aff. Torrente Sovata 3	1.22	1.35	1.53	1.66	1.79	MG3
SI\028	12+744.83	Fosso della Valle	5.95	6.60	7.45	8.10	8.74	MG3

Tabella 5.12: Riepilogo delle portate per i corsi d'acqua del lotto 3 parte 2

Codice scheda	Progr.	CORSO D'ACQUA	Q10	Q20	Q50	Q100	Q200	Metodo calcolo portata
	[Km]		[m³/s]	[m³/s]	[m³/s]	[m³/s]	[m³/s]	
SI\029	0+370.88	Fosso del Boccheraio	5.52	6.12	6.91	7.51	8.10	MG3
SI\030	0+814.25	Fosso della Rovina	3.26	3.61	4.07	4.43	4.78	MG3
SI\031	1+069.35	Aff. fosso della Rovina	2.86	3.17	3.58	3.89	4.20	MG3
SI\032	1+449.87	Fosso Mollarella nuovo	1.78	1.97	2.23	2.42	2.61	MG3
SI\033	2+315.55	Aff. torrente Sovata 4	1.59	1.76	1.99	2.16	2.33	MG3
SI\034	2+470.73	Aff. torrente Sovata 5	0.48	0.53	0.60	0.65	0.70	MG3
SI\035	3+750.83	Fosso Mollarello	6.80	7.54	8.51	10.07	11.04	CB
SI\036	3+909.58	Fosso Secca	1.78	1.97	2.23	2.42	2.61	MG3
SI\037	1+960.00	Fiume Bruna	311	354	411	454	497	MG1
SI\038	6+017.79	Fosso Beccarello	15.54	17.22	19.45	19.49	21.37	CB
SI\039	6+899.83	Il Fossone	3.01	3.34	3.77	4.10	4.42	MG3
SI\040	7+425.11	Fosso Sansucolo	1.20	1.33	1.50	1.63	1.76	MG3
SI\041	8+164.00	Torrente Fossa	205.57	232.35	267.76	287.34	315.58	CB
SI\042	8+346.81	Fosso Rigoni	1.85	2.05	2.31	2.51	2.71	MG3
SI\043	9+620.24	Fosso Rigo	2.49	2.76	3.12	3.39	3.66	MG3
SI\044	11+408.41	Affluente canale Allacciante degli Acquisti superiore	1.79	1.98	2.24	2.43	2.63	MG3
SI\045	12+151.59	Canale Allacciante degli Acquisti superiore	4.51	5.00	5.65	6.14	6.63	MG3

Codice scheda	Progr.	CORSO D'ACQUA	Q10	Q20	Q50	Q100	Q200	Metodo calcolo portata
	[Km]		[m³/s]	[m³/s]	[m³/s]	[m³/s]	[m³/s]	
SI\046	14+272.57	Aff. fosso Bottegone	20.95	23.22	26.23	28.50	30.77	MG3
SI\047	14+440.00	Fosso Bottegone	0.00	0.00	0.00	0.00	1.07	CB
SI\048	15+309.64	Fosso Pesciatino	0.00	0.00	0.00	0.00	2.86	CB
SI\049	15+409.47	Diversivo fosso Pesciatino	1.36	1.50	1.70	1.84	1.99	MG3
SI\050	17+080.00	Fosso senza nome G	1.25	1.39	1.57	1.71	1.84	MG3
SI\051	17+680.94	Affluente fosso san Rocco	1.16	1.28	1.45	1.58	1.70	MG3
SI\052	18+103.25	Affluente canale della Molla	1.23	1.36	1.54	1.67	1.80	MG3
SI\053	18+598.63	Canale della Molla int. 3	0.00	0.00	0.00	0.00	4.89	CB
SI\061	20+660.11	Fosso Salica	86.52	98.20	113.64	125.31	136.99	MG2
SI\054	20+660.11	Canale della Molla int. 2	20.20	22.39	25.28	27.47	29.66	MG3
SI\055	22+004.80	Canale della Molla int. 1	14.80	16.41	18.53	20.13	21.74	MG3
SI\056	25+320.00	Canale diversivo Ombrone					150.00	DIV
SI\057	25+540.00	Fiume Ombrone	2960.29	3303.24	3756.60	4099.55	4442.51	MG2
SI\058	29+081.99	Aff. n.2 fiume Ombrone	1.22	1.35	1.53	1.66	1.79	MG3
SI\059	29+490.93	Aff. n.1 fiume Ombrone	2.25	2.50	2.82	3.06	3.31	MG3
SI\062	29+721.16	Aff. n.3 fiume Ombrone	1.32	1.47	1.66	1.80	1.94	MG3

6. IDRAULICA

Criteri di compatibilità

La verifica di compatibilità idraulica degli attraversamenti sui corsi d'acqua è stata svolta in conformità con la normativa vigente, in particolare:

- D.M. 4 maggio 1990 “Aggiornamento delle norme tecniche per la progettazione, l'esecuzione e il collaudo dei ponti stradali”;
- Circolare n.34233 del 25 febbraio 1991 del Ministero LL.PP. “Istruzioni relative alla normativa tecnica dei ponti stradali”;

I calcoli idraulici vengono eseguiti per diversi tempi ritorno, assumendo poi come riferimento l'evento due centennale.

Costruzione del modello geometrico

La costruzione del modello geometrico ha avuto come punto di partenza i dati di rilievo forniti:

- Rilievo celerimetrico in scala 1:500 della fascia occupata dall'autostrada;
- Sezioni idrauliche dei corsi d'acqua interferiti dal progetto autostradale;
- Rilievo di tutte le opere d'arte esistenti e relative schede monografiche.
- Modello digitale del terreno a maglia 10x10 o 20x20

Il modello così costruito è stato sottoposto, per mezzo del codice di calcolo Hec-Ras, a simulazione idraulica in moto permanente (portata costante e geometria variabile) con portata di piena calcolata per ogni singolo corso d'acqua in base alla metodologia esposta precedentemente, valutando quindi le condizioni di moto in corrispondenza dei vari attraversamenti autostradali al fine di verificare la compatibilità idraulica dell'opera secondo i criteri adottati dalla normativa vigente.

Vengono inoltre costruiti, sulla base dei rilievi planimetrici tridimensionali forniti per ciascun corso d'acqua, i modelli digitali del terreno (DTM) dell'area adiacente il manufatto di attraversamento.

Infine, sui DTM così ottenuti vengono riportati i risultati delle modellazioni idrauliche condotte; i dati output vengono interpretati con il software applicativo Hec-GeoRAS 3.1.1 che, confrontando in ogni punto della griglia del DTM il livello idrico con il livello del terreno, restituisce le planimetrie delle aree di allagamento

Il codice di calcolo Hec-RAS 4.1.0

Grazie all'impiego di un apposito modello matematico di simulazione idraulica è stato possibile utilizzare la schematizzazione dinamica delle equazioni differenziali di De Saint Venant che, richiedendo le condizioni al contorno sia a monte che a valle, permette, tra l'altro, di considerare anche eventuali "effetti di rigurgito".

Il fenomeno del moto vario in una corrente naturale può essere quindi ben rappresentato dalle equazioni comunemente note come equazioni di De Saint Venant. Esse sono valide per il moto gradualmente variato, in cui sia le variazioni nel tempo sia le variazioni nello spazio non siano eccessivamente brusche.

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

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(\beta QV)}{\partial x} = -gA \frac{\partial Z_w}{\partial x} - \frac{\tau_0 P}{\rho_0} + qU_q$$

La prima equazione rappresenta la legge di conservazione della massa liquida, specificata nel caso di densità costante.

Il codice di calcolo HEC-RAS del U.S. Army Corps of Engineers consente di determinare il profilo idraulico, lungo un determinato tratto fluviale o canale artificiale, in condizioni di moto stazionario e gradualmente variato. Possono essere analizzate condizioni di moto subcritiche, condizioni di moto critiche e condizioni di regime misto. Il codice di calcolo permette di descrivere in maniera dettagliata la geometria delle singole sezioni idrauliche, tenendo conto di scabrezze differenti non solo in diversi tratti del corso d'acqua, ma anche all'interno della stessa sezione, ad esempio per differenziare le zone golenali e il canale principale. Esso consente di modellare l'andamento meandriforme di un corso d'acqua, pur rimanendo in ambito monodimensionale, indicando differenti lunghezze del tratto che separa due sezioni adiacenti per la golena in sponda sinistra, la golena in sponda destra e il canale principale.

Le ipotesi caratterizzanti il codice di calcolo sono:

- il moto della corrente è permanente e gradualmente variato;

- il deflusso della corrente è monodimensionale: le componenti della velocità nelle direzioni diverse da quella principale della corrente non vengono considerate. Le equazioni utilizzate assumono che il carico totale è lo stesso per tutti i punti appartenenti ad una generica sezione;
- la pendenza del fondo alveo è limitata (inferiore a 1:10);
- la cadente è assunta costante tra due sezioni adiacenti;
- la geometria delle sezioni idrauliche è fissa.

Il programma di calcolo opera integrando le equazioni generali del moto secondo il metodo denominato nella letteratura anglosassone "Standard Step Method". Il processo di calcolo si sviluppa a seconda delle caratteristiche della corrente, lenta o veloce, dalla sezione estrema di valle o dalla sezione estrema di monte, dove vengono assegnate dall'utente le condizioni al contorno, e procede verso l'altro estremo.

