

COMMITTENTE:



PROGETTAZIONE:



CUP: J71H92000020011

U.O. OPERE CIVILI E GESTIONE DELLE VARIANTI

PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA

VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO - GENOVA

QUADRUPPLICAMENTO TORTONA - VOGHERA

IDROLOGIA E IDRAULICA

Studio di geomorfologia fluviale - Relazione

SCALA:

-

COMMESSA LOTTO FASE ENTE TIPO DOC. OPERA/DISCIPLINA PROGR. REV.

I Q 0 1 0 1 R 0 9 R G I D 0 0 0 2 0 0 1 A

Rev.	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Autorizzato Data
A	Emissione esecutiva	D. Polverelli 	Settembre 2021	F. Cabas 	Settembre 2021	M. Berlingieri 	Settembre 2021	A. Vittozzi Settembre 2021 ITALFERR S.p.A. U.O. Opere Civili e Gestione delle varianti Dott. Ing. Angelo Vittozzi Ordine degli Ingegneri della Provincia di Rom: N° A20783

File:

n. Elab.:

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA					
	IDROLOGIA E IDRAULICA Studio di geomorfologia fluviale - Relazione	COMMESSA IQ01	LOTTO 01	CODIFICA R 09 RG	DOCUMENTO ID 0002 001	REV. A

INDICE

1	PREMESSA	5
1.1	OBIETTIVI E CONTENUTI DELLO STUDIO	5
1.2	METODOLOGIA DI LAVORO.....	5
1.3	NORMATIVA E DOCUMENTAZIONE DI RIFERIMENTO	7
2	CARATTERISTICHE DELL'AREA DI STUDIO.....	9
2.1	ASSETTO GEOMORFOLOGICO DEI CORSI D'ACQUA INTERESSATI DAL PROGETTO.....	11
2.1.1	METODOLOGIA PER L'INDIVIDUAZIONE DEI PUNTI DI PRELIEVO DEL MATERIALE D'ALVEO.....	13
2.1.2	CARATTERISTICHE GRANULOMETRICHE DEI CORSI D'ACQUA IN ESAME.....	15
2.2	INDICE DI DINAMICA MORFOLOGICA (IDM).....	17
2.2.1	METODO IDRAIM.....	17
2.2.2	APPLICAZIONE AI CASI DI STUDIO.....	21
3	VALUTAZIONE DEL TRASPORTO SOLIDO.....	27
3.1	MODELLI MATEMATICI PER IL TRASPORTO SOLIDO	27
3.1.1	LA TEORIA DI SHIELDS PER IL MOTO INCIPIENTE	27
3.1.2	L'EQUAZIONE DI EXNER	30
3.1.3	ACCOPPIAMENTO ACQUA-SEDIMENTI	32
3.1.4	SCELTA DELLA FORMULA DI TRASPORTO SOLIDO PER I CASI IN ESAME.....	34
3.2	MODELLO DI CALCOLO IDRAULICO A FONDO MOBILE.....	41
3.2.1	HEC-RAS, MODULO PER IL TRASPORTO DEI SEDIMENTI.....	41
3.2.2	SCHEMATIZZAZIONE IDRAULICA ADOTTATA	44

	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA												
IDROLOGIA E IDRAULICA Studio di geomorfologia fluviale - Relazione	<table border="1"> <thead> <tr> <th>COMMESSA</th> <th>LOTTO</th> <th>CODIFICA</th> <th>DOCUMENTO</th> <th>REV.</th> <th>FOGLIO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>IQ01</td> <td>01</td> <td>R 09 RG</td> <td>ID 0002 001</td> <td>A</td> <td>4 di 63</td> </tr> </tbody> </table>	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO	IQ01	01	R 09 RG	ID 0002 001	A	4 di 63
COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO								
IQ01	01	R 09 RG	ID 0002 001	A	4 di 63								

3.3	MODALITÀ EVOLUTIVE DELL'ALVEO	52
3.3.1	TENDENZA ALL'EROSIONE E ALLA DEPOSIZIONE.....	52
4	CONCLUSIONI.....	57
4.1	ANALISI DEL RAPPORTO CON L'OPERA IN PROGETTO.....	57
5	BIBLIOGRAFIA	61
6	ALLEGATO - SCHEDE DI RILEVAMENTO GEOMORFOLOGICO	63

	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA					
IDROLOGIA E IDRAULICA Studio di geomorfologia fluviale - Relazione	COMMESSA IQ01	LOTTO 01	CODIFICA R 09 RG	DOCUMENTO ID 0002 001	REV. A	FOGLIO 5 di 63

1 PREMESSA

1.1 OBIETTIVI E CONTENUTI DELLO STUDIO

La presente Relazione riferisce in merito alle analisi di geomorfologia fluviale, relative ai corsi d'acqua interessati dal Progetto di fattibilità tecnica ed economica di quadruplicamento della tratta ferroviaria "Tortona-Voghera". Lo studio geomorfologico viene condotto con l'obiettivo di valutare le tendenze evolutive dei corsi d'acqua, in termini di possibili naturali variazioni morfologiche dell'alveo che evidenzino erosioni o deposizioni diffuse con mobilitazione dei sedimenti e conseguente possibile rischio di interrimento delle opere di attraversamento. La deposizione del materiale d'alveo, trasportato dalla corrente idrica, viene infatti presa in considerazione per il dimensionamento delle nuove opere di attraversamento, in quanto la luce libera di sottotrave può ridursi appunto a causa dell'interrimento. Tuttavia, i sedimenti naturalmente depositi dalla corrente idrica possono essere rimobilizzati dalle piene, per cui l'analisi del trasporto solido fluviale ha l'obiettivo di indicare appunto la tendenza evolutiva, secondo adeguati scenari di andamento delle portate di magra e di piena, al fine di programmare le conseguenti attività di manutenzione, finalizzate al monitoraggio della dinamica morfologica del corso d'acqua.

1.2 METODOLOGIA DI LAVORO

La procedura implementata per valutare la tendenza evolutiva di un corso d'acqua si compone operativamente delle seguenti fasi:

- Caratterizzazione geomorfologica del corso d'acqua
 - Valutazione degli apporti di sedimenti per fenomeni gravitativi all'interno del bacino idrografico di interesse mediante sopralluoghi e l'analisi degli studi (se disponibili) condotti dagli enti proposti alla tutela e salvaguardia del territorio (ad es. cartografia P.A.I., Carta dei Dissesti,...), secondo quanto previsto dal manuale di progettazione e dalle linee guida di RFI.

	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA					
IDROLOGIA E IDRAULICA Studio di geomorfologia fluviale - Relazione	COMMESSA IQ01	LOTTO 01	CODIFICA R 09 RG	DOCUMENTO ID 0002 001	REV. A	FOGLIO 6 di 63

- Applicazione della metodologia IDRAIM (Ispra, 2016) per la definizione dell'Indice di dinamica morfologica – IDM, sulla base del rilevamento *in situ* delle caratteristiche di erodibilità, artificialità (opere di protezione/difesa sponde/alveo), variabilità morfologica (larghezza alveo, altimetria), nonché delle analisi granulometriche di campioni di materiale prelevati in alveo.

- Caratterizzazione idraulica del corso d'acqua
 - Sviluppo di modelli idraulici «a fondo mobile» (HEC RAS), secondo scenari di andamento delle portate medie mensili, ai fini dell'individuazione dei tratti di alveo soggetti a fenomeni erosione e/o deposizione, nelle situazioni ante-operam e post-operam, in corrispondenza delle opere di attraversamento in progetto.
 - Simulazioni di scenari relativi a portate corrispondenti a tempi di ritorno elevati, laddove necessario (ad es. in presenza di zone soggette a deposizione immediatamente a monte dell'intervento), per una più dettagliata valutazione della possibilità di interrimento delle opere previste.

- Analisi dei risultati ottenuti dalla caratterizzazione geomorfologica e idraulica
 - Verifica e/o dimensionamento delle opere di attraversamento: se soggette ad erosione, si procede alla definizione di opportune opere di sistemazione idraulica; se soggette a deposizione, si procede con la verifica dell'ufficiosità idraulica dell'opera di attraversamento prevista, con riferimento alla normativa vigente in materia di franco idraulico (minimo) di sicurezza.
 - Nuove iterazioni di progettazione per le opere a (forte) rischio di interrimento con conseguente significativa riduzione del franco idraulico, al di sotto del valore minimo previsto dalla normativa vigente.
 - Definizione del '*livello di attenzione per interventi di manutenzione*' (LAm) finalizzato al mantenimento dei franchi idraulici di progetto e programmazione delle

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA					
	IDROLOGIA E IDRAULICA Studio di geomorfologia fluviale - Relazione	COMMESSA IQ01	LOTTO 01	CODIFICA R 09 RG	DOCUMENTO ID 0002 001	REV. A

attività manutentive (frequenza delle ispezioni,...), sulla base dei risultati IDRAIM e HECRAS.

Di seguito, la “flow chart” riepilogativa della procedura sopra descritta.

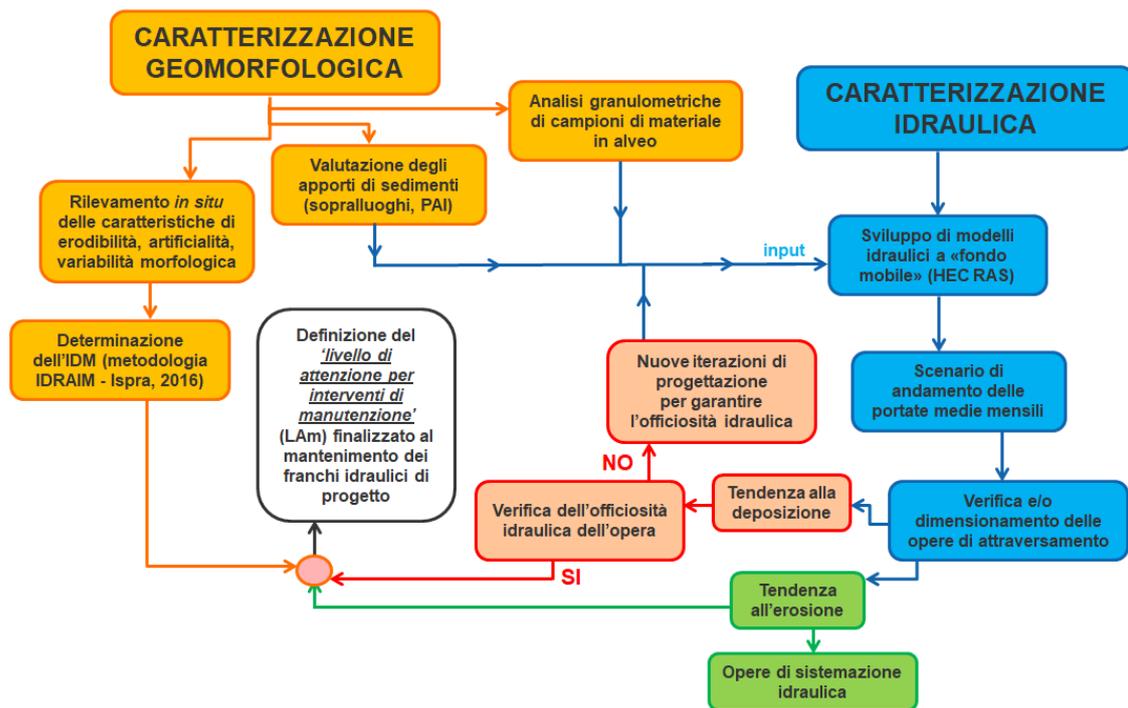


Figura 1: Procedura di analisi: flow chart

1.3 NORMATIVA E DOCUMENTAZIONE DI RIFERIMENTO

Ai fini del presente studio sono stati consultati i seguenti piani e documentazione di riferimento:

- Piano di Gestione del Rischio di Alluvioni (PGRA) relativo al Bacino del Po, approvato nel 2016, e i suoi elaborati relativi alla Regione Piemonte;
- Direttiva tecnica per la programmazione degli interventi di gestione dei sedimenti degli alvei dei corsi d'acqua” ad integrazione della Direttiva tecnica in materia di attività estrattive nelle fasce fluviali del Po (deliberazione n.9/2006);

	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA					
	IDROLOGIA E IDRAULICA Studio di geomorfologia fluviale - Relazione	COMMESSA IQ01	LOTTO 01	CODIFICA R 09 RG	DOCUMENTO ID 0002 001	REV. A

- Sistema di valutazione geomorfologica, analisi e monitoraggio dei corsi d'acqua – Metodo IDRAIM (ISPRA – Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale).

Sistema di valutazione geomorfologica, analisi e monitoraggio dei corsi d'acqua – Metodo IDRAIM (ISPRA – Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale)

Il sistema di valutazione idromorfologica, analisi e monitoraggio dei corsi d'acqua, denominato IDRAIM, è stato realizzato con l'obiettivo di sviluppare una metodologia complessiva di analisi e di supporto alla gestione dei processi geomorfologici nei corsi d'acqua, tenendo conto in maniera integrata di obiettivi di qualità e di sicurezza, ai sensi della Direttiva Quadro Acque 2000/60/CE (Water Framework Directive o WFD) e della Direttiva Alluvioni 2007/60/CE (Floods Directive o FD). Il metodo sviluppato intende costituire una procedura sistematica e strutturata su come affrontare i vari aspetti geomorfologici, a integrazione di altre componenti (quali, ad es., gli aspetti idraulici ed ecologici), per poter giungere a fornire il supporto scientifico e conoscitivo per una gestione integrata dei corsi d'acqua.

Seppure costruito su basi scientifiche solide, è da tener presente che si tratta di una metodologia applicativa, tale da poter essere utilizzabile da parte degli enti responsabili dell'implementazione delle Direttive e dei piani di gestione e della gestione dei corsi d'acqua.

Uno degli obiettivi di tale metodologia è la definizione dell'Indice di Qualità Morfologica (IQM) e dell'Indice di Dinamica Morfologica (IDM) i quali rappresentano uno strumento per valutare lo scostamento rispetto a condizioni indisturbate del corso d'acqua che rappresentano le condizioni di riferimento. Nella definizione delle condizioni di riferimento si tiene conto della traiettoria di evoluzione del corso d'acqua, dei requisiti richiesti dalla WFD e del contesto specifico dei corsi d'acqua italiani, i quali sono stati interessati da fattori antropici per un lungo periodo di tempo. In accordo con la WFD, lo stato di riferimento deve corrispondere a condizioni "indisturbate", caratterizzate da assenza o impatti antropici molto limitati. Conseguentemente, le condizioni di

	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA					
	IDROLOGIA E IDRAULICA Studio di geomorfologia fluviale - Relazione	COMMESSA IQ01	LOTTO 01	CODIFICA R 09 RG	DOCUMENTO ID 0002 001	REV. A

riferimento sono definite in maniera tale da misurare lo scostamento rispetto a condizioni geomorfologiche indisturbate o solo lievemente disturbate.

Le condizioni di riferimento per un dato tratto sono definite considerando tre componenti, vale a dire:

- funzionalità geomorfologica (forme e processi del corso d'acqua);
- artificialità;
- variazioni morfologiche (instabilità).

Riguardo la prima componente, le condizioni di riferimento sono date dalla forma e dai processi che sono attesi per la tipologia morfologica esaminata. Per l'artificialità, la condizione di riferimento è data da assenza o presenza molto ridotta di interventi antropici (regolazione delle portate liquide e solide, strutture idrauliche e attività di gestione). Se esistono elementi antropici, essi dovrebbero produrre effetti trascurabili sulla morfologia dell'alveo e sui processi. Riguardo alla terza componente, un alveo deve essere stabile o in "equilibrio dinamico", vale a dire che non si sono verificate importanti variazioni morfologiche dovute a fattori antropici nel corso del "recente" passato (ovvero negli ultimi 100 anni circa). Riassumendo, le condizioni di riferimento consistono in un tratto di corso d'acqua in equilibrio dinamico, dove il fiume svolge quei processi geomorfologici che sono attesi per una specifica tipologia, e dove l'artificialità è assente o non altera significativamente la dinamica del corso d'acqua a scala di bacino e di tratto.

Nell'ambito del presente studio, è stata applicata, in modo semplificato e in via preliminare, la metodologia per la determinazione dell'IDM (Indice di Dinamica Morfologica).

2 CARATTERISTICHE DELL'AREA DI STUDIO

Come anticipato in premessa, il presente studio idraulico è stato redatto a supporto della progettazione definitiva del quadruplicamento linea ferroviaria Tortona-Voghera. L'area di studio è centrata sulle intersezioni tra la linea ferroviaria e i torrenti Curone, Limbione, Grue e Calvenza. La

 <p>ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p>	<p>VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA</p>												
<p>IDROLOGIA E IDRAULICA Studio di geomorfologia fluviale - Relazione</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>COMMESSA</th> <th>LOTTO</th> <th>CODIFICA</th> <th>DOCUMENTO</th> <th>REV.</th> <th>FOGLIO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>IQ01</td> <td>01</td> <td>R 09 RG</td> <td>ID 0002 001</td> <td>A</td> <td>10 di 63</td> </tr> </tbody> </table>	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO	IQ01	01	R 09 RG	ID 0002 001	A	10 di 63
COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO								
IQ01	01	R 09 RG	ID 0002 001	A	10 di 63								

mappa che segue illustra il tratto preso in esame per i corpi idrici in fase di studio, in relazione al tracciato della linea ferroviaria.

NOTA: il sistema di riferimento adottato per le coordinate indicate nelle mappe presentate nel presente rapporto è Gauss-Boaga Fuso Ovest.



Figura 2: Inquadramento generale dell'area di studio

	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA					
IDROLOGIA E IDRAULICA Studio di geomorfologia fluviale - Relazione	COMMESSA IQ01	LOTTO 01	CODIFICA R 09 RG	DOCUMENTO ID 0002 001	REV. A	FOGLIO 11 di 63

2.1 ASSETTO GEOMORFOLOGICO DEI CORSI D'ACQUA INTERESSATI DAL PROGETTO

I tratti dei corsi d'acqua a cavallo del tracciato ferroviario presentano le caratteristiche morfologiche tipiche dei corsi d'acqua all'ingresso di territori pianeggianti, in particolare per il torrente Curone. Quest'ultimo ha un bacino idrografico di estensione complessiva di 213 km². Il torrente si origina a monte dell'abitato di Bruggi, al confine tra Piemonte, Emilia Romagna e Lombardia. Il reticolo idrografico è caratterizzato da una fitta rete di rii di modesta estensione lineare a causa del forte ravvicinamento degli spartiacque occidentale ed orientale. I principali parametri morfologici sono i seguenti:

- Area del bacino: 213 km²
- Quota massima: 1683 m s.l.m.
- Quota minima: 87 m s.l.m.
- Quota media: 519 m s.l.m.
- Pendenza media versanti: 18.5%
- Lunghezza asta 102 km

Nel tratto di interesse, il Curone scorre formando un'ansa abbastanza pronunciata in prossimità dell'abitato di Pontecurone. L'alveo, nel complesso sinuoso, si restringe notevolmente rispetto al tratto precedente e la sua pendenza diminuisce. A monte, infatti, il torrente presenta una configurazione morfologica più sinuosa, e con maggiore sviluppo delle barre, avvicinandosi a una tipologia a barre alternate, o mostrando la tendenza a formare più canali. Nel tratto di interesse, la variabilità della sezione e le forme tipiche della tipologia morfologica sono alquanto limitate. Numerose opere di attraversamento incidono sull'artificialità del tratto: i ponti dell'abitato di Pontecurone di Viale Giuseppe di Vittorio e di Viale Gramsci, della SPexSS10, oltre a quello della ferrovia e infine a quello dell'Autostrada A21. Sono presenti, inoltre, brevi tratti di sponde difese e arginature discontinue.

La figura che segue mostra la sostanziale stabilità dell'alveo nel tratto a cavallo dell'attraversamento ferroviario, fatta salva la tendenza a formare canali multipli all'interno dell'alveo, quanto meno a monte della SPexSS10, mediante il confronto tra due immagini satellitari datate rispettivamente 2002 e 2021.

IDROLOGIA E IDRAULICA
**Studio di geomorfologia fluviale -
Relazione**

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IQ01	01	R 09 RG	ID 0002 001	A	12 di 63

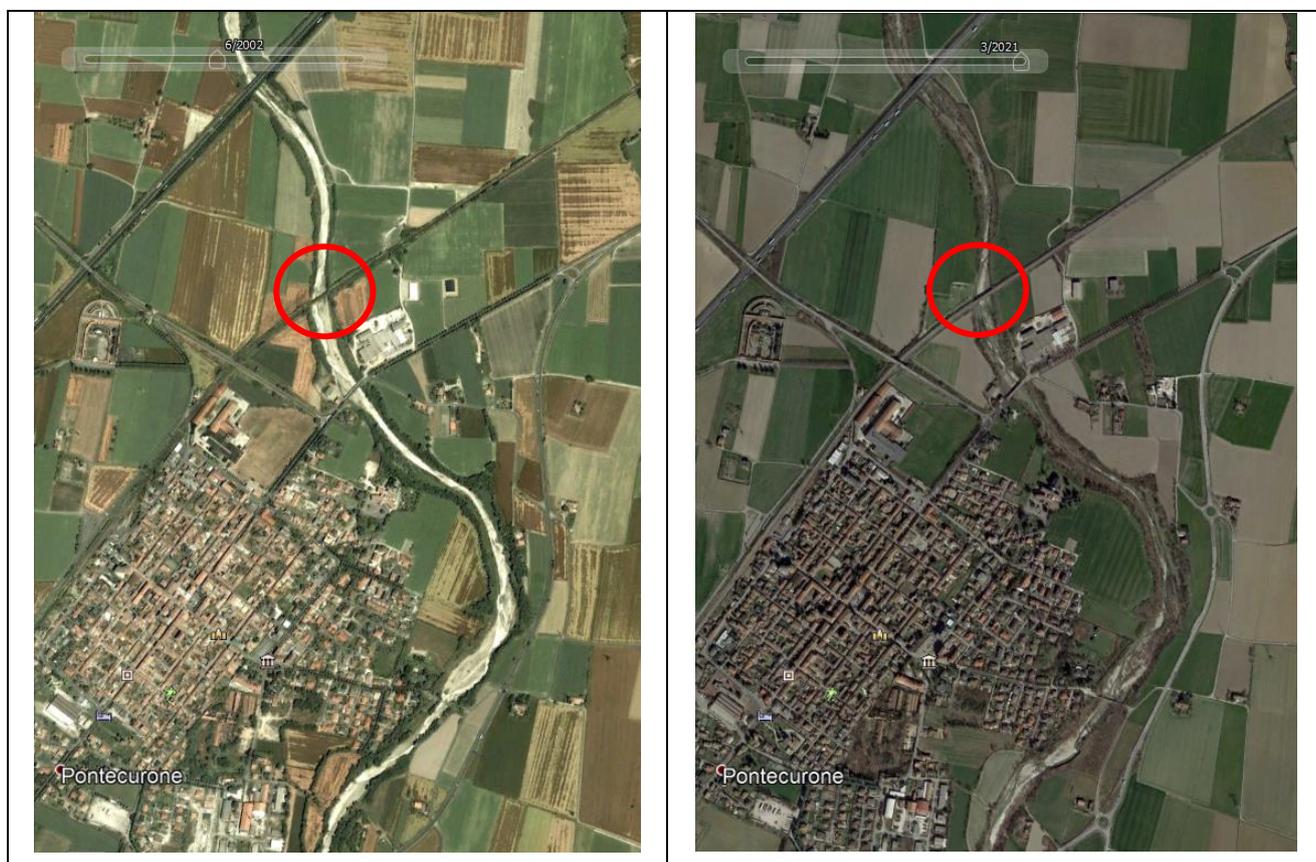


Figura 3: Torrente Curone – vista da satellite: a sinistra 06/2002; a destra 03/2021

Il Torrente Grue ha un bacino di 101 km², dopo lo sbocco in pianura a Viguzzolo percorre il confine orientale del territorio di Tortona e sbocca nello Scrivia poco a meridione del concentrico di Castelnuovo Scrivia.

