

 	PROGETTISTA  Snamprogetti	COMMESSA P66990	UNITÀ 000
	LOCALITÀ Regione Toscana - Regione Emilia Romagna	SPC. LA-E-80081	
	PROGETTO Metanodotto Pontremoli - Cortemaggiore	Fg. 1 di 43	Rev. 0

**Metanodotto Pontremoli - Cortemaggiore
DN 900 (36"), P 75 bar**

**ATTRAVERSAMENTO TORRENTE TEGLIA
STUDIO IDROLOGICO-IDRAULICO**

	SSIONE	Aureli	Sabbatini	Sciosci	Feb '10
Rev.	Descrizione	Elaborato	Verificato	Approvato	Data

 	PROGETTISTA  Snamprogetti	COMMESSA P66990	UNITÀ 000
	LOCALITÀ Regione Toscana - Regione Emilia Romagna	SPC. LA-E-80081	
	PROGETTO Metanodotto Pontremoli - Cortemaggiore	Fg. 2 di 43	Rev. 0

INDICE

1	INTRODUZIONE	3
	1.1 Oggetto della relazione	3
	1.2 Elaborati progettuali di riferimento	3
	1.2 Sistema di qualità	4
2	INQUADRAMENTO TERRITORIALE	5
	2.1 Caratterizzazione del sito di intervento	5
	2.2 Morfometria del bacino	7
	2.3 Opere di derivazione e presa	9
3	STUDIO IDROLOGICO	12
	3.1 Criteri generali di analisi	12
	3.2 Procedure di regionalizzazione idrologica	13
	3.3 Applicazione dei modelli di calcolo	15
	3.4 Conclusioni dello studio idrologico	20
4	STUDIO IDRAULICO	22
	4.1 Finalità e presupposti dello studio idraulico	22
	4.2 Assetto geometrico e modellazione dell'alveo	22
	4.3 Parametri del deflusso di piena	25
5	VALUTAZIONE DEI FENOMENI EROSIVI IN ALVEO	28
	5.1 Fenomeni potenziali oggetto di indagine	28
	5.2 Stima dei massimi approfondimenti attesi	31
6	SINTESI E CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE	34
	APPENDICE I - STRALCI TOPOGRAFICI DI DETTAGLIO	36
	APPENDICE II - TABELLE DATI E REPORT	39
	APPENDICE III - METODOLOGIA DI VERIFICA IDRAULICA	42

 	PROGETTISTA  Snamprogetti	COMMESSA P66990	UNITÀ 000
	LOCALITÀ Regione Toscana - Regione Emilia Romagna	SPC. LA-E-80081	
	PROGETTO Metanodotto Pontremoli - Cortemaggiore	Fg. 3 di 43	Rev. 0

1 INTRODUZIONE

1.1 Oggetto della relazione

La realizzazione del metanodotto "Pontremoli - Cortemaggiore", costituito da condotta DN 900 mm (36"), comporta nel 1° tronco, Mulazzo – Pontremoli, l'attraversamento in sub-alveo del torrente "Teglia", al confine tra i territori dei Comune di Mulazzo, Filattiera e Pontremoli, in provincia di Massa Carrara.

L'ottimizzazione planimetrica del tracciato ed il profilo di posa della condotta attraverso l'alveo del corso d'acqua sono stati individuati in funzione di valutazioni di tipo geomorfologico, geologico ed idraulico. A tali fini, le caratteristiche morfologiche e geologiche dell'area, in particolare, sono state valutate sulla base dei seguenti elementi:

- documentazione bibliografica e cartografica disponibile;
- rilievi topografici di dettaglio;
- evidenze emerse nel corso di sopralluoghi di controllo appositamente effettuati.

Gli stessi elementi hanno permesso la definizione dei seguenti aspetti progettuali:

- metodologia esecutiva per la posa del metanodotto;
- caratteristiche tipologiche e dimensionali degli interventi di ripristino e di eventuale integrazione delle opere di difesa idraulica esistenti.

Nella presente relazione sono descritte le analisi condotte per la valutazione della portata di piena e per la stima dei parametri di deflusso di tale portata nel corso d'acqua, in corrispondenza della sezione di attraversamento.

In relazione ai risultati ottenuti è possibile verificare che la profondità minima prevista per la posa della condotta risulta tale da garantirne la sicurezza nei riguardi degli effetti erosivi che potrebbero verificarsi sul fondo d'alveo.

Le analisi sono state effettuate sulla base di valutazioni idrologiche ed idrauliche, condotte come di seguito descritto:

- sono stati analizzati i risultati dei rilievi topografici di dettaglio;
- è stato elaborato uno studio idrologico del corso d'acqua, per la porzione di bacino sottesa dalla sezione di interesse, al fine di valutare la portata di massima piena corrispondente a prefissato tempo di ritorno;
- si sono determinati i parametri di deflusso idrico in moto uniforme, per il riscontro dei potenziali effetti dell'evento di piena, diretti ed indiretti, in corrispondenza della sezione di attraversamento.

1.2 Elaborati progettuali di riferimento

Per le caratteristiche progettuali dell'attraversamento, comprendenti le specifiche geometriche e strutturali della condotta, il profilo di posa della stessa, nonché gli elementi tipologici e dimensionali degli interventi previsti, la presente relazione ha riferimento nell'elaborato

 	PROGETTISTA  Snamprogetti	COMMESSA P66990	UNITÀ 000
	LOCALITÀ Regione Toscana - Regione Emilia Romagna	SPC. LA-E-80081	
	PROGETTO Metanodotto Pontremoli - Cortemaggiore	Fg. 4 di 43	Rev. 0

- Attraversamento: Torrente Teglia S.V. del Consorzio, LC-13E-81111.

Esso costituisce anche la caratterizzazione di dettaglio del sito.

A tale elaborato si rimanda per quanto non espressamente descritto nella presente relazione e per ogni correlato approfondimento.

1.2 Sistema di qualità

Le attività relative al presente studio sono sviluppate seguendo quanto stabilito dalle procedure ed istruzioni di lavoro applicabili nell'ambito del sistema di qualità aziendale SAIPEM S.p.A., certificato dal DNV ai sensi UNI EN ISO 9001:2000 (Certificate N°: LRC 160247/D – Original approval: 08/12/1994).

 	PROGETTISTA  Snamprogetti	COMMESSA P66990	UNITÀ 000
	LOCALITÀ Regione Toscana - Regione Emilia Romagna	SPC. LA-E-80081	
	PROGETTO Metanodotto Pontremoli - Cortemaggiore	Fg. 5 di 43	Rev. 0

2 INQUADRAMENTO TERRITORIALE

2.1 Caratterizzazione del sito di intervento

Il torrente Teglia è un corso d'acqua di significative dimensioni, direttamente confluyente nel fiume Magra, in destra di questo, circa 100 m a valle del sito di attraversamento. L'incisione che può identificarsi come genesi dell'asta principale ha inizio dai rilievi del monte "Ferri", sullo spartiacque tra il bacino del Magra e quello del fiume Vara, suo principale tributario medio-vallivo.

Il torrente Teglia si snoda essenzialmente in direzione ovest-est, con un corso pressochè ortogonale rispetto all'asta del Magra (tipico della maggior parte degli affluenti in destra), ricevendo numerosi contributi da entrambi i versanti, su una superficie imbrifera di forma sostanzialmente ristretta ed allungata, con eccezione della porzione areale tributaria del torrente Orsara.



Nella porzione medio-montana, il Teglia svolge il suo corso in ambiente naturale; le rocce arenacee rappresentano l'ossatura dell'intero bacino; solo nella parte settentrionale affiorano rocce argillitiche e calcareo marnose, che conferiscono forme più adolcite ai rilievi.

 	PROGETTISTA  Snamprogetti	COMMESSA P66990	UNITÀ 000
	LOCALITÀ Regione Toscana - Regione Emilia Romagna	SPC. LA-E-80081	
	PROGETTO Metanodotto Pontremoli - Cortemaggiore	Fg. 6 di 43	Rev. 0

Il territorio è prevalentemente coperto da vegetazione arborea: il castagneto si alterna alle querce e, alle quote maggiori, al bosco di faggio; solo a corona degli insediamenti trovano luogo poco significative aree coltivate.

A valle dell'invaso artificiale della Rocchetta, che caratterizza il corso centrale del torrente, questo scorre in un ambiente poco antropizzato.

L'ambito geomorfologico di interesse costituisce parte dalla pianura alluvionale del fiume Magra, ove essa si allarga ed iniziano a prendere forma le vaste aree golenali che rappresentano naturali casse d'espansione del fiume.

L'utilizzazione agraria del suolo qui interessa gran parte della superficie imbriferà, con prevalenza di seminativo semplice; le formazioni arboree sono alquanto limitate e solo i nodi idrografici principali sono sedi di coperture vegetali spontanee.

In questo settore la piana alluvionale del Magra è costituita da depositi che presentano elevata permeabilità e sono sede di acquiferi anche cospicui. Gli interscambi tra acque superficiali e acque di sub-alveo sono intensi, con fluttuazioni della superficie piezometrica ed andamento di falda strettamente collegate al regime dei deflussi in alveo.

Il tronco del corso d'acqua direttamente interessato dalle opere è sito immediatamente a valle del viadotto autostradale della A15.

In corrispondenza dell'attraversamento, il torrente è ampio circa 10÷12 m e inciso per circa 2,5÷3,0 m. Il profilo longitudinale del fondo, nel tronco di stretto interesse, è caratterizzato da pendenze locali variabili, in media pari a circa 1%.

Le sponde sono del tutto inerbite con presenza di una fitta vegetazione ripariale, a portamento arbustivo-arboreo.



 	PROGETTISTA  Snamprogetti	COMMESSA P66990	UNITÀ 000
	LOCALITÀ Regione Toscana - Regione Emilia Romagna	SPC. LA-E-80081	
	PROGETTO Metanodotto Pontremoli - Cortemaggiore	Fg. 7 di 43	Rev. 0

La quota minima dell'asta nella sezione di posa del metanodotto è pari a circa 170 m s.l.m. La sponda in destra idrografica, è caratterizzata da altezza e pendenza leggermente superiori a quanto in sinistra idrografica.

Le aree di esondazione sono delimitate, in destra, da un muro in pietra ed, in sinistra, da gabbionate.

Il letto è costituito da alluvioni ghiaioso-sabbiose, i cui emergono elementi di più grossa pezzatura, a testimonianza della capacità di trasporto attribuibile alle piene.

In coincidenza con l'attraversamento, si prevede di eseguire un rivestimento in massi delle sponde e un approfondimento della condotta per il tratto di alveo attraversato, di modo che la morfologia della sezione sia ripristinata nell'esatta conformazione plano-altimetrica originaria.

L'intervento non apporterà alterazioni alle condizioni geometriche ed idrauliche dell'alveo, non si realizzeranno restringimenti, deviazioni dell'asta o modifiche morfologiche e non si ipotizza alcuna considerevole variazione delle condizioni locali di scabrezza.

Nel tratto di interesse, il deflusso nel torrente è influenzato dalla immissione nel corso del fiume Magra, immediatamente a valle della sezione di attraversamento. In concomitanza dei maggiori eventi di piena, tale tronco del corso d'acqua è oggetto riconosciuto di possibili fenomeni di esondazione, identificati in ambito PAI.

Specificatamente nell'intorno della sezione di interesse, sono state perimetrare aree a pericolosità idraulica media, ovvero aree inondabili con tempo di ritorno pari a 200 anni.

Tale riferimento probabilistico di base si ritiene significativo, in ragione della natura dell'intervento previsto, quale fondamento dell'analisi dell'evento di piena e delle relative verifiche idrauliche, finalizzate ad attestare la sussistenza di idonee condizioni di sicurezza per la condotta in progetto.

2.2 Morfometria del bacino

Il bacino, sotteso dalla sezione identificata come elemento di chiusura ai fini delle modellazioni idrauliche, è stato delimitato, appositamente per il presente studio, su base cartografica 1:10.000¹.

Per la caratterizzazione del bacino, ai fini delle valutazioni idrologiche, si è proceduto a determinare i parametri e le grandezze geometriche e morfometriche principali.

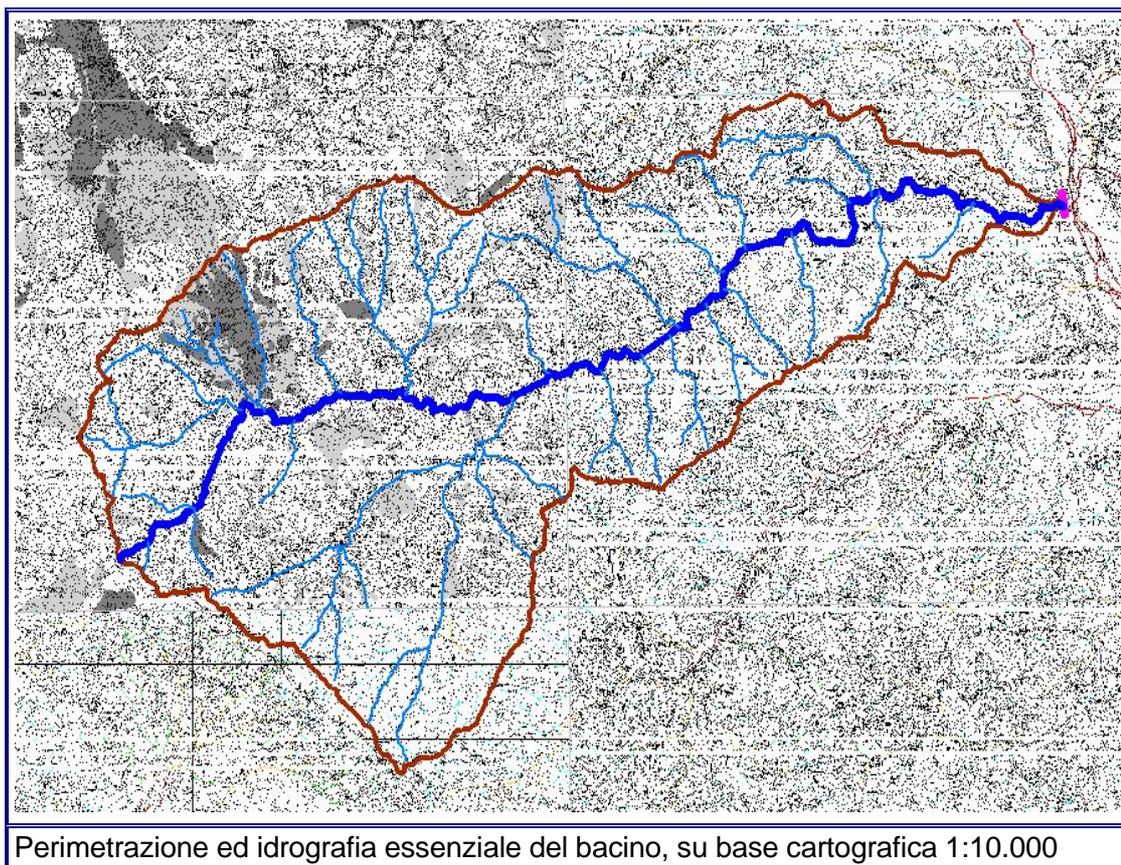
Gli elementi di forma stimati riguardano proprietà lineari, areali e di rilievo.

Le proprietà lineari sono quelle che attengono al drenaggio e quindi ai caratteri della rete idrografica; le proprietà areali definiscono le superfici di alimentazione ed alcune peculiarità dei versanti; le proprietà del rilievo caratterizzano il bacino dal punto di vista altimetrico ed esprimono il rapporto tra le dimensioni verticali e le proprietà lineari ed areali.

