

Contraente: 	Progetto: RIFACIMENTO METANODOTTO CHIETI - RIETI DN400 (16") DP 75 bar E OPERE CONNESSE		Cliente: 
	N° Contratto : N° Commessa : NR/19094		
N° documento: 03857-PPL-RE-101-0205	Foglio 1 di 37	Data 20-02-2020	N° documento Cliente: AT-RE-105

**RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA
ATTRAVERSAMENTO FIUME TIRINO**



Alberto Vanni

00	20-02-2020	EMISSIONE	VANNI	STROPPA	CAPRIOTTI
REV	DATA	TITOLO REVISIONE	PREPARATO	CONTROLLATO	APPROVATO

RIFACIMENTO METANODOTTO CHIETI-RIETI DN400 (16") DP 24 bar E OPERE CONNESSE						
RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA ATTRAVERSAMENTO IL FIUME TIRINO						
N° Documento: 03857-PPL-RE-101-0205	Foglio 2	di 37	Rev.: 00			AT-RE-105

INDICE

1	PREMESSA E CARATTERISTICHE GENERALI.....	3
2	CARATTERISTICHE DELL'OPERA IN PROGETTO.....	5
3	STUDIO IDROLOGICO-IDRAULICO	6
3.1	Individuazione del bacino idrografico.....	6
3.2	Analisi idrologica e determinazione della portata al colmo di piena.....	8
3.3	Studio idraulico	11
4	DETERMINAZIONE DELLA MASSIMA PROFONDITÀ DI EROSIONE	22
5	CONCLUSIONI.....	27
	ANNESSO 1: STRALCIO PLANIMETRICO DEL TRATTO MODELLATO	28
	ANNESSO 2: GENERALITÀ SUL MODELLO HEC-RAS	29
	ANNESSO 3: TABELLE DI LETTERATURA	37

RIFACIMENTO METANODOTTO CHIETI-RIETI DN400 (16") DP 24 bar E OPERE CONNESSE						
RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA ATTRAVERSAMENTO IL FIUME TIRINO						
N° Documento: 03857-PPL-RE-101-0205	Foglio 3 di 37		Rev.:			AT-RE-105
			00			

1 PREMESSA E CARATTERISTICHE GENERALI

La presente relazione è finalizzata alla determinazione delle caratteristiche idrologiche-idrauliche del fiume Tirino, necessarie per la verifica della profondità di posa in subalveo della nuova condotta in acciaio DN 400 (16") DP26 bar, finalizzata al rifacimento dell'omonimo metanodotto esistente che attraverserà il corso d'acqua in un punto, individuato col numero 10, come evidenziato nello stralcio planimetrico riportato in Figura 1.

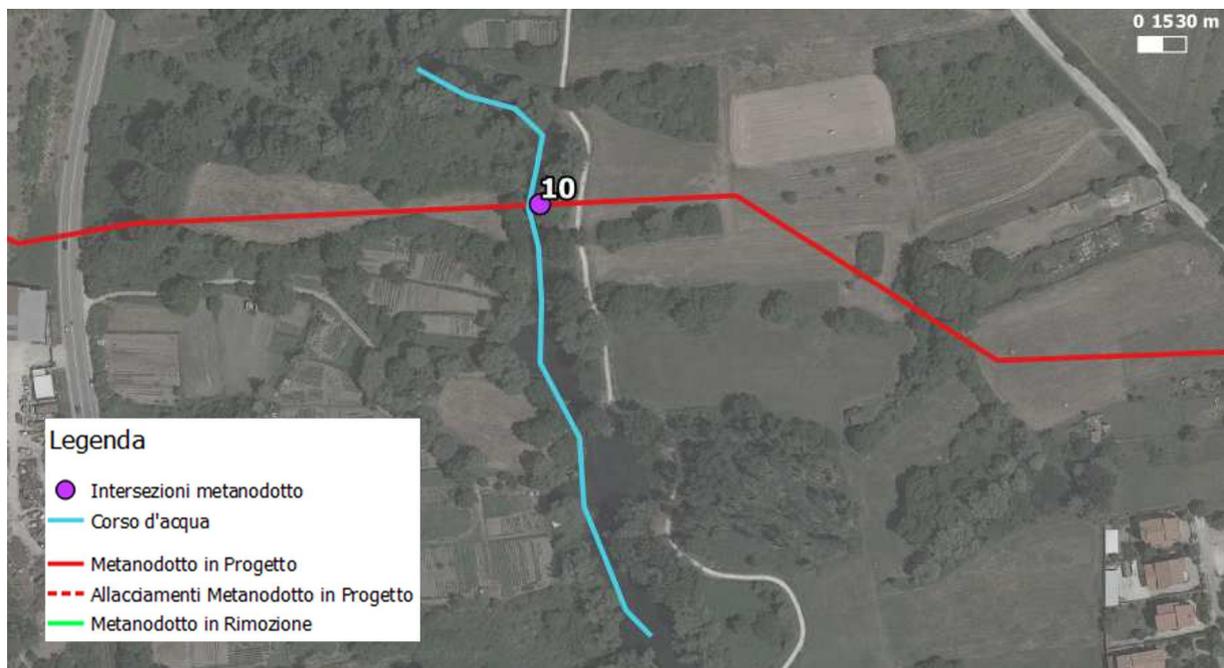


Figura 1: Vista planimetrica della zona dell'attraversamento, del tracciato del metanodotto di progetto ed esistente e del corso d'acqua.

Il fiume Tirino, è un corso d'acqua naturale appartenente alla Regione Abruzzo, affluente del fiume Aterno che, in dettaglio, viene attraversato dall'opera in progetto in un punto ubicato alla progressiva 31+110.

Scopo e finalità del presente studio è pertanto verificare l'idoneità della profondità di posa e delle protezioni adottate rispetto alle possibili dinamiche evolutive del fondo alveo o a possibili fenomeni di dissesto/erosione localizzati in corrispondenza del transito degli eventi di piena.

RIFACIMENTO METANODOTTO CHIETI-RIETI DN400 (16") DP 24 bar E OPERE CONNESSE						
RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA ATTRAVERSAMENTO IL FIUME TIRINO						
N° Documento: 03857-PPL-RE-101-0205	Foglio	4	di	37	Rev.: 00	
					AT-RE-105	

A tal fine è stata eseguita una specifica modellazione idraulica di un tratto d'alveo significativo per una lunghezza complessiva di circa 300 m, utilizzando i valori di portata ricavati secondo la metodologia riportata nel Paragrafo 3, nell'ipotesi di moto permanente, con l'ausilio del programma di calcolo HEC-RAS 5.0.7 (per le cui caratteristiche si rimanda all'Annesso 2).

Si è provveduto in tal modo alla determinazione delle grandezze caratteristiche del deflusso in alveo quali: altezza del tirante idrico, velocità della corrente, raggio idraulico, ecc..

I valori così calcolati sono stati poi utilizzati per le verifiche della profondità di posa della nuova condotta eseguite al Paragrafo 4.

RIFACIMENTO METANODOTTO CHIETI-RIETI DN400 (16") DP 24 bar E OPERE CONNESSE							
RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA ATTRAVERSAMENTO IL FIUME TIRINO							
N° Documento: 03857-PPL-RE-101-0205	Foglio 5 di 37		Rev.:				AT-RE-105
			00				

2 CARATTERISTICHE DELL'OPERA IN PROGETTO

La posa della nuova condotta verrà eseguita tramite tecnologia trenchless ad una profondità avente un minimo pari a 7.3 m in corrispondenza dell'attraversamento.

Non essendoci interferenze dirette con l'alveo non sono state previste opere di ripristino.

Per il dettaglio dell'intervento e le caratteristiche costruttive di dettaglio si rimanda all'elaborato grafico di progetto denominato AT-115.

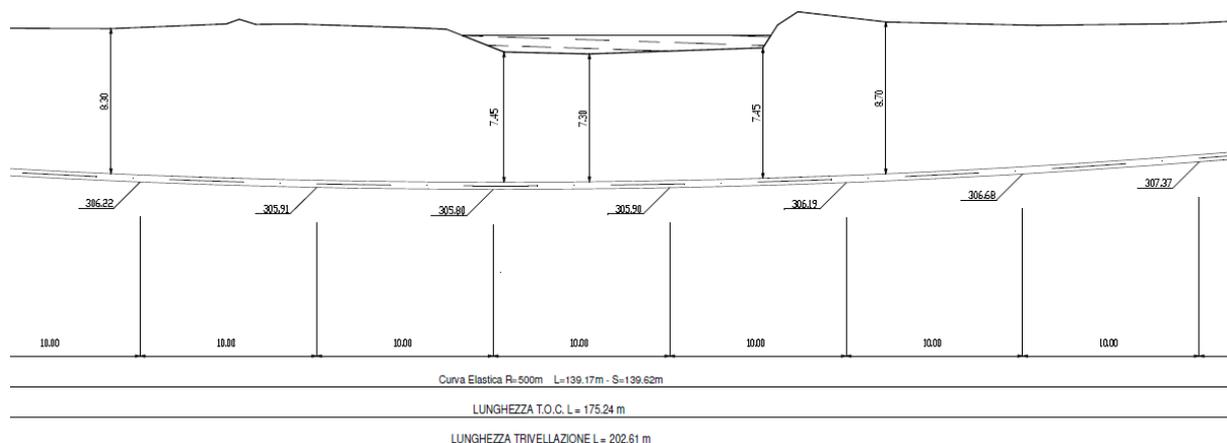


Figura 2: Attraversamento fiume Tirino (n. 10) - Sezione schematica di progetto

RIFACIMENTO METANODOTTO CHIETI-RIETI DN400 (16") DP 24 bar E OPERE CONNESSE					
RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA ATTRAVERSAMENTO IL FIUME TIRINO					
N° Documento:	Foglio	Rev.:			
03857-PPL-RE-101-0205	6 di 37	00			AT-RE-105

3 STUDIO IDROLOGICO-IDRAULICO

3.1 Individuazione del bacino idrografico

L'identificazione e la generazione grafica del bacino è stata effettuata sulla base del modello digitale del terreno (DEM) a maglia 20×20m fornito dal Geoportale Nazionale (MATTM)¹ tramite i software QGIS² e SAGA³,

Partendo da questo DEM20, a seguito del pre-processamento tramite il codice di calcolo "fillsinks" (SAGA), è stato possibile determinare il reticolo idrografico principale dei bacini tramite il codice "strahlerorder" (SAGA) ed è stato inoltre possibile risalire ai bacini sottesi nei vari punti di intersezione tra metanodotto e corpi idrici grazie al codice "upslope area – deterministic 8" (SAGA); il risultato così ottenuto è stato infine validato sulla base delle osservazioni delle linee di livello e degli elementi contenuti nella CTR della Regione Abruzzo.

¹ Catalogo WCS, Geoportale Nazionale, MATTM, http://wms.pcn.minambiente.it/wcs/dtm_20m, il quale è caratterizzato dal seguente abstract: "Il lavoro è partito agli inizi degli anni 80. Il modello numerico del terreno e' stato ottenuto interpolando le curve di livello dell'archivio IGM. Oltre a questi sono state utilizzate le linee di costa dei laghi, aventi quota pari al livello delle acque dei laghi stessi, e del mare (quest'ultima proveniente da cartografia scala 1:100.000) per arrestarne l'interpolazione. La quota, espressa in metri, e' il valore altimetrico medio incontrato nell'area della cella elementare (pixel) riferito al baricentro della cella stessa. Le curve di livello sono state digitalizzate con varie metodologie quindi l'accuratezza del dato dipende dal tipo di terreno (pianura, collina, montagne). L'accuratezza planimetrica mediamente è di circa 3-4 decimi di millimetro grafico."

²QGIS Development Team, 2019. QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. <http://qgis.osgeo.org>

³Conrad, O., Bechtel, B., Bock, M., Dietrich, H., Fischer, E., Gerlitz, L., Wehberg, J., Wichmann, V., and Böhner, J. (2015): System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2.1.4, Geosci. Model Dev., 8, 1991-2007, doi:10.5194/gmd-8-1991-2015.

**RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA
 ATTRAVERSAMENTO IL FIUME TIRINO**

N° Documento:

03857-PPL-RE-101-0205

Foglio

7 di 37

Rev.:

00

AT-RE-105

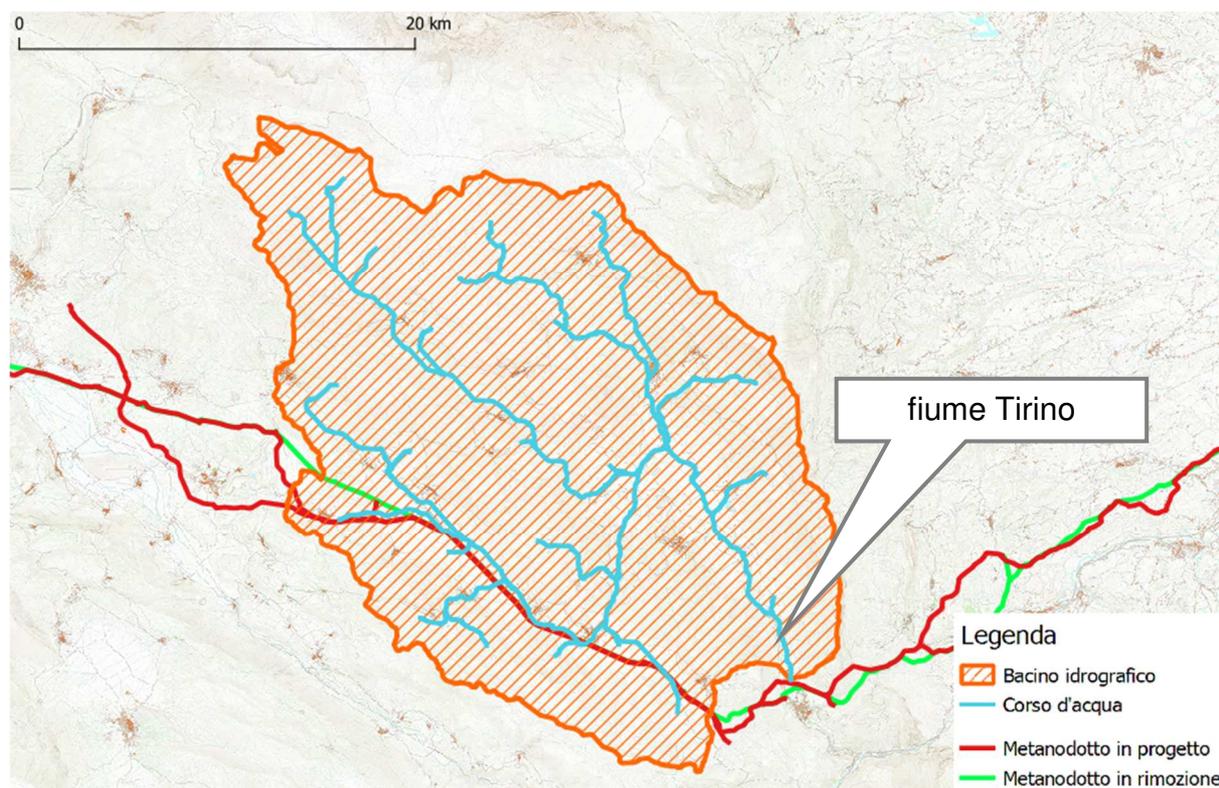


Figura 3: Bacino idrografico del fiume Tirino alla sezione di chiusura (n. 10)

Per determinare le portate da inserire nei modelli di calcolo, si è generato il bacino idrografico sotteso dalla sezione di attraversamento e da questo sono state ricavate le caratteristiche geomorfologiche (superficie, quota massima, media e minima e lunghezza dell'asta principale), le quali sono riportate in Tabella 1.

Sezione di chiusura	Superficie [km ²]	Quota minima [m s.m.]	Quota media [m s.m.]	Quota massima [m s.m.]	Lunghezza asta principale [km]
Intersezione 10	346.1	323	966.8	1915	36.00

Tabella 1: caratteristiche geomorfologiche dei tre bacini relativi alle tre sezioni di chiusura.

RIFACIMENTO METANODOTTO CHIETI-RIETI DN400 (16") DP 24 bar E OPERE CONNESSE					
RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA ATTRAVERSAMENTO IL FIUME TIRINO					
N° Documento:	Foglio	Rev.:			
03857-PPL-RE-101-0205	8 di 37	00			AT-RE-105

3.2 Analisi idrologica e determinazione della portata al colmo di piena

Lo studio idrologico dei bacini idrografici in oggetto è stato condotto seguendo l'approccio riportato nel Piano Stralcio Difesa Alluvioni (PSDA) redatto dall'Autorità dei Bacini di Rilievo Regionale dell'Abruzzo⁴; tale studio si avvale della metodologia Valutazione Piene (VAPI) la quale, a seguito di una calibrazione effettuata sulla base di dati idrologici disponibili, fornisce relazioni che consentono di ricavare le portate al colmo per mezzo del prodotto tra un fattore di crescita, dipendente dal solo tempo di ritorno, e una portata indice, dipendente dalle sole caratteristiche del bacino considerato, in questo modo è possibile regionalizzare le variabili idrologiche per aree omogenee e ottenere un valore di portata al colmo anche per quelle sezioni che non dispongono di serie storiche di dati.

La portata al colmo Q con tempo di ritorno T , relativamente a una determinata sezione di chiusura, è perciò determinabile per mezzo della relazione:

$$Q(T) = x'(T) \cdot m_Q$$

dove $x'(T)$ è il fattore di crescita dei tempi di ritorno e m_Q è la portata indice.

Per il fattore di crescita $x'(T)$ il PSDA fornisce la seguente espressione, valida solo per la zona appenninica:

$$x'(T) = -0.2781 + 0.9230 \cdot \ln(T)$$

Per quanto riguarda invece la portata indice m_Q , fornisce due possibili equazioni:

$$1) m_Q = 0.00858 \cdot A_{imp}^{0.6506} \cdot m_g^{1.4387}$$

dove A_{imp} (in km^2) è l'area sottesa classificata come impermeabile secondo le indicazioni del SIMN e $m_g = 0.885 \cdot m_{24}$ (in mm) è la pioggia indice di durata 1

⁴ Studio idrologico per la valutazione delle piene, Relazione illustrativa, Piano Stralcio Difesa Alluvioni, Autorità dei Bacini di Rilievo Regionale dell'Abruzzo

**RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA
ATTRAVERSAMENTO IL FIUME TIRINO**

N° Documento: 03857-PPL-RE-101-0205	Foglio 9 di 37	Rev.:								AT-RE-105
--	-------------------	-------	--	--	--	--	--	--	--	-----------

giorno valutata nel baricentro del bacino, $m_{24} = m_1 \cdot 24^n$, m_1 la pioggia indice di durata 1 ora (in *mm*), n l'esponente della curva di possibilità climatica valutati nel baricentro del bacino sotteso.

$$2) m_Q = \psi \cdot A \cdot ARF(T_c, A) \cdot m_1 \cdot T_c^{n-1}$$

dove $\psi = 0.315 \cdot \left(\frac{A_{imp}}{A}\right)^{0.39}$ rappresenta il coefficiente di deflusso, A la superficie idrografica del bacino (in km^2), $ARF(d, A) = 1 - (1 - \exp(-0.01298 \cdot A)) \cdot \exp(-0.6786 \cdot d^{0.332})$ il fattore di riduzione areale per la durata d (in *ore*) e T_c il tempo di corrivazione (in *ore*) calcolato mediante la classica formula di

$$Giandotti T_c = \frac{4 \cdot A^{0.5} + 1.5 \cdot L}{0.8 \cdot (z_{med} - z_{min})^{0.5}}$$

Per le finalità del presente studio si è preferito utilizzare la seconda espressione (eq. 2) per il calcolo della portata indice in quanto maggiormente correlata ai parametri geomorfologici del bacino.

I parametri m_1 ed n sono stati invece ottenuti grazie alle carte delle isolinee fornite in allegato alla relazione dal PSDA, valutati nel baricentro dei bacini; per i tre bacini oggetti di studio, si sono ricavati i parametri riportati in Tabella2

m_1	n
21.0	0.30

Tabella2: parametri ottenuti dalle carte delle isolinee fornite dal PSDA per il calcolo della portata indice

L'area impermeabile è stata determinata moltiplicando l'area del bacino per un coefficiente pari a 0.42⁵.

I fattori intermedi e le portate indice ottenuti sono riportati in Tabella3.

⁵ Tale valore è stato ricavato dalla relazione del PAI relativa al Fiume Pescara alla sezione di Santa Teresa, ed assunto uniforme per tutto il bacino.

RIFACIMENTO METANODOTTO CHIETI-RIETI DN400 (16") DP 24 bar E OPERE CONNESSE						
RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA ATTRAVERSAMENTO IL FIUME TIRINO						
N° Documento: 03857-PPL-RE-101-0205	Foglio 10 di 37		Rev.:			AT-RE-105
			00			

Sezione di chiusura	$z_{med} - z_{min}$ [m s. m.]	T_c [h]	$ARF(T_c, A)$	m_Q (eq. 2) [m ³ /s]
Intersezione 10	643.60	6.33	0.72	89.17

Tabella3: fattori intermedi e portate indicecalcolati nella sezione di interesse

Con i valori sopra riportati si è pertanto proceduto alla determinazione delle portate di progetto nelle sezioni di interesse, riassunte in Tabella4.

Sezione di chiusura	Portate al colmo		
	Q_{200} [m ³ /s]	Q_{100} [m ³ /s]	Q_{50} [m ³ /s]
Intersezione 10	411.3	354.2	297.2

Tabella4: Valori di portata calcolati nella sezione di interesse

RIFACIMENTO METANODOTTO CHIETI-RIETI DN400 (16") DP 24 bar E OPERE CONNESSE						
RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA ATTRAVERSAMENTO IL FIUME TIRINO						
N° Documento:		Foglio		Rev.:		
03857-PPL-RE-101-0205		11 di 37		00		
						AT-RE-105

3.3 Studio idraulico

Il calcolo in moto permanente è stato eseguito tramite elaboratore elettronico con l'ausilio del programma di calcolo HEC-RAS 5.0.7, per le cui caratteristiche si rimanda all'Annesso 2, mentre per i dettagli sulla posizione delle sezioni modellate si rimanda all'Annesso 1.

La lunghezza complessiva del tratto modellato è di circa 300 m.

Come condizioni al contorno rispettivamente a monte e valle del tratto modellato, è stata imposta l'altezza di moto uniforme, calcolata con una pendenza pari a quella media del tratto rilevato immediatamente adiacente.

La modellazione è stata eseguita direttamente nello stato di progetto, essendo previsto il sostanziale ripristino dell'andamento delle sponde esistenti.

Nella fincatura superiore delle sezioni riportate nelle pagine seguenti sono mostrati i valori di scabrezza (secondo Manning) utilizzati per i vari tratti, desunti da valori di letteratura⁶ richiamati in Tabella 6.

I risultati grafici e numerici, sono riportati nelle pagine seguenti, dove il significato delle grandezze in legenda è il seguente:

WS Q50	Quota pelo libero per portata con tempo di ritorno 50 anni
Crit Q50	Altezza critica per portata con tempo di ritorno 50 anni
WS Q100	Quota pelo libero per portata con tempo di ritorno 100 anni
Crit Q100	Altezza critica per portata con tempo di ritorno 100 anni
WS Q200	Quota pelo libero per portata con tempo di ritorno 200 anni
Crit Q200	Altezza critica per portata con tempo di ritorno 200 anni
Ground	Fondo alveo
Levee	Argine
Bank sta	Ciglio alveo

Tabella 5: significato grandezze in legenda ai grafici di output di HEC-RAS

⁶ Chow, V.T. (1959) Open Channel Hydraulics. McGraw-Hill, New York.

**RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA
ATTRAVERSAMENTO IL FIUME TIRINO**

N° Documento: 03857-PPL-RE-101-0205	Foglio 12 di 37	Rev.:					AT-RE-105
		00					

CORSI D'ACQUA MINORI (Larghezza del pelo libero in piena < 30m)	Minimo	Normale	Massimo
Corsi d'acqua di pianura			
1. Pulito, diritto, con la massima portata e senza divisioni o bacini profondi	0.025	0.030	0.033
2. Idem 1, ma con una maggior presenza di pietre ed erba	0.030	0.035	0.040
3. Pulito, meandriforme, alcuni bacini e zone di profondità ridotta	0.033	0.040	0.045
4. Idem 3, ma con erba e pietre	0.035	0.045	0.050
5. Idem 4, ma con portate minori e pendenze e sezioni irrilevanti	0.040	0.048	0.055
6. Idem 5, ma con una maggior presenza di pietre	0.040	0.050	0.060
7. Tratti stagnanti con erba e bacini profondi	0.045	0.070	0.080
8. Tratti con una elevata presenza di erba, con bacini profondi o scolmatori ricoperti di ceppi d'albero ed arbusti	0.075	0.100	0.150
Torrenti in montagna senza vegetazione in alveo, sponde generalmente ripide, alberi ed arbusti sulle sponde sommersi durante le piene			
9. Fondo: ghiaia, ciottoli e grosse pietre	0.030	0.040	0.050
10. Fondo: ghiaia e grosse pietre	0.040	0.050	0.070

Tabella 6: Valori caratteristici di scabrezza $[s/m^{1/3}]$, (Chow, 1959)

RIFACIMENTO METANODOTTO CHIETI-RIETI DN400 (16") DP 24 bar E OPERE CONNESSE			
RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA ATTRAVERSAMENTO IL FIUME TIRINO			
N° Documento: 03857-PPL-RE-101-0205	Foglio 13 di 37	Rev.:	
		00	
			AT-RE-105

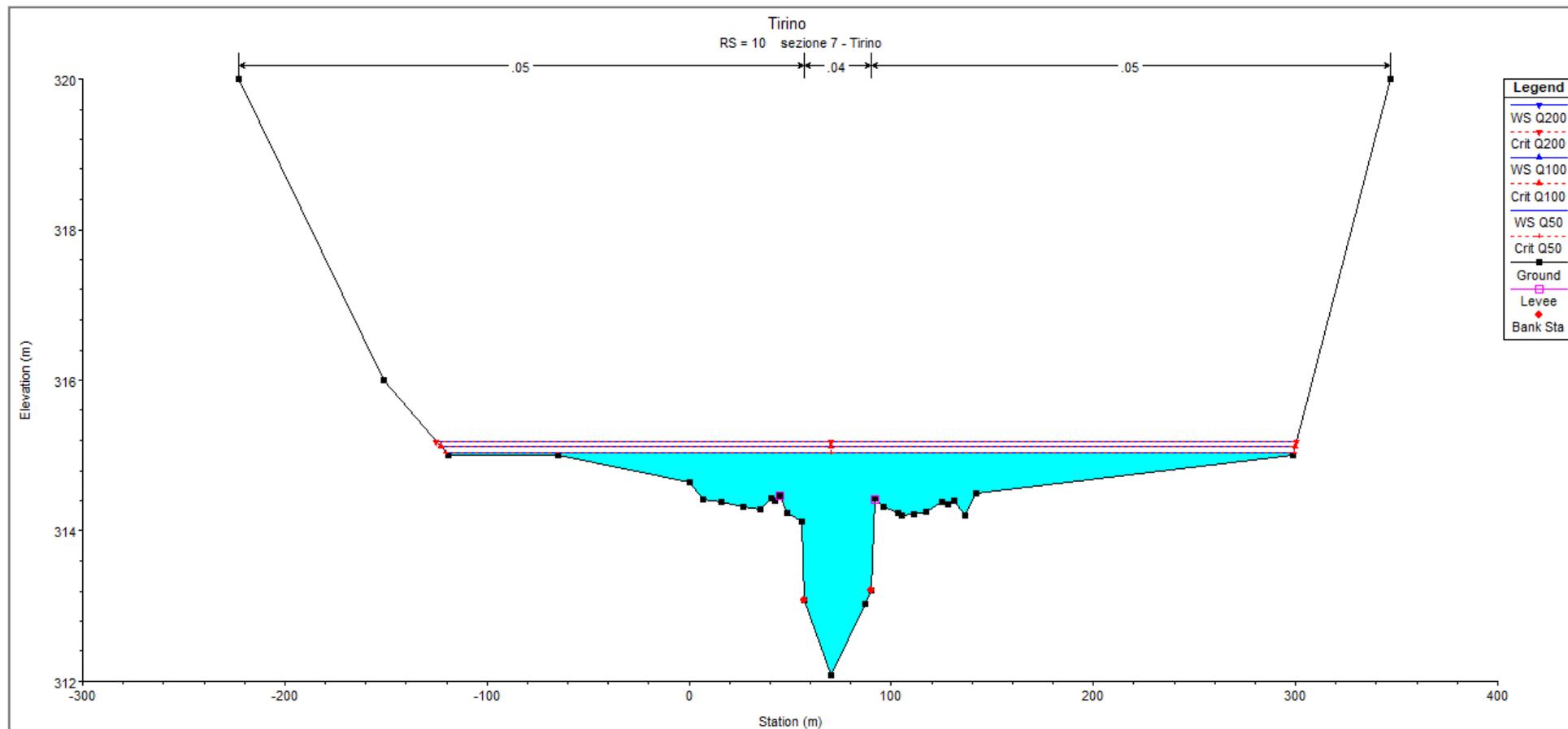


Figura 4: **RS=10** - Sezione trasversale a valle dell'attraversamento n. 10 del nuovo metanodotto - stato di progetto

RIFACIMENTO METANODOTTO CHIETI-RIETI DN400 (16") DP 24 bar E OPERE CONNESSE					
RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA ATTRAVERSAMENTO IL FIUME TIRINO					
N° Documento: 03857-PPL-RE-101-0205	Foglio 14 di 37	Rev.:			AT-RE-105
		00			

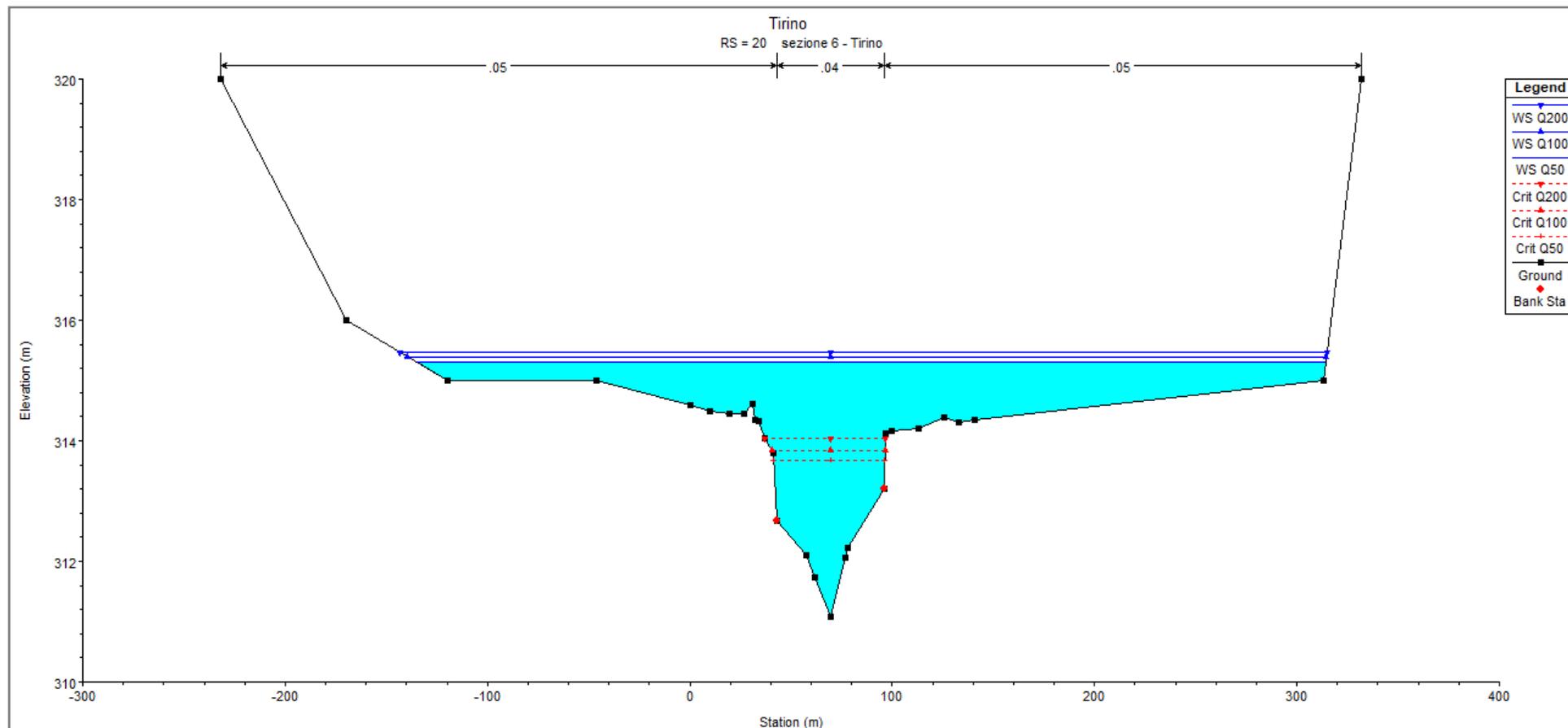


Figura 5: **RS=20** - Sezione trasversale a valle dell'attraversamento n. 10 del nuovo metanodotto - stato di progetto

RIFACIMENTO METANODOTTO CHIETI-RIETI DN400 (16'') DP 24 bar E OPERE CONNESSE			
RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA ATTRAVERSAMENTO IL FIUME TIRINO			
N° Documento: 03857-PPL-RE-101-0205	Foglio 15 di 37	Rev.:	
		00	
			AT-RE-105