I principali parametri morfologici sono i seguenti:

- Area del bacino: 213 km²
- Quota massima: 787 m s.l.m.
- Quota minima: 81 m s.l.m.
- Quota media: 265 m s.l.m.
- Pendenza media versanti: 14.4%
- Lunghezza asta 33 km

Nel tratto di interesse presenta una maggiore sinuosità rispetto al Curone e caratteristiche meandriformi, mantenendo una stabilità dell'alveo nel tratto a cavallo dell'attraversamento

	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA					
IDROLOGIA E IDRAULICA Studio di geomorfologia fluviale - Relazione	COMMESSA IQ01	LOTTO 01	CODIFICA R 09 RG	DOCUMENTO ID 0002 001	REV. A	FOGLIO 13 di 63

ferroviario. Le opere di attraversamento che incidono sull'artificialità del tratto sono il ponte della SPexSS10, e quello della ferrovia.



Figura 4: Torrente Grue – vista da satellite: a sinistra 06/2002; a destra 03/2021

Per quanto riguarda Limbione e Calvenza, trattandosi di scoli minori con funzione idrologica di drenaggio di bacini a carattere localizzato, non presentano particolari caratteristiche geomorfologiche o tendenze evolutive significative.

2.1.1 Metodologia per l'individuazione dei punti di prelievo del materiale d'alveo

L'individuazione del punto di prelievo del materiale d'alveo rappresenta un'attività di fondamentale importanza per la caratterizzazione dei fenomeni di geomorfologia fluviale che si intende studiare, in quanto la granulometria dei sedimenti presenti nell'alveo e sulle sponde può essere talmente varia e articolata da dover richiedere, per una rappresentazione completa, più punti di prelievo lungo una

	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA					
IDROLOGIA E IDRAULICA Studio di geomorfologia fluviale - Relazione	COMMESSA IQ01	LOTTO 01	CODIFICA R 09 RG	DOCUMENTO ID 0002 001	REV. A	FOGLIO 14 di 63

stessa sezione. Ovviamente le caratteristiche granulometriche cambiano anche lungo lo sviluppo longitudinale del corso d'acqua, per cui devono opportunamente essere scelte le sezioni di indagine, al fine di rappresentare la variabilità longitudinale del materiale d'alveo, che è la caratteristica maggiormente rappresentativa dei fenomeni che si vogliono studiare in questa sede e che viene anche preliminarmente verificata durante i sopralluoghi tecnici propedeutici all'individuazione dei punti di prelievo. La seguente figura rappresenta la distribuzione teorica della granulometria dei sedimenti in una forma di deposito (barra longitudinale).

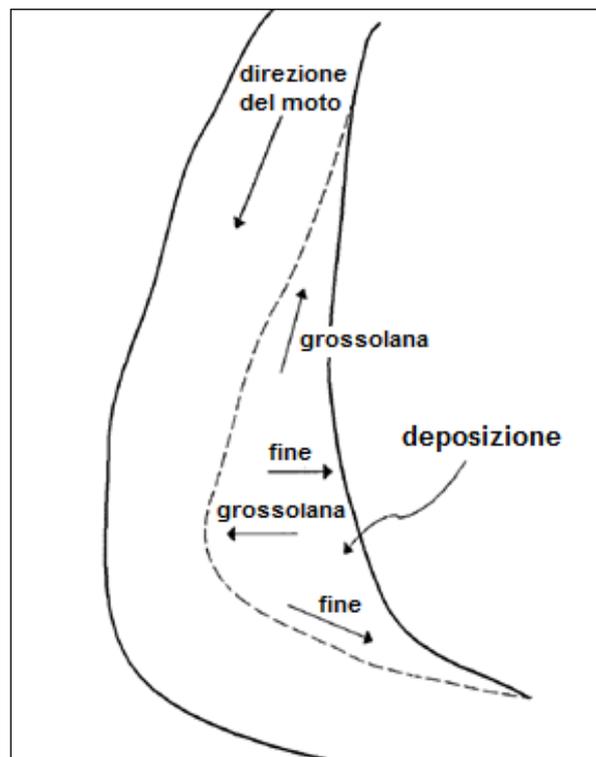


Figura 5: distribuzione teorica della granulometria dei sedimenti in una forma di deposito

I fenomeni di trasporto solido presi in considerazione vengono indagati, tra l'altro, con una schematizzazione di calcolo idraulico, descritta nel successivo capitolo nella quale le sezioni vengono considerate omogenee dal punto di vista granulometrico (nessuna variabilità trasversale della granulometria), di conseguenza, poiché il campione di materiale d'alveo deve essere

	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA					
IDROLOGIA E IDRAULICA Studio di geomorfologia fluviale - Relazione	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
	IQ01	01	R 09 RG	ID 0002 001	A	15 di 63

rappresentativo di ciò che può essere movimentato anche dalle basse portate, si possono individuare le seguenti condizioni per la scelta del punto di prelievo:

- Esame visivo della sezione:
 - Sedimenti deposti a valle di ostacoli naturali in alveo (es.: grandi massi o vegetazione, oppure strutture);
 - Deposito rappresentativo della variabilità trasversale della sezione;
 - Deposito rappresentativo di ciò che si può movimentare con le piene ordinarie;
 - Punto prossimo all'alveo bagnato, ma situato all'asciutto;
- Modalità di prelievo:
 - Traguardare il punto con un oggetto riconoscibile (es. picchetto bianco/rosso o simile);
 - Ripresa fotografica del punto di prelievo:
 - Foto dall'alto;
 - Foto del transetto;
 - Foto del punto guardando verso valle;
 - Scartare eventuali ciottoli di dimensioni maggiori di 10 cm:
 - Foto dall'alto;
 - Prelevare con pala a mano almeno 2 kg di materiale da collocare in sacchetto da campionamento;
 - Classificare il campione in base al codice dell'individuazione del transetto.

2.1.2 Caratteristiche granulometriche dei corsi d'acqua in esame

I campioni prelevati secondo la metodologia descritta nel precedente paragrafo 2.1.1 sono stati analizzati in laboratorio per la determinazione delle curve granulometriche, riportate in dettaglio in allegato al presente documento e sintetizzate nella seguente Tabella, in cui è riportata la classificazione granulometrica secondo la scala Udden-Wentworth per ogni punto di prelievo.

IDROLOGIA E IDRAULICA
Studio di geomorfologia fluviale -
Relazione

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IQ01	01	R 09 RG	ID 0002 001	A	16 di 63



Figura 6: posizione dei punti di prelievo del materiale d'alveo

Tabella 1: Caratteristiche granulometriche dei corsi d'acqua in esame (% passante)

Diametro (mm)	Grue		Calvenza		Curone				Limbione	
	PR 1	PR 2	PR 3	PR 4	PR 5	PR 6	PR 7	PR 8	PR 9	PR 10
0.004	0.0	3.4	2.9	31.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.008	0.0	8.5	8.6	42.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA					
	IDROLOGIA E IDRAULICA Studio di geomorfologia fluviale - Relazione	COMMESSA IQ01	LOTTO 01	CODIFICA R 09 RG	DOCUMENTO ID 0002 001	REV. A

Diametro (mm)	Grue		Calvenza		Curone				Limbione	
	PR 1	PR 2	PR 3	PR 4	PR 5	PR 6	PR 7	PR 8	PR 9	PR 10
0.016	0.0	16.8	17.0	49.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.032	0.0	28.4	22.8	53.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0625	3.6	42.1	26.1	56.9	4.1	5.4	2.8	5.4	2.2	10.1
0.125	4.0	48.1	26.5	58.8	5.1	7.4	3.4	6.4	2.4	10.7
0.25	5.2	57.8	27.1	63.3	8.2	14.1	5.4	9.8	3.1	12.0
0.5	8.7	77.1	28.1	67.9	13.7	23.4	8.8	13.9	5.8	16.0
1	14.1	86.7	29.9	72.2	17.0	29.0	11.2	16.1	10.3	23.2
2	19.1	88.3	32.4	76.1	18.5	32.7	12.7	17.9	14.1	29.5
4	24.3	90.1	35.0	80.2	20.6	36.9	15.3	20.1	18.7	36.6
8	31.8	93.2	38.0	85.6	24.4	43.8	21.4	24.8	29.7	51.2
16	41.9	100.0	40.6	92.3	35.3	56.4	35.0	38.3	53.0	73.6
32	56.7	0.0	50.3	95.7	63.1	81.1	69.0	54.5	80.2	92.2
64	78.6	0.0	85.4	100.0	93.5	100.0	100.0	86.1	97.5	100.0
128	100.0	0.0	100.0	0.0	100.0	0.0	0.0	100.0	100.0	0.0

2.2 INDICE DI DINAMICA MORFOLOGICA (IDM)

2.2.1 Metodo IDRAIM

Il “Sistema di valutazione **idromorfologica**, **analisi** e **monitoraggio** dei corsi d’acqua”, denominato IDRAIM, costituisce un quadro metodologico complessivo di analisi, valutazione post-monitoraggio e di definizione delle misure di mitigazione degli impatti ai fini della pianificazione integrata prevista dalle Direttive 2000/60/CE (Acque) e 2007/60/CE (Alluvioni).

La metodologia IDRAIM prende in considerazione i processi legati alle variazioni del fondo alveo, alla mobilità laterale, alla presenza di opere e a tutte quelle componenti che vanno a determinare la dinamica morfologica di un fiume. Tali valutazioni, opportunamente integrate con le metodologie tradizionalmente impiegate per le analisi idrauliche, forniscono un quadro completo e dettagliato degli elementi che caratterizzano un corso d’acqua.

	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA					
IDROLOGIA E IDRAULICA Studio di geomorfologia fluviale - Relazione	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
	IQ01	01	R 09 RG	ID 0002 001	A	18 di 63

Il metodo IDRAIM tenendo conto in maniera integrata di obiettivi di qualità ambientale e di mitigazione dei rischi legati ai processi di dinamica fluviale, si pone quindi come sistema a supporto della gestione dei corsi d'acqua e dei processi geomorfologici.

La struttura complessiva del metodo IDRAIM si articola in 4 fasi che possono essere riassunte come riportato in Figura 7. Si sottolinea che si tratta di uno strumento metodologico flessibile a seconda delle finalità per le quali viene impiegato, in cui ogni componente può essere affrontata per livelli di approfondimento crescenti, tenendo conto degli obiettivi e delle esigenze specifiche.

I metodi utilizzati per la valutazione della qualità e della **dinamica morfologica** presentano un'analoga e coerente impostazione. Essi possono essere utilizzati insieme o anche separatamente, secondo l'esigenza di analizzare entrambi gli aspetti o uno solo di essi. Infine, i due aspetti di qualità morfologica e pericolosità da dinamica morfologica sono tenuti concettualmente separati, ma una delle finalità del metodo è di fare emergere le conflittualità e individuare le possibili azioni per tenere conto dei diversi obiettivi.

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA					
	IDROLOGIA E IDRAULICA Studio di geomorfologia fluviale - Relazione	COMMESSA IQ01	LOTTO 01	CODIFICA R 09 RG	DOCUMENTO ID 0002 001	REV. A

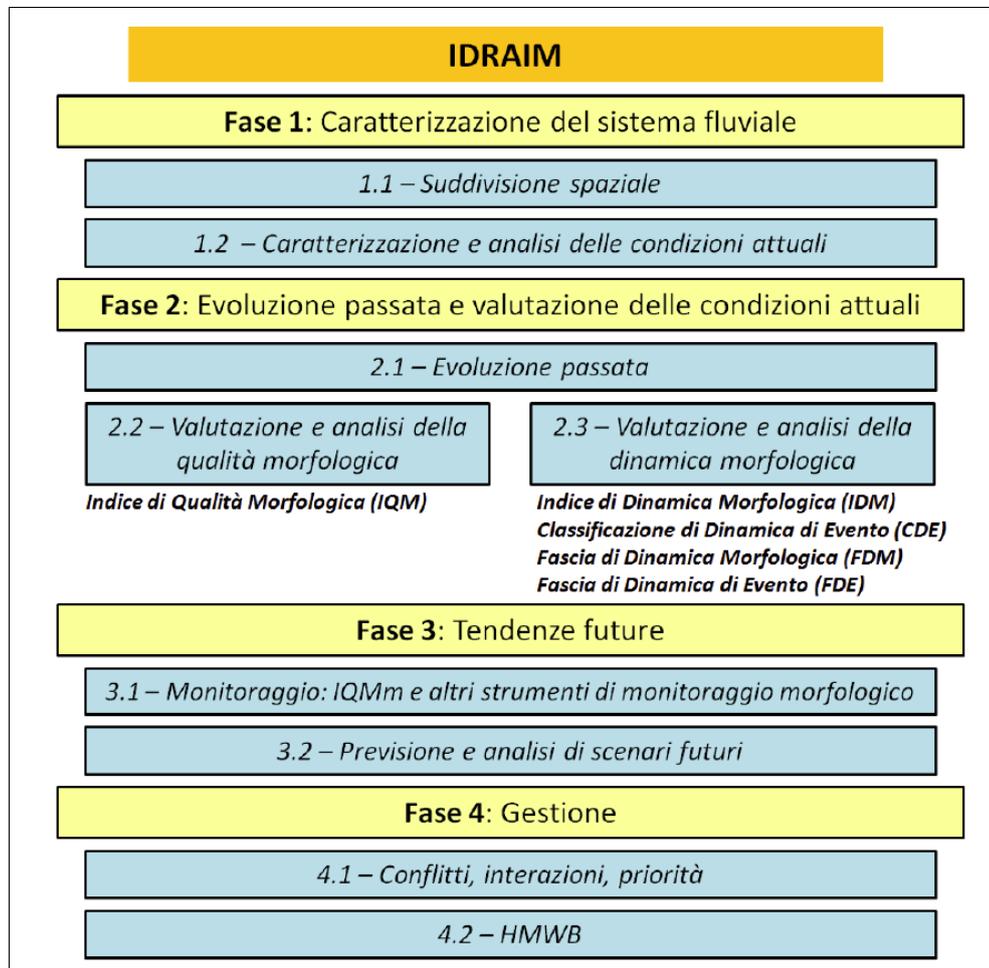


Figura 7: Schema generale della struttura del metodo IDRAIM.

Nell'ambito del presente studio è stata applicata, in via preliminare, la procedura per la valutazione dell'Indice di Dinamica Morfologica (IDM) basata sulle seguenti componenti:

- 1) **Morfologia e processi:** riguarda le caratteristiche dell'alveo, del fondo, delle sponde, i processi e le tendenze attuali (localizzate e distribuite) manifestate ad una scala temporale degli ultimi 10 – 15 anni.
- 2) **Artificialità:** considera nel dettaglio le opere che maggiormente condizionano i processi di dinamica morfologica.

	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA					
	IDROLOGIA E IDRAULICA Studio di geomorfologia fluviale - Relazione	COMMESSA IQ01	LOTTO 01	CODIFICA R 09 RG	DOCUMENTO ID 0002 001	REV. A

3) Variazioni morfologiche. si basano sull'analisi delle variazioni avvenute negli ultimi decenni, le quali condizionano la propensione o meno ai vari tipi di pericolosità.

La valutazione complessiva viene effettuata attraverso l'ausilio di apposite schede di valutazione, per mezzo delle quali si effettua un'analisi attraverso l'impiego integrato di immagini telerilevate e rilevamenti sul terreno. Le schede si basano sull'utilizzo di una serie di indicatori, per ognuno dei quali sono fornite una serie di possibili risposte (in numero variabile). Gli indicatori sono basati su una o più variabili quantitative o qualitative: in genere si tratta della percentuale rispetto alla lunghezza totale del tratto lungo la quale si osservano determinate caratteristiche o processi.

Ogni componente viene valutata attraverso una serie di indicatori, che sono:

Indicatori di morfologia e processi. Essi partono da aspetti di carattere generale (tipologia d'alveo, materiale che costituisce le sponde ed il fondo); successivamente si prendono in esame i processi di arretramento delle sponde; infine si vanno ad esaminare le tendenze (alla scala degli ultimi 10 – 15 anni) di tipo distribuito della larghezza e del fondo. Alcuni indicatori di morfologia e processi includono l'esame degli elementi di artificialità, considerati ad esempio tra i tipi di materiale costituenti il fondo e le sponde.

Indicatori di artificialità. Essi prendono in esame in maniera più specifica gli elementi artificiali, analizzandoli dal punto di vista dei loro potenziali effetti sui processi (es. difese di sponda come impedimento dei processi di arretramento delle sponde). Si precisa che il metodo non prevede una valutazione puntuale sullo stato delle opere: quando esse sono presenti all'interno o nelle immediate vicinanze dell'alveo attuale, in assenza di informazioni a riguardo, esse vengono assunte come interferenti con la dinamica morfologica. Esse vengono invece escluse qualora si accerti che non esplicano più la loro funzione di protezione delle sponde o del fondo.

Indicatori di variazioni morfologiche. Le variazioni morfologiche durante gli ultimi decenni sono valutate come indicatori di instabilità, pertanto di dinamica morfologica. Tale instabilità infatti può ancora manifestarsi, con la possibilità che, durante eventi di piena di una certa intensità, possano verificarsi delle modifiche morfologiche verso precedenti

	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA					
	IDROLOGIA E IDRAULICA Studio di geomorfologia fluviale - Relazione	COMMESSA IQ01	LOTTO 01	CODIFICA R 09 RG	DOCUMENTO ID 0002 001	REV. A

configurazioni (ad es., rimodellamento di superfici abbandonate per restringimento dell'alveo). **Nel caso specifico, trattandosi di una applicazione semplificata del metodo, la valutazione degli indicatori di tale componente si è basata su quanto osservato in campo e tramite immagini satellitari disponibili, non sulla base di una analisi storica di dettaglio.**

Ogni indicatore viene attribuito, a seconda dei suoi effetti prevalenti, ad una delle due componenti che costituiscono la dinamica morfologica: (1) dinamica verticale; (2) dinamica laterale. La dinamica verticale riguarda tutti gli aspetti connessi con la dinamica morfologica del fondo (erodibilità del fondo, processi di fondo localizzati, tendenze altimetriche, opere di rivestimento o consolidamento, ecc.). La dinamica laterale è invece relativa a tutti gli aspetti connessi con l'arretramento delle sponde e le variazioni di larghezza (erodibilità delle sponde, tendenze di larghezza, difese di sponda, ecc.).

2.2.2 Applicazione ai casi di studio

Come riportato al paragrafo precedente, la valutazione dell'Indice di Dinamica Morfologica si basa sulla valutazione della morfologia e processi in alveo e nelle sponde, dell'artificialità e delle variazioni morfologiche; ognuna di queste componenti viene valutata attraverso indicatori riportati in Tabella 2.

Il metodo è stato applicato, in via preliminare e semplificata, ai corsi d'acqua interessati dalla realizzazione delle opere di attraversamento della tratta ferroviaria in progetto.

Si precisa che nei casi di studio trattati in questo ambito, trattandosi di una applicazione semplificata del metodo, la valutazione degli indicatori della componente "variazioni morfologiche" si è basata su quanto osservato in campo e tramite immagini satellitari disponibili e non sulla base di una analisi storica di dettaglio.

	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA					
	IDROLOGIA E IDRAULICA Studio di geomorfologia fluviale - Relazione	COMMESSA IQ01	LOTTO 01	CODIFICA R 09 RG	DOCUMENTO ID 0002 001	REV. A

Tabella 2: Lista degli indicatori per la valutazione dell'IDM

SIGLA	INDICATORE
<i>Morfologia e Processi</i>	
<i>M1</i>	Tipologia d'alveo
<i>M2</i>	Erodibilità delle sponde
<i>M3</i>	Erodibilità del fondo
<i>M4</i>	Processi di arretramento delle sponde
<i>M5</i>	Tendenze di larghezza
<i>M6</i>	Tendenze altimetriche
<i>Artificialità</i>	
<i>A1</i>	Difese di sponda
<i>A2</i>	Opere di rivestimento o consolidamento del fondo
<i>Variazioni morfologiche</i>	
<i>V1</i>	Variazione della configurazione morfologica
<i>V2</i>	Variazioni di larghezza
<i>V3</i>	Variazioni altimetriche

Il risultato dell'applicazione viene riportato nella tabella che segue, precisando che l'applicazione effettuata costituisce un primo tentativo di determinare tale indice e non vuole sostituire alcuna altra applicazione ufficiale svolta in Regione Piemonte dagli Enti preposti (ARPA).

Tabella 3: Indice e Classe di Dinamica Morfologica dei corsi d'acqua oggetto di studio. L'applicazione effettuata costituisce un primo tentativo di determinare tale indice e non vuole sostituire alcuna altra applicazione ufficiale svolta in Regione Piemonte dagli Enti preposti.

Corso d'acqua	Lunghezza tratto [m]	Indice di dinamica Morfologica	Classe di Dinamica Morfologica				
			Molto Bassa	Bassa	Media	Elevata	Molto elevata
Grue	9150	0.27					
Calvenza	3475	0.41					
Curone	8370	0.46					
Limbione	4380	0.41					

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA					
	IDROLOGIA E IDRAULICA Studio di geomorfologia fluviale - Relazione	COMMESSA IQ01	LOTTO 01	CODIFICA R 09 RG	DOCUMENTO ID 0002 001	REV. A

Vengono riportate di seguito anche le tabelle di sintesi di applicazione del metodo IDRAIM ai corsi d'acqua in esame.

IDRAIM
 sistema di valutazione **IDR**omorfologica, **Analisi** e **Monitoraggio** dei Corsi d'Acqua
Versione IDM 1.0 - Aprile 2016

INDICI E CLASSI DI DINAMICA MORFOLOGICA del tratto FS			
INDICI DI DINAMICA MORFOLOGICA			
IDM	IDM _{min}	IDM _{max}	NOTE
<u>0.27</u>	0.27	0.27	0/11 IND. N.A.
CLASSI DI DINAMICA MORFOLOGICA			
CLASSE _{med}	CLASSE _{min}	CLASSE _{max}	NOTE
<u>Bassa</u>	<u>Bassa</u>	<u>Bassa</u>	0/11 IND. N.A.

IDM	CLASSE DI DINAMICA MORFOLOGICA
$0.0 \leq IDM < 0.2$	Molto bassa
$0.2 \leq IDM < 0.4$	Bassa
$0.4 \leq IDM < 0.6$	Media
$0.6 \leq IDM < 0.8$	Elevata
$0.8 \leq IDM \leq 1.0$	Molto elevata

N.A. = non applicato

SUB-INDICI

NOME	SIGLA	medio	minimo	massimo
Morfologia e Processi	IDM _M	0.11	0.11	0.11
Artificialità	IDM _A	0.16	0.16	0.16
Variazioni	IDM _V	0.00	0.00	0.00
Dinamica Laterale	SDL	0.11	0.11	0.11
Dinamica Verticale	SDV	0.16	0.16	0.16
Esondazione Indotta	SEI	0.00	0.00	0.00

SINTESI indicatori					
MORFOLOGIA E PROCESSI			ARTIFICIALITÀ		
M1	Tipologia d'alveo	3	A1	Difese di sponda	8
M2	Erodibilità delle sponde	0	A2	Opere di rivestimento o consolidamento del fondo	8
M3	Erodibilità del fondo	8			
M4	Processi di arretramento delle sponde	0	VARIAZIONI MORFOLOGICHE		
M5	Tendenze di larghezza	0	V1	Variazioni della configurazione morfologica	0
M6	Tendenze altimetriche	0	V2	Variazioni di larghezza	0
			V3	Variazioni altimetriche	0
M5e	Tendenze di larghezza - Esond	0			
M6e	Tendenze altimetriche - Esond	0			

Figura 8: Schema di sintesi IDRAIM – Torrente Grue

 GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA					
	IDROLOGIA E IDRAULICA Studio di geomorfologia fluviale - Relazione	COMMESSA IQ01	LOTTO 01	CODIFICA R 09 RG	DOCUMENTO ID 0002 001	REV. A

IDRAIM
 sistema di valutazione **IDR**omorfologica, **Analisi** e **Monitoraggio** dei Corsi d'Acqua
 Versione **IDM 1.0 - Aprile 2016**

INDICI E CLASSI DI DINAMICA MORFOLOGICA del tratto FS			
INDICI DI DINAMICA MORFOLOGICA			
IDM	IDM _{min}	IDM _{max}	NOTE
<u>0.41</u>	0.41	0.41	0/11 IND. N.A.
CLASSI DI DINAMICA MORFOLOGICA			
CLASSE _{med}	CLASSE _{min}	CLASSE _{max}	NOTE
<u>Media</u>	<u>Media</u>	<u>Media</u>	0/11 IND. N.A.