¹ Le valutazioni di lunghezza e superficie qui riportate, espresse in km e km², con riferimento a dati noti, si stima possano essere affette da errore medio rispettivamente compreso tra ±0,008% e ±0,015%, derivante dall'errore di riproduzione e vettorializzazione delle carte, di composizione dei fogli e dall'errore di graficismo.

 	PROGETTISTA  Snamprogetti	COMMESSA P66990	UNITÀ 000
	LOCALITÀ Regione Toscana - Regione Emilia Romagna	SPC. LA-E-80081	
	PROGETTO Metanodotto Pontremoli - Cortemaggiore	Fg. 8 di 43	Rev. 0

La scelta dei parametri morfometrici, in particolare, è stata limitata a quelli ritenuti utili a rappresentare i caratteri geomorfologici funzionali, anche se indirettamente, ai modelli idrologici utilizzati per individuare le relazioni che possono intercorrere tra detti caratteri e la massima portata attesa².



Si specifica che la lunghezza dell'asta principale è assunta come LDP (Longest Drainage Path length), ovvero il percorso tra la sezione di chiusura ed il punto più lontano da essa, sullo spartiacque delimitante il bacino, seguendo le direzioni di drenaggio³.

La quota della sezione di chiusura è quella della massima incisione nella sezione rilevata di valle.

² Ciò in quanto la morfometria del bacino condiziona alcuni fenomeni idrologici che in esso si verificano, quali i tempi di trasferimento dei deflussi.

³ Tale percorso coincide per la maggior parte con l'asta principale idrografica, estendendosi tuttavia fino ai limiti del bacino; l'asta principale ha, di norma, identificazione cartografica e/o sorgente più a valle.

 	PROGETTISTA  Snamprogetti	COMMESSA P66990	UNITÀ 000
	LOCALITÀ Regione Toscana - Regione Emilia Romagna	SPC. LA-E-80081	
	PROGETTO Metanodotto Pontremoli - Cortemaggiore	Fg. 9 di 43	Rev. 0

La pendenza media dell'asta principale è stata conseguentemente calcolata come

$$i = \frac{H_{Lmax} - H_0}{L_p}$$

<i>Parametri morfometrici del bacino</i>		
Quota rilevata sezione di chiusura (m s.l.m.)	H₀	170,23
Quota massima bacino sotteso (m s.l.m.)	H_{MAX}	1153,0
Quota massima asta LPD (m s.l.m.)	H_{Lmax}	1070,0
Superficie bacino sotteso (km ²)	A	38,8
Lunghezza asta LPD (km)	L_p	15,2
Perimetro bacino sotteso (km)	P	33,6
Fattore di forma bacino sotteso	$F_f = \frac{A}{L_p^2}$	0,168
Rapporto di allungamento bacino sotteso	$R_{all} = \frac{2\sqrt{A}}{L_p\sqrt{\pi}}$	0,463
Rapporto inverso di allungamento	1/R_{all}	2,161
Rapporto di circolarità	$R_c = \frac{4\pi A}{P^2}$	0,433
Coefficiente di Gravelius	(1/R_c)^{1/2}	1,520
Pendenza media asta principale	i	0,0592

2.3 Opere di derivazione e presa

Il corso d'acqua è interessato da sbarramenti ed opere di presa che rientrano nel quadro complessivo del sistema degli impianti idroelettrici "Rocchetta" e "Teglia". Ciò è realizzato mediante l'invaso artificiale della Rocchetta, lungo il corso principale del torrente. In tale invaso⁴ vengono immesse oltre che parte delle portate defluenti nel Teglia anche acque provenienti dal bacino del torrente Mangiola (tributario del Magra a sud).

⁴ Fonte "Edison, Organizzazione gestione idroelettrica – polo 2; Impianti idroelettrici Rocchetta e Teglia, aggiornamento delle informazioni, anno 2005"; Rev. 1 del 19/07/2006; Edison SpA, Foro Bonaparte 31, Milano.

 	PROGETTISTA  Snamprogetti	COMMESSA P66990	UNITÀ 000
	LOCALITÀ Regione Toscana - Regione Emilia Romagna	SPC. LA-E-80081	
	PROGETTO Metanodotto Pontremoli - Cortemaggiore	Fg. 10 di 43	Rev. 0

La diga di sbarramento sottende una superficie imbriferà diretta avente area pari a circa 29,6 km² (oltre il 75% del bacino di interesse).

Le acque di scarico superficiale sono convogliate nell'alveo del torrente Dorbola (piccolo affluente in sinistra del Teglia, che sbocca immediatamente a valle dello sbarramento) e successivamente incanalate mediante galleria nel corso d'acqua principale.

Una centrale idroelettrica, situata direttamente al piede della diga, utilizza le acque provenienti dall'invaso, che, a valle, sono condotte all'impianto di Teglia, I e II salto, ove confluiscono anche portate prese dai torrenti Betigna, Verde e Gordana. I volumi utilizzati da tale sistema vengono scaricati nel fiume Magra; in caso di necessità, le acque derivanti dal I salto possono essere scaricate direttamente nel torrente Teglia, indipendentemente dalla centrale di II salto.

Per quanto noto e descritto, l'influenza del sistema di prelievo non ha notevole rilevanza sul regime dei deflussi ordinari ma non è dato prevedere quale possa l'effetto in concomitanza con gli eventi estremi.

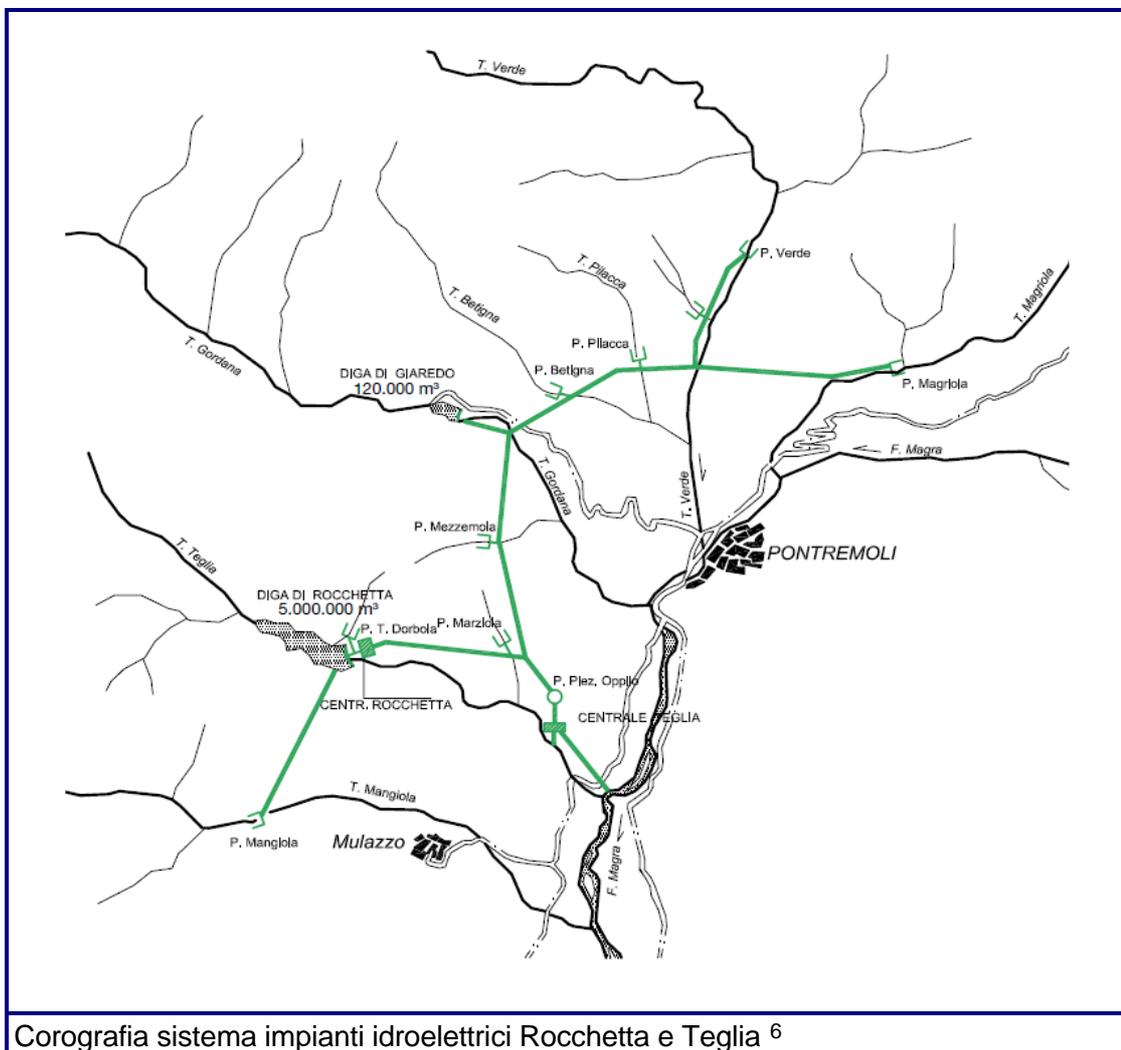
Relativamente alla riduzione dei picchi di portata per laminazione, è indubbio invece che la presenza di opere di sbarramento possano incidano su tale fenomeno, con una entità che può non essere costante nel tempo.

Durante gli eventi di piena, l'invaso è gestito secondo quanto previsto da apposito "Documento di Protezione Civile" (che, sulla base della circolare Ministero LL.PP. 352/87 e circolare PCM - DSTN/2/7019 del 19/03/1996, individua le condizioni che devono verificarsi sull'impianto di ritenuta perché si debba attivare il sistema di Protezione Civile e quali siano le procedure da mettere in atto).

A parte tali indicazioni sommarie⁵, per quanto riguarda il sistema di gestione delle piene, in particolare dal punto di vista quantitativo, non sono concretamente note le attività finalizzate alla regolazione dei deflussi nonché gli eventuali piani preventivi di laminazione. Non disponendo di informazioni significative, in estrema sintesi, gli effetti delle derivazioni e dell'invaso sull'andamento delle portate massime eccezionali non sono direttamente valutabili nell'ambito del presente studio.

⁵ Ai sensi della Circolare Ministero LL.PP. 04/12/1987, n. 352 (Prescrizioni inerenti l'applicazione del regolamento sulle dighe di ritenuta approvato con decreto del Presidente della Repubblica 1° Novembre 1959, n. 1363), ai fini della protezione civile, per tutte le «opere di ritenuta» soggette al regolamento, il concessionario o richiedente la concessione o, in mancanza di questo, il proprietario delle opere, dovrebbe determinare le caratteristiche dell'onda di piena conseguente ad ipotetico collasso dello sbarramento e la individuazione delle aree soggette ad allagamento.

 	PROGETTISTA  Snamprogetti	COMMESSA P66990	UNITÀ 000
	LOCALITÀ Regione Toscana - Regione Emilia Romagna	SPC. LA-E-80081	
	PROGETTO Metanodotto Pontremoli - Cortemaggiore	Fg. 11 di 43	Rev. 0



E' quindi obbligato e, nel caso specifico, opportuno non considerare alcun effetto di laminazione per ottenere risultati a favore di sicurezza sulla valutazione delle caratteristiche della corrente in corrispondenza delle opere che interessano il presente studio, pur sapendo che ricorrerebbe la necessità di adattamento dei risultati derivanti da analisi effettuate a scala "regionale", per la "taratura" locale dei modelli applicati. Si osserva infatti che analisi idrologiche basate su correlazioni tra funzioni probabilistiche operanti sui dati storici e parametri geomorfoclimatici possono essere rese, dal punto di vista concettuale, di non immediata applicabilità, a causa di elementi non naturali che intervengono, in modo variabile, lungo il corso principale del torrente. E' parimenti evidente che risultano estranee alle modellazioni idrauliche qui presentate le condizioni conseguenti ad analisi di crisi dello sbarramento.

⁶ Edison, fonte citata.

 	PROGETTISTA  Snamprogetti	COMMESSA P66990	UNITÀ 000
	LOCALITÀ Regione Toscana - Regione Emilia Romagna		SPC. LA-E-80081
	PROGETTO Metanodotto Pontremoli - Cortemaggiore		Fg. 12 di 43

3 STUDIO IDROLOGICO

3.1 Criteri generali di analisi

Le presenti valutazioni idrologiche hanno come fine la determinazione, per prefissati tempi di ritorno, della portata di piena relativa alla parte di interesse del corso d'acqua in studio, per analizzare e caratterizzare le condizioni idrauliche di deflusso, in corrispondenza delle opere in progetto.

Ai fini delle verifiche idrauliche, il tronco d'alveo di diretto interesse viene rappresentato sulla base dei dati della sezione rilevata di attraversamento, che costituisce l'estremo di indagine; pertanto le valutazioni idrologiche, atte a caratterizzare il bacino imbrifero sono effettuate considerando tale limite come sezione di chiusura: in corrispondenza di essa si determina la portata al colmo, che si attribuisce all'intero tratto di analisi.

Come è noto, la valutazione degli eventi idrologici estremi, appartenendo ad un ambito prettamente probabilistico, si configura come elaborazione di un legame tra il valore della grandezza (portata di piena o pioggia intensa) ed il rischio (inteso qui in senso puramente idrologico) del suo superamento, "espresso" nel tempo di ritorno. Dato x° valore massimo del campione costituito da tutti i valori assunti dalla grandezza idrologica X in un generico anno, data la probabilità $P(x^{\circ})$ con cui l'evento, rappresentato quantitativamente da x° , può verificarsi, tale rischio, in termini statistici, è definibile come segue:

- $P(x^{\circ})$ misura la probabilità che il massimo valore assunto dalla grandezza in un generico anno non superi x° (*probabilità di non superamento*);
- $P(x') = 1 - P(x^{\circ})$ è di conseguenza la probabilità che lo stesso evento venga superato da un altro ($x' > x^{\circ}$) (*probabilità di superamento*);
- $[1 - P(x^{\circ})] \cdot n$ è il numero di volte che (con assegnata probabilità) l'evento $x' > x^{\circ}$ si verificherà in un periodo di n anni;
- T_r , *tempo di ritorno*, definisce il periodo medio, espresso in anni, in cui è statisticamente previsto, una sola volta, il verificarsi del fenomeno x' (ovvero il periodo in cui mediamente x° è superato una sola volta), ed è dato dalla relazione $T_r \cdot [1 - P(x^{\circ})] = 1$.

La scelta dei modelli e dei criteri di calcolo atti a fornire i valori da utilizzare per la valutazione degli eventi estremi comporta quindi l'assunzione di un *rischio*, commisurato alla finalità della indagine. Nel caso delle piene, ciò si concretizza nel confronto tra i valori delle portate, stimati per assegnati *tempi di ritorno*, e la capacità di deflusso della rete idrografica, procedendo alla verifica degli eventuali effetti sull'alveo, sulle sponde e sulle opere in progetto.

In termini di assetto idrogeologico del territorio, ai fenomeni idrologici ed alla loro analisi stocastica, si associa il concetto di *pericolosità*, intesa come probabilità, espressa in termini di *tempo di ritorno*, che un evento eccezionale, di determinata intensità, si verifichi in una data area.

Nel caso in studio, si ritiene significativo, in ragione della natura dell'intervento previsto, porre a fondamento dell'analisi dell'evento di piena e delle analisi idrauliche *tempo di ritorno* $T_r = 200$ anni. Le determinazioni idrologiche che seguono, oltre che per tale dato, sono tuttavia elaborate per un più ampio intervallo di valori temporali.

