

COMMITTENTE:



PROGETTAZIONE:



**DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA-CATANIA-PALERMO  
NODO DI CATANIA**

**U.O. INFRASTRUTTURE SUD**

**PROGETTO DEFINITIVO**

**INTERRAMENTO LINEA PER IL PROLUNGAMENTO DELLA PISTA  
DELL'AEROPORTO DI FONTANAROSSA E PER LA MESSA A STI DEL  
TRATTO DI LINEA INTERESSATO.**

**MACROFASE FUNZIONALE 1**

**LOTTO 2**

**ELABORATI GENERALI - IDROLOGIA E IDRAULICA - ID**

**Relazione idraulica corsi d'acqua secondari**

SCALA:

-

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

RS3H 02 D 78 RI ID0002 001 A

Rev.	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Autorizzato Data
A	Emissione esecutiva	L.Nani	Marzo 2020	G.De Gianni	Marzo 2020	S.Vanfiori	Marzo 2020	D.Tiberti
								Marzo 2020

ITALFERR S.p.A.  
Direzione Generale  
UO Infrastrutture Sud  
Dott. Ing. Donato Tiberti  
Ordine degli Ingegneri Prov. di Napoli, n. 10795

File: RS3H.0.2.D.78.RI.ID.00.0.2.001.A

n. Elab.:

## INDICE

1	PREMESSA .....	3
2	ELENCO ELABORATI ANNESSI .....	4
3	INQUADRAMENTO DEI MANUFATTI DI ATTRAVERSAMENTO DELLA LINEA FERROVIARIA	6
4	NORMATIVA DI RIFERIMENTO E CRITERI DI VERIFICA.....	7
4.1	MANUALE DI PROGETTAZIONE FERROVIARIO .....	7
4.2	NTC 2018 E RELATIVA CIRCOLARE APPLICATIVA .....	8
4.3	CRITERI DI VERIFICA.....	12
5	MODELLAZIONE IDRAULICA.....	14
5.1	MIKE HYDRO RIVER .....	15
5.2	RILIEVI DELLA ZONA DI STUDIO.....	16
5.3	PORTATE DI PROGETTO.....	16
5.4	SCABREZZA .....	18
5.5	CONDIZIONI AL CONTORNO.....	21
5.6	VERIFICHE IDRAULICHE .....	21
5.6.1	<i>Interferenza pk km 0+070 –NI02 (IN44 del Progetto Esecutivo Bicocca-Catenanuova)</i> .....	21
5.6.2	<i>Interferenza pk km 0+475 - IN 07</i> .....	25
	Verifica post operam .....	25
5.6.3	<i>Interferenza pk km 0+737-IN18</i> .....	30
	Verifica post operam .....	30
	Verifica del sovrizzo in curva .....	34
5.6.4	<i>Interferenza pk km1+160 -IN 09</i> .....	35
	Verifica post operam .....	35
5.6.5	<i>Interferenza pk km 1+190 - IN 08</i> .....	39
	Verifica post operam .....	39
5.6.6	<i>Interferenze pk 2+940,00 IN16, pk km 3+010 - IN17- NI13 – NI09</i> .....	44
	Verifica ante operam.....	44
	Verifica post operam.....	48
	Verifica nella fase transitoria.....	55
6	VERIFICA DELLE CONDIZIONI D'INCIPIENTE EROSIONE.....	60
6.1	RIVESTIMENTO IN MATERASSI TIPO RENO E GABBIONI .....	61
6.2	RIVESTIMENTO IN MASSI NATURALI .....	61
6.2.1	<i>Approccio secondo la teoria di Shields</i> .....	62
6.2.2	<i>Approccio secondo la FHWA</i> .....	63
7	COMPATIBILITÀ IDRAULICACOMPATIBILITÀ IDRAULICA .....	66
7.1	STUDIO IDROLOGICO .....	67
7.2	VERIFICHE IDRAULICHE .....	67
7.3	SISTEMAZIONI IDRAULICHE .....	68
7.4	ANALISI DI COMPATIBILITÀ IDRAULICA.....	68
	BIBLIOGRAFIA .....	71
	APPENDICE A - IL CODICE DI CALCOLO DHI MIKE 11 .....	73
	MODULO IDRODINAMICO HD .....	74
	<i>Descrizione delle condizioni di moto simulate</i> .....	74

<i>Equazioni generali di De Saint Venant .....</i>	<i>75</i>
<i>Approssimazione dell'onda diffusiva .....</i>	<i>76</i>
<i>Descrizione in corrispondenza di strutture .....</i>	<i>77</i>
Tipo 1. Stramazzo a larga soglia .....	77
Tipo 2. Relazione Q-h .....	77
Tipo 3. Tombino .....	77
Tipo 4. Relazione Q-t .....	77
Tipo 5. Relazione $Q = A(Z_{j1}) \cdot Z_{j2}$ .....	77
Tipo 6. Strutture mobili .....	77
Tipo 7. Ponti .....	78
<i>Resistenza d'attrito .....</i>	<i>78</i>
<i>Condizioni iniziali .....</i>	<i>78</i>
<i>Metodo di soluzione .....</i>	<i>78</i>
<i>Condizioni al contorno .....</i>	<i>79</i>
<i>Definizione dei passi di calcolo .....</i>	<i>79</i>

## 1 PREMESSA

Il presente documento è parte della progettazione definitiva dell'Interramento della linea dal km 231+631, tra le stazioni di Catania Acquicella e Bicocca, al km 237+139, tra le stazioni di Bicocca e Lentini Diramazione, per il prolungamento della pista dell'aeroporto Vincenzo Bellini di Catania-Fontanarossa.

La presente relazione descrive lo studio idraulico per la verifica delle opere di attraversamento dei corsi d'acqua minori interferenti, che verranno realizzate lungo la linea ferroviaria di progetto.

Lo studio si è articolato nelle seguenti fasi:

- Analisi su modello matematico di simulazione idraulica in schema monodimensionale nelle configurazioni attuale e di progetto (solo di progetto per alcune interferenze);
- Dimensionamento degli inalveamenti di progetto e delle nuove opere di attraversamento;
- Redazione delle planimetrie, dei profili e delle sezioni trasversali con livelli idrici ed energetici nelle configurazioni attuale e di progetto.
- Analisi di compatibilità idraulica;

Lo studio idraulico riportato nei successivi paragrafi è stato redatto in accordo con il manuale di progettazione ferroviario e con gli strumenti di pianificazione territoriale in vigore.

## 2 ELENCO ELABORATI ANNESSI

<i>Codice</i>	<i>Interf.</i>	<i>Argomento</i>
RS3H02D78RIID0001001A	-	Relazione idrologica corsi d'acqua secondariLotto 2
<i>Interramento Linea PA-CT</i>		
RS3H02D78P8ID0002001A	NI02	<b>Interferenza NI02</b> Planimetria Tav. 1/2
RS3H02D78P8ID0002002A		<b>Interferenza NI02</b> Planimetria Tav. 2/2
RS3H02D78FZID0002001A		<b>Interferenza NI02</b> Profilo
RS3H02D78WAID0002001A		<b>Interferenza NI02</b> Sezioni
RS3H02D78BZID0002001A		<b>Interferenza NI02</b> Manufatto di presa Pianta Profilo e Sezioni
RS3H02D78BZID0002002A		<b>Interferenza NI02</b> Argini di protezione e sistemazioni: profilo e sezioni Tav. 1/2
RS3H02D78BZID0002003A		<b>Interferenza NI02</b> Argini di protezione e sistemazioni: profilo e sezioni Tav. 2/2
<i>Bretella CT-SR e Fascio A/P di prima fase e Collegamento Fascio A/P-Interporto</i>		
RS3H02D78PZID0002005A	IN06	<b>Interferenza IN06</b> Planimetria, profilo e sezioni post operam
RS3H02D78PZID0002006A	IN07	<b>Interferenza IN07</b> Planimetria e profili Post Operam
RS3H02D78WAID0002002A	IN07	<b>Interferenza IN07</b> Sezioni Post Operam
RS3H02D78PZID0002007A	IN08	<b>Interferenza IN08</b> Planimetria e profili post operam
RS3H02D78WAID0002003A		<b>Interferenza IN08</b> Sezioni post operam Tav. 1/2
RS3H02D78WAID0002004A		<b>Interferenza IN08</b> Sezioni post operam Tav. 2/2
RS3H02D78PZID0002008A	IN09	<b>Interferenza IN09</b> Pianta, Profilo post Operam
RS3H02D78WAID0002005A		<b>Interferenza IN09</b> Sezioni post Operam

<i>Codice</i>	<i>Interf.</i>	<i>Argomento</i>
RS3H02D78PZID0002009A	IN16 IN17+NI09 NI13	<b>Interferenza IN16-IN17e NI09-NI13</b> Planimetria e profili Ante Operam
RS3H02D78WAID0002006A		<b>Interferenza IN16-IN17e NI09-NI13</b> Sezioni Ante Operam
RS3H02D78P7ID0002005A		<b>Interferenza IN16-IN17e NI09-NI13</b> Planimetria post Operam
RS3H02D78FZID0002002A		<b>Interferenza IN16-IN17e NI09-NI13</b> Profili post Operam
RS3H02D78WAID0002007A		<b>Interferenza IN16-IN17e NI09-NI13</b> Sezioni post Operam Tav. 1/2
RS3H02D78WAID0002008A		<b>Interferenza IN16-IN17e NI09-NI13</b> Sezioni post Operam Tav. 2/2
RS3H02D78PZID0002010A	IN18	<b>Intereferenza IN18</b> Planimetria e profilo post operam
RS3H02D78WAID0002009A		<b>Intereferenza IN18</b> Sezioni post operam Tav. 1/2
RS3H02D78WAID0002010A		<b>Intereferenza IN18</b> Sezioni post operam Tav.2/2


### 3 INQUADRAMENTO DEI MANUFATTI DI ATTRAVERSAMENTO DELLA LINEA FERROVIARIA

Le interferenze della linea ferroviaria di progetto del Lotto 2 con il reticolo idrografico interessano corsi d'acqua minori se non incisioni sul territorio e per questo definiti minori. Nella tabella sotto riportata vengono indicate le interferenze in oggetto con relativa WBS, progressiva e la tipologia dell'opera.