IDM	CLASSE DI DINAMICA MORFOLOGICA
$0.0 \leq IDM < 0.2$	Molto bassa
$0.2 \leq IDM < 0.4$	Bassa
$0.4 \leq IDM < 0.6$	Media
$0.6 \leq IDM < 0.8$	Elevata
$0.8 \leq IDM \leq 1.0$	Molto elevata

N.A. = non applicato

SUB-INDICI

NOME	SIGLA	medio	minimo	massimo
Morfologia e Processi	IDM _M	0.11	0.11	0.11
Artificialità	IDM _A	0.30	0.30	0.30
Variazioni	IDM _V	0.00	0.00	0.00
Dinamica Laterale	SDL	0.18	0.18	0.18
Dinamica Verticale	SDV	0.23	0.23	0.23
Esondazione Indotta	SEI	0.00	0.00	0.00

SINTESI indicatori					
MORFOLOGIA E PROCESSI			ARTIFICIALITÀ		
M1	Tipologia d'alveo	3	A1	Difese di sponda	15
M2	Erodibilità delle sponde	0	A2	Opere di rivestimento o consolidamento del fondo	15
M3	Erodibilità del fondo	8			
M4	Processi di arretramento delle sponde	0	VARIAZIONI MORFOLOGICHE		
M5	Tendenze di larghezza	0	V1	Variazioni della configurazione morfologica	0
M6	Tendenze altimetriche	0	V2	Variazioni di larghezza	0
			V3	Variazioni altimetriche	0
M5e	Tendenze di larghezza - Esond	0			
M6e	Tendenze altimetriche - Esond	0			

Figura 9: Schema di sintesi IDRAIM – Torrente Calvenza

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA					
	IDROLOGIA E IDRAULICA Studio di geomorfologia fluviale - Relazione	COMMESSA IQ01	LOTTO 01	CODIFICA R 09 RG	DOCUMENTO ID 0002 001	REV. A

IDRAIM
 sistema di valutazione **IDR** morfologica, **Analisi** e **Monitoraggio** dei Corsi d'Acqua
 Versione **IDM 1.0 - Aprile 2016**

INDICI E CLASSI DI DINAMICA MORFOLOGICA del tratto			
INDICI DI DINAMICA MORFOLOGICA			
IDM	IDM _{min}	IDM _{max}	NOTE
<u>0.46</u>	<u>0.46</u>	<u>0.46</u>	0/11 IND. N.A.
CLASSI DI DINAMICA MORFOLOGICA			
CLASSE _{med}	CLASSE _{min}	CLASSE _{max}	NOTE
<u>Media</u>	<u>Media</u>	<u>Media</u>	0/11 IND. N.A.

IDM	CLASSE DI DINAMICA MORFOLOGICA
$0.0 \leq IDM < 0.2$	Molto bassa
$0.2 \leq IDM < 0.4$	Bassa
$0.4 \leq IDM < 0.6$	Media
$0.6 \leq IDM < 0.8$	Elevata
$0.8 \leq IDM \leq 1.0$	Molto elevata

N.A. = non applicato

SUB-INDICI

NOME	SIGLA	medio	minimo	massimo
Morfologia e Processi	IDM _M	0.16	0.16	0.16
Artificialità	IDM _A	0.30	0.30	0.30
Variazioni	IDM _V	0.00	0.00	0.00
Dinamica Laterale	SDL	0.23	0.23	0.23
Dinamica Verticale	SDV	0.23	0.23	0.23
Esondazione Indotta	SEI	0.00	0.00	0.00

SINTESI indicatori					
MORFOLOGIA E PROCESSI			ARTIFICIALITÀ		
M1	Tipologia d'alveo	6	A1	Difese di sponda	15
M2	Erodibilità delle sponde	2	A2	Opere di rivestimento o consolidamento del fondo	15
M3	Erodibilità del fondo	8			
M4	Processi di arretramento delle sponde	0	VARIAZIONI MORFOLOGICHE		
M5	Tendenze di larghezza	0	V1	Variazioni della configurazione morfologica	0
M6	Tendenze altimetriche	0	V2	Variazioni di larghezza	0
			V3	Variazioni altimetriche	0
M5e	Tendenze di larghezza - Esond	0			
M6e	Tendenze altimetriche - Esond	0			

Figura 10: Schema di sintesi IDRAIM – Torrente Curone

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA					
	IDROLOGIA E IDRAULICA Studio di geomorfologia fluviale - Relazione	COMMESSA IQ01	LOTTO 01	CODIFICA R 09 RG	DOCUMENTO ID 0002 001	REV. A

IDRAIM

sistema di valutazione IDR morfologica, Analisi e Monitoraggio dei Corsi d'Acqua
 Versione IDM 1.0 - Aprile 2016

INDICI E CLASSI DI DINAMICA MORFOLOGICA del tratto			
INDICI DI DINAMICA MORFOLOGICA			
IDM	IDM _{min}	IDM _{max}	NOTE
0.41	0.41	0.41	0/11 IND. N.A.
CLASSI DI DINAMICA MORFOLOGICA			
CLASSE _{med}	CLASSE _{min}	CLASSE _{max}	NOTE
Media	Media	Media	0/11 IND. N.A.

IDM	CLASSE DI DINAMICA MORFOLOGICA
$0.0 \leq IDM < 0.2$	Molto bassa
$0.2 \leq IDM < 0.4$	Bassa
$0.4 \leq IDM < 0.6$	Media
$0.6 \leq IDM < 0.8$	Elevata
$0.8 \leq IDM \leq 1.0$	Molto elevata

N.A. = non applicato

SUB-INDICI

NOME	SIGLA	medio	minimo	massimo
Morfologia e Processi	IDM _M	0.11	0.11	0.11
Artificialità	IDM _A	0.30	0.30	0.30
Variazioni	IDM _V	0.00	0.00	0.00
Dinamica Laterale	SDL	0.18	0.18	0.18
Dinamica Verticale	SDV	0.23	0.23	0.23
Esondazione Indotta	SEI	0.00	0.00	0.00

SINTESI indicatori					
MORFOLOGIA E PROCESSI			ARTIFICIALITÀ		
M1	Tipologia d'alveo	3	A1	Difese di sponda	15
M2	Erodibilità delle sponde	0	A2	Opere di rivestimento o consolidamento del fondo	15
M3	Erodibilità del fondo	8			
M4	Processi di arretramento delle sponde	0	VARIAZIONI MORFOLOGICHE		
M5	Tendenze di larghezza	0	V1	Variazioni della configurazione morfologica	0
M6	Tendenze altimetriche	0	V2	Variazioni di larghezza	0
			V3	Variazioni altimetriche	0
M5e	Tendenze di larghezza - Esond	0			
M6e	Tendenze altimetriche - Esond	0			

Figura 11: Schema di sintesi IDRAIM – Torrente Limbione

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA					
	IDROLOGIA E IDRAULICA Studio di geomorfologia fluviale - Relazione	COMMESSA IQ01	LOTTO 01	CODIFICA R 09 RG	DOCUMENTO ID 0002 001	REV. A

3 VALUTAZIONE DEL TRASPORTO SOLIDO

3.1 MODELLI MATEMATICI PER IL TRASPORTO SOLIDO

3.1.1 La teoria di Shields per il moto incipiente

La prima interpretazione del fenomeno di inizio del trasporto al fondo, comunemente noto come *moto incipiente* o condizione critica per il fondo, si deve a Shields (1936), che individuò la relazione tra il valore della tensione al contorno τ_0 che pone in movimento il materiale di fondo di densità ρ_s e diametro d_s e le proprietà del fluido, μ e ρ . Nella formulazione più semplice tale relazione si deduce come segue.

In alveo rettangolare molto largo il raggio idraulico si confonde con la profondità h e la tensione al fondo τ_0 si può esprimere come

$$\tau_0 = \rho g h j \quad 3.1$$

Con riferimento alla **3.1**, in condizioni critiche la resistenza al moto, R , dei granuli di diametro d_s e peso specifico γ_s uguaglia la forza di trascinamento al fondo all'inizio del trasporto, A .

$$R \propto (\gamma_s - \gamma) d_s^3 \quad 3.2$$

$$A \propto C_R \tau_{cr} d_s^2 \quad 3.3$$

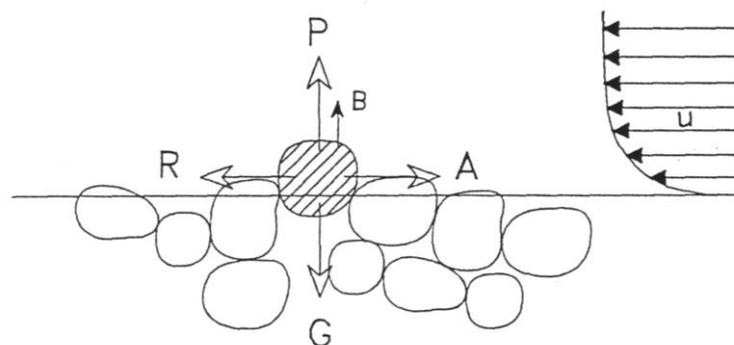


Figura 12: Schema delle forze agenti su una particella solida al fondo di un corso d'acqua

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA					
	IDROLOGIA E IDRAULICA Studio di geomorfologia fluviale - Relazione	COMMESSA IQ01	LOTTO 01	CODIFICA R 09 RG	DOCUMENTO ID 0002 001	REV. A

Il coefficiente C_R è funzione, a parità di forma dei sedimenti, del numero di Reynolds del sedimento, costruito con le grandezze caratteristiche del moto attorno al granulo:

- la velocità di attrito $u_* = \sqrt{\tau_0 / \rho}$
- il diametro del granulo d_s
- la viscosità cinematica del fluido $\nu = \mu / \rho$

ossia dal numero

$$Re_* = \frac{u_* d_s}{\nu} \quad 3.4$$

Si ha in definitiva

$$\frac{\tau_{cr}}{(\gamma_s - \gamma)d_s} = f\left(\frac{u_* d_s}{\nu}\right) \quad 3.5$$

Il primo membro della (3.5), indicato spesso anche come θ_{cr} , prende il nome di *parametro di stabilità* o di *mobilità di Shields*

$$\theta_{cr} = \frac{u_*^2}{g \frac{\rho_s - \rho}{\rho} d} = \frac{u_*^2}{g \Delta d} = \frac{\tau_{cr}}{g(\rho_s - \rho)d} \quad 3.6$$

Avendo indicato con $\Delta = \frac{\rho_s - \rho}{\rho}$ la densità relativa del grano immerso.

La dipendenza funzionale da Re_* di θ_{cr} è rappresentata dalla *curva di Shields*.

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA					
	IDROLOGIA E IDRAULICA Studio di geomorfologia fluviale - Relazione	COMMESSA IQ01	LOTTO 01	CODIFICA R 09 RG	DOCUMENTO ID 0002 001	REV. A

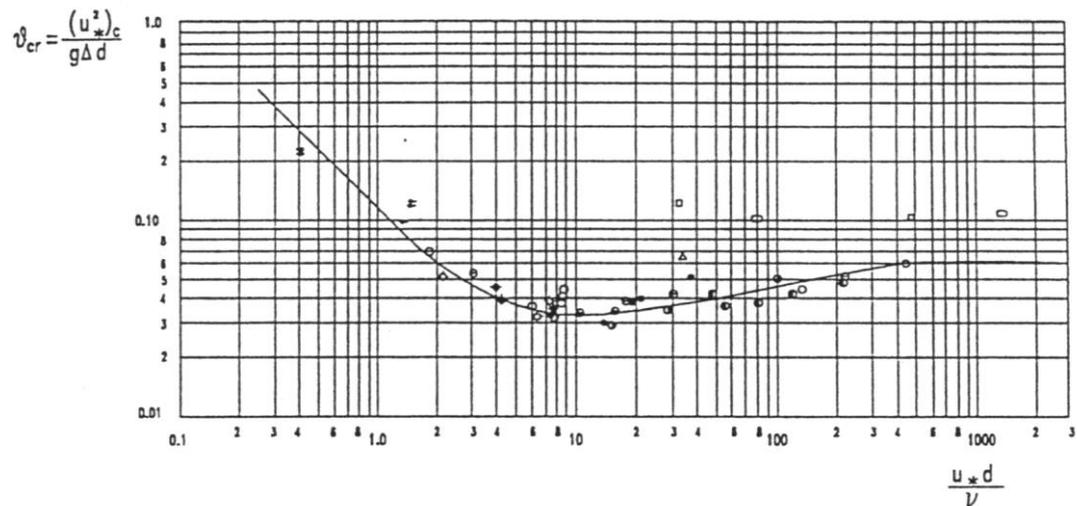


Figura 13: Diagramma di Shields

Questa curva separa la zona di mobilità delle particelle da quelle di immobilità: per i punti che giacciono sotto la curva, il moto dell'acqua non è in grado di provocare il moto delle particelle ($\theta \leq \theta_{cr}$), i punti che giacciono al di sopra della curva rappresentano invece condizioni di movimento dei sedimenti.

La curva che rappresenta il movimento incipiente delle particelle ($\theta = \theta_{cr}$) può essere divisa in tre parti:

- una prima parte che nel diagramma bilogarithmico ($Re_* \leq 2$) è rappresentata da un segmento di retta;
- una seconda parte ($2 \leq Re_* \leq 200$) ad andamento curvilineo con un valore di minimo relativo;
- una terza zona ($Re_* \geq 200$) nuovamente ad andamento rettilineo.

Il primo tratto è descritto da un'equazione del tipo:

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA					
	IDROLOGIA E IDRAULICA Studio di geomorfologia fluviale - Relazione	COMMESSA IQ01	LOTTO 01	CODIFICA R 09 RG	DOCUMENTO ID 0002 001	REV. A

$$\frac{(u_*)_{cr}^2}{g \Delta d} \propto \left[\frac{(u_*)_{cr} d}{\nu} \right]^{-1} = \frac{\nu}{(u_*)_{cr} d} \quad 3.7$$

cioè:

$$(u_*)_{cr}^3 \propto g \Delta \nu \quad 3.8$$

Da questa equazione si vede che, nel primo tratto, la velocità critica delle particelle è indipendente dal diametro delle particelle stesse, mentre dipende dalla viscosità del fluido.

Nel tratto intermedio la condizione di mobilità dipende sia dalla dimensione del grano sia dalla viscosità del fluido. In questo tratto inoltre la curva presenta il suo valore minimo $(\theta_{cr})_{\min} \approx 0.03 \div 0.04$ per $\frac{u_* d}{\nu} \approx 8 \div 10$.

Nel terzo tratto, il parametro di mobilità assume valori pressoché costanti:

$$\theta_{cr} = \frac{(u_*)_{cr}^2}{g \Delta d} \approx 0.047 \quad 3.9$$

con 0.047 valore proposto da Zeller. In questo caso le condizioni di mobilità del grano sono indipendenti dalla viscosità del fluido; il regime è simile a quello del moto turbolento in corrispondenza di una parete idraulicamente scabra.

3.1.2 L'equazione di Exner

L'equazione di bilancio di massa dei sedimenti si ottiene considerando come volume di controllo un tronco infinitesimo di corrente dx largo B ed imponendo che la variazione nel tempo della sua massa di materiale solido sia pari alla differenza tra la portata solida entrante e quella uscente.

Applicando il bilancio della massa dei sedimenti si ottiene:

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA					
	IDROLOGIA E IDRAULICA Studio di geomorfologia fluviale - Relazione	COMMESSA IQ01	LOTTO 01	CODIFICA R 09 RG	DOCUMENTO ID 0002 001	REV. A

$$\frac{\partial Q_s}{\partial x} + \frac{\partial C \sigma}{\partial t} = -(1-p) \frac{\partial z_f}{\partial t} B \quad 3.10$$

dove p (compreso tra 0 ed 1) è la porosità del materiale d'alveo, cioè la frazione del volume dei sedimenti riempita dall'acqua; $C = \frac{\int_A c d\sigma}{\sigma}$ è la concentrazione di volume mediata sulla sezione trasversale σ (c è la concentrazione locale); $Q_s = \int_A u c d\sigma$ è la portata solida; z_f è la quota del fondo rispetto ad un piano di riferimento.

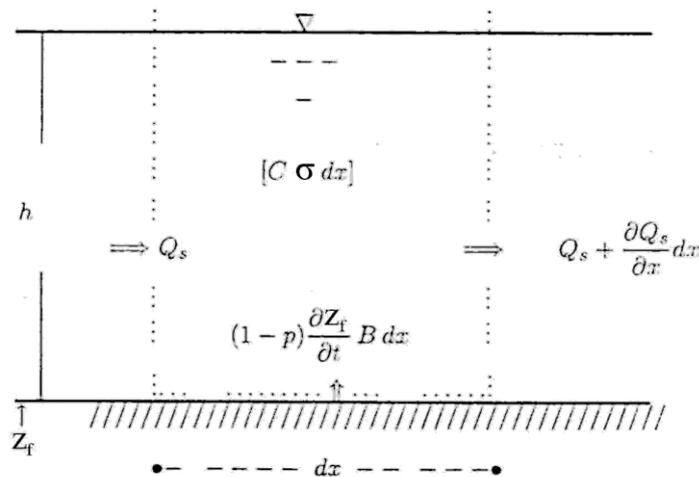


Figura 14: Bilancio di massa dei sedimenti nel volume di controllo

Introducendo il *coefficiente di ragguaglio delle concentrazioni* $\left(\alpha_c = \frac{\sigma \int_{\sigma} c u d\sigma}{\int_{\sigma} u d\sigma \int_{\sigma} c d\sigma} \right)$, la

portata solida può essere espressa in funzione della concentrazione dei sedimenti:

$$Q_s = \alpha_c U \sigma C \quad 3.11$$

Inoltre, il termine $1-p$, relativo alla porosità del materiale, viene spesso inglobato nella portata solida. L'equazione 3.10 diventa:

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA					
	IDROLOGIA E IDRAULICA Studio di geomorfologia fluviale - Relazione	COMMESSA IQ01	LOTTO 01	CODIFICA R 09 RG	DOCUMENTO ID 0002 001	REV. A

$$\frac{\partial Q_s}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{Q_s}{\alpha_c U} \right) = - \frac{\partial z_f}{\partial t} B \quad 3.12$$

Il secondo termine a primo membro solitamente è trascurabile rispetto al primo: questa ipotesi è tanto più vera quanto maggiore è la portata solida di fondo rispetto a quella in sospensione.

$$\frac{\partial Q_s}{\partial x} = - \frac{\partial z_f}{\partial t} B \quad 3.13$$

La 3.13 è nota come *equazione di Exner*. Essa è di facile interpretazione fisica:

quando $\frac{\partial Q_s}{\partial x} > 0$	⇒	la portata solida aumenta		
	⇒	l'alveo è in erosione	⇒	$\frac{\partial z_f}{\partial t} < 0$
quando $\frac{\partial Q_s}{\partial x} < 0$	⇒	la portata solida diminuisce		
	⇒	l'alveo è in deposito	⇒	$\frac{\partial z_f}{\partial t} > 0$

3.1.3 Accoppiamento acqua-sedimenti

In condizioni di moto vario la portata solida Q_s varia nello spazio e nel tempo, quindi nello stesso alveo si possono avere sia zone di sedimentazione sia di erosione.

Utilizzando uno schema monodimensionale, ipotizzando che i grani siano tutti della stessa grandezza e supponendo che le variazioni spaziali delle grandezze considerate siano gradualmente, si può ottenere un modello che descrive l'evoluzione della corrente e del fondo.

Le variabili dipendenti da considerare sono tre:

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA					
	IDROLOGIA E IDRAULICA Studio di geomorfologia fluviale - Relazione	COMMESSA IQ01	LOTTO 01	CODIFICA R 09 RG	DOCUMENTO ID 0002 001	REV. A

- la velocità o la portata;
- il tirante idrico;
- la quota del fondo.

Quindi si ha bisogno di tre equazioni:

- conservazione della massa;
- bilancio della quantità di moto;
- bilancio della portata di materiale solido trasportata sul fondo.

Le equazioni da considerare sono quindi la 3.13 e le equazioni del moto dell'acqua (equazioni di de Saint Venant):

$$\frac{\partial \sigma}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad 3.14$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{\sigma} \right) + g \sigma \frac{\partial}{\partial x} (h + z_f) = -g \sigma j \quad 3.15$$

dove Q è la portata liquida, h il tirante idrico ed j la cadente della linea dell'energia.

Tenendo conto che l'area σ e la larghezza B possono essere espresse in funzione del tirante idrico, il sistema delle tre equazioni contiene ancora le seguenti variabili indipendenti: Q_s, C, Q, h, z_f, j .

Per poter essere risolto, il sistema necessita quindi, oltre che delle condizioni iniziali e al contorno, di altre tre equazioni che sono fornite dall'ipotesi di condizioni di equilibrio locale:

- La cadente della linea dell'energia viene calcolata come se localmente valesse la formula di Chezy per il moto uniforme:

$$j = \frac{U^2}{\chi^2 \mathfrak{R}} \quad 3.16$$

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA					
	IDROLOGIA E IDRAULICA Studio di geomorfologia fluviale - Relazione	COMMESSA IQ01	LOTTO 01	CODIFICA R 09 RG	DOCUMENTO ID 0002 001	REV. A

- La portata solida viene calcolata come se localmente essa fosse pari alla capacità di trasporto e quindi attraverso un'opportuna formula di trasporto solido:

$$Q_s = f_s(U, h, u_*, d, \dots) \quad 3.17$$

- La stessa ipotesi viene fatta per quanto riguarda la concentrazione C del materiale:

$$C = f_s(U, h, u_*, d, \dots) \quad 3.18$$

Nell'ipotesi semplificativa che la sezione sia di forma rettangolare larga, le equazioni (trascurando il secondo termine nell'equazione 3.15) divengono:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial U h}{\partial x} = 0 \quad 3.19$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + g \frac{\partial h}{\partial x} + g \frac{\partial z_f}{\partial x} = -g j \quad 3.20$$

$$\frac{\partial q_s}{\partial x} + \frac{\partial z_f}{\partial t} = 0 \quad 3.21$$

dove $q_s = Q_s/B$ è la portata solida per unità di larghezza.

Questo modello è valido per sedimenti omogenei. Se il sedimento è assortito si può sempre utilizzare la 3.21 ponendo però $q_s = \sum_{i=1}^{N_d} f_i q_i$, dove f_i rappresenta la frazione, di diametro d_i , della quantità totale di portata solida in volume trasportata, e le q_i sono espresse da un'equazione di trasporto solido per materiale uniforme.

3.1.4 Scelta della Formula di Trasporto solido per i casi in esame

Il trasporto solido viene valutato in base alla portata solida, espressa ad esempio in kg/s, in termini di quantità di sedimenti movimentati in funzione della corrispondente portata liquida. Le formule

	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA					
	IDROLOGIA E IDRAULICA Studio di geomorfologia fluviale - Relazione	COMMESSA IQ01	LOTTO 01	CODIFICA R 09 RG	DOCUMENTO ID 0002 001	REV. A

che forniscono il valore di portata solida sono di tipo parametrico e, a partire dalla teoria di Shields sul moto incipiente, mettono in relazione le caratteristiche granulometriche con quelle idrodinamiche. Le varie formule disponibili in letteratura sono state sviluppate a partire da esperienze in laboratorio ed in situ, quindi hanno dei limiti di applicabilità in dipendenza dei risultati ricavati dai vari autori. Il codice di calcolo a fondo mobile utilizzato in questa sede, il cui impiego è descritto nel successivo paragrafo, consente di scegliere tra alcune delle più note formule, che vengono di seguito presentate. I limiti di applicabilità di ciascuna formula sono sintetizzati nella Tabella 4, di conseguenza, noti i diametri caratteristici dei corsi d'acqua oggetto di studio e le relative grandezze idrodinamiche, è possibile scegliere la formula più adatta per ognuno di essi. I diametri caratteristici sono ricavabili dalle curve granulometriche, riportate in allegato, mentre le grandezze idrodinamiche sono dedotte degli stessi modelli idraulici impiegati a fondo fisso.