 	PROGETTISTA  Snamprogetti	COMMESSA P66990	UNITÀ 000
	LOCALITÀ Regione Toscana - Regione Emilia Romagna	SPC. LA-E-80081	
	PROGETTO Metanodotto Pontremoli - Cortemaggiore	Fg. 13 di 43	Rev. 0

Decidere di verificare o dimensionare opere e azioni di salvaguardia per una portata di progetto che ha periodo di ritorno duecentennale corrisponde a decidere sulla base di “una portata sufficientemente più alta di quella massima osservata nella serie storica, ma che tuttavia è stimabile con rilevante affidabilità, specie se si esegue un’analisi regionale evitando i classici errori delle stime a sito singolo”⁷.

3.2 Procedure di regionalizzazione idrologica

Gli attuali modelli maggiormente in uso per la determinazione delle condizioni di pericolosità idraulica, basano lo studio idrologico a livello di bacino, finalizzato alla determinazione delle portate attese con diversi tempi di ritorno, sulle metodologie ed i risultati del progetto Valutazione Piene (VAP) del Gruppo Nazionali Difesa Catastrofi Idrogeologiche (GNDCI).

Il progetto VAP è fondato sull’analisi statistica a base regionale dei massimi annuali delle piogge di breve durata e delle piene, relative a vaste aree idrologicamente omogenee.

L’analisi si sviluppa attraverso indagini metodologiche relative alla stima integrata dei parametri di alcuni modelli probabilistici tra cui il TCEV ed il GEV⁸.

Di tali modelli è stata predisposta una verifica accurata, che ne ha dimostrato il successo nella applicazione all’ambiente idrologico italiano, sia con riguardo alle serie dei massimi di pioggia, sia con riguardo alle serie delle piene, mediante tecniche di analisi regionale (*regionalizzazione*) ormai standardizzate. Tali procedure di regionalizzazione, se applicate alla grandezza “portate”, consentono di determinare immediatamente relazioni atte a fornire il valore di massima piena, in funzione di alcuni parametri geomorfoclimatici.

La metodologia di base si fonda su uno stimatore della grandezza idrologica X (nel caso di interesse, la massima piena attesa), definito secondo un approccio di gerarchizzazione su scala spaziale in tre livelli; ciascun livello consente la stima dei parametri della legge di distribuzione. Tale gerarchizzazione si basa sull’ipotesi che esistano zone geografiche, che possono essere considerate, in senso statistico, omogenee nei confronti dei parametri della legge di distribuzione; cosicché la varianza spaziale di questi possa essere trascurabile nei confronti della varianza campionaria.

Al primo livello, a “scala regionale” (o “sovraregionale”), si procede alla stima dei parametri di forma. Al secondo livello, a scala subregionale (o regionale), si procede alla stima dei parametri di scala. Al terzo livello, a scala di bacino, si procede alla stima di un valore-indice, che può coincidere con un dato medio della grandezza indagata.

⁷ Autorità di bacino interregionale del fiume Magra, Piano stralcio “assetto idrogeologico” del bacino del fiume Magra e del torrente Parmignola, approvato con Delibera di Consiglio Regionale 05.07.06, n. 69 (BURT Parte II n. 32 del 09.08.06) per il territorio toscano – Relazione generale, paragrafo 2.9.1, “Incertezza idrologica dei risultati”.

⁸ I modelli TCEV o GEV ipotizzano che i valori estremi delle grandezze idrologiche provengano da popolazione differenti, legate a differenti fenomeni meteorologici, che corrispondono a componenti che potrebbero definirsi “ordinaria” e “straordinaria” o “generalizzata”. L’espressione matematica dei modelli rappresenta la legge di probabilità del valore massimo di tali due variabili, così da fornire la stima della probabilità corrispondente ad un evento estremo.

 	PROGETTISTA  Snamprogetti	COMMESSA P66990	UNITÀ 000
	LOCALITÀ Regione Toscana - Regione Emilia Romagna	SPC. LA-E-80081	
	PROGETTO Metanodotto Pontremoli - Cortemaggiore	Fg. 14 di 43	Rev. 0

Mediante l'approccio di tipo gerarchico, su più livelli successivi, si individuano regioni progressivamente ristrette, in cui è possibile identificare un numero crescente di relazioni tra i parametri della distribuzione e le caratteristiche climatiche e geomorfologiche del territorio. Più precisamente il primo livello consiste nell'individuare zone omogenee, alle quali competono valori costanti di alcuni coefficienti della serie dei massimi annuali della variabile idrologica, da cui discende che in tali zone omogenee possono determinarsi come costanti alcuni parametri della legge di distribuzione; il secondo livello riguarda l'individuazione di sottozone omogenee, interne alle precedenti, nelle quali risultano costanti ulteriori coefficienti, e definisce la funzione di probabilità cumulata, detta curva di crescita. Il terzo livello di regionalizzazione si basa su relazioni locali, all'interno della sottozona omogenea di interesse, tra grandezze geomorfologiche e la grandezza idrologica indagata.

I primi due livelli della *analisi regionale* operano direttamente sulla variabile idrologica, di conseguenza si identificano zone e sottozone, omogenee dal punto di vista idrometrico o pluviometrico. Il terzo livello di gerarchizzazione dipende sia dalla natura della variabile idrologica sia da teorie ed ipotesi, la validità delle quali è oggetto di accurate verifiche; esso si basa sulla individuazione di legami di correlazione tra un parametro statistico (comunemente coincidente con un valore medio delle serie) e grandezze oggettive, che caratterizzano le località delle stazioni di misura, con l'obiettivo di ottenere una stima del corrispondente parametro teorico (comunemente una media teorica della legge di distribuzione), nei siti ove l'informazione è insufficiente.

In alternativa o ad integrazione delle procedure dirette di analisi regionale delle piene, può ricorrersi a modelli semi-deterministici di formazione dei deflussi, partendo dalla analisi regionale delle piogge, in specie dove il ridotto numero di stazioni idrometriche e la scarsa numerosità campionaria delle serie storiche non permettano di giungere ad una stima affidabile utilizzando la metodologia diretta.

Tali modelli si propongono di rappresentare, con adeguate espressioni matematiche, il legame tra la distribuzione spaziale e temporale della pioggia ed il corrispondente idrogramma, e possono essere utilizzati per la determinazione della "portata indice locale", che particolarizza la curva di crescita adimensionale delle portate massime annue.

Questa metodologia è quella impiegata nell'ambito del PAI⁹, "Piano stralcio assetto idrogeologico", redatto dalla Autorità di bacino del fiume Magra. Per tale studio si è utilizzato il metodo un modello afflussi-deflussi di tipo semi distribuito, tarato e validato sulla base d'eventi storici di piena per i quali si avevano a disposizione sia dati di precipitazione sia misure idrometriche. Le portate al colmo sono ottenute a partire dalla conoscenza delle precipitazioni intense regionalizzate, delle caratteristiche morfometriche dei bacini imbriferi e delle proprietà d'assorbimento dei suoli.

L'approccio usato per la costruzione degli ietogrammi di progetto è stato differenziato relativamente ai sottobacini principali, Vara e Magra, a monte della confluenza, al tratto a valle della stessa ed ai piccoli torrenti che affluiscono nel tratto terminale.

I dati di carattere territoriale quali la litologia, l'uso del suolo, la copertura vegetale sono sintetizzate nel metodo "Curve number" dell'U.S. Soil Conservation Service (SCS-USDA, 1968), che, opportunamente "tarato", consente una sintesi di tale complesso di fenomeni. Il metodo è idoneo a rappresentare, globalmente ed in modo "quantitativo",

⁹ Autorità di bacino interregionale del fiume Magra, Piano stralcio "assetto idrogeologico" del bacino del fiume Magra e del torrente Parmignola – Relazione generale; Op. cit.

 	PROGETTISTA  Snamprogetti	COMMESSA P66990	UNITÀ 000
	LOCALITÀ Regione Toscana - Regione Emilia Romagna	SPC. LA-E-80081	
	PROGETTO Metanodotto Pontremoli - Cortemaggiore	Fg. 15 di 43	Rev. 0

l'influenza delle caratteristiche geologiche e di uso del suolo nei bacini sul fenomeno d'invaso e di infiltrazione degli afflussi¹⁰.

I risultati conseguiti in ambito PAI, per i diversi tempi di ritorno d'interesse, sono interpretati, del tutto analogamente a quanto in ambito VAPI, con una legge che correla le portate massime all'area della superficie drenata. Gli studi VAPI hanno inoltre determinato relazioni tra le massime portate attese ed altri parametri morfometrici di bacino.

3.3 Applicazione dei modelli di calcolo

I risultati dello studio effettuato in ambito PAI¹¹, si concretizzano in relazioni di regressione distinte, costruite al variare della estensione del bacino e del tempo di ritorno.

Per l'applicazione del modello afflussi-deflussi costruito su analisi regionale delle piogge intense alla scale di bacino del Magra, è stata utilizzata la procedura basata sull'utilizzo della distribuzione di probabilità TCEV.

La fattispecie di interesse ricade nella casistica dei bacini di media estensione areale, tributari del Magra a monte della confluenza con il corso del fiume Vara; la formulazione proposta è data da

$$Q = K_T \cdot A^\alpha$$

con K_T dipendente dal tempo di ritorno ed α variabile secondo la grandezza del bacino.

<i>AdB fiume Magra, parametri per la determinazione della portata al colmo di piena - alto Magra ed affluenti a monte della confluenza con il fiume Vara</i>								
T_r	30 anni		100 anni		200 anni		500 anni	
A (km ²)	A < 39	A > 39	A < 50	A > 50	A < 65	A > 65	A < 80	A > 80
K_T	15	26	20	36	23	43	28	54
α	0.85	0.70	0.85	0.70	0.85	0.70	0.85	0.70

Posto $A = 38,8 \text{ km}^2$, segue:

T_r	30 anni	100 anni	200 anni	500 anni
Q (m ³ /s)	336	448	516	628

¹⁰ Il parametro adimensionale CN, per cui $0 < CN < 100$ (nessun deflusso, massimo deflusso), viene assegnato in funzione della permeabilità, della copertura vegetale ma soprattutto gode di variabilità secondo le condizioni potenziali di imbibimento del suolo all'inizio dell'evento di pioggia significativo.

¹¹ Allegato 4 alle Norme di attuazione, "Piano stralcio assetto idrogeologico del bacino del fiume Magra"; Op. cit.

 	PROGETTISTA  Snamprogetti	COMMESSA P66990	UNITÀ 000
	LOCALITÀ Regione Toscana - Regione Emilia Romagna	SPC. LA-E-80081	
	PROGETTO Metanodotto Pontremoli - Cortemaggiore	Fg. 16 di 43	Rev. 0

Secondo lo studio effettuato in ambito VAPI¹², l'Italia nord-occidentale può essere suddivisa in quattro sottozone omogenee. Tale suddivisione è ottenuta attraverso l'analisi delle piene massime annuali. Come distribuzione di probabilità cumulata del coefficiente di crescita del massimo annuale delle portate al colmo, è stata adottata la distribuzione generalizzata del valore estremo *GEV*.

Il bacino di interesse ricade nella zona denominata C, che include Appennino nord occidentale e bacini tirrenici. Per essa è stata determinata la relazione

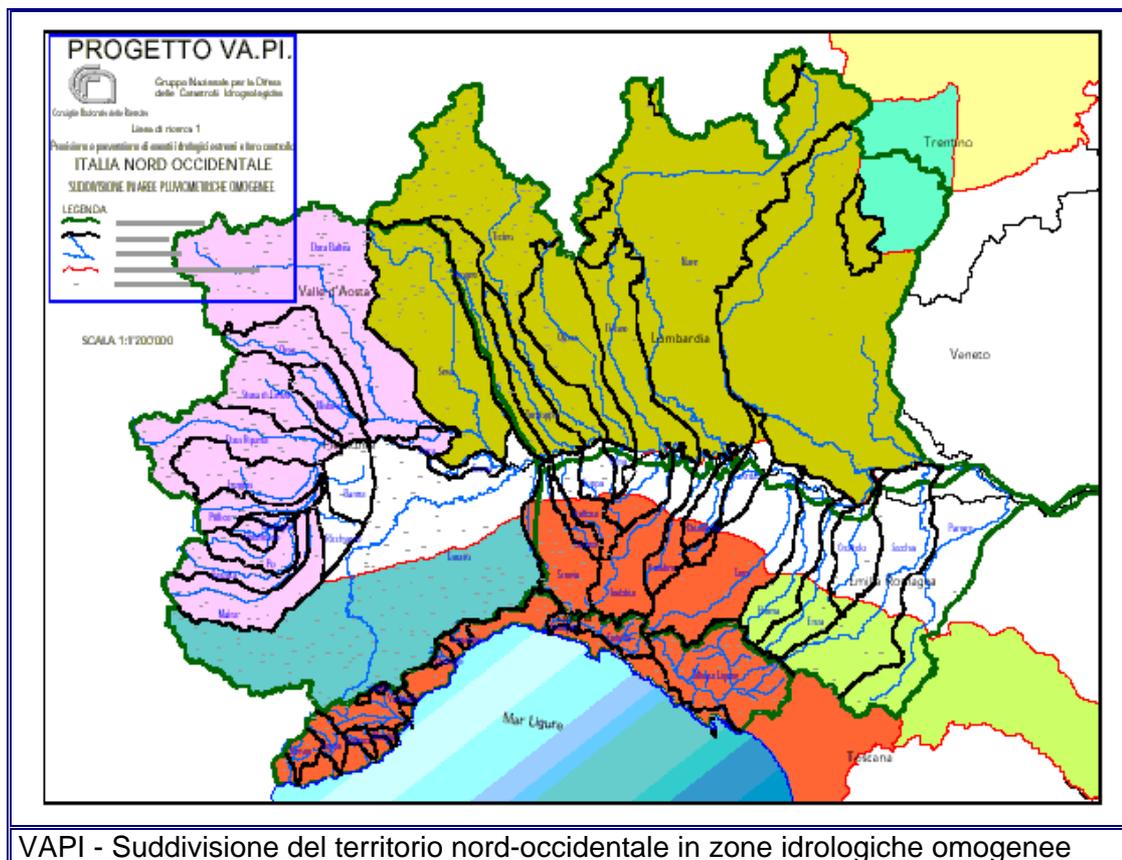
$$K_T = 0,643 - (0,377/0,276) \cdot [1 - \exp(0,276 \cdot y_T)]$$

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

Per la stima del valor medio (portata indice), q_m tale che

$$Q = K_T \cdot q_m$$

l'identificazione delle aree omogenee è stata effettuata con riferimento al valor medio annuo della portata al colmo di piena istantanea, e sono state tarate diverse formule empiriche, con il metodo della regressione statistica.



¹² C.N.R. -GNDCI Linea 1 – GNDCI, progetto VAPI, “Rapporto di sintesi sulla valutazione delle piene in Italia”, settori Parma e Genova; 2001.

 	PROGETTISTA  Snamprogetti	COMMESSA P66990	UNITÀ 000
	LOCALITÀ Regione Toscana - Regione Emilia Romagna	SPC. LA-E-80081	
	PROGETTO Metanodotto Pontremoli - Cortemaggiore	Fg. 17 di 43	Rev. 0

A tale valore, per il territorio della sottozona C, si associano le seguenti relazioni

<i>Progetto VAPI, parametri per la determinazione della portata indice al colmo di piena – bacini appenninici nord occidentali e bacini tirrenici</i>				
	c_0	c_1	c_2	c_3
$q_m = c_0 \cdot A^{c_1}$	5,20	0,750		
$q_m = c_0 \cdot A^{c_1} \cdot H_m^{c_2}$	2,62	0,807	0,0626	
$q_m = c_0 \cdot A^{c_1} \cdot H_m^{c_2} \cdot F_f^{c_3}$	2,51	0,874	0,0717	0,265

Posto

- $A = 38,8 \text{ km}^2$,
- $H_m^{13} = 620,1 \text{ m s.l.m.}$,
- $F_f = 0,168$,

si riportano le tabelle di sintesi relative alla applicazione delle procedura descritte al caso in studio.