WBS	ID Bacino	Progressiva	Descrizione
NI02	-	0+070.00	Tombino stradale NV12 (PE BICOCCA)
NI03		0+870.00	Canale di scarico delle acque provenienti dall'impianto di sollevamento lato Siracusa FA03 con relativo tombino di attraversamento stradale (NV02) e vasca a dispersione.
NI04		2+375.00	Canale di scarico delle acque provenienti dall'impianto di sollevamento lato Catania FA04
IN07	4.2	0+657.36	Tombino ferroviario + tombino stradale NV06
IN08	4.3	1+181.08	Tombino ferroviario + tombino stradale NV06
IN09	6	1+590.77	Serie multipla di attraversamenti ferroviari e stradali
IN16	7	2+963.17	Deviazione e inalveamento del Vallone Cardinale sotto VI02
IN17	8	3+010.00	Tombino ferroviario
NI09	8	0+850	Tombino stradale NV08
NI13	8.1	1+390.02	Tombino stradale
IN18b	5	0+730.46	Tombino Ferroviario
IN18-a	4+5	0+9012.30	Demolizione tombino esistente e deviazione del canale a IN18 b

Tabella 1. Interferenze idrauliche con ferrovia e viabilità in progetto (lotto 2)

I canali di scarico delle acque provenienti dagli impianti di sollevamento (NI03/NI04) e le relative opere accessorie (tombino stradale e vasca a dispersione), vengono trattati nella Relazione specifica relativa al drenaggio della piattaforma ferroviaria in quanto funzionali al solo recapito delle acque del sistema di drenaggio e sul quale non insiste un bacino idrografico di rilievo.

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA–CATANIA–PALERMO INTERRAMENTO PISTA AEROPORTO FONTANAROSSA					
	RELAZIONE IDRAULICA – OPERE MINORI	PROGETTO RS3H	LOTTO 02	CODIFICA D.78.RI	DOCUMENTO ID.00.02.001	REV. A

## 4 NORMATIVA DI RIFERIMENTO E CRITERI DI VERIFICA

### 4.1 Manuale di progettazione ferroviario

Come previsto dal Manuale di Progettazione RFI 2019 ogni tipo di manufatto idraulico verrà verificato utilizzando i seguenti tempi di ritorno  $Tr$ :

...omississ...

*Manufatti di attraversamento (ponti e tombini):*

- *linea ferroviaria  $Tr= 300$  anni per  $S > 10 \text{ km}^2$*
- *linea ferroviaria  $Tr= 200$  anni per  $S < 10 \text{ km}^2$*
- *deviazioni stradali  $Tr=200$  anni*

...omississ...

Per la verifica idraulica delle opere di attraversamento principali il manuale prevede quanto segue:

*“Relativamente ai requisiti idraulici nei confronti dei livelli di massima piena si specifica quanto segue:*

- *franco minimo tra l'intradosso dell'opera e la quota del carico idraulico totale corrispondente al livello idrico di massima piena, calcolato come precedentemente descritto, pari a 0.50 m e comunque non inferiore ad 1.5 m sul livello idrico.*
- *posizionamento delle spalle del viadotto in modo tale da non ridurre significativamente la sezione di deflusso in alveo ed in golena.*
- *posizionamento e geometria delle pile in alveo ed in golena in modo da non provocare significativi fenomeni di rigurgito ovvero fenomeni di erosione localizzati sulle sponde ed in alveo.*
- *Il calcolo dello scalzamento localizzato indotto dalle opere di sostegno deve essere valutato considerando le dimensioni delle pile; nel caso in cui il plinto di fondazione venga messo allo scoperto dall'erosione, le dimensioni maggiori e le forme più tozze dello stesso provocano un ulteriore scalzamento e pertanto, in tale condizione, il calcolo dell'erosione localizzata va ripetuto portando in conto la diversa geometria.”*

Per la verifica idraulica delle opere di attraversamento secondarie il manuale prevede quanto segue:

*“Le tipologie ammesse sono:*

- *tombini circolari in c.a. con diametro minimo 1.5m;*
- *tombini scatolari in c.a. con dimensione minima 2m;*



*Sono ammessi fino a due tombini affiancati.*

*In nessun caso saranno ammessi attraversamenti con opere a sifone.*

*La pendenza longitudinale del fondo dell'opera non dovrà essere inferiore al 2‰ e ciò al fine di impedire la sedimentazione di eventuale materiale solido trasportato.*

*La sezione di deflusso complessiva del tombino dovrà consentire lo smaltimento della portata massima di piena con un grado di riempimento non superiore al 70% della sezione totale.*

*Dovranno essere previsti gli opportuni accorgimenti per evitare, in corrispondenza delle fondazioni del manufatto, fenomeni di scalzamento o erosione.”*

## 4.2 NTC 2018 e relativa Circolare Applicativa

L'Aggiornamento delle Norme Tecniche delle Costruzioni (D.M. 17 Gennaio 2018) e la Circolare 21 gennaio 2019, n. 7 "Istruzioni per l'applicazione dell'Aggiornamento delle Norme tecniche per le costruzioni" di cui al D.M. 17 gennaio 2018, contengono le istruzioni per la progettazione dei ponti ferroviari interessanti corsi d'acqua naturali o artificiali, con particolare riferimento ai tempi di ritorno e ai franchi idraulici da adottare per le verifiche di compatibilità idraulica.

In particolare, al § 5.1.2.3 delle NTC 2018 "Compatibilità idraulica" si prescrive che:

*Quando il ponte interessa un corso d'acqua naturale o artificiale, il progetto deve essere corredato da uno studio di compatibilità idraulica costituito da una relazione idrologica e da una relazione idraulica riguardante le scelte progettuali, la costruzione e l'esercizio del ponte.*

*L'ampiezza e l'approfondimento dello studio e delle indagini che ne costituiscono la base devono essere commisurati all'importanza del problema e al livello di progettazione. Deve in ogni caso essere definita una piena di progetto caratterizzata da un tempo di ritorno  $T_r$  pari a 200 anni ( $T_r=200$ ).*

*Coerentemente al livello di progettazione, lo studio di compatibilità idraulica deve riportare:*

- l'analisi idrologica degli eventi di massima piena e stima della loro frequenza probabile;*
- la definizione dei mesi dell'anno durante i quali siano da attendersi eventi di piena, con riferimento alla prevista successione delle fasi costruttive;*
- la definizione della scala delle portate nelle condizioni attuali, di progetto, e nelle diverse fasi costruttive previste, corredata dal calcolo del profilo di rigurgito indotto dalla presenza delle opere in alveo, tenendo conto della possibile formazione di ammassi di detriti galleggianti;*
- la valutazione dello scavo localizzato con riferimento alle forme ed alle dimensioni di pile, spalle e relative fondazioni, nonché di altre opere in alveo provvisoriale e definitive, tenendo conto della possibile formazione di ammassi di detriti galleggianti oltre che dei fenomeni erosivi generalizzati conseguenti al restringimento d'alveo;*
- l'esame delle conseguenze di urti e abrasioni dovuti alla presenza di natanti e corpi flottanti.*

*Il manufatto non dovrà interessare con spalle, pile e rilevati la sezione del corso d'acqua interessata dalla piena di progetto e, se arginata, i corpi arginali.*

*Qualora fosse necessario realizzare pile in alveo, la luce netta minima tra pile contigue, o fra pila e spalla del ponte, non deve essere inferiore a 40 m misurati ortogonalmente al filone principale della corrente. Per i ponti esistenti, eventualmente interessati da luci nette di misura inferiore, è ammesso l'allargamento della piattaforma, a patto che questo non comporti modifiche dimensionali delle pile, delle spalle o della pianta delle fondazioni di queste, e nel rispetto del franco idraulico come nel seguito precisato.*

*In tutti gli altri casi deve essere richiesta l'autorizzazione all'Autorità competente, che si esprime previo parere del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici.*

*Nel caso di pile e/o spalle in alveo, cura particolare è da dedicare al problema delle escavazioni in corrispondenza delle fondazioni e alla protezione delle fondazioni delle pile e delle spalle tenuto anche conto del materiale galleggiante che il corso d'acqua può trasportare. In tali situazioni, una stima anche speditiva dello scalzamento è da sviluppare fin dai primi livelli di progettazione.*

*Il franco idraulico, definito come la distanza fra la quota liquida di progetto immediatamente a monte del ponte e l'intradosso delle strutture, è da assumersi non inferiore a 1,50 m, e comunque dovrà essere scelto tenendo conto di considerazioni e previsioni sul trasporto solido di fondo e sul trasporto di materiale galleggiante, garantendo una adeguata distanza fra l'intradosso delle strutture e il fondo alveo.*

*Quando l'intradosso delle strutture non sia costituito da un'unica linea orizzontale tra gli appoggi, il franco idraulico deve essere assicurato per una ampiezza centrale di 2/3 della luce, e comunque non inferiore a 40 m.*

*Il franco idraulico necessario non può essere ottenuto con il sollevamento del ponte durante la piena.*

*Lo scalzamento e le azioni idrodinamiche associate al livello idrico massimo che si verifica mediamente ogni anno (si assuma  $Tr = 1,001$ ) devono essere combinate con le altre azioni variabili adottando valori del coefficiente  $\psi_0$  unitario.*

*Lo scalzamento e le azioni idrodinamiche associati all'evento di piena di progetto devono essere combinate esclusivamente con le altre azioni variabili da traffico, adottando per queste ultime i coefficienti di combinazione  $\psi_1$ .*

Al § C5.1.2.4 della Circolare applicativa si prescrive inoltre:

*Ai fini dell'applicazione del punto 5.1.2.3 della Norma, s'intende per alveo la sezione occupata dal deflusso della portata di piena di progetto. Quest'ultima è a sua volta caratterizzata da un tempo di ritorno pari a  $Tr = 200$  anni, dovendosi intendere tale valore quale il più appropriato da scegliere, non escludendo tuttavia valori anche maggiori che devono però essere adeguatamente motivati e giustificati.*

*Gli elementi del ponte, quali le opere strutturali, di difesa ed accessorie, quando interessino l'alveo di un corso d'acqua, fanno parte di un progetto unitario corredato dallo studio di compatibilità idraulica di cui al punto 5.1.2.3 delle NTC. Il progetto sarà impostato tenendo in considerazione la necessità di garantire l'accesso per il ripristino dell'officiosità idraulica degli attraversamenti parzialmente o totalmente intasati dai detriti durante gli eventi di piena.*

*Fermo restando quanto previsto dalla Norma, nello studio di compatibilità idraulica, in funzione delle diverse situazioni, è opportuno siano tra l'altro illustrati i seguenti aspetti:*

*- analisi degli eventi di massima piena; esame dei principali eventi verificatisi nel corso d'acqua; raccolta dei valori estremi in quanto disponibili, e loro elaborazione in termini di frequenza probabile*

*del verificarsi; per i ponti in sezioni di un corso d'acqua che abbiano a monte manufatti artificiali che limitino il naturale deflusso delle piene, queste sono da valutarsi anche nell'ipotesi che tali manufatti siano dismessi;*

*- ricerca e raccolta, presso gli Uffici ed Enti competenti, delle notizie e dei rilievi esistenti, anche storici, utili per lo studio idraulico da svolgere;*

*- giustificazione della soluzione proposta per: l'ubicazione del ponte, le sue dimensioni e le sue strutture in pianta, in elevazione ed in fondazione, tenuto conto del regime del corso d'acqua, dell'assetto morfologico attuale e della sua possibile evoluzione, nonché delle caratteristiche geotecniche della zona interessata;*

*- allontanamento delle acque dall'impalcato e prevenzione del loro scolo incontrollato sulle strutture del ponte stesso o su infrastrutture sottostanti.*

*Inoltre è di interesse stimare i valori della frequenza probabile (1/Tr) di ipotetici eventi che diano luogo a riduzioni del franco stesso.*