In corrispondenza dei ponti o di eventuali canali a sezione chiusa, dove i meccanismi caratterizzanti il fenomeno sono più complessi, vengono utilizzati metodi di calcolo specifici.

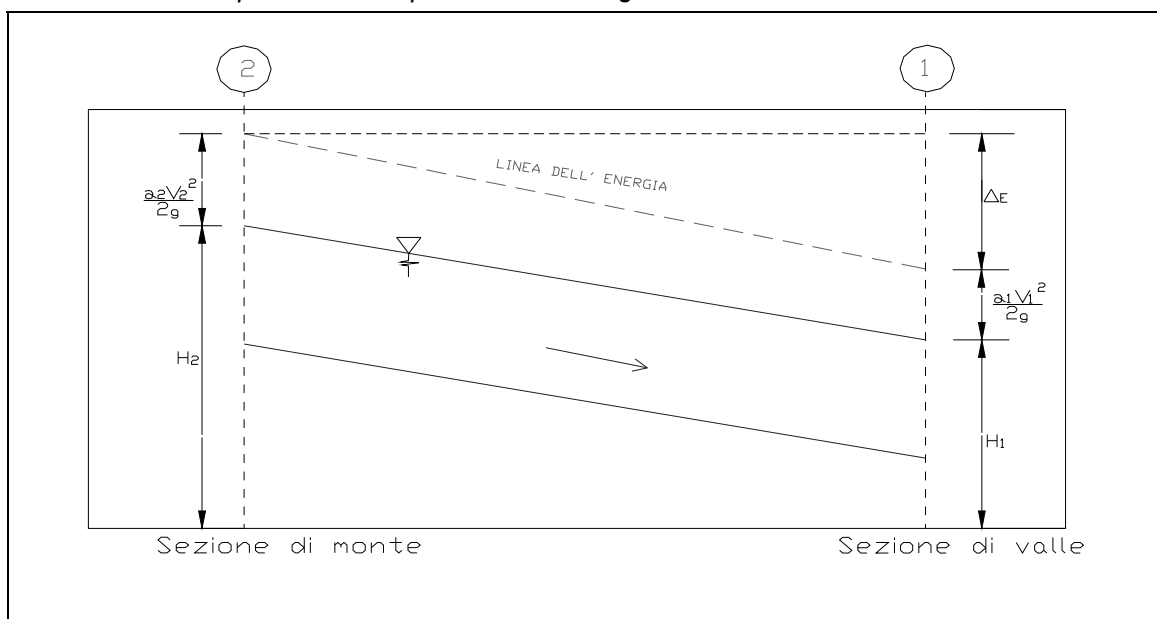
L'equazione differenziale fondamentale del moto permanente, viene risolta nella seguente forma:

$$H_2 + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} = H_1 + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} + \Delta E \quad (1)$$

dove (vedi fig.seguente):

H_1 , H_2 rappresentano le quote assolute della superficie della corrente alle sezioni 1 e 2;
 v_1 , v_2 rappresentano le velocità medie della corrente (portata totale/area totale bagnata);
 α_1 , α_2 sono i coefficienti di ragguglio della potenza cinetica (coefficienti di Coriolis);
 ΔE rappresenta la perdita di carico tra le sezioni 2 e 1.

Figura 6.1: Grandezze presenti nell'equazione dell'energia



La perdita di carico tra due sezioni è data dalla somma delle perdite distribuite lungo il tratto d'alveo compreso tra le due sezioni e le eventuali perdite dovute alla contrazione o alla espansione della corrente. L'espressione che permette il calcolo della perdita di carico risulta:

$$\Delta E = LJ + C \left| \alpha_2 \frac{v_2^2}{2g} - \alpha_1 \frac{v_1^2}{2g} \right| \quad (2)$$

dove:

L è la lunghezza del tratto d'alveo in esame;

J è la cadente piezometrica;

C è il coefficiente che tiene conto dei fenomeni di contrazione ed espansione della corrente.

La distanza L tra due successive sezioni viene valutata con la seguente espressione:

$$L = \frac{L_{gs}Q_{gs} + L_cQ_c + L_{gd}Q_{gd}}{Q_{gs} + Q_c + Q_{gd}} \quad (3)$$

dove:

L_{gs} , L_{gd} , L_c rappresentano rispettivamente la distanza percorsa dalla corrente in golena sinistra, destra e nel canale principale;

Q_{gs} , Q_{gd} , Q_c rappresentano le portate rispettivamente defluite alla sezione terminale in golena sinistra, destra e nel canale principale.

La cadente piezometrica può essere ricavata attraverso la seguente espressione:

$$J = \left(\frac{Q_1 + Q_2}{k_1 + k_2} \right)^2$$

essendo:

Q_1 , Q_2 rispettivamente la portata transitata alla sezione 1 e alla sezione 2;

k_1 , k_2 la capacità di deflusso (conveyance) totale rispettivamente associata alla sezione 1 e alla sezione 2.

La capacità di deflusso è calcolabile attraverso la seguente espressione:

$$k = \frac{1}{n} AR^{2/3} \quad (4)$$

essendo:

n = coefficiente di Manning;

A = area bagnata;

R = raggio idraulico.

La capacità di deflusso complessiva di una determinata sezione è data dalla somma delle capacità di deflusso delle due golene e del canale principale. Ciascuna parte con cui si è idealmente suddivisa la sezione idraulica è infatti caratterizzata, una volta noto o ipotizzato il tirante idrico, da una determinata area bagnata e raggio idraulico; da qui la possibilità di applicare la formula (4) per calcolare la capacità di deflusso per la golena in sponda destra, sinistra e per il canale principale.

Il coefficiente di ragguglio della potenza cinetica (coefficiente di Coriolis) viene calcolato attraverso la seguente espressione:

$$\alpha = \left(\frac{k_{gs}^3}{A_{gs}^2} + \frac{k_c^3}{A_c^2} + \frac{k_{gd}^3}{A_{gd}^2} \right) \frac{A_t^2}{k_t^3}$$

dove:

A_t , A_{gs} , A_{gd} , A_c rappresentano l'area totale bagnata della sezione, l'area bagnata in golena destra, in golena sinistra e nel canale principale;

k_t , k_{gs} , k_{gd} , k_c rappresentano la capacità di deflusso della sezione nel suo complesso, per la golena sinistra, la golena destra e per il canale principale.

Il coefficiente C viene introdotto per tenere conto delle perdite energetiche dovute ai fenomeni di espansione o di contrazione della corrente. Esso viene definito dall'utente, sezione per sezione, in funzione delle caratteristiche del fenomeno di transizione. I valori tipici di tale coefficiente vengono indicati in tabella.

Tabella 6.1: valori tipici del coefficiente C

Descrizione	Coefficiente di contrazione	Coefficiente di espansione
Nessuna perdita per contrazione o espansione	0.0	0.0
Transizione graduale	0.1	0.3
Ponti	0.3	0.5
Transizioni molto brusche	0.6	0.8

La risoluzione delle equazioni (1) e (2) attraverso un procedimento iterativo permette di determinare l'andamento del profilo idrico in moto permanente una volta assegnate le caratteristiche geometriche e fisiche dell'alveo e le condizioni ai limiti del problema. Il processo di risoluzione è volto essenzialmente ad individuare quel tirante idrico (nella sezione in cui esso non risulta già noto o calcolato in precedenza) che permette di verificare il bilancio energetico, espresso dall'equazione (1), a meno di una tolleranza prefissata e ritenuta soddisfacente dall'utente. Per i dettagli computazionali si rinvia alla documentazione del codice di calcolo.

Nei casi in cui si verifica il passaggio attraverso lo stato critico, l'equazione dell'energia (1) non può essere applicata in quanto la transizione tra moto subcritico e moto supercritico e viceversa non rispetta le ipotesi di moto gradualmente variato. Ciò può, ad esempio, verificarsi in seguito a significativi cambi di pendenza o alla presenza di forti restringimenti della sezione idraulica. In questi casi il codice di calcolo permette di risolvere il problema utilizzando o delle formule empiriche oppure l'equazione del momento.

In particolare l'equazione del momento può essere applicata, nel codice di calcolo HEC-RAS in tre differenti situazioni:

- presenza di un risalto idraulico;
- condizioni di deflusso attraverso un ponte senza che si generi un processo di moto in pressione;
- immissione di una corrente in un'altra corrente.