Fattore di crescita: $K_T = 0.643 - (0.377/0.276) \cdot [1 - \exp(0.276 \cdot y_T)]$				
T_r	30 anni	100 anni	200 anni	500 anni
K_T	2,75	4,14	5,17	6,87
Portata indice : $q_m = c_0 \cdot A^{c_1}$				
$Q \text{ (m}^3/\text{s)}$	222	335	418	555
Portata indice : $q_m = c_0 \cdot A^{c_1} \cdot H_m^{c_2}$				
$Q \text{ (m}^3/\text{s)}$	206	311	388	516
Portata indice : $q_m = c_0 \cdot A^{c_1} \cdot H_m^{c_2} \cdot F_f^{c_3}$				
$Q \text{ (m}^3/\text{s)}$	167	251	314	417

Da cui si evince una tendenza a valori progressivamente minori della portata di massima piena quando si considera l'influenza di un maggior numero di parametri geomorfometrici del bacino (risultato apparentemente equivalente una più appropriata referenziazione locale dei modelli regionali).

Una metodologia di tipo tradizionale, utile per validare il dato di massima piena derivante da analisi di tipo regionale, fa riferimento al contributo unitario di piena, dedotto dai valori delle medie dei colmi di bacini idrologicamente simili e prossimi al

¹³ Ai fini di una valutazione della portata di piena, nel quadro di un confronto tra i risultati delle relazioni elencate, si assegna al parametro H_m il valore della quota media dell'asta LPD.

 	PROGETTISTA  Snamprogetti	COMMESSA P66990	UNITÀ 000
	LOCALITÀ Regione Toscana - Regione Emilia Romagna	SPC. LA-E-80081	
	PROGETTO Metanodotto Pontremoli - Cortemaggiore	Fg. 18 di 43	Rev. 0

bacino in esame, dotati di stazione idrometrica.

Pur nella difficoltà della definizione pratica del concetto di “similitudine idrologica”, per un confronto tra i modelli disponibili fin qui descritti, sussiste così la possibilità di una verifica “locale”, in base ad elementi oggettivi riferiti alle caratteristiche idrologiche del territorio¹⁴.

La stima della portata indice, in questo caso, si ottiene moltiplicando il contributo unitario medio del bacino “simile” per la superficie del bacino di interesse.

A tal fine (in assenza di più idonee alternative in termini di superficie sottesa), è possibile ricorrere alla serie costituita dai deflussi specifici di piena derivata dalla serie storica delle portate al colmo registrate nella stazione idrometrica di Magra a Calamazza, dotata di sufficiente estensione campionaria e la cui quota media del bacino a monte (612 m s.l.m.) è del tutto comparabile con quella relativa al corso d'acqua in studio.

<i>Magra a Calamazza (A = 939 km²), serie storica del contributo unitario di massimo deflusso annuo: $q_c = Q_{Max}/A$ (m³/s·km²)</i>			
anno	q_c	anno	q_c
1930	0,44	1951	3,27
1931	1,22	1952	2,51
1932	0,96	1953	1,12
1933	0,45	1954	2,02
1934	3,30	1955	1,20
1935	2,69	1956	0,72
1936	0,81	1957	0,73
1937	1,30	1958	1,60
1938	1,42	1959	2,77
1939	1,50	1960	3,71
1940	3,30	1961	1,52
1941	2,63	1962	0,86
1942	0,99	1963	1,08
1943	0,62	1964	1,61
1944	0,48	1965	1,75
1946	1,11	1966	2,00
1947	1,56	1967	1,56
1948	1,14	1968	2,04
1949	2,18	1969	2,69
1950	1,52	1970	1,59

Per tale serie sperimentale si è determinata, oltre che il valor medio, la distribuzione di frequenza sulla base della legge asintotica di probabilità di Gumbel, con parametri calcolati con il metodo dei momenti.

¹⁴ VAPI, “Rapporto di sintesi sulla valutazione delle piene in Italia”, settori Parma e Genova; Op. cit.

 	PROGETTISTA  Snamprogetti	COMMESSA P66990	UNITÀ 000
	LOCALITÀ Regione Toscana - Regione Emilia Romagna	SPC. LA-E-80081	
	PROGETTO Metanodotto Pontremoli - Cortemaggiore	Fg. 19 di 43	Rev. 0

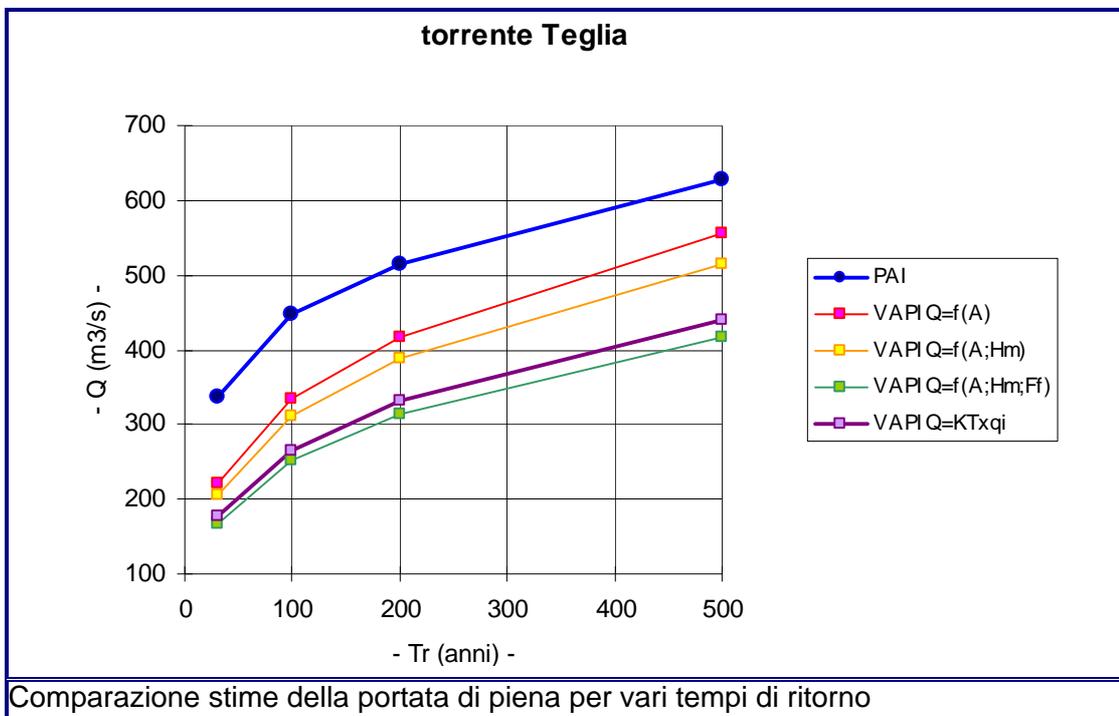
<i>Magra a Calamazza, regolarizzazione di Gumbel (metodo dei momenti) della serie storica del contributo unitario di massimo deflusso annuo</i>					
M(dati)	S(dati)	α		u	
1,65	0,86	1,500		1,265	
Tempo di ritorno T_r (anni)		30	100	200	500
q_c ($m^3/s \cdot km^2$)		3,52	4,33	4,80	5,41

Utilizzando il valor medio quale portata indice (q_i) della procedura VAPI, segue:

Fattore di crescita: $K_T = 0,643 - (0,377/0,276) \cdot [1 - \exp(0,276 \cdot y_T)]$				
T_r	30 anni	100 anni	200 anni	500 anni
K_T	2,75	4,14	5,17	6,87
Portata indice : $q_m = 1,65$				
Q (m^3/s)	176	265	331	440

In merito ai valori determinati sulla base delle procedure presentate si osserva quanto segue:

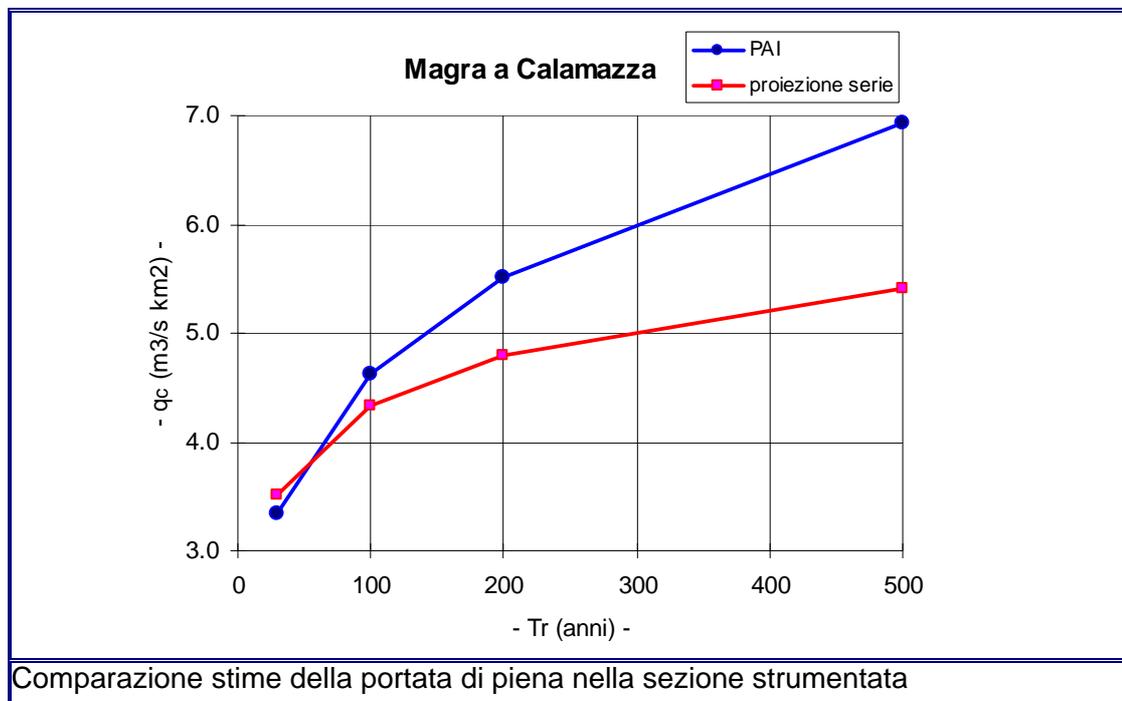
- l'applicazione del modello PAI al caso in esame fornisce valori costantemente maggiori rispetto alla applicazione del modello VAPI;



- l'applicazione del modello PAI al bacino sotteso dalla stazione strumentata Magra a Calamazza, in termini di deflusso specifico massimo per unità d'area, determina

 	PROGETTISTA  Snamprogetti	COMMESSA P66990	UNITÀ 000
	LOCALITÀ Regione Toscana - Regione Emilia Romagna	SPC. LA-E-80081	
	PROGETTO Metanodotto Pontremoli - Cortemaggiore	Fg. 20 di 43	Rev. 0

per $T_r = 200$ anni, stime superiori ai valori probabilistici (regolarizzazione di Gumbel) relativi alla serie storica, (almeno relativamente ai dati disponibili).



3.4 Conclusioni dello studio idrologico

Si evidenzia che la proiezione probabilistica della portata al colmo, valutata sulla base del modello PAI, sebbene potenzialmente più aderente alla realtà idrologica locale, fornisce valori del tutto prudenziali rispetto a quanto derivante dall'applicazione degli altri modelli disponibili.

Ai fini delle verifiche idrauliche, in ragione dell'importanza dell'opera più che degli effetti che essa potrebbe indurre sull'assetto idrografico, si ritiene di poter operare in chiave conservativa, facendo diretto riferimento ai valori derivanti dalla procedura PAI di stima della massima piena attesa.

Ciò trova motivazione anche in quanto, sulla base di rilievi statistici e di altri riscontri scientificamente attendibili, non consolidati a causa della insufficiente estensione del periodo di osservazione, sussiste la tendenza ad identificare il periodo presente come caratterizzato da effetti climatici di transizione, di cui settori degli ambienti scientifici individuano l'origine in cause antropiche, e che si manifestano in un aumento di intensità degli eventi piovosi ed in una diminuzione di detti eventi nel corso dell'anno, Poiché tale constatazione non può essere compresa nelle analisi idrologiche derivanti da serie storiche di osservazioni, è recente orientamento della ingegneria idraulica proporre, laddove potenzialmente necessario, ed in specie per i piccoli bacini (ove le maggiori intensità hanno una diretta incidenza), un fattore di cautela mirato ad evitare sottostime degli eventi di piena.

Ne consegue che, per il dato di portata al colmo, di utilizzo per l'analisi del deflusso nel corso d'acqua in studio, si assume, per $T_r = 200$ anni, $Q_{Max} = 520 \text{ m}^3/\text{s}$.

 	PROGETTISTA  Snamprogetti	COMMESSA P66990	UNITÀ 000
	LOCALITÀ Regione Toscana - Regione Emilia Romagna	SPC. LA-E-80081	
	PROGETTO Metanodotto Pontremoli - Cortemaggiore	Fg. 21 di 43	Rev. 0

Tale assunzione risulta congruente con i presupposti dello studio, non richiedendosi all'analisi idrologica di addivenire a risultati di valenza assoluta ma solo di fornire un utile dato cautelativo per l'analisi degli effetti della piena.

 	PROGETTISTA  Snamprogetti	COMMESSA P66990	UNITÀ 000
	LOCALITÀ Regione Toscana - Regione Emilia Romagna	SPC. LA-E-80081	
	PROGETTO Metanodotto Pontremoli - Cortemaggiore	Fg. 22 di 43	Rev. 0

4 STUDIO IDRAULICO

4.1 Finalità e presupposti dello studio idraulico

Come precedentemente esposto, la superficie imbriferà soggetta alle valutazioni idrologiche condotte è delimitata dalla sezione di attraversamento, che costituisce l'estremo di indagine. Tutte le valutazioni, sono pertanto riferite a tale limite come sezione di chiusura.

Lo studio è finalizzato alle seguenti determinazioni:

- stima ed analisi dei parametri idraulici che caratterizzano il deflusso della portata di piena assunta come riferimento, in corrispondenza della sezione interessata dalle opere in progetto;
- valutazione dei potenziali fenomeni erosivi del fondo alveo e degli approfondimenti, che generalmente si verificano in concomitanza di eventi di piena eccezionale.

La modellazione è condotta in condizioni di moto uniforme, in quanto l'analisi è limitata agli effetti del massimo valore di livello idrico raggiunto durante l'evento di piena ed al corrispondente regime di velocità, per la sola sezione di interesse, appositamente rilevata.

Poiché l'intervento non comporta variazioni della geometria d'alveo, lo studio idraulico è eseguito pertanto sia con riferimento alla situazione attuale sia alla configurazione post opera.

4.2 Assetto geometrico e modellazione dell'alveo

I dati geometrici di base derivano da apposito rilievo topografico, che ha consentito la redazione di un piano quotato e la definizione di dettaglio delle caratteristiche geometriche dell'alveo e delle sponde nella sezione di attraversamento, oltre che la determinazione della pendenza media lungo il profilo d'asta inciso, nel tronco prossimo al sito di intervento. In particolare, il rilievo della sezione è stato effettuato lungo la direttrice di posa in sub-alveo della condotta.

Ai fini della verifica idraulica, si effettua la trasformazione geometrica della sezione del tracciato di posa, in quanto non ortogonale all'asse di deflusso di piena (angolo di incidenza 0,81 r); a tale scopo, la sezione di verifica viene perciò rideterminata, mediante le componenti normali all'asse longitudinale dell'andamento idrico presunto in coincidenza con la portata al colmo¹⁵. Il risultato è una trasversale giacente su un piano ortogonale al vettore velocità della piena; convenientemente estesa alle aree golenali e, nelle porzioni arginate, estesa fino al piano di campagna esterno¹⁶.

¹⁵ Secondo le modalità operative previste, ad esempio, in "PODIS, Progetto operativo difesa del suolo – Metodologie e linee guida per la prevenzione ed il controllo del rischio idrogeologico ; Rischio idraulico", Istituto poligrafico dello Stato, Roma, 2006.

¹⁶ Punto 5, allegato 5 alle Norme di attuazione, "Piano stralcio assetto idrogeologico del bacino del fiume Magra"; Op. cit.

 	PROGETTISTA  Snamprogetti	COMMESSA P66990	UNITÀ 000
	LOCALITÀ Regione Toscana - Regione Emilia Romagna	SPC. LA-E-80081	
	PROGETTO Metanodotto Pontremoli - Cortemaggiore	Fg. 23 di 43	Rev. 0

Quest'ultimo è identificato tenendo conto dell'andamento medio dell'alveo inciso e delle presumibili influenze delle protezioni spondali esistenti sulla direttrice del deflusso eccezionale (tale condizione deriva dalla considerazione che il modello d'alveo è funzione della entità della corrente, per cui le sinuosità di magra tendono a scomparire durante il deflusso di piena e l'asta del corso d'acqua ne risulta "rettificata"¹⁷).

La sezione di verifica è costruita con progressive da sinistra a destra e con osservazione da monte verso valle; i relativi dati di elaborazione sono riportati in appendice. Gli stralci cartografici di dettaglio ivi compreso quello del rilievo planimetrico sono parimenti riportati in appendice.

Per quanto concerne la rappresentazione dei fattori locali di attrito, sulla base di ciò che si è descritto in sede di caratterizzazione del sito, si riscontrano motivi di differenziazione tra alveo inciso e le eventuali aree di esondazione oltre le sponde. Ai fini della simulazione, come parametro si adotta l'indice di scabrezza di Manning "n". Il campo di valori da assegnare all'indice di Manning, discende dalle osservazioni effettuate da Horton e Ramser (VenTeChow, 1959), e dal Dipartimento dell'Agricoltura degli Stati Uniti; in particolare per "corsi d'acqua naturali, con argini, cespugli sommersi solo per grandi portate e con fondo costituito da ghiaia, ciottoli ed alcuni macigni", il minimo valore per dell'indice n di Manning è 0,030, mentre quello massimo è 0,050, I valori assunti sono peraltro coincidenti con quelli consigliati nella letteratura tecnica, per corsi d'acqua in regime di piena, aventi alveo naturale con depositi e sezioni soggette a variazioni geometriche, e derivano dall'applicazione della formula generale proposta da Cowan (1956) e VenTeChow (1959), secondo la quale:

$$n = (n_{\text{superficie}} + n_{\text{vegetazione}} + n_{\text{restr/allarg}} + n_{\text{irregolarità}} + n_{\text{ostruzioni}}) \cdot m_{\text{curve}};$$

ove, secondo i valori componenti sottoposti a verifica per i corsi d'acqua italiani

		m
frequenza di deviazioni longitudinali e meandri	ridotta (massima piena)	1,000
	moderate	1,150
	elevate (portate ordinarie)	1,300

		n/m
materiale del fondo	terra	0,020
	roccia	0,025
	sedimenti fini	0,020-0,024
	sedimenti grossolani	0,025-0,028
aspetto medio della vegetazione	vegetazione bassa	0,000-0,010
	vegetazione media	0,010-0,025
	vegetazione alta e rada	0,025-0,050
	vegetazione alta e fitta	0,050-0,100
variazione di forma della sezione	graduale	0,000
	variazione occasionale larghezza	0,005
	variazione frequente di forma o larghezza	0,010-0,015
regolarità del contorno	sponde lisce e regolari	0,000
	irregolarità ridotta	0,005
	irregolarità moderata	0,010
	irregolarità elevata	0,020
effetto relativo di	assenti o trascurabili	0,000

¹⁷ La difesa idraulica delle aree urbane – Atti del corso di aggiornamento 1-5/10/2001 – Politecnico di Milano. A cura di Maione U., Brath. A., Mignosa P. - Editoriale Bios

 	PROGETTISTA  Snamprogetti	COMMESSA P66990	UNITÀ 000
	LOCALITÀ Regione Toscana - Regione Emilia Romagna	SPC. LA-E-80081	
	PROGETTO Metanodotto Pontremoli - Cortemaggiore	Fg. 24 di 43	Rev. 0

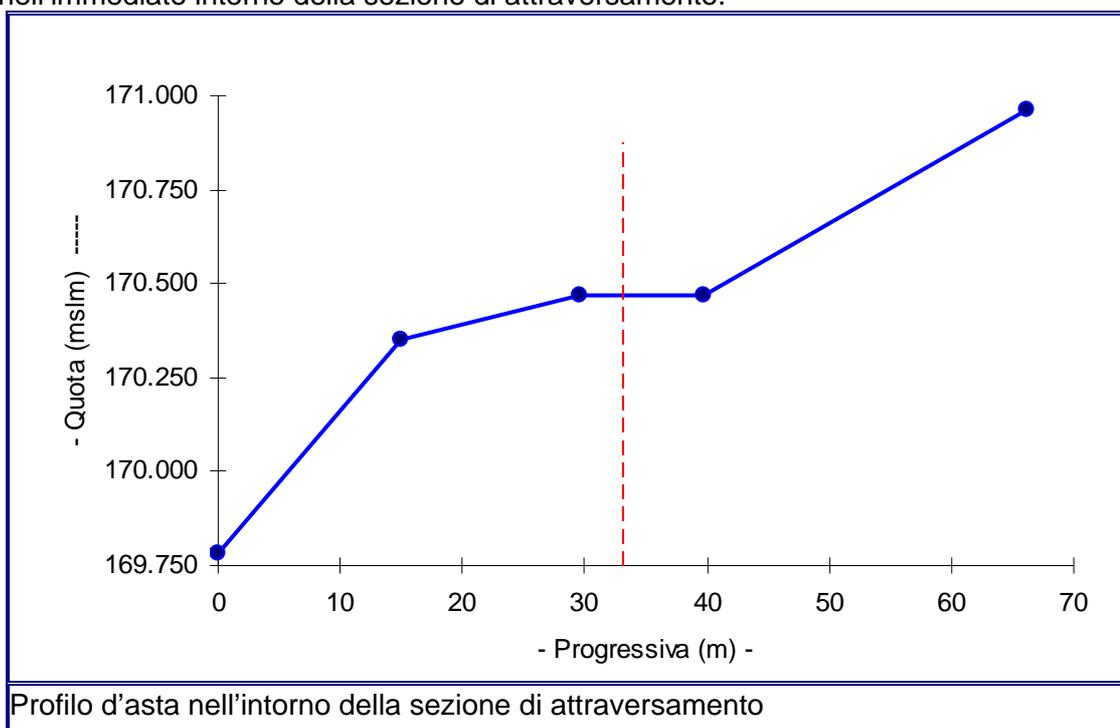
ostruzioni e singolarità	ridotte	0,010-0,015
	moderate	0,020-0,030
	elevate	0,040-0,060

Da cui:

- $n = (0,025+0,000+0,005+0,005+0,000) \cdot 1,000 = 0,035$, per l'alveo principale;
- $n = (0,020+0,020+0,000+0,000+0,000) \cdot 1,000 = 0,040$, per le aree di deflusso oltre i limiti di sponda rilevati.

Tali valori corrispondono a 25÷30 m^{1/3}s⁻¹ del coefficiente Ks nei termini di scabrezza di Gauckler-Strickler; essi sono quindi aderenti agli intervalli consigliati dalla Autorità di bacino¹⁸ e negli atti del "Progetto operativo difesa del suolo"¹⁹.

Per quanto riguarda la pendenza del fondo alveo, se ne valuta l'andamento attuale nell'immediato intorno della sezione di attraversamento.



In particolare, si evidenziano una pendenza media, su una lunghezza di oltre 65 m, pari a circa 1,8 %, ed una pendenza locale (tra due punti rilevati nelle immediate vicinanze dell'attraversamento), praticamente nulla. Tale campo di valori si può considerare utile per rappresentare anche le condizioni successive all'intervento, giacché questo tenderà a ripristinare la situazione plano-altimetrica originale del corso d'acqua.

¹⁸ Punto 2, allegato 5 alle Norme di attuazione, "Piano stralcio assetto idrogeologico del bacino del fiume Magra"; Op. cit.

¹⁹ PODIS, Progetto operativo difesa del suolo; Op. cit.

 	PROGETTISTA  Snamprogetti	COMMESSA P66990	UNITÀ 000
	LOCALITÀ Regione Toscana - Regione Emilia Romagna		SPC. LA-E-80081
	PROGETTO Metanodotto Pontremoli - Cortemaggiore		Fg. 25 di 43

Poiché si è preventivamente stimato che i fenomeni idraulici di interesse per la sicurezza della condotta sono correlati, oltre che ad elevate energie del deflusso di piena, anche all'entità dell'altezza della corrente rispetto al fondo (numero di Froude ≈ 1), appare congruente con le finalità dello studio determinare i parametri di moto uniforme sulla base della media tra i valori rilevati, al fine di rappresentare sommariamente tale alternanza localizzata della pendenza. Si assume quindi $i = 0,9\%$,

4.3 Parametri del deflusso di piena

I parametri idraulici caratteristici nella sezione di attraversamento sono determinati attraverso il programma di calcolo FLOWMASTER v6,0²⁰ (Report riportato in appendice). Si procede ad ulteriore verifica mediante il codice di calcolo HEC-RAS²¹, applicato, per il caso di moto uniforme, ad un tronco teorico di deflusso, identificato sulla base della pendenza media assegnata, ed avente costante sviluppo geometrico, e costanti caratteristiche di resistenza,

Tali due simulazioni si differenziano per le modalità di calcolo degli effetti di scabrezza, per profili bagnati che interessano porzioni alle quali si attribuiscono parametri di attrito diversificati. Il codice HEC-RAS, in particolare, consente anche una analisi frazionata del deflusso, nel caso che esso interessi aree di esondazione oltre i limiti del canale principale, in particolare per quanto attiene alla determinazione della tensione tangenziale.

Dai risultati del modello idraulico, si evince che in regime di piena, relativa al tempo di ritorno prefissato ($T_r = 200$ anni), l'alveo medio, identificato come canale principale di deflusso, non è in grado di contenere la portata entro gli elementi di sponda, identificati sulla base della sezione rilevata (e rideterminata). Le acque rimangono comunque confinate entro limiti geometricamente definiti, coincidenti con elementi morfologici presenti oltre la sommità delle scarpe di incisione,

Le condizioni di deflusso comportano altezza idrica rispetto alla minima quota d'alveo pari a circa 3,8 m, in regime di corrente lenta, ma con numero di Froude $> 0,90$,

La velocità media della corrente si stima pari a 3,7÷3,9 m/s, ed, in particolare, pari ad oltre 4,4 m/s nell'alveo medio. Il carico cinetico è pari a circa 0,8 m.

I parametri idraulici fondamentali risultano coerenti tra loro ed attendibili, nei limiti del modello utilizzato. Da ciò discende che anche le valutazioni in merito ai potenziali fenomeni erosivi interessanti l'alveo, in regime di massima piena, conducono a valori aventi sufficienti margini di significatività,

I principali parametri determinati, riportati nel seguito in forma tabellare, sono i seguenti:

parametri globali di deflusso

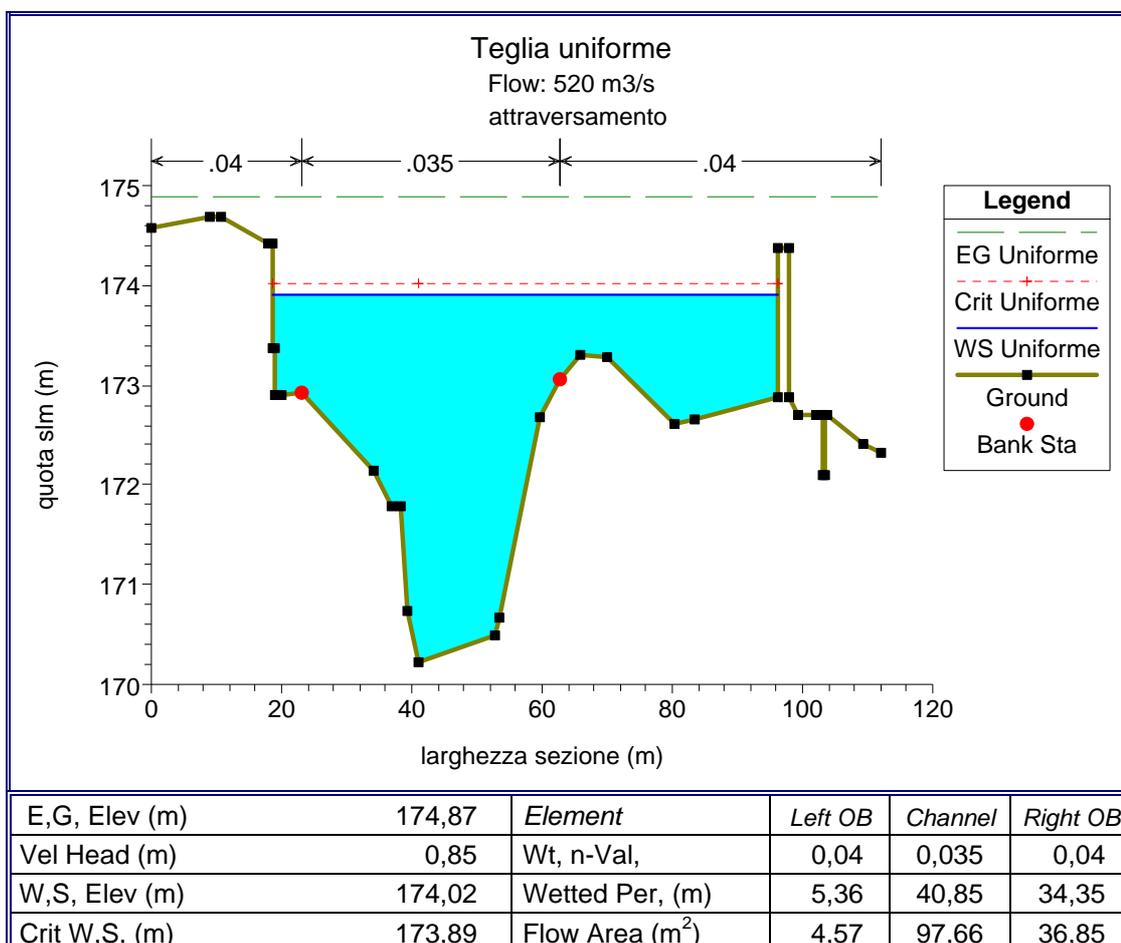
- E,G, Elev, quota della linea dell'energia per il profilo liquido calcolato;
- Vel, Head, carico cinetico;
- W,S, Elev, quota del pelo libero;

²⁰ Haestad Methods Inc. – 37 Brookside road, Waterbury, CT 06708 U.S.A.

²¹ River Analysis System, versione 3.1.3, maggio 2005, sviluppata da U.S. Army Corp of Engineers - Hydrologic Engineering Center - 609 Second Street, Davis, CA, (U.S.A..)

