PROGETTO N° A08002-D

AUTOSTRADE SESTRI LEVANTE – LIVORNO

con diramazione VIAREGGIO – LUCCA e FORNOLA – LA SPEZIA

POTENZIAMENTO INTERCONNESSIONE A12/A15

REGIONE LIGURIA

settore pianificazione e valutazione interventi

PRESCRIZIONI DI CUI AL PARERE INTERLOCUTORIO DELLA REGIONE LIGURIA - SCHEMA n° NP/4583 DEL 11/03/2011

PROVINCIA DELLA SPEZIA

RAPPORTO AMBIENTALE

(ai sensi dell'art. 13 c.1. D.lgs 152/2006 e della L.R. 32/2012)

SANTO STEFANO MAGRA - CEPARANA

COLLEGAMENTO TRA IL RACCORDO AUTOSTRADALE E LA SPONDA DESTRA DEL F. MAGRA

0	Ottobre 2014	Prima Emissione		G. F.	G. F.
EM./RE.	DATA	DESCRIZIONE	REDATTO	CONTR.	APPROV.

APPROFONDIMENTI SPECIALISTICI

RELAZIONE IDROLOGICA E IDRAULICA

CODICE IDENTIFICATIVO: **SPSI 03 RA 11**

SCALA: -

PROGETTAZIONE

CISA Engineering S.p.A.

IL PROGETTISTA

Dott. Ing. Giuseppe Fratino
O.I. Provincia di Bari n°5349

società autostrada ligure toscana p.a.
Condirettore Generale

Monica Paganini

I N D I C E

1. PREMESSA 2
2. IL PERCORSO METODOLOGICO 3
3. INQUADRAMENTO TERRITORIALE 4
3.1. DESCRIZIONE SINTETICA DEL BACINO DEL FIUME MAGRA CHIUSO ALL'ALTEZZA DEL VIADOTTO E DETERMINAZIONE DELLE PORTATE DI PROGETTO 4
3.2. INQUADRAMENTO IDROLOGICO 6
4. VERIFICHE IDRAULICHE 9
4.1. ATTRAVERSAMENTO FIUME MAGRA 9
4.1.1. Descrizione sintetica del modello matematico e numerico utilizzato 9
4.1.2. Descrizione geometrica del Magra ai fini modellistici 11
4.1.3. L'applicazione del modello numerico e parametri al contorno 13
4.1.4. Risultati delle analisi idrauliche 14
5. LA PERIMETRAZIONE DELLE AREE INONDABILI DEL PAI MAGRA E LORO MODIFICA 22
6. I PROCESSI EROSIVI ALLA BASE DELLE PILE DEL VIADOTTO A12 E DEL VIADOTTO IN PROGETTO 25
6.1. Stima dell'erosione localizzata attorno alle pile DEL VIADOTTO IN PROGETTO 25
6.1.1. Risultati dell'analisi tramite formule empiriche 28
6.2. INTERAZIONE TRA PONTE IN PROGETTO E VIADOTTO ESISTENTE A VALLE 30
7. OPERE IDRAULICHE IN PROGETTO 32

1. PREMESSA

La presente relazione idrologico-idraulica, parte integrante del Progetto Definitivo relativo a "Intervento 3 – S.Stefano Magra – Ceparana – Collegamento tra il raccordo autostradale e la sponda destra Magra" illustra le metodologie ed i criteri assunti per le verifiche idrauliche inerenti il tracciato stradale in progetto.

I risultati delle verifiche, unitamente alla conoscenza del reticolo idrografico interferito, hanno consentito di calibrare e, quindi, meglio definire, le soluzioni tecniche collegialmente individuate attraverso un approccio interdisciplinare.

La definizione del tracciato della strada è scaturita da un'analisi ambientale e tecnico-economica, all'interno della quale le problematiche idrauliche interagenti con l'infrastruttura stradale sono state tenute nella dovuta considerazione.

L'infrastruttura in progetto interagisce con il Fiume Magra, corso d'acqua naturale ricadente nelle competenze pianificatorie dell'Autorità di bacino del fiume Magra e quindi gestionali della Provincia di La Spezia. È' infatti prevista la realizzazione di un nuovo viadotto per il collegamento del raccordo autostradale A12-A15 con la sponda destra del Fiume Magra (Ceparana).

Per quanto riguarda l'analisi idrologica sul bacino del fiume si è fatto riferimento agli studi implementati nel Piano Stralcio Assetto Idrogeologico del bacino del Fiume Magra e del Torrente Parmignola, mentre per le analisi idrauliche ci si è affidati ad una modellistica monodimensionale in moto permanente.

Il risultato finale del presente lavoro consiste:

- nella determinazione, per l'interferenza, della soluzione più sostenibile, di minore impatto idraulico per il territorio e non peggiorativa dello stato di fatto;
- nella verifica che il viadotto d'attraversamento previsto sia in grado di garantire un'officiosità idraulica conforme alle prescrizioni e vincoli sovraordinati.

2. IL PERCORSO METODOLOGICO

Il presente studio di compatibilità dell'infrastruttura stradale e dell'interferenza idraulica, condotto nel rispetto delle prescrizioni specifiche imposte dall'Autorità di Bacino del fiume Magra e presenti nel Piano Stralcio di Assetto Idrogeologico, si è articolato attraverso le seguenti attività:

- ***Attività 1^: Inquadramento territoriale***

Rappresenta il "quadro di riferimento" degli elementi morfologici e topografici del corso d'acqua e del relativo bacino idrografico oggetto di studio, derivante da progettualità e da rilievi topografici precedentemente realizzati ma anche da rilievi realizzati ad hoc nel Febbraio 2011, dallo studio Geo3 di Parma, per il controllo del materiale recuperato. Rientrano in questa fase l'analisi delle caratteristiche geometriche del tracciato e delle sezioni trasversali dei corsi d'acqua, nonché di quelle morfologiche ed ambientali-paesistiche della regione fluviale in studio.

- ***Attività 2^: Inquadramento idrologico***

In questa seconda attività si è proceduto allo studio e all'acquisizione delle informazioni idrologiche disponibili e di riferimento per i progettisti presenti nel PAI.

- ***Attività 3^: Analisi idraulica***

Sono stati calcolati i deflussi di piena con analisi modellistiche monodimensionali in moto permanente, per portate con TR di 30-100-200 anni, verificando per il corso d'acqua interferito che il livello idrico raggiunto in corrispondenza dell'attraversamento rispetti i franchi imposti dall'Autorità di Bacino, come da Allegato n°5 alle Norme Tecniche di Attuazione del PAI. Contestualmente sono state verificate le prescrizioni contenute nel DM 14.01.2008 relativo alle Norme Tecniche per le Costruzioni, relative alla compatibilità idraulica dei ponti stradali.

3. INQUADRAMENTO TERRITORIALE

L' infrastruttura stradale in progetto interferisce con il Fiume Magra, attraversandolo perpendicolarmente per mezzo di un viadotto a monte della confluenza col fiume Vara. L'opera in progetto scorre parallelamente all'Autostrada A12, attraversando quindi un territorio già profondamente antropizzato. Essa ricade all'interno dei comuni di Bolano, S.Stefano Magra e Vezzano Ligure, in Provincia della Spezia.

L'interferenza dell'infrastruttura viaria con il Fiume Magra è evidenziata nell'elaborato grafico SPSI.PD.03.STR.01.07.

Per la modellazione idraulica sono state utilizzate quale base topografica sia le sezioni fornite dall'ADB Magra per il Fiume Magra sia il rilievo di campo eseguito nel Gennaio - Febbraio 2011 dallo Studio GEO3 srl di Parma. E' stato eseguito un rilievo plano-

altimetrico sia in sponda sinistra che destra in corrispondenza del viadotto esistente ed è stata rilevata la soglia in massi posta poco più a valle.

3.1. DESCRIZIONE SINTETICA DEL BACINO DEL FIUME MAGRA CHIUSO ALL'ALTEZZA DEL VIADOTTO E DETERMINAZIONE DELLE PORTATE DI PROGETTO

Il Magra è un fiume che nasce in Toscana dal monte Borgognone, a 1401 metri d'altezza e sfocia nel mar Tirreno a Bocca di Magra; scorre in Toscana e in Liguria bagnando le province di Massa-Carrara e di La Spezia. È il principale fiume della Liguria anche se ad essa appartiene solo la parte terminale del suo corso.
Il bacino del Magra è compreso tra 44°02' e 44°28' di latitudine nord e tra 2° 12' e 3° di longitudine ovest, rispetto al meridiano di M. Mario. Confina con il bacino del Po a settentrione (nel tratto compreso tra Cima Belfiore ed il M. Prato Pinello), con i bacini liguri del Graveglia – Entella e del Gromolo - Petronio verso ovest, (tra il M. Prato Pinello ed il M. S. Nicolao), con i bacini dello spezzino costiero (Cinque Terre e Golfo di La Spezia: da M. San Nicolao a Punta Bianca) verso SW, con il Mar Tirreno a meridione e con le Alpi Apuane, con i bacini dei T. Carrione (dal M. La Pizza al M. Spallone) e Frigido (tra il M. Spallone ed il M. Grondilice), seguite dall'Appennino Tosco Emiliano e dallo spartiacque col F. Serchio (tra il M. Grondilice e Cima Belfiore) verso est. Ha una superficie di 1.698,5 Kmq ed un perimetro di 238,2 Km.
Il crinale passa per vette comprese tra i 1.700 e i 1.900 metri (dal Sagro, al Grondilice, al Pizzo D'Uccello per le Apuane, ai monti Alto, Acuto, Malpasso, Sillara, Matto, Brusa, Marmagna e Orsaro per l'Appennino), climaticamente risente anche di vette esterne assai prossime e ancora più elevate come il Pisanino (1.946) e l'Alpe di Succiso (2.017).

Il bacino può essere suddiviso in tre prime grandi parti o "ambiti", con riferimento anche a dati ufficiali disponibili:

• Ambito 1 - il Magra prima della confluenza del suo maggiore affluente, che è il Vara;

• Ambito 2 - il Vara, ossia il bacino di questo particolare e rilevantissimo affluente;

• Ambito 3 - il Magra dalla confluenza del Vara alla foce.

La lunghezza dell'asta principale del Magra, dalle sorgenti alla confluenza, misura km 53,8, quella del Vara dalle sorgenti al medesimo punto km 65,15; il tratto terminale, km 15,7.



