



ANAS S.p.A.

Direzione Progettazione e Realizzazione Lavori

# PROLUNGAMENTO DELLA S.S. n°9 "TANGENZIALE NORD di REGGIO EMILIA" NEL TRATTO DA S. PROSPERO STRINATI A CORTE TEGGE

## PROGETTO ESECUTIVO

 Ing. Gianfranco Sodero Ordine degli Ingg. di Torino e Provincia n° 5666 Y	ING. RENATO DEL PRETE Ing. Renato Del Prete Ordine degli Ingg. di Bari e provincia n° 5073	DOTT. GEOL. DANILO GALLO Dott. Geol. Danilo Gallo Ordine dei Geologi della Regione Puglia n° 588	INTEGRAZIONE PRESTAZIONI Ing. Renato Del Prete	PROGETTISTA Ing. Gabriele Incecchi (E&G S.r.l.)
			PROGETTAZIONE STRADALE Prof.ing. Luigi Monterisi (Setac S.r.l.)	PROGETTAZIONE IDRAULICA Ing. Vittorio Ranieri (Uning)
 Ing. Valerio Bajetti Ordine degli Ingg. di Roma e provincia n° A-26211	SETAC Srl Servizi & Engineering Trasporti Ambiente Costruzioni Prof. Ing. Luigi Monterisi Ordine degli Ingg. di Bari e provincia n° 1771	 Ing. Gabriele Incecchi Ordine degli Ingg. di Roma e provincia n° A-12102	PROGETTAZIONE OPERE D'ARTE MAGGIORI Ing. Gianfranco Sodero (Studio Corona S.r.l.)	PROGETTAZIONE OPERE D'ARTE MINORI Ing. Giampiero Martino (E&G S.r.l.)
			COMPUTI Ing. Valerio Bajetti (I.T. Ingegneria)	CANTIERISTICA Prof.ing. Luigi Monterisi (Setac S.r.l.)
 Prof. Ing. Matteo Ranieri Ordine degli Ingg. di Bari e provincia n° 1137	ECOPLAN Arch. Nicoletta Frattini Ordine degli Arch. di Torino e provincia n° A-8433	ARKE' INGEGNERIA s.r.l. Ing. Gioacchino Angarano Ordine degli Ingg. di Bari e provincia n° 5970	GEOLOGIA Dott. Danilo Gallo	GEOTECNICA Prof.ing. Luigi Monterisi (Setac S.r.l.)
			AMBIENTE Dott. Emilio Macchi (ECOPLAN S.r.l.)	SICUREZZA Prof. ing. Luigi Monterisi (Setac S.r.l.)

VISTO: IL RESPONSABILE DEL PROCEDIMENTO Dott. Ing. Anna NOSARI	INTEGRATORE DELLE PRESTAZIONI SPECIALISTICHE DEL PRETE Ing. Renato DEL PRETE	PROGETTISTA Ing. Gabriele INCECCHI	GEOLOGO Dott. Danilo GALLO	IL COORDINATORE DELLA SICUREZZA IN FASE DI PROGETTAZIONE Prof. ing. Luigi MONTERISI
---	---	---------------------------------------	-------------------------------	--

FA 002

### F - PROGETTO IDRAULICO

#### FA - RELAZIONI

#### Premesse alle relazioni idrauliche

CODICE PROGETTO PROGETTO    LIV. PROG.    ANNO COBO    E    1701		NOME FILE T00ID00IDRRE02.dwg		REVISIONE B	SCALA:
CODICE ELAB. T00ID00IDRRE02		B			
C					
B	EMISSIONE A SEGUITO DI RAPPORTO INTERMEDIO DI VERIFICA	OTTOBRE 2018	ING. PEZZULLA	ING. INCECCHI	ING. BAJETTI
A	PRIMA EMISSIONE	GIUGNO 2018	ING. PEZZULLA	ING. INCECCHI	ING. BAJETTI
REV.	DESCRIZIONE	DATA	REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO



## INDICE

<b>1. PREMESSA</b>	<b>1</b>
<b>2. RIFERIMENTI NORMATIVI E TECNICI</b>	<b>2</b>
<b>1.1 NORMATIVA NAZIONALE</b>	<b>2</b>
<b>1.2 NORMATIVA REGIONALE/INTERREGIONALE</b>	<b>2</b>
<b>3. CRITERI GENERALI</b>	<b>2</b>
<b>4. MODELLO DI CALCOLO NUMERICO PER LA PROPAGAZIONE IDRAULICA IN REGIME DI MOTO MONODIMENSIONALE E PERMANENTE</b>	<b>4</b>
<b>5. MODELLO DI CALCOLO NUMERICO PER L'ANALISI DELL'AZIONE EROSIVA SULLE SPONDE E SUL FONDO</b>	<b>6</b>
<b>6. AMBITO DI RIFERIMENTO</b>	<b>10</b>

### 1. PREMESSA

Le relazioni idrauliche riportate negli elaborati T00ID00IDRRE03A- T00ID00IDRRE18A hanno l'obiettivo di definire le grandezze idrauliche di riferimento e, di conseguenza, di stabilire gli interventi e gli accorgimenti da adottare, al fine di garantire la compatibilità idraulica delle infrastrutture di attraversamento dei corsi d'acqua interferiti considerando gli ambienti di pertinenza degli stessi.

