

**ASSE VIARIO MARCHE-UMBRIA
E QUADRILATERO DI PENETRAZIONE INTERNA
MAXILOTTO 1**

PROGETTO ESECUTIVO

CONTRAENTE GENERALE



IL RESPONSABILE DEL CONTRAENTE GENERALE

IL PROGETTISTA

GRUPPO DI PROGETTAZIONE DEL PROGETTO ESECUTIVO APPROVATO

ATI: TECHNITAL s.p.a. (mandataria)

EGIS STRUCTURES & ENVIRONNEMENT S.A.

SICS s.r.l. Società Italiana Consulenza Strade

S.I.S. Studio di Ingegneria Stradale s.r.l.

SOIL Geologia Geotecnica Opere in sottterraneo Difesa del territorio

INTEGRAZIONE PRESTAZIONI SPECIALISTICHE *Dott. Ing. M. Raccosta*

IL GEOLOGO

Dott. Geol. F. Ferrari

IL GEOLOGO

IL RESPONSABILE DELLA CONGRUENZA FUNZIONALE
CON IL PROGETTO ESECUTIVO APPROVATO
(ATI: TECHNITAL-EGIS-SOIL-SIS-SICS)

VISTO:IL RESPONSABILE
DEL PROCEDIMENTO

Dott. Ing. Vincenzo Lomma

VISTO:IL COORDINATORE DELLA
SICUREZZA IN FASE DI ESECUZIONE

LA DIREZIONE LAVORI

**SUBLOTTO 1.2: S.S. 77 "VAL DI CHIEN TI" TRONCO PONTELATRAVE – FOLIGNO
TRATTI FOLIGNO-VALMENOTRE E GALLERIA MUCCIA-PONTELATRAVE (inclusa galleria)**

RIPRISTINO DELLE AREE DI CANTIERE – AREA ST2 E STRADA 8a

RELAZIONE IDRAULICA

Codice Unico di Progetto (CUP) **F12C03000050011 ex F12C03000050010** (comunicazione CIPE 20/04/2015)

REVISIONE

FOGLIO

SCALA

CODICE ELAB. e FILE	Opera	Lotto	Stato	Settore	WBS	Disciplina	Tipo Doc.	N. Progress.
	L0703	A1	E	P	CA10100	IDR	REL	008

A

01 01

D

C

B

A

EMISSIONE

09/11/2015

N. Arcelli

S. Pellegrini

M. Rasimelli

REV.

DESCRIZIONE

DATA

REDATTO

VERIFICATO

APPROVATO

APPROVATO RESP.
TECNICO ANAS

0	Premessa	2
1	Inquadramento	2
2	Analisi pluviometrica.....	5
3	Calcolo delle portate	7
4	Descrizione e dimensionamento degli interventi.....	13

0 Premessa

La presente Relazione Idrologica e Idraulica si pone l'obiettivo di descrivere e dimensionare le opere di sistemazione idraulica che rientrano nel piano di recupero ambientale della pista di cantiere n. 8° e dell'area di cantiere ST2, situate nella valle del Menotre, tra le località Ponte Santa Lucia e Scopoli, nel Comune di Foligno (PG). La strada in oggetto si stacca dall'esistente SS 77 (accesso num. 2c) per raggiungere gli imbocchi della galleria naturale "Sostino" (i4) e fa parte della superficie dell'area di cantiere ST2.

Le prescrizioni tecniche impartite nel Progetto Esecutivo Approvato e le delibere CIPE prevedono che l'area in oggetto recuperi l'assetto morfologico preesistente all'insediamento del cantiere. Di conseguenza la pista e l'area di cantiere dovranno essere rimosse integralmente e con esse anche il guado realizzato sul fosso di Maceratìe, che scende dal pendio ed interseca la pista e scorre all'interno dell'area di stoccaggio.

La demolizione del guado provvisorio sul citato fosso, che ne ha consentito l'attraversamento da parte dei mezzi di lavoro durante le fasi di cantiere, e la sistemazione dell'alveo (con rivestimento in pietrame nel tratto interessato dalla rimozione della condotta attualmente presente e risagomatura del tratto a valle sino all'attraversamento dell'esistente SS 77) sono gli interventi di natura idraulica previsti in progetto.

1 Inquadramento

La pista di cantiere n. 8A lungo la quale è prevista la demolizione del guado provvisorio sul fosso di Maceratìe, si stacca dalla SS77 in corrispondenza dell'accesso num. 2c (all'incirca alla chilometrica 10+500). Allo stato ante operam la zona si presentava come un'area verde, con presenza di folta vegetazione (di natura boschiva). In fase di cantiere, data la necessità di realizzare la galleria naturale "Sostino" e il viadotto "Scopoli", sull'area si è ampiamente intervenuto per la realizzazione di aree di cantiere per lo stoccaggio (ST2) del materiale e di strade per permettere l'accesso a tali aree e a quelle di lavorazione. La sistemazione finale di tale zona ne prevede il completo ripristino allo stato naturale, pre-intervento.

Il punto di guado del fosso di Maceratìe è indicato nella planimetria ed ortofoto seguenti con un cerchio di colore blu.