*Nello studio idraulico, in funzione delle diverse situazioni, sono inoltre considerati, ove applicabili, i seguenti problemi:*

*- classificazione del corso d'acqua ai fini dell'esercizio della navigazione interna: per ponti posti su vie classificate navigabili va rispettata la luce minima sotto il ponte che compete ai natanti per i quali il corso è classificato, fino alla portata per la quale sia consentita la navigazione;*

*- valutazione dell'influenza dello scavo localizzato che si realizza in corrispondenza delle pile e delle spalle, sulla stabilità di argini e sponde, oltre che delle fondazioni di altri manufatti presenti nelle vicinanze;*

*- esame delle conseguenze della presenza di corpi flottanti, considerando anche il possibile disormeggio dei natanti, trasportati dalle acque in relazione a possibili ostruzioni delle luci (specie se queste possono creare invasi anche temporanei a monte), sia in fase costruttiva sia durante l'esercizio delle opere;*

*- sollecitazioni indotte dall'acqua per evento sismico quando sia di qualche rilievo la superficie immersa delle pile (e, per i ponti esistenti, delle spalle) con riferimento al livello idrico massimo che si verifica mediamente ogni anno.*

*Per la stima del livello idrico massimo che si verifica mediamente ogni anno, in assenza di dati che garantiscano una robusta caratterizzazione statistica degli eventi, è da utilizzarsi il minimo fra i valori di portata massimi annuali registrati. Scalzamento e azioni idrodinamiche devono in tal caso essere combinate con tutte le altre azioni variabili, mentre nella situazione corrispondente all'evento di piena di progetto, nella combinazione con le altre azioni variabili sono da considerare solo quelle variabili da traffico.*

*In situazioni particolarmente complesse può essere opportuno sviluppare le indagini anche con l'ausilio di modelli fisici.*

*Quando, per caratteristiche del territorio e del corso d'acqua, si possa verificare nella sezione oggetto dell'attraversamento il transito di tronchi di rilevanti dimensioni, in aggiunta alla prescrizione di un franco normale minimo di 1,50 m, è da raccomandare che il dislivello tra fondo e sottotrave sia indicativamente non inferiore a 6÷7 m. Nel caso di corsi di acqua arginati, la quota di sottotrave sarà comunque non inferiore alla quota della sommità arginale per l'intera luce. Per tutti gli attraversamenti è opportuno sia garantito il transito dei mezzi di manutenzione delle sponde e/o delle arginature.*

*Le limitazioni alle modifiche delle pile o delle spalle e relative fondazioni di ponti esistenti previste al punto 5.1.2.3 della Norma, sono da riferirsi agli elementi che interessano l'alveo, come sopra definito, o i corpi arginali. La possibilità di deroga, subordinata all'autorizzazione dell'Autorità competente come previsto allo stesso punto della norma, è relativa alle sole pile.*

*Per i ponti esistenti sono ammessi gli interventi per l'incremento della sicurezza strutturale in analogia a quanto prescritto al § 8.4 della Norma, solo nel caso in cui siano esclusi incrementi, rispetto all'attuale, del livello di traffico di progetto e gli stessi interventi non vadano in alcun modo a peggiorare le condizioni di sicurezza idraulica esistenti. Poiché in questi casi sono possibili fenomeni di instabilità locale, in applicazione del §8.3 della Norma, è opportuno effettuare la verifica delle fondazioni, e quindi la valutazione dello scalzamento di eventuali spalle o pile in alveo. Anche gli interventi necessari per l'incremento della sicurezza strutturale devono essere accompagnati dallo studio di compatibilità idraulica dove sia messa in evidenza la frequenza probabile ( $1/Tr$ ) degli eventi che garantiscono il franco previsto da Norma.*

*Nelle Relazioni idrologica e idraulica sarà valutato il sistema di smaltimento delle acque meteoriche, tenendo in considerazione anche i seguenti aspetti:*

- analisi degli eventi pluviometrici brevi ed intensi della zona;*
- disposizione delle caditoie in numero e posizioni dipendenti dalle loro dimensioni, dalla geometria piano-altimetrica della sede stradale e dai dati pluviometrici, al fine di evitare ristagni;*
- influenza del trasporto solido e dell'eventuale deposito residuo in condotta sul dimensionamento del sistema di tubazioni che colleghino le acque fino al tubo di eduazione;*
- posizione e lunghezza dei tubi di eduazione affinché l'acqua di scolo sia portata a distanza tale da evitare la ricaduta sulle strutture anche in presenza di vento.*

*Fermo restando il rispetto della normativa ambientale vigente, in tutti quei casi in cui le acque di eduazione possono produrre danni e inconvenienti o nel caso di attraversamento di zone urbane, è opportuno considerare la possibilità che esse siano intubate fino a terra ed eventualmente immerse in un sistema fognante.*

*Nelle strutture a cassone va considerata l'opportunità di praticare, nei punti di possibili accumulo, fori di evacuazione di eventuali acque di infiltrazione. Tubi di evacuazione e gocciolatoi saranno predisposti in modo da evitare scoli di acque sul manufatto.*

*Restano esclusi dal punto 5.1.2.3 della Norma i tombini, intendendosi per tombino un manufatto totalmente rivestito in sezione, eventualmente suddiviso in più canne, in grado di condurre complessivamente portate fino a  $50 \text{ m}^3/\text{s}$ . L'evento da assumere a base del progetto di un tombino ha comunque tempo di ritorno uguale a quello da assumere per i ponti. La scelta dei materiali deve garantire la resistenza anche ai fenomeni di abrasione e urto causati dai materiali trasportati dalla corrente.*

*Oltre a quanto previsto per gli attraversamenti dalla Norma, nella Relazione idraulica è opportuno siano considerati anche i seguenti aspetti:*

- è da sconsigliare il frazionamento della portata fra più canne, tranne nei casi in cui questo sia fatto per facilitare le procedure di manutenzione, predisponendo allo scopo luci panconabili all'imbocco e allo sbocco e accessi per i mezzi d'opera;*
- sono da evitare andamenti planimetrici non rettilinei e disallineamenti altimetrici del fondo rispetto alla pendenza naturale del corso d'acqua.*

- per sezioni di area maggiore a 1,5 m<sup>2</sup> è da garantire la praticabilità del manufatto;
  - il tombino può funzionare sia in pressione che a superficie libera, evitando in ogni caso il funzionamento intermittente fra i due regimi: nel caso in una o più sezioni il funzionamento sia in pressione, la massima velocità che si realizza all'interno dello stesso tombino non dovrà superare 1,5 m/s;
  - nel caso di funzionamento a superficie libera, il tirante idrico non dovrà superare i 2/3 dell'altezza della sezione, garantendo comunque un franco minimo di 0,50 m;
  - il calcolo idraulico è da sviluppare prendendo in considerazione le condizioni che si realizzano nel tratto del corso d'acqua a valle del tombino;
  - la tenuta idraulica deve essere garantita per ciascuna sezione dell'intero manufatto per un carico pari al maggiore tra: 0,5 bar rispetto all'estradosso o 1,5 volte la massima pressione d'esercizio;
  - il massimo rigurgito previsto a monte del tombino deve garantire il rispetto del franco idraulico nel tratto del corso d'acqua a monte;
  - nel caso sia da temersi l'ostruzione anche parziale del manufatto da parte dei detriti galleggianti trasportati dalla corrente, è da disporre immediatamente a monte una varice presidiata da una griglia che consenta il passaggio di elementi caratterizzati da dimensioni non superiori alla metà della larghezza del tombino; in alternativa il tombino è da dimensionare assumendo che la sezione efficace ai fini del deflusso delle acque sia ridotta almeno alla metà di quella effettiva. È in ogni caso da garantire l'accesso in alveo ai mezzi necessari per le operazioni di manutenzione ordinaria o straordinaria da svolgere dopo gli eventi di piena;
  - i tratti del corso d'acqua immediatamente prospicienti l'imbocco e lo sbocco del manufatto devono essere protetti da fenomeni di scalzamento e/o erosione, e opportune soluzioni tecniche sono da adottare per evitare i fenomeni di sifonamento.
- Nel caso il tombino sia opera provvisoria, ovvero a servizio di un cantiere, le precedenti disposizioni possono essere assunte come elementi di riferimento, tenendo opportunamente conto del tempo di utilizzo previsto per l'opera provvisoria stessa.

### 4.3 Criteri di verifica

Sulla base di quanto riportato nei due precedenti paragrafi, le nuove opere di attraversamento sono state progettate secondo i seguenti criteri:

Ponti

	Manuale di progettazione ferroviaria	NTC 2018 e relativa circolare applicativa
<b>Manufatti di attraversamento principali (ponti e viadotti)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• linea ferroviaria <math>Tr = 300</math> anni per <math>S &gt; 10</math> km<sup>2</sup></li> <li>• linea ferroviaria <math>Tr = 200</math> anni per <math>S &lt; 10</math> km<sup>2</sup></li> </ul>	$Tr = 200$ anni

	Manuale di progettazione ferroviaria	NTC 2018 e relativa circolare applicativa
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• deviazioni stradali <i>Tr=200 anni</i></li> </ul>	
<b>Verifica Franco di Progetto ponti.</b>	<i>Franco minimo tra l'intradosso dell'opera e la quota del carico idraulico totale corrispondente al livello idrico di massima piena, pari a 0.50 m e comunque non inferiore ad 1.5 m sul livello idrico.</i>	<i>Franco minimo tra intradosso opera e L.I. pari a 1,50±2,00 m</i>
<b>Dislivello tra fondo e sottotrave</b>		<i>Non inferiore a 6÷7 m quando si possa temere il transito d'alberi d'alto fusto</i>
<b>Posizione spalle</b>	<i>Posizionamento delle spalle del viadotto in modo tale da non ridurre significativamente la sezione di deflusso in alveo ed in golena;</i>	<i>Il manufatto non dovrà interessare con spalle, pile e rilevati la sezione del corso d'acqua interessata dalla piena di progetto e, se arginata, i corpi arginali</i>

**Tombini**

	Manuale di progettazione ferroviaria	NTC 2018 e relativa circolare applicativa
<b>Manufatti di attraversamento minori (tombini)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• linea ferroviaria <i>Tr=300 anni per S &gt; 10 km<sup>2</sup></i></li> <li>• linea ferroviaria <i>Tr=200 anni per S &lt; 10 km<sup>2</sup></i></li> <li>• deviazioni stradali <i>Tr=200 anni</i></li> </ul>	<i>Tr = 200 anni</i>  <i>Per portate maggiori di 50 m<sup>3</sup>/s va previsto ponte</i>
<b>Grado di riempimento</b>	<i>Min. 70%</i>	<i>Min. 2/3 dell'altezza e comunque franco 50 cm dall'intradosso</i>

## 5 MODELLAZIONE IDRAULICA

Le simulazioni idrauliche sono state condotte utilizzando il programma di calcolo MIKE HYDRO River, nell'ipotesi che lungo l'alveo fluviale si instauri un regime di moto permanente. Analisi in moto vario sono state eseguite per le interferenze in cui confluiscono contributi di bacini caratterizzati da tempi di corrivazione non paragonabili tra loro: assegnando gli idrogrammi di piena alle aste simulate si simula il decorso della piena senza sovrapporre picchi non contemporanei evitando dunque un sovradimensionamento dell'opera.