In particolare la strada in progetto è caratterizzata da una serie di interferenze idrauliche classificate come **Corsi d'acqua principali** (Torrente Crostolo, Modolena e Quaresimo), **Corsi d'acqua secondari** (Fossetta S.Giulio, Fossetta Baratto, Cavo Guazzatore, Fossetta Ballanleoche, Fossetta Valle Pieve Modolena, Fossetta Castellara, Fossetta Valle Roncocesi, Fossetta della Torretta) e **Corsi d'acqua minori** (Fosso1, Fosso 2, Fosso 3, Fosso 4, Fosso 5 e Irrigatorio di Via Ferraroni).

Questo percorso progettuale è stato condiviso, per quanto possibile, con il Consorzio di Bonifica dell'Emilia Centrale e con l'Agenzia interregionale del Fiume Po (AIPO), preposta dall'Autorità di bacino distrettuale del fiume Po (ADBPO), e tiene conto delle osservazioni riportate nel parere del Consiglio Superiore Lavori Pubblici (CSLLPP) nonché delle osservazioni riportate nel Decreto di Compatibilità ambientale VIA del 27/04/2016;

Il risultato finale consiste nell'aver verificato:

- la capacità di deflusso di ogni tratto di canalizzazione a ridosso degli attraversamenti interferiti dalla strada in progetto, considerando il transito di piene relative alla portata con un prefissato tempo di ritorno, come prescritto dal Consiglio superiore dei Lavori Pubblici;
- i franchi imposti tenendo conto della "Direttiva contenente i criteri per la valutazione della compatibilità idraulica delle infrastrutture pubbliche e di interesse pubblico all'interno delle fasce A e B del Piano stralcio per l'Assetto Idrogeologico (PAI) dell'Autorità di Bacino del fiume PO" per i corsi d'acqua principali ricadenti nelle fasce fluviali definite dal PAI ed il "Capitolato d'onere Prescrizioni per la redazione del Progetto Esecutivo" elaborato da ANAS, per i corsi d'acqua secondari e minori;
- le opere idrauliche di protezione all'imbocco e allo sbocco di ogni attraversamento stradale in progetto, intese come difese spondali, coerentemente con quanto indicato dal Consorzio di Bonifica territorialmente competente, dall'AIPO e dal Consiglio Superiore Lavori Pubblici (CSLLPP);

L'ambito territoriale scelto per l'analisi del sistema idrografico è, quindi, quello definito dai bacini imbriferi le cui aste vengono interessate dall'opera in studio; essi appartengono interamente al bacino imbrifero del Torrente Crostolo e quindi del Fiume PO. Lo studio idrologico ed idraulico ha permesso di inquadrare il territorio interessato sotto il profilo delle sue caratteristiche idrografiche, con riferimento all'entità prevalente del bacino idrografico di riferimento.

In particolare sono stati adottati tombini circolari e scatolari di dimensione adeguata a garantire i franchi previsti dalle normative vigenti e dalle prescrizioni ANAS e adeguati raccordi con l'alveo naturale ed eventualmente risagomatura e riprofilatura delle canalizzazioni esistenti al fine di evitare l'aumento del rischio di esondazione (in accordo con la prescrizione del Decreto VIA secondo la quale "l'infrastruttura non deve aumentare il rischio di esondazione, anche per rotte arginali, deve quindi essere garantito il deflusso delle acque al fine di non aumentare il rischio per la popolazione"), verificando che le canalizzazioni siano in grado di ospitare i deflussi attesi con i tempi di ritorno previsti e che in corrispondenza delle sezioni in cui sono presenti fenomeni di esondazione il livello idrico rimanga invariato tra le condizioni pre e post operam. In alcuni casi è stato necessario effettuare l'allargamento di sezioni a valle e/o a monte delle opere.

## 2. RIFERIMENTI NORMATIVI E TECNICI

Le analisi idrauliche, riportate nelle specifiche relazioni idrauliche, sono state condotte rispettando gli indirizzi e le prescrizioni riportate nella normativa di riferimento nazionale, interregionale e regionale

Lungo tutto lo sviluppo dell'analisi e della progettazione idraulica in oggetto ci si è, inoltre, attenuti e riferiti a tutto l'insieme di indicazioni e prescrizioni (Norme di polizia idraulica) impartite dal Consorzio di Bonifica dell'Emilia Centrale, con il quale è stato attivato un positivo confronto.

### 1.1 NORMATIVA NAZIONALE

- 1- Testo Unico sulle Opere Pubbliche di cui al Regio Decreto 25/7/1904 n.523.
- 2- L. 36 del 05/01/1994 "Tutela e uso delle risorse idriche"
- 3- L. 183/89 "Norme per il riassetto organizzativo e funzionale della difesa del suolo"
- 4- D.Lgs. 3 aprile 2006 n.152 "Norme in materia ambientale" e successive modifiche ed integrazioni;
- 5- DM 14/01/2008 "Norme Tecniche per le costruzioni"
- 6- Circolare 2/02/2009 n.617 "Istruzioni per l'applicazione delle Nuove tecniche per le costruzioni" di cui al DM 14/01/2008.
- 7-

### 1.2 NORMATIVA REGIONALE/INTERREGIONALE

- 1- Legge Regionale n.4 del 6 marzo 2007 "Adeguamenti normativi in materia ambientale";
- 2- *Direttiva contenente i criteri per la valutazione della compatibilità idraulica delle infrastrutture pubbliche e di interesse pubblico all'interno delle fasce "A" e "B" del Piano stralcio per l'Assetto Idrogeologico (PAI) dell'Autorità di Bacino del fiume PO;*
- 3- *Direttiva sulla piena di progetto da assumere per le progettazioni e le verifiche di compatibilità idraulica del PAI dell'AdBPo;*

## 3. CRITERI GENERALI

Lo studio idrologico-idraulico, nel suo complesso, si è articolato nelle seguenti fasi.