Tabella 4: limiti di applicabilità delle formule di trasporto solido

Autore	d₅₀ [mm]	pendenza fondo	Froude	Rapporto tra larghezza e tirante B / h	Tirante idrico h [m]
Meyer-Peter e Muller trasporto di fondo	0.4 ÷ 30	$4 \cdot 10^{-4} \div 2 \cdot 10^{-2}$			0.01 ÷ 1.2
Toffaletti trasporto totale	0.062 ÷ 16				> 3
Ackers-White trasporto totale	0.04 ÷ 4.9		< 0.8		< 0.4
	0.1 ÷ 68		< 0.8	9 ÷ 60	
Yang trasporto di fondo	0.137 ÷ 1.35				0.022 ÷ 0.86

Formula di Meyer-Peter e Müller (1948)

La formula trovata da Meyer-Peter e Müller nel 1948 è la seguente:

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA					
	IDROLOGIA E IDRAULICA Studio di geomorfologia fluviale - Relazione	COMMESSA IQ01	LOTTO 01	CODIFICA R 09 RG	DOCUMENTO ID 0002 001	REV. A

$$q_s = \frac{\gamma}{\gamma_s - \gamma} \left\{ \frac{(Q_B/Q)(K_B/K_G)^{3/2} h j - 0.047[(\gamma_s - \gamma)/\gamma]d}{(0.25/\gamma)(\gamma/g)^{1/3}} \right\} \frac{1}{\rho_s}$$

con:

$$K_B = \frac{u}{h^{2/3} \sqrt{j}} \quad \text{e} \quad K_G = \frac{26}{d_{90}^{1/6}}$$

Nel caso di sedimenti ben assortiti, Meyer-Peter e Müller suggerirono di utilizzare un singolo diametro per caratterizzare il campione: $\sum_i d_i P_i / 100 \approx d_{50}$ con P_i frazione in peso della i -esima classe granulometrica d_i .

Nell'equazione sono presenti due fattori di riduzione, Q_B/Q e K_B/K_G ; il primo serve per tenere conto del fatto che solo una parte (Q_B) della portata totale (Q) agisce sul fondo ed è quindi responsabile del movimento del trasporto di fondo; il secondo per tenere conto della presenza della resistenza di formiche riduce lo sforzo di taglio che è disponibile per il trasporto di fondo. Meyer-Peter e Müller assunsero che $Q_B/Q=1$ per i letti dei fiumi piatti e che $K_B/K_G=1$ per i canali larghi. Nel caso di dati di laboratorio, si può porre $Q_B/Q=1-h/B$ con B larghezza del canale. Il diametro nella formula è in m.

Formula di Toffaleti (1968)

Il metodo di Toffaleti è basato sui concetti di Einstein con tre differenze:

- la distribuzione della velocità sulla verticale è ottenuta da un'espressione diversa da quella usata da Einstein;
- alcuni dei fattori correttivi di Einstein sono modificati e combinati;
- lo spessore della zona di trasporto di fondo è cambiato rispetto a quello di Einstein (due diametri).

Questa formula calcola il trasporto totale.

Toffaleti espresse il parametro di Einstein Ψ (intensità della corrente) come:

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA					
	IDROLOGIA E IDRAULICA Studio di geomorfologia fluviale - Relazione	COMMESSA IQ01	LOTTO 01	CODIFICA R 09 RG	DOCUMENTO ID 0002 001	REV. A

$$\Psi = \frac{T A}{U^2} 10^4 d$$

con T (dimensioni $[L/T^2]$) parametro che include le costanti e quelle componenti della forza di taglio che sono funzioni della temperatura dell'acqua, A fattore di correzione adimensionale per sostituire i fattori di correzione di Einstein per i sedimenti non omogenei, U $[L/T]$ è la velocità media della corrente e d $[L]$ è il diametro dei granuli.

Egli divide l'altezza della corrente in tre zone:

- la zona inferiore dove la profondità della corrente è minore di $\Re/11.24$ (con \Re raggio idraulico);
- la zona intermedia con profondità compresa tra $\Re/2.5$ e $\Re/11.25$;
- la zona superiore dove la profondità è inferiore a $\Re/2.5$.

Toffaletti inoltre stabilì che L_F o trasporto del nucleo espresso in U.S. tons/giorno per 1 piede di larghezza nella zona inferiore (assumendo che il fondo sia composto interamente da una sola granulometria di sabbia), può essere rappresentato da:

$$L_F = \frac{0.06}{\left(\frac{T A}{U^2}\right)^{5/3} \left(\frac{d}{0.00058}\right)^{5/3}}$$

che per la sabbia molto fine ($d < 1$ mm) diventa:

$$L_F = \frac{1.905}{\left(\frac{T A}{U^2}\right)^{5/3}}$$

La distribuzione della concentrazione dei sedimenti è espressa da:

$$C_y = C_a \left(\frac{y}{\Re}\right)^z$$

nella quale C_y è la concentrazione dei sedimenti alla quota y dal fondo e C_a è la concentrazione alla quota a .

Per la zona centrale:

	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA					
IDROLOGIA E IDRAULICA Studio di geomorfologia fluviale - Relazione	COMMESSA IQ01	LOTTO 01	CODIFICA R 09 RG	DOCUMENTO ID 0002 001	REV. A	FOGLIO 38 di 63

$$z = \frac{U w_s}{C_z j \mathfrak{R}}$$

nella quale w_s è la velocità di sedimentazione della particella in piedi/s e C_z è un fattore correttivo per la temperatura che vale $260.67 - 0.667 T$ (con T in °F). L'esponente z della distribuzione della concentrazione dei sedimenti nella zona inferiore ed in quella superiore è, rispettivamente, 0.756 e 1.5 volte quello della zona centrale.

Dopo aver determinato L_F e la distribuzione della concentrazione dei sedimenti nella zona inferiore, si può procedere col determinare la concentrazione al bordo superiore di questa zona, poi calcolare la distribuzione ed il trasporto totale dei sedimenti nella zona centrale ed infine ottenere il trasporto totale di sedimenti nella zona superiore. La somma del trasporto totale di sedimenti nelle tre zone è il trasporto totale riferito all'intera altezza della sezione.

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA					
	IDROLOGIA E IDRAULICA Studio di geomorfologia fluviale - Relazione	COMMESSA IQ01	LOTTO 01	CODIFICA R 09 RG	DOCUMENTO ID 0002 001	REV. A

Formula di Ackers-White (1973)

Ackers e White postularono che solo una parte dello sforzo di taglio agente sul letto del fiume causa il movimento dei sedimenti grossolani, mentre nel caso di quelli fini predomina il trasporto in sospensione per il quale l'intero sforzo di taglio causa il movimento.

Questa formula valuta il trasporto totale, considerato come la somma del trasporto di fondo e di quello in sospensione.

La portata solida in volume q_s ha come unità di misura il $m^3/(m s)$, ed esprime il volume del sedimento trasportato per ogni secondo per l'unità di larghezza dell'alveo.

La formula è la seguente:

$$q_s = G_{gr} g u \left(\frac{u}{u_*} \right)^n d_{gr}$$

con $u_* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} = \sqrt{g h i}$ velocità di attrito e con i parametri adimensionali G_{gr} (trasporto dei sedimenti), F_{gr} (mobilità delle particelle) e d_{gr} (granulometria):

$$G_{gr} = C \left(\frac{F_{gr}}{A} - 1 \right)^m$$

$$F_{gr} = \frac{u_*^n}{[g d (\gamma_s - 1)]^{1/2}} \left[\frac{u}{5.66 \log(10 D/d)} \right]^{(1-n)}$$

$$d_{gr} = d [g (\gamma_s - 1) / v^2]^{1/3}$$

I quattro parametri n , A , m e C sono stati ricavati in base agli esperimenti:

$$\text{per } 1 \leq d_{gr} \leq 60$$

$$\text{per } d_{gr} > 60$$

$$n = 1 - 0.5 \log d_{gr}$$

$$n = 0.0$$

$$A = \left(\frac{0.23}{d_{gr}^{1/2}} \right) + 0.14$$

$$A = 0.170$$

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA					
	IDROLOGIA E IDRAULICA Studio di geomorfologia fluviale - Relazione	COMMESSA IQ01	LOTTO 01	CODIFICA R 09 RG	DOCUMENTO ID 0002 001	REV. A

$$m = \left(\frac{9.66}{d_{gr}} \right) + 1.34 \qquad m = 1.50$$

$$C = 10^{[2.86 \log d_{gr} - (\log d_{gr})^2 - 3.53]} \qquad C = 0.025$$

Nella formula d è espresso in metri.

Formula di Yang (1973)

Questa formula considera il fiume come una macchina: il lavoro necessario per mantenere il trasporto dei sedimenti è pari al prodotto della forza per la velocità.

Il trasporto di fondo è dato da:

$$\rho_s \left(\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} \right) q_f \tan \alpha = \omega e_f$$

con $\tan \alpha$ coefficiente di attrito dinamico, q_f trasporto di fondo pari alla massa per la velocità della particella sul fondo, e_f efficienza della potenza (approssimativamente 0.15) e $\omega = \tau_0 u$ potenza della corrente.

Il trasporto in sospensione è dato da:

$$\rho_s \left(\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} \right) q_{ss} \frac{w_s}{u_s} = \omega e_s (1 - e_f)$$

con q_s trasporto in sospensione pari alla massa per la velocità della particella in sospensione, che può approssimarsi con quella della corrente u , w_s velocità di sedimentazione, e_s efficienza della potenza pari a 0.015 ed il rapporto w_s/u_s equivalente al coefficiente di attrito dinamico.

Il trasporto totale in $[m^3/(m s)]$ è dato dalla somma dei due termini precedenti:

$$q_s = q_f + q_{ss} = \omega \frac{\gamma}{\gamma_s - \gamma} \left(\frac{e_f}{\tan \alpha} + 0.01 \frac{u_s}{w_s} \right) \frac{1}{\rho_s}$$

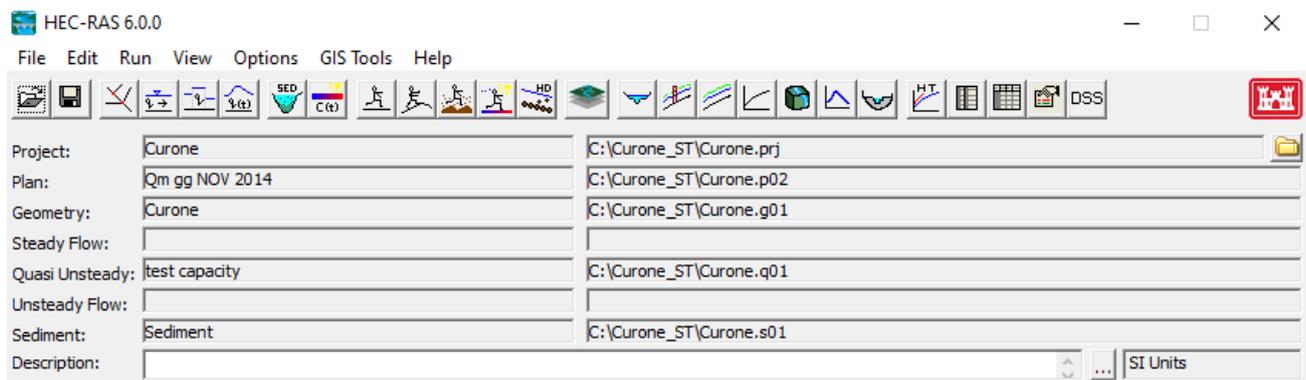
 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA					
	IDROLOGIA E IDRAULICA Studio di geomorfologia fluviale - Relazione	COMMESSA IQ01	LOTTO 01	CODIFICA R 09 RG	DOCUMENTO ID 0002 001	REV. A

3.2 MODELLO DI CALCOLO IDRAULICO A FONDO MOBILE

3.2.1 HEC-RAS, modulo per il trasporto dei sedimenti

3.2.1.1 Cenni generali

HEC-RAS¹ è un noto codice di calcolo per il moto di correnti idriche in simulazione monodimensionale di una rete di canali naturali e/o artificiali, messo a punto dal Corpo degli Ingegneri dell'Esercito Americano. La versione 4.0.x del codice ha incluso la possibilità di svolgere analisi sul trasporto di sedimenti, basate sulla metodologia già in uso nel vecchio codice HEC-6² e disponibili anche nella versione 6, utilizzata nel presente studio.



¹ HEC-RAS, Hydrologic Engineering Center – River Analysis System, US Army Corps of Engineers

² HEC-6 “Scour and deposition in Rivers and Reservoirs” (HEC 1991)

IDROLOGIA E IDRAULICA
Studio di geomorfologia fluviale -
Relazione

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IQ01	01	R 09 RG	ID 0002 001	A	42 di 63

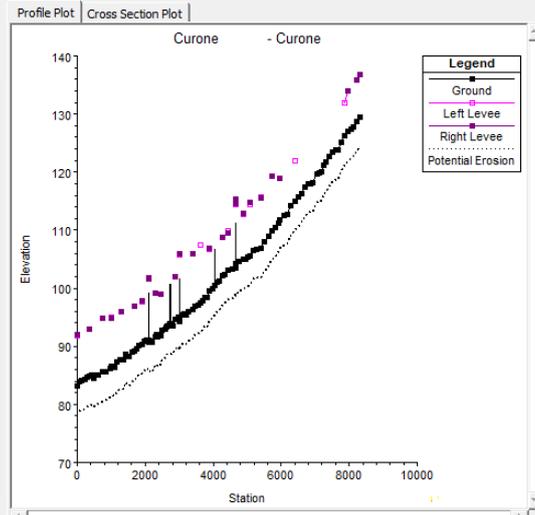
Sediment Data - Sediment

File Options View Help

Initial Conditions and Transport Parameters | Boundary Conditions | USDA-ARS Bank Stability and Toe Erosion Model (BSTEM) | 2D Bed Gradations (beta)

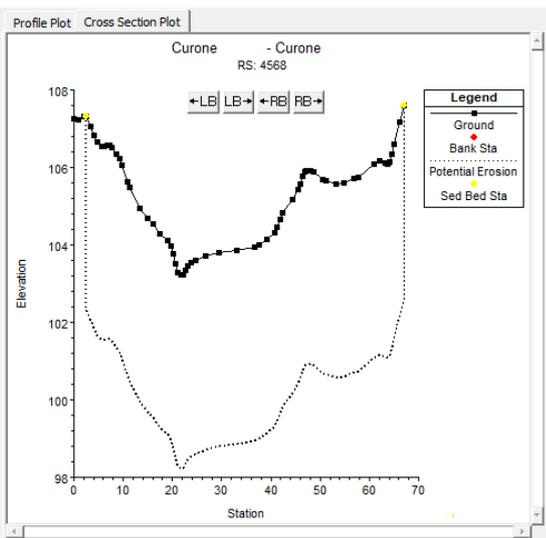
River: (All Rivers) Transport Function: Meyer Peter Muller Define/Edit Bed Gradation ...
 Reach: Sorting Method: Thomas (Ex5)
 Number of mobile bed channels: 1 Fall Velocity Method: Soulsby Define Layers... (2D)

	River	Reach	RS	Invert	Max Depth	Min Elev	Left Sta	Right Sta	Bed Gradation
1	Curone	Curone	8351.2	129.51	5		28.88	157.87	PR08
2	Curone	Curone	8242.1	128.62	5		3	128.4	PR08
3	Curone	Curone	8157	127.72	5		0	115.5	PR08
4	Curone	Curone	8070.3	127.37	5		0	92.2	PR08
5	Curone	Curone	7987.6	126.95	5		108.09	180.37	PR08
6	Curone	Curone	7884.4	126.26	5		22.8	138.8	PR08
7	Curone	Curone	7781.1	125.22	5		2.9	193.4	PR08
8	Curone	Curone	7688.9	123.82	5		18.2	152.5	PR08
9	Curone	Curone	7618.3	123.76	5		153.18	264.06	PR08
10	Curone	Curone	7540.6	123.42	5		3.7	103.1	PR08
11	Curone	Curone	7426.7	122.6	5		1.6	147.5	PR08
12	Curone	Curone	7340.7	121.76	5		1.8	103	PR08
13	Curone	Curone	7259.1	121.1	5		55	160.6	PR08
14	Curone	Curone	7191.2	120.1	5		38.76	133.28	PR08
15	Curone	Curone	7130.6	119.83	5		2.2	108.5	PR08
16	Curone	Curone	7059.6	119.76	5		2.9	75.9	PR08
17	Curone	Curone	6960	118.24	5		19	96.1	PR08
18	Curone	Curone	6886.1	118.02	5		97.37	160.83	PR08
19	Curone	Curone	6808.4	118.02	5		0.9	74.4	PR08
20	Curone	Curone	6718.2	117.35	5		3.7	99.7	PR08
21	Curone	Curone	6621.8	116.34	5		0.2	75.9	PR08
22	Curone	Curone	6508.8	115.72	5		11.1	105.1	PR08
23	Curone	Curone	6418.2	115.05	5		78.48	205.15	PR08



non-Veneer Bed Change

Description : ...



Sediment Transport Analysis

File Options Help

Plan : Qm gg NOV 2014 Short ID : Qm gg NOV 2014

Geometry File : Curone

Quasi-Unsteady Flow : test capacity

Sediment Data : Sediment

Simulation Time Window

Starting Date : 01nov2014 Starting Time : 0000

Ending Date : 30nov2014 Ending Time : 2400

Plan Description :

Compute

Enter/Edit short identifier for plan (used in plan comparisons)

	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA					
	IDROLOGIA E IDRAULICA Studio di geomorfologia fluviale - Relazione	COMMESSA IQ01	LOTTO 01	CODIFICA R 09 RG	DOCUMENTO ID 0002 001	REV. A

3.2.1.2 Funzionamento del programma

Il modulo per il trasporto dei sedimenti è stato creato per simulare e predire i cambiamenti nei profili dei fiumi derivanti dall'erosione e/o dalla deposizione.

L'idrogramma viene suddiviso in una serie di moti stazionari di portate e durate variabili. Per ogni passo è calcolato il profilo della superficie dell'acqua e da questo si ricava la pendenza piezometrica, la velocità, la profondità in ogni sezione. Da questi viene poi calcolato, per ogni sezione e per ogni classe granulometrica, il trasporto potenziale di sedimenti, che combinato con la durata della corrente, permette di ricavare il trasporto dei sedimenti associato ad ogni portata.

Il trasporto dei sedimenti è calcolato per ogni portata e per ogni classe granulometrica in questo modo:

- calcolo del trasporto potenziale per ogni classe granulometrica presente nel letto del fiume come se essa costituisse la totalità dei sedimenti presenti;
- il trasporto potenziale così ottenuto, viene poi moltiplicato per la frazione di quella stessa classe realmente presente in quel passo temporale; in questo modo si determina la capacità di trasporto per questa granulometria.

Le percentuali delle diverse classi granulometriche presenti sul fondo, possono cambiare significativamente durante il passo temporale; quindi si utilizzano delle iterazioni per poter prendere in considerazione questi cambiamenti; il numero delle iterazioni all'interno del passo temporale può essere fissato dall'utilizzatore.

L'equazione di continuità dei sedimenti deve essere applicata su un volume di controllo, che va da metà della distanza fra la sezione a monte di quella attuale a metà della distanza da quella a valle. La larghezza di questo volume di controllo generalmente coincide con quella del letto mobile, e la sua profondità va dalla superficie libera fino al terreno non erodibile (strato di roccia).

Il programma utilizza come equazione di continuità quella di Exner:

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA					
	IDROLOGIA E IDRAULICA Studio di geomorfologia fluviale - Relazione	COMMESSA IQ01	LOTTO 01	CODIFICA R 09 RG	DOCUMENTO ID 0002 001	REV. A

$$\frac{\partial Q_s}{\partial x} + B_0 \frac{\partial Y_s}{\partial t} = 0 \quad 3.1$$

con Q_s portata media dei sedimenti (in m^3/s) durante l'intervallo Δt .

Questa equazione può essere espressa in termini di differenze finite:

$$\frac{Q_{sd} - Q_{su}}{0.5(L_d - L_u)} + \frac{B_{0p}(Y'_{sp} - Y_{sp})}{\Delta t} = 0 \quad 3.2$$

con:

B_{0p}	larghezza del letto mobile al punto P;
Q_{su}	carichi di sedimenti alla sezione di monte;
Q_{sd}	carichi di sedimenti alla sezione di valle;
L_u	lunghezza del tratto di monte tra le sezioni;
L_d	lunghezza del tratto di valle tra le sezioni;
Y_{sp}	profondità dei sedimenti all'inizio dello step nel punto P;
Y'_{sp}	profondità dei sedimenti alla fine dello step nel punto P;
Δt	Passo temporale

Si rimanda al manuale ed alla documentazione di riferimento di HEC-RAS per una trattazione completa delle assunzioni teoriche circa il calcolo numerico del trasporto di sedimenti.

3.2.2 Schematizzazione idraulica adottata

3.2.2.1 Geometria dei modelli

La geometria dei modelli di calcolo a fondo mobile è la stessa di quelli monodimensionali a fondo a fisso, che sono stati costruiti a partire dai rilievi topografici appositamente eseguiti per il Progetto in esame. Per ogni corso d'acqua interessato dagli attraversamenti ferroviari in progetto è stato implementato un modello idraulico bidimensionale ed uno monodimensionale, i cui dettagli sono riportati negli elaborati IQ0000D09RIID0002001A Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Grue e Calvenza e IQ0000D09RIID0002002A Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Curone e Limbione. Ricordiamo che la geometria del

	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA					
	IDROLOGIA E IDRAULICA Studio di geomorfologia fluviale - Relazione	COMMESSA IQ01	LOTTO 01	CODIFICA R 09 RG	DOCUMENTO ID 0002 001	REV. A

modello di calcolo è costituita dalle sezioni trasversali, dalle opere eventualmente presenti e dalle caratteristiche idrauliche delle sezioni stesse.

3.2.2.2 Scabrezza idraulica

I valori di scabrezza adottati per i vari corsi d'acqua sono riportati nella seguente tabella.

Tabella 5: valori di scabrezza adottati per i corsi d'acqua di studio

Corso d'acqua	golena sinistra	canale principale	golena destra
Grue	0,050	0,035	0,050
Calvenza	0,080	0,050	0,080
Curone	0,080	0,045	0,080
Limbione	0,080	0,040	0,080

3.2.2.3 Condizioni al contorno

Le condizioni al contorno nel modello a fondo mobile riguardano sia la componente acqua, sia quella sedimenti e sono sinteticamente descritte di seguito.

Portate simulate

Per il Curone sono state utilizzate le portate medie giornaliere del novembre 2014 registrate a Volpedo, ottenuti dalla banca dati di ARPA Piemonte³. Il 15 novembre 2014 c'è stata la massima piena registrata nel periodo 2004-2020, la tabella seguente riporta i valori giornalieri.

³ https://www.arpa.piemonte.it/rischinaturali/accesso-ai-dati/annali_meteoidrologici/annali-meteo-idro/banca-dati-idrologica.html

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA					
	IDROLOGIA E IDRAULICA Studio di geomorfologia fluviale - Relazione	COMMESSA IQ01	LOTTO 01	CODIFICA R 09 RG	DOCUMENTO ID 0002 001	REV. A

Tabella 6: Portate giornaliere utilizzate come condizione al contorno per il Curone

data	Portata media giornaliera (m³/s)
1-Nov	1.52
2-Nov	1.46
3-Nov	1.19
4-Nov	1.96
5-Nov	10.70
6-Nov	7.55
7-Nov	6.87
8-Nov	6.82
9-Nov	6.69
10-Nov	10.90
11-Nov	23.20
12-Nov	11.90
13-Nov	11.90
14-Nov	12.00
15-Nov	52.00
16-Nov	17.10
17-Nov	12.60
18-Nov	10.20
19-Nov	7.93
20-Nov	6.74
21-Nov	5.77
22-Nov	5.04
23-Nov	4.55
24-Nov	4.13
25-Nov	4.39

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA					
	IDROLOGIA E IDRAULICA Studio di geomorfologia fluviale - Relazione	COMMESSA IQ01	LOTTO 01	CODIFICA R 09 RG	DOCUMENTO ID 0002 001	REV. A

data	Portata media giornaliera (m³/s)
26-Nov	4.51
27-Nov	6.01
28-Nov	11.00
29-Nov	8.48
30-Nov	11.00

Per gli altri corsi è stata stimata una portata media mensile a partire dal valore di contributo medio mensile del Curone nel mese di novembre 2014 (61.9 l/s km²) moltiplicando questo valore per l'area degli altri bacini si è ottenuta la portata media mensile utilizzata come condizione al contorno, la tabella successiva riporta i valori di portata utilizzati.