Nella tabella seguente vengono riportate le interferenze con il reticolo idrografico minore delle opere in progetto, riportando per ciascuna la progressiva ferroviaria o stradale ove localizzata l'interferenza, il bacino sotteso, la WBS, la corrispondente opera di attraversamento ed il tipo di verifica eseguito. Sono inoltre indicate le configurazioni analizzate (Ante Operam, Post Operam, Provvisoria).

	Lotto	pk	WBS	ID Bacino	OPERA	Tipo di verifica	AO	PO	Prov.
Interr. PA-CT	2	km 0+070	NI02-44	-	TOMBINO 2,00 X2,00	Moto permanente	NO	SI	NO
Bretella CT-SR	2	km 0+475	IN07	4.2	TOMBINO D=1,5 m	Moto permanente	NO	SI	NO
	2	km 1+190	IN08	4.3	TOMBINO 2,00 x 2,00 m	Moto permanente	NO	SI	NO
	2	km 1+160	IN09	6	TOMBINO 3,00 x 2,00 m	Moto permanente	NO	SI	NO
	2	km 2+940	IN16	7	VIADOTTO VI02/NW01	Moto vario		SI	SI
	2	km 3+010	IN17	8	TOMBINO 5,00 x 3,00 m	Moto vario	SI	SI	SI
	2	km 3+125	NI13	8.1	TOMBINO 4,00 x 2,00 m	Moto vario		SI	SI
	2	km 3+010	NI09	8	TOMBINO 5,00 x 3,00 m	Moto vario	NO	SI	SI
Coll. Fascio A/P - Interporto	2	km 0+737	IN18 a	4+5	TOMBINO 5,00 x 2,00 m	Moto vario	NO	SI	NO

Tabella 2. Verifiche idrauliche

## 5.1 MIKE HYDRO River

La modellazione idraulica è stata effettuata con il codice di calcolo MIKE HYDRO, nuova interfaccia grafica del codice di calcolo monodimensionale del *Danish Hydraulic Institute*. Al suo interno comprende due moduli, uno dedicato alla modellazione multifunzionale a scala di bacino volto ad agevolare la pianificazione e la gestione integrata delle risorse idriche (*Basin*), l'altro rivolto alla modellazione fluviale monodimensionale (*River*). MIKE HYDRO River utilizza il risolutore numerico MIKE 1D che risolve le equazioni di conservazione del volume e della quantità di moto sotto le seguenti ipotesi:

- fluido incomprimibile ed omogeneo,
- flusso monodimensionale,
- piccola pendenza del fondo alveo,
- modesta variazione della geometria delle sezioni d'alveo in senso longitudinale,
- distribuzione idrostatica della pressione.

$$\Rightarrow \frac{\partial Q}{\partial t} - b \frac{\partial h}{\partial t} = 0 \quad \text{Equazione di continuità}$$

$$\Rightarrow \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial \left( \frac{Q^2}{A} \right)}{\partial x} + g A \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{g n^2 Q |Q|}{AR^{4/3}} = 0 \quad \text{Equazione della conservazione della quantità di moto}$$

Il modello consente l'adozione di tre schematizzazioni del moto in funzione della tipologia del problema da risolvere. L'approccio dell'onda dinamica coincide con la formulazione completa dell'equazione della quantità di moto ed è pertanto in grado di simulare anche i flussi di marea e i flussi di rigurgito variabili rapidamente, contrariamente all'onda cinematica. L'onda diffusiva è un'approssimazione intermedia utile nelle applicazioni in cui sono previsti rigurgiti relativamente stazionari.

Lo schema di soluzione delle equazioni di De Saint Venant è uno schema implicito alle differenze finite del tipo Abbott-Ionescu a 6 punti, in cui:

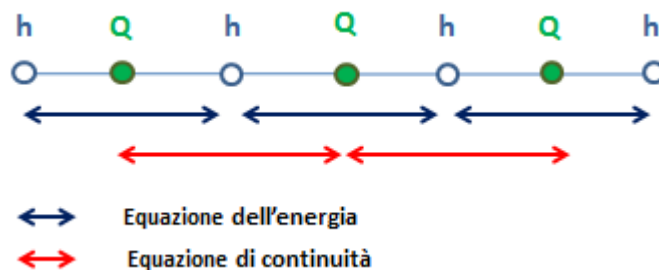



Figura 1. Schema Abbott-Ionescu a 6 punti

- i punti Q sono posizionati sempre a metà tra due punti h vicini;
- la distanza tra due punti h può essere variabile;
- ad ogni sezione trasversale d'alveo viene assegnato un punto h;



 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA–CATANIA–PALERMO INTERRAMENTO PISTA AEROPORTO FONTANAROSSA					
	<b>RELAZIONE IDRAULICA – OPERE MINORI</b>	PROGETTO RS3H	LOTTO 02	CODIFICA D.78.RI	DOCUMENTO ID.00.02.001	REV. A

- ad ogni struttura viene assegnato un punto Q.

In Mike Hydro River è possibile modellare i ponti come combinazione di *culverts* (di forma geometrica variabile secondo una relazione quota-larghezza oppure di forma circolare) e *weir*. L'introduzione dei *broadcrested weir* è doveroso per tutti gli attraversamenti minori sormontabili dai livelli di piena ed è sufficiente definire lo spessore della soglia pari alla larghezza di ciascun ponte e quota di sfioro pari a quella dell'estradosso. Per la definizione delle strutture idrauliche, il software richiede l'implementazione di due sezioni trasversali, una a monte ed una a valle, ad una distanza dall'imbocco e dallo sbocco minore della luce. Ogni tombino, così come la soglia sfiorante, viene identificato dalla progressiva alla quale è posizionato il punto medio dell'asse.

## 5.2 Rilievi della zona di studio

Le caratteristiche geometriche dei corsi d'acqua sono state estratte dai rilievi topografici eseguiti da italferr, integrando, ove necessario, con informazioni altimetriche dedotte da un modello digitale del terreno 2x2m derivante dall'elaborazione dei dati acquisiti mediante un drone (densità dei punti del rilievo è di 5pt/mq). In particolare, si è fatto riferimento a:

- rilievo LiDAR Italferr (risoluzione 5 punti mq);
- rilievo LiDAR del Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare (MATTM);
- sezioni di rilievo trasversali dei corsi d'acqua;
- rilievi celerimetrici;
- prospetti delle opere di scavalco esistenti;

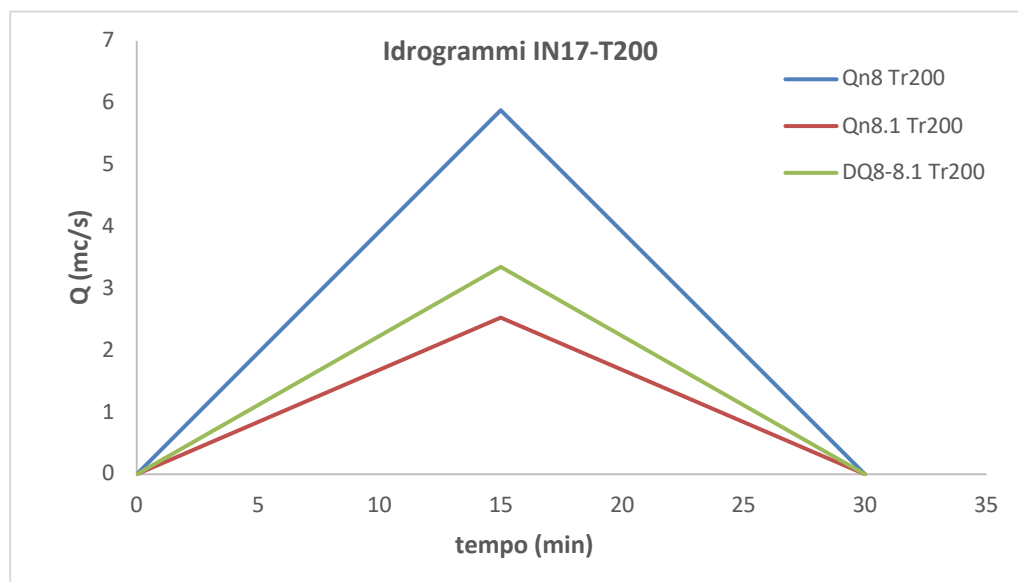
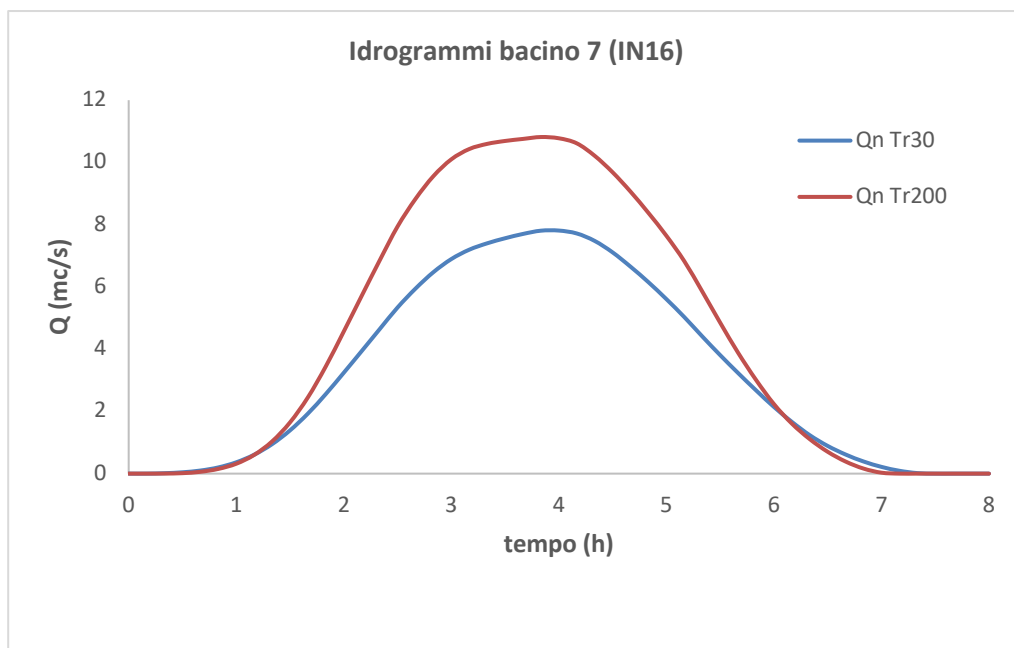
## 5.3 Portate di progetto