### **Fase 1^: Definizione di un quadro conoscitivo di riferimento morfologico ed idrologico**

Scopo di questa fase è di predisporre uno strumento conoscitivo in grado di valutare la risposta idrologica dei diversi corsi d'acqua che interferiscono con la strada in progetto con particolare attenzione alle portate al colmo di piena per prefissati tempi di ritorno, utili all'implementazione della modellistica numerica idraulica necessaria per verificare la compatibilità idraulica delle

infrastrutture di attraversamento dimensionate.

In particolare occorre precisare che per i corsi d'acqua principali si è fatto riferimento allo studio idrologico già presentato nel progetto definitivo, mentre per i corsi d'acqua secondari si è eseguito un nuovo studio idrologico, seguendo le indicazioni del Consiglio Superiore Lavori Pubblici, finalizzato al calcolo delle portate di piena con assegnato tempo di ritorno.

In merito alle caratteristiche morfologiche dei corsi d'acqua analizzati, esse sono state ricavate utilizzando il rilievo effettuato in fase di progettazione definitiva, integrato da rilievi effettuati in campo in fase di progettazione esecutiva.

### **Fase 2<sup>^</sup>: Analisi idraulica dei corsi d'acqua naturali**

Per i corsi d'acqua principali, Torrente Crostolo, T. Modolena e T. Quaresimo, è stata riproposta l'analisi idraulica effettuata nel progetto definitivo, in grado di approfondire, attraverso un processo di modellazione matematica comparativa tra stato di progetto e stato attuale, l'effetto degli attraversamenti viari sulle dinamiche idrauliche.

I parametri idraulici e le procedure di calcolo di contesto, sono quelle ricavate da studi e ricerche condotte negli ultimi anni all'interno di progettualità e valutazioni idrodinamiche funzionali alla pianificazione territoriale e quindi hanno una valenza già affermata e validata, mentre i criteri di impostazione, e soprattutto i vincoli applicati, sono quelli contenuti nel quadro normativo di riferimento precedentemente elencato. In generale si è proceduto nella definizione di soluzioni progettuali che rispettino i contenuti di tracciato del progetto ed altresì tengano conto del rispetto della naturalità dei luoghi e delle esigenze che gli Enti gestori hanno avanzato durante il continuo confronto che ha caratterizzato l'intero percorso progettuale.

Lo studio effettuato ha riguardato l'implementazione, per ogni corso d'acqua, di un modello matematico di propagazione degli eventi di piena con ipotesi di moto monodimensionale e regime di moto permanente, mediante il quale sono stati calcolati i principali parametri idraulici di interesse, raggiunti nelle varie sezioni trasversali da piene aventi prefissati tempi di ritorno e considerando diverse condizioni al contorno, sia nelle condizioni attuali che nello stato di progetto. Per il T. Crostolo sono stati effettuati studi relativi alla compatibilità idraulica in presenza di opere provvisorie ed è stato valutato il processo erosivo attorno alle spalle della porzione di ponte che interferisce con il corso d'acqua. Per tutti i corsi d'acqua analizzati sono state effettuate le verifiche della capacità erosiva della corrente in corrispondenza dei rivestimenti adottati a protezione delle sponde.

### **Fase 3<sup>^</sup>: Analisi idraulica dei corsi d'acqua artificiali**

Il sistema dei corsi d'acqua artificiali comprende la rete idrografica canalizzata composta dai corsi d'acqua di scolo e di irrigazione afferenti al Consorzio di Bonifica dell'Emilia Centrale.

Il criterio adottato per individuare i livelli idrometrici da assumere, come suggerito dal Consiglio Superiore Lavori Pubblici, a riferimento per la progettazione dei manufatti di attraversamento, è stato quello di assumere come portata di riferimento quella corrispondente ad un prefissato tempo di ritorno, mediante analisi idrologica.

L'analisi idraulica, condotta mediante modellazione matematica in moto permanente, è stata condotta indagando e mettendo a confronto la condizione attuale e quella di progetto.

Le dimensioni dei manufatti di attraversamento sono state definite in accordo con quanto impartito dal Consorzio di Bonifica e comunque garantendo, come indicato nelle prescrizioni riportate nel capitolato d'onere ANAS, un franco pari ad almeno 0.75m e comunque superiore al 30% dell'altezza interna del tombino rispetto alla portata di progetto.

Infine nel caso in cui gli stessi corsi d'acqua fossero anche i recettori delle acque di scarico dai singoli impianti di depurazione la verifica idraulica è stata altresì condotta per verificare l'impatto del contributo sui profili di rigurgito così ottenuti.

#### **Fase 4^: Analisi idraulica dei corsi d'acqua minori**

Per i fossi privati caratterizzati da sezioni trasversali minori rispetto ai precedenti (Base maggiore:  $B < 3.0\text{m}$ ) e, poiché, gli attraversamenti idraulici previsti sono rappresentati da tombini circolari di diametro  $\leq \Phi 1500$ , le analisi sono state condotte in forma più speditiva, ma sempre in regime di moto permanente e monodimensionale, indagando e confrontando la condizione attuale e quella di progetto.