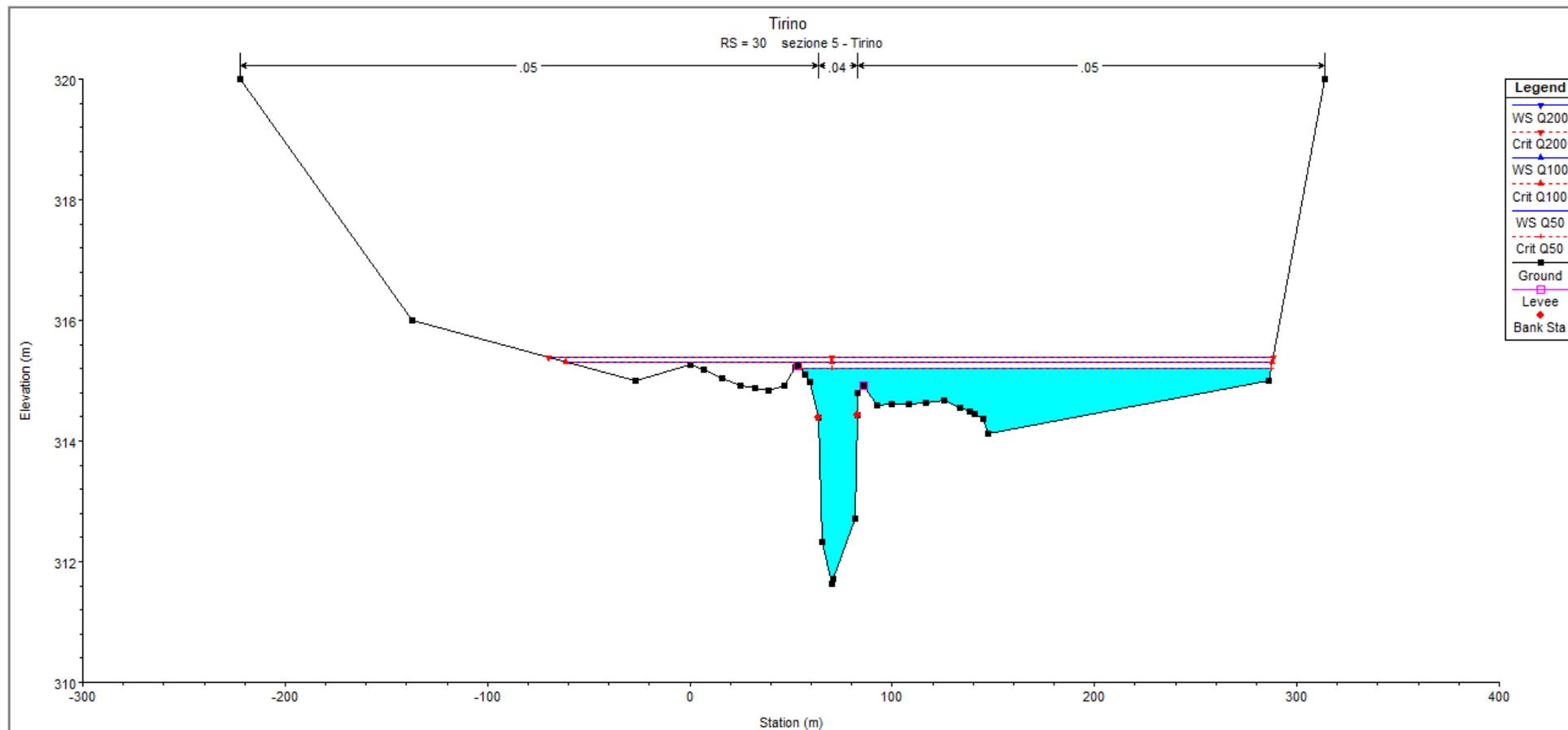


Figura 6: **RS=30** - Sezione trasversale a valle dell'attraversamento n. 10 del nuovo metanodotto - stato di progetto

RIFACIMENTO METANODOTTO CHIETI-RIETI DN400 (16") DP 24 bar E OPERE CONNESSE					
RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA ATTRAVERSAMENTO IL FIUME TIRINO					
N° Documento: 03857-PPL-RE-101-0205	Foglio 16 di 37	Rev.:			AT-RE-105
		00			

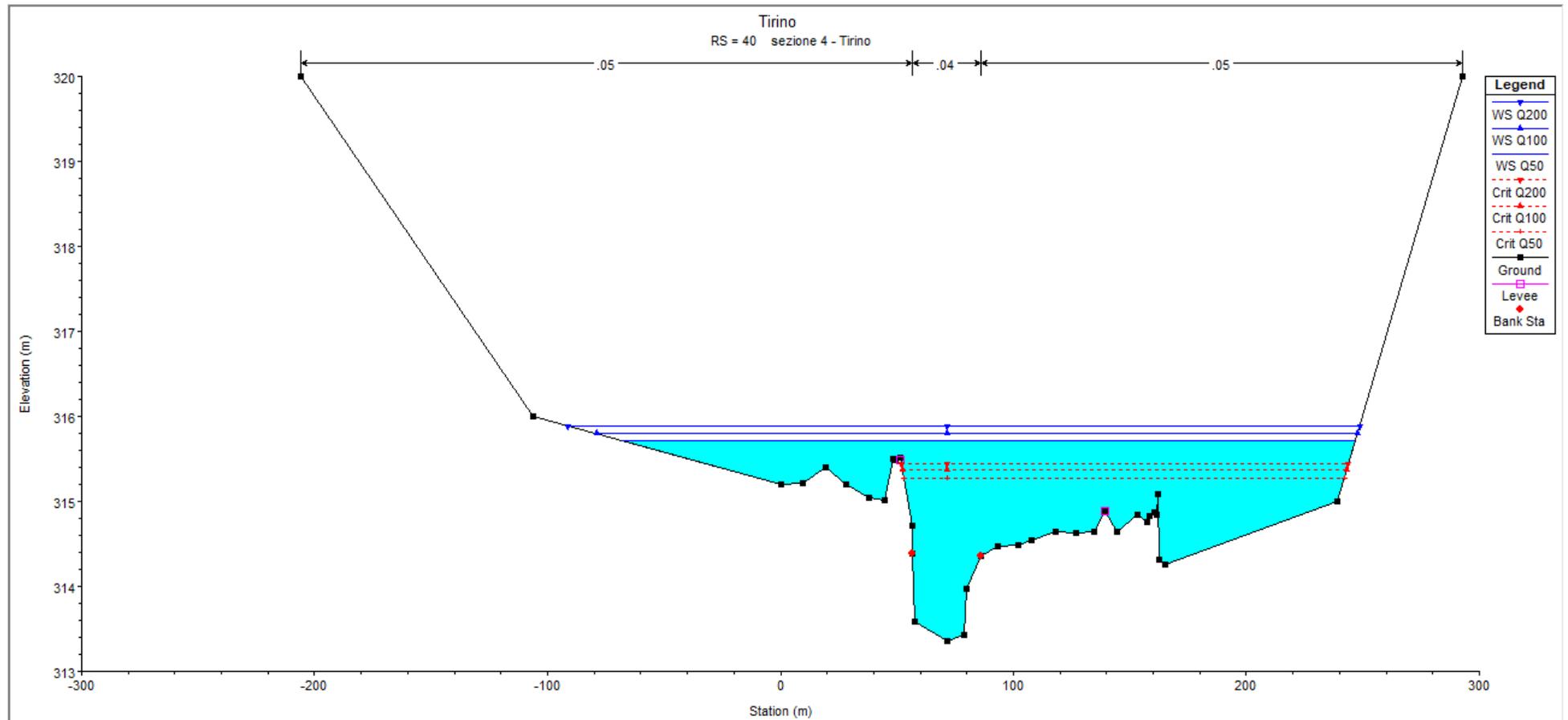


Figura 7: **RS=40** - Sezione trasversale in corrispondenza dell'attraversamento n. 10 del nuovo metanodotto - stato di progetto

RIFACIMENTO METANODOTTO CHIETI-RIETI DN400 (16") DP 24 bar E OPERE CONNESSE			
RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA ATTRAVERSAMENTO IL FIUME TIRINO			
N° Documento: 03857-PPL-RE-101-0205	Foglio 17 di 37	Rev.:	
		00	
			AT-RE-105

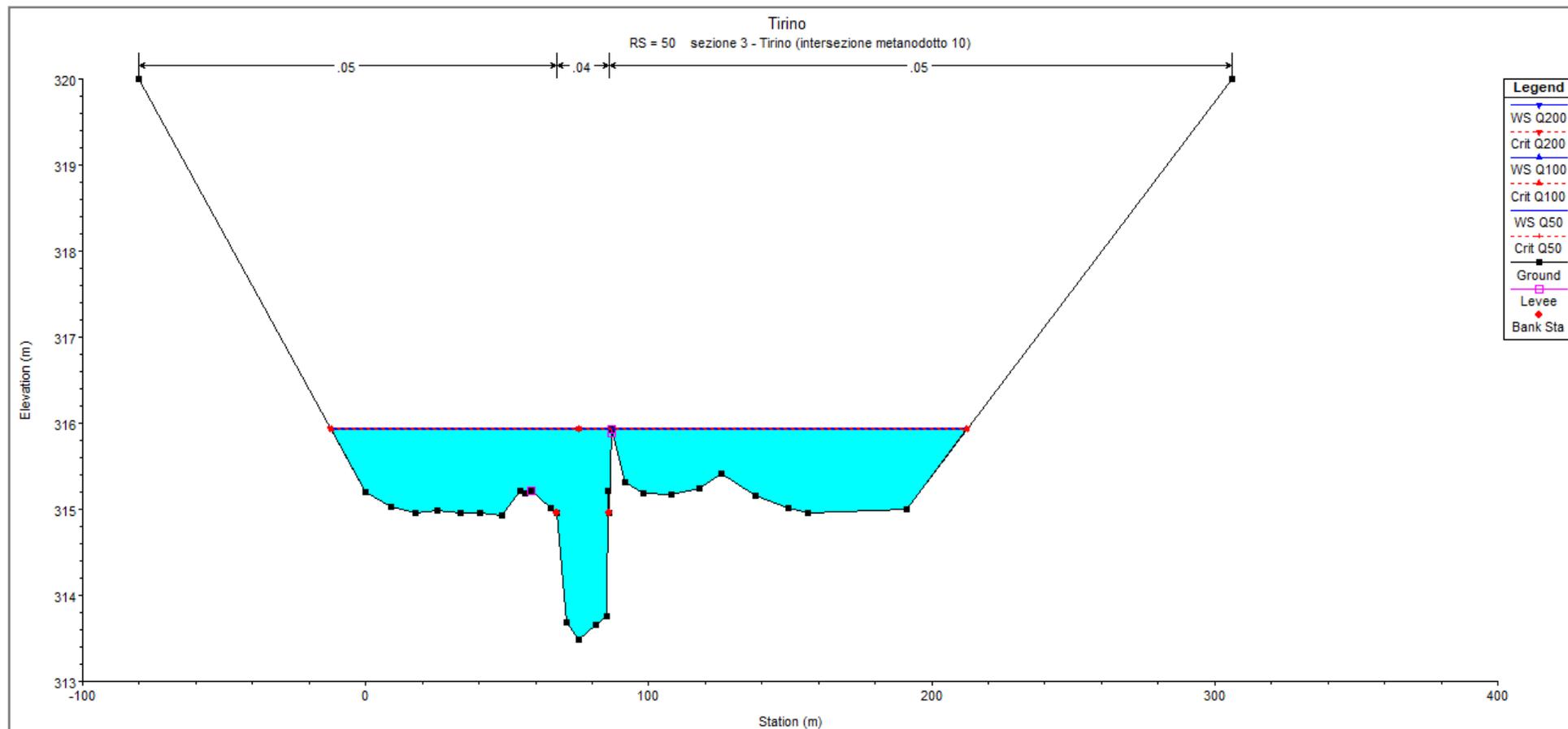


Figura 8: **RS=50** - Sezione trasversale in corrispondenza dell'attraversamento n. 10 del nuovo metanodotto - stato di progetto

RIFACIMENTO METANODOTTO CHIETI-RIETI DN400 (16") DP 24 bar E OPERE CONNESSE			
RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA ATTRAVERSAMENTO IL FIUME TIRINO			
N° Documento: 03857-PPL-RE-101-0205	Foglio 18 di 37	Rev.:	
		00	
			AT-RE-105