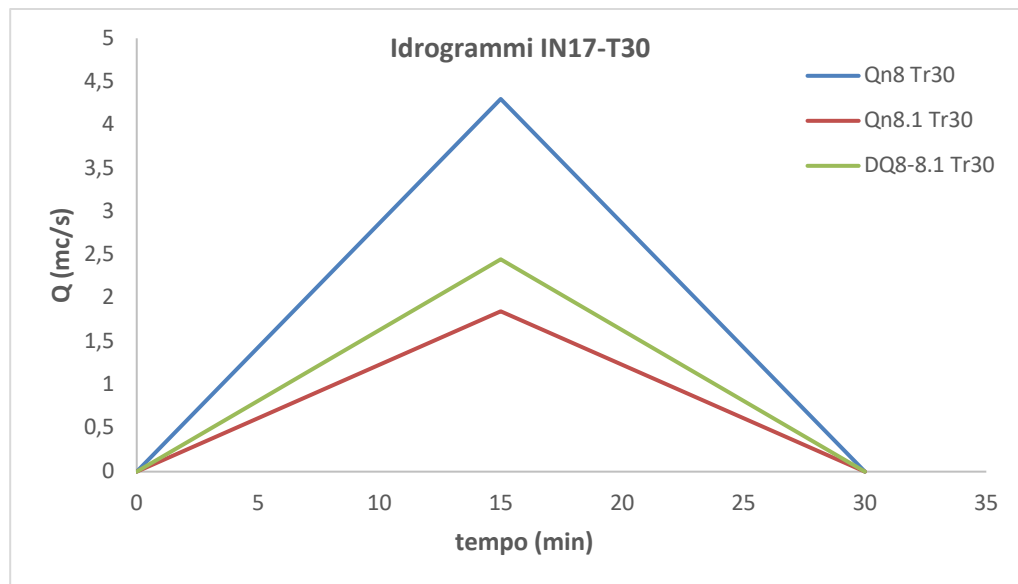
Per le verifiche condotte in moto permanente si è fatto ricorso alle portate al colmo associate a tempi di ritorno di 200 anni (in accordo con il manuale di progettazione ferroviario e le NTC2018) ricavate nello studio idrologico allegato al progetto. Si riportano i valori delle portate di progetto ottenute dalle analisi idrologiche.

LOTTO	ID Interferenza	Progressiva	ID Bac	A [km <sup>2</sup> ]	Q [m <sup>3</sup> /s]
2	IN07	0+475.00	4.2	0.014	0.81
2	IN08	1+181.08	4.3	0.047	2.63
2	IN09	1+590.77	6	0.13	6.51
2			6.1	0.08	
2			6.2	0.08	
2			6.3	0.08	

Tabella 3. Verifiche in moto permanente: portate di progetto

Alle analisi idrauliche svolte in moto vario sono stati dati in input gli idrogrammi relativi a un tempo di ritorno di 200 anni per le configurazioni post operam e 30 anni per quelle relative alla fase di cantiere. In particolare, verranno utilizzati gli idrogrammi ricavati con il metodo WFIUH per i bacini di estensione superiore ad 1 kmq, mentre per i bacini piccoli ( $S < 1$  kmq) gli idrogrammi triangolari con portata al colmo stimata con il metodo razionale.





## 5.4 Scabrezza

La stima dei coefficienti di scabrezza è caratterizzata da un notevole grado di incertezza dal momento che questi parametri presentano un ampio spettro di valori in dipendenza dello stato dell'alveo, dal grado di manutenzione e pulizia detto stesso, dalla presenza e dal tipo di vegetazione, dai cicli stagionali, dalla granulometria del fondo, etc.

La relazione di piano del PAI dell'Autorità di Bacino della Sicilia riporta una tabella riepilogativa (Chow, 1959) per la scelta del coefficiente di Manning in funzione delle condizioni dell'alveo.

<b>A.</b>	<b>CORSI D'ACQUA NATURALI</b> <i>Corsi d'acqua minori (tirante inferiore a 3,5m)</i>			
<b>1.</b>	<b>Corsi d'acqua di pianura</b>			
a.	Puliti, rettilinei, in piena senza scavi localizzati	0.025	0.030	0.033
b.	Puliti, rettilinei, in piena senza scavi localizzati, con sassi e sterpaglia	0.030	0.035	0.040
c.	Puliti, ondulati, con alcune buche e banchi	0.033	0.040	0.045
d.	Puliti, ondulati, con alcune buche e banchi, con cespugli e pietre	0.035	0.045	0.050
e.	Puliti, ondulati, con alcune buche e banchi, in magra	0.040	0.048	0.055
f.	Puliti, ondulati, con alcune buche e banchi, con cespugli e più pietrame	0.045	0.050	0.060
g.	Tratti lenti, sterpaglia e buche profonde	0.050	0.070	0.080
h.	Tratti molto erbosi, buche profonde e grossi arbusti e cespugli	0.070	0.100	0.150
<b>2.</b>	<b>Aree golenali</b>			
a.	A pascolo senza vegetazione arbustiva	0.025	0.030	0.050
b.	Aree coltivate	0.020	0.035	0.050
c.	Con vegetazione arbustiva spontanea	0.035	0.070	0.160
d.	Con vegetazione arborea coltivata	0.030	0.060	0.120
<b>3.</b>	<b>Corsi d'acqua montani, senza vegetazione in alveo, sponde ripide alberi e cespugli lungo le sponde sommergibili durante le piene</b>			
a.	Fondo: ghiaia, ciottoli e massi sparsi	0.030	0.040	0.050
b.	Fondo: ciottoli e massi grossi	0.040	0.050	0.070
<b>B.</b>	<b>CANALI ARTIFICIALI</b>			
<b>1.</b>	<b>Canali in terra lisciata ed uniforme</b>			
a.	Puliti, scavata di recente	0.016	0.018	0.020
b.	Puliti, dopo prolungata esposizione	0.018	0.022	0.025
c.	Ghiaia, sezione uniforme, pulita	0.022	0.025	0.030
d.	Erba corta, pochi cespugli	0.022	0.027	0.033
<b>2.</b>	<b>Canali in terra con ondulazioni o irregolari</b>			
a.	Senza vegetazione	0.023	0.025	0.030
b.	Con erba e pochi cespugli	0.025	0.030	0.033
c.	Cespugli o piante acquatiche in canali profondi	0.030	0.035	0.040
d.	Fondo in terra e sponde in pietrisco	0.028	0.030	0.035
e.	Fondo in pietrame e sponde in cespugli	0.025	0.035	0.040
f.	Fondo in ciottoli e sponde pulite	0.030	0.040	0.050
<b>3.</b>	<b>Canali scavati o dragati</b>			
a.	Senza vegetazione	0.025	0.028	0.033
b.	Cespugli sparsi sulle sponde	0.035	0.050	0.060
<b>4.</b>	<b>Canali in roccia</b>			
a.	Lisci ed uniformi	0.025	0.035	0.040
b.	Fraggiati ed irregolari	0.035	0.040	0.050
<b>5.</b>	<b>Canali senza manutenzione, sterpaglia e cespugli</b>			
a.	Sterpaglia densa, alta quanto il tirante idrico	0.040	0.050	0.080
b.	Fondo pulito cespugli sulle sponde	0.045	0.070	0.110
c.	Fondo pulito, cespugli sulle sponde, in piena	0.050	0.080	0.120
d.	Cespugli densi ed acque profonde	0.080	0.100	0.140

*Tabella riepilogativa per la scelta del coefficiente di Manning (Chow, 1959)*

Nella valutazione dei coefficienti di scabrezza occorre tener presente che questi sono comunque suscettibili di modificazioni per tenere conto degli effetti dissipativi legati a:

perdite localizzate prodotte dall'interazione della corrente con irregolarità geometriche come presenza di ostacoli di vario genere, espansioni brusche, incisioni nelle golene, brusche variazioni di larghezza;

perdite energetiche dovute alla modificazione del fondo dell'alveo, alla risospensione e trasporto solido, allo sradicamento e al trasporto di materiale vegetale.

Si preferisce dunque optare per dei coefficienti di scabrezza che tengano mediamente conto (vista la grande variabilità dei parametri) delle condizioni ambientali e restino a favore di sicurezza.

Il manuale di progettazione ferroviaria stabilisce unicamente il valore del coefficiente di scabrezza di Manning per le strutture in calcestruzzo ( $0.015 \text{ s/m}^{1/3}$ ). Per quanto riguarda la definizione della scabrezza nelle sezioni aperte, sono stati adottati valori di  $0.045 \text{ s/m}^{1/3}$  nella configurazione ante operam, mentre in quella post operam è stato assunto sempre un rivestimento del fondo o mediante massi naturali o con materassi Reno o gabbioni metallici.

**Valori del coefficiente di scabrezza di Manning per le verifiche ante operam**

<i>ID Interferenza</i>	<i>Progressiva AO</i>	<i>ID Bac.</i>	<i>n [s/m<sup>1/3</sup>] Attraversamento</i>	<i>n [s/m<sup>1/3</sup>] Canale</i>	
IN17	3+010.00	7+8	0.015	0.045	Alveo in terra non rivestito

**Valori del coefficiente di scabrezza di Manning per le verifiche post operam**

<i>ID Interferenza</i>	<i>Progressiva PO</i>	<i>ID Bac.</i>	<i>n [s/m<sup>1/3</sup>] Attraversamento</i>	<i>n [s/m<sup>1/3</sup>] Canale</i>	
NI02-IN44	0+070.00	-	0.015	0.015	Calcestruzzo
IN18	0+737.00	4+5	0.015	0.028	Materassi Reno/ Gabbioni metallici
IN07	0+475.00	4.2	0.015	0.028	Materassi Reno/ Gabbioni metallici
IN08	1+190.00	4.3	0.015	0.035	Massi naturali
IN17	3+010.00	8	0.015	0.035	Massi naturali
NI09	3+010.00	8	0.015	0.035	Massi naturali
NI13	3+125.00	8.1	0.015	0.035	Massi naturali
IN09	1+160.00	6	0.015	0.028	Materassi Reno/ Gabbioni metallici
IN16	2+940.00	7	0.035	0.035	Massi naturali

## 5.5 Condizioni al contorno

Mike Hydro River consente di assegnare nell'estremità valliva la più piccola tra l'altezza critica e l'altezza di moto uniforme attraverso una condizione definita "free outflow".

## 5.6 Verifiche idrauliche

Per ogni corso d'acqua i risultati delle simulazioni sono riassunti nel profilo idrico della piena ed in una tabella contenente le seguenti informazioni:

- sezione di riferimento
- progressiva sezione (m)
- quota assoluta del punto più depresso della sezione ( $z_f - m$  s.l.m.);
- quota assoluta del pelo libero (*Livello Idrico - m* s.l.m.);
- tirante idrico ( $h - m$ );
- quota assoluta del livello energetico (*Livello Energetico - m* s.l.m.);
- numero di Froude (-);
- velocità media nel canale (m/s);
- lunghezza manufatto di attraversamento (m);
- quota assoluta di scorrimento monte/valle del manufatto ( $z_{scorr} - m$  s.l.m.)
- altezza manufatto di attraversamento ( $y - m$ )
- quota assoluta intradosso monte/valle del manufatto ( $z_{intrar} - m$  s.l.m.)
- tirante idrico nella sezione immediatamente a monte del manufatto ( $h - m$ )
- grado di riempimento (GR)
- portata al colmo ( $Q - mc/s$ )
- Franco sul livello idrico (m)
- Franco sul livello energetico (m)

Il livello idrico utilizzato nelle verifiche è riferito alle sezioni immediatamente a monte dell'opera di attraversamento in progetto.