Tabella 7: valori di portata media mensile simulati

Corso d'acqua	Portata media mensile (m³/s)
Grue	5.60
Calvenza	0.50
Limbione	2.50

Nel codice di calcolo il valore di portata costante della durata complessiva di *30 giorni (720 ore)* è stato suddiviso in *720* intervalli di durata pari a *24 ore* ognuno, suddivisi a loro volta in incrementi computazionali di durata pari a *2 ore*.

Livello idrico di valle

Per la definizione del livello a valle è stata utilizzata la condizione di pendenza dell'energia costante, pari alla pendenza del fondo nell'ultimo tratto. Le pendenze utilizzate sono riportate nella tabella seguente.

	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA					
	IDROLOGIA E IDRAULICA Studio di geomorfologia fluviale - Relazione	COMMESSA IQ01	LOTTO 01	CODIFICA R 09 RG	DOCUMENTO ID 0002 001	REV. A

Tabella 8: Pendenze utilizzate come condizione al contorno di valle

Corso d'acqua	Pendenza (m/m)
Grue	0.0040
Calvenza	0.0015
Curone	0.0038
Limbione	0.0035

Carico solido entrante

La condizione al contorno di monte per quanto concerne i sedimenti deve definire, per ogni granulometria considerata, l'apporto in kg/s per l'intero periodo di simulazione. Tale apporto dipende dalle caratteristiche morfologiche del bacino di monte e dagli eventi meteorici che lo investono. Usualmente si definisce una relazione univoca tra portata liquida e portata solida, trascurando quello che può essere il diverso impatto di un evento meteorico sul bacino. Se si assume che la sezione in cui è imposta la condizione al contorno sia mediamente stabile, questa relazione può essere direttamente definita mediante la formula di trasporto definita.

Il codice di calcolo è in grado di determinare automaticamente il carico di equilibrio, che corrisponde alla capacità di trasporto per quella sezione in ogni passo temporale e per ogni classe granulometrica. In via cautelativa è stata adottata, per i casi in esame, la condizione di carico di equilibrio.

Da sottolineare che essendo i tratti di interesse dell'analisi quelli a cavallo dell'attraversamento della linea ferroviaria e che questi si trovano ad una certa distanza dalla sezione in cui è definita la condizione al contorno, l'imprecisione legata alla definizione di tale condizione è attenuata dal fatto che il modello riadatta la sua capacità di trasporto sulla base delle caratteristiche dell'alveo schematizzato, perdendo quindi l'informazione iniziale definita con la condizione al contorno.

 <p>ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p>	<p>VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA</p>												
<p>IDROLOGIA E IDRAULICA Studio di geomorfologia fluviale - Relazione</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>COMMESSA</th> <th>LOTTO</th> <th>CODIFICA</th> <th>DOCUMENTO</th> <th>REV.</th> <th>FOGLIO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>IQ01</td> <td>01</td> <td>R 09 RG</td> <td>ID 0002 001</td> <td>A</td> <td>49 di 63</td> </tr> </tbody> </table>	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO	IQ01	01	R 09 RG	ID 0002 001	A	49 di 63
COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO								
IQ01	01	R 09 RG	ID 0002 001	A	49 di 63								

3.2.2.4 Limiti del fondo erodibile

La caratteristica principale del modello a fondo mobile è proprio rappresentata dai limiti della porzione erodibile delle sezioni. È possibile indicare le coordinate dei nodi di ogni sezione che possono essere alzati o abbassati in funzione dell'erosione o della deposizione calcolata, nonché la massima profondità di erosione.

Nei casi in esame sono state individuate in via preliminare le seguenti condizioni:

- limiti del fondo mobile in ogni sezione coincidenti con i limiti del canale principale;
- massima profondità di erosione pari a 5 m.

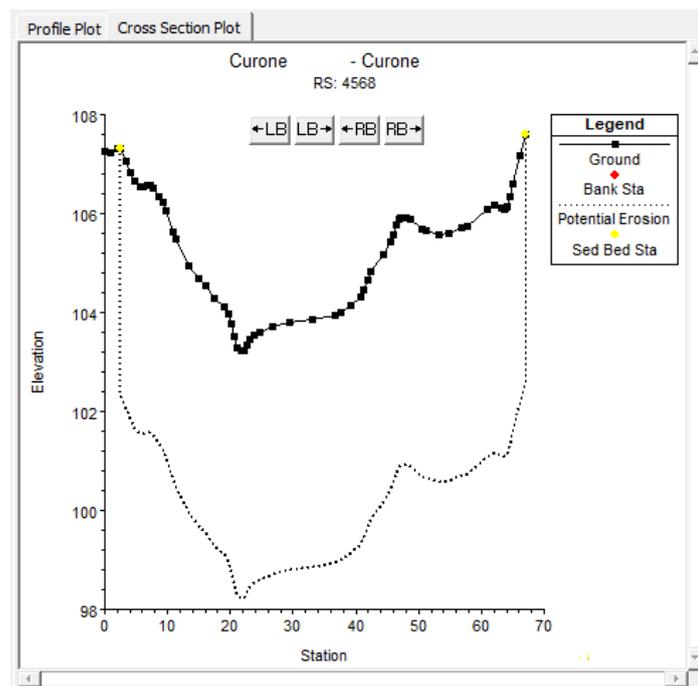


Figura 15: esempio dell'inserimento dei limiti del fondo mobile coincidenti con i limiti del canale principale

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA					
	IDROLOGIA E IDRAULICA Studio di geomorfologia fluviale - Relazione	COMMESSA IQ01	LOTTO 01	CODIFICA R 09 RG	DOCUMENTO ID 0002 001	REV. A

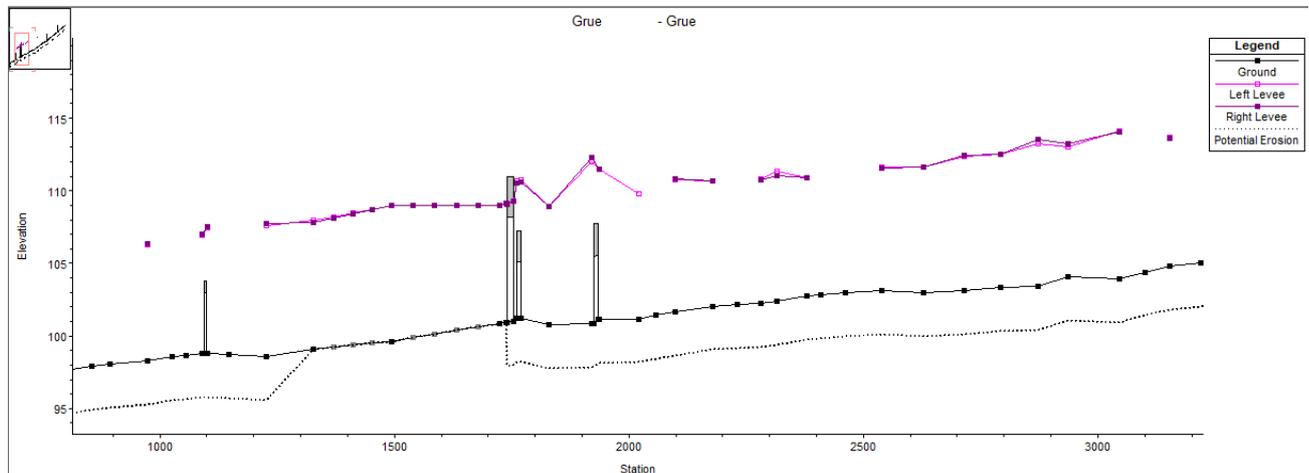


Figura 16: esempio dell'inserimento della massima profondità erodibile (si noti il tratto con protezione di fondo considerato inerosibile)

3.2.2.5 Caratteristiche del cambiamento del fondo alveo

La morfologia dei corsi d'acqua in esame può essere tale da giustificare una mobilità del fondo alveo uniforme lungo la verticale, il che corrisponde all'opzione di default del codice di calcolo che non prevede erosione né deposizione al di fuori dei limiti del fondo mobile. Tuttavia è possibile selezionare l'opzione corrispondente alla *deposizione al di fuori del fondo mobile*, qualora siano da attendersi livelli idrici superiori alla quota dei limiti del fondo erodibile.

3.2.2.6 Formula di trasporto solido

La scelta della formula di trasporto solido da adottare per i casi in esame, condotta secondo quanto indicato nel precedente paragrafo 3.1.4, ha portato ad individuare quella di Meyer-Peter e Muller come la più adatta in base alle granulometrie rilevate. Per Grue e Calvenza, dove sono presenti rilevanti frazioni coesive ($d < 0.0625$ mm), il calcolo per queste componenti è fatto con la formulazione di Krone/Partheniades che considera la particolarità delle componenti coesive. Per quanto riguarda le componenti non coesive la valutazione del diametro medio per la scelta della formula è stato fatto escludendo la parte coesiva, pertanto anche per questi due corsi d'acqua è risultata applicabile la formulazione di Meyer-Peter e Muller.

	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA					
	IDROLOGIA E IDRAULICA Studio di geomorfologia fluviale - Relazione	COMMESSA IQ01	LOTTO 01	CODIFICA R 09 RG	DOCUMENTO ID 0002 001	REV. A

3.2.2.7 Caratterizzazione del mescolamento del fondo alveo

Le formule di trasporto solido calcolano il trasporto potenziale senza considerare la reale disponibilità di materiale solido movimentabile, la quale dipende dalle caratteristiche granulometriche che influenzano il fenomeno del rimescolamento del fondo con conseguente possibile corazzamento dello stesso (*armoring*).

Il codice di calcolo consente quindi di selezionare l'opzione più adatta per rappresentare questo fenomeno e nei casi in esame è stata adottata in prima approssimazione quella di default, che corrisponde al cosiddetto metodo "Exner 5" in cui si considera un modello di fondo alveo a tre strati in cui si forma uno strato corazzato che limita lo scambio di materiale dagli altri due strati.

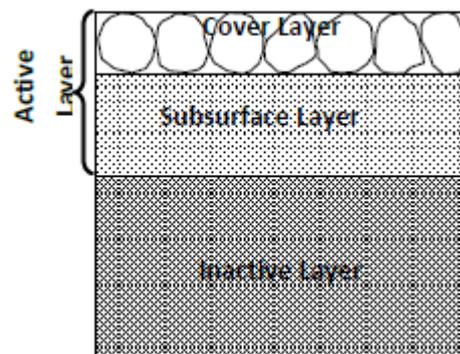


Figura 17: schema del metodo di mescolamento del fondo alveo

3.2.2.8 Granulometria del fondo alveo

La granulometria dei sedimenti di cui è costituito il fondo alveo viene rappresentata con la curva granulometrica dei campioni prelevati secondo i criteri riportati nel precedente paragrafo 2.1.1. Poiché nel codice di calcolo è possibile associare una sola curva granulometrica per ogni sezione, la scelta del punto di prelievo è di fondamentale importanza affinché esso sia rappresentativo dell'intera variabilità granulometrica osservata, tenendo anche conto che lo studio condotto in questa sede volge l'attenzione ai fenomeni di medio periodo, quindi i campioni devono essere rappresentativi di ciò che si può mobilitare durante tali eventi.

 ITALFERR <small>GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</small>	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA					
IDROLOGIA E IDRAULICA Studio di geomorfologia fluviale - Relazione	COMMESSA IQ01	LOTTO 01	CODIFICA R 09 RG	DOCUMENTO ID 0002 001	REV. A	FOGLIO 52 di 63

L'ubicazione dei punti di prelievo è riportata nelle Tavole IQ0000D09G5ID0002001A, IQ0000D09G5ID0002002A, IQ0000D09G5ID0002003A, IQ0000D09G5ID0002004A e le relative curve granulometriche sono state associate alle corrispondenti sezioni; il codice di calcolo determina poi un andamento lineare della granulometria tra una sezione e l'altra. Nei tratti a monte e a valle dei punti di prelievo sono state considerate granulometrie uguali a quelle definite dal campione più a monte e più a valle.

3.3 MODALITÀ EVOLUTIVE DELL'ALVEO

3.3.1 Tendenza all'erosione e alla deposizione

Le modalità evolutive dell'alveo, per i corsi d'acqua in esame in questa sede, vengono sinteticamente valutate in base alla possibile tendenza all'erosione o alla deposizione, stimata a sua volta mediante l'applicazione dei modelli idraulici a fondo mobile implementati per i corsi d'acqua in esame in questa sede. Nel caso di Grue e Calvenza si riportano i risultati riferiti alla configurazione di progetto, in cui sono presenti protezioni di fondo in corrispondenza degli attraversamenti.

Le figure seguenti riportano il profilo di fondo iniziale e finale dei quattro corsi d'acqua, per l'intero tratto simulato (rappresentazione del post-processor di RAS) e uno zoom in corrispondenza degli attraversamenti ferroviari.

IDROLOGIA E IDRAULICA
**Studio di geomorfologia fluviale -
Relazione**

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IQ01	01	R 09 RG	ID 0002 001	A	53 di 63

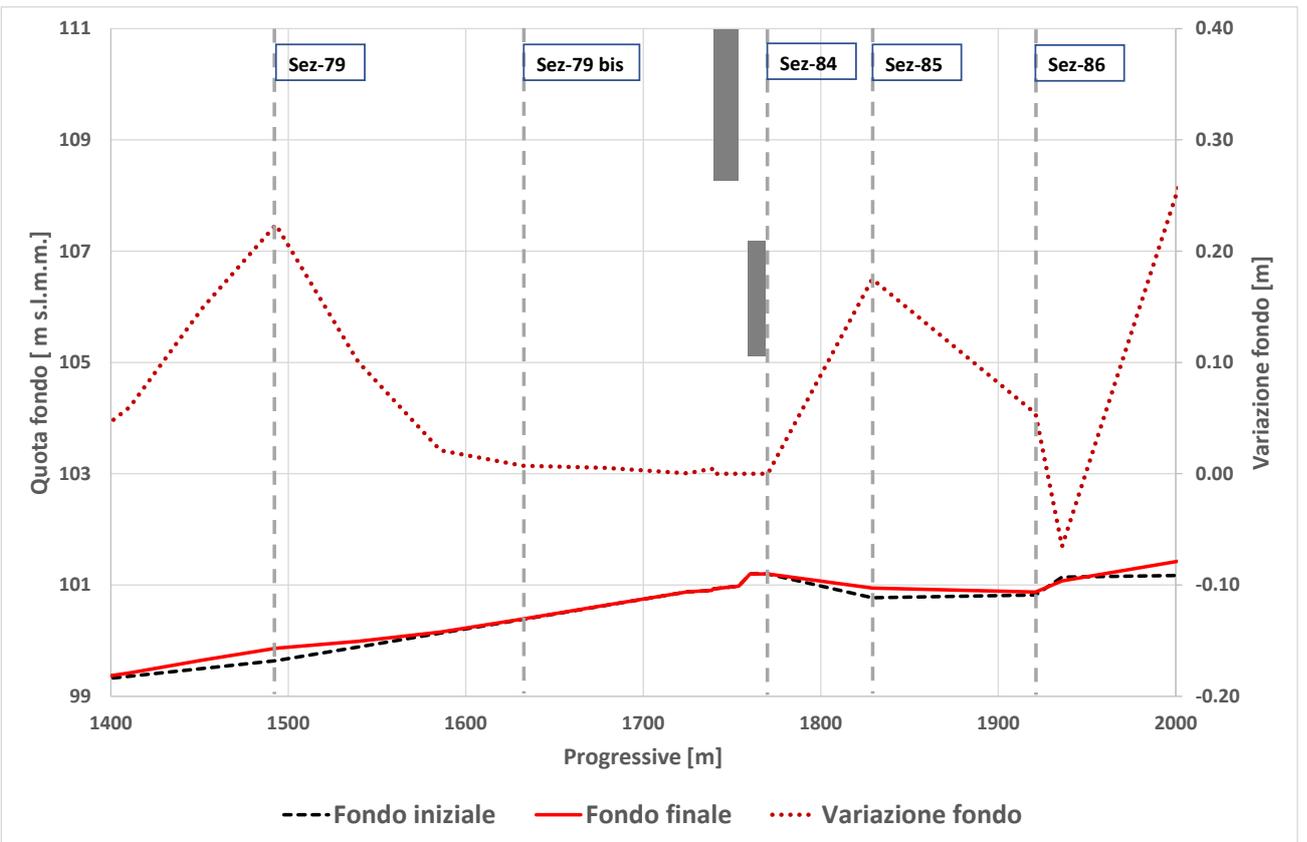
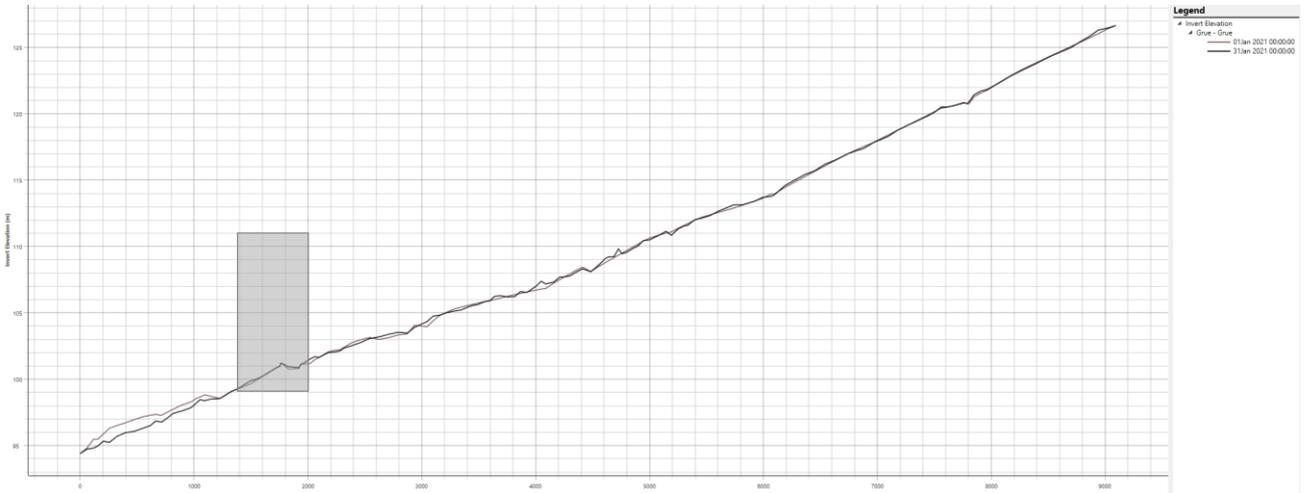


Figura 18: Evoluzione del profilo di fondo alveo del Torrente Grue, intero tratto simulato (sopra) particolare in corrispondenza degli attraversamenti ferroviari (sotto)

IDROLOGIA E IDRAULICA
**Studio di geomorfologia fluviale -
Relazione**

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IQ01	01	R 09 RG	ID 0002 001	A	54 di 63

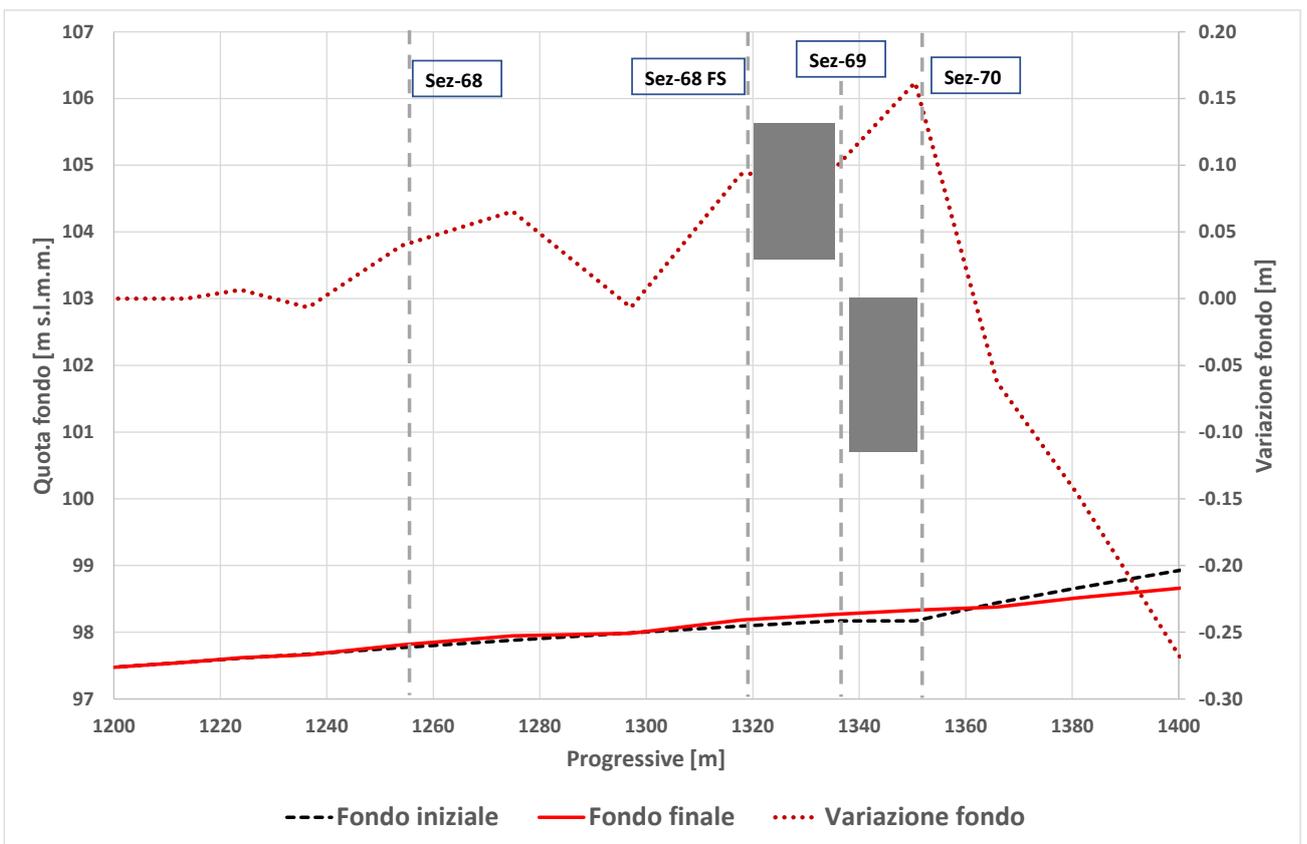
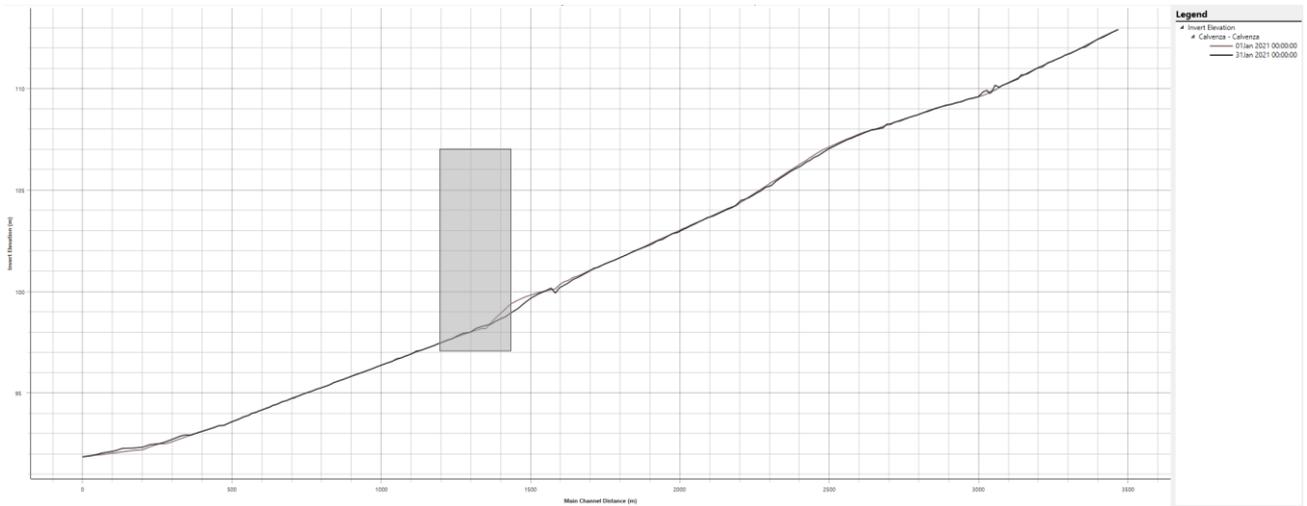