Per quanto riguarda l'opera in oggetto, essa ricade nell' Ambito 1 del bacino del Magra, cioè a monte della confluenza del Vara. In questa sezione l'asta principale riceve un numero elevato d'affluenti caratterizzati da superfici drenate oggettivamente significative a scala di bacino (Aulella, 317,6 kmq; Taverone, 87,2 kmq ; Verde, 68 kmq; Bagnone, 59 kmq; Gordana 50 kmq); o in ogni caso rilevanti (Caprio, Civiglia Teglia, Magriola, Mangiola, Osca, ed altri con bacini tra i 40 e i 20 kmq), disposti nel loro assieme con una marcata dissimmetria ben giustificata dall'importanza e altitudine dei rilievi dai quali scendono: ampi e addirittura amplissimi gli affluenti di sinistra della parte terminale (Aulella e Taverone, in particolare), meno ampi quelli della parte alta; ampi gli affluenti di destra della parte apicale (Magriola, Verde e Gordana), meno quelli della parte terminale (Osca, Penolo, Cisolagna).

Questo primo ambito, dell'alto e medio Magra in relazione ai dati validi alla sezione d'interesse d'Albiano (kmq 970), posta a 40 m.s.l.m.m., distante km 3,7dalla confluenza e km 19,4 dalla foce, può essere caratterizzato da:

• un afflusso meteorico medio di 1707 mm/anno,

• un deflusso naturale medio nell'anno stimato in 1391,68 $.10^6$ mc, e da un deflusso reale stimato in 1181,05 . 10^6 mc;

• una temperatura media annua di 12,9° C;

• un fattore di forma di 1,27;

• un coefficiente orografico di 320 mq/kmq;

• una percentuale di superficie comunque boscata pari al 76% della superficie drenata.

Per quanto riguarda la litologia del bacino, in estrema sintesi le categorie più rappresentate sono le rocce arenacee (Arenaria Macigno, Arenarie del M. Gottero ed altre), che coprono una superficie pari al 34,5% del bacino; le rocce argilloso - argillitiche (argille e calcari di Canetolo, Complesso di M. Penna - Casanova, Argille a Palombini), (25%); le rocce calcareo - marnose (Flysch di Ottone – Santo Stefano, calcari di Groppo del Vescovo ecc.) (17,4%), i depositi alluvionali recenti ed attuali ed i depositi alluvionali terrazzati

(includendo i depositi lacustri villafranchiani). (6,6%) le rocce calcaree “pure” (calcari mesozoici della Successione toscana e dell’”Autoctono” Apuano) (4,5%), le rocce ofiolitiche (2,8%).

3.2. INQUADRAMENTO IDROLOGICO

Compreso nella regione climatica Ligure Toscana settentrionale, il bacino del Magra, pur risentendo dell’influenza climatica del Mediterraneo, deve essere suddiviso, cominciando dalle termometrie, in tre fasce assai articolate in relazione alla distanza dal mare, ma anche dell’altitudine media dell’esposizione dei versanti e della direzione media prevalente dei segmenti vallivi, tutte caratteristiche in base alle quali non solo le tre fasce si differenziano decisamente tra loro, ma anche al loro interno.
La distribuzione delle piogge, poi, pone in evidenza differenze decisamente marcate e piuttosto articolate.

La fascia costiera

La breve e terminale fascia costiera, pianeggiante, è caratterizzata da un clima temperato, fortemente condizionato dal contatto o dalla vicinanza col mare, con temperature medie annue attorno ai 13-16°, medie estive attorno ai 20-22° e medie invernali attorno a 6-8° con escursioni annue contenute attorno ai 14°, (valori dell’escursione riferita alla media delle temperature delle ore più calde del mese più caldo e alla media delle temperature delle ore più fredde del mese più freddo = 20), indice, appunto, di clima temperato decisamente marittimo. Nel sub - bacino o ambito costiero le piovosità medie sul grande periodo (trentennale) si attestano sui 1175 mm con massimi nel periodo di poco inferiori ai 1500 e minimi attorno ai 700. I giorni di pioggia sono 92, sempre sulla media trentennale, con un minimo di 62 e un massimo di 129. Più complessa la determinazione di un altro parametro fondamentale, che è quello della distribuzione di piogge intense e di breve durata. Per piogge misurate in 1, 3 e 5 giorni consecutivi, i massimi raggiunti nel trentennio considerato, sono rispettivamente 185, 245 e 299,8 mm, sempre alla stazione di Sarzana. Sempre in tale stazione in anni più recenti si sono misurati a solo titolo d’esempio (1979) 38 mm in 20’.

La fascia montana interna

La fascia montana interna, viceversa, risente dell’altitudine e propone temperature medie invernali prossime allo zero e medie estive prossime ai 20°, spesso, tuttavia con alte escursioni giornaliere, per cui ad un’escursione media attorno ai 18-20° può rapportarsi un’escursione estrema attestata su valori assai più significativi (compresi tra 26 e 29°).

La fascia intermedia

La fascia intermedia, collinare, è quella che, anche sotto l’aspetto termometrico, propone più marcate differenze tra i due ambiti. Nel Magra, infatti, l’influenza mitigatrice del mare penetra in qualche pur modesta misura fino a Pontremoli e sono estese le superfici dolcemente declinati e anche i versanti più acclivi rivolti decisamente a mezzogiorno, mentre in Val di Vara, già all’altezza di Beverino si raggiungono minimi e medie invernali discretamente più accentuate, vuoi per l’orientamento decisamente sub - meridiano, vuoi per la presenza di più vasti coni d’ombra. Peraltro, risultano meno rilevanti le differenze tra le escursioni medie

soprattutto per le più alte temperature massime estive nell'interno della Valle del Magra oltre che per l'esposizione a mezzogiorno anche per una ridotta ventilazione e per la tendenza alla formazione di sacche stagnanti. Una pur modesta differenza si nota comunque, avendo temperature medie invernali di 4,5-5,5° e medie estive di 19-21° a Pontremoli e di 4-5° e 19,5-21,5° S. Margherita in Val di Vara, con escursioni tra le medie rispettivamente di 15° e di 16°.

Regime pluviometrico nelle fasce montana e intermedia

Per quanto concerne le precipitazioni, come si è accennato, è necessario sottolineare più articolate differenziazioni, che complicano, senza eluderla del tutto, la ripartizione in tre fasce.

Nell'ambito del medio - Alto Magra si notano:

- l'influenza dell'area notoriamente piovosissima della Apuane, estesa sull'alto bacino del T. Aulella;
- un marcato effetto Stau per la presenza della cordigliera tra M. Orsaro e il Passo del Cerreto che coinvolge oltre all'Aulella il Taverone, il Bagnone e il Caprio;
- un terzo marcato massimo di piovosità in corrispondenza dello spartiacque Magra - Vara (con netta prevalenza di precipitazioni sul versante settentrionale) tra M. Cornoviglio e M. Antessio, ad arricchire le defluenze sul Gordana , sul Teglia, sul Mangiola, e sul Geriola.

In questo ambito, nelle aree di massima piovosità si raggiungono medie annue nel trentennio comprese tra 1800 e 2000 e fino a 2286 mm con massimi spinti a 2836 e minimi non inferiori a 1400. Nelle aree di minima piovosità si accusano fino a 1634 mm con massimi del periodo di 2450 e minimi di 740. Infine, nell'ambito del Vara medio e alto si nota una distribuzione significativamente lineare a fasce parallele crescenti da SW a NE, spostandosi dal crinale meridionale tra il Vara e i bacini costieri, al crinale spartiacque col Magra. I valori crescono da 1400 a 1990.



Per quanto riguarda i periodi di massima piovosità si hanno in tutti e tre gli ambiti due punte, la pronunciata in ottobre e novembre quella discretamente più contenuta in maggio. Peraltro, nelle aree di massima piovosità del medio e alto Magra si nota una decisa tendenza al prolungarsi di intense precipitazioni (spesso nevose) anche nei mesi di dicembre e soprattutto di gennaio e febbraio, mentre per le aree di massimo dell'ambito del Vara si nota una tendenza ad anticipare e prolungare il massimo primaverile tra l'aprile e il maggio.

L'Autorità di bacino, attraverso il modello di calcolo "PIENE", ha trasformato i dati di precipitazione in forma di curve di possibilità pluviometrica, in idrogrammi di piena, al fine di ottenere una curva inviluppante, ciascuna valida sia per studi e verifiche, sia per la progettazione.

Quindi, per il calcolo delle portate di piena per il reticolo idrografico del Fiume Magra si è fatto riferimento alla Tabella 3-1, dove è stato riassunto il quadro complessivo per la determinazione delle portate per i tempi di ritorno di interesse in funzione delle dimensioni del bacino idrografico sotteso.

Tempi di ritorno	*Affluenti fiume Magra a valle della confluenza*	*Alto Vara ed Affluenti*	*Alto Magra ed affluenti a monte della confluenza*
30 anni	$Q = 12 * A^{0.9}$	$Q = 16 * A^{0.85}$ (A < 15 kmq) $Q = 24 * A^{0.7}$ (A > 15 kmq)	$Q = 15 * A^{0.85}$ (A < 39 kmq) $Q = 26 * A^{0.7}$ (A > 39 kmq)
100 anni	$Q = 16 * A^{0.9}$	$Q = 21 * A^{0.85}$ (A < 36 kmq) $Q = 33 * A^{0.7}$ (A > 36 kmq)	$Q = 20 * A^{0.85}$ (A < 50 kmq) $Q = 36 * A^{0.7}$ (A > 50 kmq)
200 anni	$Q = 18 * A^{0.9}$	$Q = 25 * A^{0.85}$ (A < 23 kmq) $Q = 40 * A^{0.7}$ (A > 23 kmq)	$Q = 23 * A^{0.85}$ (A < 65 kmq) $Q = 43 * A^{0.7}$ (A > 65 kmq)
500 anni	$Q = 21 * A^{0.9}$	$Q = 29 * A^{0.85}$ (A < 43 kmq) $Q = 51 * A^{0.7}$ (A > 43 kmq)	$Q = 28 * A^{0.85}$ (A < 80 kmq) $Q = 54 * A^{0.7}$ (A > 80 kmq)

TABELLA 3-1 FORMULE PER IL CALCOLO DELLE PORTATE DI PIENA DI CUI ALL'ALLEGATO 4 ALLE NORME DI ATTUAZIONE DEL PIANO STRALCIO ASSETTO IDROGEOLOGICO

I valori di portata al colmo per i diversi tempi di ritorno assunti per la modellazione del Magra a monte della confluenza sono:

TR = 30 anni, Q = 3152 m³/s;

TR = 100 anni, Q = 4366 m³/s;

TR = 200 anni, Q = 5212 m³/s;

TR = 500 anni, Q = 6546 m³/s

4. VERIFICHE IDRAULICHE

Le analisi idrauliche hanno lo scopo di definire i principali parametri idraulici che si stabiliscono in occasione del transito di portate con assegnato valore al colmo nel Fiume Magra, la cui morfologia è stata puntualmente rappresentata geometricamente.

Le portate di progetto utilizzate in questa fase progettuale derivano, per quanto riguarda il Fiume Magra, dalle analisi contenute nel PAI del Fiume Magra e già citate relativamente all'inquadramento idrologico.
I risultati dell'indagine sono destinati a tradursi nella determinazione dei gradienti idrometrici e della velocità della corrente che si riscontrano a monte e sotto il manufatto di attraversamento del corso d'acqua.