### 5.6.1 Interferenza pk km 0+070 –NI02 (IN44 del Progetto Esecutivo Bicocca-Catenanuova)

Alla progressiva 0+070 km, è attualmente esistente un tombino 2,00 m x 2,00 m denominato IN44 nell'ambito del progetto esecutivo "Raddoppio della tratta Bicocca-Catenanuova".

Per garantire il deflusso delle acque meteoriche afferenti al bacino di NI02, il progetto prevede di inserire un tombino scatolare di uguali dimensioni a monte del manufatto esistente regolato da una soglia di fondo: quest'ultima consente di far defluire una portata massima di 8.91 mc/s, a fronte dei 24.87mc/s stimati nella

relazione idrologica, tale da assicurare un grado di riempimento massimo del 66% nel tombino di progetto. La luce della soglia di fondo è larga 2 m e alta 0.71 m.

Il bacino laminerà naturalmente le portate in eccesso per poi restituirle gradualmente a valle con una portata di picco pari 8.91 mc/s. L'intervento prevede, pertanto, anche la realizzazione di un argine a protezione della viabilità e della ferrovia che consenta di invasare naturalmente il volume della piena senza compromettere la sicurezza delle opere in progetto.

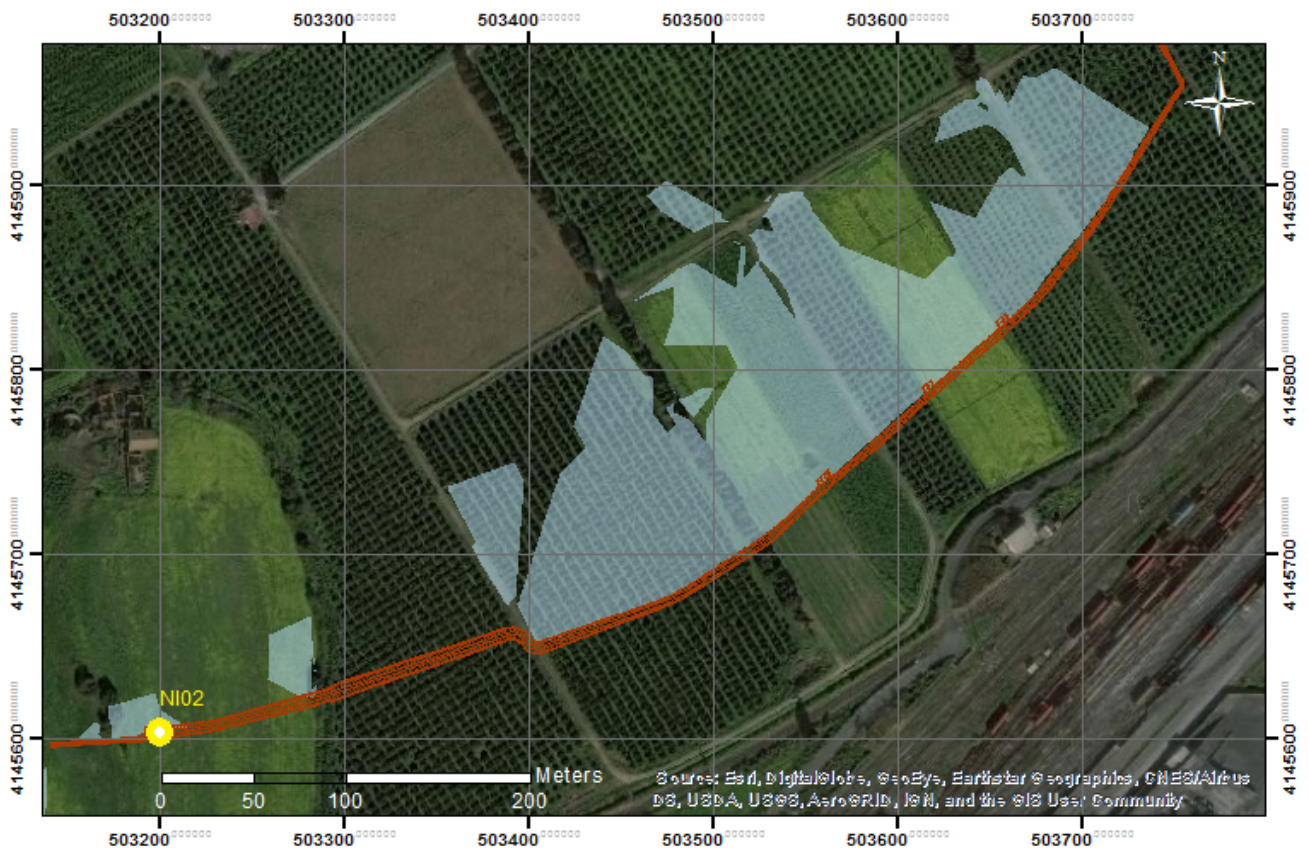


Figura 2. Aree allagate per un evento di pioggia Tr 200 anni con durata pari al tempo critico del bacino e argine di protezione della viabilità

Nell'elaborato grafico RS3H02D78P8ID0002002A è riportata la traccia planimetrica delle sezioni idrauliche considerate nella simulazione.

<b>n° sezioni</b>	<b>8</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>n° manufatti</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ <b>Tipologia</b></li> <li>➤ <b>Dimensioni</b></li> </ul> </li> </ul>	<p>1 Scatolare 2 x 2 m</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Condizioni al contorno</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ <b>Monte</b></li> <li>➤ <b>Valle</b></li> </ul> </li> </ul>	<p>8.91 Free outflow</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Coefficiente di scabrezza Manning</b></li> </ul>	<p>0.015</p>

SEZ	Progr.	Thalweg	Livello idrico	Tirante idrico	Livello energetico	Froude	Velocità
-	<i>m</i>	<i>m s.l.m.</i>	<i>m s.l.m.</i>	<i>m</i>	<i>m s.l.m.</i>	-	<i>m/s</i>
0	-40	15.55	16.74	1.19	16.93	0.60	1.652
1	0	15.25	16.6	1.30	16.98	0.52	1.46
2	36.76	15.05	16.4	1.36	16.85	1.25	2.96
3	61.27	14.92	16.3	1.41	16.74	1.22	2.90
4	66.77	14.9	16.3	1.40	16.72	1.21	2.89
5	102.38	14.79	16.0	1.19	16.66	1.79	4.00
6	110.5607	14.76	15.9	1.16	16.72	1.88	4.17
7	136.2	14.66	15.8	1.17	16.802	2.08	4.30

ID	Progr.	Lungh.	Z scorr monte	Z scorr valle	h <sub>tomb</sub>	Z intrad monte	Z intrad valle
-	-	<i>m</i>	<i>m s.l.m.</i>	<i>m s.l.m.</i>	<i>m</i>	<i>m s.l.m.</i>	<i>m s.l.m.</i>
NI02	17.72	32.75	15.25	15.05	2	17.25	17.05

ID	Progr.	h	GR	Q	Franco sul livello idrico	Franco sul carico totale
-	-	<i>m</i>	<i>%</i>	<i>m<sup>3</sup>/s</i>	<i>m</i>	<i>m</i>
NI02	17.72	1.30	65.0%	8.91	0.70	0.27



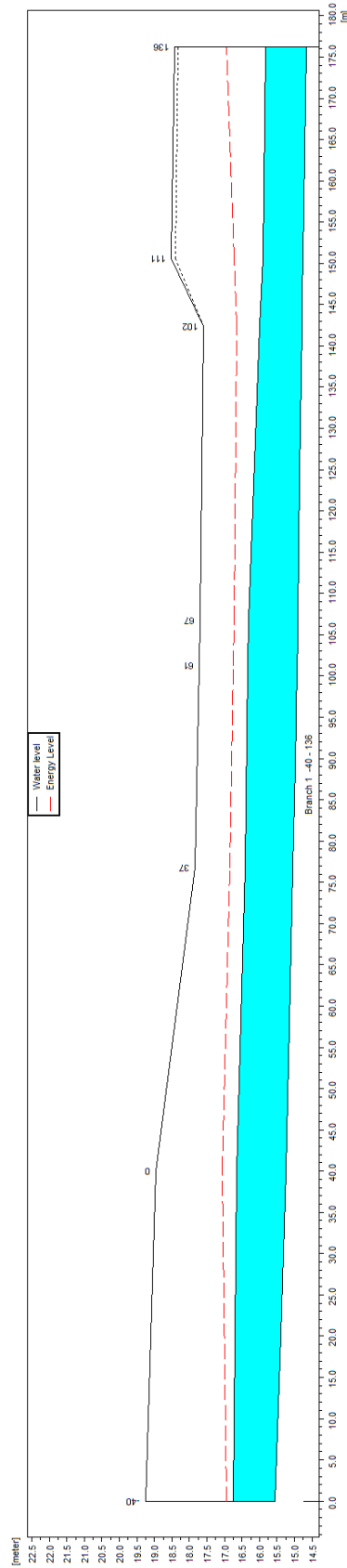


Figura 3. Profilo idraulico NI02

### 5.6.2 Interferenza pk km 0+475 - IN 07

#### Verifica post operam

Il tracciato ferroviario intercetta un nodo idraulico a tre vie (ovest-est-sud) motivo per cui si è ritenuto opportuno deviare il corso del canale lato Catania, denominato “ramo est”, a valle dell’attraversamento da realizzare. Le portate assegnate in testa ai due rami sono state calcolate considerando come aree drenanti quelle intercluse tra il fosso e gli assi ferroviari delle linee Catania-Siracusa (in fase di progetto) e Bicocca-Catena Nuova (in fase di realizzazione).

E’ stato previsto l’impiego di massi naturali per il rivestimento delle sezioni trapezoidali (pendenza delle scarpate 1:1).

Nell’elaborato grafico RS3H02D78PZID0002006A è riportata la traccia planimetrica delle sezioni idrauliche considerate nella simulazione.