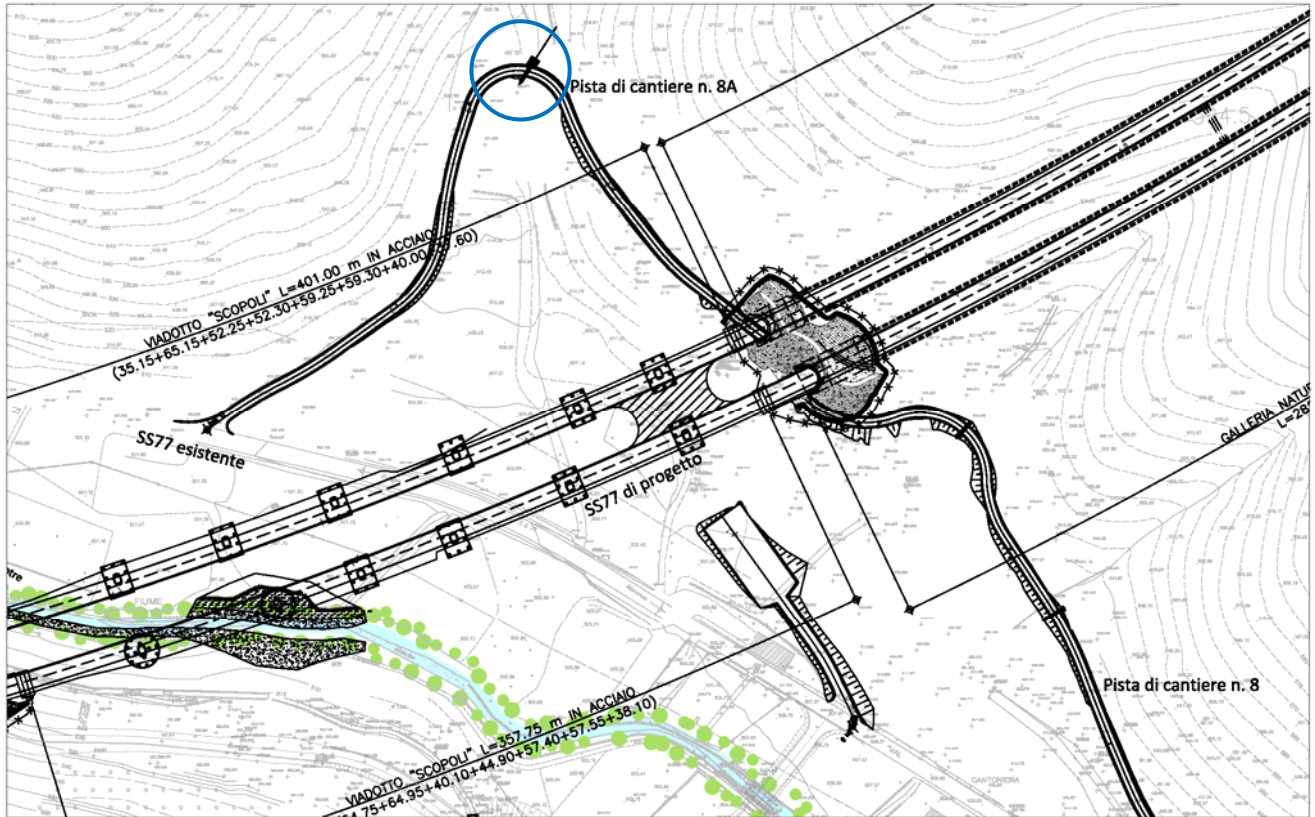


Figura 1: Localizzazione pista di cantiere n. 8A

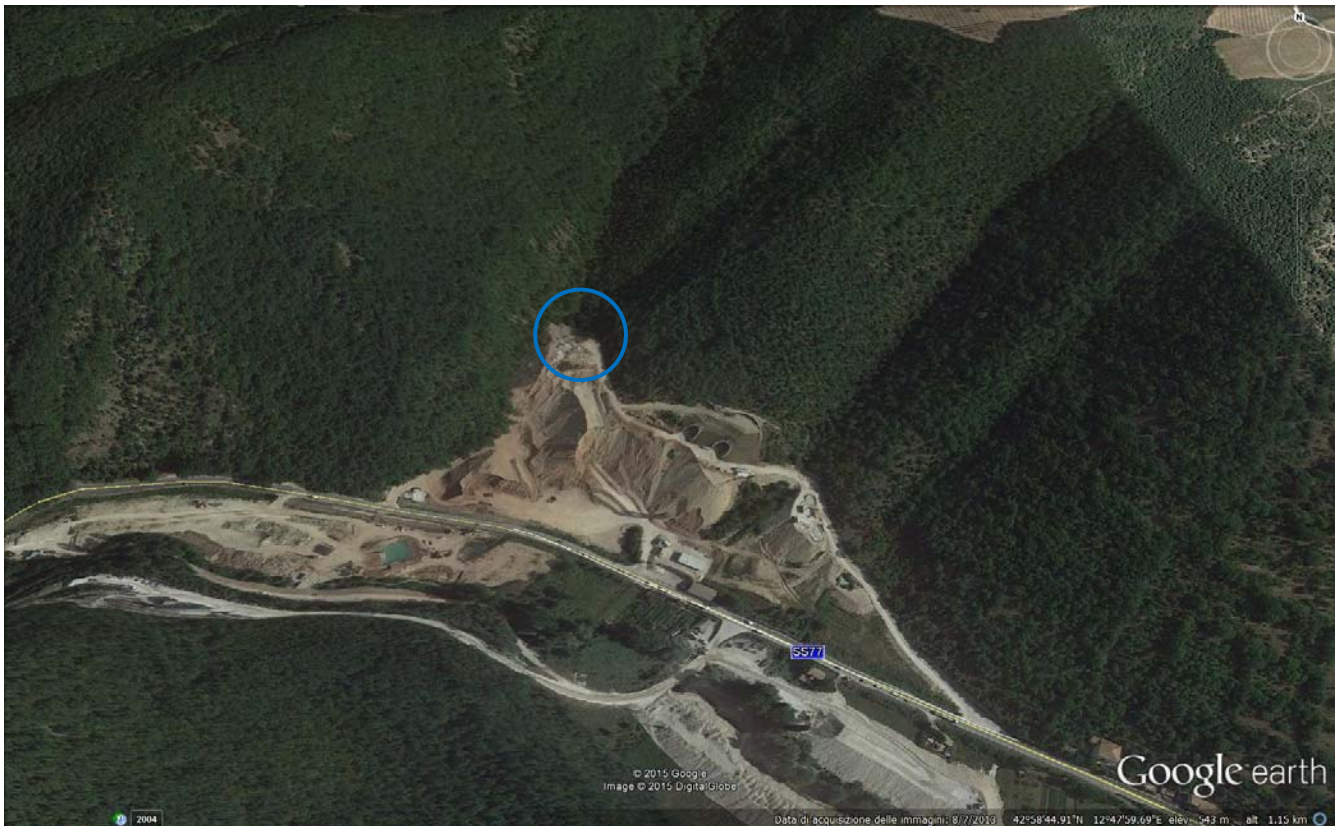


Figura 2: Localizzazione pista di cantiere n. 8A su ortofoto

Oltre alla rimozione del guado risulta necessaria una risagomatura del fosso stesso, a valle del tratto attualmente interessato dalla condotta, al fine di riportarlo alla completa funzionalità originale. Tale risagomatura verrà prolungata sino al punto di attraversamento del vecchio sedime della SS 77

I bacini che formano la valle del Menotre sono generalmente bacini incassati in versanti di pendenza medio - elevata, privi di insediamenti urbani diffusi e limitati solamente alle zone di immissione nella valle principale del fiume Menotre. I versanti presentano coperture detritiche depositatesi su un substrato roccioso piuttosto fratturato; spesso risulta visibile il substrato roccioso affiorante che si alterna alle coperture detritiche, evidenziando una roccia estremamente fratturata e permeabile. Il soprassuolo è interessato da una fitta copertura boschiva e, in misura minore, da aree prative. Tali caratteri morfologici sono indicativi di una elevata permeabilità dei suoli e di una elevata capacità di trattenuta di volumi meteorici prima che si possano formare fenomeni di scorrimento superficiale.

Queste caratteristiche morfologiche si ritrovano anche nel bacino tributario del fosso di Maceratiae, avente le seguenti caratteristiche morfometriche (ricavate dalla "Relazione idraulica per la verifica delle opere provvisionali" del Progetto Esecutivo Approvato, proprio relativamente alla pista di cantiere n. 8A):

BACINO FOSSO DI MACERATIE:

Area = 0.25 kmq

Quota massima = 765 m s.m.m.;

Quota minima = 527 m s.m.m.;

Quota media = 658 m s.m.m.;

Lunghezza = 0.66 km.

Una volta definite le caratteristiche geomorfologiche del bacino tributario del citato fosso, per il quale è prevista la demolizione del guado provvisorio lungo il tracciato della pista di cantiere n. 8A e la risagomatura del tratto più a valle, è necessario effettuare un'analisi idrologica per poter definire, partendo dalle precipitazioni, le portate di riferimento e quindi i tiranti corrispondenti. Tali grandezze permetteranno di verificare la pezzatura minima del pietrame che verrà posato come rivestimento

dell'alveo e delle sponde nei tratti ove verrà rimosso il guado, oltre che verificare l'officiosità idraulica della sezione trasversale di progetto per il tratto risagomato.