#### **Fase 5^: progettazione definitiva delle opere di presidio idraulico**

Sulla base delle risultanze delle analisi idrauliche si è, quindi, proceduto alla definizione definitiva delle opere di presidio idraulico necessarie a garantire sia l'ufficiosità idraulica delle strutture in progetto, nonché alla valutazione della compatibilità delle stesse con le dinamiche dei corsi d'acqua. Sono stati, inoltre, definiti gli accorgimenti e gli interventi necessari alla risoluzione delle interferenze con gli ulteriori elementi idraulici presenti.

Per il progetto delle difese longitudinali sono state privilegiate soluzioni di ingegneria a basso impatto ambientale, condivise con il Consorzio di Bonifica dell'Emilia Centrale e con l'AIPO.

### **4. MODELLO DI CALCOLO NUMERICO PER LA PROPAGAZIONE IDRAULICA IN REGIME DI MOTO MONODIMENSIONALE E PERMANENTE**

L'analisi idraulica è stata condotta mediante modellazione numerica dei corsi d'acqua, dove la ricostruzione in formato digitale delle rispettive morfologie dell'alveo, delle eventuali arginature e delle aree limitrofe si è basata sia sul rilievo topografico effettuato in fase di progettazione definitiva aggiornato con rilievi in campo effettuati durante la fase di progettazione esecutiva.

Il confronto tra le dinamiche idrauliche nello stato di fatto ed in quello di progetto, che prevede la realizzazione del tracciato stradale e delle relative opere accessorie, ha consentito di evidenziare sia il funzionamento attuale dei corsi d'acqua, sia l'influenza sugli stessi apportata dall'infrastruttura in esame.

Il modello adottato per le simulazioni matematiche effettuate, integra numericamente le equazioni differenziali del moto vario per correnti monodimensionali gradualmente variate. L'ipotesi di monodimensionalità è ampiamente giustificata nella grande maggioranza dei tratti dei corsi analoghi a quelli in esame.

Al fine di eseguire tali verifiche si è utilizzato, quale programma di calcolo e modellazione, HEC RAS (Hydrologic Engineering Center's River Analysis System) software adoperato per la simulazione dei flussi idrici e il calcolo del profilo del pelo libero della corrente, nell'ipotesi di monodimensionalità della corrente e prodotto dallo US ARMY Engineering Corps, e reso disponibile attraverso internet ([www.hec.usace.army.mil](http://www.hec.usace.army.mil)). Nel paragrafo che segue si illustrano brevemente i contenuti del modello.

HEC-RAS è un programma realizzato per effettuare calcoli idraulici monodimensionali per reticoli idrografici (indifferentemente naturali ed artificiali); il software può lavorare in regime di moto permanente o vario. Le simulazioni effettuate, per il caso di studio, sono state condotte in regime di moto permanente.

Lo schema adottato per il modello si basa sulle equazioni del moto e di continuità per una corrente monodimensionale, associate ad una opportuna equazione per la stima delle dissipazioni energetiche.

Le equazioni, nella loro formulazione generale di De Saint Venant, esprimono le caratteristiche idrauliche (portata, carico piezometrico, altezza d'acqua e velocità) in funzione del tempo e dello spazio. Le equazioni di moto e di continuità nello schema permanente si riducono alla sola dipendenza dalla coordinata spaziale.



HEC-RAS è in grado di effettuare l'analisi di più profili contemporaneamente, prevedendo la possibilità di inserire punti singolari (ponti, sottopassi, etc.) e portate con vari tempi di ritorno, è possibile, inoltre, un confronto per sovrapposizione; nel caso di moto permanente, il software è in grado di modellare profili sia di correnti lente che veloci, ed inoltre è possibile valutare profili misti, con passaggio attraverso lo stato critico.

Nella procedura di calcolo adottata dal programma (metodo standard step) per la determinazione del profilo del pelo libero nel tratto di un canale generico, l'altezza d'acqua in una determinata sezione è determinata tramite una soluzione iterativa tra due sezioni consecutive (1 e 2) delle due equazioni sotto riportate: (equazione dell'energia)

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

ove :

$Y_2, Y_1$  = altezze d'acqua nella sezione trasversale;

$Z_2, Z_1$  = quote del fondo del canale

$V_2, V_1$  = velocità medie;

$\alpha_2, \alpha_1$  = coefficienti di velocità;

$h_e$  = perdita di energia

$$h_e = L J' + C \left( \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} - \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} \right) \quad (2)$$

ove :

$L$  = lunghezza pesata del tratto di alveo compreso tra le due sezioni successive, "pesata" in funzione della portata defluente all'interno della sezione trasversale su zone con differente coefficiente di attrito (basato sulla equazione di Manning);

$J'$  = pendenza di attrito "rappresentativa" (media) delle due sezioni successive (in caso di moto uniforme sarebbe parallela al fondo e costante).

$C$  = coefficiente di contrazione/espansione.

Le perdite, sono calcolate aggiungendo alle perdite continue per attrito, "J", un coefficiente di contrazione/espansione (rappresentativo in un certo senso delle perdite localizzate), che viene moltiplicato per la differenza delle altezze cinetiche medie tra due sezioni successive.

Occorre ribadire che il software è programmato per il calcolo di profili nell'ipotesi monodimensionale, e quindi fornisce, per ciascuna sezione trasversale, un'unica altezza del pelo libero e un'unica altezza della linea dell'energia per ogni valore della portata idraulica immessa. L'altezza della linea dell'energia, è ottenuta dal calcolo del valore "pesato" dalla portata di ciascuna delle sottosezioni in cui si può suddividere la sezione trasversale.