Senza entrare nei particolari, per i quali si rimanda alla letteratura specializzata, è qui il caso solo di riportare l'equazione del momento applicata ad una determinata massa d'acqua compresa tra due sezioni distinte 1 e 2:

$$P_1 - P_2 + W_x - F_f = Q\rho\Delta V_x$$

dove (vedi fig seguente):

P_i = forza legata alla pressione idrostatica agente sulle sezioni 1 e 2;

W_x = forza peso proiettata nella direzione del moto;

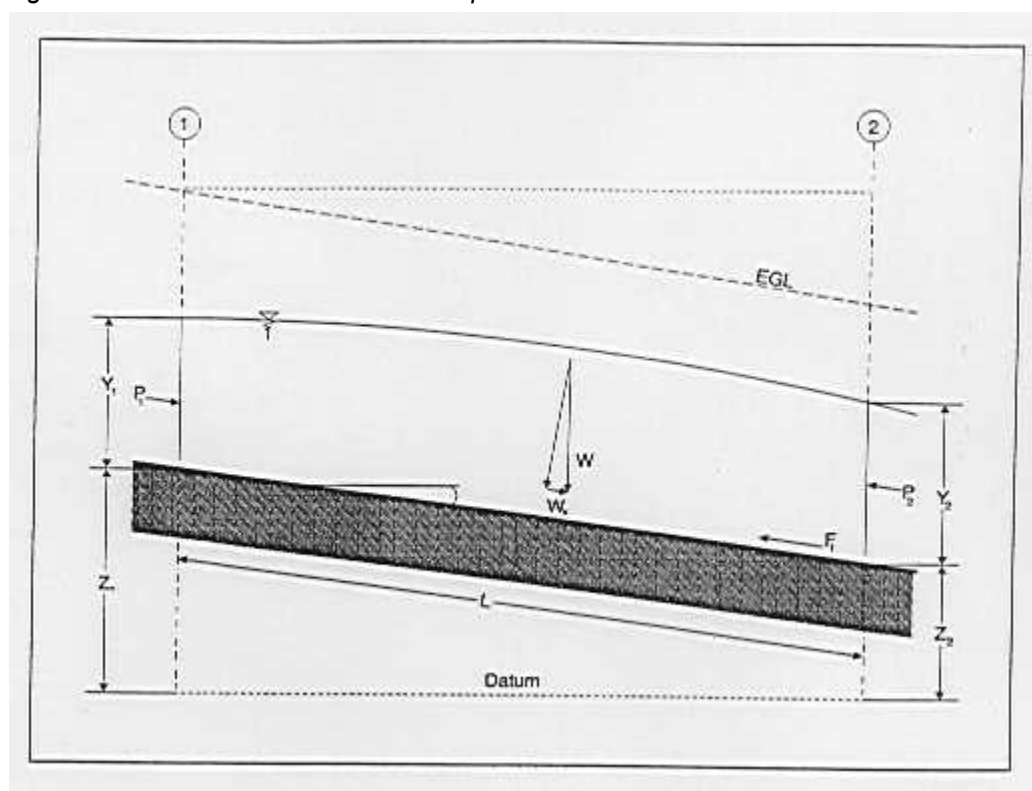
F_f = forza legata agli attriti;

Q = portata;

ρ = densità dell'acqua;

ΔV_x = variazione di velocità nella direzione del moto.

Figura 6.2: Elementi caratteristici dell'equazione del momento



Come si è già avuto modo di sottolineare in corrispondenza dei ponti, dove i meccanismi caratterizzanti il fenomeno sono più complessi, vengono utilizzati metodi di calcolo specifici. Il

codice di calcolo permette di considerare l'intera gamma di condizioni che possono generarsi in un processo di deflusso attraverso un ponte. Tali condizioni vengono qui di seguito riportate:

- la corrente non viene in contatto con l'intradosso del ponte (Low flow);
- la corrente viene in contatto con l'intradosso del ponte (Pressure/Weir flow).

La prima condizione a sua volta prevede i seguenti casi:

- la corrente si mantiene lenta durante l'attraversamento del ponte (Class A low flow);
- la corrente transita attraverso la profondità critica (Class B low flow);
- la corrente si mantiene veloce durante l'attraversamento del ponte (Class C low flow).

La seconda condizione prevede a sua volta i seguenti casi:

- il ponte risulta in pressione (Pressure flow);
- il ponte viene sormontato (Pressure and Weir flow).

Le perdite energetiche caratteristiche del deflusso attraverso la struttura comprendono:

- le perdite che si sviluppano nei tratti immediatamente a monte e a valle del manufatto. Tali perdite sono dovute essenzialmente ai processi di contrazione ed espansione della corrente;
- le perdite che si generano proprio nel processo di deflusso attraverso la struttura.

In funzione delle condizioni di deflusso che vengono a crearsi, si applicano metodi di calcolo differenti per valutare le perdite di carico e quindi l'andamento del profilo idraulico nell'intorno della struttura.

Il codice di calcolo permette di risolvere i problemi relativi al deflusso delle acque attraverso i tombini. La risoluzione di tali problemi si fonda sull'approccio teorico proposto nella letteratura specializzata (vedi ad esempio "*Open Channel Hydraulics*", V.T.Chow).

Il tipo di deflusso attraverso un tombino può essere catalogato come deflusso con sezione di controllo presso l'imbocco (in seguito "**inlet control**") o con sezione di controllo presso l'uscita ("**outlet control**").

Nel caso di "inlet control" la capacità del tombino dipende dal carico idraulico alla sezione di approccio, dalla geometria della sezione di ingresso, dal tipo di imbocco. La scabrezza del tombino, la sua lunghezza e pendenza, le condizioni idrauliche del ricettore di valle non sono elementi determinanti in grado di influenzare la capacità di deflusso.

Nel caso di "outlet control" gli elementi determinanti per fissare la capacità idraulica del tombino sono, oltre a quelli caratteristici del caso precedente, la lunghezza, la pendenza e la scabrezza del tombino e le caratteristiche idrauliche del ricettore di valle.

Il codice di calcolo risolve generalmente il problema calcolando, per la portata fissata dall'utente, il tirante idrico nella sezione di approccio al tombino utilizzando sia le equazioni adatte ai casi di "inlet control" sia quelle per i casi di "outlet control". Si assume quindi che la soluzione è quella cui è associato il massimo tirante idrico.

Nei casi di "inlet control" il tirante idrico a monte del tombino viene calcolato schematizzando il moto della corrente come quello che si genera sotto una paratoia a battente. Nei casi di "outlet control" il tirante idrico a monte del tombino viene calcolato a partire dal tirante idrico alla sezione di sbocco del tombino e considerando le perdite energetiche concentrate e distribuite che si determinano nel processo di deflusso.

Risultati delle simulazioni

I risultati delle simulazioni sono riportati nell'elaborato IDR009 che riassume le analisi idrauliche effettuate in condizioni di stato di fatto e di progetto modellando il manufatto di attraversamento autostradale così come rilevato dalle campagne di rilievo topografico. Esse riportano:

- **planimetria degli allagamenti** (scala variabile), costituita dal DEM costruito per la zona di interesse su cui vengono riportate le aree di allagamento derivanti dalla modellazione Hec-ras per il tempo di ritorno di riferimento di 200 anni;
- **profilo longitudinale**, costituito da un diagramma in cui vengono riportati l'andamento longitudinale del fondo alveo e delle sponde destra e sinistra del tratto di corso d'acqua modellato e il profilo di corrente ricavato dalle modellazioni;
- sezione trasversale del **ponte autostradale**, derivante dal rilievo topografico, su cui viene indicato il livello idrico relativo alla portata duecentennale;
- indicazione della **portata duecentennale** utilizzata per la modellazione.

Come condizione di valle nelle simulazioni si è considerato il livello di moto uniforme.

Si riporta nel seguito, per ogni corso d'acqua, un breve commento ai risultati ottenuti.

FOSSO DELLA VETRICELLA

Nella situazione attuale il corso d'acqua presenta problemi a valle dell'attraversamento della SS Aurelia causati dall'insufficienza dell'attraversamento posto sulla viabilità secondaria parallela.

Nella configurazione di progetto il tombino autostradale viene esteso verso valle per circa 15 m comportando la necessità di uno spostamento della viabilità secondaria.

Non si evidenziano significative variazioni delle condizioni idrauliche nello stato di progetto ed il tombino mantiene a Tr 200 anni un funzionamento a gravità con un franco superiore a 1,3 m.

FOSSO GRASCETA

Le simulazioni eseguite non evidenziano problematiche per il corso d'acqua né nella situazione attuale né dopo la realizzazione del prolungamento del tombino (15 m verso valle) previsto con i lavori di realizzazione della A12.

In franco idraulico in entrambe le simulazioni risulta pari a 1,96 m.

AFFLUENTE FOSSO GRASCETA

Come per il caso precedente le simulazioni eseguite non evidenziano problematiche per il corso d'acqua né nella situazione attuale né dopo la realizzazione dell'ampliamento del tombino (5 m in modo pressoché simmetrico rispetto all'asse stradale).

In franco idraulico in entrambe le simulazioni risulta superiore a 0,5 m.

FOSSO PELAGONE

Anche in questo caso le simulazioni eseguite non evidenziano problematiche per il corso d'acqua né nella situazione attuale né dopo la realizzazione del prolungamento del tombino (10 m in modo pressoché simmetrico rispetto all'asse stradale).

In franco idraulico, seppure restando ampiamente sufficiente, scende dagli 1,29 m dello stato attuale agli 1,03 m della configurazione di progetto.

FOSSO CERRETTELLA

La situazione del corso d'acqua è ampiamente verificata sia nello stato di fatto (franco 1,37 m) che dopo l'intervento di ampliamento della sede stradale e del relativo rilevato verso valle (franco 1,39 m).

Si segnala l'esigenza di provvedere alla nuova inalveazione del corso d'acqua a valle dell'autostrada (circa 35 m) necessaria dopo il prolungamento del tombino oltre la strada di servizio parallela alla costruenda A12. Il miglioramento del profilo comporta un incremento delle condizioni di sicurezza e spiega l'aumento del franco idraulico.

FOSSE RICCIO

La situazione del corso d'acqua è ampiamente verificata sia nello stato di fatto (franco 0,96 m) che dopo l'intervento di ampliamento della sede stradale e del relativo rilevato verso valle (franco 0,99 m).