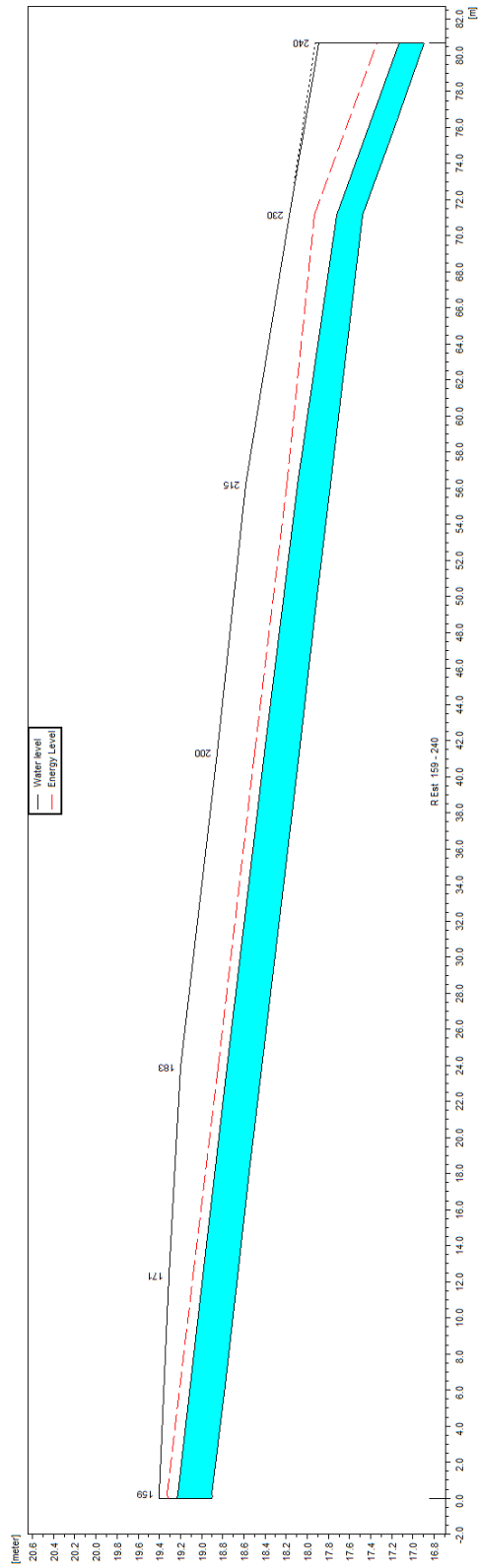
- |                                     |                            |
|-------------------------------------|----------------------------|
| • n° sezioni                        | <b>20</b>                  |
| • n° manufatti                      | 1                          |
| ➢ Tipologia                         | Circolare                  |
| ➢ Dimensioni                        | D= 1.5 m                   |
| • Condizioni al contorno            |                            |
| ➢ Monte ramo ovest                  | Q = 0.81 m <sup>3</sup> /s |
| ➢ Monte ramo est                    | Q = 0.36 m <sup>3</sup> /s |
| ➢ Valle                             | Free outflow               |
| • Coefficiente di scabrezza Manning | 0.035                      |

Ramo	SEZ	Progr.	z <sub>f</sub>	Livello idrico	Tirante idrico	Livello energetico	Froude	Velocità
-	-	<i>m</i>	<i>m s.l.m.</i>	<i>m s.l.m.</i>	<i>m</i>	<i>m s.l.m.</i>	-	<i>m/s</i>
R Est	1	159.08	18.90	19.23	0.33	19.32	1.00	1.36
R Est	2	171.17	18.66	18.99	0.33	19.08	0.98	1.33
R Est	3	182.73	18.43	18.76	0.33	18.85	0.98	1.34
R Est	4	200.16	18.08	18.40	0.32	18.50	1.00	1.36
R Est	5	215.06	17.78	18.09	0.31	18.19	1.08	1.44
R Est	6	230.02	17.48	17.72	0.24	17.93	1.66	2.02
R Est	7	239.53	16.89	17.13	0.24	17.34	1.66	2.02
R Ovest	1	32.70	18.65	18.85	0.20	18.9	0.53	0.62
R Ovest	2	72.83	18.05	18.58	0.53	18.7	0.91	1.48

Ramo	SEZ	Progr.	z <sub>f</sub>	Livello idrico	Tirante idrico	Livello energetico	Froude	Velocità
-	-	m	<i>m s.l.m.</i>	<i>m s.l.m.</i>	m	<i>m s.l.m.</i>	-	m/s
R Ovest	3	86.21	17.85	18.38	0.53	18.49	0.91	1.49
R Ovest	4	97.51	17.68	18.21	0.53	18.31	0.87	1.43
R Ovest	5	101.35	17.64	18.15	0.51	18.28	0.96	1.55
R Ovest	6	112.03	17.53	17.97	0.44	18.16	1.29	1.11
R Ovest	7	120.97	17.11	17.69	0.58	17.76	0.64	1.19
R Ovest	8	137.47	16.92	17.50	0.58	17.57	0.72	1.08
R Ovest	9	153.64	16.79	17.47	0.68	17.51	0.77	1.33
R Ovest	10	174.29	16.68	17.44	0.71	17.41	0.82	0.83
R Ovest	12	205.02	16.57	17.11	0.54	17.22	1.28	1.43
R Ovest	12	229.69	16.49	16.79	0.30	16.86	0.58	1.25
R Ovest	13	261.29	16.20	16.44	0.24	16.65	0.80	1.5

ID	Progr.	Lungh.	Z scorrimento monte	Z scorrimento valle	D	z intradosso monte	Z intradosso valle
-	-	<i>m</i>	<i>m s.l.m.</i>	<i>m s.l.m.</i>	<i>m</i>	<i>m s.l.m.</i>	<i>m s.l.m.</i>
IN07 (ferr)	128.05	12.51	17.11	16.98	1.5	18.61	18.5
IN07 (NV06)	146.88	12.46	16.92	16.79	1.5	18.42	18.3

ID	Progr.	h	GR	Q	Franco sul livello idrico	Franco sul carico totale
-	-	<i>m</i>	%	<i>m<sup>3</sup>/s</i>	<i>m</i>	<i>m</i>
<b>IN07 (ferr)</b>	128.05	0.585	39.6%	0.47	0.92	0.85
<b>IN07 (NV06)</b>	146.88	0.578	38.6%	0.47	0.92	0.85



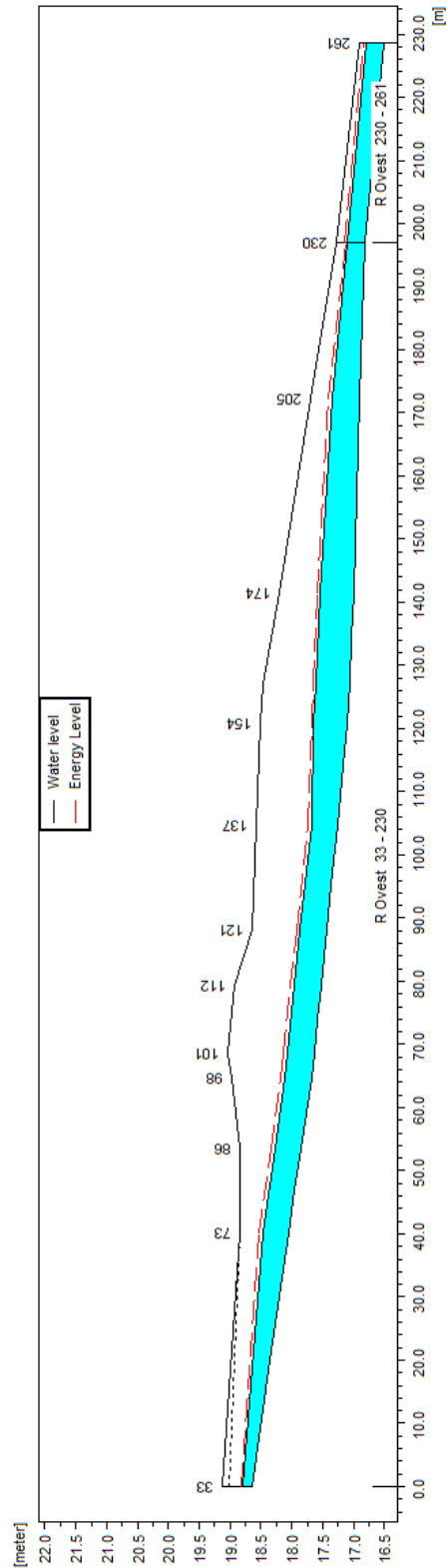


Figura 4. Profili idraulici IN07: a) Ramo Est b) Ramo Ovest

### 5.6.3 Interferenza pk km 0+737-IN18

#### Verifica post operam

La configurazione post operam prevede la deviazione del fosso, che allo stato attuale affluisce alla progressiva 0+975 km (IN18b), ad IN18A con implementazione di un tombino in grado di far defluire una portata al colmo di 18.01 m<sup>3</sup>/s del bacino 4.

La verifica è stata eseguita in moto vario considerando disaccoppiati i contributi dei bacini 4 e 5 e definendo le sezioni trasversali ipotizzando l'impiego di gabbioni metallici. Di seguito si riportano le caratteristiche dell'opera e i risultati dell'analisi svolta.

Nell'elaborato grafico RS3H02D78PZID0002010A è riportata la traccia planimetrica delle sezioni idrauliche considerate nella simulazione.

• n° sezioni	<b>30</b>
• n° manufatti	1
➤ Tipologia	Scatolare
➤ Dimensioni	5 x 2 m
• Condizioni al contorno	
➤ Monte	Idrogramma bac.4
➤ Valle	Free outflow
➤ Contributo puntuale	Idrogramma bac.5
• Coefficiente di scabrezza Manning	0.028

SEZ	Progressiva	$z_i$	Livello idrico	Tirante idrico	Livello energetico	Froude	Velocità
-	<i>m</i>	<i>m s.l.m.</i>	<i>m s.l.m.</i>	<i>m</i>	<i>m s.l.m.</i>	-	<i>m/s</i>
1	0.00	12.8	14.30	1.50	14.59	0.62	2.40
2	10.47	12.77	14.27	1.50	14.56	0.62	2.40
3	24.13	12.74	14.23	1.49	14.53	0.62	2.41
4	29.77	12.73	14.21	1.48	14.51	0.63	2.41
5	35.29	12.71	14.20	1.49	14.49	0.62	2.40
6	44.14	12.69	14.17	1.48	14.47	0.63	2.41
7	56.95	12.66	14.14	1.48	14.43	0.65	2.41
8	81.05	12.6	14.07	1.47	14.36	0.89	2.41
9	106.05	12.53	14.00	1.47	14.29	0.63	2.40

SEZ	Progressiva	$z_f$	Livello idrico	Tirante idrico	Livello energetico	Froude	Velocità
-	<i>m</i>	<i>m s.l.m.</i>	<i>m s.l.m.</i>	<i>m</i>	<i>m s.l.m.</i>	-	<i>m/s</i>
10	131.05	12.47	13.92	1.45	14.22	0.63	2.41
11	156.05	12.41	13.85	1.44	14.15	0.64	2.43
12	181.05	12.35	13.77	1.42	14.07	0.8	2.45
13	206.05	12.28	13.69	1.41	14.00	0.91	2.45
14	219.41	12.25	13.65	1.40	13.96	0.66	2.47
15	231.88	12.22	13.60	1.38	13.92	0.67	2.49
16	242.89	12.19	13.57	1.38	13.88	0.68	2.50
17	249.01	12.18	13.54	1.36	13.87	0.69	2.53
18	252.99	12.17	13.53	1.36	13.85	0.69	2.54
19	257.50	12.16	13.51	1.35	13.84	0.70	2.55
20	263.72	12.14	13.49	1.35	13.82	0.70	2.56
21	265.42	12.14	13.48	1.34	13.81	0.71	2.58
22	268.95	12.13	13.46	1.33	13.81	0.73	2.64
23	275.11	12.11	13.41	1.30	13.79	0.76	2.72
24	309.48	12.03	13.32	1.29	13.71	0.77	2.75
25	316.48	12.01	13.27	1.26	13.68	0.80	2.82
26	328.92	11.98	13.21	1.23	13.64	0.83	2.90
27	333.57	11.97	13.18	1.21	13.62	0.85	2.94
28	342.75	11.94	13.13	1.19	13.59	0.87	3.00
29	356.07	11.91	13.05	1.14	13.55	0.93	3.13
30	370.28	11.87	12.96	1.09	13.51	3.13	3.27