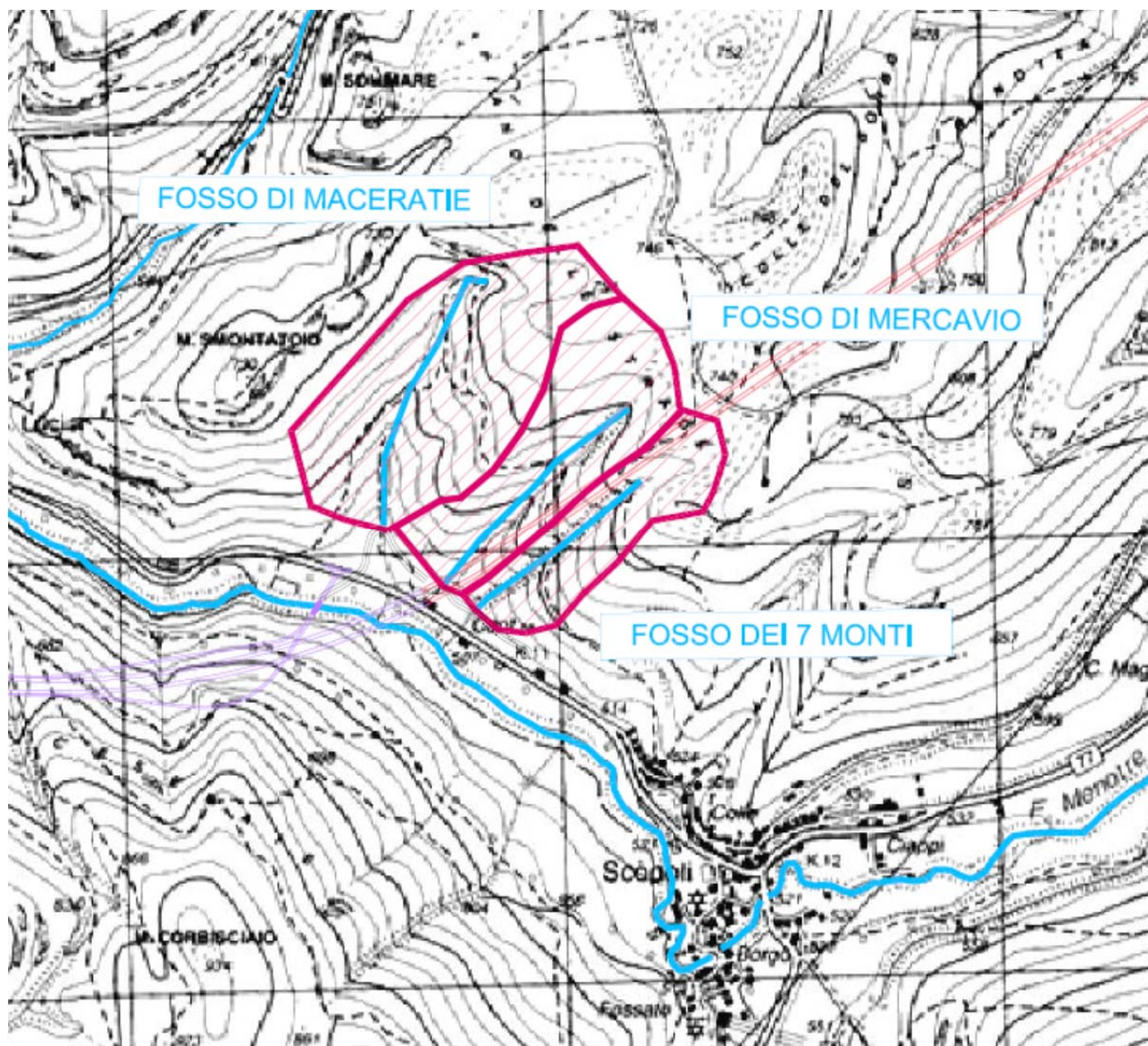


Figura 3: Bacino tributario del fosso di Maceratle

2 Analisi pluviometrica

Lo studio idrologico condotto nell'ambito del Progetto Esecutivo Approvato, per quanto riguarda la regione Umbria, ha fatto propri i risultati di uno studio di regionalizzazione statistica, riportato nella pubblicazione *“Determinazione delle precipitazioni di massima intensità e breve durata per la Regione Umbria”*, prodotto dal Servizio Idrografico Regionale della Regione dell'Umbria.

Secondo tale studio, i valori delle altezze cumulate di pioggia per la zona di Foligno assumono i valori riportati in tabella 1:

Tr =	2	5	10	20	25	50	100	200	500
D (h)	Altezza di pioggia cumulata (mm)								
0.80	27.08	40.98	50.18	59.01	61.81	70.43	78.99	87.52	98.77
1.00	28.64	43.33	53.06	62.39	65.35	74.47	83.52	92.54	104.44
1.20	29.97	45.35	55.53	65.30	68.40	77.94	87.42	96.85	109.31
1.50	31.69	47.95	58.72	69.05	72.32	82.41	92.43	102.41	115.58
2.00	34.06	51.53	63.10	74.20	77.72	88.56	99.32	110.05	124.20
3.00	37.69	57.03	69.83	82.11	86.01	98.01	109.92	121.79	137.45
4.00	40.50	61.28	75.04	88.23	92.42	105.32	118.12	130.87	147.70
6.00	44.82	67.82	83.04	97.65	102.28	116.55	130.72	144.83	163.45
9.00	49.60	75.05	91.90	108.06	113.19	128.99	144.66	160.28	180.89
12.00	53.30	80.65	98.76	116.12	121.63	138.60	155.45	172.23	194.38

Tabella 1 - Altezze cumulate di precipitazione per la zona di Foligno

I valori delle altezze di pioggia sono funzione della durata della precipitazione e del tempo di ritorno e vengono ricavati dalla curva di possibilità pluviometrica, che per la zona di Foligno assume la forma:

$$P(\text{Tr}, t) = m_1 * (1 + V * K_T) * t^n \quad (1)$$

dove i valori dei parametri si ricavano dalla tabella seguente:

Tr (anni)	2	5	10	20	25	50	100	200	500
(1+V·K _T)	0.91	1.38	1.69	1.99	2.08	2.37	2.66	2.95	3.33
a	28.64	43.33	53.06	62.39	65.35	74.47	83.52	92.54	104.4
n	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25

Tabella 2 - Curve di possibilità pluviometrica per la zona di Foligno

La correlazione tra l'intensità di pioggia e la sua probabilità di accadimento ottenuta a seguito di analisi di tipo statistico, consente di assegnare a ciascun punto del territorio il valore dell'altezza di pioggia per una determinato tempo di ritorno. Tale correlazione assume validità puntuale in quanto si riferisce alla storia pluviometrica osservata negli anni in quel particolare punto dello spazio.