Per quanto riguarda il Fiume Magra l'analisi idraulica è stata realizzata in questa fase per mezzo di modellistica idraulica monodimensionale, determinando la stima dei massimi livelli di piena sulla base delle equazioni classiche dell'idraulica dei moti a pelo libero: in particolare per mezzo di modelli matematici sono state integrate numericamente le equazioni differenziali per correnti monodimensionali su alveo prismatico in condizione di moto permanente.

I

4.1. ATTRAVERSAMENTO FIUME MAGRA

4.1.1. Descrizione sintetica del modello matematico e numerico utilizzato

Il modello utilizzato per la propagazione delle onde di piena nel corso d'acqua analizzato è: "HEC-RAS River Analysis System", elaborato dall' Hydrologic Engineering Center del US Army Corps of Engineers degli U.S.A. (versione 4.0.0).

Si tratta di uno strumento di applicabilità molto ampia, largamente utilizzato presso Enti Pubblici e Privati negli Stati Uniti e in oltre 40 nazioni, ed ormai adottato anche da molti Enti Pubblici Italiani.

Il modello è stato progettato per contenere vari moduli di analisi idraulica monodimensionale: analisi di moto permanente, analisi del moto vario, analisi del trasporto solido in letto mobile. Tra le diverse componenti quella utilizzata nel presente studio consiste nell'algoritmo di calcolo idraulico per la determinazione delle variazioni della portata, della velocità, della larghezza del pelo libero della corrente e di altre caratteristiche idrauliche del moto durante la propagazione verso valle della corrente idrica di portata nota, per effetto della capacità di laminazione naturale dell'alveo, della sua resistenza d'attrito, della presenza di opere interagenti con la corrente (ponti e traverse). Il modello calcola i profili di moto permanente gradualmente vario per corsi d'acqua monodimensionali in regime di corrente lenta, veloce o mista. Il programma è in grado di calcolare e gestire i profili per una rete di canali naturali o artificiali, in un sistema ad albero o a singolo ramo. Le

relazioni fondamentali della formulazione matematica sono le equazioni del moto permanente nell'espressione classica dell'equazione monodimensionale dell'energia secondo Manning. Le perdite valutate sono quelle d'attrito (secondo Manning), valutate per le diverse parti della sezione trasversale (canale centrale, sponde laterali e golene) e quelle causate dalla contrazione o espansione delle sezioni (tramite un coefficiente che moltiplica la variazione dell'altezza cinetica). L'equazione della quantità di moto è utilizzata nei punti dove il profilo del pelo libero subisce brusche variazioni ovvero in regime misto nel passaggio da corrente veloce a corrente lenta oppure in corrispondenza di ponti, traverse e sottopassi o alla confluenza di più rami di una rete.

Il modello richiede oltre alla geometria generale del corso d'acqua, profili e sezioni trasversali, i dati di portata in ingresso da monte ed in tutte le sezioni ove sono conosciuti ed anche le condizioni al contorno a seconda del regime di moto della corrente. L'equazione generale dell'energia è la seguente:

$$Y_2 + Z_2 + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} = Y_1 + Z_1 + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} + h_e \qquad (1)$$

dove:

Y_1, Y_2 altezza idrometrica nella sezione 1 e 2,

Z_1, Z_2 quota del fondo alveo nelle sezioni 1 e 2,

V_1, V_2 velocità medie (portata totale/area bagnata) nelle sezioni 1 e 2,

α_1, α_2 coefficienti di velocità,

h_e perdita di carico nel tratto 1-2.

La perdita di carico tra due sezioni trasversali è calcolata come somma delle perdite distribuite per attrito e di quelle concentrate per effetto di contrazioni o allargamenti bruschi di sezione secondo l'equazione:

$$h_e = LS_f + C\left(\alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} - \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g}\right) \qquad (2)$$

dove:

L distanza pesata, in funzione della portata, tra le due sezioni trasversali 1 e 2,

S_f pendenza motrice tra le sezioni 1 e 2,

C coefficiente di perdita di carico per contrazione o allargamento di sezione.

La pendenza d'attrito S_f viene valutata secondo l'espressione di Manning:

$$S_f = n^2 Q|Q| / (A^2 R^{4/3}) \qquad (3)$$

dove n è il coefficiente di resistenza di Manning (che vale anche n=1/c con c di Gauckler-Strickler) ed R è il raggio idraulico.

L'equazione differenziale del moto è integrata per via numerica, attraverso un insieme di fasi iterative che sono ripetute più volte per affinarne la risoluzione; per la determinazione dei profili è quindi necessario fornire le condizioni iniziali di portata in ingresso e le condizioni al contorno in funzione del regime di moto.

L'ipotesi di stazionarietà è a favore di sicurezza in termini di livelli idrici massimi, poiché implica l'esaurimento delle capacità laminative del corso d'acqua. Le simulazioni sono state condotte in regime permanente per i valori al colmo della portata di riferimento e per portate con diverso tempo di ritorno al fine di individuare i livelli idrici nelle singole sezioni.

4.1.2. Descrizione geometrica del Magra ai fini modellistici

L'analisi idraulica si è avvalsa, in questa fase, di una descrizione topografica fornita dall'ADB Magra realizzata per effettuare le verifiche idrauliche contenute nel PAI, integrata con rilievi effettuati specificatamente, in corrispondenza del viadotto dell'Autostrada A12 sul Fiume Magra ed a valle di esso.

Il tronco di fiume oggetto di analisi modellistica è lungo 5.2 km e va dalla sezione 70 alla sez. 49. Le sezioni utilizzate sono state ricavate da:

1) Studio per il Piano di Bacino del Fiume Magra del provveditorato alle OO PP per la Toscana. I rilievi delle sezioni nell'ambito dello "Studio per il piano di bacino del fiume Magra" commissionato dal Provveditorato OOPP per la Toscana conclusosi nel 1992, sono stati condotti dall'Aprile del 1989 al Gennaio del 1991. I tratti rilevati comprendono il fiume Magra dalla foce fino alla località Mignegno, per un totale di 255 sezioni;

2) Il rilievo delle sezioni CIMA – PIN. Il rilievo delle 30 sezioni da parte del Cima - Pin è stato condotto nei mesi di ottobre, novembre e parte del mese di dicembre del 1997.

3) Rilievo in campo eseguito nel Gennaio Febbraio 2011 dallo Studio GEO3 srl di Parma .E' stato eseguito un rilievo plano-altimetrico sia in sponda sinistra che destra in corrispondenza del viadotto esistente e della soglia in massi posta poco più a valle, mentre in corrispondenza del viadotto sono state ricavate 4 nuove sezioni.

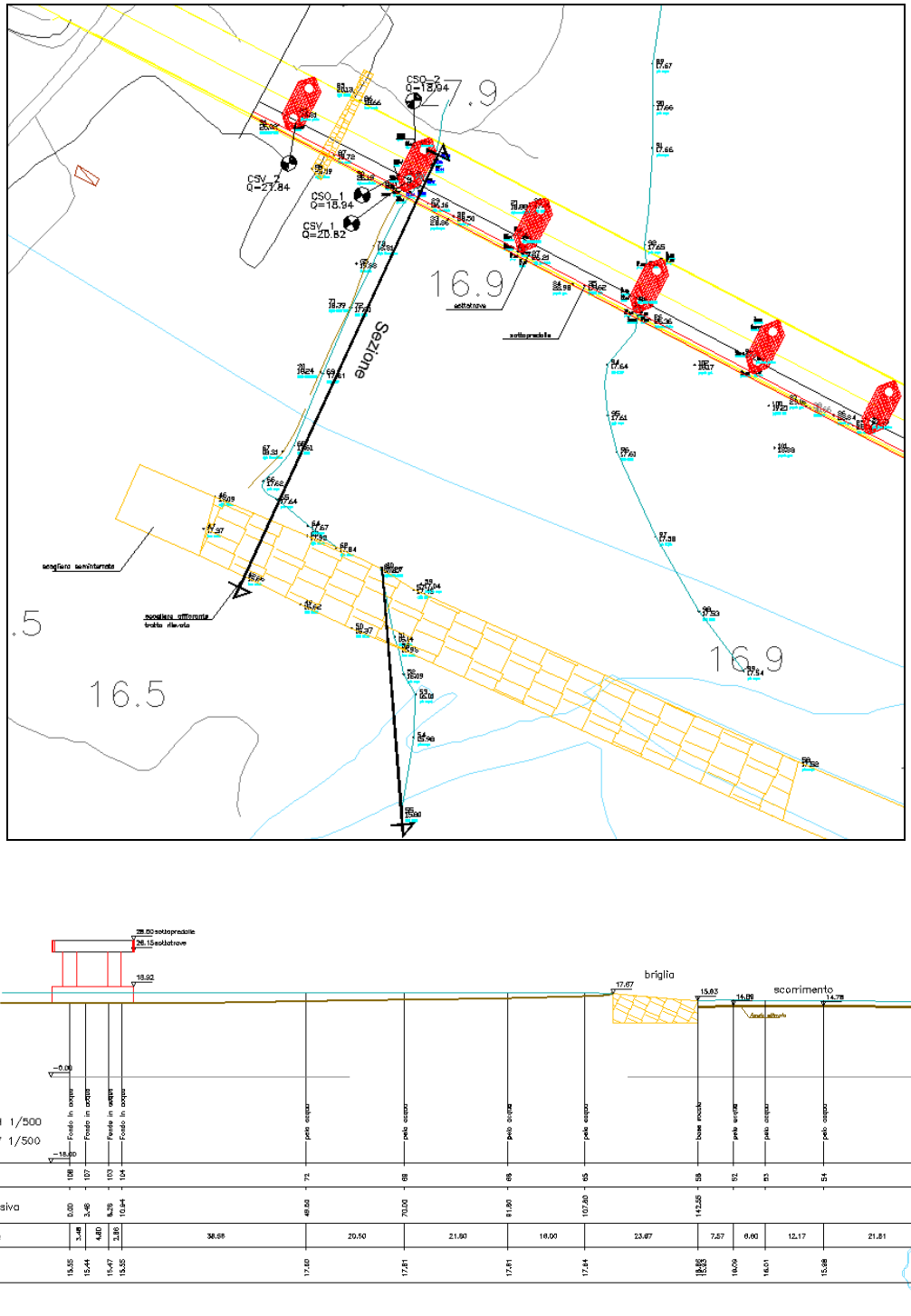


FIGURA 4.1 RILIEVO TOPOGRAFICO ESEGUITO NEL GENNAIO-FEBBRAIO 2011

4.1.3. L'applicazione del modello numerico e parametri al contorno

Le analisi idrauliche, di seguito riportate, sono state condotte rispettando le prescrizioni ed indicazioni di tutto l'insieme di documenti e direttive che compongono il Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico (PAI) dell'Autorità di Bacino del fiume Magra.