Figura 19: Evoluzione del profilo di fondo alveo del Torrente Calvenza, intero tratto simulato (sopra) particolare in corrispondenza degli attraversamenti ferroviari (sotto)

IDROLOGIA E IDRAULICA
**Studio di geomorfologia fluviale -
Relazione**

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IQ01	01	R 09 RG	ID 0002 001	A	55 di 63

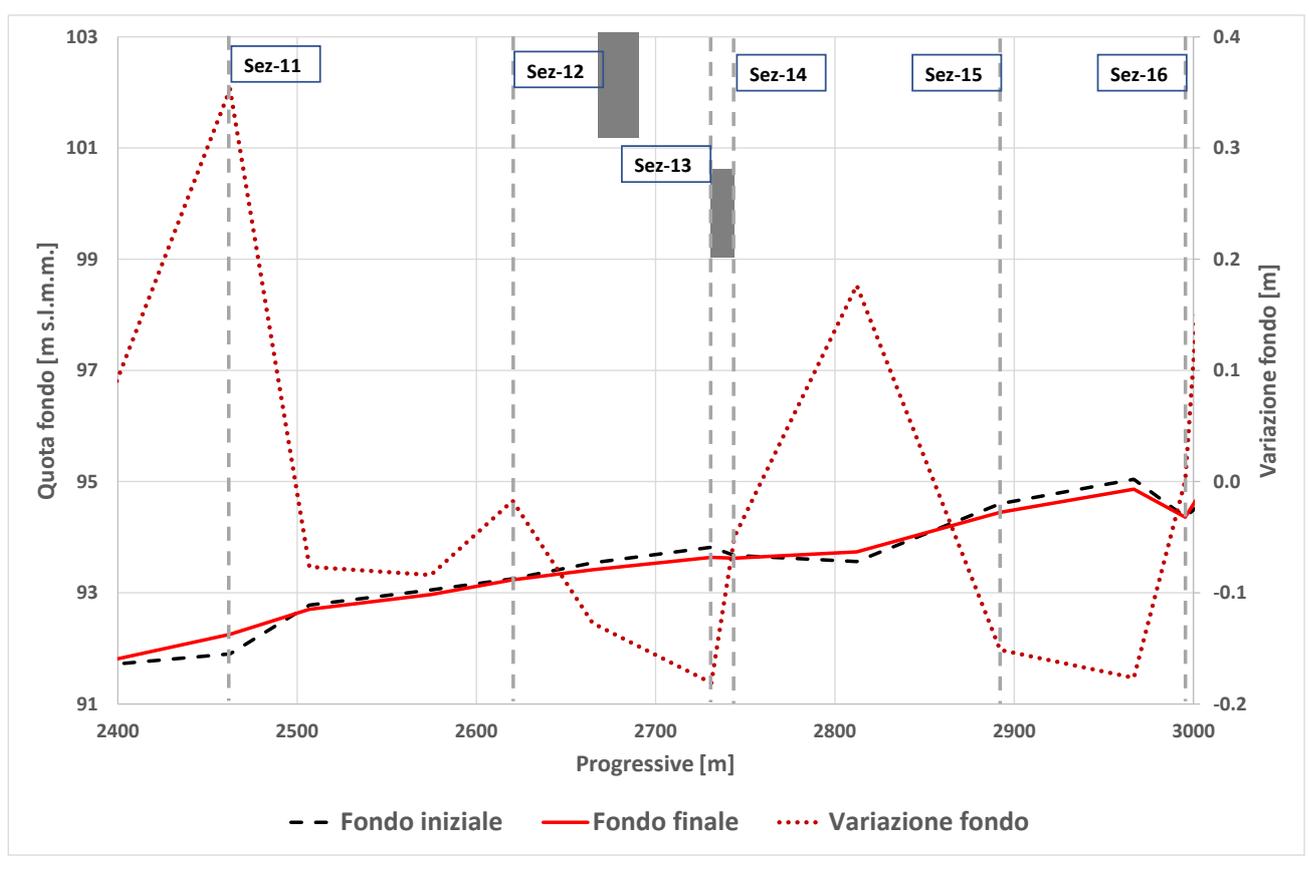
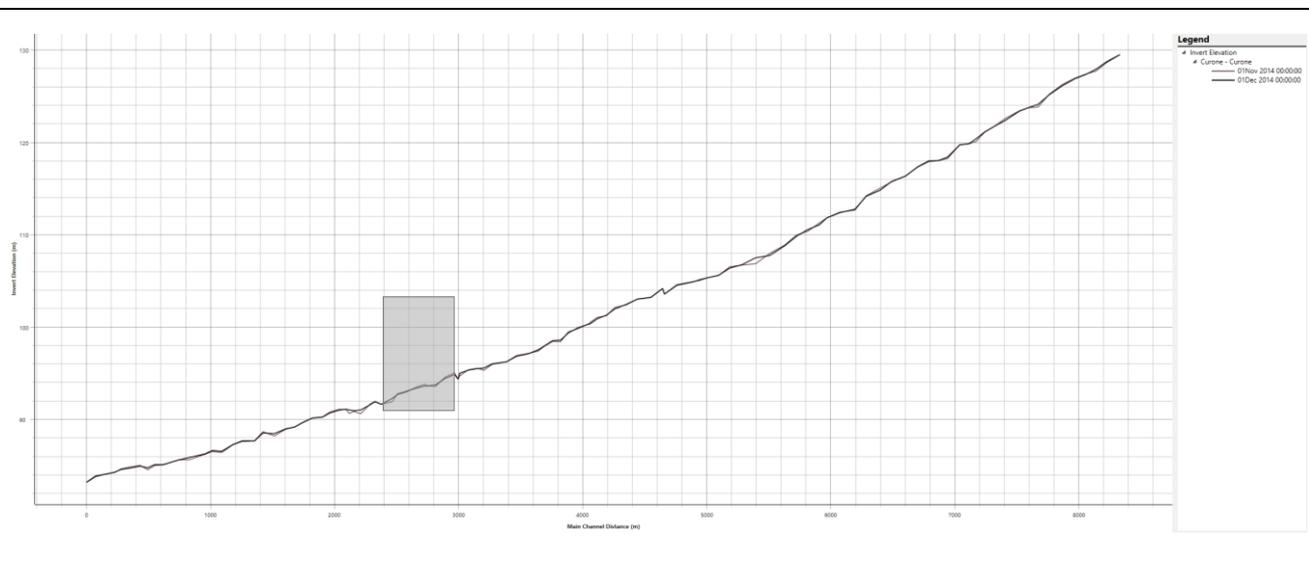


Figura 20: Evoluzione del profilo di fondo alveo del Torrente Curone, intero tratto simulato (sopra) particolare in corrispondenza degli attraversamenti ferroviari (sotto)

IDROLOGIA E IDRAULICA
**Studio di geomorfologia fluviale -
Relazione**

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IQ01	01	R 09 RG	ID 0002 001	A	56 di 63

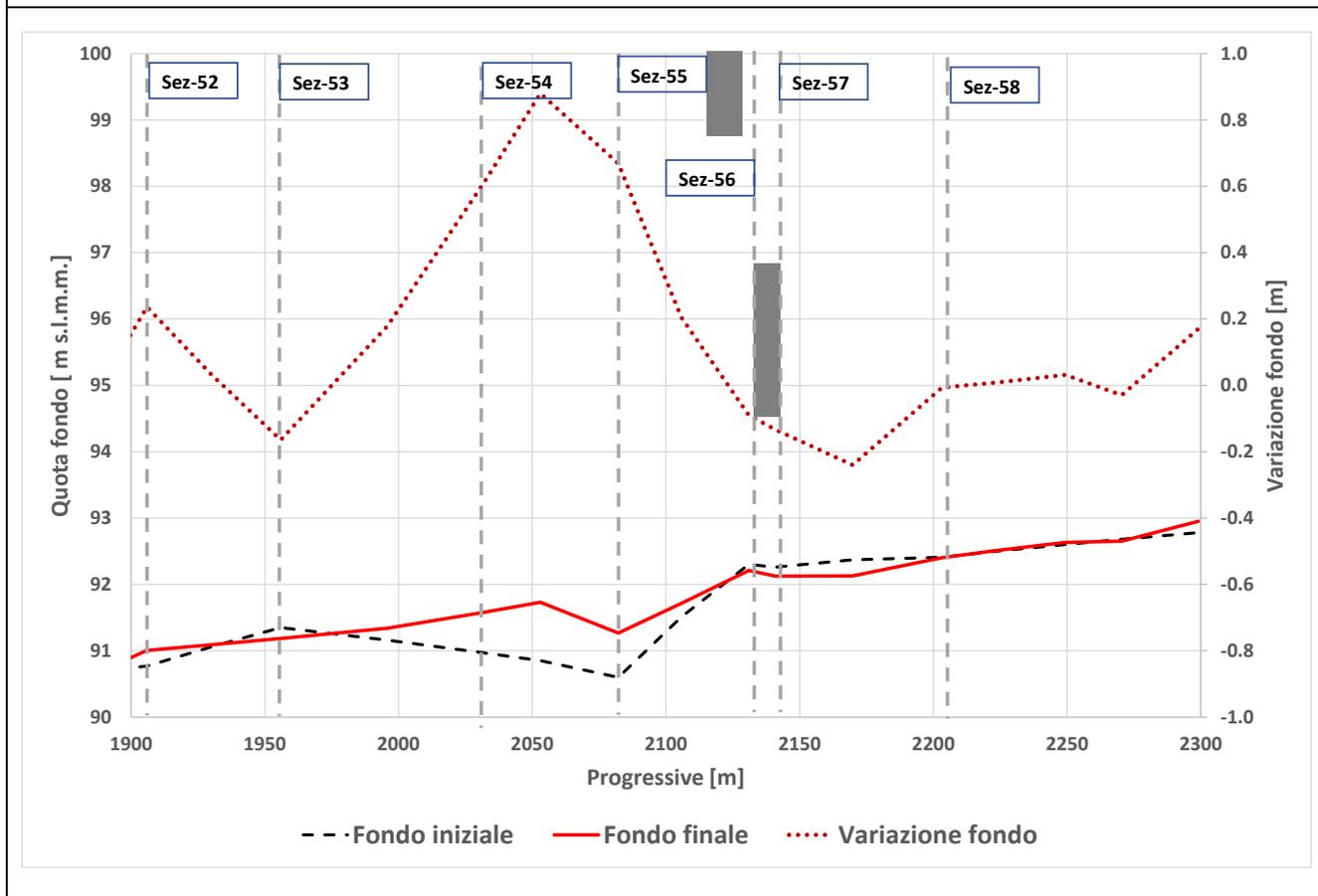
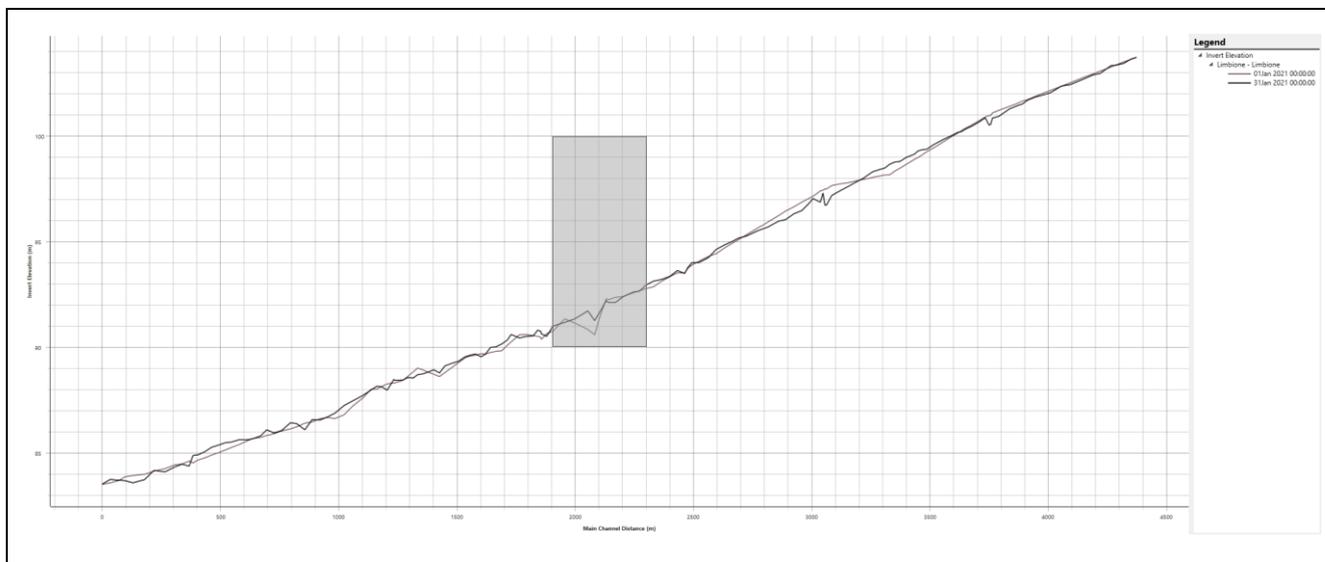


Figura 21: Evoluzione del profilo di fondo alveo del Torrente Limbione, intero tratto simulato (sopra) particolare in corrispondenza degli attraversamenti ferroviari (sotto)

 ITALFERR <small>GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</small>	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA					
	IDROLOGIA E IDRAULICA Studio di geomorfologia fluviale - Relazione	COMMESSA IQ01	LOTTO 01	CODIFICA R 09 RG	DOCUMENTO ID 0002 001	REV. A

La seguente tabella riporta in sintesi le condizioni di simulazione ed i risultati ottenuti in termini di tendenza all'erosione o alla deposizione.

Tabella 9: Stima della tendenza evolutiva

Corso d'acqua	Portata media mensile (m³/s)	Apporto di sedimenti	Tendenza evolutiva
Grue	5.60	Carico di equilibrio	stabile
Calvenza	0.50	Carico di equilibrio	deposito
Curone	Var. giornaliera	Carico di equilibrio	erosione
Limbione	2.50	Carico di equilibrio	deposito

4 CONCLUSIONI

4.1 ANALISI DEL RAPPORTO CON L'OPERA IN PROGETTO

La valutazione della tendenza all'erosione o alla deposizione, oppure la condizione di stabilità dell'alveo, consente di analizzare il rapporto delle opere di attraversamento in progetto con le dinamiche fluviali studiate in questa sede.

Le simulazioni di calcolo idraulico a fondo mobile hanno consentito di simulare anche gli interventi di sistemazione idraulica connessi alle opere in progetto, rendendo possibile il confronto con la condizione ante operam, fornendo di conseguenza un'utilissima indicazione per verificare che le modalità evolutive dei corsi d'acqua di interesse non interferiscano con la sicurezza dell'opera e, al contempo, che gli interventi in progetto non alterino significativamente tali modalità, in modo da non causare problemi al territorio connessi con le dinamiche morfologiche.

L'insieme delle valutazioni effettuate sulla dinamica morfologica dei corsi d'acqua (IDM) e le applicazioni modellistiche (HEC-RAS) hanno quindi avuto come obiettivo principale quello di

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA					
	IDROLOGIA E IDRAULICA Studio di geomorfologia fluviale - Relazione	COMMESSA IQ01	LOTTO 01	CODIFICA R 09 RG	DOCUMENTO ID 0002 001	REV. A

fornire una prima indicazione sul livello di attenzione che si dovrebbe applicare ai fini della manutenzione delle opere di attraversamento in progetto.

Incrociando i dati relativi all'Indice di Dinamica Morfologica con i risultati sulla tendenza evolutiva del corso d'acqua ricavata dalle applicazioni modellistiche è possibile definire **un probabile Livello di Attenzione per manutenzione programmata (LAm)**, così come riportato in Tabella 10.

Ad ogni valore di LAm è possibile associare una indicazione di “frequenza suggerita” per ispezioni manutentive (Tabella 11), finalizzate a:

- verifica del mantenimento della luce libera di progetto
- contestuale esame del bilancio di sedimenti, con gestione da concordare con gli Enti preposti (Regione, ARPA, Provincia, Comune e Genio Civile).

La frequenza suggerita per le ispezioni manutentive è basata sulla stagionalità delle portate simulate e sulla periodicità del ciclo idrologico da cui sono stati ricavati i valori medi mensili.

La sintesi di queste valutazioni è riportata negli elaborati che costituiscono la “Carta di sintesi dello studio geomorfologico” del presente progetto.

Tabella 10: Valori dell'indice LAm = Livello di Attenzione per interventi di manutenzione programmata

IDM	Tendenza evolutiva (risultati modellazione HecRas)		
	<i>stabilità</i>	<i>erosione</i>	<i>deposizione</i>
<i>bassa</i>	LAm basso	LAm basso	LAm medio
<i>media</i>	LAm basso	LAm medio	LAm alto
<i>alta</i>	LAm medio	LAm alto	LAm alto

	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA					
IDROLOGIA E IDRAULICA Studio di geomorfologia fluviale - Relazione	COMMESSA IQ01	LOTTO 01	CODIFICA R 09 RG	DOCUMENTO ID 0002 001	REV. A	FOGLIO 59 di 63

Tabella 11: Valori dell'indice LAm = Livello di Attenzione per interventi di manutenzione programmata

	<i>frequenza suggerita per le ispezioni manutentive</i>
LAm basso	ogni 2-3 anni
LAm medio	ogni 1,5-2 anni
LAm alto	ogni 6-9 mesi

Sulla base delle risultanze del presente studio, tutte le opere di attraversamento analizzate sono risultate idraulicamente verificate; in particolare, per i corsi d'acqua soggetti ad erosione, sono state dimensionate opportune opere di sistemazione idraulica per contrastare l'erosione, mentre per quelli soggetti a deposizione è stata verificata l'efficienza idraulica dell'opera, in relazione al rispetto dei franchi idraulici come da normativa vigente.

	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA					
	IDROLOGIA E IDRAULICA Studio di geomorfologia fluviale - Relazione	COMMESSA IQ01	LOTTO 01	CODIFICA R 09 RG	DOCUMENTO ID 0002 001	REV. A

Tabella 12: Livello di Attenzione per interventi di manutenzione programmata per i corsi d'acqua in esame

Corso d'acqua	Portata media mensile (m ³ /s)	Apporto di sedimenti	Tendenza evolutiva	Indice di Dinamica Morfologica IDM	Livello di attenzione per manutenzione LAm
Grue	5.60	Carico di equilibrio	stabile	bassa	basso
Calvenza	0.50	Carico di equilibrio	deposito	media	alto
Curone	Var. giornaliera	Carico di equilibrio	erosione	media	medio
Limbione	2.50	Carico di equilibrio	deposito	media	alto

	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA					
	IDROLOGIA E IDRAULICA Studio di geomorfologia fluviale - Relazione	COMMESSA IQ01	LOTTO 01	CODIFICA R 09 RG	DOCUMENTO ID 0002 001	REV. A

5 BIBLIOGRAFIA

Armanini A. – *Sistemazione dei bacini idrografici*, Università degli Studi di Trento

Armanini A. – *Principi di Idraulica fluviale*, ed. BIOS

Brunner, Gary W. (2016), HEC-RAS, River Analysis System Hydraulic Reference Manual

Brunner, Gary W. (2016), HEC-RAS, River Analysis System User's Manual

Bull W.B. (1964a). *Geomorphology of segmented alluvial fans in western Fresno County, California*. United States Geological Professional Paper 352E,128.

Castiglioni G. B. – *Geomorfologia*, ed. UTET

Garde R. J. – Ranga Raju K. G. – *Mechanics of Sediment Transportation and Alluvial Stream Problems*, ed. WILEY EASTERN LTD

Graf W. H. – *Fluvial Hydraulics* – LRH Lausanne

Graf W. H. – *Hydraulics of Sediment Transport*, ed. MCGRAW-HILL

Guzzetti F., Carrara A., Cardinali M., Reichenbach P. (1999). *Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy*. *Geomorphology* **31**, 181-216.

Harvey AM. (1997). *The role of alluvial fans in arid zone fluvial-systems*. In: Thomas D.S.G. (ed), *Arid Zone Geomorphology: Process, Form and Change in Drylands*. Wiley & Sons: Chichester, 231–259.

HEC– *River Hydraulics*, USACE

HEC – *Sediment Transport Mechanics*, USACE

Hooke R. LeB. (1968). *Steady-state relationships of arid-region alluvial fans in closed basins*. *American Journal of Science*, **266**, 609-629.

Ricci Lucchi F. – *Sedimentologia*, ed. CLUEB

	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA					
	IDROLOGIA E IDRAULICA Studio di geomorfologia fluviale - Relazione	COMMESSA IQ01	LOTTO 01	CODIFICA R 09 RG	DOCUMENTO ID 0002 001	REV. A

Rinaldi M., Surian N., Comiti F., Bussettini M. (2016): IDRAIM – Sistema di valutazione idromorfologica, analisi e monitoraggio dei corsi d'acqua – ISPRA – Manuali e Linee Guida 131/2016. Roma

Ferrara V. (1993) – *Modificazioni indotte dallo sfruttamento delle acque sotterranee nell'equilibrio idrodinamico e idrochimico dell'acquifero vulcanico dell'Etna*. Memorie della Società Geologica Italiana, **47**, 619-630.

Marchi E. – Rubatta A. – *Meccanica dei fluidi*, ed. UTET

Marchi L., Pasuto A., Tecca P.R. (1993). *Flow processes on alluvial fans in the Eastern Italian Alps*. Z. Geomorph. **4**, 447-458.

Melton M.A.(1965). *The geomorphic and paleoclimatic significance of alluvial deposits in southern Arizona*. *Journal of Geology*, **73**,1-38.

Mergili, M., Schratz, K., Ostermann, A., and Fellin, W. (2012). *Physically based modelling of granular flows with Open Source GIS*, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 12, 187–200, doi:10.5194/nhess-12-187-2012, 2012.

Moisello U. – *Idrologia tecnica*, ed. LA GOLIARDICA PAVESE

Pudasaini, S. P. (2012). *A general two-phase debris flow model*, J. Geophys. Res., 117, F03010, doi:10.1029/2011JF002186, 2012.

Varnes D.J. (1978) – *Slope movement types and processes*. Special Report 176, National Academy of Sciences, Washington.

	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA												
IDROLOGIA E IDRAULICA Studio di geomorfologia fluviale - Relazione	<table border="1"> <thead> <tr> <th>COMMESSA</th> <th>LOTTO</th> <th>CODIFICA</th> <th>DOCUMENTO</th> <th>REV.</th> <th>FOGLIO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>IQ01</td> <td>01</td> <td>R 09 RG</td> <td>ID 0002 001</td> <td>A</td> <td>63 di 63</td> </tr> </tbody> </table>	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO	IQ01	01	R 09 RG	ID 0002 001	A	63 di 63
COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO								
IQ01	01	R 09 RG	ID 0002 001	A	63 di 63								

6 ALLEGATO - SCHEDE DI RILEVAMENTO GEOMORFOLOGICO

Committente ITALFERR S.p.A.

