Comuni di Triora e Molini di Triora
Provincia di Imperia
Regione Liguria

INTERVENTI DI RIPRISTINO IN SEGUITO ALL'EVENTO ALLUVIONALE DEL 02/10/2020

PROGETTO DEFINITIVO

INTEGRAZIONI RICHIESTE DAL SETTORE DIFESA DEL SUOLO DI IMPERIA CON NOTA PROT. PG/2021/353069 DEL 4/11/2021

ELABORATO

B - RELAZIONE IDROLOGICO-IDRAULICA

VERSIONE ***02***

COMMITTENTE

RE++ s.r.l.
Via Fratelli Ceirano, n. 9
12100 CUNEO (CN)

PROGETTISTA
ING. M. GALFRÈ

ORDINE DEGLI INGEGNERI DELLA PROVINCIA DI CUNEO
A1649 Dott. Ing. Marco Galfrè

PER LA SOCIETÀ

RE++ s.r.l.
Via F.lli Ceirano, 9 - 12100 CUNEO
Tel. 340 2570771
P.IVA / C.F. 03557700048
pec: repiupiuriz@legalmail.it

COLLABORATORE
ING. S. GIORDANO

Ordine Ingegneri Cuneo
ORDINE DEGLI INGEGNERI DELLA PROVINCIA DI CUNEO
A2471 Dott. Ing. Sara Giordano

LABORATORIO DI INGEGNERIA, ARCHITETTURA E AMBIENTE

LIAAM di Galfrè ing. Marco
via Toglia n. 3A - 12018 ROCCAVIONE (CN)
Tel. 347-2427265
e-mail: info@liaam.it
web: www.liaam.it
P. IVA 03483550046

ROCCAVIONE, novembre 2021

** Tutti i diritti riservati a termine di legge **

SOMMARIO

1. INTRODUZIONE 2
1.1 Riferimenti normativi 3
1.2 Descrizione dell'intervento 3
1.2.1 Scogliera 2 3
1.2.2 Scogliera 3 3
1.2.3 Scogliera 4 4
2. INQUADRAMENTO TERRITORIALE 5
2.1 Inquadramento geologico 6
2.2 Inquadramento idrografico 9
2.2.1 Corsi d'acqua analizzati 9
3. ANALISI IDROLOGICA 10
3.1 Idrografia 12
3.1.1 Torrente Capriolo 12
3.2 Definizione delle portate di riferimento 13
4. ANALISI IDRAULICA 13
4.1 Rilievo della morfologia dell'alveo 13
4.1.1 Rilievo aerofotogrammetrico 13
4.2 Modello idraulico numerico 15
4.3 Condizioni fisiche di riferimento 15
4.4 Risultati ottenuti 16
5. OPERE DI DIFESA IDRAULICA 16
6. MANUFATTI INTERFERENTI 16
7. EFFETTI DEGLI INTERVENTI IN PROGETTO 17
7.1.1 Modifiche indotte sul profilo inviluppo di piena 17
7.1.2 Riduzione della capacità di invaso dell'alveo 17
7.1.3 Interazioni con le opere di difesa idrauliche esistenti 18
7.1.4 Opere idrauliche in progetto nell'ambito dell'intervento 18
7.1.4.1 Dimensionamento idraulico dei massi 20
7.1.5 Modifiche indotte sull'assetto morfologico, planimetrico ed altimetrico dell'alveo inciso e di piena 21
7.1.6 Modifiche indotte sulle caratteristiche naturali e paesaggistiche della regione fluviale 22
7.1.7 Condizioni di sicurezza dell'intervento rispetto alla piena 22
8. ALLEGATI 22

1. INTRODUZIONE

Il presente elaborato costituisce la *Relazione idrologico-idraulica* del progetto definitivo dell'intervento di «*Sistemazione idraulica del torrente Capriolo nelle aree di pertinenza dell'impianto idroelettrico della società Re++ s.r.l. a seguito dell'evento alluvionale dell'ottobre 2020*».

L'area di studio, ovvero il tratto continuo di corso d'acqua oggetto di modellizzazione idraulica, è compresa tra 95 m a monte della presa e 155 m a valle della restituzione. Nell'area di intervento, si prevede la realizzazione di scogliere atte a limitare i fenomeni di erosione spondale. Il tratto di corso d'acqua preso in esame risulta sufficientemente esteso da evitare che i risultati possano essere influenzati dalle condizioni al contorno.

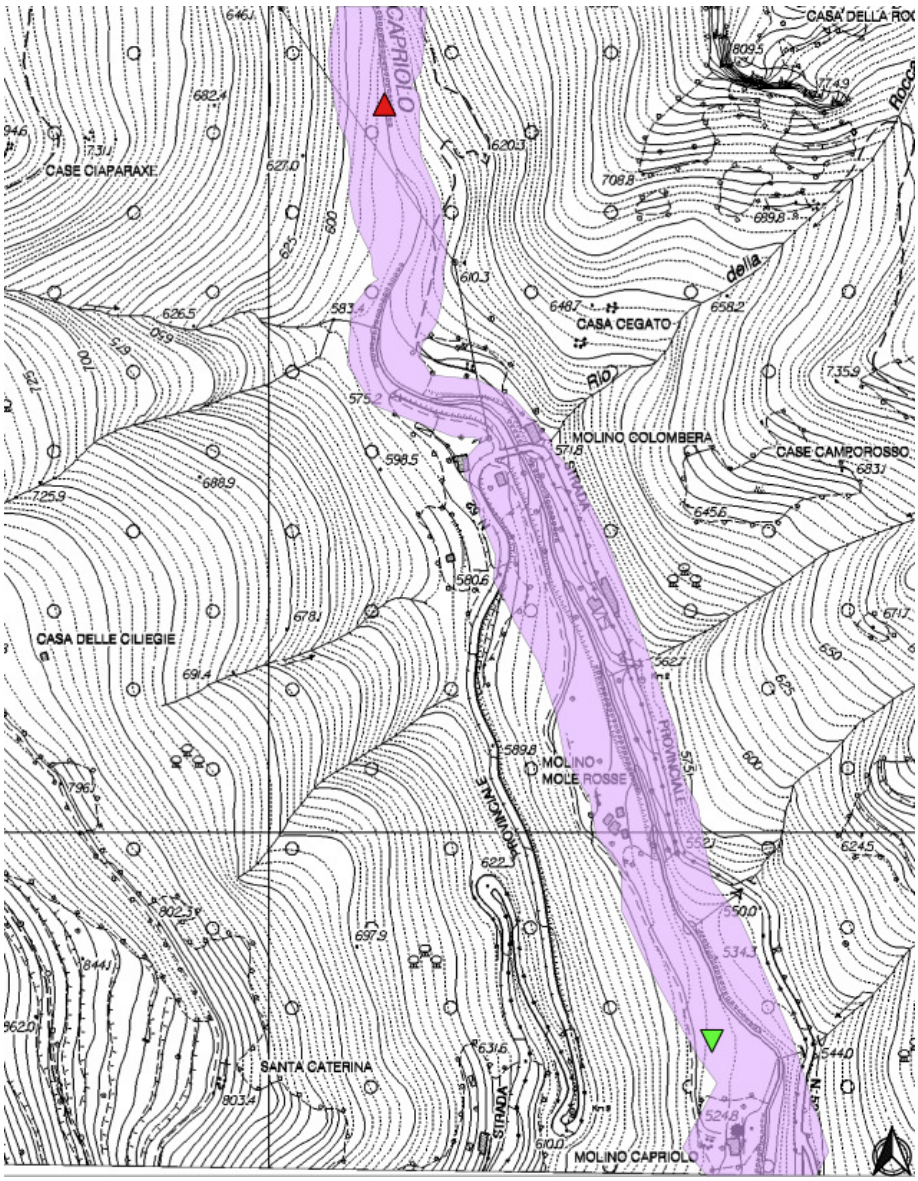


Figura 1.1 – Sovrapposizione su CTR dell'area oggetto di modellizzazione idraulica (in viola), compresa tra 95 m a monte della presa (indicata con triangolo rosso) e 150 m a valle della restituzione (indicata con triangolo verde)

1.1 Riferimenti normativi

I principali riferimenti tecnico-normativi che hanno guidato le valutazione descritte nella presente relazione sono:

- Piano di bacino dell'Ambito n.°4 – Argentina[1];
- DGR 357/2008, Criteri ed indirizzi tecnici per la verifica e la valutazione delle portate e degli idrogrammi di piena attraverso studi idrologici di dettaglio nei bacini idrografici liguri.

1.2 Descrizione dell'intervento

Il progetto prevede la realizzazione di tre tratti di scogliera a protezione della sponda nel tratto del Rio Capriolo sotteso dall'impianto idroelettrico. Nel seguito si fornisce una puntuale descrizione delle stesse.

1.2.1 Scogliera 2

Si prevede la realizzazione di una scogliera a protezione dell'erosione localizzata, che si è originata a seguito dell'evento alluvionale in sinistra del Rio Capriolo, circa 100 m a valle della presa, nel comune di Molini di Triora. La scogliera presenterà un'altezza di 2.50 m e una lunghezza di 8.50 m. Il paramento risulterà inclinato di 50° rispetto all'orizzontale; la fondazione avrà uno spessore di 1.00 m, risulterà inclinata di 6° e poggiante su marna affiorante con ricoprimento al piede di almeno 0.50 m.

Essa verrà realizzata in massi ciclopici di diametro minimo 0.75 m, per evitare che essi vengano trasportati a valle durante le piene (per ulteriori dettagli in merito, si rimanda al dimensionamento idraulico, riportato al par. 7.1.4.1). La fondazione verrà realizzata in massi ciclopici cementati e poggerà su marna affiorante. La parte in elevazione verrà realizzata escludendo l'impiego del calcestruzzo per garantire una migliore integrazione paesaggistica dell'opera.

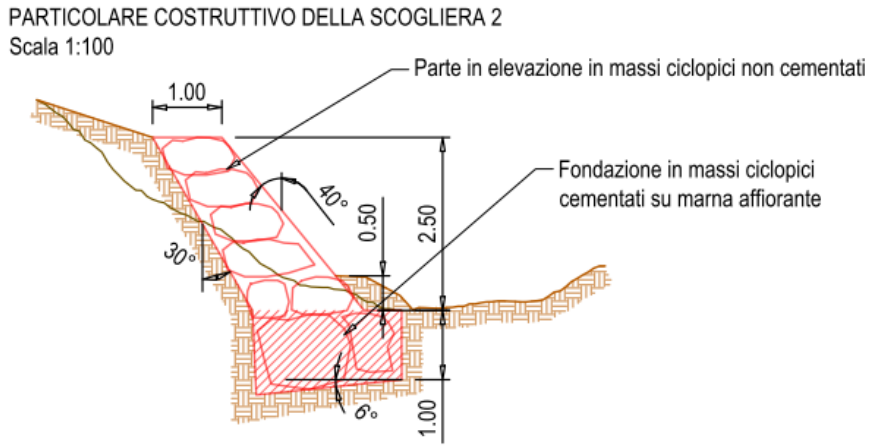


Figura 1.2 – Estratto non in scala dell'Elaborato D.2: particolare costruttivo della scogliera 2

1.2.2 Scogliera 3

Nel comune di Molini di Triora, in sinistra del Rio Capriolo, circa 150 m a valle della presa, in un'area in cui attualmente la condotta dell'impianto idroelettrico risulta scoperta in alcuni punti, si prevede la realizzazione di una doppia scogliera e di un terrapieno a protezione della condotta forzata. La doppia scogliera presenterà una lunghezza di 41.50 m; la scogliera alla base presenterà un'altezza di 3.50 m, la scogliera superiore, arretrata di circa 1.50 m rispetto alla testa della scogliera alla base, presenterà un'altezza variabile da 2.00 a 1.50 m. Entrambi i paramenti risulteranno inclinati di circa 60° rispetto

[1] *Reperibile all'indirizzo* http://www.pianidibacino.ambienteinliguria.it/IM/argentina/argentina.html

all'orizzontale; la fondazione della scogliera alla base presenterà una spessore di 1.00 m e un ricoprimento alla base pari a 1.00 m; la fondazione della scogliera superiore, non raggiunta dai livelli di piena per tempi di ritorno di 200 anni, presenterà uno spessore di 0.50 m. Entrambe le fondazioni risulteranno inclinate di 6° verso l'interno.

Per entrambe le scogliere si prevede l'impiego di massi ciclopici di diametro minimo equivalente pari a 1.00 m, capaci di resistere alle piene (per ulteriori dettagli in merito, si rimanda al dimensionamento idraulico, riportato al par. 7.1.4.1). Considerata l'azione di trascinamento dovuto alle piene, cautelativamente si prevede di realizzare sia la fondazione che il paramento della scogliera alla base in massi ciclopici cementati; per la scogliera superiore è prevista la cementazione esclusivamente della fondazione, escludendo l'utilizzo del calcestruzzo per la parte in elevazione al fine di favorire l'integrazione paesaggistica dell'opera.

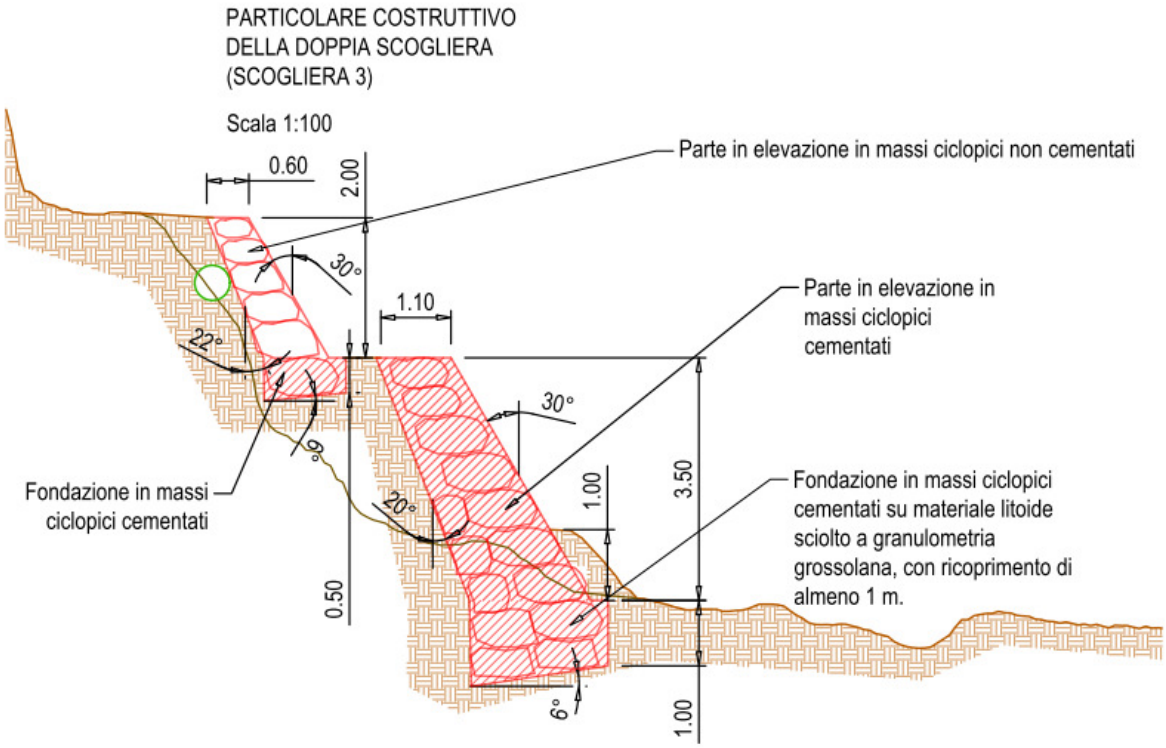


Figura 1.3 - Estratto non in scala dell'Elaborato D.2: particolare costruttivo della scogliera 3

1.2.3 Scogliera 4

Nel comune di Triora, circa 70 m a valle del ponte della SP n. 52, in destra del Rio Capriolo, si prevede la realizzazione di 81 m di scogliera ad altezza variabile a seconda del profilo della sponda originario, a protezione della strada vicinale che si articola parallela alla sponda e della condotta forzata al di sotto. La scogliera presenterà un'altezza massima di 2 m e una fondazione di spessore 1.00 m, inclinata di 6°, poggiante su marna affiorante.

Si prevede l'impiego di massi ciclopici di diametro minimo equivalente pari a 1.00 m, capaci di resistere alle piene (per ulteriori dettagli in merito, si rimanda al dimensionamento idraulico, riportato al par. 7.1.4.1), e l'utilizzo del calcestruzzo per il riempimento dei vuoti della fondazione. Il calcestruzzo non verrà impiegato per la realizzazione del paramento, al fine di garantire una migliore integrazione paesaggistica dell'opera.

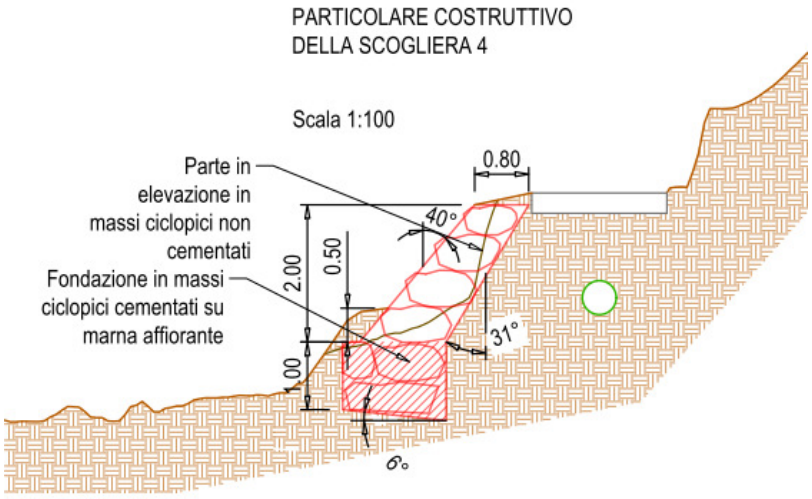


Figura 1.4 - Estratto non in scala dell'Elaborato D.2: particolare costruttivo della scogliera 4

2. INQUADRAMENTO TERRITORIALE

Il bacino del torrente Capriolo ricade interamente nei comuni di Triori e Molini di Triora, siti in Alta Valle Argentina, nelle Alpi Liguri della Liguria occidentale.

La Valle Argentina è attraversata dal torrente omonimo: esso presenta una lunghezza di 38.78 km, una pendenza media del 5.56% e sottende un bacino di 210.75 km^2. Il bacino è orientato in direzione N-S da Taggia a Badalucco e NW-SE da Badalucco fino alle pendici del Monte Saccarello. Si sviluppa da una quota minima pari al livello del mare, in corrispondenza di Arma di Taggia, fino a raggiungere la quota massima di 2199 m s.l.m. in corrispondenza della vetta del monte Saccarello.

Il tratto a valle,compreso nel comune di Taggia, è caratterizzato dalla presenza di un tessuto urbano continuo (Arma di Taggia e Taggia) alternato a zone destinate prevalentemente alla floricoltura e all'olivicoltura, che risalendo lungo l'entroterra lasciano spazio sempre più a insediamenti boschivi piuttosto che abitativi e agricoli e che mantengono l'impronta data dagli originari caratteri rurali legati allo sfruttamento dell'agricoltura povera di un tempo tipica di queste zone,fatta eccezione dei centri urbani di Badalucco, Montalto Ligure, Carpasio, Molini di Triora, Triora e relative frazioni.

Il Torrente Argentina è alimentato da un reticolo idrograficosecondario rappresentato da corsi d'acqua minori che scendono dai versanti in sinistra e destraidrografica.

Il torrente Capriolo si articola nella vallata in sinistra orografica del torrente Argentina, confluendo in esso a valle dell'abitato di Molini di Triora a quota 464 m s.l.m. La quota più elevata del bacino è rappresentata da Monte Fronte, a quota 2150.6 m s.l.m. Principale affluente del torrente Capriolo è il Rio di Corte, che confluisce in esso poco a monte dell'abitato di Molini di Triora.

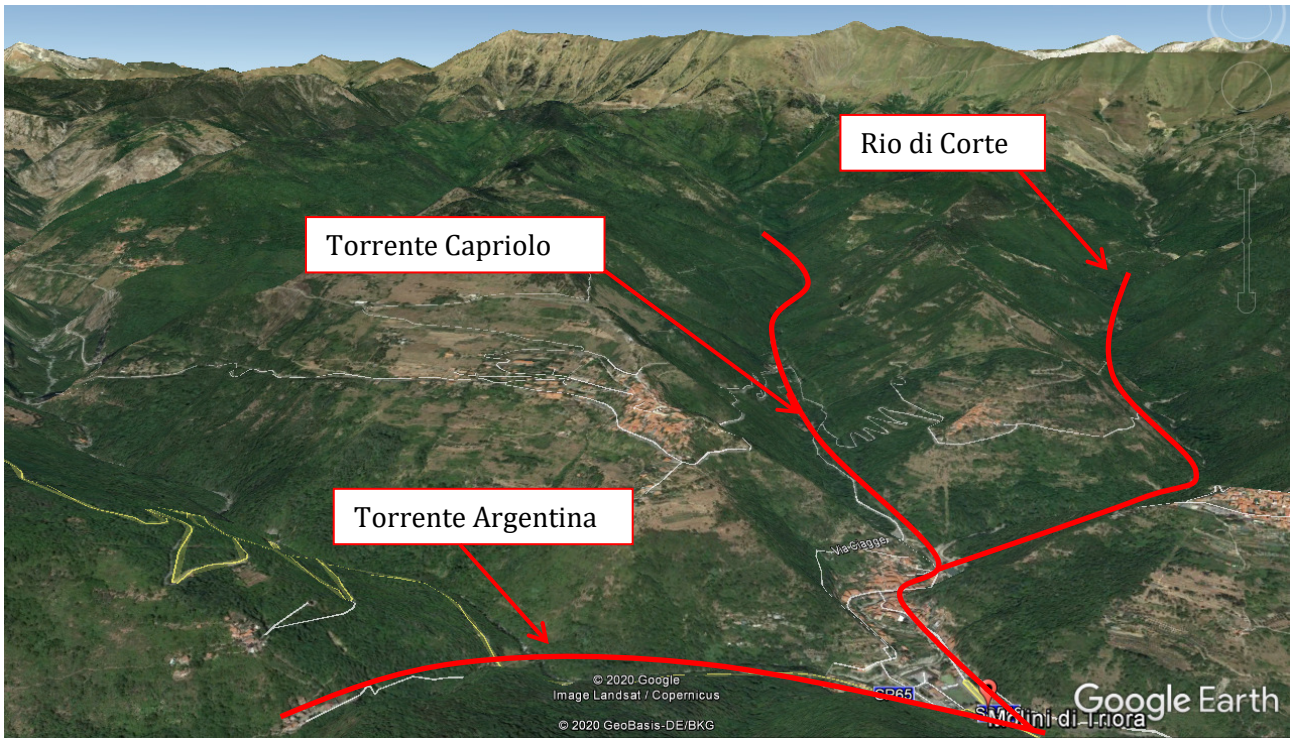


Figura 2.1 - Vista aerea del bacino imbrifero del torrente Capriolo (fonte Google Earth Pro)

2.1 Inquadramento geologico

Nell'area oggetto di intervento, la coltre, generalmente di ridotto spessore e spesso assente, è di natura essenzialmente eluviale e di tessitura equilibrata con dominanza delle frazioni fini (sabbia fine, limo e , subordinatamente argilla); lo scheletro solido è abbondante ed è costituito da frammenti del substrato generalmente di forma appiattita ma anche concoide di dimensioni da medio-minute a grossolane.

Le Formazioni affioranti nei versanti prossimi all'area di intervento sono attribuibili alle Unità della Zona Delfinese con il Flysch di Ventimiglia (Eocene superiore –Oligocene) ed a quelle appartenenti alla falda dei Flysch ad Helmintoidi della Liguria Occidentale del Dominio Oceanico Piemontese-Ligure (Cretaceosuperiore). La Formazione del Flysch di Ventimiglia (Eocene superiore – Oligocene)è costituita da un'alternanza ritmica di arenarie e torbiditiarenaceomarnose-argillose che presentano variazioni litostratigrafiche dello spessore dei litotipi. Questa Formazione appartiene all'Unità Argentera-Mercantour del dominio paleogeografico Delfinese-Elvetico, che costituisce il settore esterno verso il quale sono avvenuti movimenti di traslazione dell'orogenesi alpina.Localmente la roccia affiora estesamente lungo i tagli stradali, negli alvei dei corsi d'acqua e alla base dei muretti a secco. Ivi si osservano intercalazioni di strati marnosi e marno-argillosi, potenti fino a 40 cm e strati arenacei dello spessore di qualche decimetro, più competenti, intercalati a marne e argilliti fortemente alterate e scistose.

Nell'area in esame, la "Formazione di San Bartolomeo", rappresenta un "complesso di base" la cui litozona più antica (Cretaceo inf.) corrisponde per caratteri litologici e per età alle "Argille a palombini", ben note nelle successioni oceaniche liguridi dell'Appennino settentrionale. Segue al di sopra una litozona caratterizzata da peliti non calcaree, di colore grigio scuro, variamente
pigmentate e rese lucenti da laminazioni di ossidi di Fe e Mn (Cenomaniano-Turoniano e Senoniano Inf.). Queste costituiscono per lo più l'intervallo sommitale di torbiditi sottili aventi alla base, per spessori centimetrici, siltiti o areniti fini laminate. Verso il tetto la formazione può presentare vivaci colorazioni rosso-vinose e verdine, con intercalazioni di quarzareniti; termina con un livello, solo localmente presente, di emipelagiti e sottili strati torbiditici, sovente di natura calcarea, con Helmintoidi.

La stratigrafia tipo nell'area di intervento, dedotta dalle osservazioni di superficie e da precedenti studi interessanti gli stessi litotipi nell'areale, si può così schematizzare dall'alto verso il basso:

A. Il suolo di natura eluviale strutturato ed il terreno di coltivo humifero di ridotto spessore (max 0,5m), a tratti assente;
B. La coltre di natura essenzialmente eluviale, di tessitura fine sabbiosolimosa,subordinatamente argillosa con abbondante scheletro solido di dimensioni da medio minute a grossolane; presenta un elevato contenuto di carbonato di calcio che aumenta la coesione allo stato asciutto. Lo spessore è variabile localmente; è il prodotto pedologico dell'alterazionedella sequenza flyschoide;
C. Substrato flyschoide alterato e fratturato di spessore generalmente ridotto, spesso affiorante, con alterazione di tipo selettivo più marcata sui litotipi marnosi e argilloso-scistosi; dove l'alterazione è più spinta si ha un passaggio sfumato, che rende la sequenza a volte indistinguibile dalla coltre eluviale;
D. Substrato flyschoide sano o solo lievemente alterato, si ipotizza posto a ridotta profondità.

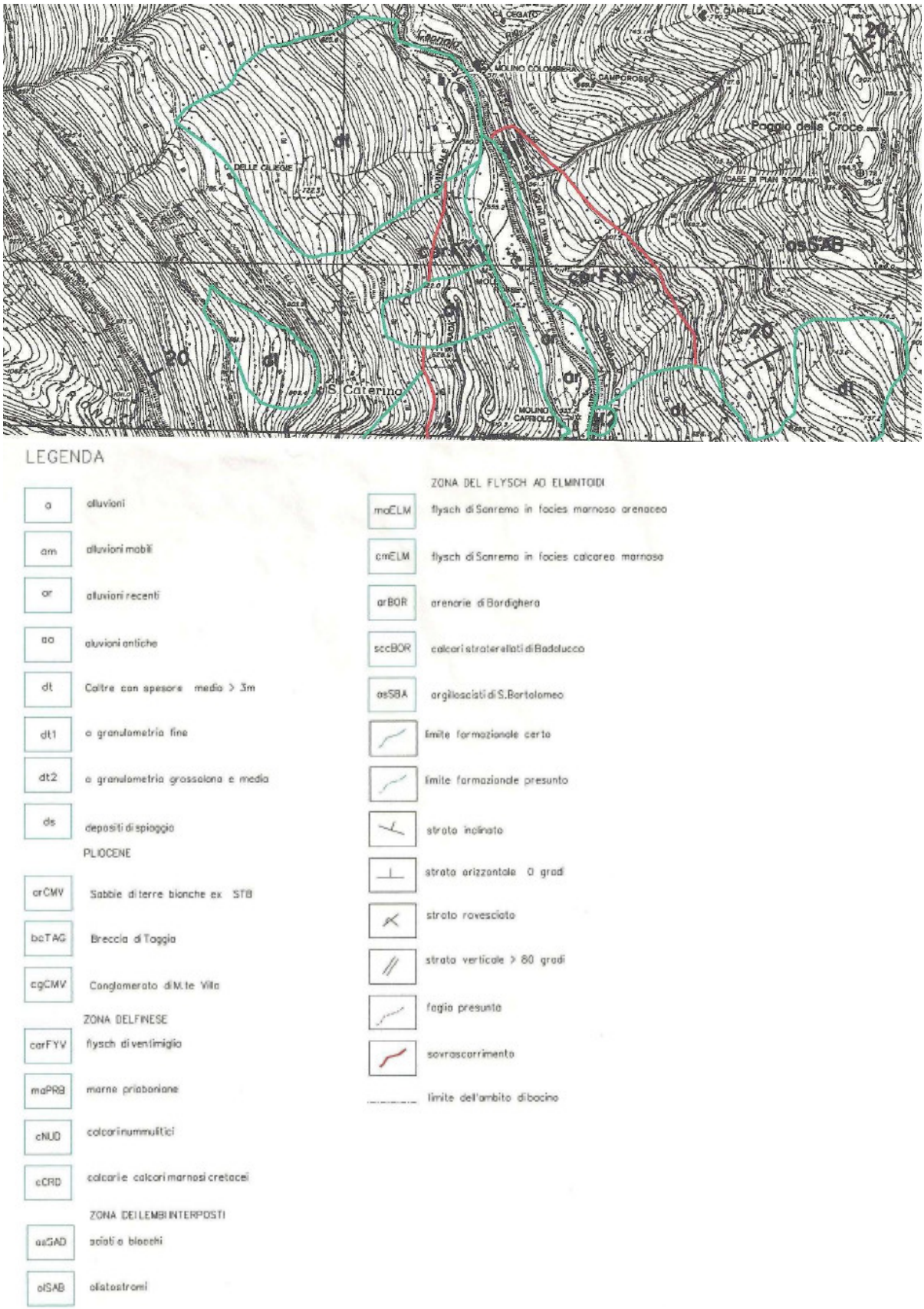


Figura 2.2 – Estratto della carta litologica facente parte del Piano di Bacino con legenda

2.2 Inquadramento idrografico

L'idrografia del territorio della Valle Argentina è rappresentata da un corso d'acqua vallivo principale, ilTorrente Argentina, e da un reticolo idrografico secondario con corsi d'acqua minori, localizzatilungo versanti in destra e sinistra orografica della valle principale.
Il Torrente Argentinanel tratto a monte di Badalucco presenta un andamento NW-SE, a valle dell'abitato assume un andamento Nord-Sud, fino a sfociare nel mar Ligure in corrispondenza di Arma di Taggia.
La quota massima del bacino è individuata dal Monte Saccarello a quota 2199 m s.l.m. Il bacino dell'Argentina è limitato verso ponente dal Monte Saccarello e successivamente dai monti Collardente(m 1776), Ceppo (m 1626), Cavanelle (m 1444), Collettazzo (m 1233) e Merlo (m 1015). Sul versante di levante, sempre partendo da monte Saccarello, il crinale incontra i monti Fronte(m 2151), Monega (m 1881),Bussana (m 1701), Arborea (m 1549), Carpasina (m 1413),Alpasino (m 1097), Moro (m 1181), Arbozzaro (m 1129), Audo (m 1148) e Grange (m 200).
Il Torrente Capriolo, affluente sinistro dell'Argentina si sviluppa in direzione N-S, riceve numerosi contributi dalla rete idrografica minore, il più rilevante dei quali è rappresentato dal Rio di Corte, il quale confluisce nel torrente Capriolo a monte dell'abitato di Molini di Triora. Il bacino sotteso alla confluenza nell'Argentina presenta un'area di circa 26.57 km^2.
Il regime idrologico dei corsi d'acqua della zona è fortemente legato alla distribuzione delle precipitazioni, caratterizzata da un massimo principale autunnale e un minimo estivo. Si osserva generalmente una magra estiva e importanti piene nei periodi autunnali, quando le precipitazioni si manifestano sotto forma di bruschi rovesci.
I principali motivi di dissesto legati al reticolo idrografico si concentranoprevalentemente nei pressi dei centri abitati, dove molteplici fattori di tipo antropico(tombinature, canalizzazioni, attraversamenti) interferiscono con il naturale deflusso delle acque.

2.2.1 Corsi d'acqua analizzati

Nell'ambito del presente studio è stata analizzata una parte del bacino del torrente Capriolo, rilevando lo sviluppo del corso d'acqua nel tratto sotteso dall'impianto idroelettrico gestito dalla società Re++ s.r.l. Il tratto indagato presenta una lunghezza di circa 550 m.
Per il calcolo delle portate di piena, si è individuata una sezione di chiusura posta a quota 586 m s.l.m., ossia in corrispondenza della traversa di derivazione dell'impianto idroelettrico. Il bacino chiuso alla sezione di presa presenta un'area di 11.55 km^2.

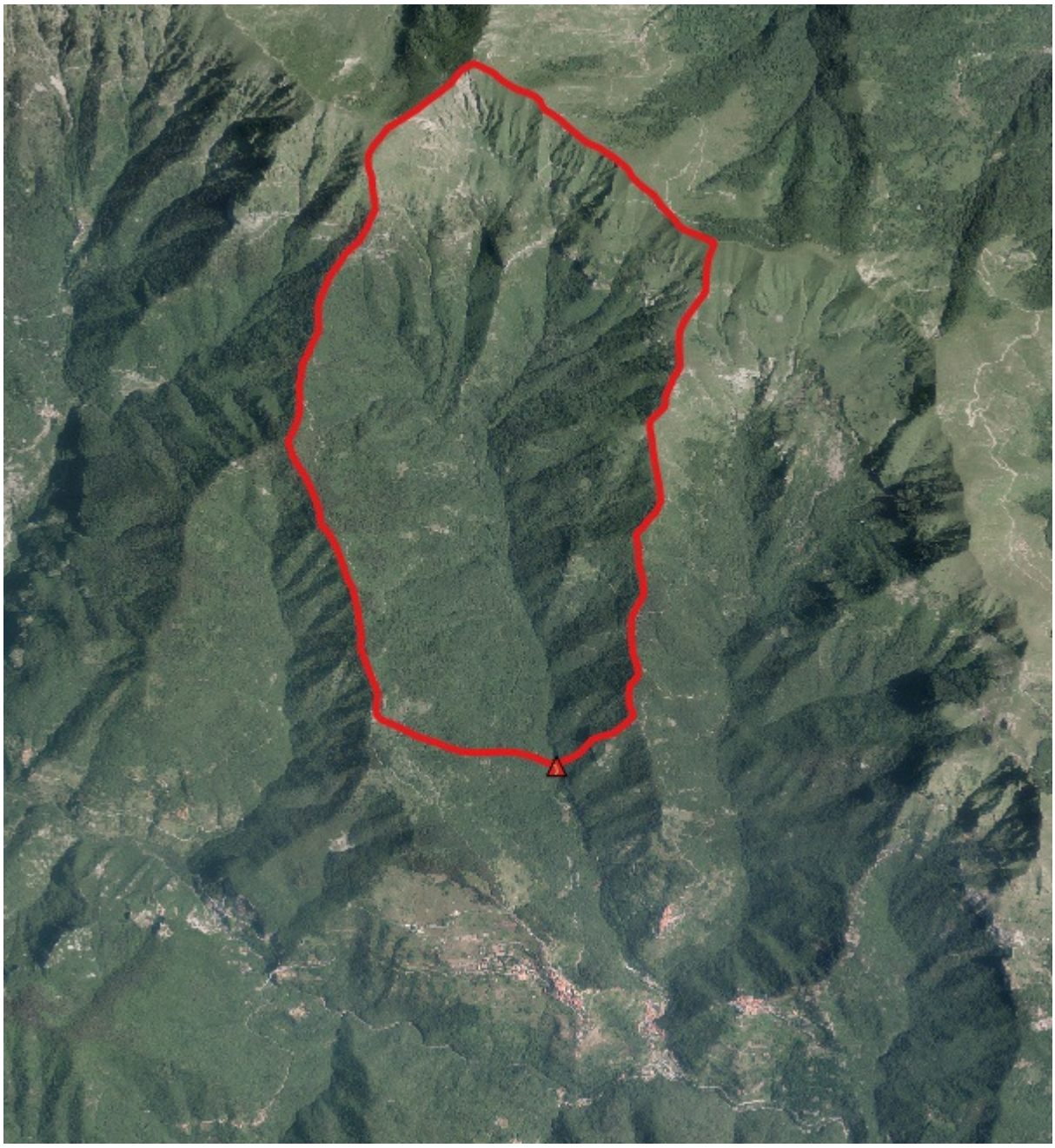


Figura 2.3 - Bacino del torrente Capriolo chiuso alla sezione di presa dell'impianto idroelettrico contornato in rosso.

3. ANALISI IDROLOGICA

Nel presente capitolo viene descritto il metodo impiegato per la stima delle portate di piena del corso d'acqua nel tratto di interesse. Tale stima è stata effettuata sulla base di quanto suggerito dalle Norme di Attuazione del Piano di Bacino dell'Ambito n. 4 – Argentina.

Le portate di piena del torrente Argentina e dei suoi principali affluenti per tempi di ritorno compresi tra 50 e 500 anni sono state stimate dal Politecnico di Milano, Dipartimento di Ingegneria Idraulica, Ambientale, Infrastrutture Viarie e Rilevamento, Sezione Costruzioni Idrauliche e Marittime e Idrologia, sotto la responsabilità del prof. Renzo Rosso, in un progetto di consulenza finanziato dalla Provincia di Imperia. Il lavoro si avvale di dati storici e delle osservazioni idrologiche disponibili; viene impiegata la tecnica di valutazione regionale proposta del metodo VAPI del CNR-GNDCI, riferita alla zona omogenea in cui cade la Liguria tirrenica. In questo contesto, in particolare, è stato costruito, tarato e validato un modello di trasformazione afflussi-deflussi per la valutazione indiretta della portata indice. Il rapporto

finale, riportato in Allegato tecnico 1 al Piano di bacino n.4 – Argentina[2], fornisce una stima delle portate di piena in sezioni salienti identificate dal vigente Piano di Bacino mediante l'applicazione della curva di crescita GEV regionale e la stima della portata indice con il metodo della simulazione idrologica dell'evento critico, nonché la valutazione degli idrogrammi di riferimento per le stesse sezioni idrografiche.

Stime dei valori di portata indice e per tempi di ritorno salienti nelle sezioni non strumentate del torrente Argentina. Metodo GEV regionale con portata indice stimata con il metodo della Simulazione dell'Evento Critico.

Corso d'Acqua	Sezione	*Area* [Km^2]	q_{indice} [m^3s^{-1}]	q_{50} [m^3s^{-1}]	q_{100} [m^3s^{-1}]	q_{200} [m^3s^{-1}]	q_{500} [m^3s^{-1}]
Argentina	Alla foce	208.68	327	1074	1353	1690	2245
Argentina	A Taggia	200.54	306	1004	1265	1579	2098
Argentina	*Merelli*	*192.20*	*299*	*982*	*1236*	*1544*	*2051*
Argentina	T. Oxentina v	183.39	281	923	1163	1452	1929
Argentina	T. Oxentina m	155.96	251	825	1039	1297	1723
Argentina	T. Carpasina m	130.52	221	725	914	1141	1516
Argentina	Ponte nuovo	118.65	212	698	879	1097	1458
Argentina	Ponte Aigovo	114.86	209	687	865	1080	1435
Argentina	A Agaggio	108.68	203	668	841	1050	1395
Argentina	Ponte Gavano	84.87	168	553	696	869	1154
Argentina	R. Capriolo v	82.24	150	491	619	773	1027
Argentina	R. Capriolo m	55.58	108	354	446	557	740
Oxentina	T. Argentina	27.77	57	187	236	295	392
Oxentina	R. Ruglio m	22.72	47	154	194	241	321
Carpasina	T. Argentina	19.31	37	122	153	191	254
Carpasina	R. S. Antonio m	16.36	32	104	131	163	217
Carpasina	Ponte Passetto	14.69	29	94	118	148	196
Carpasina	Ponte Salini	6.87	15	48	60	75	100
Capriolo	T. Argentina	26.5	63	207	261	326	433
Capriolo	R. Corte m	14.35	36	119	149	186	247
Capriolo	Ponte Molino C.	12.74	33	109	138	173	229
Corte	R. Capriolo	11.65	29	96	120	151	200
Agaggio	T. Argentina	4.43	10	32	40	50	67
S. Antonio	T. Carpasina	2.88	6	21	26	33	44

Figura 3.1 – Estratto dell'Allegato tecnico 1 al Piano di Bacino n. 4 – Torrente Argentina: stima dei valori di portata nelle sezioni salienti non strumentate identificate dal Piano di Bacino

Per il calcolo delle portate di piena in sezioni non individuate nella tabella precedente, l'Allegato 2 delle Norme di Attuazione del Piano di Bacino suggerisce:

- L'applicazione della metodologia definita nell'allegato tecnico 1, conforme alle *Linee guida per la verifica ed eventuale aggiornamento delle portate al colmo massime annuali e relativi idrogrammi di piena,* di cui alla DGR n. 357 del 04/04/2008;
- L'interpolazione lineare tra i valori relativi a due sezioni consecutive indicate nella tabella precedente.

Nel caso in esame, la sezione di chiusura del bacino di interesse, collocata alla presa dell'impianto idroelettrico della società Re++ s.r.l. sul torrente Capriolo si colloca circa 400 m sul corso d'acqua a monte della sezione Ponte Molino C., di cui vengono forniti i valori di portata di piena.

A favore di sicurezza, si decide di adottare alla sezione di interesse i valori di portate di piena definiti per la sezione Ponte Molino C.

[2] *Consultabile al link http://www.pianidibacino.ambienteinliguria.it/IM/argentina/allegatitecnici.html*

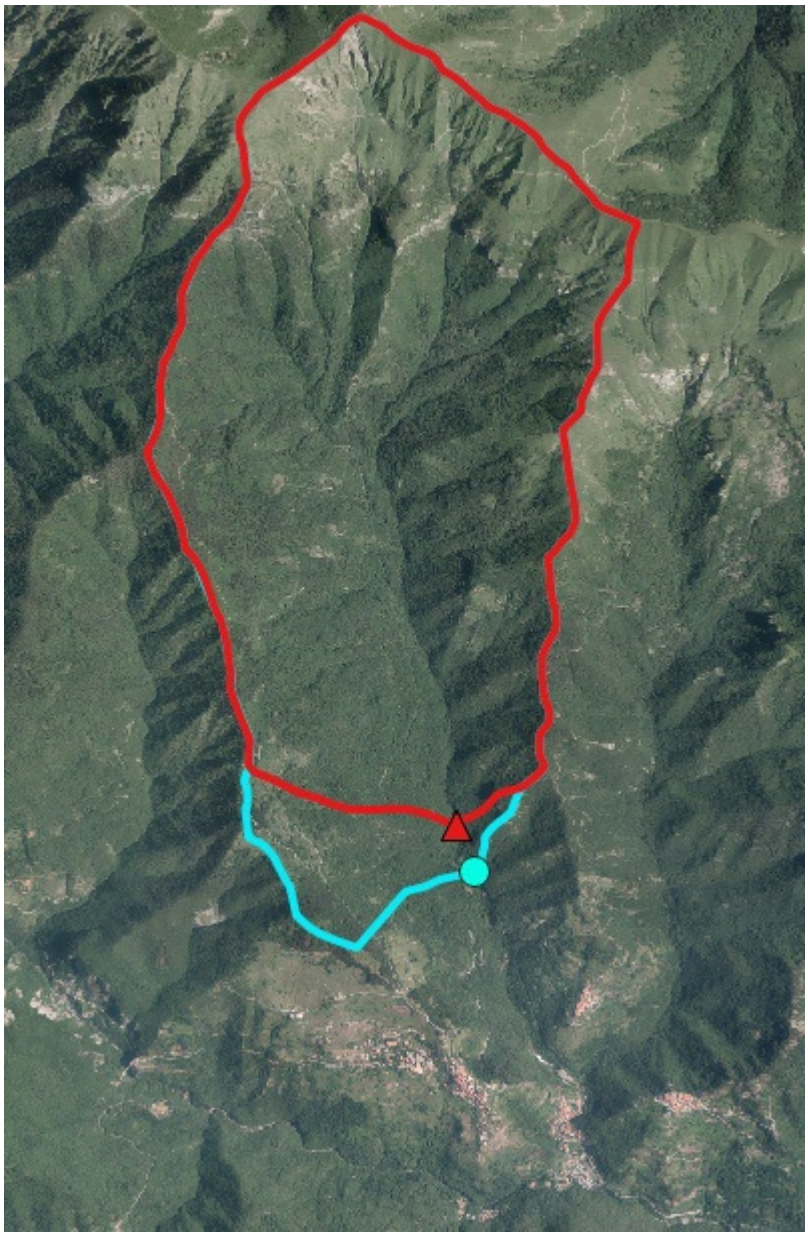


Figura 3.2 – Ortofoto non in scala in cui sono messi a confronto il bacino di interesse in rosso (chiuso alla presa dell'impianto idroelettrico) e il bacino chiuso alla sezione di riferimento denominata Ponte Molino C. in azzurro

3.1 Idrografia

3.1.1 Torrente Capriolo

Il torrente Capriolo ha origine dalla confluenza di alcuni rii minori a quota 900 m s.l.m. circa, tra cui si citano il Rio di Bottesina, il Rio di Pogetto e il Rio di Ceresola.Il torrente scorre in direzione Nord-Sud, riceve il contributo principale da parte del Rio di Corte a circa 480 m s.l.m. e confluisce nel torrente Argentina a quota 464 m s.l.m., a valle dell'abitato di Molini di Triora.

A monte della sezione di chiusura considerata (traversa di derivazione dell'impianto idroelettrico), il torrente Capriolo riceve numerosi contributi da corsi d'acqua minori; procedendo da monte verso valle, in destra si citano il Rio del Pellegrino e il Rio Rovereto, e in sinistra idrografica il Rio del Ganave, il Rio della Rocca della Mea, il Rio Vignago e il Rio di Gravo.

Nel tratto di interesse di lunghezza di circa 134 m, il torrente Capriolo presenta modeste pendenze e si rileva la presenza di una scogliera di lunghezza 12 m in sponda sinistra poco a valle della presa.

3.2 Definizione delle portate di riferimento

Di seguito si riportano i valori delle portate di piena assunte come riferimento per la creazione del modello idraulico(corrispondenti a quelle fornite dal Piano di Bacino per la sezione di riferimento Ponte Molino C.).

	Q [m³/s]
Tr 50	109
Tr 100	138
Tr 200	173
Tr 500	229

Tabella 3.1–Portate prese a riferimento per la modellazione idraulica

4. ANALISI IDRAULICA

Il presente capitolo descrive le attività e le valutazioni condotte al fine di ricostruire, per mezzo di simulazione numerica, le condizioni di deflusso delle portate di piena all'interno del corso d'acqua di interesse.
Le analisi idrauliche sono state condotte per le portate con tempo di ritorno pari a 50, 100, 200 e 500 anni.

4.1 Rilievo della morfologia dell'alveo

L'assetto geometrico dell'alveo (inciso e di piena) è stato ricostruito per mezzo di un rilievo aerofotogrammetrico eseguito con drone nel maggio 2021, integrato con rilievo GPS in modalità RTK.
L'area di studio, ovvero l'insieme dei tratti di corso d'acqua oggetto di rilievo e di successiva modellizzazione idraulica, è stata estesa a monte ed a valle dei tratti di corso d'acqua oggetto di intervento così da poter allestire un modello idraulico in cui questi ultimi non siano influenzati dalle condizioni al contorno.
L'assetto geometrico dell'alveo è stato georiferito nel sistema di riferimento UTM-WGS84 fuso 32 Nord; le quote sono espresse in metri sul livello del mare (quote geodetiche).

4.1.1 Rilievo aerofotogrammetrico

La superficie oggetto di rilievo aerofotogrammetrico si estende nel tratto compreso tra circa 150 m a monte della presa e 150 m a valle della restituzione dell'impianto idroelettrico.
La missione di volo è stata programmata in modo da garantire nell'area oggetto del rilievo un ricoprimento tra i fotogrammi successivi sempre superiore all'80% e tra le strisciate adiacenti sempre superiore al 60%.
L'elaborazione del rilievo è stata articolata nelle seguenti fasi.

- **Allineamento e georeferenziazione dei fotogrammi**
  I fotogrammi sono stati allineati ed il rilievo è stato opportunamente georeferenziato e scalato sulla base della posizione nota dei Ground Control Points (G.C.P.), punti a terra univocamente determinati dall'incontro dei vertici di due triangoli tracciati in rosso su pannelli in cartone o direttamente sul terreno, facilmente individuabili sulle foto aeree, la cui posizione è stata rilevata con rilievo GPS di precisione;
- **Generazione della nuvola di punti**
  Dai fotogrammi correttamente georeferenziati è possibile elaborare una nuvola di punti. Nel caso in esame, si è proceduto alla generazione di una nuvola di punti ad alta densità con risoluzione pari a 8 cm/pixel.
- **Classificazione della nuvola di punti**

La nuvola di punti è stata classificata al fine di rimuovere la vegetazione, le infrastrutture e le opere antropiche e con l'obiettivo di estrapolare un modello tridimensionale del terreno. In primo luogo, la classificazione è stata effettuata con l'ausilio di algoritmi automatici di riconoscimento del terreno; successivamente si è proceduto ad una verifica e ad un affinamento manuale della classificazione al fine di distinguere dal terreno i bordi della vegetazione, gli arbusti di ridotta altezza e i punti di rumore non individuati dagli algoritmi automatici.

- **Generazione del modello digitale del terreno (DTM)**
  A partire dalla nuvola di punti si è generato un modello digitale del terreno di risoluzione pari a 10 cm.
- **Ortomosaico**
  Generato il DTM, a partire dalle fotografie scattate durante il volo del drone si è ricostruita una ortofoto complessiva dell'area rilevata, ossia una fotografia che ha la proprietà di essere una proiezione ortografica, sulla quale è possibile definire con precisione la dimensione planimetrica degli elementi.

L'accuratezza di un rilievo aerofotogrammetrico con drone dipende da:

- Ground Sampling Distance (GSD), ossia la dimensione sul campo del pixel. La GSD dipende dalla risoluzione della macchina fotografica a bordo del drone, dalla lunghezza focale della sua ottica e dall'altezza di volo. Nel caso in esame, in fase di progettazione del volo si è definita una risoluzione a terra pari a 3 cm/pixel.
- accuratezza di rilievo dei Ground Control Points; nel caso in esame essi sono stati rilevati con palina GPS in modalità RTK, con un'accuratezza centimetrica;
- accuratezza del modello tridimensionale, dipendente da diversi fattori legati al volo del drone (condizioni meteorologiche, illuminazione, copertura GPS, velocità di crociera, stabilità).

Sulla base dei dati di letteratura, in termini di accuratezza relativa (ossia l'accuratezza con la quale i punti sono correttamente posizionati relativamente uno con l'altro all'interno del modello), si prevede un errore che va da una a tre volte la dimensione del pixel. Per l'accuratezza assoluta (legata alla differenza tra la posizione dei punti nel modello ricostruito e la loro effettiva posizione), l'errore varia da una a due volte la GSD per le misure sul piano orizzontale e da una a tre volte la GSD sul piano delle quote. I valori di accuratezza solitamente non risultano costanti sull'intera area rilevata ma variano a seconda delle caratteristiche del terreno, ad esempio risultano solitamente maggiori in terreni irregolari con sensibili dislivelli. L'accuratezza assoluta del rilievo è verificabile rilevando le coordinate di ulteriori punti a terra oltre ai G.C.P. e valutando quanto queste si discostano da quelle risultanti dal rilievo aerofotogrammetrico.
Nel caso in esame, l'accuratezza relativa e quella assoluta sono stimabili attorno ai 10 cm sull'intera area rilevata.

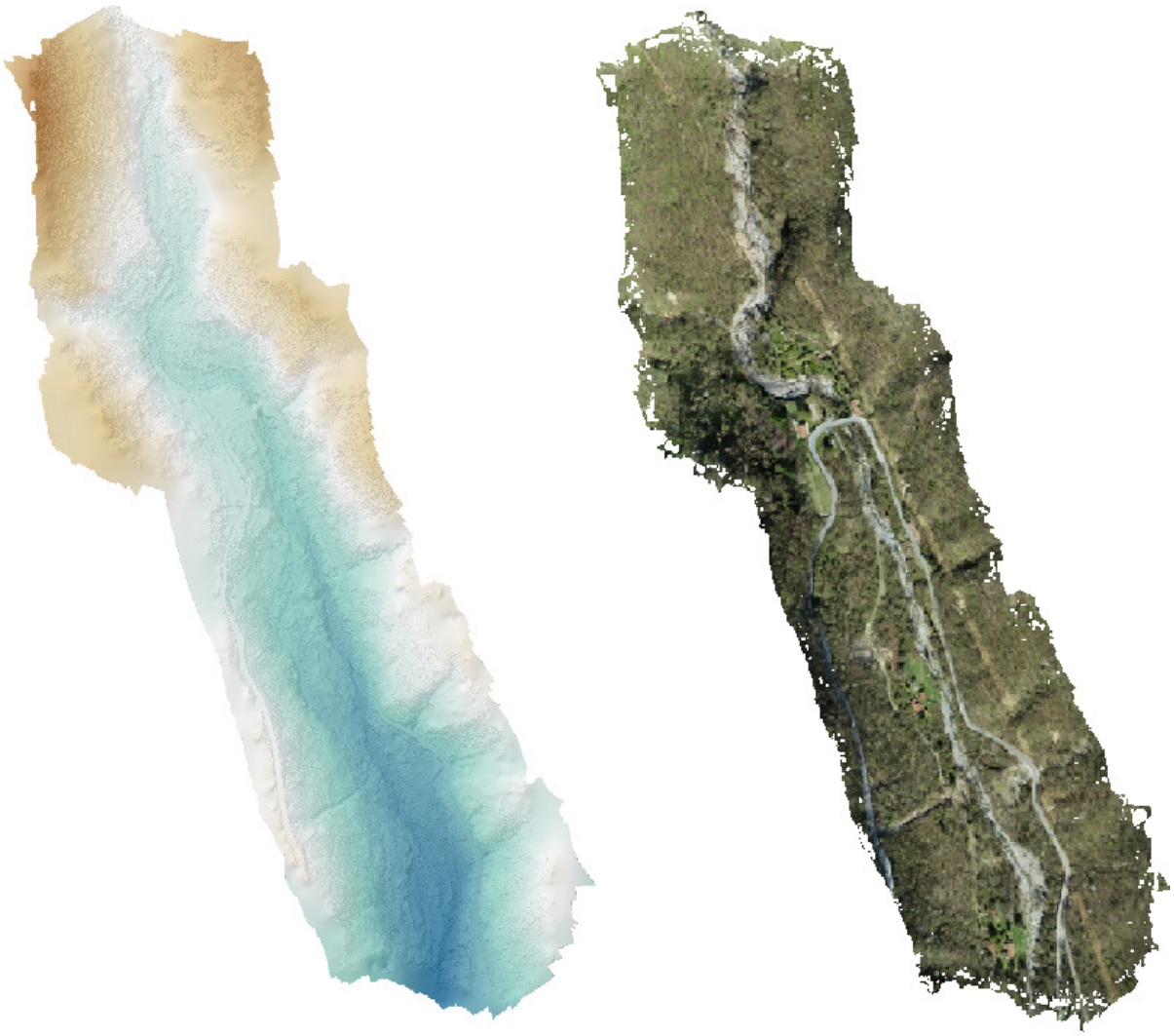


Figura 4.1 – A sinistra: modello digitale del terreno ottenuto per elaborazione del rilievo aerofotogrammetrico; a destra: ortomosaico.

4.2 Modello idraulico numerico

Il modello idraulico numerico impiegato per l'analisi delle condizioni di deflusso delle piene nel corso d'acqua di interesse è un modello unidimensionale implementato per mezzo del software HEC-RAS versione 5.0.3, sviluppato dal U.S. ArmyCorps of Engineer.
Le sezioni idrauliche sono state ricavate dal modello digitale del terreno ottenuto mediante l'elaborazione del rilievo aerofotogrammetrico.
Per il tratto del corso d'acqua indagato, si sono modellate in totale 42 sezioni, identificate con numerazione crescente da valle verso monte.
La simulazione idraulica è stata svolta allo stato attuale e allo stato di progetto.
Le scogliere e il materiale movimentato in alveo allo stato di progetto sono stati inseriti nel modello definendo una configurazione geometrica di progetto della sezione, che differisce da quella rilevata allo stato attuale.

4.3 Condizioni fisiche di riferimento

Il modello idraulico numerico è stato analizzato nelle condizioni di rilievo (stato attuale, SA) e di progetto (stato di progetto, SP).
Le portate di piena sono state immesse nella prima sezione a monte (sezione 1279).

Per quanto riguarda le condizioni al contorno, si è inserita una pendenza dell'alveo a monte pari all'11% e a valle del 5%, entrambe rilevate in sito.
Per il calcolo si è assunto, secondo i '*Valori di riferimento da adottare nei calcoli idraulici per la scabrezza idraulica'* indicati nel Regolamento Regionale del 14 luglio 2011 n. 3, un coefficiente di scabrezza pari a n = 0,033, corrispondente a **Ks = 30,0 $m^{1/3}/s$** - valido per *corsi d'acqua naturali con salti, rocce o vegetazione anche arbustiva-arborea in alveo.*

	Q [m^3/s]
Tr 50	109
Tr 100	138
Tr 200	173
Tr 500	229

Tabella 4.1–Portate prese a riferimento per la modellazione idraulica

Le simulazioni sono state condotte in regime misto al fine di considerare sia correnti lente sia correnti veloci.

4.4 Risultati ottenuti

Le simulazioni condotte mostrano che il deflusso delle portate di piena avviene per la totalità in corrente veloce con elevato carico cinetico.
Per la piena associata al periodo di ritorno pari a 200 anni, presa a riferimento ai fini della progettazione delle opere, sia nella situazione attuale sia nella situazione di progetto, il limite delle aree di esondazione raggiunge all'incirca il ciglio di sponda attuale, che risulta in alcuni punti molto arretrato rispetto a quello rilevato prima dell'evento alluvionale.
Gli interventi in progetto non determinano alcuna modifica rilevante né dei tiranti idrici né delle aree di esondazione tra lo stato attuale e lo stato di progetto.
Per ulteriori dettagli si vedano le *Planimetrie di esondazione,* in allegato A alla presente, e i risultati della modellizzazione idraulica in HEC-RAS, in allegato B.

5. OPERE DI DIFESA IDRAULICA

Nell'area in esame, allo stato attuale, non si riscontra la presenza di opere di difesa idraulica.

6. MANUFATTI INTERFERENTI

All'interno dell'area di studio sono presenti due ponti che possono interferire con il deflusso delle portate di piena.

Manufatto interferente n. 1
Si tratta di un ponte in muratura, che si colloca immediatamente a monte del ponte della S.P. n. 52. Il ponte attualmente non è visibile da foto aerea, in quanto l'area in esame è totalmente invasa dalla vegetazione. L'impalcato del ponte è poco più basso rispetto all'impalcato del ponte della S.P. n. 52. Il ponte non è stato inserito nel modello idraulico, non avendo avuto la possibilità di rilevarlo, a causa della folta vegetazione.

Manufatto interferente n. 2
Si tratta del ponte della S.P. n. 52: è un ponte in muratura ad arco con una luce di circa 10 m. Il ponte è stato inserito nel modello, definendo una sezione immediatamente a monte e a valle.



Figura 6.1 – Ortomosaico con indicazione del ponte della S.P. n. 52 e del ponte nascosto dalla vegetazionepoco a monte

7. EFFETTI DEGLI INTERVENTI IN PROGETTO

Nel seguito si descrivono in maniera sintetica gli effetti idraulici delle opere in progetto con riferimento alle piene con tempo di ritorno pari a 50, 100, 200 e 500 anni.
In accordo con quanto sancito al comma 1, art. 7 delle Norme di Attuazione del Piano di Bacino dell'Ambito n. 4 – Argentina, la portata di piena presa a riferimento per la progettazione delle opere è quella con tempo di ritorno 200 anni.

7.1.1 Modifiche indotte sul profilo inviluppo di piena

Le modifiche indotte dall'introduzione delle opere in progetto vengono valutate confrontando gli andamenti dei profili di pelo libero della corrente allo stato attuale e allo stato di progetto.
L'introduzione delle difese spondali non modifica in maniera sostanziale la quota del pelo libero; i tiranti in corrispondenza delle scogliere allo stato di progetto subiscono degli innalzamenti massimi pari a 25 cm per piene con tempo di ritorno 200 anni.
La realizzazione delle scogliere non comporta variazioni sostanziali dell'area della sezione di deflusso rispetto a quanto rilevato allo stato attuale; si sottolinea che, nei tratti di realizzazione delle difese spondali, la sezione di deflusso attuale risulta molto più ampia rispetto allo stato ante-alluvione.

7.1.2 Riduzione della capacità di invaso dell'alveo

Per nessun periodo di ritorno, si verificano variazioni sensibili della aree allagate, come evidente osservando le *Planimetrie di esondazione* in allegato A alla presente.

In generale si può quindi concludere che non si determina variazione significativa della capacità di invaso dell'alveo.

7.1.3 Interazioni con le opere di difesa idrauliche esistenti

Attualmente, nel tratto di interesse, non sono presenti opere di difesa idraulica.

7.1.4 Opere idrauliche in progetto nell'ambito dell'intervento

Nel seguito si elencano le principali opere di sistemazione idraulica previste sul torrente Capriolo da monte verso valle:

- **Scogliera 2**: si prevede la realizzazione di una scogliera a protezione dell'erosione localizzata, che si è originata a seguito dell'evento alluvionale in sinistra del Rio Capriolo, circa 100 m a valle della presa, nel comune di Molini di Triora. La scogliera presenterà un'altezza di 2.50 m e una lunghezza di 8.50 m. Il paramento risulterà inclinato di 50° rispetto all'orizzontale; la fondazione avrà uno spessore di 1.00 m, risulterà inclinata di 6° e poggiante su marna affiorante con ricoprimento al piede di almeno 0.50 m. Essa verrà realizzata in massi ciclopici di diametro minimo 0.75 m, per evitare che essi vengano trasportati a valle durante le piene (per ulteriori dettagli in merito, si rimanda al dimensionamento idraulico, riportato al par. 7.1.4.1). La fondazione verrà realizzata in massi ciclopici cementati e poggerà su marna affiorante. La parte in elevazione verrà realizzata escludendo l'impiego del calcestruzzo per garantire una migliore integrazione paesaggistica dell'opera.

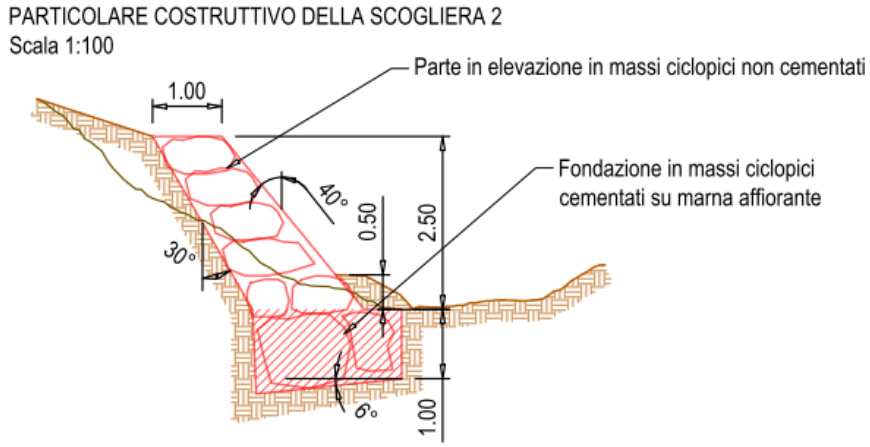


Figura 7.1 – Estratto non in scala dell'Elaborato D.2: particolare costruttivo della scogliera 2

- **Scogliera 3**: nel comune di Molini di Triora, in sinistra del Rio Capriolo, circa 150 m a valle della presa, in un'area in cui attualmente la condotta dell'impianto idroelettrico risulta scoperta in alcuni punti, si prevede la realizzazione di una doppia scogliera e di un terrapieno a protezione della condotta forzata. La doppia scogliera presenterà una lunghezza di 41.50 m; la scogliera alla base presenterà un'altezza di 3.50 m, la scogliera superiore, arretrata di circa 1.50 m rispetto alla testa della scogliera alla base, presenterà un'altezza variabile da 2.00 a 1.50 m. Entrambi i paramenti risulteranno inclinati di circa 60° rispetto all'orizzontale; la fondazione della scogliera alla base presenterà una spessore di 1.00 m e un ricoprimento alla base pari a 1.00 m; la fondazione della scogliera superiore, non raggiunta dai livelli di piena per tempi di ritorno di 200 anni, presenterà uno spessore di 0.50 m. Entrambe le fondazioni risulteranno inclinate di 6° verso l'interno. Per entrambe le scogliere si prevede l'impiego di massi ciclopici di diametro minimo equivalente pari a 1.00 m, capaci di resistere alle piene (per ulteriori dettagli in merito, si rimanda al dimensionamento idraulico, riportato al par. 7.1.4.1). Considerata l'azione di trascinamento dovuto alle piene, cautelativamente si prevede di realizzare sia la fondazione che il paramento della scogliera alla base in massi ciclopici cementati; per la scogliera superiore è prevista la cementazione esclusivamente della fondazione, escludendo l'utilizzo del calcestruzzo per la parte in elevazione al fine di favorire l'integrazione paesaggistica dell'opera.

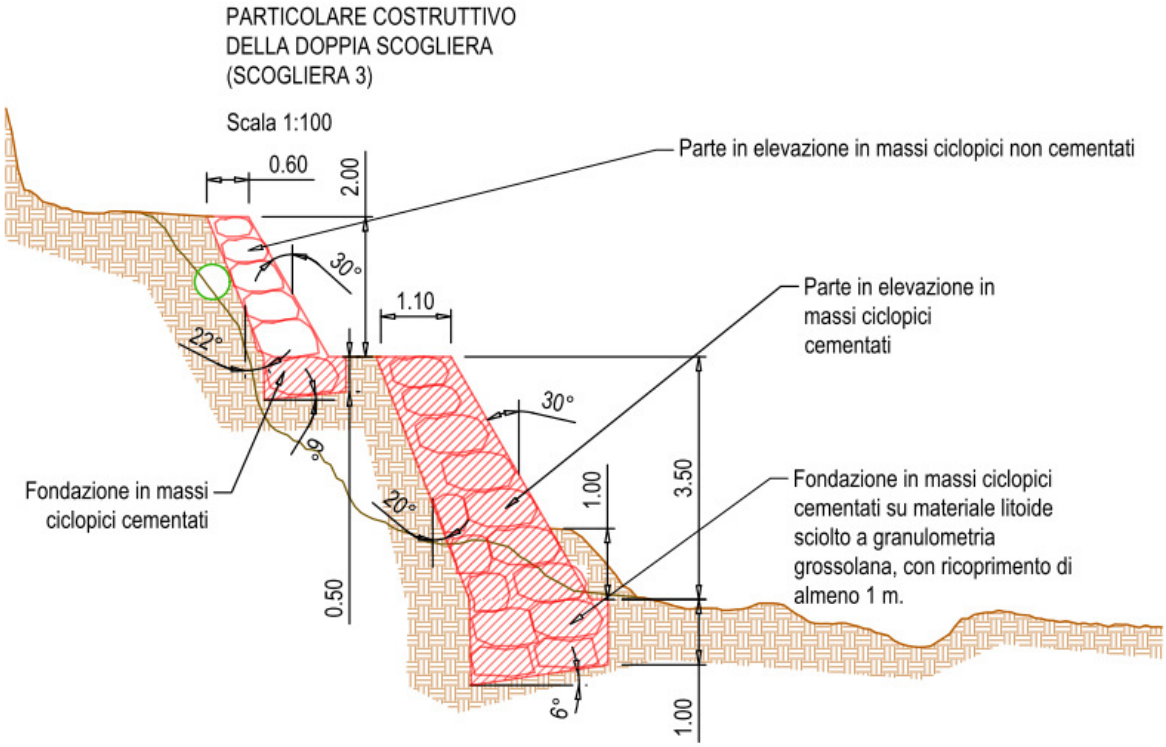


Figura 7.2 - Estratto non in scala dell'Elaborato D.2: particolare costruttivo della scogliera 3

- **Scogliera 4:** nel comune di Triora, circa 70 m a valle del ponte della SP n. 52, in destra del Rio Capriolo, si prevede la realizzazione di 81 m di scogliera ad altezza variabile a seconda del profilo della sponda originario, a protezione della strada vicinale che si articola parallela alla sponda e della condotta forzata al di sotto. La scogliera presenterà un'altezza massima di 2 m e una fondazione di spessore 1.00 m, inclinata di 6°, poggiante su marna affiorante. Si prevede l'impiego di massi ciclopici di diametro minimo equivalente pari a 1.00 m, capaci di resistere alle piene (per ulteriori dettagli in merito, si rimanda al dimensionamento idraulico, riportato al par. 7.1.4.1), e l'utilizzo del calcestruzzo per il riempimento dei vuoti della fondazione. Il calcestruzzo non verrà impiegato per la realizzazione del paramento, al fine di garantire una migliore integrazione paesaggistica dell'opera.

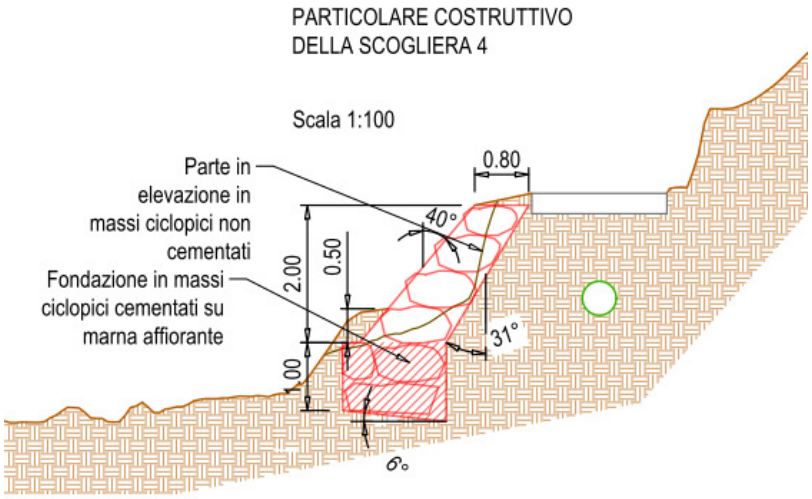


Figura 7.3 - Estratto non in scala dell'Elaborato D.2: particolare costruttivo della scogliera 4

7.1.4.1 Dimensionamento idraulico dei massi

La stabilità dei massi facenti parte della scogliera è stata verificata per mezzo della teoria di Shields (1936). Essa valuta la stabilità di materiali di assegnata granulometria soggetti all'azione di trascinamento della corrente confrontando i valori critici di velocità o di tensioni tangenziali (intesi come valori che corrispondono alle condizioni di moto incipiente per il materiale considerato) con i valori delle tensioni realmente agenti sulle superfici di interesse. La condizione di stabilità si raggiunge quando la tensione tangenziale critica (τ_{cr}) risulta maggiore di quella esercitata dalla corrente sul singolo masso (τ_0): $\tau_{cr}>\tau_0$.

La tensione tangenziale agente sul fondo alveo può essere espressa come:

$$\tau_{0,f} = \gamma_w * R * i$$

dove:
γ_w è il peso specifico dell'acqua;
R è il raggio idraulico della sezione, pari al rapporto tra l'area e il perimetro bagnato di quest'ultima;
i è la pendenza del fondo alveo.
La tensione tangenziale critica che determina il moto incipiente dei granuli (τ_{cr}) può essere ricavata a partire dalla seguente condizione di equilibrio alla base della teoria di Shields:

$$\frac{\tau_{cr}}{(\gamma_s - \gamma_w) * d} = \theta\ (Re^*)$$

dove:
γ_s è il peso specifico del materiale;
d è il diametro medio del materiale;
θ è un parametro adimensionale dipendente dalle caratteristiche dei granuli e del letto fluviale e dal numero di Reynolds di grano (Re*) relativo alla velocità di attrito u*.
In particolare alcuni autori hanno individuato valori empirici specifici del parametro di Shields:
- $\theta = 0.047$ nell'espressione di Meyer-Peter, che considera nullo il termine relativo al trasporto solido;
- $\theta = 0.058 \div 0.060$ nell'espressione originale di Shields per Re*>400;
- $\theta = 0.116$ nella relazione di Kalinske, che considera un fattore di compattezza del materiale dato dall'effetto di mutuo incastro delle particelle.

La formulazione della condizione di equilibrio considerata nel presente progetto è quella sviluppata da Shields per Re*>400:

$$\frac{\tau_{cr}}{(\gamma_s - \gamma_w) * d} = 0.06$$

Tale formulazione è stata ricavata facendo riferimento al movimento di particelle isolate posate sul fondo di un alveo naturale.

Per le verifiche di stabilità delle sponde, la condizione di moto incipiente viene espressa considerando le componenti attive del peso e della spinta idrodinamica in relazione alla pendenza della sponda (α) rispetto all'orizzontale. Per tali verifiche, viene solitamente utilizzata la seguente espressione (Lané, 1953):

$$\tau_{cr}(\alpha) = \tau_{cr}(0)[cos\alpha * \sqrt{1 - tg^2\alpha / tg^2\varphi}]$$

dove:
$\tau_{cr}(0)$ è la tensione critica sul fondo;
φ è l'angolo di attrito interno al materiale.
La tensione tangenziale agente sulle sponde viceversa si può considerare il 75% di quella agente sul fondo.
Nel seguito si riportano i calcoli eseguiti sia per le sezioni di progetto.
Le proprietà geometriche delle sezioni di calcolo sono state definite in funzione dei risultati ottenuti per Tr=200 anni mediante la simulazione eseguita con il software HEC-RAS v.5.0.5 (per ulteriori dettagli si rimanda all'elaborato *B-Relazione idrologico-idraulica*), in particolare:
- A [m^2]: area di deflusso;
- p[m]: perimetro bagnato;
- R [m]= A/p: raggio idraulico;
- i [-]: pendenza dell'alveo in prossimità della sezione;

Si è assunto il peso specifico dei massi γ_s pari a 26 kN/m^3.
Nella seguente tabella inoltre si è indicato con:

- $\tau_{0,f}$ la tensione tangenziale agente sul fondo alveo;
- $\tau_{0,s}$ la tensione tangenziale agente sulla sponda;
- $\tau_{cr,f}$ la tensione tangenziale critica valutata con la formula di Shields;
- $\tau_{cr,0}$ la tensione critica sul fondo valutata con la formula di Shields prendendo in considerazione il diametro dei massi sulla sponda $d_{masso,\,s}$;
- α l'angolo di inclinazione della scogliera rispetto all'orizzontale;
- ϕ l'angolo di attrito caratteristico dei massi, individuato sulla base dei dati forniti in letteratura per massi naturali costituenti scogliere marittime (67°) e massi cementati (75°);
- $\tau_{cr,s}$ la tensione tangenziale critica agente sulla sponda inclinata, valutata mediante la formula di Lané.

Infine si sono definiti i fattori di sicurezza:
- $FS_f = \tau c_{r,f} / \tau_{0,f}$: fattore di sicurezza sul fondo;
- $FS_s = \tau_{cr,s} / \tau_{0,s}$: fattore di sicurezza sulla sponda.

	Tr=200 anni								
	SCOGLIERA 2	**SCOGLIERA 3**				**SCOGLIERA 4**			
	S9	S10	S11	S12	S13	S14	S15	S16	S17
A [m^2]	21.82	25.56	23.30	17.50	23.82	20.77	21.46	20.72	21.78
p [m]	19.07	17.77	24.00	15.70	23.71	16.18	16.50	19.21	17.93
R [m]	1.14	1.44	0.97	1.11	1.00	1.28	1.30	1.08	1.21
i [-]	0.02	0.03	0.03	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
τ0,f [kPa]	0.22	0.42	0.29	0.44	0.39	0.50	0.51	0.42	0.48
τ0,s [kPa]	0.17	0.32	0.21	0.33	0.30	0.38	0.38	0.32	0.36
dmasso,f [m]	0.75	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
h [m]	2.03	2.48	1.73	1.85	1.73	1.73	2.12	1.74	2.12
τcr,f [kPa]	0.73	0.97	0.97	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91
FS,f	**3.2**	**2.3**	**3.4**	**2.1**	**2.3**	**1.8**	**1.8**	**2.1**	**1.9**
dmasso,s [m]	0.75	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
τcr,0 [kPa]	0.73	0.97	0.97	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91
α [°]	50.00	60.00	60.00	60.00	60.00	50.00	50.00	50.00	50.00
ϕ [°]	67.00	75.00	75.00	75.00	75.00	67.00	67.00	67.00	67.00
cosα	0.64	0.50	0.50	0.50	0.50	0.64	0.64	0.64	0.64
tanα	1.19	1.73	1.73	1.73	1.73	1.19	1.19	1.19	1.19
tanϕ	2.36	3.73	3.73	3.73	3.73	2.36	2.36	2.36	2.36
τcr,s [kPa]	0.40	0.43	0.43	0.40	0.40	0.50	0.50	0.50	0.50
FS,s	**2.4**	**1.4**	**2.0**	**1.2**	**1.4**	**1.3**	**1.3**	**1.6**	**1.4**

Tabella 7.1- Dimensionamento idraulico dei massi

Per garantire adeguati margini di sicurezza nei confronti della piena con tempo di ritorno 200 anni (FS > 1.2), si prescrive l'impiego di massi con diametro equivalente superiore a 0.75 m per la realizzazione della scogliera 2 e superiore a 1.00 m per la realizzazione delle scogliere 3 e 4.

7.1.5 Modifiche indotte sull'assetto morfologico, planimetrico ed altimetrico dell'alveo inciso e di piena

Le scogliere sono state progettate allo scopo di non causare una significativa modifica dell'assetto morfologico, planimetrico ed altimetrico dell'alveo inciso e di piena.

7.1.6 Modifiche indotte sulle caratteristiche naturali e paesaggistiche della regione fluviale

Gli interventi sono stati progettati allo scopo di garantire il più possibile l'integrazione delle opere con l'ambiente circostante, limitando per quanto possibile l'utilizzo del calcestruzzo e prevedendo opere spondali con massi d'alveo, in modo da mantenere le caratteristiche di naturalità.
Si prevede l'utilizzo del calcestruzzo esclusivamente dove strettamente necessario, per la realizzazione delle fondazioni delle scogliere e del paramento della porzione inferiore della scogliera 3.

7.1.7 Condizioni di sicurezza dell'intervento rispetto alla piena

In condizioni di piena, le scogliere contrastano l'erosione spondale, senza generare variazioni significative dei livelli idrici tra lo stato attuale e lo stato di progetto.
Si prescrive l'impiego di massi di diametro minimo equivalente superiore a 0.75 m per la realizzazione della scogliera 2 e superiore a 1.00 m per la realizzazione delle scogliere 3 e 4, per evitare che essi vengano trasportati a valle dalla corrente durante le piene.

8. ALLEGATI

A Planimetrie di esondazione

B Risultati delle simulazioni idrauliche in HEC RAS per Tr 50, 100, 200 e 500 anni