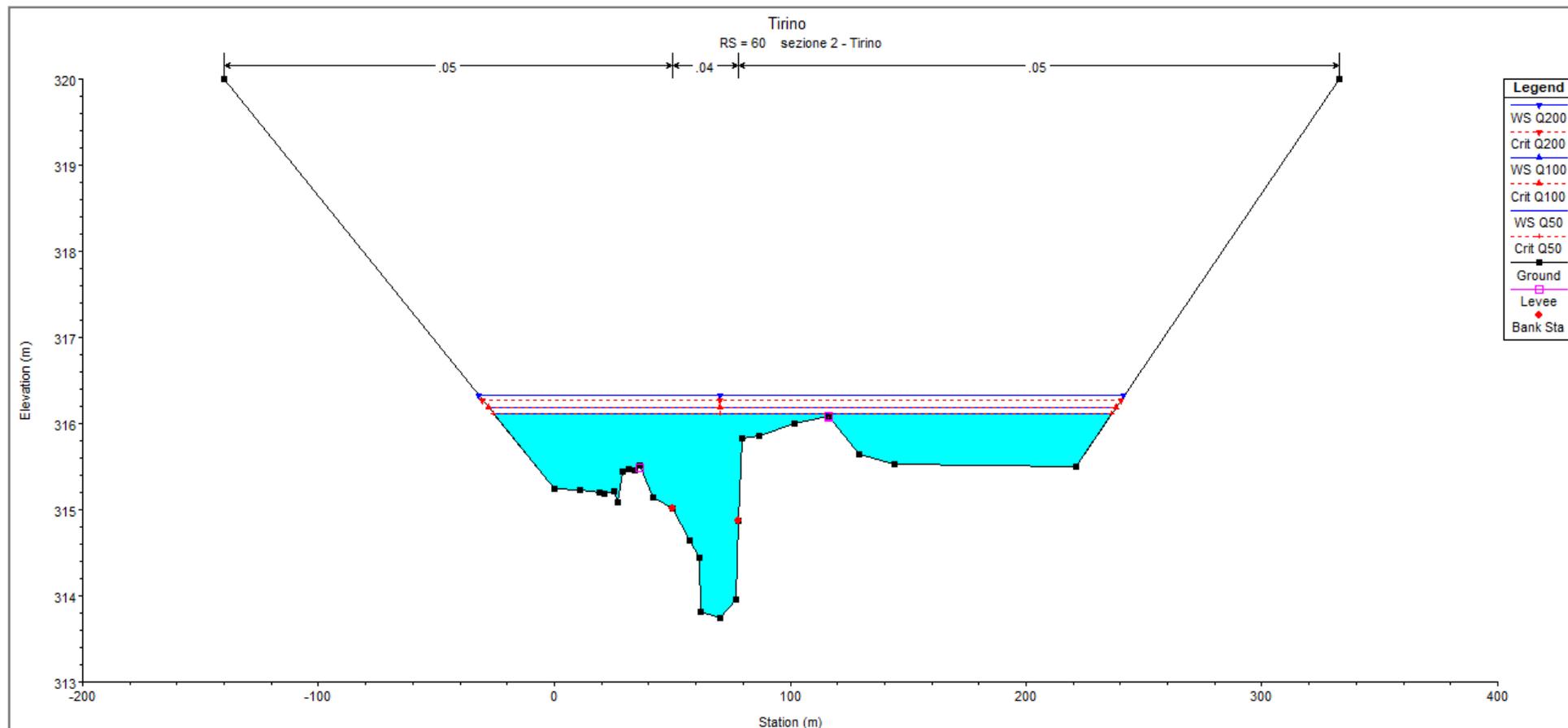


Figura 9: **RS=60** - Sezione trasversale a monte dell'attraversamento n. 10 del nuovo metanodotto– stato di progetto

RIFACIMENTO METANODOTTO CHIETI-RIETI DN400 (16") DP 24 bar E OPERE CONNESSE					
RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA ATTRAVERSAMENTO IL FIUME TIRINO					
N° Documento: 03857-PPL-RE-101-0205	Foglio 19 di 37	Rev.:			AT-RE-105
		00			

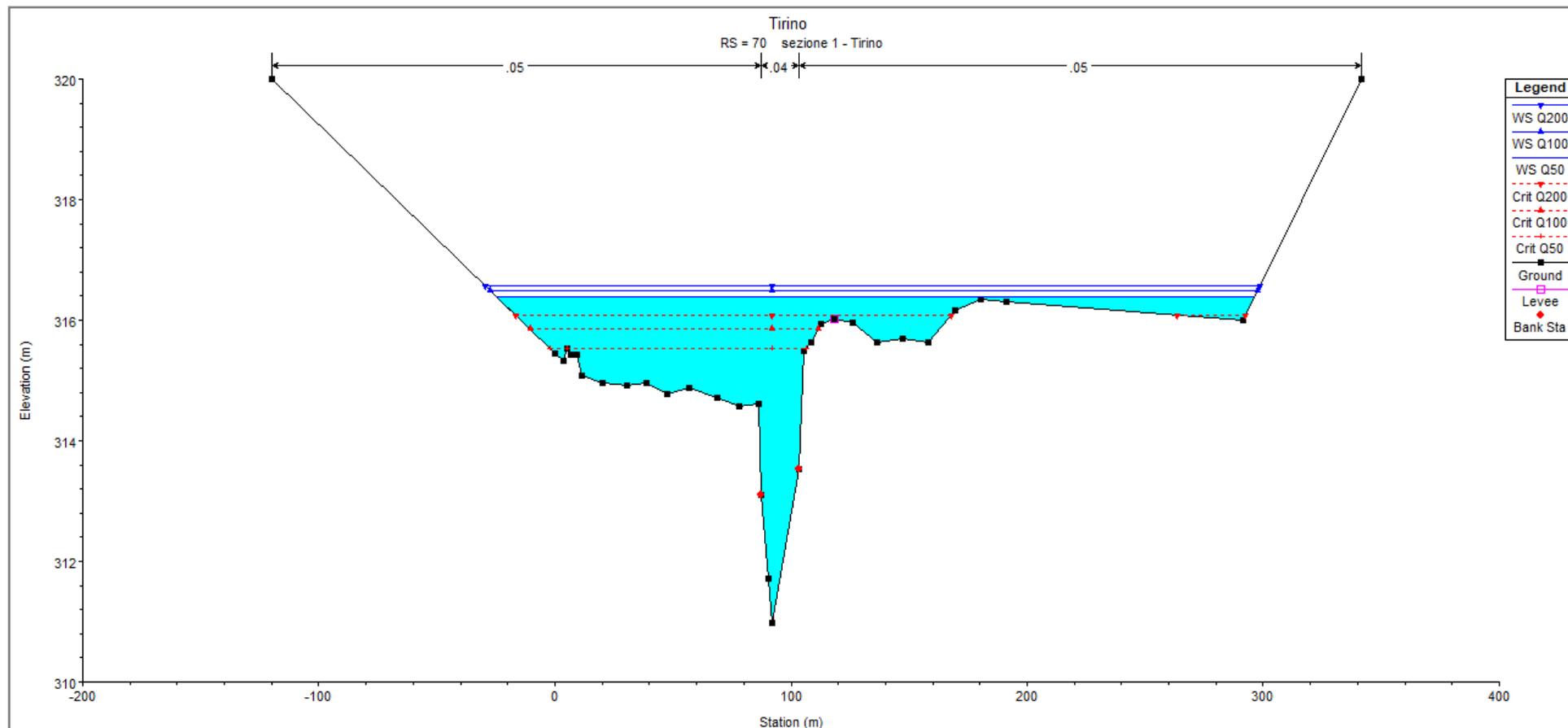


Figura 10: **RS=70** - Sezione trasversale a monte dell'attraversamento n. 10 del nuovo metanodotto– stato di progetto

RIFACIMENTO METANODOTTO CHIETI-RIETI DN400 (16") DP 24 bar E OPERE CONNESSE					
RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA ATTRAVERSAMENTO IL FIUME TIRINO					
N° Documento: 03857-PPL-RE-101-0205	Foglio 20 di 37	Rev.:			AT-RE-105
		00			

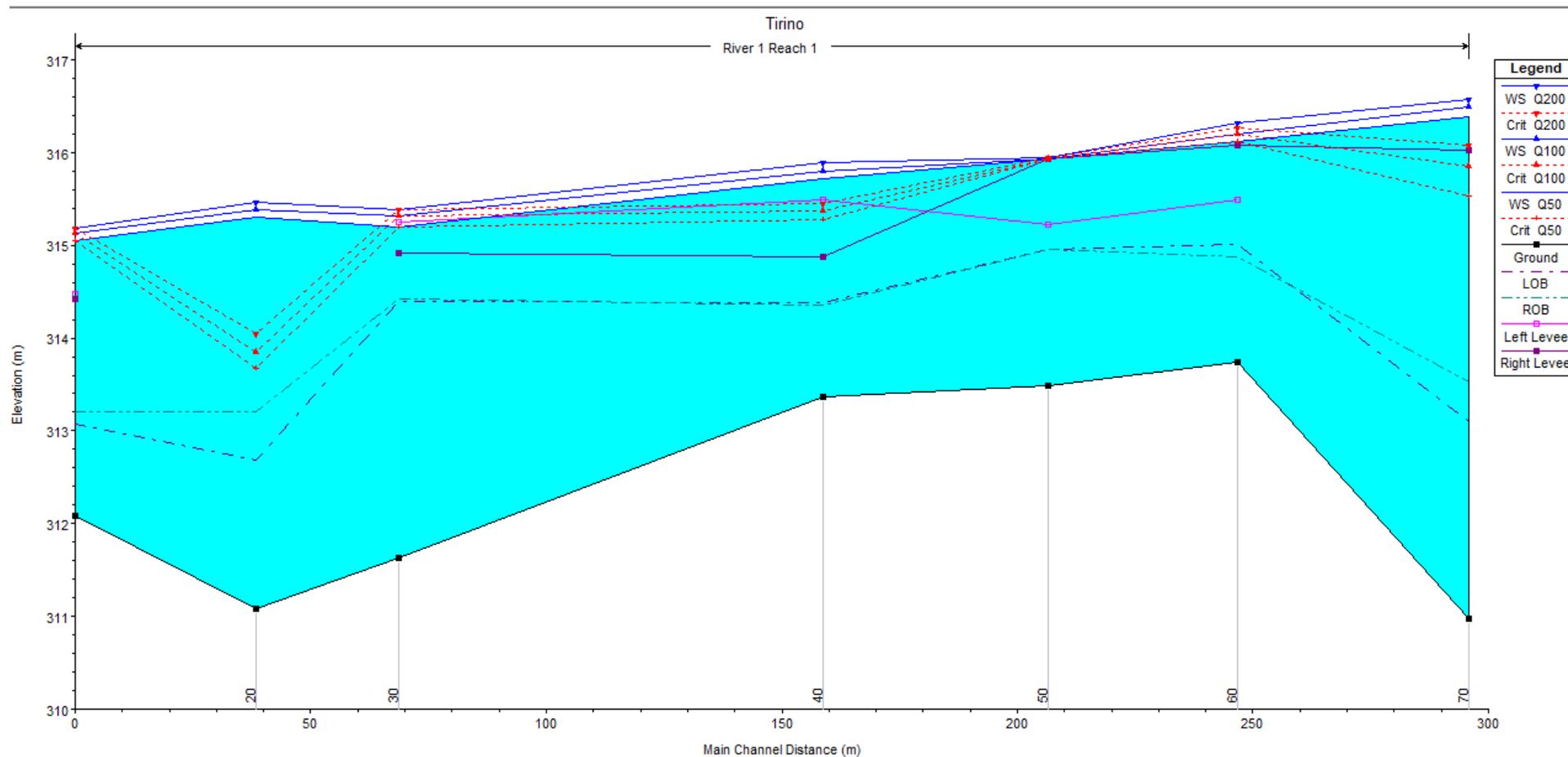


Figura 11: profilo longitudinale del tratto modellato – stato di progetto

RIFACIMENTO METANODOTTO CHIETI-RIETI DN400 (16") DP 24 bar E OPERE CONNESSE												
RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA ATTRAVERSAMENTO IL FIUME TIRINO												
N° Documento: 03857-PPL-RE-101-0205			Foglio 21 di 37		Rev.: 00				AT-RE-105			