Volendo determinare il valore dell'altezza di pioggia media caduta all'interno di una regione spaziale di significative dimensioni è necessario affrontare il problema della probabilità della contemporaneità degli eventi in quanto il manifestarsi, in un punto del territorio, di una precipitazione di eccezionale intensità è difficilmente accompagnata da una precipitazione di analoga

intensità in un punto posto ad una certa distanza da esso. Per evitare di sovrastimare l'intensità dell'evento meteorico, si applica un coefficiente correttivo (detto ARF(S,d), coefficiente di riduzione areale), che permette di determinare la precipitazione media che interessa un'area di superficie S (kmq) in funzione della sua durata d (ore); esso, in base alla definizione dell'USWB (United States Weather Bureau) è determinabile come:

$$ARF(S, d) = 1 - (1 - \exp(c_1 * S)) * \exp(c_2 * d^{c_3}) \quad (2)$$

I coefficienti c_1 , c_2 e c_3 dipendono dalla regione geografica di appartenenza e devono essere valutati mediante apposite valutazioni sui dati disponibili. Attualmente non esistono studi realizzati in tal senso e per la pratica valutazione del coefficiente ARF è possibile fare riferimento unicamente ai risultati ottenuti per il bacino del fiume Reno chiuso a Casalecchio (S=1051 kmq):

$$c_1 = -0.01298$$

$$c_2 = -0.6787$$

$$c_3 = 0.332.$$

3 Calcolo delle portate

Nell'ambito dello studio idraulico del PEA, i tre fossi presenti nell'area in oggetto, fosso Maceratice (interferente con la pista n. 8A), fosso di Mercavio e fosso dei Sette Monti (entrambi non interferenti con la pista in oggetto), sono stati studiati proprio in ragione dell'interferenza con le piste di cantiere presenti in prossimità della galleria "Sostino" e dello svincolo "Menotre".

Partendo dall'analisi delle precipitazioni, secondo le modalità riportate al paragrafo precedente, il Progetto Esecutivo ha proceduto alla determinazione delle portate di riferimento, per un tempo di ritorno pari a 10 anni, trattandosi di opere provvisoriale per il dimensionamento delle tombature; le portate di piena sono state determinate adottando il metodo del Curve Number, riportato nella Relazione Idrologica e Idraulica relativa al subplotto 1.2. Per brevità di esposizione si riportano qui i principali risultati delle elaborazioni idrologiche e le risultanze numeriche ottenute dall'applicazione del modello idraulico più significative per la trattazione in oggetto.

Corso d'acqua	Area (kmq)	Zmax (m s.m.m.)	Zmin (m s.m.m.)	Zmedia (m s.m.m.)	L (km)	Tc (h)
Fosso di Maceratie	0.25	765	527	658	0.66	0.33

Tabella 3 - Caratteristiche morfometriche del bacino del fosso di Maceratie e tempo di corrivazione

Metodo del Curve Number per il calcolo della portata

Per il calcolo delle portate di riferimento per il dimensionamento del diametro medio del pietrame da utilizzare per il rivestimento di fondo alveo e sponde, è necessario innanzitutto calcolare la pioggia efficace, ossia quella che effettivamente contribuisce alla generazione del deflusso superficiale. La stima della pioggia effettiva può essere determinata con il noto metodo del Curve Number (CN), introdotto dal SCS (Soil Conservation Service, 1972), sviluppato sull'analisi di eventi pioggia-portata di un gran numero di bacini degli Stati Uniti. Tale metodo è largamente impiegato in campo idrologico, soprattutto nel caso di bacini non strumentati, per la sua facilità di applicazione e per la sua discreta affidabilità. Esso si basa su un'equazione che lega la pioggia netta con le perdite per infiltrazione e con la precipitazione totale, così rappresentabile:

$$h_{\text{netta}} = \frac{(P-I_a)^2}{P-I_a+S} \quad (3)$$

con h_{netta} = volume specifico (altezza) di pioggia netta;

P = volume specifico (altezza) di pioggia lorda;

S = massimo volume specifico di acqua che il terreno può trattenere in condizioni di saturazione;

I_a = perdita iniziale, cioè il valore limite di altezza di pioggia che il terreno può trattenere nella fase iniziale del fenomeno.

La pioggia lorda può essere calcolata partendo dai coefficienti della curva di possibilità climatica a ed n, fissato un certo tempo di ritorno (tabella 2):

$$P = a * t_c^n \quad (4)$$

I due parametri della relazione (3), S ed I_a , possono essere determinati mediante operazioni di taratura del modello, o, in mancanza di misurazioni, per la stima di I_a si può far ricorso alla relazione:

$$I_a = 0.2 * S \quad (5)$$

Per valutare il parametro S, sulla base di considerazioni empiriche, il Soil Conservation Service ha proposto la seguente relazione:

$$S = 25.4 \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) \quad (6)$$

(con S espresso in mm), in funzione di un parametro adimensionale, CN, indicato come Curve Number. Il valore di CN varia tra 0 (suoli "infinitamente" permeabili) e 100 (suoli impermeabili) in funzione del tipo di suolo, dell'uso del suolo e del contenuto di acqua iniziale.

In particolare sulla base del contenuto d'acqua iniziale, definito in termini di classi di valori del parametro API₅ (indice delle precipitazioni nei cinque giorni antecedenti l'evento), vengono distinte tre categorie di CN: CN(I), CN(II), CN(III).