Per calcolare quindi il valore dell'energia per l'intera sezione, bisogna ricavare la parte relativa alla altezza cinetica media, passando attraverso la valutazione del coefficiente di velocità  $\alpha$  (a sua volta "pesato"):

$$\alpha \frac{\bar{V}^2}{2g} = \frac{Q_1 \frac{V_1^2}{2g} + Q_2 \frac{V_2^2}{2g}}{Q_1 + Q_2} \quad (3)$$

Come detto, le perdite continue per attrito sono valutate come il prodotto di  $J'$  dove  $J'$  è la pendenza media della linee dell'energia tra due sezioni consecutive distanti tra loro  $L$  (pesate in funzione

delle "portate trasversali"). La pendenza della linea dell'energia è calcolata, per ciascuna sezione, tramite l'equazione di Manning, nel modo seguente:

$$J' = \left( \frac{Q}{K} \right)^2 \quad (4)$$

dove  $K = 1.486/n * A * R^{2/3}$  rappresenta il termine di "trascinamento" e quindi influenza le perdite continue.

In definitiva l'equazione della energia, al fine della valutazione della incognita ovvero del tirante idrico nella singola sezione, viene applicata in maniera iterativa.

## 5. MODELLO DI CALCOLO NUMERICO PER L'ANALISI DELL'AZIONE EROSIVA SULLE SPONDE E SUL FONDO

L'analisi dell'azione erosiva è stata effettuata confrontando la tensione tangenziale dovuta all'azione della corrente sulle particelle dell'alveo fluviale con quella critica nella condizione di incipiente movimento, calcolata sia sulle sponde che sul fondo del canale e considerando sia la condizione di inizio del trasporto di fondo per effetto del rotolamento che per strisciamento.

Nel caso di trasporto solido sul fondo, il valore medio della tensione tangenziale sul contorno bagnato viene ottenuto esprimendo la condizione di equilibrio alla traslazione, scritta nel senso del moto, tra la componente del peso di un tratto del corso d'acqua in condizioni di moto uniforme e l'azione resistente che si sviluppa lungo il contorno della sezione. In particolare per un tratto di alveo cilindrico di lunghezza  $l$ , pendenza  $j$  della linea dell'energia, area  $A$  e contorno bagnato  $P$  (fig. 1) il valore medio della tensione tangenziale  $\tau$  lungo il contorno bagnato è dato dal prodotto della pendenza ( $j$ ) per il raggio idraulico (pari al rapporto di  $A/P$ ) per il peso specifico  $\gamma_w$  della massa liquida contenuta nel tratto.

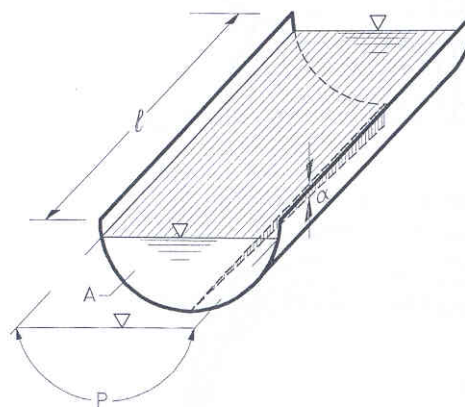


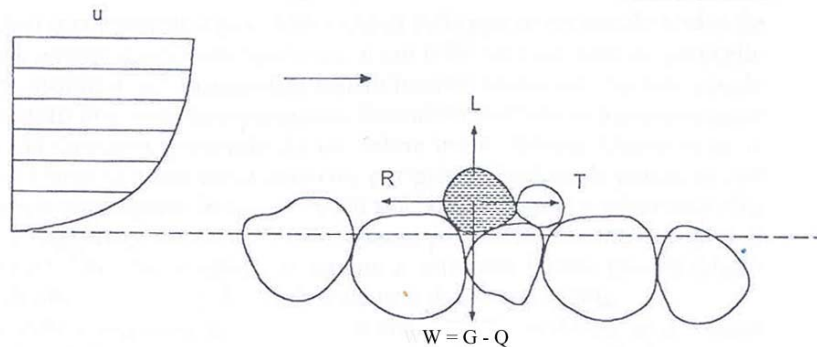
FIGURA 1 - SCHEMA DI UN TRATTO DI ALVEO CILINDRICO.

Per valutare se la corrente liquida è in grado di erodere la sezione fluviale è necessario confrontare la tensione tangenziale esercitata dall'acqua sul contorno della sezione con la tensione critica di trascinamento corrispondente alla condizione di moto incipiente.

Quest'ultima viene in genere valutata cercando di interpretare ed allo stesso tempo di semplificare ciò che avviene nella realtà, ovvero ipotizzando che il singolo elemento litoide si muove trasportato dalla corrente liquida in maniera essenzialmente indipendente dalla presenza degli altri elementi e che il movimento può avvenire per rotolamento, se le particelle sono di tipo sferico come le sabbie



ed i ciottoli arrotondati, o per strisciamento se le particelle sono caratterizzate da una superficie sfaccettata. Pertanto relativamente al movimento per strisciamento, si suppone che il materiale che si trova sul fondo si mette in movimento (figura 2) quando le azioni idrodinamiche esercitate dalla corrente (componente orizzontale  $T$  della spinta idrodinamica e componente verticale  $L$  della stessa spinta) prevalgono sulle forze resistenti (peso immerso  $W=G - Q$ , essendo  $G$  il peso del granulo e  $Q$  la spinta di galleggiamento, e resistenza d'attrito  $R$ , conseguente al contatto con le particelle circostanti); un importante contributo allo studio di tali effetti è dovuto a Shields che nel 1936 sviluppò un approccio secondo il quale si assume che le condizioni di inizio del moto si verifichino quando l'azione idrodinamica di trascinamento  $T$  esercitata dalla corrente, supera la resistenza di attrito  $R$  calcolata in funzione del peso immerso e del coefficiente di attrito.