Sezione	TR	Q (m ³ /s)	Quota di fondo (m s.m.)	Quota p. l. (m s.m.)	Quota idr. critica (m s.m.)	Carico totale (m s.m.)	P. linea carichi (m/m)	Velocità (m/s)	Area bagnata (m ²)	Larghezza p.l. (m)	n. Froude	Raggio idr. (m)	Tensione tan. (N/m ²)
70	Q50	297.2	310.97	316.39	315.54	316.54	0.001278	2.26	278.71	321.02	0.35	0.86	10.8
70	Q100	354.2	310.97	316.49	315.85	316.66	0.001462	2.46	312.24	325.05	0.38	0.95	13.67
70	Q200	411.3	310.97	316.58	316.08	316.76	0.001655	2.65	340.16	328.37	0.4	1.03	16.69
60	Q50	297.2	313.74	316.11	316.11	316.4	0.006516	3.05	176.81	261.93	0.71	0.67	42.95
60	Q100	354.2	313.74	316.19	316.19	316.51	0.007053	3.26	197.69	266.23	0.74	0.74	51.15
60	Q200	411.3	313.74	316.32	316.27	316.61	0.00627	3.21	232.95	273.32	0.7	0.85	52.19
50	Q50	297.2	313.49	315.93	315.93	316.12	0.004994	2.81	197.23	224.56	0.61	0.87	42.66
50	Q100	354.2	313.49	315.93	315.93	316.21	0.007094	3.35	197.23	224.56	0.73	0.87	60.59
50	Q200	411.3	313.49	315.95	315.95	316.3	0.009123	3.81	200.63	225.16	0.83	0.88	79.06
40	Q50	297.2	313.36	315.71	315.28	315.81	0.002135	1.87	276.06	314.74	0.41	0.87	18.3
40	Q100	354.2	313.36	315.79	315.36	315.9	0.002431	2.04	301.57	326.15	0.44	0.92	21.96
40	Q200	411.3	313.36	315.89	315.45	316.01	0.002545	2.15	333.4	339.85	0.46	0.98	24.4
30	Q50	297.2	311.63	315.2	315.2	315.52	0.004485	3.17	183.22	232.09	0.6	0.78	34.39
30	Q100	354.2	311.63	315.31	315.31	315.6	0.00429	3.18	235.92	348.87	0.59	0.67	28.27
30	Q200	411.3	311.63	315.39	315.39	315.69	0.004564	3.34	263.08	357.76	0.61	0.73	32.7
20	Q50	297.2	311.08	315.3	313.67	315.36	0.000589	1.29	406.58	449.07	0.23	0.9	5.22
20	Q100	354.2	311.08	315.39	313.84	315.46	0.000686	1.42	446.63	453.84	0.25	0.98	6.6
20	Q200	411.3	311.08	315.47	314.05	315.55	0.000776	1.53	483.39	458.18	0.27	1.05	8.01
10	Q50	297.2	312.08	315.04	315.04	315.3	0.003353	2.61	223.13	419.79	0.54	0.53	17.43
10	Q100	354.2	312.08	315.12	315.12	315.39	0.003611	2.77	256.94	423.12	0.56	0.61	21.45
10	Q200	411.3	312.08	315.18	315.18	315.47	0.003981	2.95	282.58	425.64	0.59	0.66	25.85

Tabella 7: Grandezze caratteristiche dei deflussi nel tratto modellato nello stato di progetto (evidenziate in verde le sezioni interessate dagli attraversamenti)

RIFACIMENTO METANODOTTO CHIETI-RIETI DN400 (16") DP 24 bar E OPERE CONNESSE					
RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA ATTRAVERSAMENTO IL FIUME TIRINO					
N° Documento:	Foglio	Rev.:			
03857-PPL-RE-101-0205	22 di 37	00			AT-RE-105

4 DETERMINAZIONE DELLA MASSIMA PROFONDITÀ DI EROSIONE

Per la determinazione della profondità di posa della condotta sono stati valutati gli effetti del transito dell'evento di piena duecentennale considerato nella modellazione idraulica.

Esistono vari studi, per lo più sperimentali, per la determinazione della massima profondità di erosione di un fondo d'alveo in corrispondenza di piene eccezionali, dovuta principalmente alla presenza di:

- Caso 1: discontinuità di fondo
- Caso 2: manufatti in alveo (pile, pennelli, briglie, ecc.)
- Caso 3: propagazione di barre alterne
- Caso 4: curve

Di seguito si riportano le equazioni considerate per il calcolo della profondità di erosione per i quattro casi sopra citati:

Caso 1

Per valutare la profondità di erosione S_{max} connessa alla presenza di discontinuità di fondo, che nel caso in esame si può correlare al diverso grado di compattazione tra i terreni dell'alveo indisturbato e quelli interessati dalle operazioni di scavo e rinterro, si utilizzeranno due formulazioni alternative, assumendo poi il valore più cautelativo tra i due calcolati:

a) espressione di Schoklitsch:

$$S_{max} = 0.378 \cdot H^{0.5} \cdot q^{0.35}$$

con H carico totale, $q = \frac{Q}{A \cdot y_u}$ portata specifica, A area bagnata della sezione trasversale, y_u altezza di moto uniforme

b) espressione in funzione dell'altezza idrica di moto uniforme:

$$S_{max} = \frac{y_u}{2}$$

RIFACIMENTO METANODOTTO CHIETI-RIETI DN400 (16") DP 24 bar E OPERE CONNESSE						
RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA ATTRAVERSAMENTO IL FIUME TIRINO						
N° Documento: 03857-PPL-RE-101-0205		Foglio 23 di 37		Rev.: 00		AT-RE-105

Caso 2

Si valuteranno caso per caso, se presenti, i manufatti in alveo.

Caso 3

Le barre alterne sono onde di sedimenti che si propagano molto lentamente sul fondo di corsi d'acqua dando luogo a sequenza di zone di scavo e di deposito; ipotizzando che l'evento di piena abbia una durata temporale abbastanza lunga da instaurare condizioni di moto assimilabili a quelle di moto permanente e uniforme, il criterio per l'esistenza di barre alterne, in moto permanente uniforme in un alveo rettilineo, è che:

$$\beta > \beta_c$$

dove il parametro β è definito come:

$$\beta = \frac{B_f}{2Y}$$

con B_f larghezza del fondo e Y profondità media della corrente.

I valori di β_c si trovano rappresentati in un grafico sperimentale in funzione della scabrezza relativa D/Y (intesa come rapporto tra il diametro medio dei sedimenti D e la profondità media della corrente Y) e della tensione $\theta = \frac{i_f \cdot R_H}{D \cdot (s-1)}$ di Shields (riportato in Annesso 3), con i_f pendenza di fondo, R_H è il raggio idraulico, s parametro pari a 2.5.

Esistono poi espressioni empiriche per il calcolo della massima altezza di deposito rispetto al fondo della buca di erosione; utilizzando l'espressione di Ikeda:

$$H_{b \max} = 0.18 \cdot Y \cdot \left(\frac{D}{Y}\right)^{0.45} \cdot \beta^{1.45}$$

nota la quale è possibile ricavare la massima profondità di erosione come:

$$\eta_{\max} = (0.50 \div 0.57) \times H_{b \max}$$

Caso 4

RIFACIMENTO METANODOTTO CHIETI-RIETI DN400 (16") DP 24 bar E OPERE CONNESSE						
RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA ATTRAVERSAMENTO IL FIUME TIRINO						
N° Documento: 03857-PPL-RE-101-0205		Foglio 24 di 37		Rev.: 00		AT-RE-105

In presenza di una curva pronunciata si possono innescare erosioni di fondo sul lato più esterno della curva. Per valutarne la profondità si utilizzeranno due formulazioni sperimentali, assumendo poi un valore pari alla media dei due calcolati:

- a) espressione di Seminara e Tubino (1989): nell'ipotesi di trasporto al fondo dominante, sedimenti omogenei e raggio di curvatura costante, la profondità massima di scavo η_{max} si può ricavare dall'espressione:

$$\eta_{max} = Y d_0 \frac{B_f}{4 r_c}$$

dove B_f è la larghezza del fondo alveo; Y il tirante idrico della sezione all'inizio della curva, r_c è il raggio di curvatura, d_0 è il coefficiente ottenuto dal grafico sperimentale riportato in Annesso 3 in funzione del numero di Shields θ e del rapporto D/Y , con D diametro rappresentativo del sedimento.

- b) espressione di Galay et al. (1987): per alvei in ghiaia ed angolo interno intorno tra 60° e 100° pone il tirante idraulico in corrispondenza del gorgo h_g pari a:

$$h_g = Y \cdot \left(0.9 + 3.7 \frac{B_f}{r_c} \right)$$

mentre per angoli al centro inferiori a 60° risulta:

$$h_g = Y \cdot \left(1.2 + \frac{B}{r_c} \right)$$

dove, oltre ai simboli già visti in precedenza, Y è il tirante idrico medio nella sezione di attacco della curva calcolato come rapporto tra l'area bagnata della sezione e la larghezza del pelo libero B .

Da cui la profondità di scavo risulta:

$$h_{scavo} = h_g - Y$$

Il valore di erosione finale da considerare sarà quello maggiore tra i quattro casi sopra descritti.

RIFACIMENTO METANODOTTO CHIETI-RIETI DN400 (16") DP 24 bar E OPERE CONNESSE					
RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA ATTRAVERSAMENTO IL FIUME TIRINO					
N° Documento:	Foglio	Rev.:			
03857-PPL-RE-101-0205	25 di 37	00			AT-RE-105

Su tale valore tuttavia è bene tenere presente che le formule utilizzate, essendo di tipo sperimentale, consentono di determinare l'ordine di grandezza del fenomeno e che pertanto vanno utilizzate con cautela ed opportuni coefficienti di sicurezza.

Per tali motivi, in considerazione delle caratteristiche dell'alveo fluviale e dei materiali presenti in sito, si ritiene opportuno considerare un coefficiente di sicurezza non inferiore a 1.30

Alla luce di quanto sopra esposto, in considerazione delle caratteristiche di progetto, per questo attraversamento si possono escludere le casistiche di cui ai punti 2, 3 e 4 in quanto nella sezione in esame non sono presenti manufatti in alveo, l'entità dell'eventuale erosione per barre alterne è sicuramente trascurabile e si è in un tratto essenzialmente rettilineo.

Si procede quindi ad analizzare il caso 1.

Caso 1

Utilizzando le grandezze caratteristiche del moto determinate al Paragrafo 3.3 e sintetizzate in Tabella 7, per il tempo di ritorno di 200 anni e considerando il fattore di sicurezza pari a 1.30, dall'espressione (a) di Schoklitsch, risulta:

$$S_{max\ buche\ (a)} = 1.30 \times (1.12) = 1.45\ m$$

e dall'espressione (b), per un'altezza d'acqua pari a $315.95 - 313.5 = 2.46\ m$ si ottiene:

$$S_{max\ buche\ (b)} = 1.30 \times \left(\frac{2.46}{2}\right) = 1.6\ m$$

Definizione della profondità di posa per l'attraversamento n. 10

RIFACIMENTO METANODOTTO CHIETI-RIETI DN400 (16") DP 24 bar E OPERE CONNESSE						
RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA ATTRAVERSAMENTO IL FIUME TIRINO						
N° Documento: 03857-PPL-RE-101-0205	Foglio	26	di	37	Rev.: 00	
					AT-RE-105	

Alla luce dell'analisi effettuata, la profondità minima di posa della condotta al di sotto della quota di fondo alveo, dovrebbe risultare non inferiore a **1.6 m**, con un coefficiente di sicurezza di 1.30.

Tuttavia, poichè il fiume Tirino presenta nel tratto modellato un andamento del fondo alveo caratterizzato da accumuli di fondo (si vede al riguardo il profilo di fondo riportato in Figura11) e poichè la sezione di attraversamento del fiume (sezione 50 di HEC-RAS) cade proprio in corrispondenza di uno di questi accumuli di fondo, è bene che la profondità di posa sia aumentata di almeno 2 m per tener conto di un possibile futuro livellamento del fondo alveo, perciò la profondità minima di posa da assumere in progetto è pari a **3.6 m**.

RIFACIMENTO METANODOTTO CHIETI-RIETI DN400 (16") DP 24 bar E OPERE CONNESSE						
RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA ATTRAVERSAMENTO IL FIUME TIRINO						
N° Documento:		Foglio		Rev.:		
03857-PPL-RE-101-0205		27 di 37		00		
						AT-RE-105

5 CONCLUSIONI

Il presente studio ha lo scopo di valutare l' idoneità della profondità di posa della nuova condotta in corrispondenza dell' attraversamento in subalveo del fiume Tirino che, si ricorda, verrà eseguita con tecnologia trenchless con una profondità dalla quota più depressa di fondo alveo di 7.3 m.