Progetto Quadruplicamento Linea Ferroviaria Tortona - Voghera

Sondaggio			PR1	PR2	PR3	PR4	PR5	PR6	PR7	PR8	PR9
Campione											
Profondità	da m		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	a m		0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
Consistenza	Pen.	kPa									
	Tor.	kPa									
Contenuto naturale d'acqua	Wn	%									
Peso dell'unità di volume	γ	Mg/m ³									
Peso specifico	Gs	Mg/m ³	2,72	2,70	2,72	2,73	2,72	2,72	2,73	2,72	2,70
Limite di liquidità	Wl	%				48,2					
Limite di plasticità	Wp	%				20,6					
Indice di plasticità	Ip					27,6					
Indice di consistenza	Ic										
Limite di ritiro	Wr	%									
Sostanze organiche											
Indice di gruppo	Ig		0	0	0	12	0	0	0	0	0
Classificazione USCS			GW	SM	GM	CL	GP	GW-GM	GP	GP-GM	GP
Classificazione UNI 11531-1			A1-a	A4	A2-4	A7-6	A1-a	A1-a	A1-a	A1-a	A1-a
Analisi granulometrica	% ciottoli + massi										
	% Ghiaia		80,9	14,7	67,6	23,9	81,5	66,3	87,3	82,1	85,9
	% Sabbia		15,5	43,2	6,3	19,2	14,4	28,3	9,9	12,5	11,9
	% Limo		3,6	42,1	26,1	41,9	4,1	5,4	2,8	5,4	2,2
	% Argilla					15					
Prova Costipamento Proctor Modificato	γ_{dmax}	Mg/m ³									
	W_{opt} (%)	%									
Prova Edometrica	C_v (σ 100 kPa)	m ² /s x10 ⁻⁸									
	C_v (σ 200 kPa)	m ² /s x10 ⁻⁸									
	C_v (σ 400 kPa)	m ² /s x10 ⁻⁶									
	K (σ 100 kPa)	m/s x10 ⁻¹¹									
	K (σ 200 kPa)	m/s x10 ⁻¹¹									
	K (σ 400 kPa)	m/s x10 ⁻¹¹									
	Cc										
Pressione di Rigonfiamento	σ'_s	kPa									
Deformazione di Rigonfiamento	σ'_v	kPa									
	% def.	%									
Prova di taglio diretto (DS)	ϕ'	(°)									
	c'	kPa									
	ϕ_r	(°)									
	c_r	kPa									
Prova triassiale (TxUU)	c_{u1}	kPa									
	c_{u2}	kPa									
	c_{u3}	kPa									
Prova triassiale (TxCIU)	ϕ'	(°)									
	c'	kPa									



VICENZETTO S.r.l. Via Marconi 8 35040 Villa Estense (PD) - Tel. 0429-91798 - Fax 0429-91200 - info@vicenzetto.it - P.IVA 01391790282
 Laboratorio in concessione effettuazione e certificazione di prove geotecniche di laboratorio (sett.a) DPR 380/01 - CIRC. n. 7618/STC/2010

Committente ITALFERR

Cantiere Quadruplicamento Linea Ferroviaria Tortona - Voghera

Sondaggio - Campione PR1 Profondità (m) 0,00 - 0,50

Data arrivo campione 12/06/2020 Data esecuzione foto 19/06/2020

Verbale di accettazione campioni n° A057/20



Descrizione geotecnica del campione:

Ghiaia, sabbiosa, grigia.

Prove eseguite

- Contenuto naturale d'acqua
- Peso dell'unità di volume
- Limiti di Atterberg
- Peso specifico assoluto dei grani
- Analisi granulometrica per vagliatura meccanica
- Analisi granulometrica per sedimentazione
- Taglio diretto

Note:

Data ago-20 Sperimentatore: Dott. Geol. P. Greggio *PG*

Direttore: Dott. Geol. T. Vicenzetto *TV*



VICENZETTO S.r.l. Via Marconi 8 35040 Villa Estense (PD) - Tel. 0429-91798 - Fax 0429-91200 - info@vicenzetto.it - P.IVA 01391790282
 Laboratorio in concessione effettuazione e certificazione di prove geotecniche di laboratorio (sett.a) DPR 380/01 - CIRC. n. 7618/STC/2010

vicenzetto	DETERMINAZIONE DELLA MASSA		COMM 073cm20 R. 00
	VOLUMICA DEI GRANULI		PAG. 1 DI 1
Committente	ITALFERR		
Cantiere	Quadruplicamento Linea Ferroviaria Tortona - Voghera		
Data arrivo campione	12/06/2020	Data esecuzione prova	24/06/2020
Certificato n°	A35877	Verbale di accettazione campioni n°	A057/20

Norma CEN ISO/TS 17892-3

Sondaggio	-	
Campione	PR1	
Profondità	0,00 - 0,50	
Massa volumica dei grani	ρ_s Mg/m ³	2,72

Note: _____

Data	ago-20	Sperimentatore: Dott. Geol. P. Greggio	Direttore: Dott. Geol. T. Vicenzetto
------	--------	--	--------------------------------------



Committente ITALFERR

Cantiere Quadruplicamento Linea Ferroviaria Tortona - Voghera

Sondaggio - Campione PR2 Profondità (m) 0,00 - 0,50

Data arrivo campione 12/06/2020 Data esecuzione foto 19/06/2020

Verbale di accettazione campioni n° A057/20



Descrizione geotecnica del campione:

Sabbia, con limo, ghiaiosa, grigia.

Prove eseguite

- Contenuto naturale d'acqua
- Peso dell'unità di volume
- Limiti di Atterberg
- Peso specifico assoluto dei grani
- Analisi granulometrica per vagliatura meccanica
- Analisi granulometrica per sedimentazione
- Taglio diretto

Note:

Data ago-20

Sperimentatore: Dott. Geol. P. Greggio *PG*

Direttore: Dott. Geol. T. Vicenzetto *TV*



VICENZETTO S.r.l. Via Marconi 8 35040 Villa Estense (PD) - Tel. 0429-91798 - Fax 0429-91200 - info@vicenzetto.it - P.IVA 01391790282
 Laboratorio in concessione effettuazione e certificazione di prove geotecniche di laboratorio (sett.a) DPR 380/01 - CIRC. n. 7618/STC/2010

vicenzetto	DETERMINAZIONE DELLA MASSA		COMM	073cm20	R.	OO
	VOLUMICA DEI GRANULI		PAG.	1	DI	1
Committente	ITALFERR					
Cantiere	Quadruplicamento Linea Ferroviaria Tortona - Voghera					
Data arrivo campione	12/06/2020	Data esecuzione prova	24/06/2020			
Certificato n°	A35879	Verbale di accettazione campioni n°	A057/20			

Norma CEN ISO/TS 17892-3

Sondaggio	-		
Campione	PR2		
Profondità	0,00 - 0,50		
Massa volumica dei grani	ρ_s	Mg/m^3	2,70

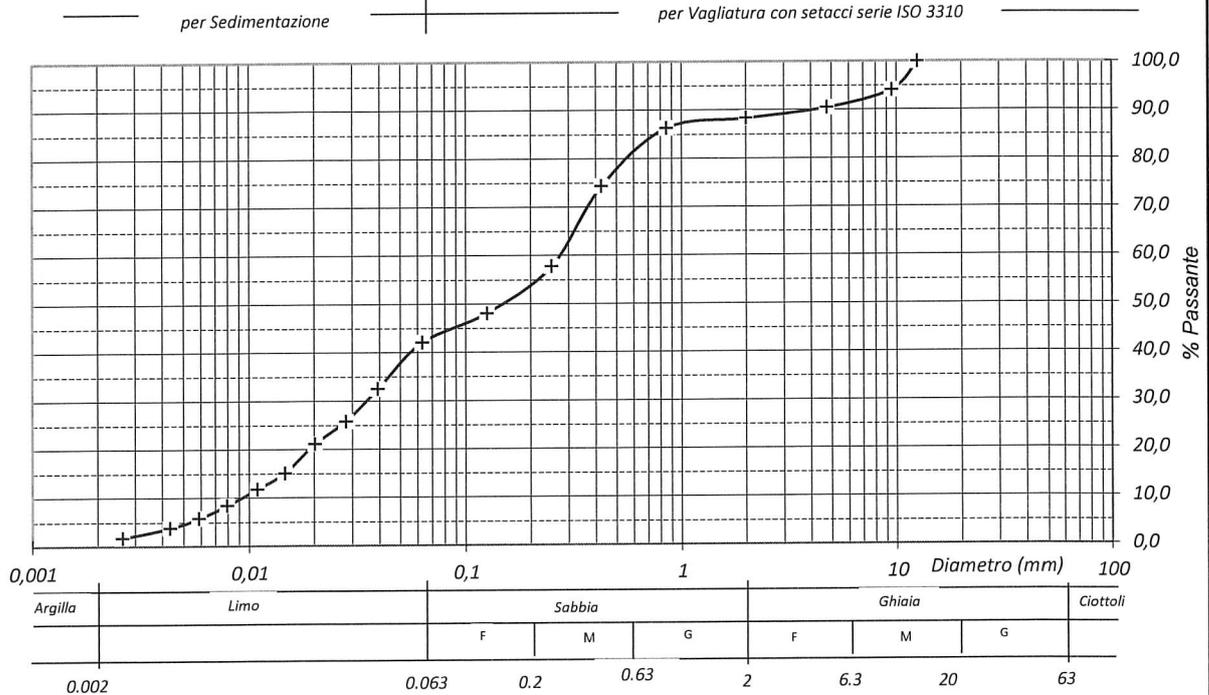
Note: _____

Data	ago-20	Sperimentatore: Dott. Geol. P. Greggio	8	Direttore: Dott. Geol. T. Vicenzetto
------	--------	--	---	--------------------------------------



Committente ITALFERR
Progetto Quadruplicamento Linea Ferroviaria Tortona - Voghera
Sondaggio - **Campione** PR2 **Profondità (m)** 0,00 - 0,50
Certificato n° A35880 **Verbale di accettazione campioni n°** A057/20
Data arrivo campione 12/06/2020 **Data esecuzione prova** 19-23/06/2020

Curva Granulometrica



Analisi granulometrica per vagliatura per via secca per via umida

Analisi granulometrica per sedimentazione metodo con densimetro
metodo con pipetta Andreasen

Peso campione analizzato 759,6 (gr) Massa volumica dei grani
valore assunto $\rho_s = 2,70 \text{ Mg/m}^3$
valore determinato

Classificazione USCS SM **Classificazione UNI11531-1** A4

Analisi granulometrica per vagliatura	
Diametro vaglio (mm)	Percentuale passante (%)
100	
75	
50	
37,50	
25,00	
19,00	
12,50	100,0
9,50	94,1
4,75	90,5
2,00	88,3
0,850	86,3
0,425	74,3
0,250	57,8
0,125	48,1
0,063	42,1

Analisi granulometrica per sedimentazione	
Diametro (mm)	Percentuale pass. (%)
0,039277856	32,5
0,02800863	25,8
0,020133306	21,1
0,014577594	15,1
0,010889444	11,8
0,007923734	8,4
0,005866667	5,7
0,004330704	3,7
0,002600276	1,7
0,001396225	-



VICENZETTO S.r.l. Via Marconi 8 35040 Villa Estense (PD) - Tel. 0429-91798 - Fax 0429-91200 - info@vicenzetto.it - P.IVA 01391790282
 Laboratorio in concessione effettuazione e certificazione di prove geotecniche di laboratorio (sett.a) DPR 380/01 - CIRC. n. 7618/STC/2010

Data ago-20 Sperimentatore : Dott. Geol. P. Greggio Direttore Dott. Geol. T. Vicenzetto

Committente ITALFERR

Cantiere Quadruplicamento Linea Ferroviaria Tortona - Voghera

Sondaggio - Campione PR3 Profondità (m) 0,00 - 0,50

Data arrivo campione 12/06/2020 Data esecuzione foto 19/06/2020

Verbale di accettazione campioni n° A057/20



Descrizione geotecnica del campione:

Ghiaia, con limo, debolmente sabbiosa, marrone.

Prove eseguite

- Contenuto naturale d'acqua
- Peso dell'unità di volume
- Limiti di Atterberg
- Peso specifico assoluto dei grani
- Analisi granulometrica per vagliatura meccanica
- Analisi granulometrica per sedimentazione
- Taglio diretto

Note:

Data ago-20

Sperimentatore: Dott. Geol. P. Greggio

Direttore: Dott. Geol. T. Vicenzetto



VICENZETTO S.r.l. Via Marconi 8 35040 Villa Estense (PD) - Tel. 0429-91798 - Fax 0429-91200 - info@vicenzetto.it - P.IVA 01391790282
 Laboratorio in concessione effettuazione e certificazione di prove geotecniche di laboratorio (sett.a) DPR 380/01 - CIRC. n. 7618/STC/2010

vicenzetto	DETERMINAZIONE DELLA MASSA		COMM	073cm20	R.	OO
	VOLUMICA DEI GRANULI		PAG.	1	DI	1
Committente ITALFERR						
Cantiere Quadruplicamento Linea Ferroviaria Tortona - Voghera						
Data arrivo campione			12/06/2020	Data esecuzione prova		24/06/2020
Certificato n°			A35881	Verbale di accettazione campioni n°		A057/20

Norma CEN ISO/TS 17892-3

Sondaggio	-		
Campione	PR3		
Profondità	0,00 - 0,50		
Massa volumica dei grani	ρ_s	Mg/m ³	2,72

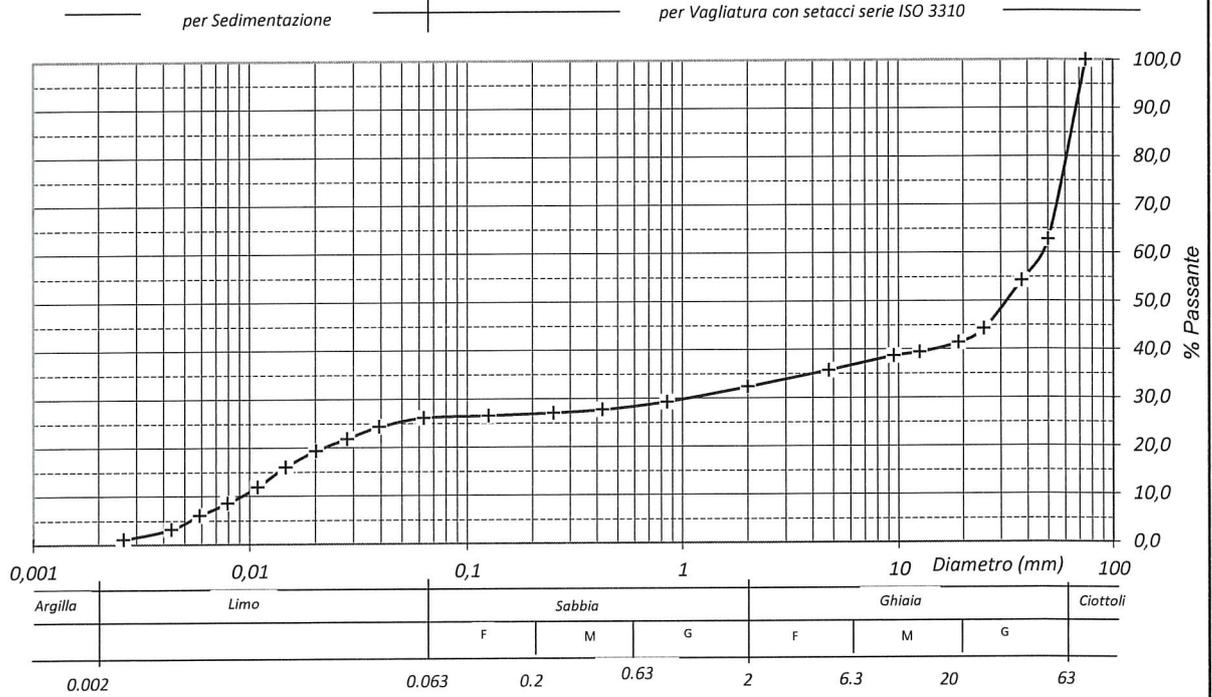
Note: _____

Data ago-20 Sperimentatore: Dott. Geol. P. Greggio  Direttore: Dott. Geol. T. Vicenzetto 



Committente ITALFERR
Progetto Quadruplicamento Linea Ferroviaria Tortona - Voghera
Sondaggio - **Campione** PR3 **Profondità (m)** 0,00 - 0,50
Certificato n° A35882 **Verbale di accettazione campioni n°** A057/20
Data arrivo campione 12/06/2020 **Data esecuzione prova** 19-23/06/2020

Curva Granulometrica



Analisi granulometrica per vagliatura per via secca per via umida

Analisi granulometrica per sedimentazione metodo con densimetro
 metodo con pipetta Andreasen

Peso campione analizzato 2293,4 (gr) Massa volumica dei grani
 valore assunto valore determinato $\rho_s = 2,72 \text{ Mg/m}^3$

Classificazione USCS **GM** **Classificazione UNI11531-1** **A2-4**

Analisi granulometrica per vagliatura	
Diametro vaglio (mm)	Percentuale passante (%)
100	
75	100,0
50	62,8
37,50	54,2
25,00	44,3
19,00	41,4
12,50	39,4
9,50	38,7
4,75	35,7
2,00	32,4
0,850	29,3
0,425	27,7
0,250	27,1
0,125	26,5
0,063	26,1

Analisi granulometrica per sedimentazione	
Diametro (mm)	Percentuale pass. (%)
0,039277856	24,3
0,02800863	21,8
0,020133306	19,3
0,014577594	16,0
0,010889444	11,9
0,007923734	8,5
0,005866667	6,1
0,004330704	3,2
0,002600276	1,1
0,001396225	-

Data ago-20 Sperimentatore : Dott. Geol. P. Greggio Direttore Dott. Geol. T. Vicenzetto

VICENZETTO S.r.l. Via Marconi 8 35040 Villa Estense (PD) - Tel. 0429-91798 - Fax 0429-91200 - info@vicenzetto.it - P.IVA 01391790282
 Laboratorio in concessione effettuazione e certificazione di prove geotecniche di laboratorio (sett.a) DPR 380/01 - CIRC. n. 7618/STC/2010



VICENZETTO S.r.l. Via Marconi, 8 35040 Villa Estense (PD) - Tel. 0429-91798 - Fax 0429-91200 - info@vicenzetto.it - P.IVA 01391790282
Laboratorio in concessione effettuazione e certificazione di prove geotecniche di laboratorio DPR 380/01 - CIRC. n. 7618/STC/2010

vicenzetto

Fotografia del Campione

COMM. 073cm20 R. OO
PAG. 1 DI 1

Committente ITALFERR

Cantiere Quadruplicamento Linea Ferroviaria Tortona - Voghera

Sondaggio - Campione PR4 Profondità (m) 0,00 - 0,50

Data arrivo campione 12/06/2020 Data esecuzione foto 19/06/2020

Verbale di accettazione campioni n° A057/20



Descrizione geotecnica del campione:

Argilla, con ghiaia, sabbiosa, debolmente limosa, marrone.

Prove eseguite

- Contenuto naturale d'acqua
- Peso dell'unità di volume
- Limiti di Atterberg
- Peso specifico assoluto dei grani
- Analisi granulometrica per vagliatura meccanica
- Analisi granulometrica per sedimentazione
- Taglio diretto

Note:

Data ago-20

Sperimentatore: Dott. Geol. P. Greggio *B*

Direttore: Dott. Geol. T. Vicenzetto *th*



vicenzetto	DETERMINAZIONE DELLA MASSA		COMM	073cm20	R.	OO
	VOLUMICA DEI GRANULI		PAG.	1	DI	1
Committente	ITALFERR					
Cantiere	Quadruplicamento Linea Ferroviaria Tortona - Voghera					
Data arrivo campione	12/06/2020	Data esecuzione prova	24/06/2020			
Certificato n°	A35883	Verbale di accettazione campioni n°	A057/20			

Norma CEN ISO/TS 17892-3

Sondaggio	-		
Campione	PR4		
Profondità	0,00 - 0,50		
Massa volumica dei grani	ρ_s	Mg/m ³	2,73

Note:

Data ago-20 Sperimentatore: Dott. Geol. P. Greggio Direttore: Dott. Geol. T. Vicenzetto



VICENZETTO S.r.l. Via Marconi 8 35040 Villa Estense (PD) - Tel. 0429-91798 - Fax 0429-91200 - info@vicenzetto.it - P.IVA 01391790282
 Laboratorio in concessione effettuazione e certificazione di prove geotecniche di laboratorio (sett.a) DPR 380/01 - CIRC. n. 7618/STC/2010

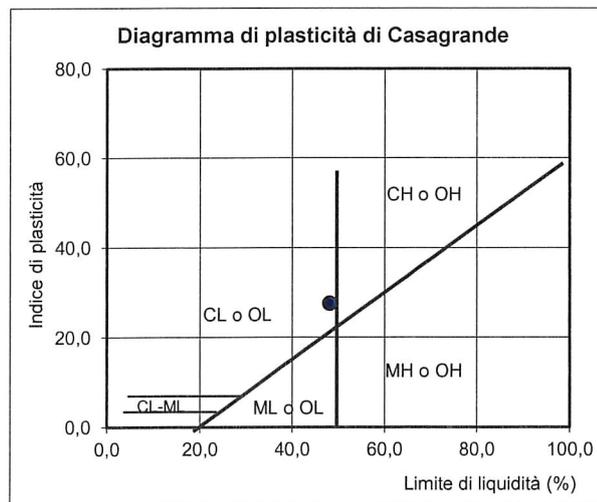
vicenzetto	DETERMINAZIONE DEI LIMITI DI ATTERBERG		COMM 073cm20 R. OO
			PAG. 1 DI 1
Committente	ITALFERR		
Cantiere	Quadruplicamento Linea Ferroviaria Tortona - Voghera		
Data arrivo campione	12/06/2020	Data esecuzione prova	22/06/2020
Certificato n°	A35884	Verbale di accettazione campioni n°	A057/20

Norma CEN ISO/TS 17892-12

Sondaggio	-
Campione	PR4
Profondità	0,00 - 0,50

Prova eseguita su campione	allo stato naturale	<input type="checkbox"/>
	su passante al vaglio 0.425 mm	<input checked="" type="checkbox"/>
Uso di carta assorbente	<input checked="" type="checkbox"/>	passante al vaglio 0.425 mm (%)
Determinazione Limite di liquidità	apparecchio di Casagrande	<input checked="" type="checkbox"/>
	penetrometro a cono	<input type="checkbox"/>

Limite di Liquidità	W_L	(%)	48,2
Limite di plasticità	W_P	(%)	20,6
Indice di plasticità	I_P		27,6
Indice di liquidità	I_L		