Categoria di umidità	Stagione con vegetazione ferma	Stagione con vegetazione crescente
I	< 0.5	< 1.4
II	0.5 ÷ 1.1	1.4 ÷ 2.1
III	> 1.1	> 2.1

Tabella 4 - Categorie di umidità del suolo in funzione di API₅ (in inch = 2.54 cm)

I valori di CN(II) sono tabulati in funzione del tipo e dell'uso del suolo come indicato in tabella 8, al variare delle quattro categorie di tipo di suolo ordinate dalla A alla D con potenzialità di deflusso crescente:

- GRUPPO A: terreni sabbiosi molto permeabili: strati di sabbie e depositi eolici (tipo loess) di elevato spessore, limi parzialmente consolidati;
- GRUPPO B: terreni franchi moderatamente permeabili, depositi sabbiosi superficiali;
- GRUPPO C: terreni franco-limosi poco permeabili: argille a medio impasto, terreni con ridotto contenuto di parti organiche o a elevato tenore di argilla;
- GRUPPO D: terreni argillosi quasi impermeabili: argille fortemente plastiche (suolo rigonfiante), terreni con elevato contenuto salino.

In termini di condizioni idrologiche si possono considerare le seguenti condizioni:

- cattive condizioni: sottobosco soggetto a sfruttamento e distruzione per via degli incendi;
- discrete condizioni: sottobosco soggetto a sfruttamento, ma al riparo dagli incendi;
- buone condizioni: sottobosco protetto.

Uso del Suolo	Drenaggio	Condizioni Idrologiche	Tipo di terreno			
			A	B	C	D
RESIDENZIALE						
zone urbane e commerciali	imp. 85%		89	92	94	95
zone industriali	imp. 72%		81	88	91	93
case a schiera	imp. 65%		77	85	90	92
ville	imp. 25%		54	70	80	85
parcheggi			98	98	98	98
parchi	cop.verde 75%		39	61	74	80
STRADE						
pavimentate	cunette e fognatura		98	98	98	98
in macadam			76	85	89	91
sterrate			72	82	87	89
AGRICOLO						
prato stabile			77	86	91	94
seminativo	solchi a ritto chino	cattive	65	76	84	88
seminativo		buone	63	75	83	87
seminativo	terrazzato (a fasce)	cattive	63	74	82	85
seminativo		buone	61	73	81	84
seminativo		cattive	61	72	79	82
seminativo		buone	59	70	78	81
pascolo		cattive	68	79	86	89
pascolo		discrete	49	69	79	84
pascolo		buone	39	61	74	80
erbaio			30	58	71	78
terreno boschivo		cattive	45	66	77	83
terreno boschivo		discrete	36	60	73	79
terreno boschivo		buone	25	55	70	77

Tabella 5 - Valori di CN(II) in funzione del tipo di suolo e della copertura

I valori di CN(I) e CN(III) sono ricavabili da quelli di CN(II) mediante le seguenti relazioni empiriche:

$$CN(I) = \frac{4.2 \cdot CN(II)}{10 - 0.058 \cdot CN(II)} \quad (7)$$

$$CN(III) = \frac{23 \cdot CN(II)}{10 + 0.13 \cdot CN(II)} \quad (8)$$

Una volta ricavati tutti i parametri, si procede alla stima della precipitazione netta, che rappresenta l'altezza di pioggia che effettivamente contribuisce al deflusso.

Per quanto riguarda il territorio rientrante nella regione Umbria l'analisi delle caratteristiche dei suoli presenti suggerisce di assumere come rappresentativo delle caratteristiche medie dei bacini idrografici un valore del CN compreso tra 40 e 45. Considerando le dimensioni ridotte del bacino e la possibilità che si verificano scrosci ravvicinati, durante i quali il terreno si trovi già imbibito, si assume un valore maggiore di CN(II), a favore di sicurezza, pari a 48, incremento del 20% rispetto al valore 40 di riferimento.

Inoltre si è assunto un valore delle perdite iniziali I_a pari a 10 mm, inferiore a quello consigliato dal SCS in quanto esperienze condotte in ambiti alpini hanno evidenziato una tendenza alla sovrastima di questo parametro se assunto pari a 0.2 S come consigliato dal SCS.

Per il dimensionamento della sezione trasversale di progetto del tratto da risagomare e la verifica del pietrame da posare lungo il fondo alveo e lungo le sponde nel tratto oggetto di rimozione del guado, si adotta un tempo di ritorno $T_r = 100$ anni, per il quale i coefficienti della curva di probabilità climatica sono $a = 83.25$, $n = 0.25$; per la determinazione del tempo critico della precipitazione e della portata massima si riporta quanto determinato in sede di Progetto Esecutivo Approvato.

In particolare, la durata della precipitazione è stata determinata, per tentativi, ricercando la situazione in grado di restituire le massime portate di piena. Adottando il metodo proposto dal SCS, viene a cessare la regola che impone la durata critica pari al tempo di corrivazione T_c , valida utilizzando il metodo razionale. Il tempo di pioggia critica, valutato per tentativi, è risultato essere pari a 0.8 h (figura 4).

Partendo dagli ietogrammi corrispondenti ai fenomeni meteorici di diversa frequenza di accadimento (T_r), si sono ottenuti i valori della massima portata al colmo:

Corso d'acqua	Q10 (m ³ /s)	Q100 (m³/s)	Q200 (m ³ /s)	Q500 (m ³ /s)
Fosso di Maceratie	1.0	2.3	2.8	3.5

Tabella 6 - Risultati delle elaborazioni idrologiche

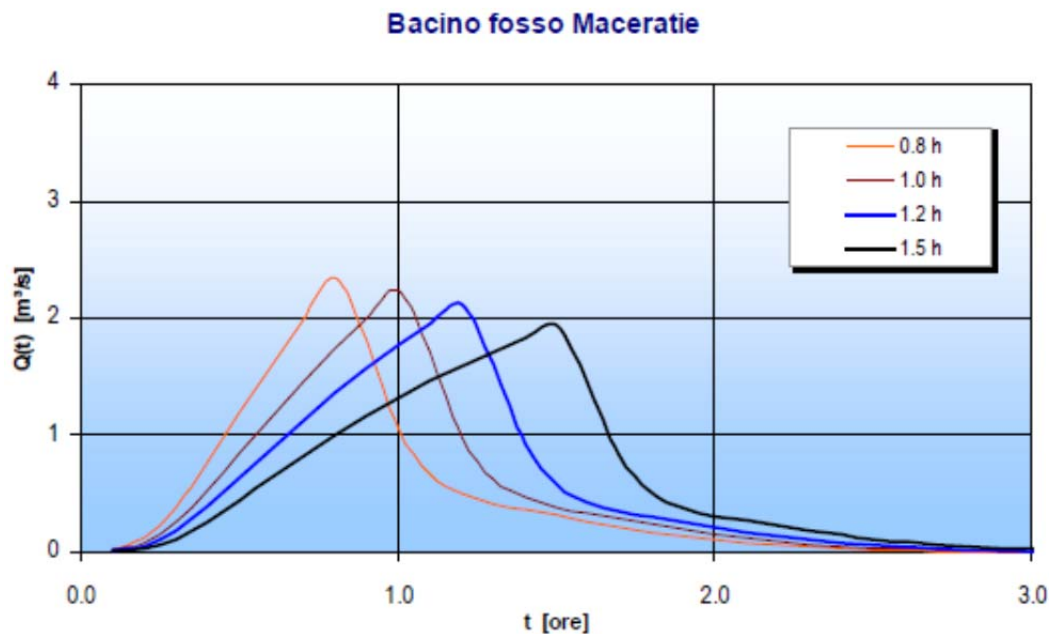


Figura 4: Idrogrammi di piena per diverse durate di pioggia

Le portate di piena sono state valutate con riferimento ad un tempo di ritorno da 10 a 500 anni, ma ai fini delle verifiche idrauliche degli interventi di ripristino del fosso si farà riferimento al solo tempo di ritorno di 100 anni.

Questo valore di portata, $Q_{100} = 2.3 \text{ m}^3/\text{s}$, viene assunto come riferimento per il dimensionamento del pietrame che verrà posato a protezione dell'alveo e della scarpata nel punto di demolizione del guado provvisorio, oltre che per la verifica del tratto a valle che verrà risagomato.

Per il calcolo dei tiranti corrispondenti a tale portata, si utilizza la nota formula di Chezy, del moto uniforme:

$$Q = K_s * A * R^{2/3} * \sqrt{i} \quad (9)$$

dove:

Q = portata (mc/s)

K_s = coefficiente di Strickler, preso pari a 30 come suggerito in letteratura per canali inerbiti

R = raggio idraulico (sezione bagnata / perimetro bagnato) (m)

i = pendenza (adimensionale)

A = sezione bagnata (mq)

Dal momento che il progetto di ripristino dell'area prevede la rimozione completa della pista di cantiere e delle varie aree di stoccaggio di materiale, si interverrà su un'area estesa e sarà necessario ripristinare, oltre al tratto interessato dalla rimozione del guado, anche la porzione di fosso a valle del guado stesso, in quanto compromesso durante le fasi di lavorazione. Si decide di adottare una sezione di progetto trapezoidale con pendenza delle sponde pari a 2/3 e larghezza alla base pari a 1.00 m ed altezza massima pari a 1.00 m. Di seguito si riportano le verifiche in condizioni di moto uniforme per il fosso di Maceratie, al fine di determinare, per il tratto oggetto di risagomatura, il tirante corrispondente alla portata centennale calcolata.

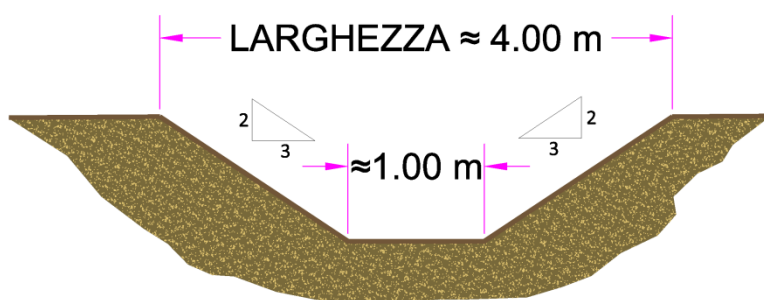


Figura 5: Sezione tipo di ripristino del fosso oggetto di intervento

Il tratto di fosso interessato dalla rimozione del guado (1 condotta in cls DN1000) e, più a valle, dalla risagomatura del fosso per il suo completo ripristino, ha una pendenza di fondo media dell'ordine del 11-12%; considerando la sezione trasversale di progetto indicata in figura 5, si ha, per $p = 11\%$, una portata massima pari a 16.55 mc/s. La portata di riferimento ($Q_{100} = 2.30$ mc/s) transita con un tirante pari a 0.37 m e una velocità pari a circa 4 m/s.

4 Descrizione e dimensionamento degli interventi

Gli interventi idraulici previsti in progetto consistono nei seguenti:

- demolizione del guado provvisorio realizzato sul fosso di Maceratie, lungo la pista di cantiere n. 8A, e sistemazione dell'alveo e delle sponde, mediante protezione con pietrame di idonea pezzatura, nel tratto interessato dalla rimozione della condotta;

- risagomatura del fosso, a valle del guado, per una lunghezza di circa 210 metri, sino all'attuale attraversamento della vecchia SS 77 congiungimento con la sistemazione finale del fosso prevista nel progetto dello svincolo "Menotre".

La sezione trasversale di progetto è quella indicata in figura 5 (come riportato nell'elaborato relativo alla sistemazione idraulica della pista n. 8A) e si estende, come detto, dal tratto di rimozione del guado sino all'intersezione con l'esistente SS 77. Il tratto con protezione in pietrame si estenderà per una lunghezza totale di 14 metri circa. Dalle verifiche riportate nel seguito è risultato efficace un diametro medio dei massi pari a 60 cm. Gli spazi interstiziali verranno riempiti con pietrame di più piccola e variegata pezzatura tale da garantire la stabilità del fondo ed evitare scalzamenti e aggiramenti.

Nel tratto più a valle oggetto di risagomatura l'alveo verrà protetto con biostuoia.

Di seguito si riportano i calcoli eseguiti per il dimensionamento dei massi impiegati nella scogliera di protezione dell'alveo per il tratto interessato dalla rimozione del guado. Per la verifica della scogliera è stata utilizzata la teoria di Shields, che si basa sulla teoria delle condizioni di moto incipiente del materiale investito dalla corrente sul fondo e sulle sponde; il moto del materiale di diametro minore o uguale a d ha origine quando la tensione tangenziale τ dovuta alla corrente supera il valore critico τ_{cr} , funzione della dimensione del materiale e delle caratteristiche geometriche dell'alveo.

La tensione tangenziale massima esercitata dalla corrente è espressa dalla relazione :

$$\tau_0 = \xi \cdot \gamma_w \cdot y_0 \cdot i \quad (10)$$

dove γ_w è il peso specifico del fluido (pari ad 1 t/m^3), i la pendenza di fondo, y_0 l'altezza idrica nella sezione e ξ è un coefficiente che tiene conto della distribuzione delle τ sul fondo e sulle sponde; esso viene assunto cautelativamente pari ad 1 in corrispondenza del fondo e 0.75 in corrispondenza delle sponde, secondo le indicazioni usualmente riportate in letteratura tecnica.

Il calcolo delle tensioni tangenziali dovute alla corrente è stato svolto considerando il tirante massimo in alveo corrispondente ad un evento di piena con tempo di ritorno $Tr = 100$ anni. Nella

tabella seguente si riportano i risultati delle tensioni tangenziali massime ricavate mediante l'applicazione della (10), al fondo e lungo la sponda:

	Pendenza (i)	Battente idrico γ_0 (m)	τ_0 (N/mq)
Fosso di Maceratie (fondo)	0.11	0.37	407
Fosso di Maceratie (sponda)	0.11	0.37	305

Tabella 7 - Calcolo delle tensioni tangenziali massime esercitate dalla corrente

I valori della τ_0 devono essere confrontati con le tensioni tangenziali critiche che mobilitano il materiale sul fondo e sulle sponde. Il valore critico τ_{cr} che mobilita un granulo di diametro d_m con peso specifico γ_s (2.67 t/mc) in assenza di coesione ed in regime turbolento, ha la seguente espressione:

$$\tau_{cr}(\alpha) = \left(\cos(\alpha) \cdot \sqrt{1 - \frac{\text{tg}^2(\alpha)}{\text{tg}^2(\varphi)}} \right) \cdot (0,06 \cdot (\gamma_s - \gamma_w) \cdot d_m) \quad (11)$$

dove α è l'inclinazione della sponda pari a 2/3, mentre per il fondo si assume α pari a zero e φ l'angolo di attrito del materiale (da letteratura si assume un angolo di 50° per il calcare sano privo di giunti e fessurazioni); d_m (diametro medio dei massi da scogliera) è pari a 60cm.

Se α è pari a zero (fondo alveo) la precedente si riduce a:

$$\tau_{cr}(\alpha) = (0,06 \cdot (\gamma_s - \gamma_w) \cdot d_m) \quad (12)$$

Di seguito si riporta il confronto tra le tensioni esercitate dalla corrente e quelle critiche, sia per il fondo alveo che per le sponde.

	τ_0	τ_{cr}	Fs
Fosso di Maceratie (fondo - $\alpha = 0$)	407	601	1.48
Fosso di Maceratie (sponda - $\alpha = 37^\circ$)	305	366	1.20

Tabella 8 - Fattori di sicurezza per diametro medio scogliere $d_m = 0.60$ m

Dal confronto di τ_0 con τ_{cr} risulta che il moto incipiente di una scogliera di massi di diametro medio $d_m = 0.60$ m caratterizzato dal valore τ_{cr} delle tensioni tangenziali è superiore al valore massimo τ_0 di tensione tangenziale che si può instaurare per $T_r = 100$ anni. Il loro rapporto consente di ottenere un valore del fattore di sicurezza F_s ovunque superiore o uguale a 1.2.