**FIGURA 2** - SCHEMA DELLE FORZE AGENTI SU UNA PARTICELLA SOLIDA POSTA SUL FONDO ALVEO.

Shields ha investigato sperimentalmente il caso di un letto orizzontale formato da particelle uniformi non coesive fornendo il seguente legame funzionale:

$$\frac{\tau_c}{(\gamma_s - \gamma) d} = f \left( Re_*, \frac{h}{d} \right) \quad (6)$$

in cui  $Yc = \tau_c / (\gamma_s - \gamma) d$  è il numero o parametro di Shields corrispondente alle condizioni critiche di trascinamento,  $\tau_c$  è la tensione tangenziale di trascinamento,  $\gamma_s$  è peso specifico delle particelle,  $\gamma$  è il peso specifico della massa fluida,  $d$  è il diametro caratteristico dei granuli,  $Re^* = u^* d / \nu$  è il numero di Reynolds della corrente di fondo,  $u^*$  è la velocità di attrito pari a  $(\tau/\rho)^{1/2}$ ,  $\nu$  è la viscosità cinematica,  $\rho$  è la densità della massa liquida ed  $h$  è il tirante idrico. Nella condizione idraulica di microscabrezza, quest'ultima non interviene nella definizione di moto incipiente e la relazione (6) diventa:

$$\frac{\tau_c}{(\gamma_s - \gamma) d} = f (Re_*) \quad (7)$$

L'esatto sviluppo matematico del legame funzionale (7), determinato sperimentalmente da Shields, è rappresentato in figura 3 ed è usualmente denominato Abaco di Shields.

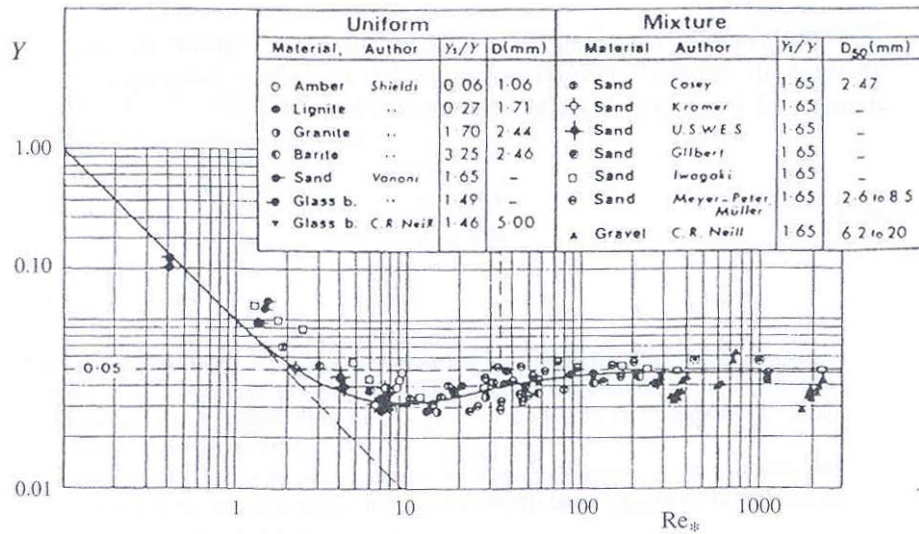


FIGURA 3 - ABACO DI SHIELDS NELLA VERSIONE RIDISEGNATA DA YALIN E KARAHAN, 1979<sup>1</sup>.

Nell'abaco si notano tre regioni caratterizzate da differente comportamento. La prima, che si presenta per valori  $Re^* < 1$  è denominata laminare e mostra, nel piano logaritmico di rappresentazione, una relazione di proporzionalità inversa tra il parametro di Shields e il numero di Reynolds della corrente di fondo; per valori di  $Re^* > 400-500$  il parametro di Shields risulta costante e pari a 0.056-0.060 (moto turbolento), mentre per i numeri di Reynolds intermedi si ha la transizione tra i due andamenti. I punti della curva sono rappresentativi di condizioni di equilibrio limite in cui la tensione tangenziale al fondo è pari al valore critico  $\tau_c$ ; i punti posti al di sopra della curva rappresentano le situazioni di trasporto mentre quelli posti al di sotto sono relativi alle condizioni di deposito.