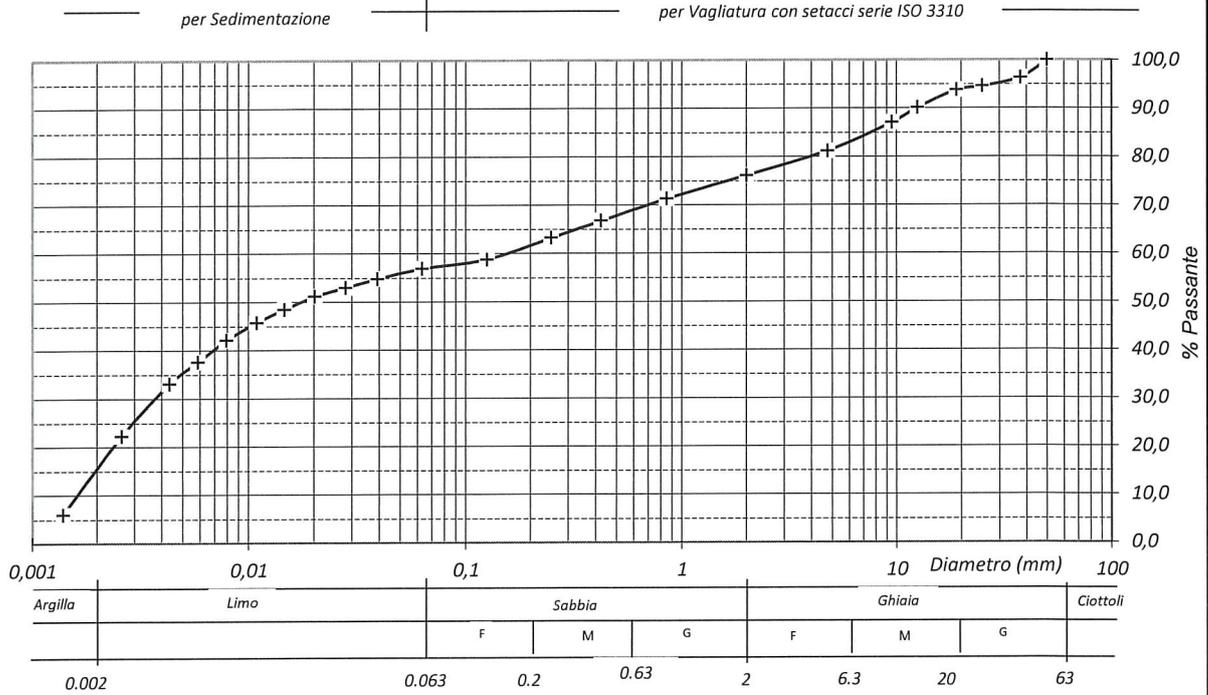
Note:

Data ago-20 Sperimentatore: Dott. Geol. P. Greggio Direttore: Dott. Geol. T. Vicenzetto



Committente ITALFERR
Progetto Quadruplicamento Linea Ferroviaria Tortona - Voghera
Sondaggio - **Campione** PR4 **Profondità (m)** 0,00 - 0,50
Certificato n° A35885 **Verbale di accettazione campioni n°** A057/20
Data arrivo campione 12/06/2020 **Data esecuzione prova** 19-23/06/2020

Curva Granulometrica



Analisi granulometrica per vagliatura		per via secca <input type="checkbox"/>	per via umida <input checked="" type="checkbox"/>
Analisi granulometrica per sedimentazione		metodo con densimetro <input checked="" type="checkbox"/>	metodo con pipetta Andreasen <input type="checkbox"/>
Peso campione analizzato	1015,8 (gr)	Massa volumica dei grani	
		valore assunto <input type="checkbox"/>	$\rho_s = 2,73 \text{ Mg/m}^3$
		valore determinato <input checked="" type="checkbox"/>	
Classificazione USCS	CL	Classificazione UNI11531-1	A7-6

Analisi granulometrica per vagliatura	
Diametro vaglio (mm)	Percentuale passante (%)
100	
75	
50	100,0
37,50	96,4
25,00	94,6
19,00	93,8
12,50	90,1
9,50	87,1
4,75	81,2
2,00	76,1
0,850	71,3
0,425	66,8
0,250	63,3
0,125	58,8
0,063	56,9

Analisi granulometrica per sedimentazione	
Diametro (mm)	Percentuale pass. (%)
0,039277856	54,8
0,02800863	53,0
0,020133306	51,2
0,014577594	48,5
0,010889444	45,7
0,007923734	42,1
0,005866667	37,6
0,004330704	33,1
0,002600276	22,2
0,001396225	6,0



Data ago-20 Sperimentatore : Dott. Geol. P. Greggio Direttore Dott. Geol. T. Vicenzetto

Committente ITALFERR

Cantiere Quadruplicamento Linea Ferroviaria Tortona - Voghera

Sondaggio - Campione PR5 Profondità (m) 0,00 - 0,50

Data arrivo campione 12/06/2020 Data esecuzione foto 19/06/2020

Verbale di accettazione campioni n° A057/20



Descrizione geotecnica del campione:

Ghiaia, sabbiosa, grigio marrone

Prove eseguite

- Contenuto naturale d'acqua
- Peso dell'unità di volume
- Limiti di Atterberg
- Peso specifico assoluto dei grani
- Analisi granulometrica per vagliatura meccanica
- Analisi granulometrica per sedimentazione
- Taglio diretto

Note:

Data ago-20

Sperimentatore: Dott. Geol. P. Greggio *PG*

Direttore: Dott. Geol. T. Vicenzetto *T. Vicenzetto*



vicenzetto	DETERMINAZIONE DELLA MASSA		COMM	073cm20	R. 00
	VOLUMICA DEI GRANULI		PAG.	1	DI 1
Committente ITALFERR					
Cantiere Quadruplicamento Linea Ferroviaria Tortona - Voghera					
Data arrivo campione		12/06/2020	Data esecuzione prova		24/06/2020
Certificato n°		A35886	Verbale di accettazione campioni n°		A057/20

Norma CEN ISO/TS 17892-3

Sondaggio	-		
Campione	PR5		
Profondità	0,00 - 0,50		
Massa volumica dei grani	ρ_s	Mg/m ³	2,72

Note:

Data ago-20 Sperimentatore: Dott. Geol. P. Greggio Direttore: Dott. Geol. T. Vicenzetto



Committente ITALFERR

Cantiere Quadruplicamento Linea Ferroviaria Tortona - Voghera

Sondaggio - Campione PR6 Profondità (m) 0,00 - 0,50

Data arrivo campione 12/06/2020 Data esecuzione foto 19/06/2020

Verbale di accettazione campioni n° A057/20



Descrizione geotecnica del campione:

Ghiaia, con sabbia, debolmente limosa, marrone.

Prove eseguite

- Contenuto naturale d'acqua
- Peso dell'unità di volume
- Limiti di Atterberg
- Peso specifico assoluto dei grani
- Analisi granulometrica per vagliatura meccanica
- Analisi granulometrica per sedimentazione
- Taglio diretto

Note:

Data ago-20

Sperimentatore: Dott. Geol. P. Greggio *PG*

Direttore: Dott. Geol. T. Vicenzetto *TV*



VICENZETTO S.r.l. Via Marconi 8 35040 Villa Estense (PD) - Tel. 0429-91798 - Fax 0429-91200 - info@vicenzetto.it - P.IVA 01391790282
 Laboratorio in concessione effettuazione e certificazione di prove geotecniche di laboratorio (sett.a) DPR 380/01 - CIRC. n. 7618/STC/2010

vicenzetto	DETERMINAZIONE DELLA MASSA		COMM	073cm20	R.	OO
	VOLUMICA DEI GRANULI		PAG.	1	DI	1
Committente <u>ITALFERR</u>						
Cantiere <u>Quadruplicamento Linea Ferroviaria Tortona - Voghera</u>						
Data arrivo campione <u>12/06/2020</u>			Data esecuzione prova <u>24/06/2020</u>			
Certificato n° <u>A35894</u>			Verbale di accettazione campioni n° <u>A057/20</u>			

Norma CEN ISO/TS 17892-3

Sondaggio	-		
Campione	PR6		
Profondità	0,00 - 0,50		
Massa volumica dei grani	ρ_s	Mg/m ³	2,72

Note:

Data ago-20 Sperimentatore: Dott. Geol. P. Greggio  Direttore: Dott. Geol. T. Vicenzetto 



Committente ITALFERR

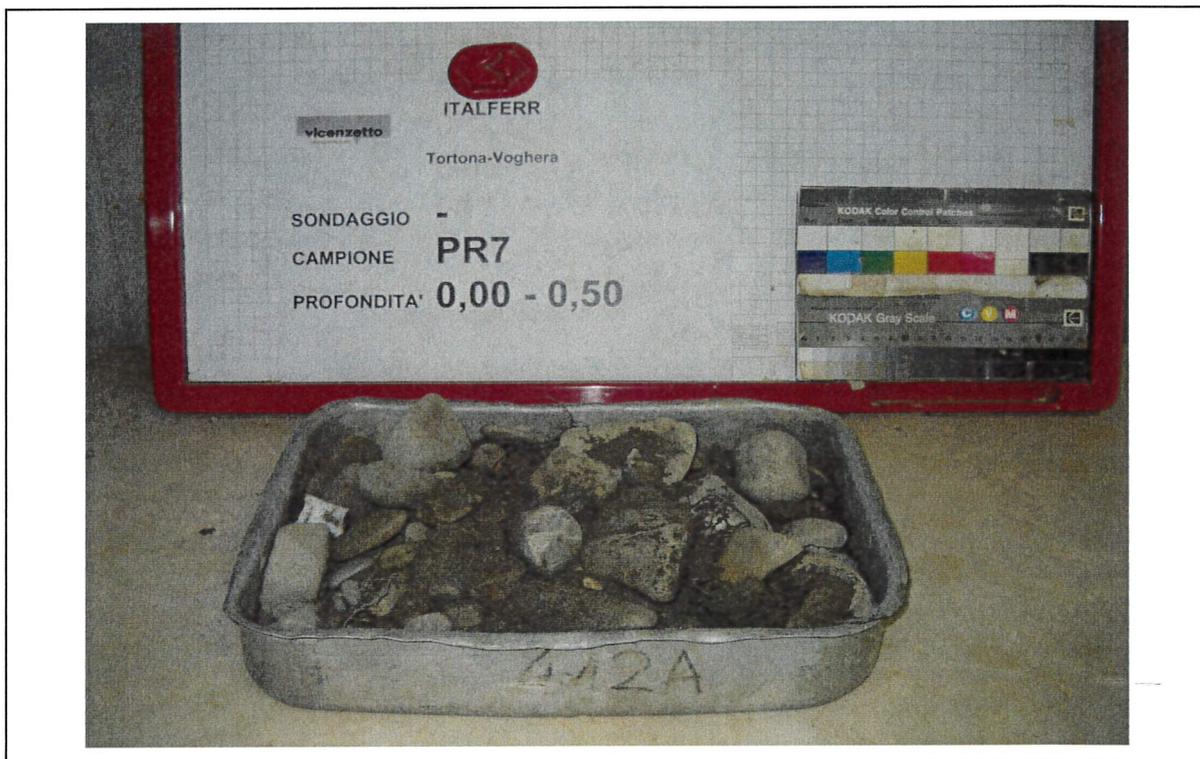
Cantiere Quadruplicamento Linea Ferroviaria Tortona - Voghera

Sondaggio - Campione PR7 Profondità (m) 0,00 - 0,50

Data arrivo campione 12/06/2020 Data esecuzione foto 19/06/2020

Verbale di accettazione campioni n° A057/20

VICENZETTO S.r.l. Via Marconi, 8 35040 Villa Estense (PD) - Tel. 0429-91798 - Fax 0429-91200 - info@vicenzetto.it - P.IVA 01391790282
 Laboratorio in concessione effettuazione e certificazione di prove geotecniche di laboratorio DPR 380/01 - CIRC. n. 7618/STC/2010



Descrizione geotecnica del campione:

Ghiaia, debolmente sabbiosa, grigia e marrone.

Prove eseguite

- Contenuto naturale d'acqua
- Peso dell'unità di volume
- Limiti di Atterberg
- Peso specifico assoluto dei grani
- Analisi granulometrica per vagliatura meccanica
- Analisi granulometrica per sedimentazione
- Taglio diretto

Note:

Data ago-20 | Sperimentatore: Dott. Geol. P. Greggio *PG* | Direttore: Dott. Geol. T. Vicenzetto *TV*



VICENZETTO S.r.l. Via Marconi 8 35040 Villa Estense (PD) - Tel. 0429-91798 - Fax 0429-91200 - info@vicenzetto.it - P.IVA 01391790282
Laboratorio in concessione effettuazione e certificazione di prove geotecniche di laboratorio (sett.a) DPR 380/01 - CIRC. n. 7618/STC/2010

vicenzetto

**DETERMINAZIONE DELLA MASSA
VOLUMICA DEI GRANULI**

COMM 073cm20 R. OO

PAG. 1 DI 1

Committente ITALFERR

Cantiere Quadruplicamento Linea Ferroviaria Tortona - Voghera

Data arrivo campione 12/06/2020 Data esecuzione prova 24/06/2020

Certificato n° A35896 Verbale di accettazione campioni n° A057/20

Norma CEN ISO/TS 17892-3

Sondaggio	-
Campione	PR7
Profondità	0,00 - 0,50
Massa volumica dei grani	ρ_s Mg/m ³ 2,73

Note:

Data ago-20

Sperimentatore: Dott. Geol. P. Greggio

Direttore: Dott. Geol. T. Vicenzetto



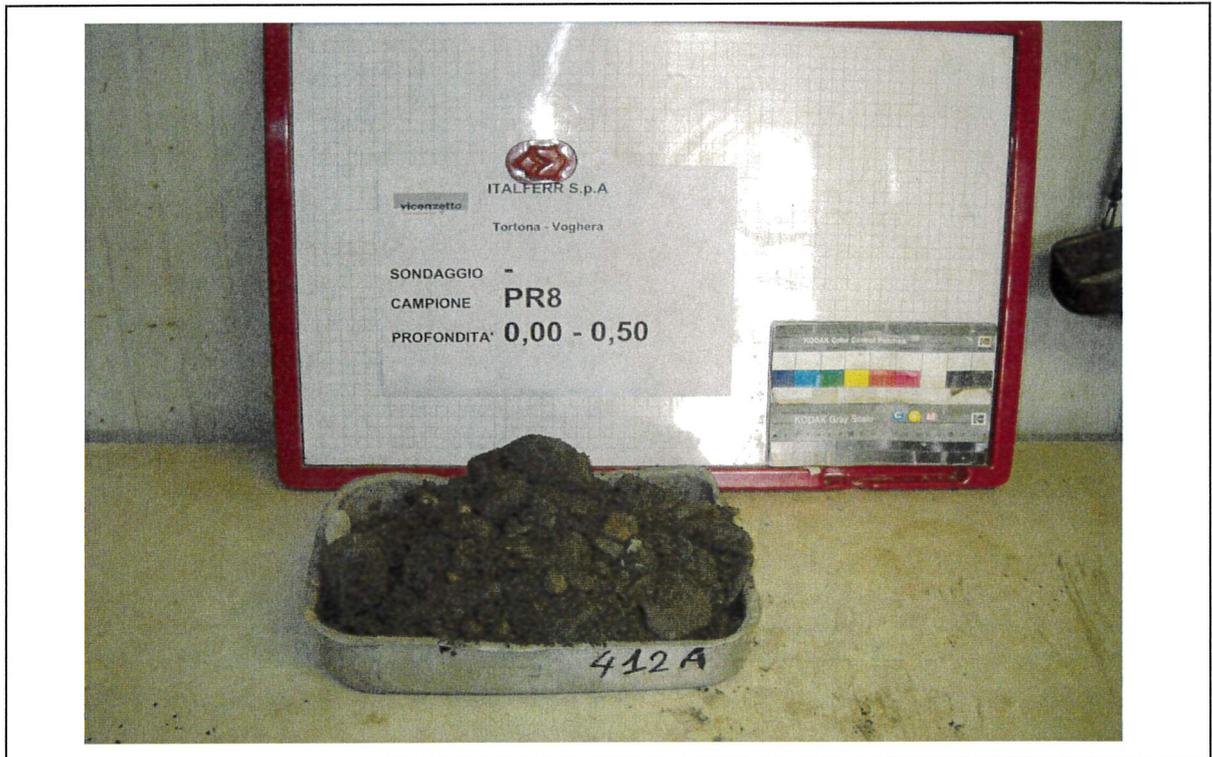
Committente ITALFERR

Cantiere Quadruplicamento Linea Ferroviaria Tortona - Voghera

Sondaggio - Campione PR8 Profondità (m) 0,00 - 0,50

Data arrivo campione 12/06/2020 Data esecuzione foto 19/06/2020

Verbale di accettazione campioni n° A057/20



Descrizione geotecnica del campione:

Ghiaia, sabbiosa, debolmente limosa, grigio marrone.

Prove eseguite

- Contenuto naturale d'acqua
- Peso dell'unità di volume
- Limiti di Atterberg
- Peso specifico assoluto dei grani
- Analisi granulometrica per vagliatura meccanica
- Analisi granulometrica per sedimentazione
- Taglio diretto

Note:

Data ago-20 Sperimentatore: Dott. Geol. P. Greggio

Direttore: Dott. Geol. T. Vicenzetto



VICENZETTO S.r.l. Via Marconi 8 35040 Villa Estense (PD) - Tel. 0429-91798 - Fax 0429-91200 - info@vicenzetto.it - P.IVA 01391790282
Laboratorio in concessione effettuazione e certificazione di prove geotecniche di laboratorio (sett.a) DPR 380/01 - CIRC. n. 7618/STC/2010

vicenzetto	DETERMINAZIONE DELLA MASSA VOLUMICA DEI GRANULI	COMM 073cm20 R. 00
		PAG. 1 DI 1
Committente	ITALFERR	
Cantiere	Quadruplicamento Linea Ferroviaria Tortona - Voghera	
Data arrivo campione	12/06/2020	Data esecuzione prova 24/06/2020
Certificato n°	A35888	Verbale di accettazione campioni n° A057/20

Norma CEN ISO/TS 17892-3

Sondaggio			-
Campione			PR8
Profondità			0,00 - 0,50
Massa volumica dei grani	ρ_s	Mg/m ³	2,72

Note:

Data ago-20 Sperimentatore: Dott. Geol. P. Greggio  Direttore: Dott. Geol. T. Vicenzetto 



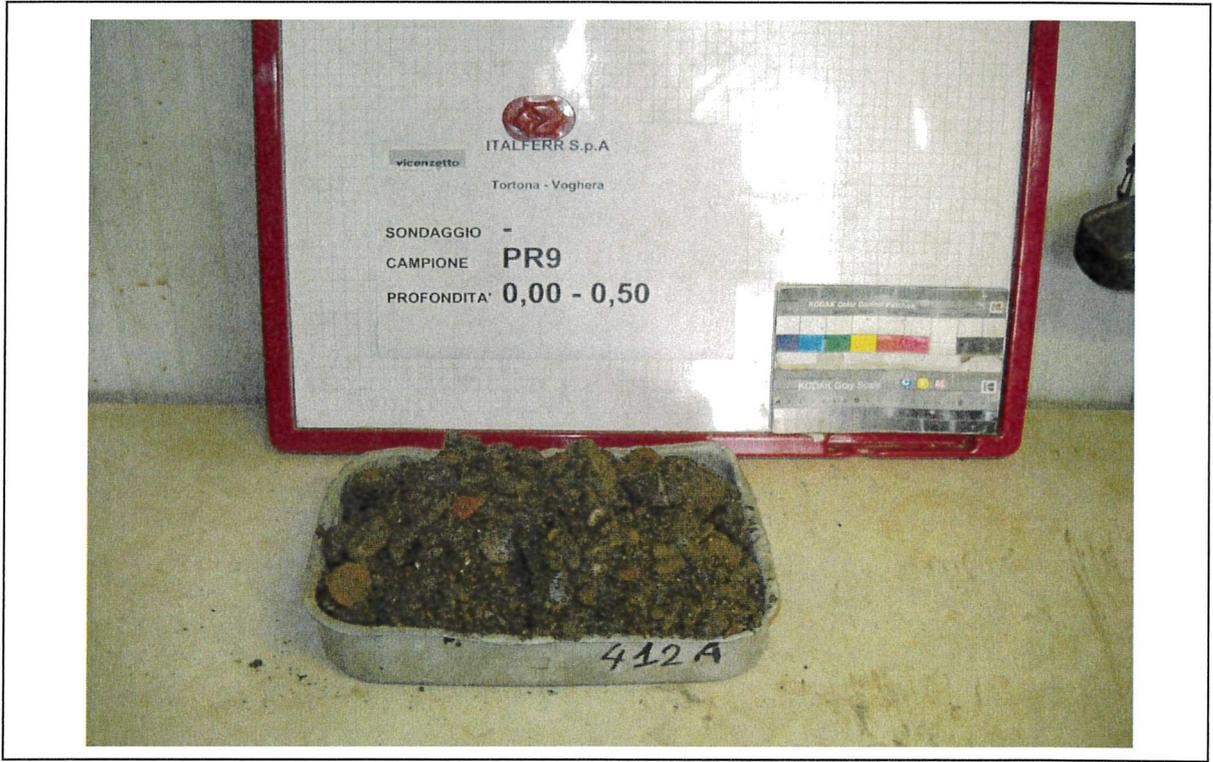
VICENZETTO S.r.l. Via Marconi, 8 35040 Villa Estense (PD) - Tel. 0429-91798 - Fax 0429-91200 - info@vicenzetto.it - P.IVA 01391790282
Laboratorio in concessione effettuazione e certificazione di prove geotecniche di laboratorio DPR 380/01 - CIRC. n. 7618/STC/2010

vicenzetto

Fotografia del Campione

COMM. 073cm20 R. OO
PAG. 1 DI 1

Committente ITALFERR
Cantiere Quadruplicamento Linea Ferroviaria Tortona - Voghera
Sondaggio - **Campione** PR9 **Profondità (m)** 0,00 - 0,50
Data arrivo campione 12/06/2020 **Data esecuzione foto** 19/06/2020
Verbale di accettazione campioni n° A057/20



Descrizione geotecnica del campione:

Ghiaia, sabbiosa, marrone.

Prove eseguite

- Contenuto naturale d'acqua
- Peso dell'unità di volume
- Limiti di Atterberg
- Peso specifico assoluto dei grani
- Analisi granulometrica per vagliatura meccanica
- Analisi granulometrica per sedimentazione
- Taglio diretto

Note:

Data ago-20 Sperimentatore: Dott. Geol. P. Greggio *PG* Direttore: Dott. Geol. T. Vicenzetto *T*



VICENZETTO S.r.l. Via Marconi 8 35040 Villa Estense (PD) - Tel. 0429-91798 - Fax 0429-91200 - info@vicenzetto.it - P.IVA 01391790282
 Laboratorio in concessione effettuazione e certificazione di prove geotecniche di laboratorio (sett.a) DPR 380/01 - CIRC. n. 7618/STC/2010

vicenzetto	DETERMINAZIONE DELLA MASSA		COMM	073cm20	R. OO
	VOLUMICA DEI GRANULI		PAG.	1	DI 1
Committente <u>ITALFERR</u>					
Cantiere <u>Quadruplicamento Linea Ferroviaria Tortona - Voghera</u>					
Data arrivo campione <u>12/06/2020</u>		Data esecuzione prova <u>24/06/2020</u>			
Certificato n° <u>A35890</u>		Verbale di accettazione campioni n° <u>A057/20</u>			

Norma CEN ISO/TS 17892-3

Sondaggio			-
Campione			PR9
Profondità			0,00 - 0,50
Massa volumica dei grani	ρ_s	Mg/m ³	2,70

Note:



Data	ago-20	Sperimentatore: Dott. Geol. P. Greggio	Direttore: Dott. Geol. T. Vicenzetto
------	--------	--	--------------------------------------

Committente ITALFERR

Cantiere Quadruplicamento Linea Ferroviaria Tortona - Voghera

Sondaggio - **Campione** PR10 **Profondità (m)** 0,00 - 0,50

Data arrivo campione 12/06/2020 **Data esecuzione foto** 19/06/2020

Verbale di accettazione campioni n° A057/20



Descrizione geotecnica del campione:

Ghiaia, sabbiosa, limosa, marrone.

Prove eseguite

- Contenuto naturale d'acqua
- Peso dell'unità di volume
- Limiti di Atterberg
- Peso specifico assoluto dei grani
- Analisi granulometrica per vagliatura meccanica
- Analisi granulometrica per sedimentazione
- Taglio diretto

Note:



Data ago-20

Sperimentatore: Dott. Geol. P. Greggio

Direttore: Dott. Geol. F. Vicenzetto

Committente	ITALFERR		
Cantiere	Quadruplicamento Linea Ferroviaria Tortona - Voghera		
Data arrivo campione	12/06/2020	Data esecuzione prova	24/06/2020
Certificato n°	A35892	Verbale di accettazione campioni n°	A057/20

Norma CEN ISO/TS 17892-3

Sondaggio	-		
Campione	PR10		
Profondità	0,00 - 0,50		
Massa volumica dei grani	ρ_s	Mg/m ³	2,70

Note:



