

COMMITTENTE



PROGETTAZIONE



DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO

NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA

U.O. OPERE CIVILI E GESTIONE DELLE VARIANTI

PROGETTO DEFINITIVO

TRATTA DITTAINO – CATENANUOVA (LOTTO 5)

STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE

Relazione

SCALA:

-

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

RS3E 50 D 09 RG ID0002 001 A

Rev.	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Autorizzato	Data
A	EMISSIONE ESECUTIVA	A. Cappelli	dicembre 2019	F. Cabas	dicembre 2019	F. Sgragino	dicembre 2019	A. Vitozzi	dicembre 2019

ITALFERR S.p.A.
 U.O. Opere Civili e Gestione delle Varianti
 Dott. Ing. Angelo Vitozzi
 Ordine degli Ingegneri della Provincia di Roma
 N° A.20783

INDICE

1.	INTRODUZIONE	4
1.1	OBIETTIVI E CONTENUTI DELLO STUDIO	4
1.2	METODOLOGIA DI LAVORO	4
1.3	NORMATIVA DI RIFERIMENTO	5
1.4	DOCUMENTAZIONE DI RIFERIMENTO	8
2.	CARATTERISTICHE DELL'AREA DI STUDIO	8
2.1	INQUADRAMENTO TERRITORIALE DELL'INTERVENTO	8
2.2	AREE A PERICOLOSITÀ GEOMORFOLOGICA	9
2.3	CARATTERISTICHE AMBIENTALI E PAESISTICHE DELLA REGIONE FLUVIALE	11
2.4	ASSETTO GEOMORFOLOGICO DEI CORSI D'ACQUA	11
2.4.1	<i>Assetto dei bacini</i>	11
2.4.2	<i>Assetto dei versanti e propensione al dissesto</i>	12
2.4.3	<i>Metodologia per l'individuazione dei punti di prelievo del materiale d'alveo</i>	12
2.4.4	<i>Caratteristiche granulometriche dei corsi d'acqua minori</i>	14
2.4.5	<i>Indice di Dinamica Morfologica (IDM)</i>	17
2.4.5.1	<i>Metodo IDRAIM</i>	17
2.4.5.2	<i>Applicazione al caso di studio</i>	20
2.5	APPORTO DI SEDIMENTI AL TRATTO DI STUDIO	22
2.5.1	<i>Considerazioni generali</i>	22
2.6	ANDAMENTO DELLE PORTATE LIQUIDE (DI MEDIO PERIODO)	22
3.	VALUTAZIONE DEL TRASPORTO SOLIDO	25
3.1	MODELLI MATEMATICI PER IL TRASPORTO SOLIDO	25
3.1.1	<i>La teoria di Shields per il moto incipiente</i>	25

3.1.4	Formule di Trasporto solido e campo di applicabilità.....	32
3.2	MODELLO DI CALCOLO IDRAULICO A FONDO MOBILE.....	39
3.2.1	HEC-RAS, modulo per il trasporto dei sedimenti.....	39
3.2.1.1	Cenni generali.....	39
3.2.1.2	Funzionamento del programma.....	40
3.2.2	Schematizzazione idraulica adottata.....	42
3.2.2.1	Geometria del modello.....	42
3.2.2.2	Scabrezza idraulica.....	42
3.2.2.3	Condizioni al contorno.....	43
3.2.2.4	Limiti del fondo erodibile.....	45
3.2.2.5	Caratteristiche del cambiamento del fondo alveo.....	47
3.2.2.6	Formula di trasporto solido.....	47
3.2.2.7	Caratterizzazione del mescolamento del fondo alveo.....	47
3.2.2.8	Granulometria del fondo alveo.....	48
3.3	MODALITÀ EVOLUTIVE DELL'ALVEO.....	48
3.3.1	Tendenza all'erosione e alla deposizione.....	48
4.	CONCLUSIONI.....	51
4.1	ANALISI DEL RAPPORTO CON L'OPERA IN PROGETTO.....	51

INDICE DELLE FIGURE

FIGURA 2-1:	INQUADRAMENTO TERRITORIALE DELLA TRATTA IN PROGETTO.....	9
FIGURA 2-2:	AREE A PERICOLOSITÀ GEOMORFOLOGICA (FONTE SITR REGIONE SICILIA, 2018).....	10
FIGURA 2-3:	LEGENDA DELLE AREE A PERICOLOSITÀ GEOMORFOLOGICA.....	10
FIGURA 2-5:	DISTRIBUZIONE TEORICA DELLA GRANULOMETRIA DEI SEDIMENTI IN UNA FORMA DI DEPOSITO.....	13
FIGURA 2-15 –	SCHEMA GENERALE DELLA STRUTTURA DEL METODO IDRAIM.....	18
FIGURA 2-16:	ESTRATTO PTA.....	23
FIGURA 3-1:	SCHEMA DELLE FORZE AGENTI SU UNA PARTICELLA SOLIDA AL FONDO DI UN CORSO D'ACQUA.....	25
FIGURA 3-2:	DIAGRAMMA DI SHIELDS.....	27
FIGURA 3-3:	BILANCIO DI MASSA DEI SEDIMENTI NEL VOLUME DI CONTROLLO.....	29
FIGURA 3-4:	ESEMPIO DELL'INSERIMENTO DEI LIMITI DEL FONDO MOBILE COINCIDENTI CON I LIMITI DEL CANALE PRINCIPALE.....	46
FIGURA 3-5:	ESEMPIO DELL'INSERIMENTO DELLA MASSIMA PROFONDITÀ ERODIBILE.....	46
FIGURA 3-6:	SCHEMA DEL METODO DI MESCOLAMENTO DEL FONDO ALVEO.....	48

INDICE DELLE TABELLE

TABELLA 2.4-2:	CARATTERISTICHE GRANULOMETRICHE DEI CORSI D'ACQUA IN ESAME.....	15
TABELLA 2.4-3 –	LISTA DEGLI INDICATORI PER LA VALUTAZIONE DELL'IDM.....	20

TABELLA 2.4-4 – 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 SICILIA DAGLI ENTI PREPOSTI.....	21
TABELLA 2.6-1: VALORI DI PORTATA MEDIA ADOTTATI	23
TABELLA 3.1-1: LIMITI DI APPLICABILITÀ DELLE FORMULE DI TRASPORTO SOLIDO	33
TABELLA 3.2-1: VALORI DI SCABREZZA ADOTTATI.....	43
TABELLA 3.2-2: VALORI DI PORTATA MODALE SIMULATI.....	43
TABELLA 3.3-1: STIMA DELLA TENDENZA EVOLUTIVA.....	49
TABELLA 4.1-1 – VALORI DELL’INDICE LAM = LIVELLO DI ATTENZIONE PER INTERVENTI DI MANUTENZIONE PROGRAMMATA	52
TABELLA 4.1-2 – VALORI DELL’INDICE LAM = LIVELLO DI ATTENZIONE PER INTERVENTI DI MANUTENZIONE PROGRAMMATA	52
TABELLA 4.1-3: LIVELLO DI ATTENZIONE PER INTERVENTI DI MANUTENZIONE PROGRAMMATA PER I CORSI D’ACQUA IN ESAME	53

 <p>ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p>	<p>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO-CATANIA TRATTA DITTAINO-CATENANUOVA (LOTTO5)</p> <p>PROGETTO DEFINITIVO</p>					
<p>STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE – RELAZIONE</p>	<p>COMMESSA RS3E</p>	<p>LOTTO 50 D 09</p>	<p>CODIFICA RG</p>	<p>DOCUMENTO ID0002 001</p>	<p>REV. A</p>	<p>FOGLIO 4 di 58</p>

1. INTRODUZIONE

1.1 Obiettivi e contenuti dello Studio

La presente Relazione riferisce in merito all'analisi di geomorfologia fluviale relativa ai corsi d'acqua interessati dal Progetto Definitivo del nuovo collegamento Palermo-Catania della tratta PM Palomba-Catenanuova. Lo studio geomorfologico viene condotto con l'obiettivo di valutare la tendenza evolutiva 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, 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 metodologia da seguire per valutare la tendenza evolutiva di un corso d'acqua si può articolare, come svolto nell'ambito del presente studio, sulla combinazione di analisi quali-quantitative basate sui seguenti approcci:

- Caratterizzazione geomorfologica del bacino idrografico, con particolare attenzione ai processi legati alla dinamica fluviale, in particolare per valutare l'entità (anche qualitativamente) dell'apporto di sedimenti dai versanti e dai tratti di monte;
- Caratterizzazione del corso d'acqua di interesse, in base ai seguenti aspetti:
 - Granulometria del materiale d'alveo, con attenzione ai sedimenti movimentabili dalle piene;
 - Valutazione della portata media di riferimento per le analisi di trasporto solido;

- Individuazione delle caratteristiche di dinamica morfologica, secondo le specifiche della metodologia IDRAIM elaborata da ISPRA (Rinaldi et al., 2015), descritta nel seguito al paragrafo 2.5;
- Valutazione del trasporto solido mediante individuazione della formula parametrica di trasporto solido adatta al caso in esame e conseguente implementazione di un modello di calcolo idraulico a fondo mobile (per il presente studio si adotta il noto HEC-RAS versione 5.0.5, attivando l'opportuno modulo per l'analisi dei sedimenti); in particolare, i risultati del modello idraulico a fondo mobile consentono di verificare le opere di attraversamento secondo il seguente schema concettuale:
 - Tendenza all'erosione ⇒ progettazione di opere di protezione dall'erosione, dimensionate con il criterio di impedire lo scalzamento;
 - Tendenza alla deposizione ⇒ progettazione dell'opera di attraversamento in modo che sia garantita l'officiosità idraulica (franco di progetto maggiore del minimo richiesto dalla Normativa);
individuazione delle azioni necessarie al mantenimento del franco idraulico di progetto (interventi di manutenzione);
- Definizione del Livello di Attenzione per interventi di manutenzione programmata (LAm), sulla base dei risultati ottenuti tramite la metodologia IDRAIM e la modellazione idraulica a fondo mobile (conclusioni riportate al paragrafo 4.1).

1.3 Normativa di riferimento

Ai fini del presente studio sono stati consultati i seguenti strumenti normativi:

- Piano Stralcio di Bacino per l'Assetto Idrogeologico della Regione Siciliana;
- Sistema di valutazione geomorfologica, analisi e monitoraggio dei corsi d'acqua – Metodo IDRAIM (ISPRA – Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale)

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO-CATANIA TRATTA DITTAINO-CATENANUOVA (LOTTO5) PROGETTO DEFINITIVO												
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>RS3E</td> <td>50 D 09</td> <td>RG</td> <td>ID0002 001</td> <td>A</td> <td>6 di 58</td> </tr> </tbody> </table>	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO	RS3E	50 D 09	RG	ID0002 001	A	6 di 58
COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO								
RS3E	50 D 09	RG	ID0002 001	A	6 di 58								

Piano Stralcio di Bacino per l'Assetto Idrogeologico

La disamina delle Norme del P.A.I., per quanto attiene agli aspetti geomorfologici, è riportata nella Relazione geologica, idrogeologica, geomorfologica e geologico-tecnica RS3E52D69RGGE0001001B.

Piano di gestione dei sedimenti

Allo stato attuale la Regione Sicilia non si è dotata, in attuazione alla Direttiva per la gestione dei sedimenti, approvata nell'aprile 2006, di un Piano generale di gestione dei sedimenti per i corsi d'acqua regionali.

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) il 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

 <p>ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p>	<p>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO-CATANIA TRATTA DITTAINO-CATENANUOVA (LOTTO5)</p> <p>PROGETTO DEFINITIVO</p>												
<p>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>RS3E</td> <td>50 D 09</td> <td>RG</td> <td>ID0002 001</td> <td>A</td> <td>7 di 58</td> </tr> </tbody> </table>	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO	RS3E	50 D 09	RG	ID0002 001	A	7 di 58
COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO								
RS3E	50 D 09	RG	ID0002 001	A	7 di 58								

stato di riferimento deve corrispondere a condizioni “indisturbate”, caratterizzate da assenza o impatti antropici molto limitati. Conseguentemente, le condizioni di 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).

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO-CATANIA TRATTA DITTAINO-CATENANUOVA (LOTTO5) PROGETTO DEFINITIVO					
	STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE – RELAZIONE	COMMESSA RS3E	LOTTO 50 D 09	CODIFICA RG	DOCUMENTO ID0002 001	REV. A

1.4 Documentazione di riferimento

La documentazione di riferimento è la seguente:

Relazione geologica, idrogeologica, geomorfologica e geologico- tecnica	RS3E50D69RGGE0001001A
Carta geologica con elementi di geomorfologia	RS3E50D69L5GE0001001A RS3E50D69L5GE0001002A RS3E50D69L5GE0001003A RS3E50D69L5GE0001004A
Carta di sintesi dello studio geomorfologico	RS3E50D09G5ID0002001A RS3E50D09G5ID0002002A RS3E50D09G5ID0002003A RS3E50D09G5ID0002004A

2. CARATTERISTICHE DELL'AREA DI STUDIO

2.1 Inquadramento territoriale dell'intervento

L'area interessata dallo studio interessa una fascia di territorio di circa 100 km² situata nell'entroterra siciliano nel territorio della Provincia di Enna, tra Dittaino e Catenanuova, sviluppandosi lungo la valle del Fiume Dittaino.

La seguente Figura 2-1 mostra l'inquadramento territoriale su foto aerea.



Figura 2-1: Inquadramento territoriale della tratta in progetto

2.2 Aree a pericolosità geomorfologica

La carta della Pericolosità e del rischio geomorfologico del Piano di Assetto Idrogeologico della Regione Sicilia (PAI 2005, agg. 2018) riporta le aree a diversa pericolosità di frana, associate appunto ai diversi dissesti censiti. La seguente Figura 2-2 mostra la distribuzione di tali aree nell'ambito di studio preso in considerazione in questa sede. La disamina delle Norme del PAI è riportata nella relazione geologica RS3E50D69RGGE0001001A.



Figura 2-2: Aree a Pericolosità geomorfologica (fonte SITR Regione Sicilia, 2018)

Pericolosità geomorfologica	
Classe di pericolosità	
	P1 – moderata
	P2 – media
	P3 - elevata

Figura 2-3. Legenda delle aree a Pericolosità geomorfologica

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO-CATANIA TRATTA DITTAINO-CATENANUOVA (LOTTO5) PROGETTO DEFINITIVO					
STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE – RELAZIONE	COMMESSA RS3E	LOTTO 50 D 09	CODIFICA RG	DOCUMENTO ID0002 001	REV. A	FOGLIO 11 di 58

2.3 Caratteristiche ambientali e paesistiche della Regione fluviale

Per quel che riguarda gli aspetti ambientali e paesistici, essi non sono rilevanti ai fini del presente studio. Si rimanda allo Studio di Impatto Ambientale per la valutazione di tali aspetti.

2.4 Assetto geomorfologico dei corsi d'acqua

2.4.1 Assetto dei bacini

L'assetto geomorfologico dei bacini dei corsi d'acqua interferiti dalla linea ferroviaria in progetto è desunto dalla caratterizzazione geomorfologica effettuata per il progetto in esame, riportata nell'elaborato RS3E50D69RGGE0001001A di cui di seguito si riportano gli estratti significativi per lo scopo del presente documento.

Sotto il profilo geomorfologico, l'intera area di studio è caratterizzata dalla presenza di movimenti di versante (frane s.s. e deformazioni superficiali lente) e di estesi fenomeni di erosione superficiale, essenzialmente connessi all'assetto geologico-strutturale dell'area e all'evoluzione geomorfologica recente di questo settore di catena.

Nei settori di intervento sono presenti, localmente, dissesti riconducibili sia a fenomeni di deformazione viscosa delle coltri (*creep* e/o soliflusso) che a movimenti franosi s.s.. Si tratta, in buona sostanza, di fenomeni poco estesi e piuttosto superficiali, che coinvolgono generalmente le coltri di copertura eluvio-colluviali o le porzioni più superficiali ed alterate del substrato geologico locale.

In generale, per i tratti all'aperto tali fenomeni di versante non rappresentano degli elementi di particolare criticità per le opere in progetto. Infatti, queste ricadono essenzialmente lungo il fondovalle del F. Dittaino e quindi ad una certa distanza dai dissesti stessi, fuori dall'area d'interferenza diretta. Per i settori di intervento all'aperto sono da segnalare solo sporadiche conoidi di origine alluvionale con stato quiescente o inattivo, localizzate lungo i versanti settentrionali delle colline che bordano verso sud la piana del F. Dittaino, nel settore sud-occidentale dell'area di studio, e lungo i versanti sud-orientali delle colline che bordano verso nord la piana alluvionale del Fiume Dittaino, nel settore centrale dell'area di studio. Gli ambiti di conoide a cui si fa riferimento, dunque, sono relativi a settori di piana alluvionale posti allo sbocco di affluenti minori in sinistra del F. Dittaino.

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO-CATANIA TRATTA DITTAINO-CATENANUOVA (LOTTO5) PROGETTO DEFINITIVO					
STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE – RELAZIONE	COMMESSA RS3E	LOTTO 50 D 09	CODIFICA RG	DOCUMENTO ID0002 001	REV. A	FOGLIO 12 di 58

Gli studi condotti attraverso rilievi diretti e analisi fotointerpretative hanno consentito di classificare tali forme come quiescenti. Si tratta di dunque di forme e processi dovuti alle acque correnti superficiali, con bassa intensità e ridotti tassi di evoluzione, infatti le verifiche mediante analisi fotointerpretativa a scala multi-temporale non hanno evidenziato sostanziali fenomeni di alluvionamento fuori alveo, con trasporto ed accumulo tali da determinare condizioni di criticità per l'intervento. Pertanto, in relazione alle specifiche caratteristiche rilevate, tali settori non rappresentano una condizione ostativa per le opere che risultano compatibili con il contesto di riferimento, ferme restando le indicazioni e caratterizzazione geologiche s.l. fornite e le indispensabili verifiche analitiche e di sicurezza delle opere, condotte e verificate negli elaborati tecnici progettuali specifici.

2.4.2 Assetto dei versanti e propensione al dissesto

L'analisi dell'assetto geomorfologico del bacino del F. Dittaino mostra che i dissesti, presenti sui versanti e sui bacini delle incisioni affluenti al Dittaino, possono alimentare il trasporto solido dei corsi d'acqua; l'analisi della possibile propagazione dei fenomeni di dissesto è riportata nell'elaborato RS3E50D09RGID0002002A.

2.4.3 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 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).

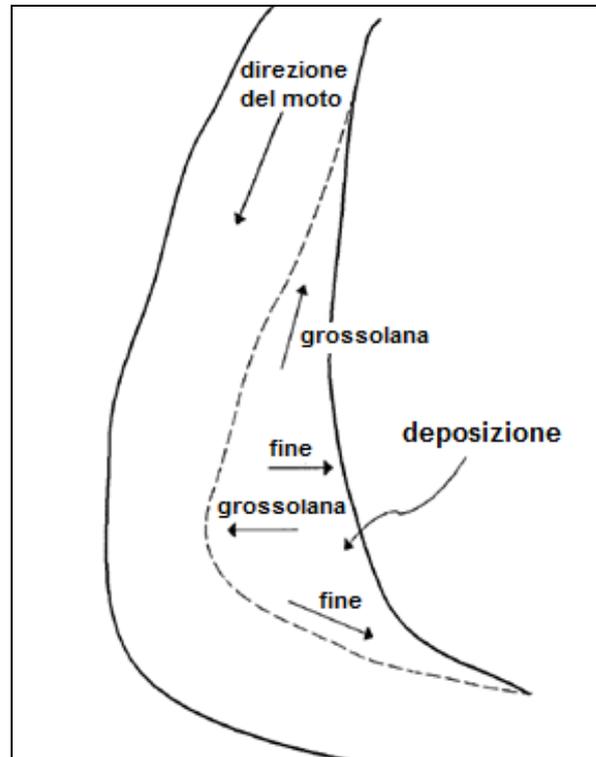


Figura 2-4: distribuzione teorica della granulometria dei sedimenti in una forma di deposito

I fenomeni di trasporto solido presi in considerazione vengono indagati, tra l'altro, con una schematizzazione di calcolo idraulico, descritta nel successivo paragrafo 3.2, 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 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 depositi 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

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO-CATANIA TRATTA DITTAINO-CATENANUOVA (LOTTO5) PROGETTO DEFINITIVO					
STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE – RELAZIONE	COMMESSA RS3E	LOTTO 50 D 09	CODIFICA RG	DOCUMENTO ID0002 001	REV. A	FOGLIO 14 di 58

- 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 2Kg di materiale da collocare in sacchetto da campionamento
 - Classificare il campione in base al codice dell’individuazione del transetto

2.4.4 Caratteristiche granulometriche dei corsi d’acqua minori

I campioni prelevati secondo la metodologia descritta nel precedente paragrafo 2.4.3 sono stati analizzati in laboratorio per la determinazione della curva granulometrica, riportata nelle schede di campionamento (elaborato RS3E50D09SHID0002001A) e sintetizzate nella seguente Tabella 2.4-1, in cui è riportato il diametro caratteristico D_{50} . I corsi d’acqua indagati sono caratterizzati da materiale appartenente alla classe granulometrica delle sabbie fini debolmente ghiaiose.

Tabella 2.4-1: Caratteristiche granulometriche dei corsi d'acqua in esame

Corso d'acqua / Codice bacino	Codice punto di prelievo	D ₅₀ (mm)
A5	PR1	0,004
A7	PR2	0,0015
A8	PR3bis	1,500
A9	PR4	0,00067
A10	PR5	0,070
A11	PR6	0,050
	PR7	0,100
A12	PR8bis	2,000
A16	PR9bis	0,900
A20	PR10	2,01
B06	PR11	0,35
	PR11_bis	0,46
Dittaino	PR13	0,100
B09	PR14	0,65
B11	PR15	0,42
	PR15_bis	0,20
	PR15_ter	1,12
B12	PR16	0,45
B13	PR17	0,1
B15	PR18	0,5

Corso d'acqua / Codice bacino	Codice punto di prelievo	D ₅₀ (mm)
B17	PR19	0,22
B20	PR20	0,2
	PR20_bis	3
B25	PR21	1,18
	PR21_bis	0,25
B27	PR22	0,05
	PR22_bis	5,95
B28	PR23	3,10

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO-CATANIA TRATTA DITTAINO-CATENANUOVA (LOTTO5) PROGETTO DEFINITIVO					
STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE – RELAZIONE	COMMESSA RS3E	LOTTO 50 D 09	CODIFICA RG	DOCUMENTO ID0002 001	REV. A	FOGLIO 17 di 58

2.4.5 *Indice di Dinamica Morfologica (IDM)*

2.4.5.1 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. 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 2-5. 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’analogia 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	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO-CATANIA TRATTA DITTAINO-CATENANUOVA (LOTTO5) PROGETTO DEFINITIVO					
	STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE – RELAZIONE	COMMESSA RS3E	LOTTO 50 D 09	CODIFICA RG	DOCUMENTO ID0002 001	REV. A

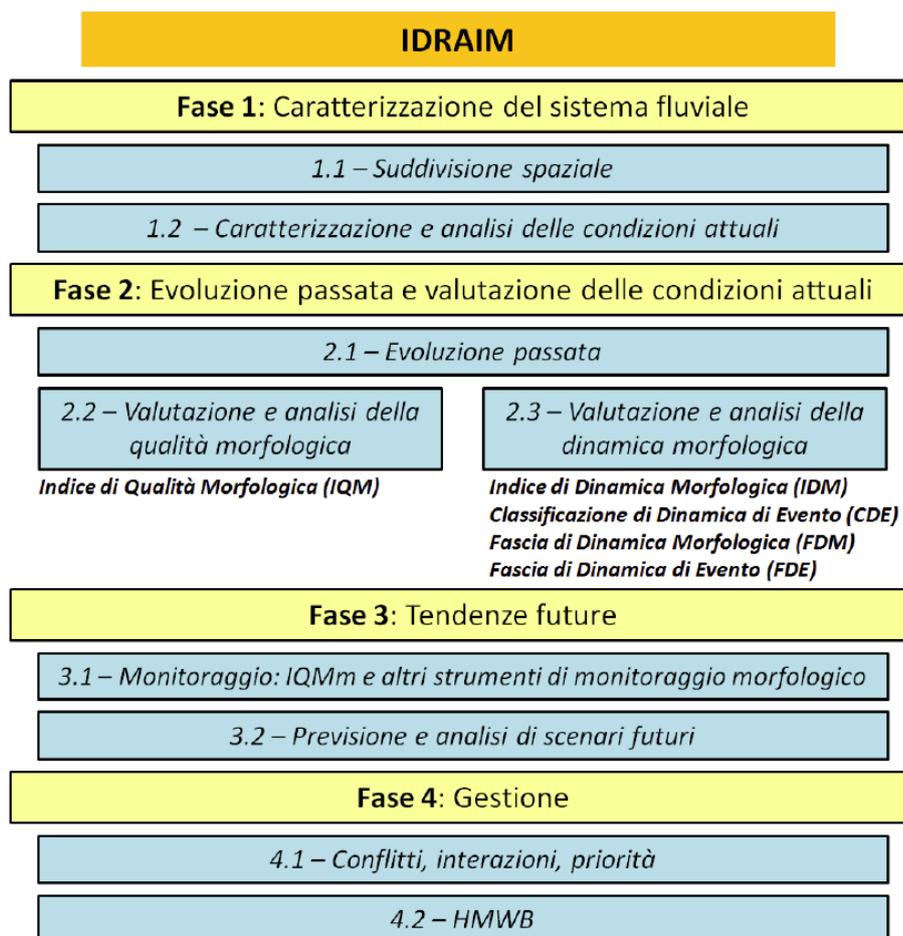


Figura 2-5 – Schema generale della struttura del metodo IDRAIM.

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.

- 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:

- All. [1] **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.
- All. [2] **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.
- All. [3] **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 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 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.).

2.4.5.2 Applicazione al caso 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 2.4-2.

Si precisa che nel caso di studio trattato in questa sede, trattandosi di una applicazione semplificata del metodo, la valutazione degli indicatori della componente "variazioni morfologiche" si è basata su quanto osservato in campo e non sulla base di una analisi storica di dettaglio.

Tabella 2.4-2 – Lista degli indicatori per la valutazione dell'IDM

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

Il risultato dell'applicazione viene riportato in Tabella 2.4-3, precisando che l'applicazione effettuata costituisce un primo tentativo di determinare tale indice e non vuole sostituire alcuna altra applicazione ufficiale svolta in Regione Sicilia dagli Enti preposti (ARPA).

Tabella 2.4-3 – 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 Sicilia dagli Enti preposti.

Codice Bacino	Classe di Dinamica Morfologica				
	Molto bassa	Bassa	Media	Elevata	Molto elevata
A5					
A7					
A8					
A9					
A10					
A11					
A12					
A16					
A20					
B04					
B06					
Dittaino					
B09					
B11					
B12					
B13					
B15					
B17					
B20					
B25					
B27					
B28					

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO-CATANIA TRATTA DITTAINO-CATENANUOVA (LOTTO5) PROGETTO DEFINITIVO					
STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE – RELAZIONE	COMMESSA RS3E	LOTTO 50 D 09	CODIFICA RG	DOCUMENTO ID0002 001	REV. A	FOGLIO 22 di 58

2.5 Apporto di sedimenti al tratto di studio

2.5.1 Considerazioni generali

Sulla base delle analisi condotte ed illustrate nei paragrafi precedenti è possibile correlare, seppur in maniera qualitativa, le dinamiche di versante e del corso d'acqua (IDM semplificato) con le litologie presenti nel bacino, al fine di valutare la dinamica di trasporto solido dei corsi d'acqua oggetto di studio, come meglio descritto nel seguito al capitolo 3. Il Fiume Dittaino ed i suoi affluenti sono caratterizzati da una dinamica morfologica elevata e media, dovuta alla presenza di sponde alluvionali e fondo erodibili per buona parte dei tratti in esame. I bacini sono caratterizzati dalla presenza di dissesti, la cui natura contribuisce all'apporto di materiale solido in alveo.

Si può, quindi, ritenere che vi sia apporto di sedimento ai tratti di studio.

2.6 Andamento delle portate liquide (di medio periodo)

La valutazione del trasporto solido di un corso d'acqua richiede particolare attenzione anche nella scelta dei valori di portata liquida da studiare, ai quali associare la corrispondente portata solida. Durante gli eventi di piena vi è sempre una fase di formazione dell'idrogramma in cui la portata cresce abbastanza rapidamente fino al valore al colmo, tuttavia nei modelli a fondo mobile bisogna considerare che vi sarà trasporto di sedimenti già dall'inizio della fase di crescita dell'idrogramma, con conseguente riassortimento della granulometria rispetto alle condizioni in cui i campioni sono stati prelevati (generalmente durante i periodi di magra, come indicato nel precedente paragrafo 2.4.3). Risulta quindi più opportuno, prima di simulare il trasporto solido al passaggio di un'onda di piena, studiare il comportamento del fiume per le basse portate. Allo scopo è stato consultato il Piano di Tutela delle Acque della Regione Siciliana, che riporta i dati delle stazioni idrometriche di alcuni bacini di interesse. Nell'ambito di studio del presente lavoro è risultato essere strumentato solo il bacino del Rio Sciaguana, affluente in sinistra del F. Dittaino, per cui, dai dati riportati nella seguente Figura 2-6, si è ricavato il valore massimo della portata media mensile per unità di area del bacino sotteso, nel periodo di funzionamento della stazione idrometrica, riscalandolo opportunamente il valore sull'area del bacino dei corsi d'acqua oggetto di studio. Poiché in questo modo, però, si ottengono dei valori di portata estremamente bassi, nel presente studio si è deciso di adottare il valore della portata modale (cfr. Relazione idrologica RS3E50D09RIID0001001A e RS3E50D78RIID0001001A) con una durata costante

pari a 24 ore, valida quest'ultima solamente ai fini delle simulazioni a fondo mobile più avanti descritte.
La seguente Tabella 2.6-1 riporta i valori adottati.

ELEMENTI CARATTERISTICI	VALORI RIASSUNTIVI PER IL PERIODO												
	VALORE MEDIO ANNUO	Gennaio	Febbraio	Marzo	Aprile	Maggio	Giugno	Luglio	Agosto	Settembre	Ottobre	Novembre	Dicembre
Q_{med} [m ³ /s]	0,64	0,06	0,09	0,12	0,03	0,02	0,01	0,01	0,02	0,03	0,05	0,05	0,17
q [l/s]	638,2	64,7	94,2	115,4	33,2	17,5	7,4	11,4	15,7	29,2	49,7	47,6	165,1
Deflusso [mm]	25,5	2,6	3,4	4,6	1,3	0,7	0,3	0,5	0,6	1,1	2,0	1,8	6,6
Aff. met. [mm]	401,2	35,0	41,3	42,9	26,0	9,6	5,2	7,0	19,1	38,8	51,1	54,1	71,3
Perd. app. [mm]	375,7	32,4	37,9	38,2	24,7	8,9	4,9	6,5	18,4	37,7	49,1	52,3	64,7
Coeff. deflusso	0,064	0,074	0,082	0,108	0,050	0,073	0,055	0,066	0,033	0,029	0,039	0,034	0,093

Figura 2-6: estratto PTA

Tabella 2.6-1: Valori di portata media adottati

ID Bacino	Area del bacino (km ²)	Portata modale (m ³ /s)
A5	0,64	3,52
A7	0,13	1,02
A8	9,47	23,56
A9	0,28	2,12
A10	1,27	4,72
A11	1,07	4,19
A12	12,61	25,45
A16	11,14	27,01
A20	0,66	3,84
B04	0,48	2,48
B06	1,05	3,67
Dittaino	480	219
B09	6,19	14,24

ID Bacino	Area del bacino (km ²)	Portata modale (m ³ /s)
B11	4,21	11,60
B12	0,11	0,85
B13	0,48	2,03
B15	1,72	4,81
B17	99,20	85,26
B20	1,29	4,49
B27	2,88	7,08
B28	12,39	18,58

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 Figura 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 .

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

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

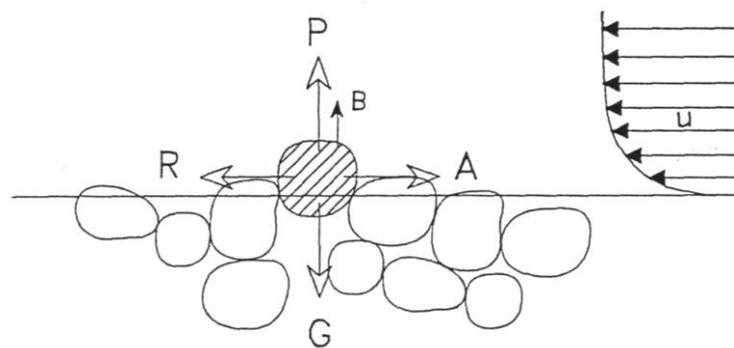


Figura 3-1: Schema delle forze agenti su una particella solida al fondo di un corso d'acqua

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*.

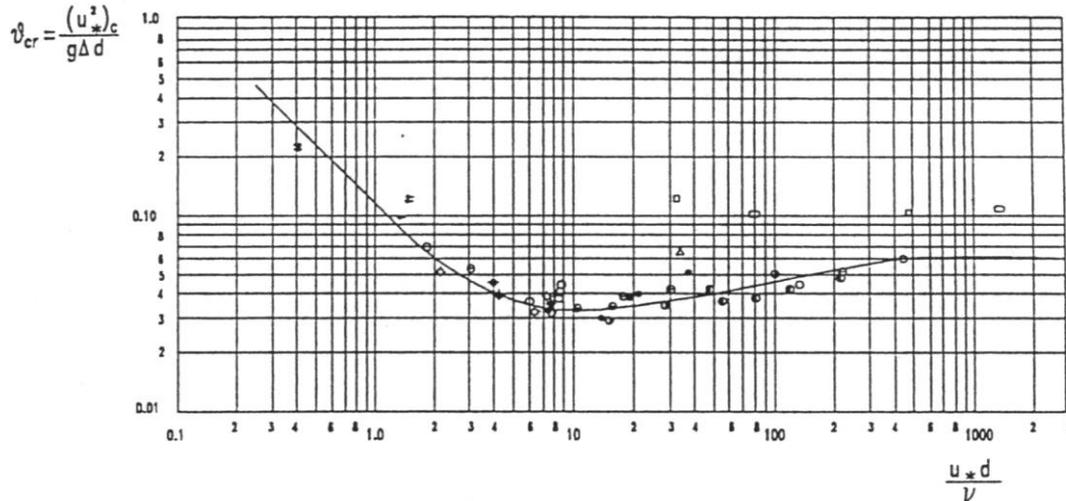


Figura 3-2: Diagramma di Shields

Questa curva separa la zona di mobilità delle particelle da quella 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:

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

cioè:

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

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:

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

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.

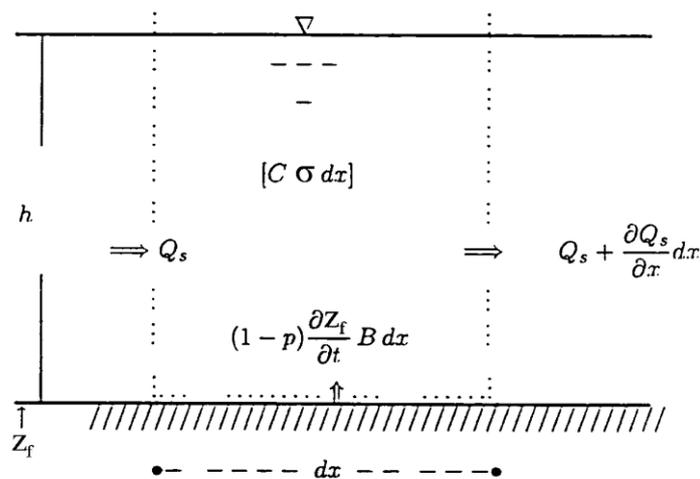


Figura 3-3: Bilancio di massa dei sedimenti nel volume di controllo

Introducendo il *coefficiente di ragguglio 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:

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

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 graduali, si può ottenere un modello che descrive l'evoluzione della corrente e del fondo.

Le variabili dipendenti da considerare sono tre:

- 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 e 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:

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

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

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

- o 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 Formule di Trasporto solido e campo di applicabilità

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 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 3.2, 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 3.1-1, di conseguenza, noto il diametro caratteristico del corso d'acqua oggetto di studio e le relative grandezze idrodinamiche, è possibile scegliere la formula più adatta. Il diametro caratteristico è ricavabile dalle curve granulometriche, mentre le grandezze idrodinamiche sono dedotte dal modello idraulico impiegato a fondo fisso.

Tabella 3.1-1: limiti di applicabilità delle formule di trasporto solido

Autore	d ₅₀ [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	4·10 ⁻⁴ ÷ 2·10 ⁻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:

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

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 cambiata rispetto a quella di Einstein (due diametri).

Questa formula calcola il trasporto totale.

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

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

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 $\mathfrak{R}/11.24$ (con \mathfrak{R} raggio idraulico);
- la zona intermedia con profondità compresa tra $\mathfrak{R}/2.5$ e $\mathfrak{R}/11.25$;
- la zona superiore dove la profondità è inferiore a $\mathfrak{R}/2.5$.

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:

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

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

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

La distribuzione della concentrazione dei sedimenti è espressa da:

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

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:

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

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 $260.67 - 0.667T$ (con T in °F). L'esponente z della distribuzione della

concentrazione dei sedimenti nella zona inferiore ed in quella superiore sono, 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.

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):

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

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

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

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

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

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

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

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

$$C = 10^{[2.861 \log d_{gr} - (\log d_{gr})^2 - 3.53]}$$

per $d_{gr} > 60$

$$n = 0.0$$

$$A = 0.170$$

$$m = 1.50$$

$$C = 0.025$$

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:

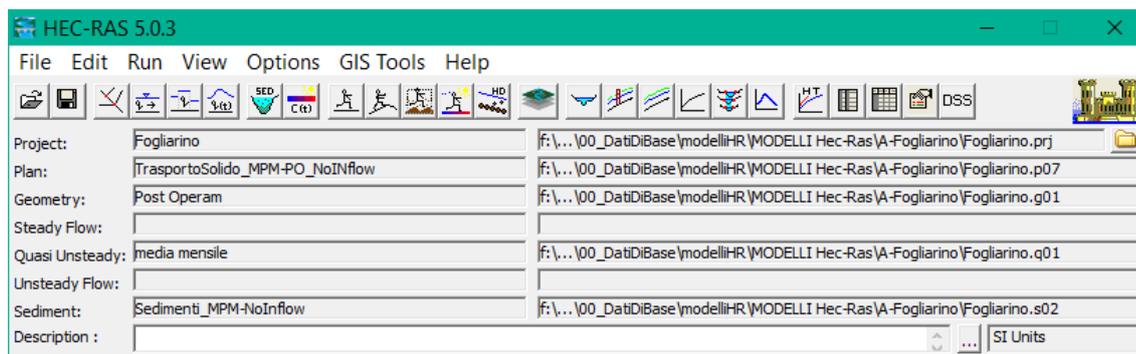
$$q_s = q_f + q_{ss} = \omega \frac{\gamma}{\gamma_s - \gamma} \left(\frac{e_f}{\tan \alpha} + 0.01 \frac{u_s}{w_s} \right) \frac{1}{\rho_s}$$

3.2 Modello di calcolo idraulico a fondo mobile

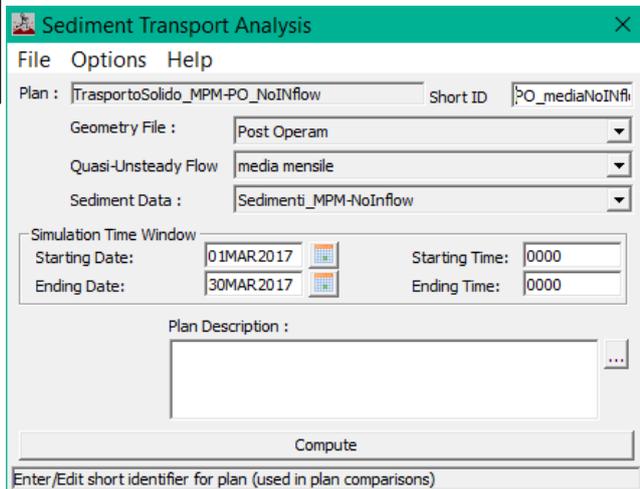
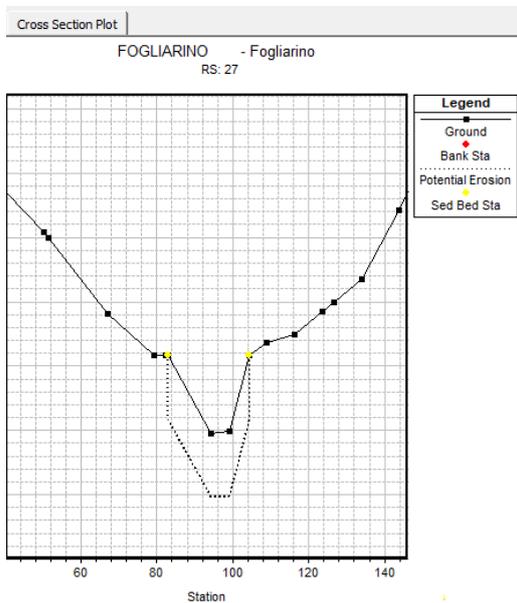
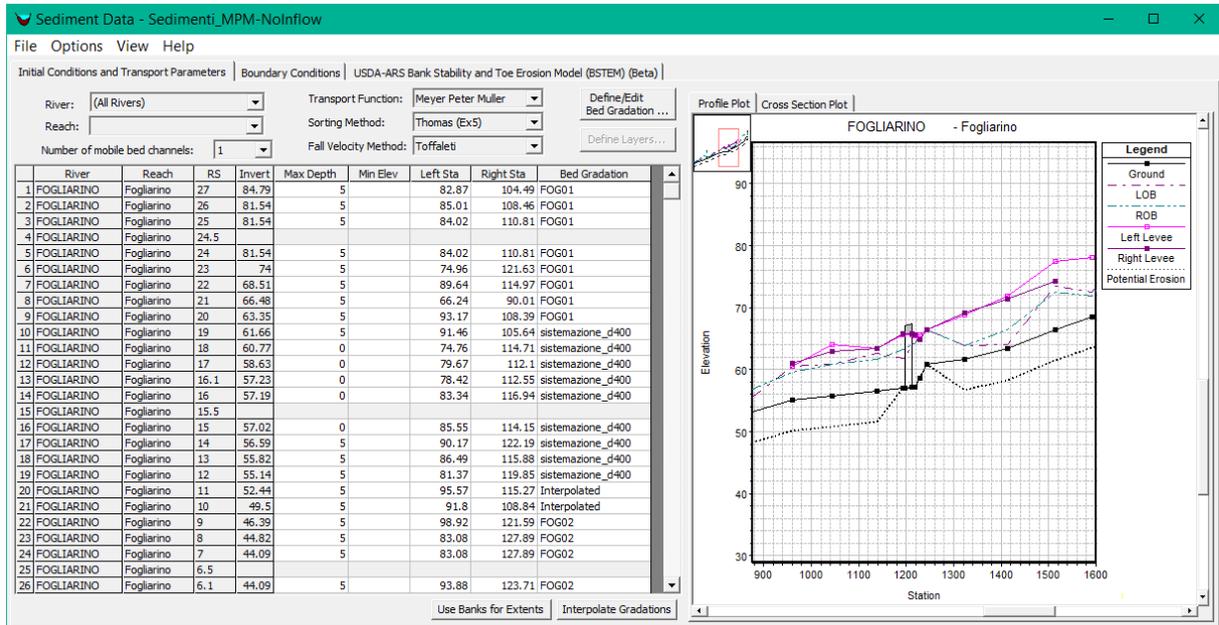
3.2.1 HEC-RAS, modulo per il trasporto dei sedimenti

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 5.0.5 del giugno 2018 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)



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:

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

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:

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

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 del modello

La geometria del modello di calcolo a fondo mobile è costruita a partire dai rilievi topografici appositamente eseguiti per il Progetto in esame. Ricordiamo che la geometria del modello di calcolo è costituita dalle sezioni trasversali, dalle opere eventualmente presenti e dalle caratteristiche idrauliche delle sezioni stesse. L'ubicazione delle sezioni di studio è riportata nelle tavole RS3E50D09G5ID0002001A, RS3E50D09G5ID0002002A, RS3E50D09G5ID0002003A, RS3E50D09G5ID0002004A, RS3E50D09G5ID0002005A e RS3E50D09G5ID0002006A.

3.2.2.2 Scabrezza idraulica

I valori di scabrezza adottati sono riportati nella seguente tabella.

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO-CATANIA TRATTA DITTAINO-CATENANUOVA (LOTTO5) PROGETTO DEFINITIVO					
	STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE – RELAZIONE	COMMESSA RS3E	LOTTO 50 D 09	CODIFICA RG	DOCUMENTO ID0002 001	REV. A

Tabella 3.2-1: valori di scabrezza adottati

golena sinistra	canale principale	golena destra
0,035	0,045	0,035

La scabrezza idraulica può anche variare in base alla dinamica del trasporto solido, in quanto i sedimenti in movimento offrono una minore resistenza al moto dell'acqua (USACE-HEC, 1982). È quindi possibile far calcolare al codice di calcolo il valore della cosiddetta "scabrezza di grano", scegliendo tra le formulazioni proposte da Limerinos (1970), Brownlie (1983) e Van Rijn (1984).

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

Le portate simulate per la valutazione delle tendenze evolutive dell'alveo sono quelle modali, ricavate come illustrato nel precedente paragrafo 2.6 e riportate nella seguente Tabella 3.2-2. Nel codice di calcolo il valore di portata costante della durata complessiva di 24 ore è stato suddiviso in incrementi computazionali di durata pari a 1 ora.

Tabella 3.2-2: valori di portata modale simulati

ID Bacino	Portata modale (m ³ /s)
A5	3,52
A7	1,02
A8	23,56
A9	2,12

ID Bacino	Portata modale (m ³ /s)
A10	4,72
A11	4,19
A12	25,45
A16	27,01
A20	3,84
B04	2,48
B06	3,67
Dittaino	219
B09	14,24
B11	11,60
B12	0,85
B13	2,03
B15	4,81
B17	85,26
B20	4,49
B27	7,08
B28	18,58

Livello idrico di valle

Il livello idrico di valle deve essere assegnato per ogni intervallo temporale con cui viene discretizzato l'idrogramma di calcolo e può essere calcolato dal programma assegnando la scala di deflusso della sezione di valle. Nel caso di portata costante per tutta la durata della simulazione, è sufficiente fornire un unico valore di livello idrico, che è stato posto pari all'altezza di moto uniforme.

Carico solido entrante

La condizione al contorno relativa ai sedimenti riguarda l'apporto di materiale solido al tratto di studio. Nel caso in esame, in base alle informazioni ricavate dalla caratterizzazione geomorfologica del bacino, è stato possibile valutare in via preliminare se il carico entrante da monte nel modello di calcolo è significativo ai fini delle valutazioni sulla tendenza evolutiva. Se la sezione di monte del modello è

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO-CATANIA TRATTA DITTAINO-CATENANUOVA (LOTTO5) PROGETTO DEFINITIVO												
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>RS3E</td> <td>50 D 09</td> <td>RG</td> <td>ID0002 001</td> <td>A</td> <td>45 di 58</td> </tr> </tbody> </table>	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO	RS3E	50 D 09	RG	ID0002 001	A	45 di 58
COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO								
RS3E	50 D 09	RG	ID0002 001	A	45 di 58								

sufficientemente lontana dal tratto di interesse³, si può anche assumere un carico entrante nullo, in modo che siano proprio le prime sezioni di monte a costituire un serbatoio di sedimenti per il modello a fondo mobile. Qualora, però, ci si trovi in condizioni di forte apporto solido dai versanti (in caso di fenomeni franosi attivi, ad esempio), è necessario stimare tale apporto ed introdurlo come condizione al contorno. In alternativa, è anche possibile estrarre dai risultati del codice di calcolo il carico solido uscente dalla sezione di valle e inserirlo come carico entrante in una successiva simulazione. Questa procedura richiede di simulare più valori di portata.

Il codice di calcolo è anche 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. Per i casi in esame è stata adottata la condizione di *carico di equilibrio*.

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.

Nel caso 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.

³ La valutazione della tendenza evolutiva riguarda principalmente, in questa sede, il tratto interessato dall'attraversamento in progetto.

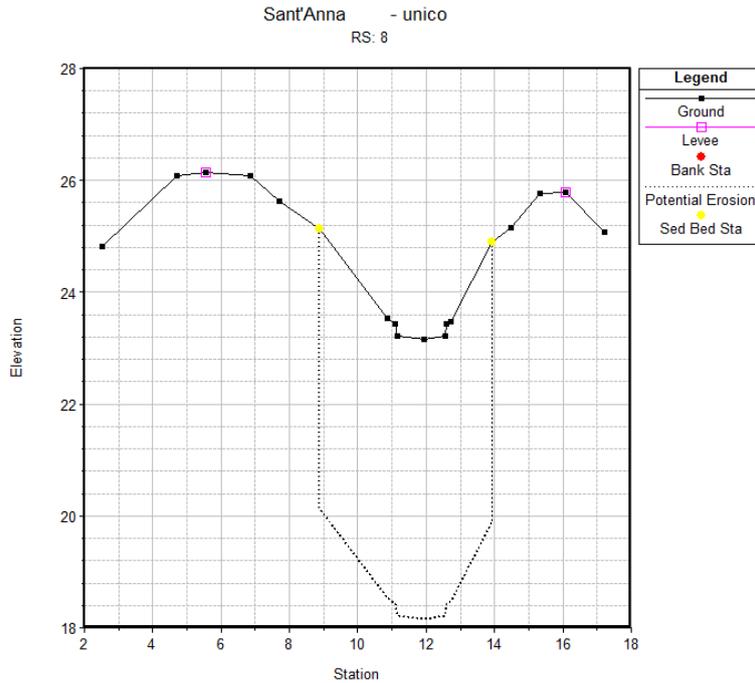


Figura 3-4: esempio dell'inserimento dei limiti del fondo mobile coincidenti con i limiti del canale principale

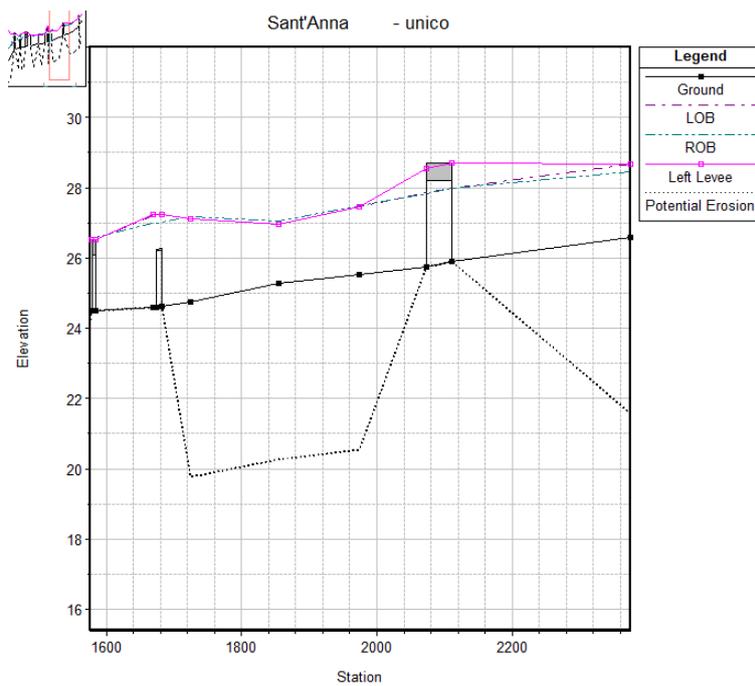


Figura 3-5: esempio dell'inserimento della massima profondità erodibile

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO-CATANIA TRATTA DITTAINO-CATENANUOVA (LOTTO5) PROGETTO DEFINITIVO												
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>RS3E</td> <td>50 D 09</td> <td>RG</td> <td>ID0002 001</td> <td>A</td> <td>47 di 58</td> </tr> </tbody> </table>	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO	RS3E	50 D 09	RG	ID0002 001	A	47 di 58
COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO								
RS3E	50 D 09	RG	ID0002 001	A	47 di 58								

3.2.2.5 Caratteristiche del cambiamento del fondo alveo

La morfologia del corso 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&Muller come la più adatta in base alle granulometrie rilevate, per i corsi d'acqua minori, mentre quella di Toffaleti per il Fiume Dittaino.

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.

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO-CATANIA TRATTA DITTAINO-CATENANUOVA (LOTTO5) PROGETTO DEFINITIVO					
	STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE – RELAZIONE	COMMESSA RS3E	LOTTO 50 D 09	CODIFICA RG	DOCUMENTO ID0002 001	REV. A

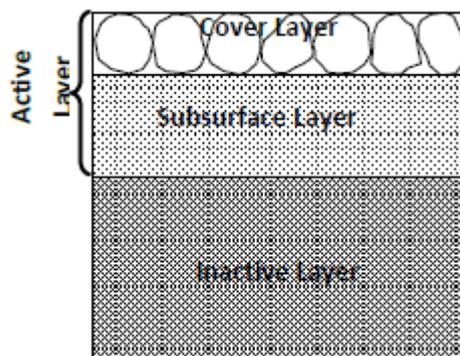


Figura 3-6: schema del metodo di mescolamento del fondo alveo

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 del campione prelevato secondo i criteri riportati nel precedente paragrafo 2.4.3. 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.