I fenomeni erosivi non riguardano solo il fondo ma anche le sponde della sezione. Le formule di incipiente movimento devono essere però corrette per tenere conto dell'effetto destabilizzante dell'inclinazione delle sponde medesime, analogo all'effetto dell'inclinazione del fondo. Detto  $\alpha$  l'angolo formato dalle sponde (v. figura 4), risulta un fattore di riduzione della soglia critica proposto da E. Lane (1953) e riportata da Da Deppo et al. 2004<sup>2</sup>:

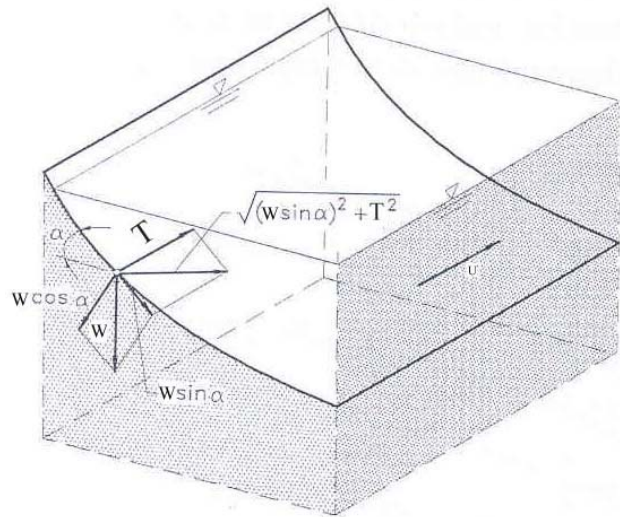
$$\frac{\tau_c(\alpha)}{\tau_c(\alpha=0)} = \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \alpha}{\sin^2 \beta}} \quad (8)$$

dove  $\beta$  è l'angolo di naturale declivio.

Infatti una particella posta sulla sponda, oltre ad essere trascinata dall'azione della corrente (T), subisce anche l'effetto della componente del peso proprio lungo la direzione del flusso, pertanto la forza di trascinamento subisce un incremento.

<sup>1</sup> Yalin M.S., Karahan E., Inception of sediment transport, "Journal of Hydraulic Engineering", Proc. ASCE, Vol. 105, 11, 1433-1443, 1979.

<sup>2</sup> L. Da Deppo, C. Datei, P. Salandin, Sistemazione dei corsi d'acqua, Libreria Internazionale Cortina Padova, ISBN 88-7784-246-6, 2004.



**FIGURA 4 - FORZE AGENTI SU UN GRANO SULLA SPONDA DI UN CORSO D'ACQUA.**

Occorre notare che l'angolo  $\alpha$  deve essere minore o uguale all'angolo di naturale declivio  $\beta$  poiché il termine sotto radice ha senso solo se ha segno positivo; inoltre occorre notare che la tensione critica  $\tau_c$  sulla sponda è minore di quella sul fondo; pertanto il materiale presente sulla sponda viene eroso prima.

Se le particelle sono caratterizzate prevalentemente da una superficie di tipo sferico piuttosto che sfaccettata, il materiale viene messo in movimento per rotolamento, pertanto la stima della tensione critica di trascinamento viene effettuata imponendo l'equilibrio alla rotazione rispetto al punto intorno al quale avviene il rotolamento (punto di pivoting, v. figura 5) che viene individuato mediante l'angolo di pivoting  $\phi$  o angolo di rotolamento rispetto allo strato inferiore di base costituito da elementi di diametro  $D$ ; tale angolo dipende dal rapporto  $d/D$  tra le particelle dello strato rotolante e quello dello strato di base ed assume valore pari a  $50^\circ$  nel caso di letto monogranulare ( $d/D=1$ ). Lo sviluppo numerico dell'equilibrio alla rotazione, conduce ad una relazione che per elevati valori del numero di Reynolds della corrente di fondo viene scritta nella seguente forma (riportata da Ferro, 2006<sup>3</sup>) :

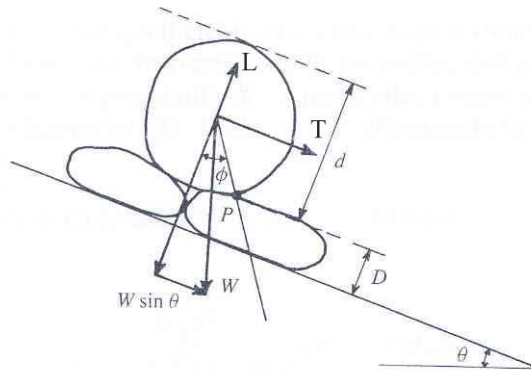
$$\frac{\tau_{c,no}}{\tau_{c,o}} = \frac{\tan \phi \cos \vartheta - \sin \vartheta}{\tan \phi} = \cos \vartheta \left( 1 - \frac{\tan \vartheta}{\tan \phi} \right) \quad (9)$$

$$\frac{\tau_{c,o}}{(\gamma_s - \gamma)d} = 0.056 \frac{\tan \phi}{\tan 50^\circ} \quad (10)$$

dove  $\tau_{c,o}$  è la tensione tangenziale critica nel caso di fondo orizzontale,  $\tau_{c,no}$  è la tensione tangenziale critica nel caso di fondo non orizzontale,  $\phi$  è l'angolo di pivoting e  $\vartheta$  è l'angolo di inclinazione del fondo.

La (10) dimostra che nel caso di alveo poco ripido e granulometricamente omogeneo ( $\phi=50^\circ$ ), la tensione tangenziale critica assume una espressione analoga a quella ricavata da Shields per sabbie monogranulari disposte su un letto orizzontale.

<sup>3</sup> Ferro Vito, La sistemazione dei bacini idrografici, McGraw-Hill, 2006



**FIGURA 5 - EROSIONE PER ROTOLAMENTO DELLE PARTICELLE.**

## 6. AMBITO DI RIFERIMENTO

### 6.1. IL COMPENSORIO DI BONIFICA

Si riporta di seguito integralmente quanto già riportato nella relazione 7.1 del progetto definitivo (Relazione idrologico e idraulica: gestione delle interferenze idrauliche).