Le verifiche condotte hanno evidenziato che la profondità di posa prevista è idonea a garantire il corretto ricoprimento delle condotte per un tempo superiore alla vita utile delle opere.

RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA
ATTRAVERSAMENTO IL FIUME TIRINO

N° Documento:

03857-PPL-RE-101-0205

Foglio

28

di

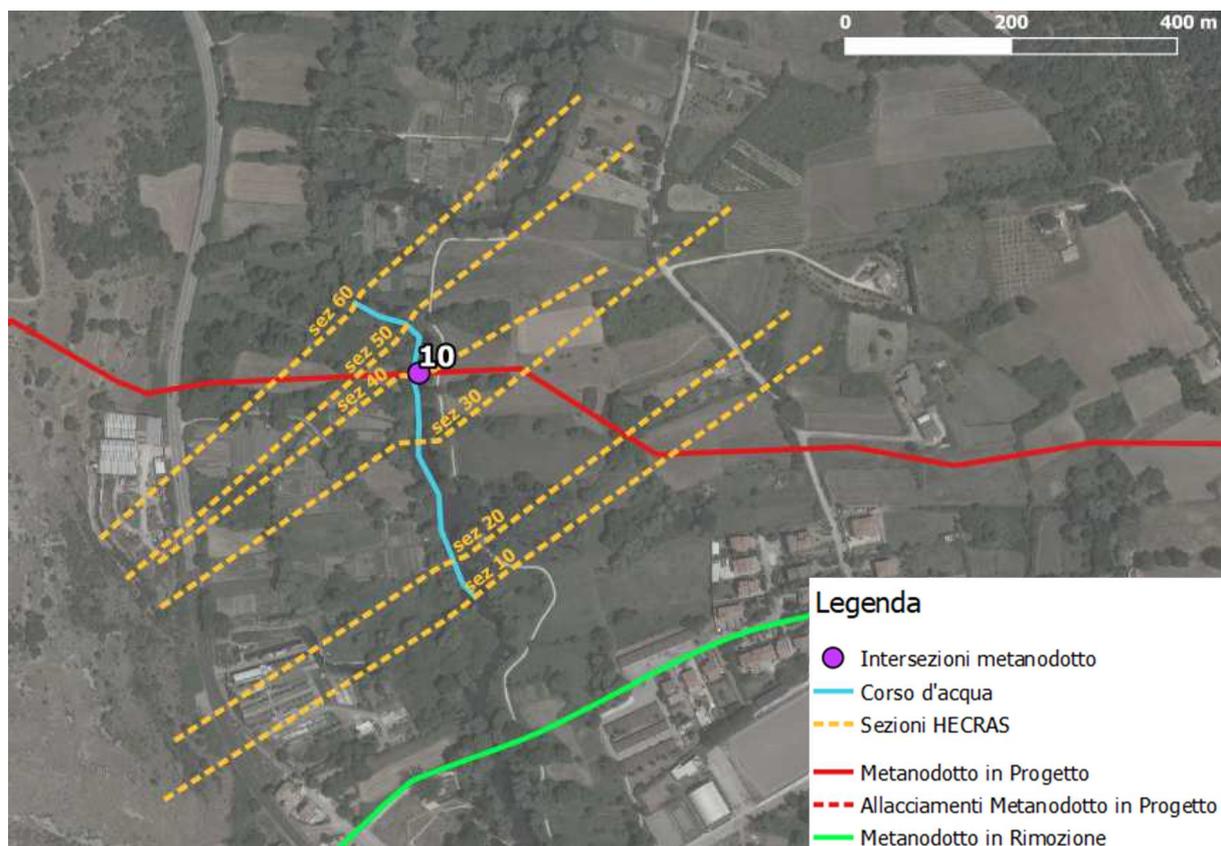
37

Rev.:

00

AT-RE-105

ANNESNO 1: STRALCIO PLANIMETRICO DEL TRATTO MODELLATO



Tratto modellato in HEC-RAS, con relativi codici numerici delle sezioni trasversali inserite

RIFACIMENTO METANODOTTO CHIETI-RIETI DN400 (16") DP 24 bar E OPERE CONNESSE					
RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA ATTRAVERSAMENTO IL FIUME TIRINO					
N° Documento:	Foglio	Rev.:			
03857-PPL-RE-101-0205	29 di 37	00			AT-RE-105

ANNESSO 2: GENERALITÀ SUL MODELLO HEC-RAS

Il software di calcolo utilizzato è denominato HEC-RAS(versione 5.0.7) ed è stato sviluppato dall'HydrologicEngineering Center dell'U.S. ArmyCorps of Engineers (California).

Descrizione del modello di simulazione idraulica

Il presente capitolo fornisce chiarimenti sul funzionamento del modello numerico adottato e sulla metodologia utilizzata nella scelta delle sezioni trasversali necessarie alle simulazioni.

Il modello calcola i profili di superficie libera in moto permanente gradualmente vario (in senso spaziale e non temporale) in alvei prismatici e non prismatici. Entrambi i tipi di corrente, lenta e veloce, possono essere calcolati così come le conseguenze di diverse tipologie di accidentalità e strutture di cui si conosca la relazione fra carico e portata defluente.

- Il modello è comunque vincolato nel suo utilizzo da tre condizioni:
- il moto deve essere permanente poiché le equazioni non contengono termini dipendenti dal tempo;
- il moto deve essere gradualmente vario in senso spaziale poiché le equazioni ipotizzano la distribuzione idrostatica delle pressioni in seno alla corrente;
- il moto è mono-dimensionale.

È rilevante e importante evidenziare la capacità del modello di dare attendibili risultati nella gestione delle aree inondabili circostanti gli alvei naturali.

In questo senso è quindi possibile:

- determinare le aree inondabili da parte di portate diverse allo scopo di predisporre l'opportuna protezione;
- studiare le conseguenze d'uso delle aree golenali e il loro danneggiamento;
- definire i miglioramenti dell'alveo atti a ridurre le conseguenze delle inondazioni.

RIFACIMENTO METANODOTTO CHIETI-RIETI DN400 (16") DP 24 bar E OPERE CONNESSE						
RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA ATTRAVERSAMENTO IL FIUME TIRINO						
N° Documento:	Foglio		Rev.:			
03857-PPL-RE-101-0205	30	di 37	00			AT-RE-105

Proprio nell'ottica di queste problematiche l'utilizzo del modello numerico in questione risulta essere estremamente efficace.

La possibilità di determinare il comportamento del profilo del corso d'acqua tenendo conto anche dell'influenza esercitata dai manufatti in alveo consente di tracciare con buona precisione la via di piena e le sue caratteristiche.

Il modello di calcolo effettua simulazioni di moto permanente, situazione di calcolo che in realtà non si presenta, in quanto è noto dalla teoria che la portata massima in ogni sezione si presenta per un tempo limitato, presentando la curva (tempo, portata) una forma a campana, essendo presenti nel fenomeno delle piene vari fenomeni tra i quali i più noti sono l'effetto di laminazione del corso d'acqua, l'invaso e la corrivazione.

Nonostante tutto la simulazione assume rilevanza fondamentale perché, per i motivi sopra descritti, rappresenta una verifica in termini più gravosi del corso d'acqua (si presenta una portata elevata per tempi più lunghi di quelli che si hanno in realtà), permettendo quindi di fare raggiungere elevati gradi di sicurezza ai manufatti progettati secondo le indicazioni tratte da tale simulazione.

Tra le diverse opzioni di calcolo di cui il modello è dotato in relazione alla presenza di strutture che interagiscono direttamente con il corso d'acqua è da evidenziare la possibilità di calcolo del profilo in corrispondenza dei tombini (circolari, scatolari, con o senza muri d'ala, ecc.) secondo la normativa proposta da FHWA (Federal Highway Administration-USA).

Il software implementato consente di determinare con precisione l'effetto di rigurgito dovuto alle spalle dei ponti o all'ingombro delle pile.

Particolare importanza riveste la possibilità di parametrizzare il coefficiente di scabrezza per alveo e golene.

RIFACIMENTO METANODOTTO CHIETI-RIETI DN400 (16") DP 24 bar E OPERE CONNESSE						
RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA ATTRAVERSAMENTO IL FIUME TIRINO						
N° Documento: 03857-PPL-RE-101-0205	Foglio	31	di	37	Rev.: 00	
					AT-RE-105	

Inoltre è possibile creare all'interno di ciascuna sezione trasversale del corso d'acqua più zone a scabrezza omogenea in modo da approssimare con precisione notevole il valore del suddetto parametro, troppo spesso legato all'imprecisione del coefficiente di scabrezza equivalente.

L'insieme dei dati di output è strutturato in modo da fornire la conoscenza globale dei fenomeni che interessano l'intera area occupata dalla portata di piena.

L'output risulta quindi suddiviso in dati relativi alle aree golenali e al torrente principale di deflusso.

Le informazioni fornite riguardano diversi parametri fisici e di progettazione quali, per esempio:

- quota in m s.l.m. del pelo libero;
- quota del gradiente energetico;
- velocità e portata, relativa a golene e torrente principale;
- larghezza del pelo libero;
- area bagnata;
- principali parametri geometrici;
- sezioni trasversali;
- profilo di moto permanente.

Per meglio comprendere il funzionamento del modello idraulico utilizzato è opportuno fornire una sintesi delle potenzialità e dei fondamenti teorici che stanno alla base del calcolo dei profili di moto permanente e che sono implementati nel modello stesso.

Calcolo del profilo di moto permanente

Al fine di calcolare la quota del pelo libero incognita in una determinata sezione trasversale del corso d'acqua è stata adottata la procedura di calcolo nota come

**RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA
ATTRAVERSAMENTO IL FIUME TIRINO**

N° Documento:

03857-PPL-RE-101-0205

Foglio

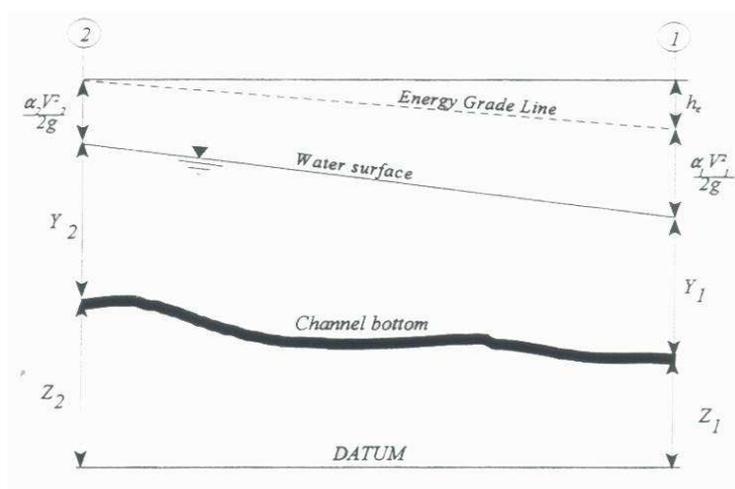
32 di 37

Rev.:

00

AT-RE-105

Standard Step Method, consistente nell'integrazione dell'equazione di bilancio energetico.



Rappresentazione dei termini dell'equazione di bilancio energetico

Le due equazioni che proponiamo rappresentano il metodo di cui sopra:

$$WS_2 + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} = WS_1 + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} + h_e$$

$$h_e = L \cdot \bar{S}f + C \left| \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} - \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} \right|$$

dove:

WS1, WS2 : quota del pelo libero fra due sezioni di calcolo, con la sezione 2 posta a monte della 1;

V1, V2 : velocità media;

α_1, α_2 : coefficienti energetici moltiplicativi della velocità;

g : accelerazione gravitazionale;

h_e : perdita di carico;

RIFACIMENTO METANODOTTO CHIETI-RIETI DN400 (16") DP 24 bar E OPERE CONNESSE						
RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA ATTRAVERSAMENTO IL FIUME TIRINO						
N° Documento: 03857-PPL-RE-101-0205		Foglio 33 di 37		Rev.: 00		AT-RE-105

L : distanza fra le sezioni trasversali;

Sf : pendenza media;

C : coefficiente di perdita per contrazione o espansione.