 	PROGETTISTA  Snamprogetti	COMMESSA P66990	UNITÀ 000
	LOCALITÀ Regione Toscana - Regione Emilia Romagna	SPC. LA-E-80081	
	PROGETTO Metanodotto Pontremoli - Cortemaggiore	Fg. 26 di 43	Rev. 0

- Crit W,S, quota corrispondente all'altezza critica del pelo libero;
 - E,G, Slope, pendenza della linea dell'energia;
 - Vel, Total, velocità complessiva di flusso;
 - Max Chl Dpth, profondità massima in alveo;
 - Froude # Chl, numero di Froude;
- parametri parziali delle componenti di deflusso oltre i limiti di sponda sinistra (LeftOB), nell'alveo medio principale (Chan) ed oltre i limiti di sponda destra (RightOB)*
- Wt, n-Val,, coefficiente di scabrezza di Manning;
 - Wetted Per,, lunghezza del contorno bagnato;
 - Flow Area, superficie della sezione di deflusso;
 - Flow, deflusso parziale;
 - Top Width, larghezza superficiale della sezione liquida;
 - Avg, Vel,, velocità nelle aree di deflusso parziale,
 - Hydr Depth, altezza liquida equivalente,



 	PROGETTISTA  Snamprogetti	COMMESSA P66990	UNITÀ 000
	LOCALITÀ Regione Toscana - Regione Emilia Romagna	SPC. LA-E-80081	
	PROGETTO Metanodotto Pontremoli - Cortemaggiore	Fg. 27 di 43	Rev. 0

E,G, Slope (m/m)	0,0090	Flow (m ³ /s)	8,82	428,29	82,89
Vel Total (m/s)	3,74	Top Width (m)	4,25	39,97	33,17
Max Chl Dpth (m)	3,79	Avg, Vel, (m/s)	1,93	4,39	2,25
Froude # Chl	0,95	Hydr, Depth (m)	1,08	2,44	1,11
<i>Grafico della sezione di deflusso e tabella risultati</i>					

 	PROGETTISTA  Snamprogetti	COMMESSA P66990	UNITÀ 000
	LOCALITÀ Regione Toscana - Regione Emilia Romagna	SPC. LA-E-80081	
	PROGETTO Metanodotto Pontremoli - Cortemaggiore	Fg. 28 di 43	Rev. 0

5 VALUTAZIONE DEI FENOMENI EROSIVI IN ALVEO

5.1 Fenomeni potenziali oggetto di indagine

Nel corso degli eventi di piena, il fondo degli alvei subisce modifiche morfologiche, spesso anche di notevole entità, innescate da cause che possono essere definite "intrinseche" (dovute cioè a fenomeni naturali quali confluenze, curve, ostacoli naturali ecc.) o "indotte" (legate ad alterazioni di origine antropica diretta o indiretta, quali opere in alveo, escavazioni, ecc.). La valutazione di tali fenomeni riveste notevole importanza ai fini del dimensionamento degli interventi in alveo.

Allo stato attuale delle conoscenze tecniche, la valutazione dell'entità degli approfondimenti, dei fenomeni di escavazione e di trasporto localizzato, nella maggioranza dei casi, dipende da un puntuale riscontro sul campo, atto a valutare lo stato generale dell'alveo. La stima del valore atteso per tali fenomeni rimane, nella maggioranza dei casi, un'attività dipendente in massima parte dall'esperienza e dalla sensibilità del progettista, il quale deve avvalersi in misura preponderante degli esiti di appositi sopralluoghi per valutare lo stato generale dell'alveo. Le analisi di natura sperimentale disponibili, pur fornendo utili indicazioni circa l'entità dei fenomeni, risultano spesso legate alle particolari condizioni al contorno, poste a base della indagine, ed ai modelli rappresentativi realizzati. Il lavoro di ricerca ha prodotto negli ultimi 50 anni una serie di risultati che forniscono utili indicazioni circa l'entità dei fenomeni di escavazione e trasporto localizzato, solo in alcuni casi tipici. Va sottolineato che tali risultati sono in generale caratterizzati da due limiti principali:

- a) la quasi totalità dei dati utilizzati per la definizione delle metodologie di valutazione delle escavazioni proviene da prove effettuate in laboratorio, su modelli in scala ridotta e su terreni di fondo alveo a granulometria maggiormente omogenea di quanto effettivamente riscontrabile in natura;
- b) ogni formula è strettamente legata a casi particolari di escavazione in alveo e risulta difficilmente estrapolabile a casi simili a quelli sperimentati in laboratorio,

Le considerazioni sopra riportate devono condurre pertanto ad un atteggiamento di estrema cautela nell'uso delle relazioni utilizzate per il calcolo degli approfondimenti, avendo cura di utilizzare ciascuna di esse per casi simili a quelli per cui sono state ricavate ed associando comunque alle valutazioni condotte su scala locale (buche, approfondimenti localizzati) considerazioni ed analisi sulla dinamica d'alveo generale nella zona di interesse (presenza o meno di trasporto solido, variazioni storiche della planimetria d'alveo, granulometria dei sedimenti ed indagine geotecnica sui litotipi presenti nei primi metri al di sotto del fondo, ecc.).

Va osservato che l'applicazione dei procedimenti di calcolo disponibili porta sovente a risultati alquanto diversi tra loro, dovuti ad una più o meno corretta valutazione delle diverse grandezze idrauliche e geometriche esplicitate nelle singole formule. Il principale tra i termini fondamentali di analisi è comunque direttamente conseguente agli effetti idraulici del deflusso di piena, in relazione alle caratteristiche geometriche dell'alveo, e quindi ai parametri idraulici della corrente,

Per quanto attiene alla formazione locale di buche ed approfondimenti, le posizioni e le caratteristiche di queste erosioni sono talvolta abbastanza prevedibili, come ad esempio nel punto di gorgo dei meandri o in corrispondenza di manufatti, ed a volte del tutto imprevedibili, specialmente in alvei a fondo mobile, cioè costituiti da un materiale

 	PROGETTISTA  Snamprogetti	COMMESSA P66990	UNITÀ 000
	LOCALITÀ Regione Toscana - Regione Emilia Romagna	SPC. LA-E-80081	
	PROGETTO Metanodotto Pontremoli - Cortemaggiore	Fg. 29 di 43	Rev. 0

di fondo essenzialmente granulare. Infatti, in tali alvei, anche in assenza di manufatti, sul fondo possono crearsi buche di notevole profondità; le condizioni necessarie per lo sviluppo del fenomeno sembrano individuarsi nella formazione di correnti particolarmente veloci sul fondo e nella presenza di irregolarità geometriche dell'alveo, che innescano il fenomeno stesso. In questi casi, e quando le dimensioni granulometriche del materiale di fondo sono inferiori a 5 cm, i valori raggiungibili dalle suddette erosioni sono generalmente indipendenti dalla granulometria; per dimensioni dei grani maggiori di 5 cm, invece, all'aumentare della pezzatura diminuisce la profondità dell'erosione. Occorre quindi poter stimare quale sia il diametro limite dei clasti trasportabili dalla piena e quindi valutare gli eventuali approfondimenti. Fra i modelli più noti a tal fine (Schoklitsh, Eggemberger, Adami), la formula di Schoklitsh è quella che presenta minori difficoltà nella determinazione dei parametri caratteristici. Per quanto attiene al fenomeno di scavo temporaneo durante le piene o "aratura di fondo", esso raggiunge valori modesti, se inteso come generale abbassamento del fondo alveo, mentre può assumere valori consistenti, localmente, se inteso come migrazione trasversale o longitudinale dei materiali incoerenti. Nel primo caso si tratta della formazione di canali effimeri di fondo alveo sotto l'azione di vene particolarmente veloci; nel secondo caso, tali approfondimenti possono derivare, durante il deflusso di massima piena, dalla formazione di dune disposte trasversalmente alla corrente fluida, che comportano un temporaneo abbassamento della quota d'alveo, in corrispondenza del cavo tra le dune stesse. Allo stato attuale non potendosi fare che semplici ipotesi sul fenomeno, non è possibile proporre algoritmi per calcolare la profondità degli scavi. Le proprietà geometriche del fondo alveo, in relazione all'entità delle tensioni tangenziali indotte dalla corrente, sono state studiate²² da Yalin (1964), Nordin (1965) ed Altri, che hanno proposto di assegnare a tali escavazioni un valore cautelativo pari ad una percentuale dell'altezza idrometrica di piena ivi determinata. In particolare, nel caso di regime di corrente lenta, venne concluso che, per granulometrie comprese nel campo delle sabbie, la profondità del fenomeno risulta comunque inferiore a 1/6 o al massimo 1/3 dell'altezza idrica. Una generalizzazione prudenziale, proposta in Italia, sulla base di osservazioni dirette nei corsi d'acqua della pianura padana, estende il limite massimo dei fenomeni di escavazione per aratura, indipendentemente dalla natura del fondo e dal regime di corrente, ad un valore cautelativo pari al 50% dell'altezza idrometrica di piena²³.

Nel seguito si descrivono quindi le espressioni generali che si ritengono utilizzabili nel caso in oggetto, per la valutazione delle erosioni localizzate e dei potenziali fenomeni di escavazione in alveo, in specie al fine di quantificare il valore che un eventuale approfondimento potrebbe raggiungere rispetto alla quota media iniziale del fondo, interessando quindi la quota di collocazione della condotta.

Diametro limite dei clasti trasportabili

In merito al problema della determinazione del diametro limite dei clasti trasportabili dalla piena, si ricorre alla formula di Shields, che, per i casi di regime turbolento ($Re^* > 1000$), diviene

²² Si veda la sintesi di questi lavori in Graf W.H., "Hydraulics of sediment transport"; McGraw-Hill, U.S.A.; 1971.

²³ Vollo L., "L'aratura di fondo nell'alveo dei fiumi durante le piene"; L'energia elettrica, vol. XXIX; Milano, 1952. Zanovello A., "Sulle variazioni del fondo degli alvei durante le piene"; L'energia elettrica, vol. XXXV; Milano, 1959.

 	PROGETTISTA  Snamprogetti	COMMESSA P66990	UNITÀ 000
	LOCALITÀ Regione Toscana - Regione Emilia Romagna	SPC. LA-E-80081	
	PROGETTO Metanodotto Pontremoli - Cortemaggiore	Fg. 30 di 43	Rev. 0

$$\delta = \frac{\tau_0}{[0.06 \cdot (\gamma_s - \gamma_w)]}$$

dove

- δ è il diametro delle particelle;
- τ_0 è la tensione tangenziale in alveo;
- γ_s è il peso specifico delle particelle;
- γ_w è il peso specifico dell'acqua, considerata, per semplicità, limpida.

Approfondimenti localizzati

Per quanto attiene al rischio di formazione di approfondimenti localizzati, come già esposto, le condizioni necessarie per lo sviluppo di tali fenomeni possono individuarsi nella formazione di correnti particolarmente veloci sul fondo e nella contestuale presenza di irregolarità geometriche dell'alveo, A seguito delle opere in progetto, non dovrebbero potersi manifestare tali particolari condizioni.

Per determinare un valore medio rappresentativo dell'eventuale approfondimento rispetto alla quota media iniziale del fondo, si ricorre alla formula di Schoklitch:

$$S = 0.378 \cdot H^{1/2} \cdot q^{0.35} + 2.15 \cdot a$$

dove

- **S** è la profondità massima degli approfondimenti rispetto alla quota media del fondo, nella sezione d'alveo considerata;
- **H** = $h_0 + v^2/2g$ rappresenta il carico totale relativo alla sezione immediatamente a monte della buca;
- **q** = Q_{Max} / L è la portata specifica per unità di larghezza L della corrente in alveo;
- **a** è dato dal dislivello delle quote d'alveo a monte e a valle della buca.

Il valore di **a** viene assunto in funzione delle caratteristiche geometriche del corso d'acqua, sulla base del dislivello locale del fondo alveo, in corrispondenza della massima incisione, relativo ad una lunghezza pari all'altezza idrica massima ivi determinata.

Arature di fondo

Per quanto riguarda il fenomeno di scavo temporaneo durante le piene, come detto, non disponendo allo stato di algoritmi opportunamente tarati, atti a determinare la potenziale entità del fenomeno in relazione alle specificità del sito di attraversamento, ci si basa sulle considerazioni empiriche proposte in letteratura tecnica, secondo le quali un valore del tutto cautelativo della profondità di tali potenziali escavazioni del fondo (**Z**) è stimabile, in corrispondenza di una assegnata sezione, al massimo in ragione del 50% del battente idrometrico di piena (h_0), ovvero

$$Z = 0,5 \cdot h_0$$

 	PROGETTISTA  Snamprogetti	COMMESSA P66990	UNITÀ 000
	LOCALITÀ Regione Toscana - Regione Emilia Romagna		SPC. LA-E-80081
	PROGETTO Metanodotto Pontremoli - Cortemaggiore		Fg. 31 di 43

5.2 Stima dei massimi approfondimenti attesi

Nelle seguenti tabelle si riportano i valori utili alle determinazioni fin qui descritte, derivati dalla simulazione idraulica in regime di moto uniforme, corrispondenti alla portata di piena definita per il tempo di ritorno T_r fissato a base di studio.

In particolare:

- Shear, tensione tangenziale τ_0 agente sul fondo di scorrimento, distinta nelle componenti di flusso oltre i limiti di sponda sinistra (LOB), nell'alveo principale (Chan) ed oltre i limiti di sponda destra (ROB);
- la terna di valori LOB Elev, Min Ch Elev, ROB Elev, quote geodetiche dei limiti di sponda e quota geodetica minima del fondo d'alveo principale, da cui si ricavano (nota la quota del pelo libero "W,S, Elev") i corrispondenti valori dell'altezza idrometrica locale;
- Vel LOB, Vel Chnl, Vel ROB, valori della velocità media di deflusso nelle aree rispettive che lo compongono (oltre i limiti di sponda e nell'alveo principale).

Shear LOB (N/m ²)	Shear Chan (N/m ²)	Shear ROB (N/m ²)	LOB Elev (m)	Min Ch Elev (m)	ROB Elev (m)	Vel LOB (m/s)	Vel Chnl (m/s)	Vel ROB (m/s)
61,61	172,79	77,56	172,93	170,23	173,06	1,93	4,39	2,25

Assumendo che la natura e le caratteristiche meccaniche dei sedimenti in alveo possano essere qualificati da un valore medio del peso di volume $\gamma_s = 17,0 \div 19,0$ kN/m³, dai risultati della verifica idraulica e sulla base della media di tali valori seguono:

- δ , diametro limite dei clasti trasportabili;
- **H**, carico totale rispetto alla quota d'alveo;
- h_o , altezza idrometrica.

Si riporta il prospetto sintetico dei valori relativi alla portata di verifica:

γ_s (N/m ³)	δ (LOB) (cm)	δ (Chan) (cm)	δ (ROB) (cm)	H (LOB) (m)	H (Chan) (m)	H (ROB) (m)	h_o (LOB) (m)	h_o (Chan) (m)	h_o (ROB) (m)	$h_o - \delta$ (Chan) (m)
18000	12,5	35,2	15,8	1,94	4,64	1,81	1,09	3,79	0,96	3,44

Nello specifico, si evidenziano le condizioni per non rilevanti fenomeni di trasporto di fondo, correlati alla energia della corrente, in caso di piena, La dimensione dei clasti potenzialmente movimentati è però compatibile con la struttura del fondo alveo naturale, e pertanto possibile che si inneschino fenomeni di distacco e/o trascinamento.

E' tuttavia evidente che i valori determinati per la dimensione dei clasti massimi trasportabili godono di significatività unicamente se l'altezza idrica in alveo risulta ad essi sensibilmente superiore, ovvero $h_o - \delta \gg 0$; in questo senso, i

 	PROGETTISTA  Snamprogetti	COMMESSA P66990	UNITÀ 000
	LOCALITÀ Regione Toscana - Regione Emilia Romagna	SPC. LA-E-80081	
	PROGETTO Metanodotto Pontremoli - Cortemaggiore	Fg. 32 di 43	Rev. 0

risultati determinati possono intendersi del tutto validi, sebbene solo in chiave "qualitativa"²⁴.