In particolare si è fatto riferimento all'Allegato n.5 del PAI, contenente "Indirizzi tecnici per la redazione di studi e verifiche idrauliche"

Per quanto riguarda i parametri di scabrezza del tronco fluviale è stato utilizzato un valore di k_s pari a 15 $m^{1/3}s^{-1}$ secondo Strickler per le golene, e valori variabili tra 22 e 30 $m^{1/3}s^{-1}$ per l'alveo. Entrambi i valori sono stati assunti sempre in base alle indicazioni del PAI.

La simulazione è stata condotta in regime permanente e come valore di portata si è utilizzata quella desunta dalle analisi idrologiche precedentemente descritte (v. valori paragrafo 3.2).

Il presente studio ha interessato un tratto di circa 5,2 km del Fiume Magra, compreso tra la sez. 70 e la sez. 49 del PAI, in corrispondenza della confluenza con il Fiume Vara. Come condizione al contorno di valle è stata imposta l'altezza d'acqua raggiunta per i vari tempi di ritorno analizzati in corrispondenza della sez. 49 e nota dalle analisi in precedenza effettuate nel PAI.



FIGURA 4.2FIUME MAGRA – VISTA VALLE VIADOTTO

4.1.4. Risultati delle analisi idrauliche

Si riportano di seguito in formato tabulare e grafico i risultati delle simulazioni sviluppate per il Fiume Magra, con evidenziate le sezioni del tratto di interesse nei seguenti momenti progettuali:

a) Stato di Fatto.

b) Stato di Progetto. Si stima l'influenza della realizzazione del nuovo viadotto in progetto sui profili di rigurgito e quindi le variazioni rispetto allo stato di fatto

A) Verifiche Stato di fatto. Vengono di seguito esposti i profili di rigurgito per i valori di portata presi a riferimento e i livelli idrometrici nelle sezioni di interesse.

TABELLA 4.1: FIUME MAGRA - RISULTATI DELLA SIMULAZIONE IDRAULICA NELLE CONDIZIONI ATTUALI (TR=30, 100 E 200 ANNI)

SEZIONI	Sezioni HEC-RAS	Quota min fondo	W.S. Elev			Vel Chnl		
			TR 30	TR 100	TR 200	TR 30	TR 100	TR 200
		(m)	(m)	(m)	(m)	(m/s)	(m/s)	(m/s)
70	70	22.72	25.74	26.37	26.85	4.91	5.39	5.47
69	69	18.68	25.25	26.12	26.63	2.34	2.61	2.7
68	68	18	24.55	25.3	25.68	2.87	3.35	3.7
NW21	67	18.38	23.84	24.63	25.1	2.66	2.84	2.89
66BR	66	18.75	22.31	23.02	23.41	3.58	4.03	4.37
65	65	16.8	21.72	22.42	22.85	2.61	3.04	3.26
64	64	16.7	21.12	21.81	22.25	2.64	3	3.17
NW20A	63	15.42	20.84	21.52	21.95	2.44	2.8	3.01
NW20B	62.9	15.42	20.78	21.46	21.88	2.18	2.55	2.78
NW20C	62.8	15.42	20.69	21.35	21.76	2.23	2.62	2.85
NW20D	62.5	15.7	20.46	21.08	21.46	2.65	3.07	3.32
Monte soglia	62.45	16.5	19.69	20.16	20.48	3.9	4.46	4.75
soglia upstream	62.4	17	19.2	19.7	20.32	4.41	4.84	4.59
soglia downstream	62.3	15.93	19.26	20.16	20.78	2.66	2.7	2.61

62	62	12.5	19	19.99	20.64	1.62	1.69	1.71
61	61	10.72	18.89	19.91	20.57	1.05	1.12	1.16
60	60	10.22	18.26	19.23	19.83	2.87	3.12	3.33
NW19	59	9.77	17.35	18.29	18.97	4.02	4.42	4.54
58	58	9.19	17.55	18.56	19.23	1.84	2.07	2.23
57	57	8	17.3	18.27	18.92	2.24	2.57	2.78
56.5	56.5	8.5	17.32	18.32	18.98	1.89	2.1	2.25
56	56	8.2	16.57	17.58	18.26	3.75	3.97	4.08
55	55	7.9	16.29	17.29	18	2.86	3.1	3.2
NW17A	54.9	9	16.15	17.19	17.93	2.96	3.12	3.19
NW17B	54.8	9	16.05	17.11	17.86	2.9	3.08	3.15
NW17C	54.6	9	15.85	16.95	17.73	3.05	3.19	3.19
NW17D	54.5	9	15.77	16.89	17.68	2.77	2.93	2.99
54	54	8.48	15.64	16.75	17.54	2.59	2.88	3.03
54a	53.95	8.48	15.49	16.59	17.39	2.66	2.97	3.11
NW16A	53.9	8.7	15.04	16.06	16.76	3.44	3.86	4.14
NW16B	53.8	8.7	14.92	15.94	16.65	3.31	3.74	3.99
NW16C	53.6	8.7	14.48	15.41	16.01	3.65	4.12	4.46
NW16D	53.5	8.3	13.88	14.82	15.37	4.42	4.8	5.17
50	50	7.28	13.58	14.6	15.22	2.57	2.92	3.15
49	49	6.5	13.22	14.22	14.81	2.52	2.9	3.17

FIGURA 4.3: FIUME MAGRA – PROFILO DI RIGURGITO NELLE CONDIZIONI ATTUALI

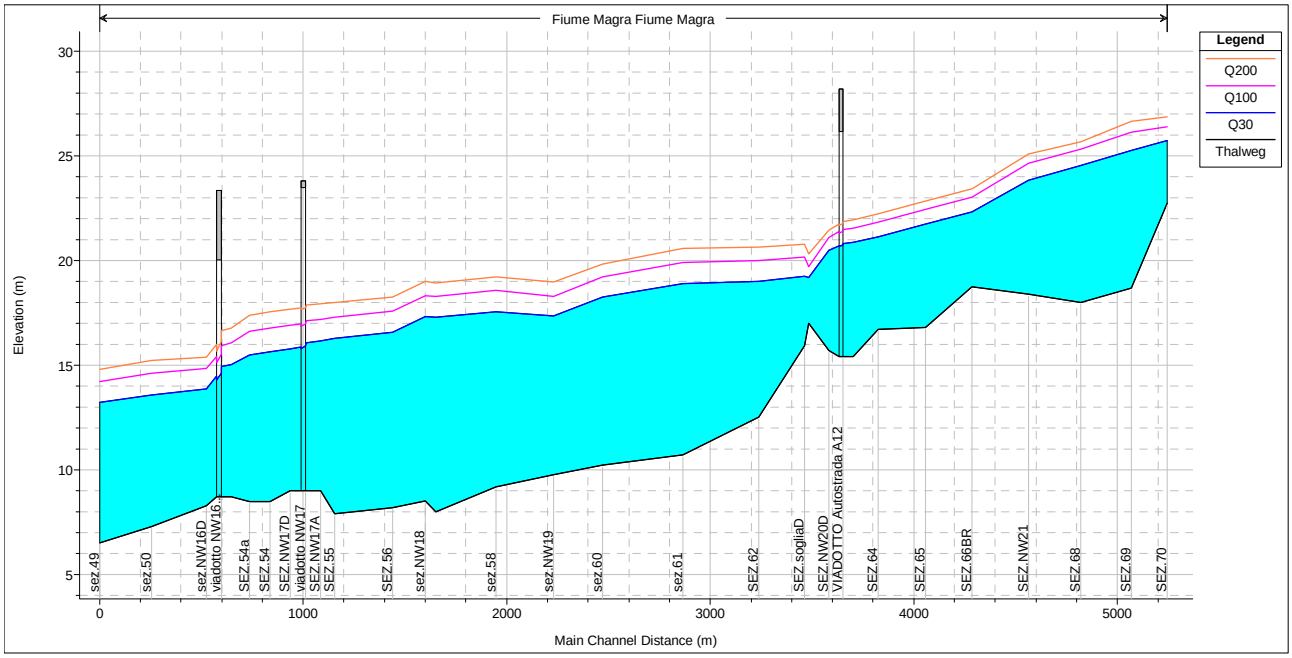
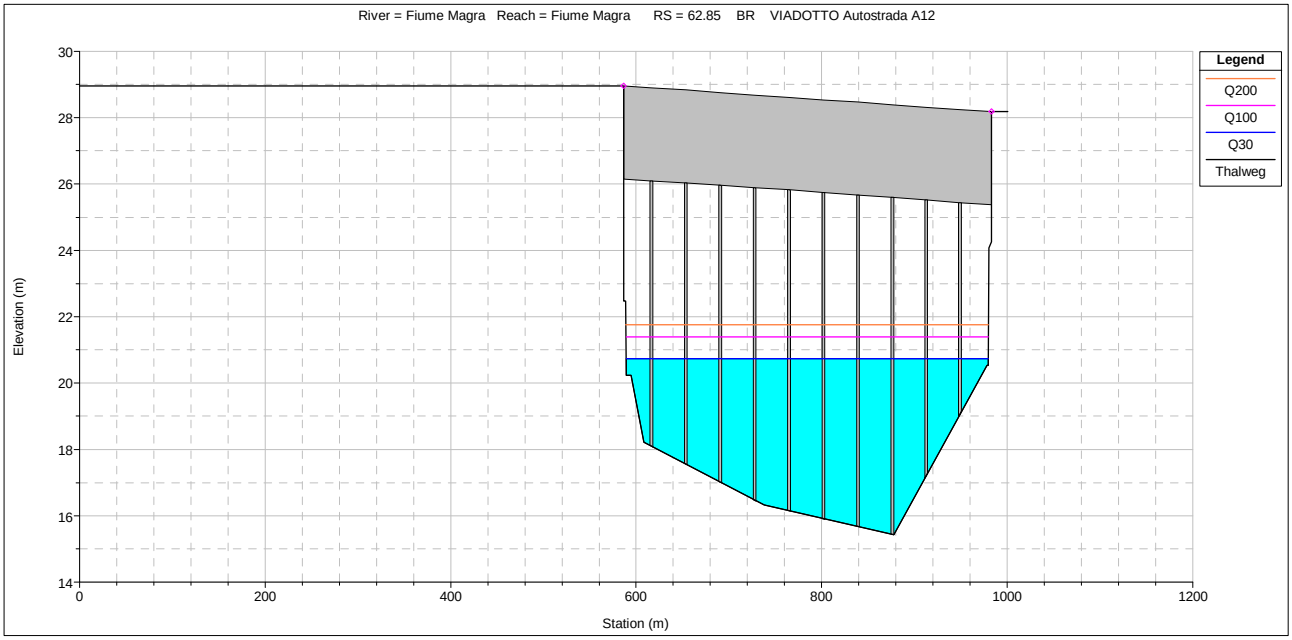


FIGURA 4.4: FIUME MAGRA – LIVELLO IDROMETRICO IN CORRISPONDENZA DEL VIADOTTO DELL'AUTOSTRADA A12



B) Verifiche Stato di progetto. Nella configurazione di progetto il corso d'acqua viene attraversato da un viadotto situato a monte dell'esistente e con andamento parallelo ad esso.