Il tracciato del prolungamento della Tangenziale Nord di Reggio Emilia si colloca nella parte medio alta della Pianura Padana ovvero laddove i corsi d'acqua appenninici tributari del Po, cambiano assetto morfologico e da corsi d'acqua ramificati si trasformano in monocorsuali ad andamento meandriforme, delimitati da arginature via via crescenti. Ed è proprio in questa parte di pianura che prendono forma i canali di bonifica funzionali allo scolo delle acque non altrimenti drenanti dai primi in quanto pensili.

Il tracciato stradale in progetto si sviluppa in gran parte parallelo e a ridosso del lato Nord della linea Ferroviaria Milano-Bologna, collegando il centro urbano di Reggio Emilia, la zona industriale di Sesso e quella di Pieve Modolena con quella di Corte Tegge. L'andamento altimetrico si presenta monotona deprimente verso Nord-Ovest, con quote altimetriche che variano da 49.00m slm all'inizio del tracciato fino a 39.00m slm dopo circa 5.0Km.

Sul territorio si evidenziano anche alcuni rilievi naturali costituiti dai dossi di pianura, in genere con orientamento nord-sud, originati dalle antiche esondazioni dei corsi d'acqua e fluttuazioni d'alveo che hanno modellato la pianura in alternanza di dossi e valli, oggi non sempre riconoscibili, i primi caratterizzati da suoli sabbiosi e talvolta ghiaiosi le seconde caratterizzate da depositi alluvionali di limi ed argille. Altri elementi di origine artificiale sono le arginature dei principali corsi d'acqua e dei rilevati infrastrutturali e le incisioni dei canali di scolo e bonifica.

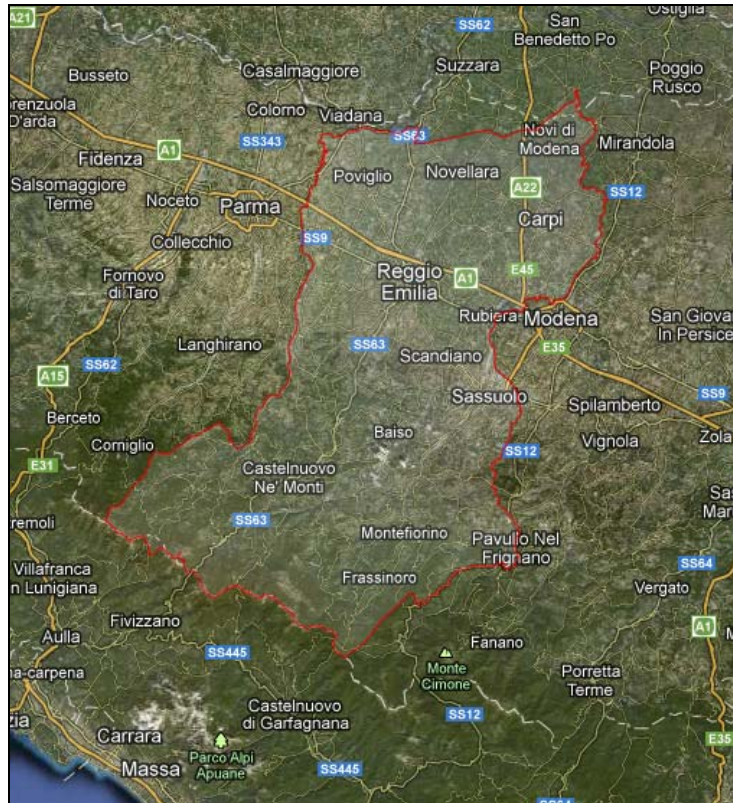
Gli elementi morfologicamente più significativi sono i corpi idrici principali attraversati dalla tangenziale: il Torrente Crostolo, Modolena e Quaresimo che suddividono il territorio in ambiti idrologicamente omogenei, tutti appartenenti al bacino idrografico del Crostolo.

L'area in esame ricade all'interno del comprensorio del Consorzio di Bonifica dell'Emilia Centrale (Figura 5 1), ente di diritto pubblico, che nasce nell'ottobre del 2009 dalla fusione dei Consorzi di Bonifica Parmigiana Moglia Secchia e Bentivoglio-Enza, ed assicura la gestione e distribuzione delle acque superficiali per la tutela e lo sviluppo del territorio. Il comprensorio del Consorzio, che ha caratteristica di interregionalità, ha una superficie totale di 312.325 Ha e ricadenti nelle province di Reggio Emilia, Modena, Parma, Massa Carrara e Mantova.

Nell'area di studio, le opere del Consorzio garantiscono il corretto deflusso delle acque meteoriche, tramite la loro raccolta, allontanamento e smaltimento ed assicurano inoltre la difesa



dalle inondazioni delle acque provenienti dai territori situati più a monte. Anche a causa della sempre maggiore urbanizzazione del territorio e dei cambiamenti climatici in atto, tale attività risulta indispensabile per evitare possibili allagamenti degli immobili (terreni e fabbricati) posti nel comprensorio di bonifica.



**FIGURA 6 - PERIMETRAZIONE DEL COMPRESORIO DI BONIFICA DELL'EMILIA CENTRALE**  
 Il tracciato insiste su un territorio di campagna prevalentemente destinata a seminativi con presenza di vigneti ed altre colture arboree, oltre ad alcune abitazioni isolate.  
 Il territorio è soggetto ad un clima continentale temperato tipico della pianura padana tuttavia con influenze del clima sublitoraneo appenninico dominato da due massimi e due minimi di precipitazione.