Avendo fissato il valore della pendenza media del tronco d'alveo in corrispondenza della sezione di attraversamento ed essendo nota l'altezza idrica di piena, si determina il dislivello di quota, a monte ed a valle delle potenziali buche che si potrebbero manifestare:

pendenza alveo	=	0,009
h_o Chan massimo (m)	=	3,79
a stimato [per lunghezza pari a h_o Chan] (m)	=	0,034

Essendo inoltre noti

- Q Left, Q Channel, Q Right, portate defluenti nella sezione trasversale, distinta nelle componenti di flusso oltre i limiti di sponda sinistra (LOB), nell'alveo medio principale (Chan) ed oltre i limiti di sponda destra (ROB),
 - Top W Left, Top W Chnl, Top W Right, larghezza superficiale della sezione liquida, distinta nelle componenti parziali di deflusso,
- da tali valori e dai precedenti seguono:

- q , portata specifica per unità di larghezza della corrente in alveo;
- S , profondità massima dei potenziali approfondimenti localizzati;
- Z , profondità massima delle potenziali arature di fondo.

Nel dettaglio, si ricava:

q (LOB) (m ³ /s m)	q (Chan) (m ³ /s m)	q (ROB) (m ³ /s m)	a (m)	S (LOB) (m)	S (Chan) (m)	S (ROB) (m)	Z (LOB) (m)	Z (Chan) (m)	Z (ROB) (m)
2,08	10,72	2,50	0,03	0,00	1,93	0,77	0,55	1,90	0,48

Sulla base dei dati determinati, si desume che i valori delle potenziali erosioni localizzate in alveo, approfondimenti S ed arature Z , corrispondenti all'evento di piena (per $T_r = 200$ anni), presentano prevalenza per il primo fenomeno.

E' evidente che la stima quantitativa del potenziale effetto della piena sull'assetto del fondo del corso d'acqua, con profondità d'erosione localizzata pari ad oltre 1,9 m, deve essere comparata con quello che è l'attuale stato dell'incisione principale d'alveo; in altri termini, l'attuale conformazione geometrica, derivante dalla evoluzione geomorfologica, più o meno naturale del corso d'acqua deve poter far presagire la sussistenza del rischio stimato. In tal senso, essendo l'altezza dell'alveo inciso (pur con i limiti relativi alla arbitrarietà

²⁴ Occorre considerare che condizioni straordinarie di velocità della corrente alterano i risultati delle valutazioni, che sono effettuate sulla base di formulazioni adatte al caso di alvei fluviali di pianura e che pertanto possono mal adattarsi alla situazione di tronchi torrentizi. È inoltre da rilevare che le modalità di analisi, condotte in condizioni di moto uniforme, e il dato di portata al colmo assunto a base delle verifiche, in quanto prudenziale nei confronti dei fenomeni di maggiore interesse (ovvero l'eventuale erosione del fondo in corrispondenza dell'attraversamento) conducono ad una sovrastima delle manifestazioni di trasporto (che andrebbero semmai valutate mediante apposite simulazioni, che esulano dalle necessità del presente contesto).

 	PROGETTISTA  Snamprogetti	COMMESSA P66990	UNITÀ 000
	LOCALITÀ Regione Toscana - Regione Emilia Romagna	SPC. LA-E-80081	
	PROGETTO Metanodotto Pontremoli - Cortemaggiore	Fg. 33 di 43	Rev. 0

di identificazione dei limiti di sponda del canale principale) inferiore a 3,0 m, parrebbe del tutto sovrastimata la potenzialità del fenomeno. E' evidente che maggiori profondità di posa della condotta, in corrispondenza della collocazione in sub-alveo, forniscono ampia garanzia in merito ai potenziali fenomeni di erosione in caso di massima piena.

 	PROGETTISTA  Snamprogetti	COMMESSA P66990	UNITÀ 000
	LOCALITÀ Regione Toscana - Regione Emilia Romagna	SPC. LA-E-80081	
	PROGETTO Metanodotto Pontremoli - Cortemaggiore	Fg. 34 di 43	Rev. 0

6 SINTESI E CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Nell'ambito del progetto di realizzazione del metanodotto "Pontremoli-Cortemaggiore", costituito da condotta DN 900 mm (36"), è previsto l'attraversamento in sub-alveo del torrente "Teglia", al confine tra i territori dei Comune di Mulazzo, Filattiera e Pontremoli.

Il tronco del corso d'acqua direttamente interessato dalle opere è sito tra il viadotto autostradale della A15 e la confluenza nel fiume Magra, di cui il Teglia è diretto tributario in destra.

Nella sezione di attraversamento, il torrente è ampio circa 10÷12 metri ed inciso per circa 2÷3 metri. Qui il deflusso è influenzato dalla immissione nel Magra ed in concomitanza dei maggiori eventi di piena, tale tronco del corso d'acqua è oggetto riconosciuto di potenziali fenomeni di esondazione, identificati in ambito PAI. Specificatamente nell'intorno della sezione di interesse, sono state perimetrare aree a pericolosità idraulica media, ovvero aree inondabili con tempo di ritorno pari a 200 anni.

Le aree di esondazione del Teglia sono delimitate, in destra, da un muro in pietra ed, in sinistra, da gabbionate, In coincidenza con l'attraversamento, si prevede di eseguire un rivestimento in massi delle sponde e un approfondimento della condotta per il tratto di alveo attraversato, di modo che la morfologia della sezione sia ripristinata nell'esatta conformazione plano-altimetrica originaria.

L'intervento non apporterà alterazioni alle condizioni geometriche ed idrauliche dell'alveo, non si realizzeranno restringimenti, deviazioni dell'asta o modifiche morfologiche e non si ipotizza alcuna considerevole variazione delle condizioni locali di scabrezza,

Per analizzare le condizioni idrauliche del deflusso di massima piena in corrispondenza della sezione di interesse e per stimare i potenziali effetti sulla stabilità della condotta è stato eseguito apposito studio idrologico-idraulico.

Il bacino, sotteso dalla sezione identificata come elemento di chiusura ai fini delle modellazioni idrauliche, è stato delimitato, appositamente per il presente studio, su base cartografica 1:10,000. Per la caratterizzazione del bacino, ai fini delle valutazioni idrologiche, si è proceduto a determinare i parametri e le grandezze geometriche e morfometriche principali.

Per determinare la portata al colmo, l'analisi idrologica è stata effettuata seguendo i modelli elaborati in ambito PAI-Magra, discendenti dall'analisi regionale delle piogge, e le stime regionali delle portate, propri del progetto VAPI, I valori così determinati sono stati oggetto di analisi comparativa, In ragione della natura dell'intervento previsto, si è considerato significativo porre a fondamento dell'analisi dell'evento di piena e delle modellazioni idrauliche il riferimento probabilistico correlato a *tempo di ritorno* $T_r = 200$ anni.

Il valore di massima piena è stato assunto pari al dato massimo derivante dai modelli idrologici adottati, sebbene esso si dimostri estremamente cautelativo, in virtù dell'analisi del deflusso specifico per unità d'area relativo alla elaborazione di osservazioni idrometriche dirette. Ai fini delle verifiche idrauliche, tuttavia, in ragione dell'importanza dell'opera più che degli effetti che essa potrebbe indurre sull'assetto idrografico, si è ritenuto di operare in chiave conservativa. Quale dato di portata al colmo, di utilizzo per l'analisi del deflusso

 	PROGETTISTA  Snamprogetti	COMMESSA P66990	UNITÀ 000
	LOCALITÀ Regione Toscana - Regione Emilia Romagna	SPC. LA-E-80081	
	PROGETTO Metanodotto Pontremoli - Cortemaggiore	Fg. 35 di 43	Rev. 0

nel corso d'acqua, è stato quindi assunto $Q_{Max} = 520 \text{ m}^3/\text{s}$. Tale assunzione risulta congruente con i presupposti dello studio, non richiedendosi all'analisi idrologica di addivenire a risultati di valenza assoluta ma solo di fornire un utile dato cautelativo per l'analisi degli effetti della piena.

Si è quindi effettuato lo studio idraulico, finalizzato a determinare i parametri che caratterizzano il deflusso della portata di piena, in corrispondenza della sezione interessata dall'attraversamento, ed a valutare i potenziali fenomeni erosivi localizzati del fondo alveo.

I dati geometrici di base derivano da apposito rilievo topografico, che ha consentito la definizione di dettaglio della sezione di interesse, consentendo una rappresentazione fedele delle caratteristiche geometriche dell'alveo e delle sponde.

Le simulazioni numeriche del deflusso sono state eseguite in condizioni di moto uniforme.

Poiché l'intervento non comporta variazioni della geometria d'alveo, lo studio idraulico si applica indifferentemente alla situazione attuale ed alla configurazione post opera.

Sulla base dei risultati conseguiti, si evince che, in coincidenza della prefissata portata al colmo, l'alveo inciso non è in grado di contenere il deflusso idrico nell'ambito degli elementi di sponda. Le acque rimangono comunque confinate entro limiti geometricamente definiti, coincidenti con elementi morfologici presenti oltre la sommità delle scarpe di incisione.

Le condizioni di deflusso comportano altezza idrica rispetto alla minima quota di fondo pari a circa 3,8 m, in regime di corrente lenta. La velocità media della corrente si stima pari a 3,7÷3,9 m/s, ed, in particolare, pari ad oltre 4,4 m/s nell'alveo medio. Il carico cinetico risulta pari a circa 0,8 m. L'intervento non comporterà riduzioni in tali aspetti del deflusso di piena nel corso d'acqua, né altererà la capacità di laminazione naturale del bacino o la portata naturalmente rilasciata a valle.

In corrispondenza della sezione di attraversamento, i parametri idraulici fondamentali sono risultati congruenti tra loro ed attendibili, ed hanno consentito la stima di potenziali erosioni localizzate, approfondimenti ed arature dell'alveo, conseguenti all'evento di piena.

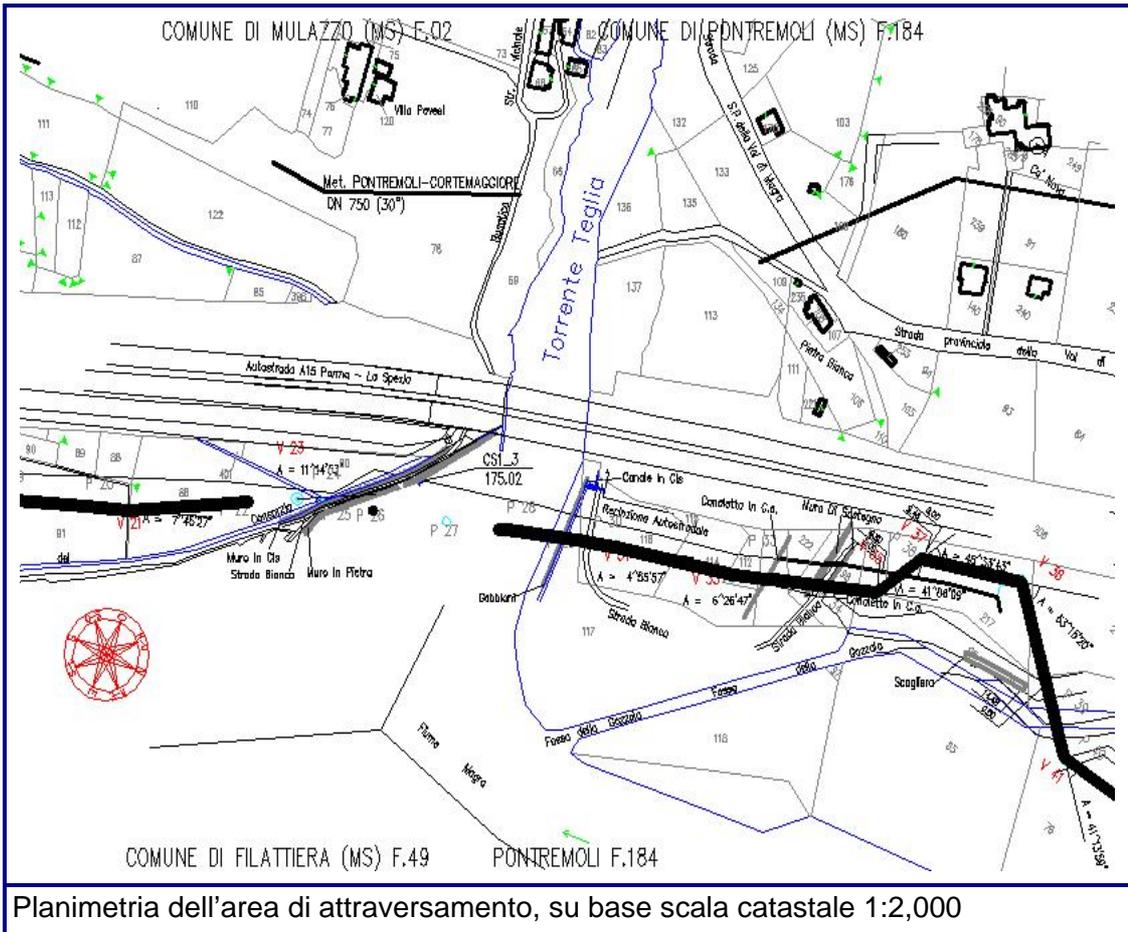
In particolare, si evidenziano le condizioni per non rilevanti fenomeni di trasporto di fondo, correlati alla energia della corrente, in caso di piena. La dimensione dei clasti potenzialmente movimentati è però compatibile con la struttura del fondo alveo naturale, e pertanto possibile che si inneschino fenomeni di distacco e/o trascinamento.

Anche i fenomeni potenziali di approfondimento del fondo sono rilevanti: stime numeriche del tutto prudenziali presentano, per l'evoluzione di erosioni locali, valore massimo circa pari a 2,0 m, da ritenersi comunque sovrastimato in ragione della concreta morfologia dell'incisione principale d'alveo.

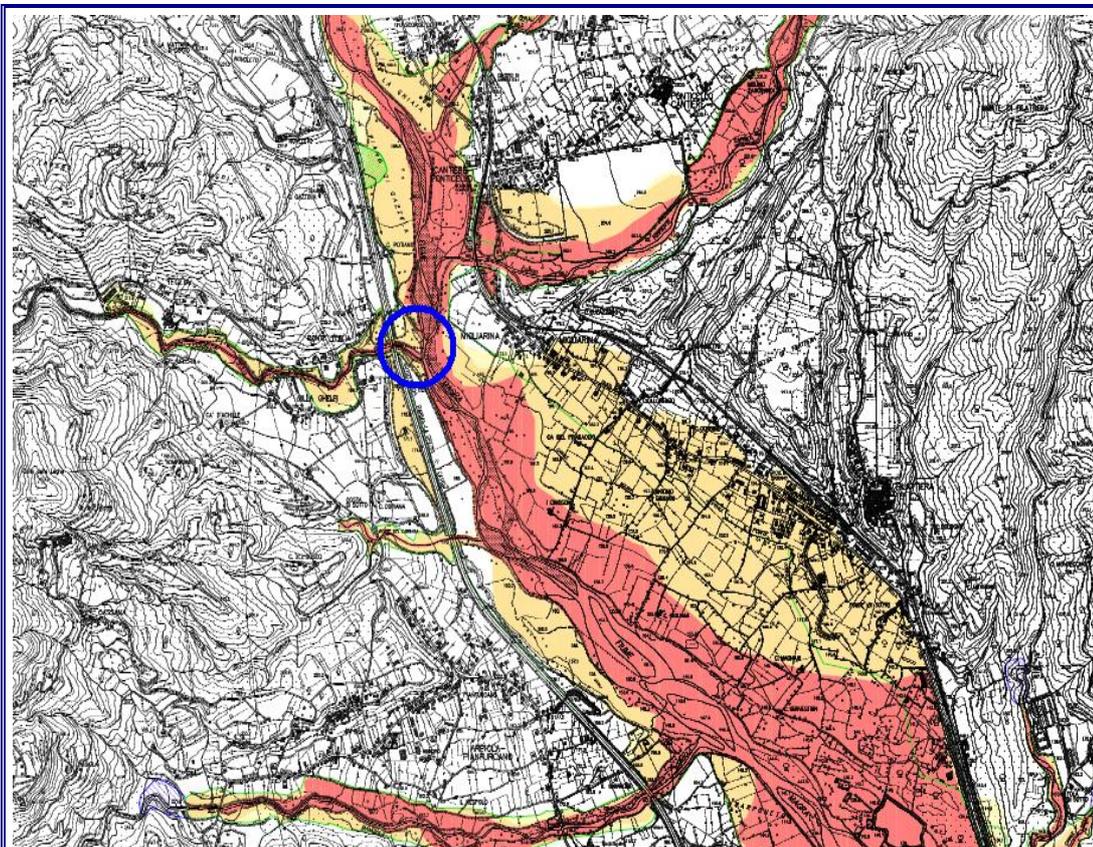
In sintesi, essendo previsto un franco minimo di copertura della condotta pari a 4,5 m, le opere in progetto possono ritenersi tecnicamente fattibili e la profondità di posa più che prudenziale per la sicurezza del metanodotto nella collocazione in sub-alveo.

 Snam Rete Gas	PROGETTISTA  Snamprogetti	COMMESSA P66990	UNITÀ 000
	LOCALITÀ Regione Toscana - Regione Emilia Romagna	SPC. LA-E-80081	
	PROGETTO Metanodotto Pontremoli - Cortemaggiore	Fg. 36 di 43	Rev. 0

APPENDICE I - STRALCI TOPOGRAFICI DI DETTAGLIO

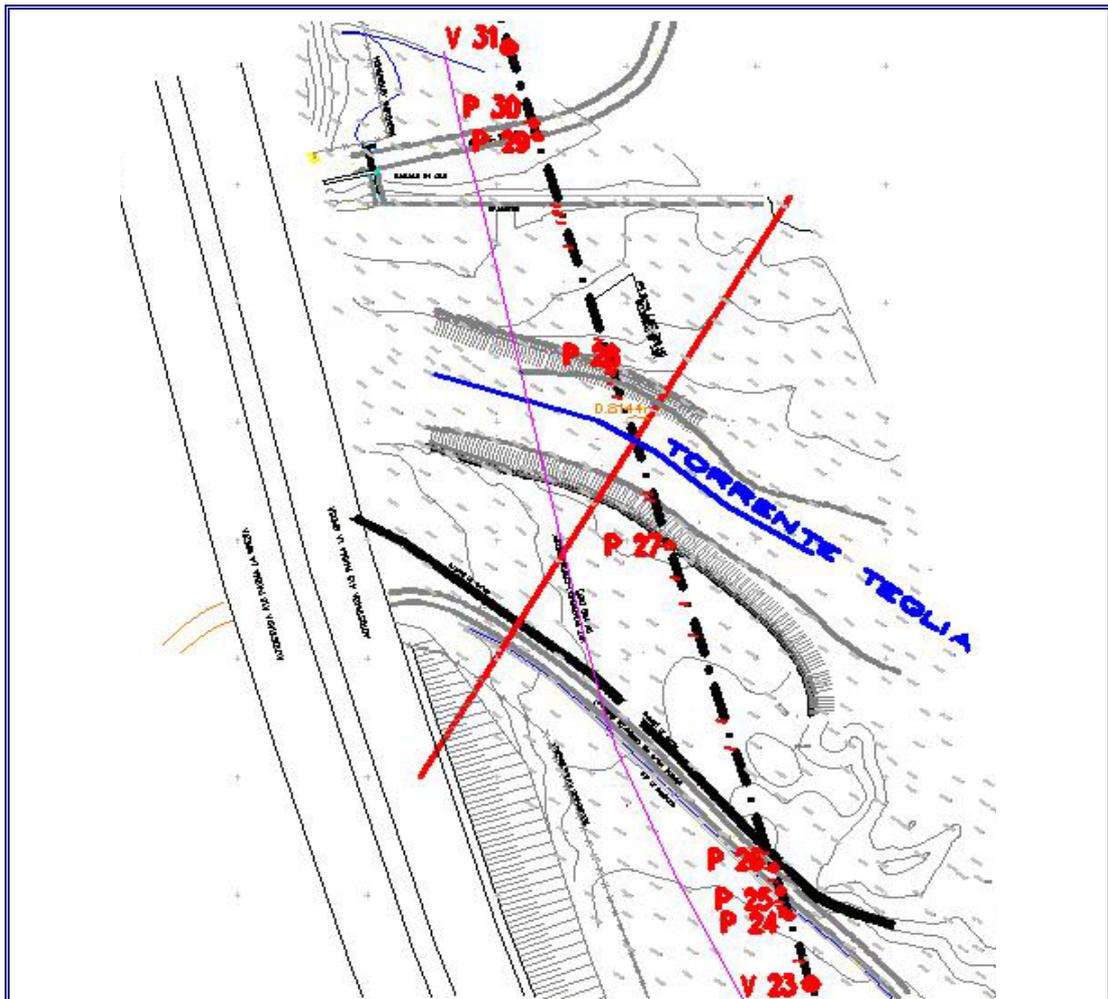


 	PROGETTISTA  Snamprogetti	COMMESSA P66990	UNITÀ 000
	LOCALITÀ Regione Toscana - Regione Emilia Romagna	SPC. LA-E-80081	
	PROGETTO Metanodotto Pontremoli - Cortemaggiore	Fg. 37 di 43	Rev. 0



Indicazione dell'area di attraversamento, su stralcio cartografia P,A,I, (Carta della pericolosità idraulica con fascia di riassetto fluviale e aree inondabil; Tav, 4-09), base 1:10,000

 	PROGETTISTA  Snamprogetti	COMMESSA P66990	UNITÀ 000
	LOCALITÀ Regione Toscana - Regione Emilia Romagna	SPC. LA-E-80081	
	PROGETTO Metanodotto Pontremoli - Cortemaggiore	Fg. 38 di 43	Rev. 0



Dettaglio del rilievo dell'area di intervento, con indicazione della direttrice di attraversamento, dell'asse idrografico e della sezione di modellazione idraulica

 	PROGETTISTA  Snamprogetti	COMMESSA P66990	UNITÀ 000
	LOCALITÀ Regione Toscana - Regione Emilia Romagna	SPC. LA-E-80081	
	PROGETTO Metanodotto Pontremoli - Cortemaggiore	Fg. 39 di 43	Rev. 0

APPENDICE II - TABELLE DATI E REPORT

COORDINATE SEZIONE DI ATTRAVERSAMENTO

*Determinazione della sezione ortogonale al flusso di piena,
sulla base della sezione rilevata in asse condotta*

angolo di
incidenza
0,8144 r

vertici	progressive lungo la condotta (m)	progressive ortogonali al flusso (m)	quota rilevata (m s.l.m.)	parziali lungo la condotta (m)	parziali ortogonali al flusso (m)
V31	0,00	0,00	174,58	0,00	0,00
P30	13,12	9,00	174,69	13,12	9,00
P29	15,63	10,73	174,69	2,51	1,72
	26,15	17,95	174,42	10,52	7,22
	27,24	18,69	174,42	1,09	0,75
	27,25	18,70	173,38	0,01	0,01
	27,68	19,00	173,38	0,43	0,30
	27,69	19,00	172,90	0,01	0,01
	29,15	20,01	172,90	1,46	1,00
	33,42	22,94	172,93	4,27	2,93
	49,67	34,09	172,14	16,25	11,15
	53,90	36,99	171,79	4,23	2,90
P28	55,73	38,25	171,79	1,83	1,26
	57,48	39,45	170,74	1,75	1,20
	59,87	41,09	170,23	2,39	1,64
	76,67	52,62	170,50	16,80	11,53
	77,91	53,47	170,68	1,24	0,85
P27	86,79	59,56	172,68	8,88	6,09
	91,67	62,91	173,06	4,88	3,35
	96,21	66,03	173,31	4,54	3,12
	101,76	69,84	173,29	5,55	3,81
	116,86	80,20	172,62	15,10	10,36
	121,67	83,50	172,65	4,81	3,30
	139,98	96,07	172,87	18,31	12,57
	139,99	96,08	174,37	0,01	0,01
	142,85	98,04	174,37	2,86	1,96
	142,86	98,05	172,87	0,01	0,01
P26	144,82	99,39	172,70	1,96	1,35
P25	148,62	102,00	172,70	3,80	2,61
	149,51	102,61	172,70	0,89	0,61
P24	150,00	102,95	172,70	0,49	0,34
	150,01	102,95	172,10	0,01	0,01
	150,73	103,45	172,10	0,72	0,49
	150,74	103,45	172,70	0,01	0,01
	151,24	103,80	172,70	0,50	0,34

 	PROGETTISTA  Snamprogetti	COMMESSA P66990	UNITÀ 000
	LOCALITÀ Regione Toscana - Regione Emilia Romagna	SPC. LA-E-80081	
	PROGETTO Metanodotto Pontremoli - Cortemaggiore	Fg. 40 di 43	Rev. 0

	159,12	109,20	172,42	7,88	5,41
V23	163,05	111,90	172,33	3,93	2,70

REPORT FLOWMASTER v 6,0 [614e]

Project Description

Worksheet	Torrente Teglia q, 170
Flow Element	Irregular Channel
Method	Manning's Formula
Solve For	Channel Depth

Section Data

Slope	0,009000 m/m
Elevation Range	170,23 to 174,69
Discharge	520,0000 m ³ /s

Roughness Segments

Start Station	End Station	Mannings Coefficient
0+13,86	0+48,99	0,040
0+48,99	0+88,97	0,035
0+88,97	1+11,90	0,040

Options

Current Roughness Method	Improved Lotter's Method
Open Channel Weighting Method	Improved Lotter's Method
Closed Channel Weighting Method	Horton's Method

Natural Channel Points

Station (m)	Elevation (m)
0+13,86	174,37
0+15,83	174,37
0+15,83	172,87
0+28,40	172,65
0+31,70	172,62
0+42,06	173,29
0+45,87	173,31
0+48,99	173,06
0+52,34	172,68
0+58,43	170,68
0+59,28	170,50
0+70,81	170,23
0+72,45	170,74
0+73,65	171,79
0+74,91	171,79
0+77,81	172,14
0+88,97	172,93
0+91,90	172,90
0+92,90	172,90
0+92,91	173,38
0+93,21	174,42
0+93,96	174,42

 	PROGETTISTA  Snamprogetti	COMMESSA P66990	UNITÀ 000
	LOCALITÀ Regione Toscana - Regione Emilia Romagna	SPC. LA-E-80081	
	PROGETTO Metanodotto Pontremoli - Cortemaggiore	Fg. 41 di 43	Rev. 0

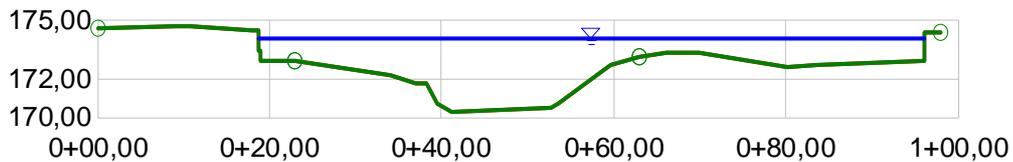
Natural Channel Points

Station (m)	Elevation (m)
1+01,18	174,69
1+02,90	174,69
1+11,90	174,58

Results

Mannings Coefficient	0,034
Water Surface Elevation	173,95 m
Elevation Range	170,23 to 174,69
Flow Area	133,3 m ²
Wetted Perimeter	80,40 m
Top Width	77,38 m
Actual Depth	3,72 m
Critical Elevation	173,89 m
Critical Slope	0,010079 m/m
Velocity	3,90 m/s
Velocity Head	0,78 m
Specific Energy	174,72 m
Froude Number	0,95
Flow Type	Subcritical

Section



V:2,0
H:1
NTS

 	PROGETTISTA  Snamprogetti	COMMESSA P66990	UNITÀ 000
	LOCALITÀ Regione Toscana - Regione Emilia Romagna	SPC. LA-E-80081	
	PROGETTO Metanodotto Pontremoli - Cortemaggiore	Fg. 42 di 43	Rev. 0

APPENDICE III - METODOLOGIA DI VERIFICA IDRAULICA

I codici di calcolo utilizzati per le modellazioni permettono di calcolare, per canali naturali od artificiali, l'altezza idrica di moto uniforme, correlata alla corrente a superficie libera unidirezionale (le linee di corrente del moto sono rettilinee e parallele; la velocità del fluido ha un'unica componente non nulla), indipendente dal tempo e dalla coordinata longitudinale che definisce la direzione del moto.

Le generatrici delle sezioni d'alveo sono assunte come rette parallele alla direzione del moto, su direttrici che rappresentano il contorno della corrente, senza variazioni della conformazione geometrica della sezione di deflusso, con pendenza costante del canale.

La modellazione viene così a corrispondere al caso in cui la velocità media della corrente V è funzione dell'altezza idrometrica, per tramite dell'equazione del moto

$$V = X (R \cdot j)^{1/2} \quad (\text{m/s})$$

dove

- R è il raggio idraulico (m), definito come il rapporto fra l'area della sezione bagnata e la lunghezza del perimetro bagnato;
- j è la pendenza del fondo alveo, nel tratto comprendente la sezione di attraversamento;
- X è il coefficiente di resistenza calcolato secondo la formula di *Manning-Strickler*

$$X = (1/n) \cdot R^{1/6}$$

con

- n = coefficiente di scabrezza, funzione delle caratteristiche geomorfologiche del corso d'acqua.

La portata defluente Q è legata alla velocità dall'equazione di continuità:

$$Q = V \cdot A,$$

dove

- A è l'area della sezione bagnata (m^2).

Con processo iterativo si ricavano l'altezza idrometrica e la velocità relativa alla portata considerata.

Si determina inoltre il numero di Froude F_r , definito come rapporto fra la forza d'inerzia e la forza di gravità, che caratterizza lo stato energetico del moto (corrente veloce o lenta)

$$F_r = V/(g \cdot h)^{1/2}$$

dove

 	PROGETTISTA  Snamprogetti	COMMESSA P66990	UNITÀ 000
	LOCALITÀ Regione Toscana - Regione Emilia Romagna	SPC. LA-E-80081	
	PROGETTO Metanodotto Pontremoli - Cortemaggiore	Fg. 43 di 43	Rev. 0

- **g** è l'accelerazione di gravità (m/s^2),
- **h** è il battente idrico (m).

La sezione trasversale è concettualmente suddivisa in tre parti, caratterizzate, laddove necessario, da differenti valori della scabrezza, in cui la velocità si può ritenere uniforme: la parte centrale o canale principale e le banchine laterali o golene, Ciò consente la valutazione di eventuali fenomeni di deflusso oltre limiti d'alveo preassegnati.

La scelta di operare con un modello di moto uniforme, scaturisce dalle seguenti considerazioni:

- la verifica idraulica è di interesse limitatamente ad una sola sezione trasversale;
- i risultati attesi non dipendono dallo sviluppo temporale dell'evento di piena, ma solo dal massimo valore di livello idrico raggiunto durante l'evento stesso e dalla relativa velocità.