Al fine di mantenere l'allineamento delle pile di nuova realizzazione con le pile del ponte autostradale esistente, l'impalcato prevede la sequenza di luci di seguito riportata, a partire dalla spalla in sponda destra:

- Singola campata avente luce pari a 45.0 m
- Quattro campate aventi luce pari a 74.0 m
- Singola campata avente luce pari a 69.5 m

Le altre caratteristiche geometriche principali del viadotto sono le seguenti:

- Unica carreggiata sostenuta da una serie di 5 pile a sezione circolare;
- Pile cilindriche in cls con diametro = 3 m;
- Interasse pile =74 m;
- Dado di fondazione delle pile di forma circolare (diametro 10 m),
- n° campate = 6,
- Lunghezza complessiva = 410.5 m

Di seguito si mostrano i risultati della simulazione nello stato di progetto per il tratto influenzato dalla realizzazione del Viadotto compreso tra la sezione di monte (Sez. 70) e la confluenza con il Fiume Vara (Sez. 60).

TABELLA 4.2: FIUME MAGRA - RISULTATI DELLA SIMULAZIONE IDRAULICA NELLE CONDIZIONI DI PROGETTO (TR=30, 100 E 200 ANNI).

SEZIONI	Sezioni HEC-RAS	Quota min fondo	W.S. Elev			Vel Chnl		
			TR 30	TR 100	TR 200	TR 30	TR 100	TR 200
		(m)	(m)	(m)	(m)	(m/s)	(m/s)	(m/s)
70	70	22.72	25.74	26.37	26.85	4.91	5.39	5.47
69	69	18.68	25.25	26.12	26.63	2.34	2.61	2.7
68	68	18	24.55	25.3	25.68	2.87	3.35	3.7
NW21	67	18.38	23.84	24.63	25.1	2.66	2.84	2.89
66BR	66	18.75	22.31	23.02	23.41	3.58	4.03	4.36
65	65	16.8	21.72	22.43	22.86	2.61	3.04	3.25

64	64	16.7	21.12	21.81	22.25	2.63	3.00	3.19
NW20A	63	15.55	20.83	21.52	21.95	2.46	2.82	3.03
NW20A-monte ponte nuovo	**62.95**	**15.55**	**20.82**	**21.51**	**21.97**	**2.18**	**2.55**	**2.77**
NW20B	**62.9**	**15.55**	**20.76**	**21.43**	**21.85**	**2.22**	**2.59**	**2.82**
NW20C	62.8	15.55	20.66	21.31	21.72	2.28	2.66	2.9
NW20D	62.5	15.7	20.46	21.08	21.46	2.65	3.07	3.32
monte soglia	62.45	16.5	19.69	20.16	20.49	3.9	4.46	4.72
soglia upstream	62.4	17	19.19	19.7	20.34	4.42	4.85	4.55
soglia downstream	62.3	15.93	19.26	20.17	20.79	2.67	2.69	2.6
62	62	12.5	18.99	20	20.65	1.63	1.69	1.7
61	61	10.72	18.89	19.92	20.59	1.05	1.12	1.16
60	60	10.22	18.25	19.24	19.86	2.87	3.11	3.31

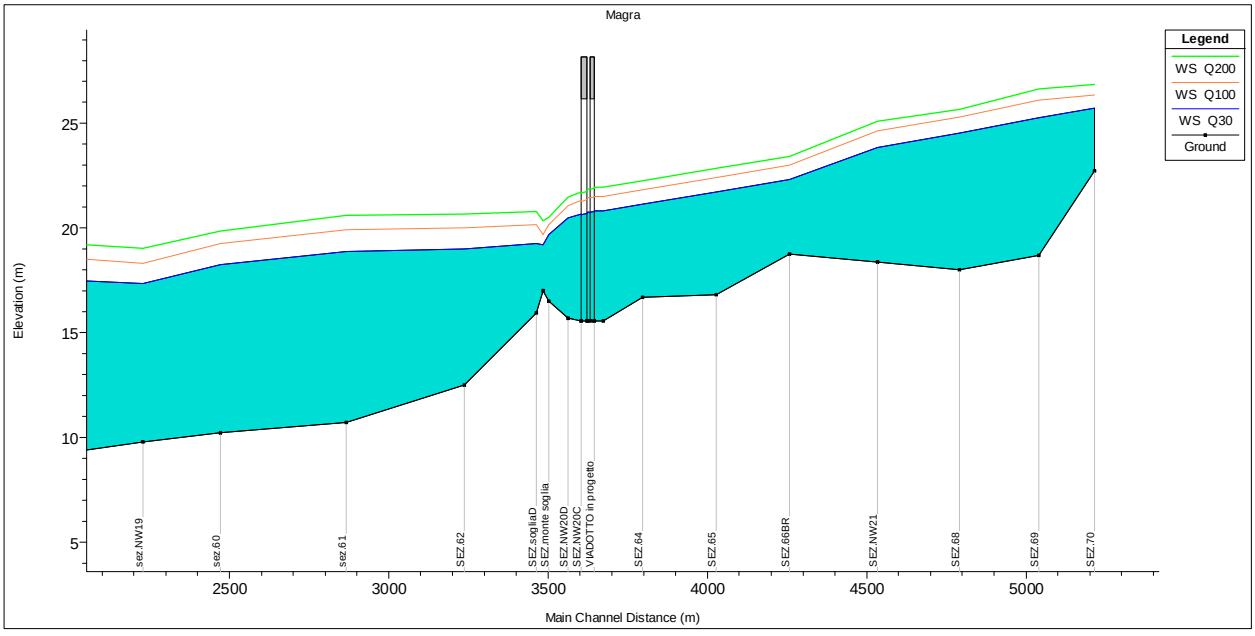


FIGURA 4.5: FIUME MAGRA – PROFILO DI RIGURGITO NELLE CONDIZIONI DI PROGETTO NEL TRATTO COMPRESO TRA LA SEZ. 70 E LA SEZ. 60

Dal confronto tra lo stato di fatto e quello di progetto si nota come la realizzazione del nuovo viadotto non determina variazioni significative del profilo di rigurgito: si può notare un innalzamento delle quote idriche in

corrispondenza delle sezioni a monte del viadotto dell'ordine di pochi centimetri per tutti e tre i tempi di ritorno presi in esame e un conseguente abbassamento delle stesse (sempre di pochi centimetri) a valle del viadotto.

In corrispondenza delle sez. 66BR a monte del viadotto e della sezione relativa alla soglia a valle non si risente più dell'influenza dell'opera in progetto rispetto alla configurazione dello stato di fatto.

Dalle verifiche si può quindi desumere che l'opera in progetto influenza i profili di rigurgito in modo solo marginale rispetto l'attuale situazione ed inoltre viene ampiamente rispettato il franco di sicurezza imposto dal PAI Magra (Allegato n. 5) e dalla Circolare C.S.LL.PP 07.02.2009. **Il franco infatti si mantiene ovunque maggiore di 2 m rispetto alla quota della Q200, che si attesta a 21.97 m s.l.m.**

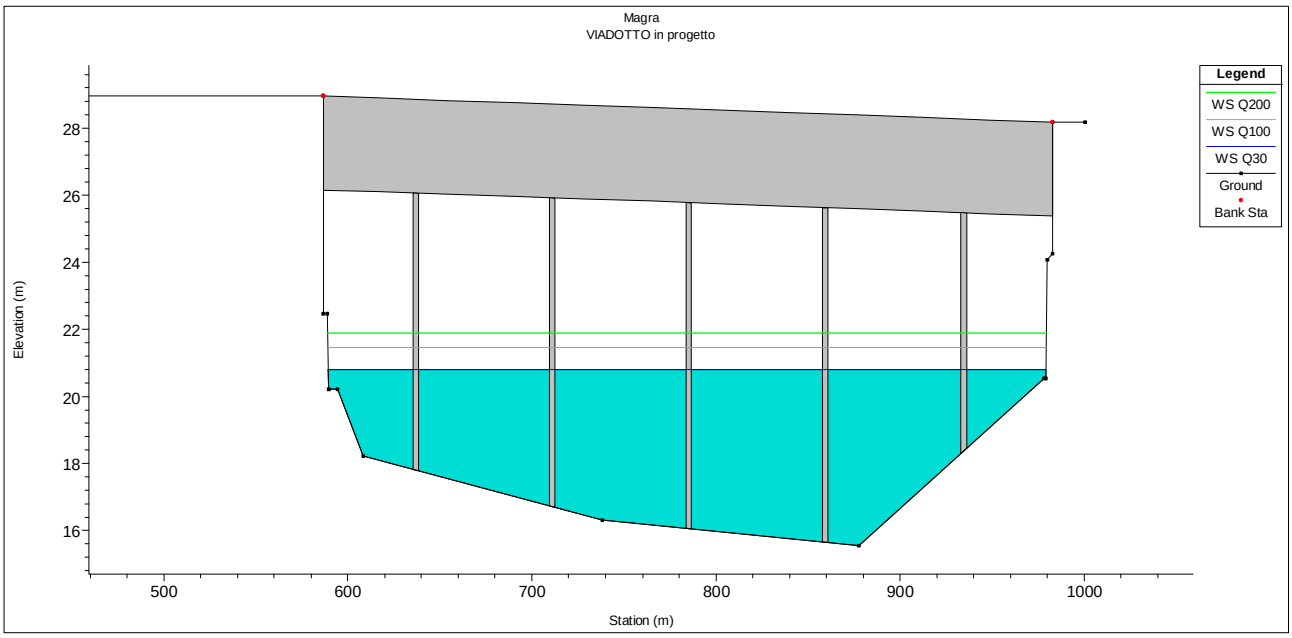


FIGURA 4.6 FIUME MAGRA – LIVELLO IDROMETRICO IN CORRISPONDENZA DEL VIADOTTO IN PROGETTO PER I TEMPI DI RITORNO PRESI IN ESAME (TR=30, 100, 200 ANNI)

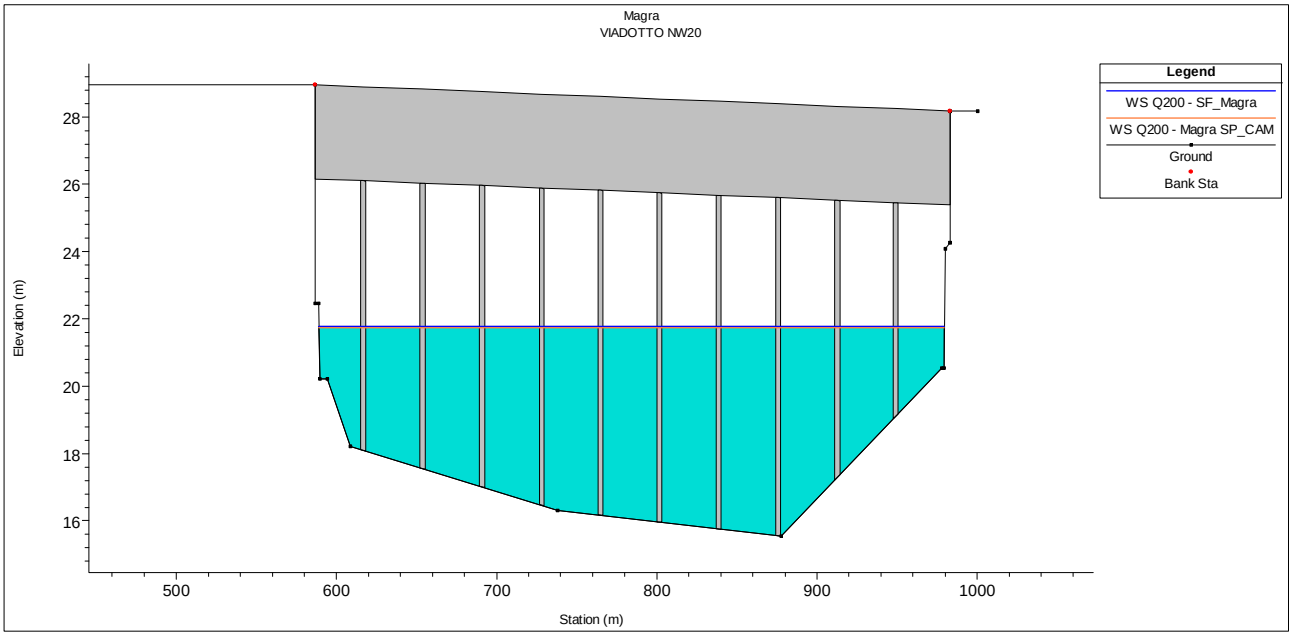


FIGURA 4.7: FIUME MAGRA – LIVELLO IDROMETRICO IN CORRISPONDENZA DEL VIADOTTO A12 NELLA CONFIGURAZIONE ATTUALE (LINEA DI COLORE BLU E NELLE CONDIZIONI DI PROGETTO (LINEA DI COLORE ARANCIO)

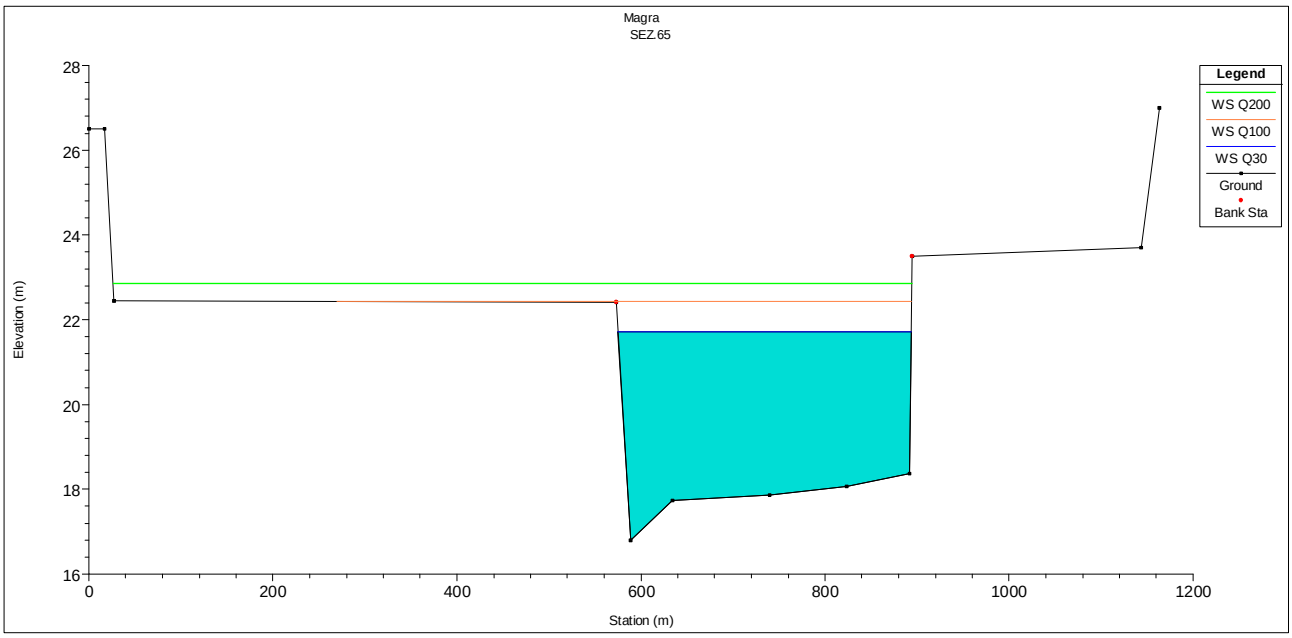


FIGURA 4.8 FIUME MAGRA- LIVELLO IDROMETRICO IN CORRISPONDENZA DELLA SEZ. 65 PER I TEMPI DI RITORNO PRESI IN ESAME NELLO STATO DI PROGETTO (TR=30, 100, 200 ANNI)

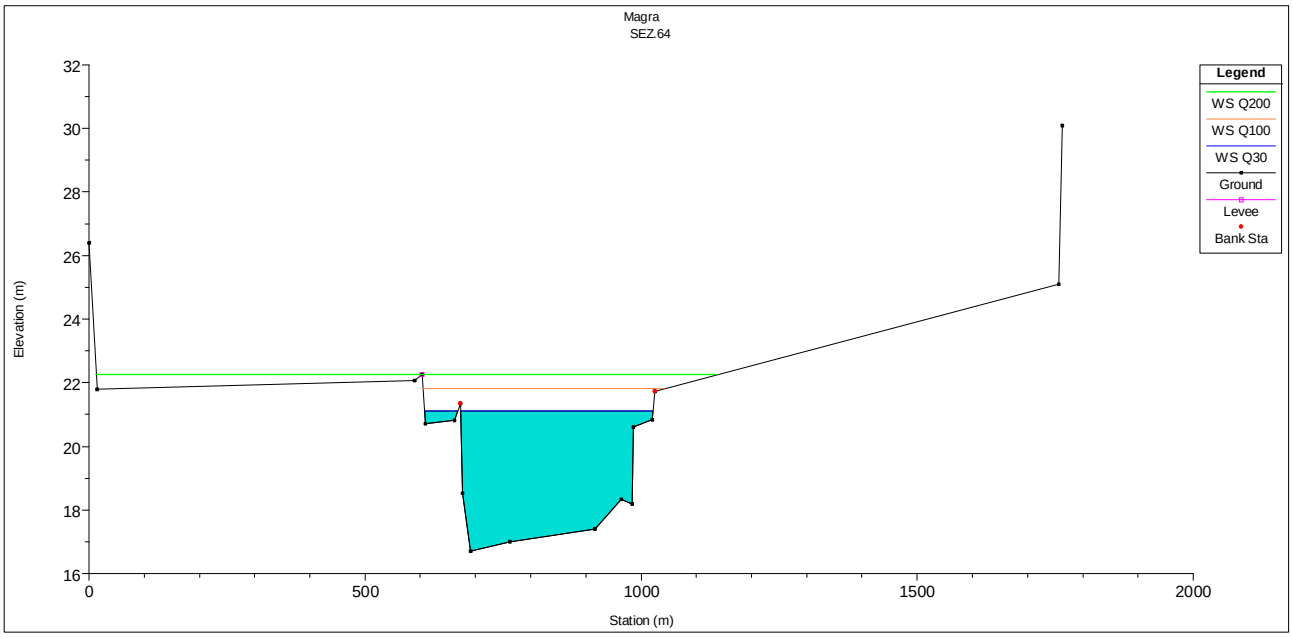


FIGURA 4.9:FIUME MAGRA- LIVELLO IDROMETRICO IN CORRISPONDENZA DELLA SEZ. 64 PER I TEMPI DI RITORNO PRESI IN ESAME NELLO STATO DI PROGETTO (TR=30, 100, 200 ANNI)

5. LA PERIMETRAZIONE DELLE AREE INONDABILI DEL PAI MAGRA E LORO MODIFICA

Il PAI riporta la delimitazione delle aree inondabili per i diversi eventi di piena e la valutazione delle altezze d'acqua e velocità che si determinano all'interno delle aree coinvolte.

La perimetrazione delle aree inondabili è stata condotta nel PAI con metodologie differenziate, a seconda che si trattasse di tratti verificati in moto vario o di tratti in moto permanente. Sono state, quindi, tracciate le rispettive aree inondabili per i tempi di ritorno di 30, 100, 200 e 500 anni. Il tronco di fiume in esame ricade nelle aste verificate in moto permanente in quanto è posto a monte della confluenza Magra - Vara.

Nel caso specifico le aree di esondazione sono state tracciate sulla base dei livelli in alveo sfruttando sia le informazioni geometriche delle sezioni fluviali che quelle altimetriche della cartografia scala 1:5.000. In particolare sulla cartografia numerica di base scala 1.5000 sono state riportate le sezioni con evidenziati i livelli raggiunti dall'acqua per i vari tempi di ritorno. Sulla base dei livelli idrometrici, controllando di volta in volta la sezione trasversale per verificare la rispondenza delle quote del rilievo alla cartografia scala 1:5.000, si è proceduto al tracciamento delle aree.

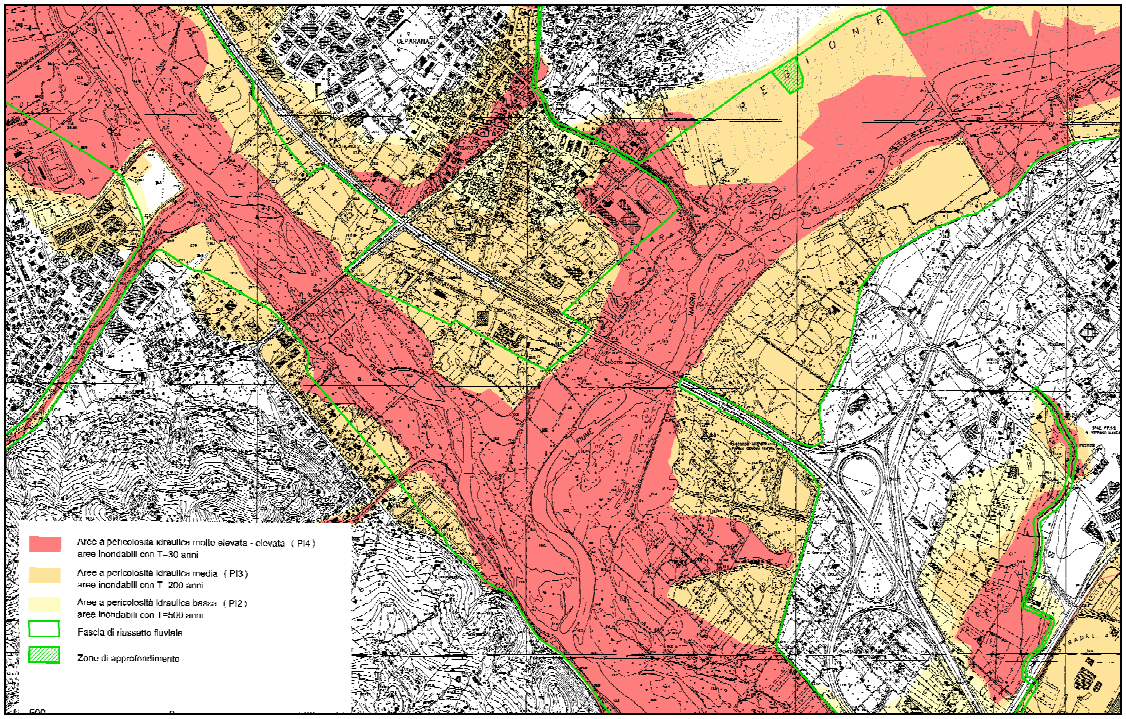


FIGURA 5.1 CARTA DELLA PERICOLOSITÀ IDRAULICA CON FASCIA DI RIASSETTO FLUVIALE E AREE INONDABILI ALLA CONFLUENZA VARA-MAGRA

Nella configurazione di progetto la perimetrazione delle aree inondabili con TR=200 anni subirà una modesta modifica corrispondente al sedime del rilevato dell'infrastruttura stradale.

La perdita di volume d'invaso, dovuta a questa nuova perimetrazione, è trascurabile (circa 3.000 m^3 per TR=200 anni e per la maggior parte in sponda sinistra), in quanto la nuova infrastruttura stradale si affianca al rilevato esistente e di fatto sostituisce una strada di campagna. Il deflusso delle acque non viene modificato in quanto la luce libera della corrente rimane inalterata e centrata all'interno del viadotto.

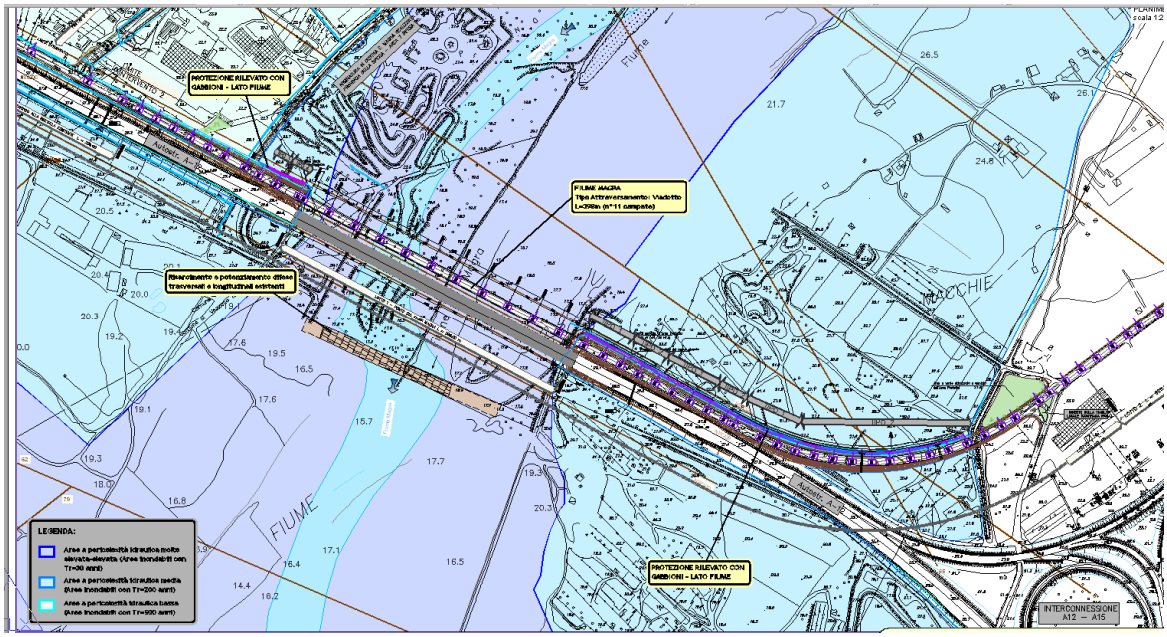


FIGURA 5.2:PERIMETRAZIONE DELLE AREE INONDABILI NELLA CONFIGURAZIONE DI PROGETTO



FIGURA 5.3 PERIMETRAZIONE DELLE AREE INONDABILI NELLO STATO DI FATTO

6. I PROCESSI EROSIVI ALLA BASE DELLE PILE DEL VIADOTTO A12 E DEL VIADOTTO IN PROGETTO

La presenza in un qualunque alveo fluviale di pile o corpi interagenti con il dinamismo del fiume, comporta inevitabilmente una variazione geometrica della sezione fluviale e quindi aumenti di velocità localizzati causati dall'addensamento delle linee di corrente attorno alle pile stesse.

Questo fenomeno provoca l'instaurarsi di masse vorticose, a forma di ferro di cavallo, attorno alle pile e può generare importanti processi di erosione localizzati che si formano durante la fase di crescita dell'onda di piena, per poi invertirsi durante la successiva fase calante.

Tali fenomeni devono essere opportunamente indagati al fine di determinare la quota a cui impostare le fondazioni delle strutture, in modo tale che le stesse non siano interessate, a causa dell'erosione, da fenomeni di scalzamento alla base.

Il fiume Magra nel tratto in questione, posto a monte della confluenza con il fiume Vara, ha un alveo di magra molto mobile ed in continua evoluzione.

Questa sua caratteristica comporta che le pile maggiormente soggette a fenomeni di scalzamento, ossia quelle interferenti con la corrente anche in caso di magra, non siano sempre le medesime, ma varino nel corso del tempo. Tali pile sono quelle più soggette a fenomeni di erosione e scalzamento in quanto sono quelle in cui il tirante idrico in caso di piena sarà massimo.

6.1. STIMA DELL'EROSIONE LOCALIZZATA ATTORNO ALLE PILE DEL VIADOTTO IN PROGETTO

Il processo erosivo può essere in generale schematizzato come il sovrapporsi di tre tipi di fenomeni:

- escavazione naturale del fiume,
- escavazione dovuta al restringimento della sezione di deflusso,
- escavazione localizzata attorno alle pile del ponte.

Il primo tipo di escavazione è solitamente legato ai fenomeni di trasporto solido che si verificano durante le piene ed in generale sono piuttosto contenuti. Il secondo tipo di erosione è principalmente funzione, oltre che delle caratteristiche idrodinamiche del fiume, del rapporto tra la larghezza ristretta e la larghezza originaria della sezione; quanto più questo è prossimo all'unità, tanto minori sono gli effetti del restringimento sui processi di deflusso ed erosione. I valori di escavazione dovuti a questi due processi sono, per alvei come quello in oggetto, solitamente riconducibile alle normali variazioni delle forme di fondo.

I processi erosivi più intensi sono invece quelli localizzati attorno alle pile (terzo tipo) e sono principalmente funzione di:

- forma e dimensione delle pile,
- angolo tra la corrente indisturbata e la pila,
- velocità della corrente, velocità critica e tirante idrico,
- caratteristiche dei sedimenti e loro granulometria.

La profondità di scavo massima è determinabile tramite l'applicazione di formule empiriche, disponibili nella letteratura scientifica, derivanti dai risultati di indagini sperimentali..

Per l'analisi in questione si è adottata la formula empirica sottoriportata, detta Metodo Breusers, Nicollet e Shen, largamente diffusa nelle applicazioni tecniche:

$d_s/s = f_1(v_0/v_c)\ [2\tanh(y_0/s)]\ f_2\ f_3(\alpha,l/s)$

dove:

l = lunghezza della pila,

s = larghezza della pila,

d_s = profondità di scavo,

v_0 = velocità media della corrente,

v_c = velocità critica di trascinamento,

α = angolo tra la direzione della corrente indisturbata e la pila,

f_1 = coefficiente sperimentale, legato al rapporto tra la velocità della corrente e la velocità critica di trascinamento,

f_2 = coefficiente di forma,

f_3 = coefficiente funzione dell'angolo di attacco della corrente,

y_0 = tirante idrico.

Il coefficiente sperimentale f_1 viene determinato in funzione del rapporto tra la velocità media della corrente indisturbata v_0 e la velocità critica di trascinamento v_c, definita come la velocità alla quale inizia il movimento del materiale di fondo di diametro d e peso specifico γ_s. Per i miscugli eterogenei di clasti di forma differente solitamente si utilizza come diametro d il d_{50} ovvero il diametro per passante in peso superiore al 50%.

La velocità critica è la velocità di incipiente movimento per la quale si è adottata la seguente espressione:

$$v_c = 0{,}85\ [2gd(\gamma_s-\gamma)/\gamma]^{1/2}$$

con:

- v_c = velocità critica,
- g = accelerazione di gravità,
- d = diametro d_{50} dei grani,
- γ_s = peso specifico del materiale di fondo,
- γ = peso specifico dell'acqua.

I coefficienti f assumono i valori di seguito descritti:

- $f_1(v_0/v_c)=0$ per $v_0/v_c = 0,5$
- $f_1(v_0/v_c)=2v_0/v_c-1$ per $0,5<v_0/v_c \leq 1,0$
- $f_1(v_0/v_c)=1$ per $v_0/v_c > 1,0$

Il coefficiente f_2 di forma tiene conto dell'impatto delle pile con la corrente in alveo; vale:

- $f_2 = 1,00$ 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.

Le pile del viadotto esistente e di quello in progetto sono circolari con diametro pari a 3 m. I due viadotti sono posti perpendicolarmente rispetto alla sezione d'alveo. Il valore del d_{50} da adottare in questo caso risulta essere pari a 0.036m.

I coefficienti f assumono i seguenti valori:

f_1 = 1, in quanto la velocità media della corrente risulta essere sempre superiore alla velocità critica di trascinamento;

f_2 e f_3 = 1, in quanto le pile dei viadotti hanno forma circolare.

Il valore di erosione massima attendibile d_s per un dato evento di piena rappresenta l'escavazione massima che si può avere attorno alle pile **durante** l'evento di piena: durante la fase calante della piena si assiste ad un parziale riempimento di tale erosione, pertanto a piena conclusa non si riesce ad evincere quale sia stata effettivamente la profondità massima di scavo raggiunta durante l'evento.