L'ubicazione dei punti di prelievo è riportata nelle Tavole RS3E50D09G5ID0002001A, RS3E50D09G5ID0002002A, RS3E50D09G5ID0002003A, RS3E50D09G5ID0002004A, RS3E50D09G5ID0002005A e RS3E50D09G5ID0002006A e le relative curve granulometriche sono state associate ai tratti di studio per i quali si è osservato che le caratteristiche morfologiche sono uniformi.

3.3 Modalità evolutive dell'alveo

3.3.1 Tendenza all'erosione e alla deposizione

Le modalità evolutive dell'alveo dei corsi d'acqua oggetto di studio, per il tratto 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 del modello idraulico a fondo mobile descritto nel precedente paragrafo 3.2.

I risultati delle simulazioni sono riportati nelle figure seguenti, che rappresentano il profilo del fondo alveo al termine del periodo di simulazione (24 ore a portata costante, pari alla portata modale), in confronto con il profilo di fondo alveo ad inizio simulazione. La seguente Tabella 3.3-1 riporta in sintesi le condizioni di simulazione ed i risultati ottenuti in termini di tendenza all'erosione o alla deposizione.

Tabella 3.3-1: Stima della tendenza evolutiva

Codice bacino / WBS	Portata modale (m³/s)	Apporto di sedimenti	Tendenza evolutiva
A5	3,52	Carico di equilibrio	Deposizione
A7	1,02	Carico di equilibrio	Stabile
A8	23,56	Carico di equilibrio	Deposizione
A9	2,12	Carico di equilibrio	Deposizione
A10	4,72	Carico di equilibrio	Deposizione
A11	4,19	Carico di equilibrio	Stabile
A12	25,45	Carico di equilibrio	Erosione / deposizione
A16	27,01	Carico di equilibrio	Erosione / deposizione
A20	3,84	Carico di equilibrio	Stabile
B06 / IN06A	3,67	Carico di equilibrio	Deposizione
Dittaino / VI04	219	Carico di equilibrio	Stabile
B09 / IN09	14,24	Carico di equilibrio	Stabile
B11 / IN11A	11,60	Carico di equilibrio	Deposizione
B12 / IN13A	0,85	Carico di equilibrio	Deposizione
B13 / IN14A	2,03	Carico di equilibrio	Deposizione
B15 / IN16C	4,81	Carico di equilibrio	Stabile
B17 / IN20	85,26	Carico di equilibrio*	Deposizione
B20 / IN25	4,40	Carico di equilibrio	Deposizione

B25 / IN32A	42,15	Carico di equilibrio	Deposizione
B27 / IN34	7,08	Carico di equilibrio	Deposizione

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO-CATANIA TRATTA DITTAINO-CATENANUOVA (LOTTO5) PROGETTO DEFINITIVO					
	STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE – RELAZIONE	COMMESSA RS3E	LOTTO 50 D 09	CODIFICA RG	DOCUMENTO ID0002 001	REV. A

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 al territorio problemi 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 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 4.1-1.

Ad ogni valore di *LAm* è possibile associare una indicazione di "frequenza suggerita" per ispezioni manutentive (Tabella 4.1-2), 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 4.1-1 – 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

Tabella 4.1-2 – 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

Tabella 4.1-3: Livello di Attenzione per interventi di manutenzione programmata per i corsi d'acqua in esame

Codice bacino / WBS	Portata modale (m ³ /s)	Apporto di sedimenti	Tendenza evolutiva	Indice di Dinamica Morfologica IDM	Livello di attenzione per manutenzione LAm
A5	3,52	Carico di equilibrio	Deposizione	Media	Alto
A7	1,02	Carico di equilibrio	Stabile	Media	Basso
A8	23,56	Carico di equilibrio	Deposizione	Alta	Alto
A9	2,12	Carico di equilibrio	Deposizione	Alta	Alto
A10	4,72	Carico di equilibrio	Deposizione	Alta	Alto
A11	4,19	Carico di equilibrio	Stabile	Alta	Medio
A12	25,45	Carico di equilibrio	Erosione / deposizione	Alta	Alto
A16	27,01	Carico di equilibrio	Erosione / deposizione	Alta	Alto
A20	3,84	Carico di equilibrio	Stabile	Alta	Medio
B06 / IN06A	3,67	Carico di equilibrio	Deposizione	Alta	Alto
Dittaino / VI04	219	Carico di equilibrio	Stabile	Media	Basso
B09 / IN09	14,24	Carico di equilibrio	Stabile	Alta	Medio
B11 / IN11A	11,60	Carico di equilibrio	Deposizione	Alta	Alto
B12 / IN13A	0,85	Carico di equilibrio	Deposizione	Alta	Alto
B13 / IN14A	2,03	Carico di	Deposizione	Alta	Alto

Codice bacino / WBS	Portata modale (m ³ /s)	Apporto di sedimenti	Tendenza evolutiva	Indice di Dinamica Morfologica IDM	Livello di attenzione per manutenzione LAm
		equilibrio			
B15 / IN16C	4,81	Carico di equilibrio	Stabile	Alta	Medio
B17 / IN20	85,26	Carico di equilibrio*	Deposizione	Alta	Alto
B20 / IN25	4,4	Carico di equilibrio	Deposizione	Alta	Alto
B25 / IN32A	42,15	Carico di equilibrio	Deposizione	Media	Alto
B27 / IN34	7,08	Carico di equilibrio	Deposizione	Media	Alto

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO-CATANIA TRATTA DITTAINO-CATENANUOVA (LOTTO5) PROGETTO DEFINITIVO					
	STUDIO DI GEOMORFOLOGIA FLUVIALE – RELAZIONE	COMMESSA RS3E	LOTTO 50 D 09	CODIFICA RG	DOCUMENTO ID0002 001	REV. A

5. Riferimenti bibliografici

- Armanini A. – *Sistemazione dei bacini idrografici*, Università degli Studi di Trento
- Armanini A. – *Principi di Idraulica fluviale*, ed. BIOS
- Branca S., Coltelli M., Groppelli G. & Pasquarè G. (2009) - *Note illustrative della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000. Foglio 625 Acireale*. Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale.
- 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
- Catalano S., De Guidi G. (2003) – *Late Quaternary uplift of northeastern Sicily: relation with the active normal faulting deformation*. Journal of Geodynamics, **36**, 445-467.
- Ceriani, M., Crosta, G., Frattini, P., & Quattrini, S. (2000). *Evaluation of hydrogeological hazard on alluvial fans*. In International Symposium INTERPRAEVENT 2000, pp.213-225.
- De Scally F.A. & Owens I.F. (2004). *Morphometric controls and Geomorphic responses on fans in the Southern Alps, New Zealand*. Earth Surface Processes and Landforms, **29**,311– 322.
- Drew F. (1873). *Alluvial and lacustrine deposits and glacial records of the Upper Indus Basin*: Geological Society of London Quarterly Journal, **29**, 441-471.
- 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.

 <p>ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p>	<p>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO-CATANIA TRATTA DITTAINO-CATENANUOVA (LOTTO5)</p> <p>PROGETTO DEFINITIVO</p>												
<p>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>RS3E</td> <td>50 D 09</td> <td>RG</td> <td>ID0002 001</td> <td>A</td> <td>56 di 58</td> </tr> </tbody> </table>	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO	RS3E	50 D 09	RG	ID0002 001	A	56 di 58
COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO								
RS3E	50 D 09	RG	ID0002 001	A	56 di 58								

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.

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

Marchi L. & Tecca P.R. (1996). *Magnitudo delle colate detritiche nelle Alpi Orientali italiane*. *GEAM*, **33** (2-3), p. 79-86.

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

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

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

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

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

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