Come per il Fosso Cerrettella si segnala l'esigenza di provvedere alla nuova inalveazione del corso d'acqua a valle dell'autostrada (circa 20 m) necessaria dopo il prolungamento del tombino oltre la strada di servizio parallela alla costruenda A12. Il miglioramento del profilo comporta un incremento delle condizioni di sicurezza e spiega l'aumento del franco idraulico.

AFFLUENTE FOSSE RICCIO

Si esprimono le considerazioni valide per il tombinamento relativo al fosso Riccio. La situazione del corso d'acqua è verificata sia nello stato di fatto (franco 0,50 m) che dopo l'intervento di ampliamento della sede stradale e del relativo rilevato (franco 0,53 m).

Come in precedenza si segnala l'esigenza di provvedere alla nuova inalveazione del corso d'acqua a valle dell'autostrada (circa 30 m) necessaria dopo il prolungamento del tombino oltre la strada di servizio parallela alla costruenda A12. Il miglioramento del profilo comporta un incremento delle condizioni di sicurezza e spiega l'aumento del franco idraulico.

FOSSE BOTRELLE

Le verifiche idrauliche condotte sul corso d'acqua non evidenziano alcuna criticità degli attraversamenti né nello stato di fatto né in quello di progetto per il quale è previsto solo un piccolo prolungamento verso valle del tombino il cui franco idraulico rimane comunque superiore ai 2 m.

FOSSE SANT'ANSANO

Nel suo sviluppo il corso d'acqua dapprima attraversa la viabilità secondaria parallela e quindi, attraverso un tombinamento di ugual dimensioni, la SS Aurelia.

Le verifiche idrauliche condotte, sia nello stato di fatto che di progetto, evidenziano nel complesso un funzionamento del tombino in pressione al transitare di una portata con tempo di ritorno pari a 200 anni.

AFFLUENTE 1 FOSSO RIGIOLATO

Analogamente alla situazione descritta nella sezione precedente anche l’Affluente 1 del Fosso Rigiolato dapprima attraversa la viabilità secondaria parallela con un tombino che tuttavia in questo caso ha dimensioni ridotte rispetto al successivo attraversamento della SS Aurelia.

Le verifiche idrauliche condotte evidenziano nel complesso un funzionamento sufficiente anche se con tempi di ritorno pari a 200 anni con un franco idraulico di 20 cm sia nella configurazione attuale che nello stato di progetto nel quale è previsto solo un modesto prolungamento dell’attraversamento esistente.

AFFLUENTE 2 FOSSO RIGIOLATO

Rispetto al tombino di attraversamento della SS Aurelia il corso d’acqua attraversa la viabilità parallela più ad est percorrendo quindi un tratto ai piedi del rilevato stradale.

Le verifiche idrauliche condotte evidenziano nel complesso un funzionamento sufficiente anche se con tempi di ritorno pari a 200 anni con un franco idraulico di 23 cm sia nella configurazione attuale che nello stato di progetto nel quale è previsto solo un piccolo prolungamento dell’attraversamento esistente.

AFFLUENTE 3 FOSSO RIGIOLATO

Situazione analoga agli attraversamenti precedenti con il corso d’acqua che dapprima attraversa la viabilità secondaria parallela e quindi la SS Aurelia.

Le verifiche idrauliche condotte evidenziano nel complesso un funzionamento critico a monte con allagamenti dovuti all’insufficienza del tombino sulla viabilità minore sia nello stato di fatto che in quello di progetto.

Il tombino di attraversamento dell’Aurelia e quindi della futura A12 risultano invece verificati con un franco idraulico pari a 0,40 m.

AFFLUENTE 4 FOSSO RIGIOLATO

Situazione analoga agli attraversamenti precedenti con il corso d’acqua che dapprima attraversa la viabilità secondaria parallela e quindi la SS Aurelia.

Le verifiche idrauliche condotte non evidenziano particolari criticità né nella situazione attuale né in seguito all’estensione necessaria per la realizzazione dell’A12 (franco idraulico 0,89 m).

AFFLUENTE 5 FOSSO RIGIOLATO

Situazione analoga all'attraversamento precedente con il corso d'acqua che dapprima attraversa la viabilità secondaria parallela e quindi la SS Aurelia.

Le verifiche idrauliche condotte non evidenziano particolari criticità né nella situazione attuale né in seguito all'estensione necessaria per la realizzazione dell'A12 (franco idraulico 0,39 m).

AFFLUENTE 6 FOSSO RIGIOLATO

Situazione analoga all'attraversamento precedente con il corso d'acqua che dapprima attraversa la viabilità secondaria parallela e quindi la SS Aurelia.

Le verifiche idrauliche condotte mostrano un funzionamento in pressione del tombino sia nello stato di fatto che in quello di progetto.

FOSSO RIGIOLATO

Le verifiche idrauliche condotte non evidenziano particolari criticità né nella situazione attuale né in seguito all'estensione necessaria per la realizzazione dell'A12. Entrambi gli scenari mostrano il manufatto di attraversamento verificato con un franco idraulico pari a 0.69 m.

FOSSO DEL MELO

Le verifiche idrauliche condotte non evidenziano particolari criticità né per il tombino di attraversamento dell'Aurelia né per quello sulla costruenda A12.

FOSSO SENZA NOME (SI018)

Le verifiche idrauliche condotte non evidenziano particolari criticità né nella situazione attuale né in seguito all'estensione necessaria per la realizzazione dell'A12 che rispetto al precedente presenta un prolungamento in direzione nord.

Il tombino di valle esterno al rilevato stradale risulta verificato con un margine di sicurezza molto residuo.

FOSSO SENZA NOME (SI019)

Le verifiche idrauliche condotte sul corso d'acqua non evidenziano particolari criticità né nella situazione attuale né in seguito all'estensione necessaria per la realizzazione dell'A12.

FOSSO SENZA NOME (SI020)

Le verifiche idrauliche condotte sul corso d'acqua non evidenziano particolari criticità né nella situazione attuale né in seguito all'estensione necessaria per la realizzazione dell'A12 che rispetto al precedente presenta un modesto prolungamento verso nord.

FOSSO SENZA NOME (SI021)

Nel suo sviluppo il corso d'acqua dapprima attraversa la viabilità secondaria parallela e quindi, attraverso un tombinamento di ugual dimensioni, la SS Aurelia. Il progetto per la nuova A12 prevede l'unione dei due tombini.

Le verifiche idrauliche condotte evidenziano un miglioramento del profilo idraulico nelle simulazioni di progetto.

FOSSO SENZA NOME (SI022)

L'allargamento della sede stradale in corrispondenza al tombino di attraversamento dell'Aurelia non comporta particolari problematiche al corso d'acqua con valori del franco comunque ampiamente verificati (1,46 m) sia nello stato di fatto che di progetto.

FOSSO DI VALLE DI PESCO

L'allargamento della sede stradale in corrispondenza al tombino di attraversamento dell'Aurelia non comporta particolari problematiche al corso d'acqua con valori del franco comunque ampiamente verificati (0,94 m) sia nello stato di fatto che di progetto nonostante qualche problema a monte a causa di un tombino dalle dimensioni insufficienti.

FOSSO DI QUERCIONA

Le dimensioni del tombino con tempo di ritorno pari a 200 anni si presentano insufficienti sia nella verifica relative allo stato di fatto che in quelle in stato di progetto, con funzionamento in pressione senza tuttavia rischi di allagamento per il piano stradale.

AFFLUENTE 1 TORRENTE SOVATA

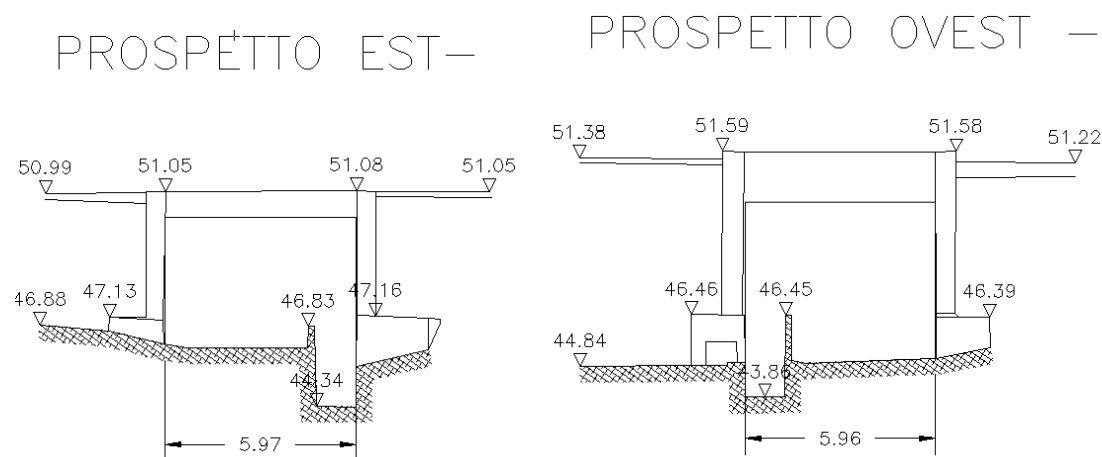
L'allargamento della SS Aurelia non comporta neanche per la simulazione di progetto alcuna criticità essendo la sezione verificata con un franco idraulico pari a 0,43 m.

AFFLUENTE 2 TORRENTE SOVATA

L'allargamento della SS Aurelia non comporta neanche per la simulazione di progetto alcuna criticità essendo la sezione verificata con un franco idraulico pari a 0,93 m.

AFFLUENTE 3 TORRENTE SOVATA

Il passaggio del corso d'acqua al di sotto della SS Aurelia avviene mediante canaletta a sezione rettangolare a cielo aperto al di sotto del sottopasso codificato in fase di rilievo come SO12.



Non sono previsti interventi in fase di progetto che vadano a modificare la lunghezza dei tombini e dell'attraversamento presente.

Le simulazioni idrauliche condotte evidenziano che la capacità di portata delle opere d'arte è comunque sufficiente a garantire un funzionamento a pelo libero al di sotto del sottopasso stradale mentre qualche problema in più si presenta sui tombini di attraversamento della viabilità secondaria.

FOSSO DELLA VALLE

La modellazione matematica condotta sul corso d'acqua evidenzia un funzionamento in pressione del tombino sia nello stato attuale che nella configurazione di progetto che consiste in un prolungamento di poco superiore a 5 m verso sud.

Si evidenziano fenomeni di allagamento della zona a monte del rilevato stradale che pur estesi non peggiorano con la realizzazione delle opere di progetto.

FOSSO DEL BOCCHERAI

Il corso d'acqua presenta estesi fenomeni di esondazione causati dall'insufficienza dell'attraversamento posto a valle del tombino.

Nella configurazione di progetto il tombino viene esteso di pochi metri a valle ed il tratto compreso tra i due attraversamenti viene rivestito in c.a. Il manufatto risulta in pressione sia in stato di fatto che di progetto.

FOSSO DELLA ROVINA

Nella configurazione di progetto si prevede di prolungare il manufatto esistente verso valle senza però interferire con il tombino esistente (di dimensioni inferiori rispetto all'attraversamento principale ed insufficiente). È inoltre prevista la sistemazione della livelletta nel tratto di valle.

Il profilo risente dell'adeguamento della livelletta di valle che porta ad un abbassamento dei livelli, riducendo le aree d'allagamento che comunque permangono a causa dell'insufficienza del tombino sulla viabilità secondaria.

In stato di fatto l'allagamento è diffuso sia monte che a valle dell'Aurelia, e il manufatto, comunque sufficiente, ha franco di 1.43 m. In progetto il franco viene portato a 1.45 m.

AFF. FOSSO DELLA ROVINA

Il corso d'acqua presenta fenomeni di esondazione a monte ed a valle dell'attraversamento causati dall'insufficienza dell'alveo; gli attraversamenti sono invece sufficienti (leggero rigurgito).

In progetto occorre riposizionare il tratto di valle dell'alveo, interessato dall'ampliamento del rilevato stradale; il suo riposizionamento consente, al contempo, di adeguarne le dimensioni permettendo di contenere le esondazioni almeno nel tratto a valle del rilevato autostradale.

FOSSO MOLLARELLA NUOVO

Il corso d'acqua non presenta rilevanti fenomeni di esondazione.

Nella configurazione di progetto non è prevista estensione del manufatto, ma risultano deviati i tratti di alveo in affiancamento al rilevato stradale. Le modificazioni al profilo sono indotte dalla sistemazione della livelletta a monte e a valle dell'attraversamento.

Non si hanno variazioni sostanziali al funzionamento del manufatto, che risulta sufficiente con un franco di circa 2.08 m sia in stato di fatto che in progetto.

AFF. TORRENTE SOVATA 4

Il corso d'acqua non presenta rilevanti fenomeni di esondazione.

Nella configurazione di progetto il tombino viene esteso di pochi metri a monte e valle. È prevista una risistemazione della livelletta di fondo a monte e valle del manufatto.

AFF. TORRENTE SOVATA 5

Il corso d'acqua non presenta rilevanti fenomeni di esondazione.

Nella configurazione di progetto il tombino viene esteso di pochi metri a monte e valle. Il profilo non varia sensibilmente. Il manufatto è sufficiente con franco di circa 1.35 m sia in stato di fatto che di progetto

FOSSO MOLLARELLO

Il corso d'acqua presenta fenomeni di esondazione nel tratto di monte.

Nella configurazione di progetto il tombino viene esteso di pochi metri a valle ed a monte.

Nel tratto di valle è prevista la sistemazione della livelletta. Il manufatto in progetto è sufficiente, con franco di 0.92 m.

FOSSO SECCA

Il corso d'acqua presenta estesi fenomeni di esondazione a monte e a valle.

Nella configurazione di progetto il tombino viene esteso di pochi metri a monte e valle. Il profilo non varia. Il manufatto risulta in pressione, sia in stato di fatto che di progetto.

FIUME BRUNA

La portata duecentennale è interamente contenuta all'interno delle arginature esistenti.

Il progetto stradale non prevede alcun intervento sulle pile esistenti. Si prevede di intervenire sul fondo in corrispondenza del viadotto, eliminando la depressione generata probabilmente dall'instaurarsi di fenomeni erosivi.

Non vi sono sensibili variazioni del profilo, con il manufatto autostradale sufficiente sia in stato di fatto che di progetto (franco 1.38 m).

FOSSO BECCARELLO

Il corso d'acqua presenta estesi fenomeni di esondazione a monte della SP152 "Vecchia Aurelia" e nel tratto intercluso tra le due viabilità.

In progetto non è prevista l'estensione del manufatto di attraversamento. Si interviene sulla livelletta a monte e valle del tombino, ma il profilo idrico non risente delle modifiche.

Il manufatto è sufficiente sia in stato di fatto che di progetto, con franco di 0.39m.

IL FOSSONE

Il corso d'acqua presenta fenomeni di esondazione a monte e a valle.

Nella configurazione di progetto il tombino viene esteso di pochi metri a valle. Nel tratto di valle è altresì prevista la sistemazione della livelletta al fine di contenere la contropendenza esistente. Ne consegue un abbassamento dei livelli che porta alla riduzione delle aree esondate. Il manufatto in progetto è sufficiente, con un franco di 0.73 m (0.62 in stato di fatto).

FOSSO SANSUCOLO

Il corso d'acqua non presenta rilevanti fenomeni di esondazione. Nella configurazione di progetto il tombino viene esteso di pochi metri a valle. Nel tratto di valle è altresì prevista la sistemazione della livelletta al fine di contenere la contropendenza esistente. Non si hanno sensibili variazioni nel profilo. Il manufatto è sufficiente sia in stato di fatto che di progetto, con un franco di 1.51 m.

TORRENTE FOSSA

Il corso d'acqua presenta fenomeni di esondazione nel solo tratto di monte, laddove da cartografia si riscontra la presenza di un ponte di viabilità secondaria. Il mancato allineamento delle nuove pile previste in progetto genera un leggero aumento nel profilo idrico di monte. Il franco idraulico pari a 0.75 m in stato di fatto si riduce a 0.64 m in progetto.

FOSSO RIGONI

Il corso d'acqua presenta fenomeni di esondazione a monte e a valle. Nella configurazione di progetto il tombino viene esteso di pochi metri a monte e valle. Nel tratto di valle è altresì prevista la sistemazione della livelletta al fine di contenere la contropendenza esistente. Le modificazioni non portano a sensibili variazioni nel profilo idrico. Il manufatto in progetto è sufficiente, con un franco di 2.20 m (2.16 in stato di fatto).

FOSSO RIGO

Il corso d'acqua non presenta fenomeni di esondazione. Nella configurazione di progetto il tombino viene esteso a monte. L'intervento non porta sensibili variazioni nel profilo idrico. Il manufatto in progetto è sufficiente, con un franco di 1.08 m in stato di fatto e progetto.

AFFLUENTE CANALE ALLACCIANTE DEGLI ACQUISTI SUPERIORE

Il corso d'acqua presenta fenomeni di esondazione nel tratto di monte. Nella configurazione di progetto non è prevista estensione del manufatto, pertanto non vi sono variazioni nel profilo idrico. Il manufatto in progetto è sufficiente, con un franco di 0.18 m.

CANALE ALLACCIANTE DEGLI ACQUISTI SUPERIORE

Il corso d'acqua non presenta rilevanti fenomeni di esondazione. Nella configurazione di progetto il tombino viene esteso a valle. Non vi sono variazioni sensibili nel profilo idrico. Il manufatto è sufficiente con franco di 0.18 m.

AFF. FOSSO BOTTEGONE

Si assegna al fosso affluente il medesimo bacino idrografico del canale principale. Il corso d'acqua presenta estesi fenomeni di esondazione a monte e a valle. Nella configurazione di progetto il tombino viene esteso a monte e valle. È prevista la sistemazione della livelletta a monte del manufatto. Le modificazioni non portano a sensibili variazioni nel profilo idrico. Il manufatto in progetto è sufficiente, con un franco di 0.45 m.

FOSSO BOTTEGONE

Le portate di progetto nella sezione di interesse sono fornite del Consorzio di Bonifica Grossetana. La portata è interamente contenuta all'interno dell'alveo. Nella configurazione di progetto non è prevista estensione del manufatto, pertanto non vi sono variazioni nel profilo idrico. Il manufatto in progetto è sufficiente, con un franco di 2.62 m.

FOSSO PESCIATINO

Le portate di progetto nella sezione di interesse sono fornite del Consorzio di Bonifica Grossetana. La portata è interamente contenuta all'interno dell'alveo. Nella configurazione di progetto il tombino viene esteso a monte. Non vi sono variazioni nel profilo idrico. Il manufatto in progetto è sufficiente, con un franco di 0.87 m.

DIVERSIVO FOSSO PESCIATINO

Il corso d'acqua presenta fenomeni di esondazione a monte e a valle.

Nella configurazione di progetto il tombino viene esteso a valle. È prevista la sistemazione della livelletta a valle del manufatto principale e della linea ferroviaria. Le modificazioni non portano a sensibili variazioni nel profilo idrico. Il manufatto in progetto è sufficiente, con un franco di 0.44 m.

FOSSO SENZA NOME (SI050)

Il corso d'acqua presenta fenomeni di esondazione a monte e a valle. Nella configurazione di progetto non è prevista estensione del tombino ma si interviene sulla livelletta nel tratto di vallo. Il profilo varia sensibilmente e si riducono le aree di allagamento. Il manufatto in progetto è sufficiente, con un franco di 1.46 m (1.16 m in stato di fatto).

AFFLUENTE FOSSO SAN ROCCO

Il corso d'acqua allo stato di fatto presenta fenomeni di esondazione a monte. Nella configurazione di progetto è previsto il prolungamento del tombino a valle ed a monte, al di sotto della stazione di servizio in progetto. Il prolungamento del tombino a monte riduce le aree di allagamento. Il manufatto in progetto è sufficiente, con un franco di 1.35 m (0.65 m in stato di fatto).

AFFLUENTE CANALE DELLA MOLLA

Il corso d'acqua allo stato di fatto presenta fenomeni di esondazione a monte ed a valle. Nella configurazione di progetto è prevista l'estensione del tombino a valle ed a monte, al di sotto del casello autostradale in progetto e la riprofilatura del fondo alveo. Gli interventi riducono leggermente le aree di allagamento. Il manufatto in progetto è sufficiente, con un franco di 1.00 m (0.91 m in stato di fatto).

CANALE DELLA MOLLA INT. 3

Le portate di progetto nella sezione di interesse sono fornite del Consorzio di Bonifica Grossetana. La portata è interamente contenuta all'interno dell'alveo. Nella configurazione di progetto il tombino viene esteso a monte. Non vi sono variazioni sostanziali nel profilo idrico.

Il manufatto in progetto è sufficiente, con un franco di 0.75 m.

CANALE DELLA MOLLA INT. 2

La portata è interamente contenuta all'interno dell'alveo. Nella configurazione di progetto non si prevede l'estensione del tombino. È prevista la sistemazione della livelletta di valle, con influenza sul profilo idrico. Il manufatto in progetto è sufficiente, con un franco di progetto, calcolato in corrispondenza dell'imbocco nel manufatto di monte, di circa 1.72 m.

CANALE DELLA MOLLA INT. 1

La portata è interamente contenuta all'interno dell'alveo. Nella configurazione di progetto il tombino viene esteso verso valle. È prevista inoltre la sistemazione della livelletta di valle. Non risultano sostanziali variazioni del profilo idrico. Il manufatto in progetto è sufficiente, con un franco di circa 1.16m.

CANALE DIVERSIVO OMBRONE

Trattandosi di canale diversivo non è possibile determinare il bacino idrologico di monte. Si determina la massima portata compatibile con la dimensione dell'alveo arginato esistente. Il valore così individuato è pari a 150 mc/s. Il viadotto della SS1 Aurelia risulta ampiamente sufficiente, con un franco di circa 10 m. Il ponte di valle, sulla via Scansanese, ha franco di 1.17m. In progetto non è previsto alcun intervento sui manufatti.

FIUME OMBRONE

Il lungo viadotto sul Fiume Ombrone interseca trasversalmente l'area golenale, interessata dal deflusso delle acque in caso di evento duecentennale. Il ponte, su cui non sono previsti interventi in progetto, risulta comunque ampiamente sufficiente, con franco di 8.51m.

AFF. N.1 FIUME OMBRONE

La portata è interamente contenuta all'interno dell'alveo. Nella configurazione di progetto il tombino viene esteso verso monte. Non risultano sostanziali variazioni del profilo idrico.

Il manufatto in progetto è sufficiente, con un franco di 0.31m.

AFF. N.2 FIUME OMBRONE

La portata è interamente contenuta all'interno dell'alveo.

Nella configurazione di progetto il tombino viene esteso a monte e valle. Non risultano sostanziali variazioni del profilo idrico.

Il manufatto in progetto è sufficiente, con un franco di 1.04m.

FOSSO SENZA NOME (SI060)

La modellazione matematica condotta sul corso d'acqua non evidenzia particolari problematiche sia nello stato attuale che nella configurazione di progetto che consiste in un prolungamento di poco superiore a 4 m in modo simmetrico monte-valle.

FOSSO SALICA

Il Fosso Salica, che interseca il Canale della Molla in corrispondenza dell'attraversamento autostradale, verrà analizzato in una fase successiva.

AFF. N.3 FIUME OMBRONE

La portata è interamente contenuta all'interno dell'alveo, salvo una limitata esondazione nel tratto terminale dell'asta simulata.

Nella configurazione di progetto il tombino viene esteso verso monte e valle. Il fondo alveo nel tratto di monte viene livellato. Non risultano comunque sostanziali variazioni del profilo idrico.

Il manufatto in progetto è sufficiente, con un franco di 0.33m.

7. FENOMENI DI EROSIONE E SCALZAMENTO IN CORRISPONDENZA DELLE OPERE VIARIE

Generalità

Nel presente capitolo si analizza lo scalzamento massimo atteso del fondo alveo in corrispondenza delle pile dei ponti in occasione di eventi di piena.

Nel tratto autostradale in oggetto si incontrano questo tipo di interferenze in corrispondenza dell'attraversamento dei seguenti corsi d'acqua:

- Fiume Bruna;
- Torrente Fossa;
- Fiume Ombrone.

Lo scalzamento, causato dallo scavo e dall'erosione di materiale dal letto e dalle sponde dell'alveo, come conseguenza dell'azione erosiva della corrente, può mettere in crisi la stabilità di un ponte, fino ad esporne totalmente le fondazioni.

L'erosione in corrispondenza di un ponte con pile in alveo è frutto di tre diversi effetti:

1. PROGRESSIVA VARIAZIONE DIFFUSA: deposito od erosione con variazione a lungo termine della pendenza dell'alveo (quindi della quota del fondo), dovuta all'evoluzione altimetrica dell'alveo a monte ed a valle del ponte, sia in relazione alle variazioni cicliche e progressive, sia alle eventuali variazioni che si verificano nel corso di ogni singolo evento di piena;
2. EROSIONE GENERALIZZATA DOVUTA A CONTRAZIONE: rimozione del materiale di fondo lungo tutta o gran parte della larghezza dell'alveo. Questa componente dell'erosione è il risultato della contrazione dei filetti dovuta al restringimento della sezione causato dalla presenza delle pile in alveo.
3. EROSIONE TRANSITORIA LOCALIZZATA: erosione transitoria rapida che si verifica durante gli eventi di morbida e piena in corrispondenza di ostacoli, come le pile dei ponti, che determinano una brusca variazione nella direzione dei filetti fluidi, con formazione di vortici ed accelerazioni locali. La buca di erosione si approfondisce con l'aumentare della velocità della corrente contro le pile e viene ricolmata al diminuire della stessa. Tale erosione può portare nel corso di una piena alla riduzione della capacità portante delle pile del ponte, fino al crollo delle stesse.

Progressiva variazione diffusa

Il progressivo abbassamento od innalzamento dell'alveo può essere dovuto a cause naturali cicliche od a conseguenze di interventi dell'uomo sull'alveo o sul bacino imbrifero, come la sottrazione di materiale da cave in alveo, la costruzione di dighe o traverse, le variazioni nell'utilizzo del suolo nel bacino (urbanizzazione, deforestazione, riduzione delle pratiche agricole, rivestimenti d'alveo, tagli di meandri, variazioni di pendenza mediante briglie, ecc.).

Nell'ambito del presente studio non sono stati tenuti in conto questi effetti per la stima dei quali sarebbe necessaria un'analisi molto più estesa dei corsi d'acqua considerati.

Erosione generalizzata dovuta a contrazione

Questo tipo di erosione, dovuta alla riduzione della sezione trasversale dell'alveo ad opera di un attraversamento, implica la rimozione di materiale dal letto e dalle sponde lungo tutta o gran parte della sezione dell'alveo, causata dall'aumento delle velocità e dell'azione di trascinamento in corrispondenza del restringimento. Tale erosione si esplica sull'intera sezione di deflusso e su scale temporali dell'ordine di grandezza della durata degli eventi di piena.

Valutazione dell'erosione generalizzata dovuta a contrazione

Formule empiriche

L'argomento dell'erosione generalizzata è stato trattato in un articolo redatto dai Proff. Ingg. S. Franzetti e F. Ballio ("Sulla vulnerabilità idraulica dei ponti per erosione generalizzata" – D.I.I.A.R., Politecnico di Milano, 1997).

Riassumendo brevemente i contenuti di queste analisi si conclude che è possibile stimare la profondità d'erosione generalizzata attraverso la valutazione della profondità d'acqua che il corso d'acqua tende a raggiungere in corrispondenza della sezione ristretta causata dalle pile del ponte rispetto all'altezza d'acqua che si avrebbe in condizioni indisturbate.

L'articolo esprime il rapporto tra queste due altezze d'acqua attraverso la formula:

$$\frac{h_p}{h_a} = \left(\frac{Q_p \cdot W_a}{Q_a \cdot W_p} \right)^{6/7}$$

dove:

h_p profondità dell'acqua al ponte a seguito del processo erosivo;

h_a profondità dell'acqua a monte del ponte;

W_p	larghezza in superficie della corrente al ponte;
W_a	larghezza in superficie della corrente a monte del ponte;
Q_p	portata d'acqua al ponte;
Q_a	portata d'acqua nella parte centrale dell'alveo (golene escluse);

Tale formulazione può essere ritenuta attendibile sotto le seguenti ipotesi:

- condizione di corrente lenta a monte ed in corrispondenza del ponte;
- passaggio sotto il ponte senza funzionamenti in pressione;
- granulometria dell'alveo al ponte uguale ai tratti d'alveo limitrofi (assenza di fenomeni di corazzamento del fondo).

Una volta ottenuto il valore dell'altezza d'acqua al ponte che il corso d'acqua tende a raggiungere attraverso fenomeni erosivi è possibile valutare l'entità della profondità d'erosione con la formula:

$$e_c = h_p - h_0$$

dove:

e_c	profondità di scavo;
h_p	profondità dell'acqua al ponte;
h_0	profondità dell'acqua prima dell'inizio dell'erosione;

Risultati

La seguente tabella riassume i valori utilizzati nel calcolo ed i risultati ottenuti per i tre viadotti considerati in situazione di stato di fatto e di progetto:

	h_a (monte) m	h_0 (ponte) m	h_p m	Q_p m ³ /s	Q_a m ³ /s	W_p m	W_a m	erosione m
F. Bruna SDF	5.93	5.86	6.31	497.00	497.00	53.07	57.07	0.45
F. Bruna SDP	5.31	5.24	5.65	497.00	497.00	53.04	57.04	0.41
T. Fossa SDF	5.53	5.43	6.00	315.58	315.58	45.59	50.13	0.57
T. Fossa SDP	5.64	5.36	7.38	315.58	315.58	36.88	50.50	2.02
F. Ombrone (golena sinistra)	2.42	2.41	2.87	4442.50	3883.00	2414.00	2570.00	0.46

Fiume Bruna: non sussistono variazioni tra l'assetto di stato di fatto e di progetto nella

disposizione delle pile dunque i fenomeni erosivi non subiranno prevedibili modificazioni; è prevista una riprofilatura d'alveo che permette, a seguito dei lavori di ampliamento della sede stradale, di ridurre leggermente il fenomeno erosivo che comunque si attesta su valori massimi accettabili; in ogni caso è stata prevista la posa di scogliere a protezione delle pile.

Torrente Fossa: la situazione di stato di fatto indica la presenza di fenomeni erosivi contenuti che però, in stato di progetto, subiscono un aumento significativo a causa dell'ampliamento delle pile esistenti che risultano inclinate rispetto alle linee di deflusso della corrente. Pertanto in progetto è prevista la posa in opera di scogliere a protezione delle pile.

Fiume Ombrone: non sussistono variazioni tra l'assetto di stato di fatto e di progetto nella disposizione delle pile dunque i fenomeni erosivi non subiranno prevedibili modificazioni; in particolare, il calcolo dell'erosione è stato effettuato solamente per le pile poste in golena poiché le pile situate in alveo insistono su di un tratto in cui l'alveo è rivestito in calcestruzzo.

Inoltre, l'applicazione di questa formula nel caso del fiume Ombrone fornisce risultati piuttosto approssimativi date le eccessive semplificazioni insite nella modellazione monodimensionale di un alveo che in situazione di piena è largo oltre 2 km.

Erosione transitoria localizzata

L'erosione transitoria localizzata comporta la rimozione di materiale nell'intorno degli elementi collocati in alveo che ostruiscono il flusso, in particolare delle pile dei ponti.

La presenza della pila in alveo causa un aumento della velocità dovuta al restringimento della sezione disponibile per il deflusso. Nel caso di pile circolari, in corrispondenza della pila si ha la formazione di un grosso vortice che interessa planimetricamente tutta l'area circostante la pila e che è il principale responsabile dell'erosione. Il fenomeno dell'erosione localizzata dipende da numerosi parametri legati sia alle caratteristiche della corrente e dell'alveo (portata, battente, velocità della corrente, capacità di trasporto, caratteristiche del materiale dell'alveo, ecc.), sia a quelle dell'ostacolo (forma e dimensioni, angolo di attacco della direzione di flusso rispetto alla pila in caso di pile a dimensione longitudinale prevalente).

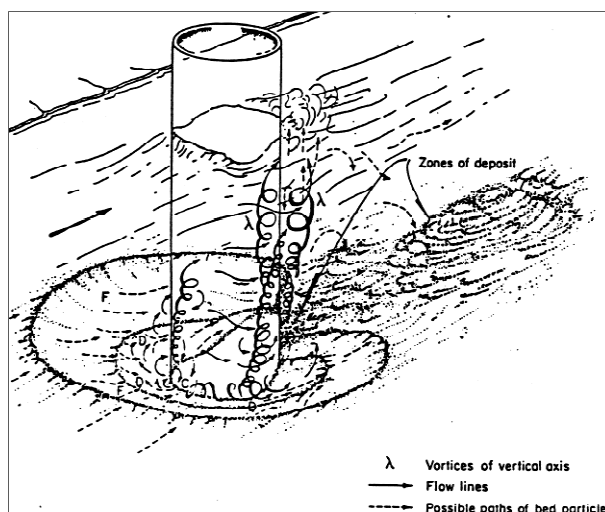


Figura: Esempio di erosione localizzata per una pila circolare.

Poiché l'entità dello scalzamento dipende in modo importante dall'altezza liquida, essa, in generale, risulta maggiore nelle fasi di piena. Durante la fase crescente della piena aumentano la portata, l'altezza liquida e la velocità dell'acqua, fino ad un valore di soglia che inficia la stabilità del fondo alveo e determina lo scavo improvviso della fossa di erosione in corrispondenza delle pile.

La fossa di erosione è situata in corrispondenza dell'attacco delle pile da parte della corrente liquida e, nella fase crescente della piena, è caratterizzata da una pendenza della scarpata, verso monte maggiore dell'angolo di attrito del terreno, in quanto la scarpata stessa è sostenuta dai moti vorticosi che si generano all'interno della fossa. Verso valle, dopo la pila, la pendenza della scarpata è minore dell'angolo di attrito del terreno. Quando la piena è in fase decrescente si riducono le forze vorticosi che sostenevano la scarpata di monte, determinando il "franamento" della scarpata con parziale ricoprimento della fossa. Perciò le misure di profondità della fossa di erosione effettuate a conclusione dell'evento di piena sono poco significative e si rileva la necessità di misurare l'erosione durante la piena.

Nelle pile con dimensione longitudinale prevalente ed inclinate rispetto alla corrente il fenomeno dell'erosione è simile, ma la fossa di massima erosione si riscontra nella parte di valle della pila ed è maggiore di quella che si genera a monte di una pila allineata con la corrente.

Valutazione dell'erosione transitoria localizzata

Formule empiriche

L'erosione localizzata in corrispondenza delle pile è influenzata dalla forma delle stesse e dalla loro inclinazione rispetto alla direzione della corrente, oltre che naturalmente dalle caratteristiche dell'alveo e del flusso in corrispondenza delle pile stesse.

Di seguito viene descritta la formulazione utilizzata per il calcolo dell'erosione localizzata, ovvero la formula di Breusers et Al. (1977).

$$\frac{d_s}{b} = f_1 \left(\frac{V_0}{V_c} \right) \cdot 2 \tanh \left(\frac{h_0}{b} \right) \cdot f_2 (forma) \cdot f_3 \left(\alpha, \frac{1}{b} \right)$$

dove:

- d_s profondità di scavo a partire dal fondo del terreno indisturbato;
- b larghezza della pila;
- V_0 velocità media della corrente indisturbata;
- V_c velocità critica di trascinamento relativa al materiale di diametro d (per i miscugli si adotta $d \approx d_{50}$ e si può ottenere la velocità critica dalla $V_c = 0,85 \sqrt{2gd_{50}(\gamma_s - \gamma)/\gamma}$ dove γ_s è il peso specifico del materiale di fondo e γ è il peso specifico dell'acqua;
- d_{50} dimensione media del materiale;
- α angolo tra la direzione della corrente indisturbata e la pila;
- f_1 coefficiente che tiene conto delle caratteristiche del materiale in rapporto a quelle della corrente, pari a:
 - $f_1 = 0$ per $(V_0/V_c) < 0,5$;
 - $f_1 = (2 \cdot V_0/V_c) - 1$ per $0,5 < (V_0/V_c) < 1,0$;
 - $f_1 = 1$ per $(V_0/V_c) > 1,0$;
- f_2 coefficiente di forma, pari a:
 - $f_2 = 1,00$ per pile circolari o con fronti arrotondate;
 - $f_2 = 0,75$ per pile sagomate in modo da accompagnare la corrente;
 - $f_2 = 1,30$ per pile rettangolari;

f_3 coefficiente funzione della forma e dell'inclinazione della pila.

Risultati

La seguente tabella riassume i valori utilizzati nel calcolo ed i risultati ottenuti per i tre viadotti considerati:

I risultati non sono stati differenziati per ogni pila poiché sono identici: con modellazione monodimensionale, tutte le pile sono soggette alla medesima velocità, inoltre le pile insistono su quote terreno identiche, dunque non si incontrano differenze sostanziali

	Quota imposta pila (m slm)	profondità di scavo (m)	larghezza a pila (m)	altezza della corrente e (m)	velocità media della corrente (m/s)	velocità critica (m/s)	materiale del fondo (kg/m ³)	dimensione e del materiale (m)	angolo di attacco	f_1	f_2	f_3
		d_s	b	h_0 (valle)	V_0 (valle)	V_c	ρ_s	d_{50}	α			
F. Bruna	16.57	3.67	2.00	3.15	2.48	0.243	1800	0.005	0.0	1.0	1.0	1.0
T. Fossa	16.81	4.07	2.27	3.30	1.94	0.973	1800	0.080	0.0	1.0	1.0	1.0
F. Ombrone (golena sinistra)	~12	4.22	2.00	2.26	0.66	0.596	1800	0.030	0.0	1.0	1.3	1.0

Occorre sottolineare che nell'ambito in cui la formula è stata ricavata la durata delle sperimentazioni è prolungata fino a raggiungere un valore prossimo al valore massimo asintotico dell'erosione, mentre nella realtà le condizioni idrauliche, pur pericolose, hanno durata limitata nel tempo, così che l'evoluzione del fenomeno può interrompersi non raggiungendo il valore massimo che potrebbe compromettere la stabilità dell'attraversamento. Inoltre, inevitabilmente, nella modellazione sperimentale non vengono tenuti in conto gli eventuali effetti del corazzamento, della coesione del materiale di fondo e del suo grado di compattazione. Queste considerazioni non vogliono comunque negare il valore dei risultati ottenuti, che si ritengono attendibili almeno in termini di ordine di grandezza.

8. SISTEMI DI PROTEZIONE CONTRO L'EROSIONE LOCALIZZATA

Generalità

Esistono differenti dispositivi atti a contenere il fenomeno dell'erosione al piede delle pile in alveo:

- a) cassoni di fondazione;
- b) collari (hanno il compito di intercettare e deviare la corrente discendente a monte dell'ostacolo);
- c) sistemi di pali di piccolo diametro posti a monte delle pile;
- d) scogliere radenti.

Alcuni di questi sistemi sono stati oggetto di indagini sperimentali su modelli di pile circolari ed isolate, per studiarne l'efficacia, da cui risulta:

- a) *cassoni di fondazione*: riescono a ridurre del 33% l'erosione se sono posti ad una profondità di $0,5b$ rispetto al fondo alveo e se hanno larghezza pari a $3b$ (con b larghezza della pila);
- b) *collari*: esiste un limite superiore per il posizionamento del collare oltre il quale la sua efficacia si annulla; l'efficacia aumenta sensibilmente con il diminuire della quota di posizionamento ed i migliori risultati si hanno con posizionamento al di sotto del fondo alveo; per collari circolari concentrici alla pila la riduzione dell'erosione è più efficace quanto maggiori sono le dimensioni del collare rispetto a quelle della pila; i risultati sono tanto migliori quanto maggiore è la scabrezza della superficie del collare. L'efficacia dei collari si manifesta a monte dell'ostacolo, ma rimangono i fenomeni di erosione a valle della protezione, dovuti alle scie di vortici ad asse verticale. Tali fenomeni possono, però, essere contenuti conformando adeguatamente i collari e la loro scabrezza;
- c) *sistemi di pali di piccolo diametro*: sono da collocare a monte della pila da proteggere e risultano molto efficaci (con riduzione del 45% dello scalzamento) nella disposizione particolare di 5 pali a cuneo con angolo di deviazione pari a 30° e con palo di punta distante $2b$. Questi sistemi

di protezione trovano applicazione nelle vie d'acqua navigabili, dove i pali fungono anche da protezione delle pile nel caso di urti;

- d) *scogliere*: sono il sistema di protezione certamente più diffuso e valido per qualsiasi tipo di fondazione e consistono nella sistemazione di scogliere a ridosso delle pile da proteggere, a monte ed a valle delle stesse. I massi vengono dimensionati in funzione della velocità della corrente. L'intervento protettivo risulta efficace se lo spessore della scogliera è pari almeno a 3 volte il diametro dei massi e se essa si estende per almeno $2b$ nell'intorno della pila.

Per quanto detto, nei casi trattati si ritiene opportuna la posa di scogliere il cui dimensionamento viene descritto nel paragrafo seguente.

Dimensionamento della protezione delle pile

Prevenire e limitare l'estensione dell'erosione localizzata dovuta all'azione della corrente idrica in corrispondenza di manufatti in alveo è materia di grande interesse. In letteratura sono disponibili numerose e diverse formulazioni per il dimensionamento di tali protezioni, con risultati che, come è ben noto, sono oltremodo variabili.

Come è noto, l'intensità dei fenomeni erosivi provocati dal deflusso delle correnti a pelo libero nei corsi d'acqua è dovuta sia alle azioni tangenziali sulle superfici bagnate, normalmente valutabili per via teorica semplificata in funzione della velocità e della profondità della corrente (assunta monodimensionale), sia alle turbolenze locali, di più difficile schematizzazione e normalmente valutabili solo per via sperimentale. Molte delle varie formulazioni empiriche proposte negli ultimi decenni per il dimensionamento delle protezioni d'alveo con massi tengono conto, infatti, del grado di turbolenza della corrente o comunque considerano l'applicazione di un coefficiente di sicurezza che va aumentato o ridotto in funzione della maggiore o minore turbolenza delle acque.

Di seguito vengono riportate le equazioni utilizzate per il dimensionamento dei massi di protezione per i casi in esame:

- *Izbash* (1970):

$$d = C_t \frac{V^2}{g(s-1)}$$

dove:

- d è il diametro medio dei sedimenti (o delle protezioni), d_{50} (m);
- V è la velocità media della corrente nella sezione;
- s è il rapporto tra il peso specifico del materiale e quello dell'acqua;
- g è l'accelerazione di gravità;
- C_t è il coefficiente di turbolenza di Izbash i cui valori sono compresi entro l'intervallo 0,3 (condizioni di bassa turbolenza) ÷ 0,7 (condizioni di alta turbolenza, per esempio nel caso di presenza di risalti multipli).

- U.S. Corp of Engineers (1970):

$$d = 0,347 \frac{V^2}{g(s-1)} \quad (\text{per bassa turbolenza})$$

- "Antica" formula pratica:

$$V = 5\sqrt{d} \Rightarrow d = 0,04V^2$$

Nella tabella seguente sono riportati i risultati dei calcoli effettuati con le formule descritte.

Tabella: risultati del calcolo del diametro dei massi di protezione delle pile

Fiume Bruna

velocità media della corrente nella sezione	V	2.48 m/s
densità delle scogliere	scogliera	2700 kg/m ³
coeff di turbolenza (0.3 bassa - 0.7 alta)	C_t	0.5

criterio di Izbash		
diametro scogliera	d50	0.18 m
criterio U.S. Corp of Engineers		
diametro scogliera	d50	0.13 m
criterio della formula "Antica"		
diametro scogliera	d50	0.25 m

Torrente Fossa

velocità media della corrente nella sezione	V	1.94 m/s
densità delle scogliere	scogliera	2700 kg/m ³
coeff di turbolenza (0.3 bassa - 0.7 alta)	Ct	0.5

criterio di Izbash

diametro scogliera	d50	0.11 m
--------------------	-----	--------

criterio U.S. Corp of Engineers

diametro scogliera	d50	0.08 m
--------------------	-----	--------

criterio della formula "Antica"

diametro scogliera	d50	0.15 m
--------------------	-----	--------

Fiume Ombrone (golena)

velocità media della corrente nella sezione	V	0.66 m/s
densità delle scogliere	scogliera	2700 kg/m ³
coeff di turbolenza (0.3 bassa - 0.7 alta)	Ct	0.5

criterio di Izbash

diametro scogliera	d50	0.01 m
--------------------	-----	--------

criterio U.S. Corp of Engineers

diametro scogliera	d50	0.01 m
--------------------	-----	--------

criterio della formula "Antica"

diametro scogliera	d50	0.02 m
--------------------	-----	--------

La velocità media della corrente utilizzata nei calcoli è stata ottenuta dai risultati dalle simulazioni condotte per evento con tempo di ritorno T = 200 anni.

Per il dimensionamento delle protezioni al fondo in corrispondenza delle pile è consigliabile utilizzare la “antica formula pratica” descritta in precedenza, che risulta essere la più cautelativa. Volendo garantire un buon margine di sicurezza per le scogliere in progetto si possono definire le seguenti dimensioni per i massi a protezione delle pile:

- fiume Bruna: massi con diametro $d_{50} \approx 50$ cm;
- torrente Fossa: massi con diametro $d_{50} \approx 50$ cm;

- fiume Ombrone: per definire con maggiore precisione la tipologia della protezione delle pile occorrerebbe studiare il fenomeno con un modello più approfondito; in prima approssimazione si può ritenere che, poiché il valore di d_{50} è simile a quello della protezione richiesta, l'effetto di corazzamento del fondo può essere sufficiente a proteggere le pile poste in zona golenale senza necessità di alcun intervento di protezione.