6.1.1. Risultati dell'analisi tramite formule empiriche

Di seguito si riportano i risultati dell'analisi condotta adottando come tempo di ritorno TR= 200 anni, portata Q_{200}= 5212 m^3/s e coefficiente di scabrezza (Strickler) C=22.2 $m^{1/3}\ s^{-1}$.

			Ponte in progetto
			Pila singola
velocità media	v_0	*m/s*	2.77
tirante idrico	y_0	*m*	6.52
diametro	d_{50}	*m*	0.036
gravità	g	m^2/s	9.81
peso specifico grani	γ_s	kg/m^3	2500.00
peso specifico acqua	γ_w	kg/m^3	1000.00
velocità critica di trascinamento	v_c	*m/s*	0.87
rapporto velocità	v_0/v_c	-	3.17
angolo corrente-pila	α	°	0.00
diametro o larghezza pila	s	*m*	3.00
lunghezza pila	l	*m*	3.00
rapporto larghezza/lunghezza	l/s		1.00
f1		-	1.00
f2		-	0.85
f3		-	1.00
erosione massima (pila singola)	**ds**	***m***	**4.97**

Il Metodo Breusers, Nicollet e Shen tende a sovrastimare i valori di erosione massima attendibile ds, in quanto ipotizza che il materiale costituente il fondo alveo sia completamente disomogeneo. Esistono tuttavia altri metodi empirici per il calcolo dell'erosione localizzata alla base delle pile.

La letteratura presenta analoghi modelli sempre di carattere empirico o semi-empirico basati sui dati sperimentali per la previsione del valore massimo della profondità di scavo a monte delle pile circolari ed in condizioni di acque chiare e sedimento uniforme. Tali equazioni fanno riferimento ad un medesimo schema, in cui la profondità della fossa d'erosione S risulta crescente sia con l'incremento del tirante idrico Y_0 che con la larghezza della pila b.

Le formule sperimentali più note riportate in letteratura e che ricoprono un ampio spettro delle principali grandezze geometriche, cinematiche e dinamiche da cui il fenomeno dipende, sono basate su esperienze di laboratorio con riferimento ad una singola pila cilindrica, in condizioni di velocità prossima a quella limite per l'inizio del movimento del materiale di fondo. Le formulazioni più note oltre a quella sopra rappresentata sono di seguito riportate.

Secondo Veiga da Cugna (1956-70) (riportato da Breusers et al., 1977)

$$S = 1{,}35b\left(\frac{Y_0}{b}\right)^{0{,}3}$$

Secondo Hancu (riportato da Breusers et al., 1977)

$$S = 1{,}66b\left(\frac{Y_0}{b}\right)^{0{,}13}$$

Secondo Coleman (1971)

$$S = 1{,}49b^{0{,}9}\left(\frac{v_0^2}{2g}\right)^{0{,}1}$$

Secondo Remedia (1984)

$$S = 1{,}42b(\frac{Y_0}{b})^{0{,}15}$$

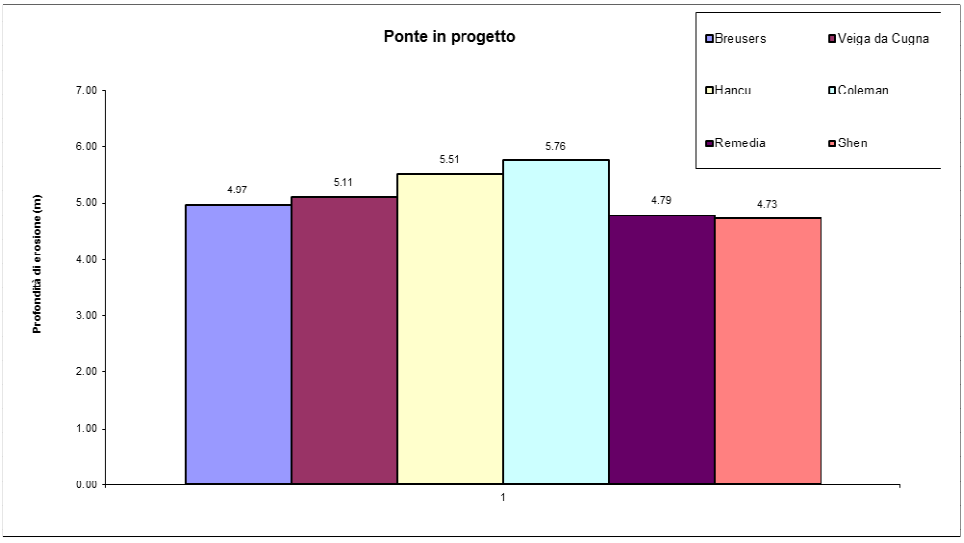
Secondo Shen (riportato da Breusers et al., 1977)

$$S = 1{,}35b(\frac{Y_0}{b})^{0{,}2}$$

È evidente il peso della larghezza della pila nel calcolo della profondità di scalzamento; infatti, è ragionevole supporre che all'aumentare della larghezza b crescano le dimensioni dei vortici a ferro di cavallo, ma è anche lecito supporre che non in eguale misura si incrementino le caratteristiche dinamiche responsabili dell'erosione intorno alle pile.

Tali formulazioni sono usualmente in discreto accordo con i risultati sperimentali di laboratorio ma spesso conducono a valutazioni molto diverse fra loro. Inoltre, esse non prendono in considerazione gli effetti dell'evoluzione temporale del fenomeno di scalzamento.

Le formulazioni empiriche sopra riportate sono state applicate adottando le grandezze idrodinamiche desunte dalla modellistica di dettaglio descritta nel capitolo precedente.



Il grafico riassuntivo illustra il campo di variabilità della profondità di scalzamento in corrispondenza delle pile del ponte in progetto, che si mantiene nella maggior parte dei casi intorno ai 5.00 m rispetto al profilo di fondo della sezione considerata (baricentro dei punti più bassi).

A seguito di queste verifiche, nel progetto il dado di fondazione delle pile è stato cautelativamente imposto ad una profondità maggiore di 5.00 m rispetto al baricentro dei punti più bassi della sezione del Fiume Magra in corrispondenza della quale si prevede di realizzare il ponte.

Se volessimo inserire anche il dado di fondazione nel calcolo delle erosioni localizzate, che presenta un diametro di 10 m, allora la profondità massima di erosione raggiungerebbe valori attorno ai 9-10 m.

A fronte di queste problematiche ed in accordo con il gruppo interdisciplinare del progetto, si è deciso attestare i pali di fondazione del diametro φ1200 mm, nel substrato roccioso costituito da alternanze di arenarie e scisti che si trova a profondità variabile fra i 10 e i 25 m dal fondo alveo. Da una lettura degli As Built del viadotto esistente dell'A12, si evince come anche gli stessi pali di fondazione del viadotto esistente siano con ogni probabilità attestati al substrato roccioso, per cui gli stimati processi erosivi combinati, che non raggiungono tali profondità, non incidono sulla stabilità della infrastruttura.. Certamente nelle fasi successive della progettazione è auspicabile che venga condotta una più approfondita indagine di natura geotecnica e topografica che consentirà di confermare questa circostanza e quindi meglio calibrare i risultati raggiunti dalle analisi sopra riportate.

6.2. INTERAZIONE TRA PONTE IN PROGETTO E VIADOTTO ESISTENTE A VALLE

La presenza in alveo delle pile del viadotto esistente dell'Autostrada A12, variando la geometria della sezione fluviale, altera il normale deflusso provocando aumenti di velocità localizzati, causati dall'addensamento delle linee di corrente. L'instaurarsi di masse vorticose, a forma di ferro di cavallo, attorno alle pile genera processi di erosione localizzati. L'erosione risulta tanto più marcata quanto più sono elevati i tiranti idrici e la velocità della corrente e quanto più è minuta la pezzatura del materiale incoerente costituente il fondo alveo; le escavazioni più significative si verificano in occasione del transito delle piene. Con la realizzazione del nuovo viadotto parallelo a quello esistente i processi erosivi già presenti alla base delle pile potrebbero subire un incremento dovuto alla futura interazione tra gli scavi al piede delle due strutture distinte.

Occorre perciò indagare anche l'influenza del ponte in progetto sull'erosione prevedibile in corrispondenza delle pile del viadotto esistente a valle.

Alcune analisi empiriche e dati di letteratura derivati da studi specifici con modelli fisici indagano il fenomeno di scavo nel caso di due pile allineate (angolo d'attacco = 0°) al variare del rapporto tra l'interasse tra le pile *a* (da estradosso ad estradosso) e il diametro *s* della pila. I risultati sperimentali evidenziano che il massimo incremento di scavo, rispetto a quanto si verificherebbe per una pila singola, si ha per un rapporto *a/s* circa

pari a 2.5 – 3.0, mentre per rapporti superiori a 8 – 9 la pila di valle non dovrebbe risentire l'influenza della fossa di scavo generata dalla presenza della pila di monte.

Altre analisi correlano la lunghezza di influenza della fossa di scavo alla massima profondità di erosione alla base della pila. Secondo questi studi, ad una distanza pari a 3-3.5 volte la profondità massima di erosione alla base della pila, non si dovrebbe più risentire dell'influenza della fossa di scavo.

A seguito di queste prime valutazioni nel presente progetto, è stata mantenuta una distanza maggiore di 25 m tra l'estradosso della pila del nuovo ponte e l'estradosso della pila del ponte esistente

Per avere una stima più precisa relativamente all' influenza della fossa di scavo sulle pile del ponte esistente nella situazione specifica sarebbe necessario sviluppare un modello idraulico bidimensionale che consideri gli effetti legati all'evoluzione nel tempo della morfologia di fondo alveo dovuta alle dinamiche di erosione/deposito, come ricordato al paragrafo precedente.

7. OPERE IDRAULICHE IN PROGETTO

Al piede del rilevato della strada in froldo, verrà realizzata sia in sponda destra che sinistra una difesa in gabbioni (analogo alla stessa difesa esistente) con duplice scopo di proteggere il piede del rilevato stesso dalle possibili azioni idrodinamiche in caso di piena del Magra che il rilevato da processi di scalzamento. La sommità di questi presidi si attesta oltre ai livelli idrometrici della piena bicentenaria del Magra. Si tratta di un presidio analogo a quello già esistente a protezione del rilevato dell'autostrada A12 e che consentirà inoltre un'azione drenante, per tale motivo è stata applicato, a tergo del gabbione metallico, un TNT agugliato a forte resistenza al taglio quale ritentore di materiali fini.

I gabbioni sono in rete metallica maglia 8x10 a doppia torsione di spessore 3,0mm e verranno riempiti con pietrame e ciottoli duri e di dimensioni uniformi superiori a 10 cm.