La distanza L viene calcolata utilizzando la seguente espressione:

$$L = \frac{L_{lob} \cdot \overline{Q_{lob}} + L_{ch} \cdot \overline{Q_{ch}} + L_{rob} \cdot \overline{Q_{rob}}}{\overline{Q_{lob}} + \overline{Q_{ch}} + \overline{Q_{rob}}}$$

Dove

L_{lob}, L_{ch}, L_{rob}: sono le distanze tra due sezioni trasversali consecutive, rispettivamente per la golena di sinistra, il torrente di magra e la golena di destra;

$\overline{Q_{lob}}$, $\overline{Q_{ch}}$, $\overline{Q_{rob}}$: sono le medie aritmetiche delle portate delle tre parti suddette.

Mentre la pendenza motrice Sf viene calcolata con l'equazione di Manning:

$$Sf = \left(\frac{Q}{K} \right)^2$$

Ulteriore punto fondamentale nella comprensione del funzionamento del modello idraulico è la suddivisione della massa liquida defluente in unità elementari per le quali la velocità è distribuita uniformemente.

TRANSITION CLASS	CONTRACTION	EXPANSION
No transition loss	0.0	0.0
Gradual transitions	0.1	0.3
Bridge sections	0.3	0.5
Abrupt transitions	0.6	0.8

Tabella di riferimento dei coefficienti di contrazione ed espansione

Individuata la sezione trasversale del corso d'acqua attraverso la griglia dei punti x (distanze Individuata la sezione trasversale del corso d'acqua attraverso la griglia dei punti x (distanze progressive dall'ascissa x = 0) e y (quote m s.l.m. relative ai punti

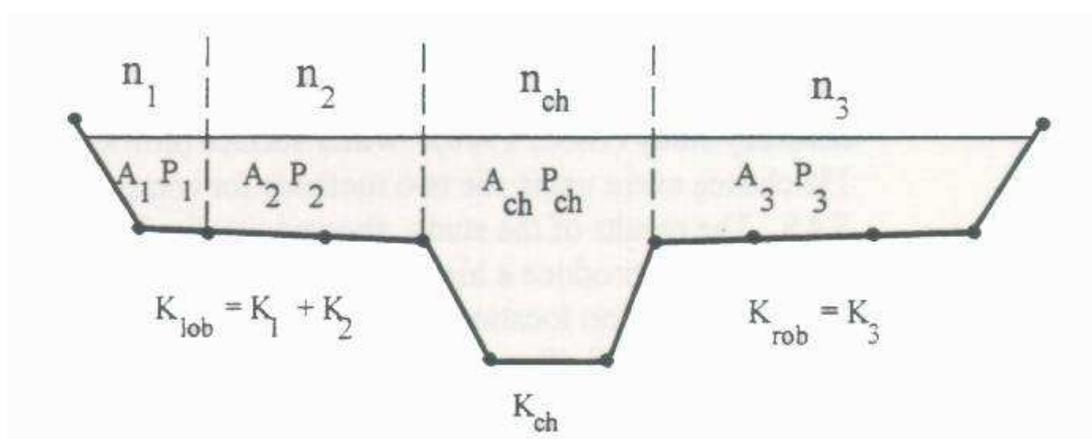
**RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA
ATTRAVERSAMENTO IL FIUME TIRINO**

N° Documento: 03857-PPL-RE-101-0205	Foglio 34 di 37	Rev.:				AT-RE-105
		00				

definiti alle varie progressive), nelle aree golenali le unità elementari di deflusso coincidono con la suddivisione creata dalle progressive all'interno della sezione trasversale.

Nel torrente principale di deflusso (o alveo di magra ordinaria) la massa liquida defluente non viene suddivisa tranne nel caso in cui si conferiscano più valori di scabrezza differenti in alveo.

In funzione del numero di differenziazioni del valore della scabrezza saranno individuate corrispondenti unità di deflusso.



Suddivisione dell'alveo in singole unità di deflusso

La capacità di deflusso per ciascuna suddivisione è pertanto calcolata con le seguenti espressioni:

$$Q = K \cdot \sqrt{Sf}$$

$$K = \frac{1,486}{n} aR^{2/3}$$

dove

Q : portata per unità elementare;

**RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA
ATTRAVERSAMENTO IL FIUME TIRINO**

N° Documento: 03857-PPL-RE-101-0205	Foglio 35 di 37	Rev.:					AT-RE-105
		00					

K : capacità di deflusso per unità elementare;

n : coefficiente di Manning per la scabrezza dell'unità elementare;

a : area di deflusso dell'unità elementare;

R : raggio idraulico per l'unità di deflusso elementare.

La capacità totale di deflusso per la sezione trasversale è ottenuta per sommatoria delle singole capacità relative alle unità in cui la sezione è stata scomposta.

Sulla base di queste considerazioni il coefficiente α , relativo alla velocità, si ottiene dalla seguente espressione:

$$\alpha = \frac{(A_t)^2 \left[\frac{(K_{lob})^3}{(A_{lob})^2} + \frac{(K_{ch})^3}{(A_{ch})^2} + \frac{(K_{rob})^3}{(A_{rob})^2} \right]}{(K_t)^3}$$

dove:

A_t : area totale di deflusso per la sezione trasversale;

A_{lob} , A_{ch} , A_{rob} : area di deflusso per golena sinistra, torrente principale, golena destra;

K_t : capacità totale di deflusso (conveyance) della sezione trasversale;

K_{lob} , K_{ch} , K_{rob} : capacità di deflusso di golena sinistra, torrente principale e golena destra.

**RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA
ATTRAVERSAMENTO IL FIUME TIRINO**

N° Documento:

03857-PPL-RE-101-0205

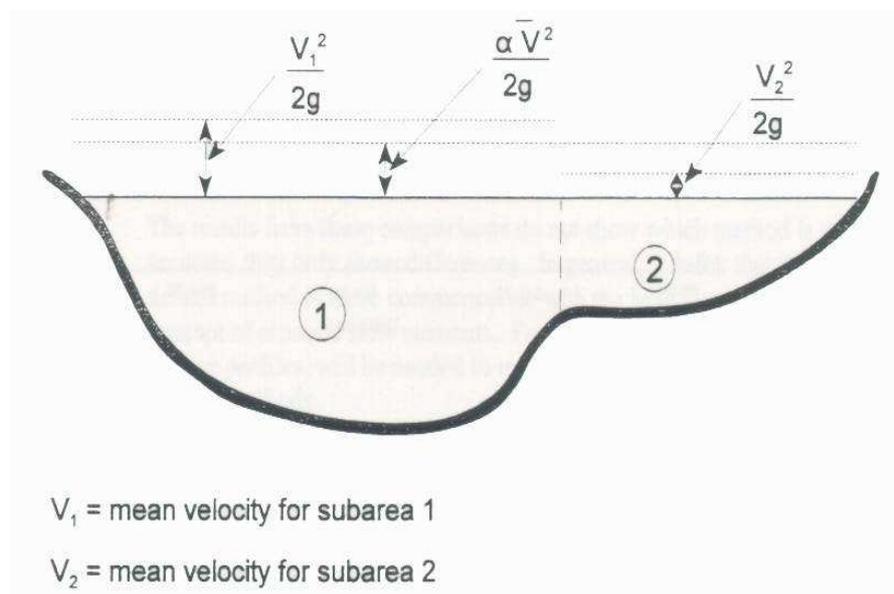
Foglio

36 di 37

Rev.:

00

AT-RE-105



Esempio di calcolo della energia media sulla sezione trasversale

Il coefficiente α si ottiene allora come media pesata delle varie capacità di deflusso.

Le perdite di carico dovute ad attrito sono calcolate come prodotto della pendenza media motrice S_f e della distanza L fra due sezioni trasversali consecutive.

Le perdite di carico dovute a contrazione e/o espansione sono calcolate con la usuale espressione riportata nell'equazione seguente:

$$h_0 = C \left| \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} - \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} \right|$$

dove C rappresenta il già citato coefficiente di contrazione/espansione

**RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA
ATTRAVERSAMENTO IL FIUME TIRINO**

N° Documento:

03857-PPL-RE-101-0205

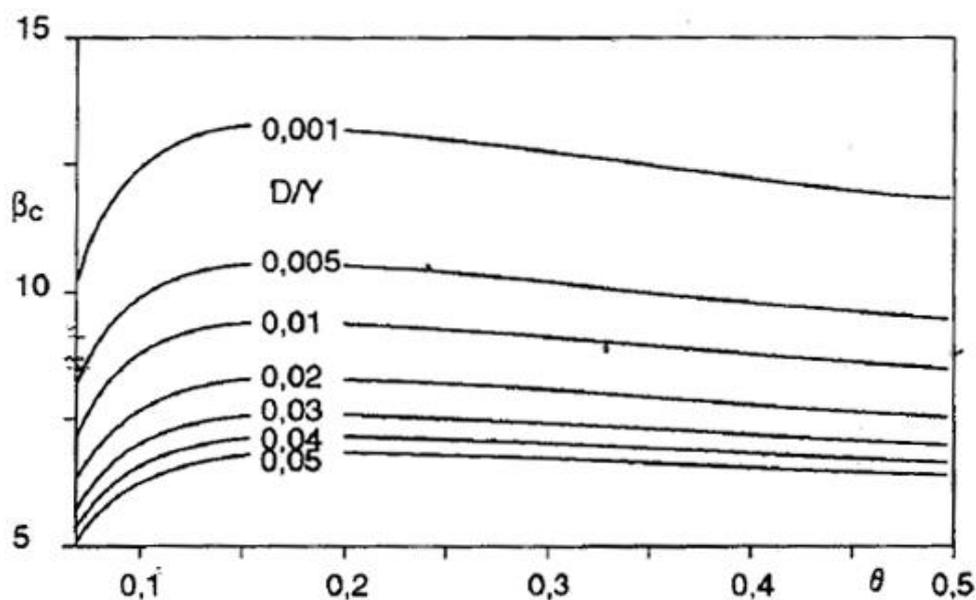
Foglio

37 di 37

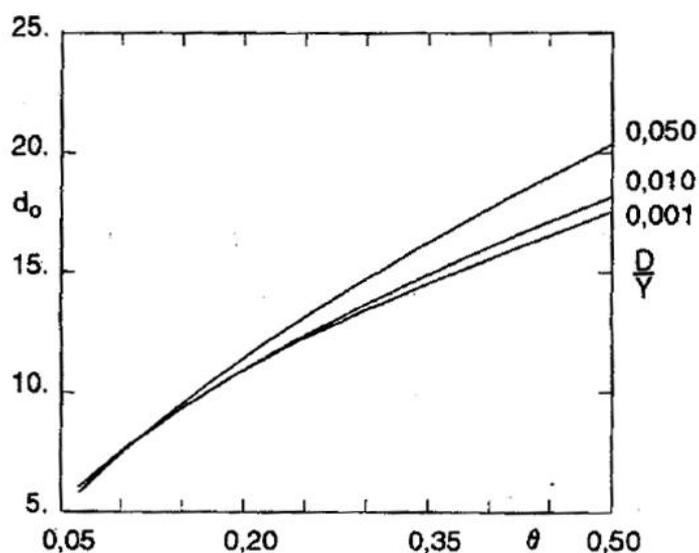
Rev.:

00

AT-RE-105

ANNESSO 3: TABELLE DI LETTERATURA**Grafico per il calcolo del parametro β_c per l'erosione da barre alterne**

con β_c valore critico del parametro β , D diametro dei sedimenti, Y altezza idrica media, θ parametro di Shields

Grafico per il calcolo del coefficiente d_0 per l'erosione in curva

con D diametro dei sedimenti, Y altezza idrica media, θ parametro di Shields