ID	Progr.	Lungh.	Z scorrimento monte	Z scorrimento valle	Altezza tombino	Z intradosso monte	Z intradosso valle
-	-	<i>m</i>	<i>m s.l.m.</i>	<i>m s.l.m.</i>	<i>m</i>	<i>m s.l.m.</i>	<i>m s.l.m.</i>



ID	Progr.	Lungh.	Z scorrimento monte	Z scorrimento valle	Altezza tombino	Z intradosso monte	Z intradosso valle
IN18A	293.66	27.31	12.09	12.04	2	14.09	14.04

ID	Progr.	h	GR	Q	Franco sul livello idrico	Franco sul carico totale
-	-	m	%	m <sup>3</sup> /s	m	m
IN18A	293.66	1.29	64%	18.01	0.71	0.33

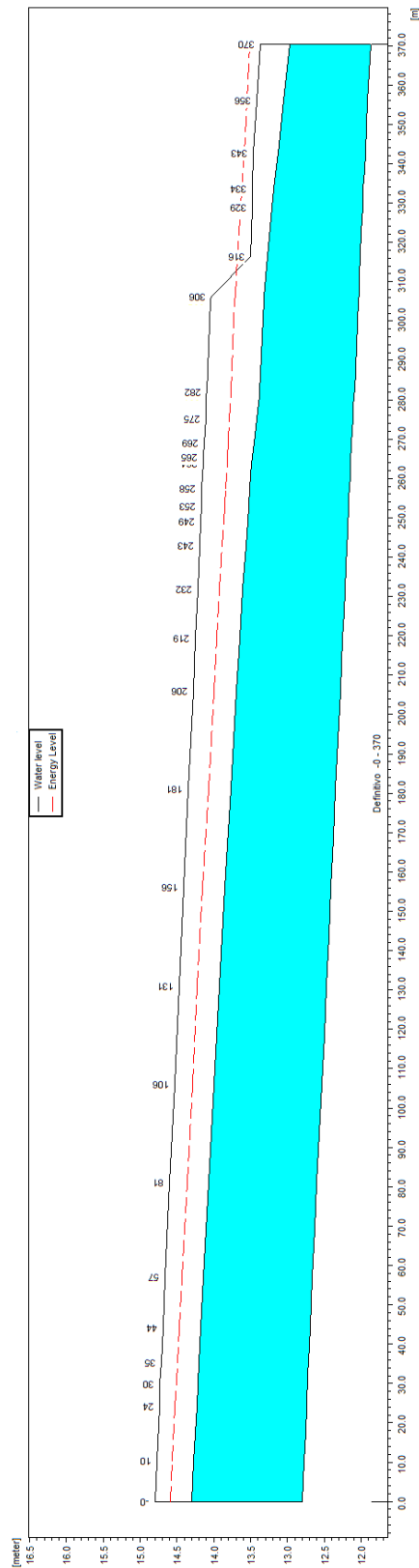


Figura 5. Profilo idraulico IN18

### Verifica del sovrizzo in curva

L'effetto di una curva su una corrente lenta è messo in evidenza dalla inclinazione che assume la sua superficie libera, con una sopraelevazione sulla sponda esterna ed una depressione su quella interna. Lo studio del fenomeno si può condurre in modo semplificato su una curva circolare a fondo piano e pareti verticali assumendo che le velocità dipendano dal raggio di curvatura  $r$ . Ogni elemento fluido è soggetto ad una forza centrifuga specifica orizzontale pari a  $v^2/r$ , oltre alla consueta forza specifica verticale  $g$  dovuta al geopotenziale. Il pelo libero deve perciò assumere una pendenza trasversale per disporsi perpendicolarmente al risultante di queste due forze.

L'innalzamento del pelo libero per correnti lente può essere stimato dalla formula di Grashof:

$$\Delta h = \frac{v^2 b}{g r_m}$$

dove:

- $v$  è la velocità e la corrente sulla curva di raggio  $r_m$

- $b$  è la larghezza del canale.

Per  $r_m/b > 1.5$  fornisce una valutazione soddisfacente del dislivello  $\Delta h$ .

La verifica è stata eseguita considerando le curve comprese tra le sezioni alle progressive 24.13-35.29 e 242.89-263.72, e una larghezza delle sezioni di 5 m. Nella tabella sottostante si può osservare come l'incremento stimato del pelo libero sia contenuto nelle sezioni di progetto.

SEZ	Progr.	$r_m$	$z_f$	L.I.	Froude	$v$	$\Delta h_{\text{sovrizzo}}$	Li+ $\Delta h$	$z_{\text{sponda}}$
-	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m s.l.m.</i>	-	<i>m/s</i>	<i>m</i>	<i>m s.l.m.</i>	<i>m s.l.m.</i>
<b>4</b>	29.77	15	12.73	14.21	0.64	2.42	0.20	14.41	14.74
<b>5</b>	35.29	15	12.71	14.20	0.63	2.41	0.20	14.40	14.73
<b>6</b>	44.14	15	12.69	14.17	0.63	2.41	0.20	14.37	14.71
<b>16</b>	242.89	10	12.19	13.57	0.70	2.55	0.33	13.90	14.19
<b>17</b>	249.01	10	12.18	13.54	0.71	2.57	0.34	13.88	14.18
<b>18</b>	252.99	10	12.17	13.53	0.72	2.59	0.34	13.87	14.17
<b>19</b>	257.50	10	12.16	13.51	0.73	2.60	0.35	13.86	14.16
<b>20</b>	263.72	10	12.14	13.49	0.74	2.61	0.35	13.84	14.14

Tabella 4 – Verifica del sovrizzo in curva per correnti lente

#### 5.6.4 Interferenza pk km1+160 -IN 09

##### Verifica post operam

La sistemazione idraulica del canale drenante all'interferenza IN09 prevede l'impiego di gabbioni metallici e la realizzazione di 4 tombini. L'analisi è stata svolta in regime di moto permanente considerando come portata di progetto la portata al colmo relativa al bacino 6.

Le opere di attraversamento presenti lungo il tratto d'asta in analisi, procedendo da monte verso valle, sono:

- Attraversamento stradale (NV07 – asse b) in progetto con tombino 3,00 x2,00 m;
- Attraversamento ferroviario in progetto con tombino 3,00 x2,00 m;
- Attraversamento ferroviario in progetto con tombino 3,00 x2,00 m;
- Attraversamento stradale (NV07 – asse c) in progetto con tombino 3,00 x2,00 m;

Nell'elaborato grafico RS3H02D78PZID0002008A è riportata la traccia planimetrica delle sezioni idrauliche considerate nella simulazione.

• n° sezioni	<b>23</b>
• n° manufatti	4
➤ Tipologia	Scatolare
➤ Dimensioni	3 x 2 m
• Condizioni al contorno	
➤ Monte	Idrogramma bac.4
➤ Valle	Free outflow
➤ Contributo puntuale	Idrogramma bac.5
• Coefficiente di scabrezza Manning	0.028

SEZ	Progr.	z <sub>r</sub>	Livello idrico	Tirante idrico	Livello energetico	Froude	Velocità
-	m	<i>m s.l.m.</i>	<i>m s.l.m.</i>	m	<i>m s.l.m.</i>	-	m/s
1	0.00	12.90	14.01	1.23	14.202	0.785	1.962
2	24.13	12.78	13.87	1.21	14.071	0.795	1.98
3	48.27	12.66	13.73	1.10	13.937	0.817	2.024
4	58.59	12.61	13.67	1.09	13.892	0.83	2.056
5	69.62	12.55	13.60	1.07	13.82	0.839	2.066
6	73.97	12.53	13.55	1.05	13.783	0.901	2.181
7	79.99	12.50	13.51	1.04	13.747	0.86	2.105
8	85.31	12.47	13.47	1.05	13.712	0.868	2.119

SEZ	Progr	z <sub>f</sub>	Livello idrico	Tirante idrico	Livello energetico	Froude	Velocità
-	m	<i>m s.l.m.</i>	<i>m s.l.m.</i>	m	<i>m s.l.m.</i>	-	m/s
9	95.52	12.42	13.40	1.01	13.652	0.892	2.166
10	97.51	12.39	13.38	1.04	13.611	0.869	2.116
11	115.31	12.32	13.29	1.00	13.556	0.932	2.24
12	121.87	12.29	13.24	0.97	13.509	1.049	2.46
13	126.66	12.27	13.20	1.08	13.488	0.991	2.348
14	156.46	12.12	13.12	1.05	13.359	0.927	2.229
15	165.52	12.07	13.05	1.00	13.299	0.931	2.225
16	170.59	12.05	13.01	0.99	13.27	0.946	2.265
17	176.92	12.02	12.96	0.96	13.23	1.004	2.35
18	180.46	12.00	12.92	1.09	13.205	1.006	2.348
19	215.52	11.83	12.73	1.02	13.026	1.245	2.758
20	237.38	11.71	12.49	1.09	12.942	1.623	3.383
21	244.68	11.40	12.32	0.96	12.605	0.991	2.439
22	263.12	11.27	12.29	1.19	12.456	1.048	2.45
23	289.70	11.10	11.88	11.88	12.4	1.05	2.46

ID	Progr.	Lungh.	Z scorr monte	Z scorr valle	h <sub>tombino</sub>	Z intradosso monte	Z intradosso valle
-	-	<i>m</i>	<i>m s.l.m.</i>	<i>m s.l.m.</i>	<i>m</i>	<i>m s.l.m.</i>	<i>m s.l.m.</i>
IN09	106.28	14.3	12.39	12.34	2	14.39	14.34
	141.75	27.17	12.27	12.12	2	14.27	14.12
	197.925	32.97	12.00	11.83	2	14.00	13.83
	253.28	7.2	11.4	11.36	2	13.4	13.36

ID	Progr.	h	GR	Q	Franco sul livello idrico	Franco sul carico totale
-	-	m	%	m <sup>3</sup> /s	m	m
IN09	106.28	1.04	52%	6.51	0.96	0.78
	141.75	1.08	54%	6.51	0.92	0.78
	197.925	1.09	55%	6.51	0.91	0.79
	253.88	0.96	48%	6.51	1.04	0.79

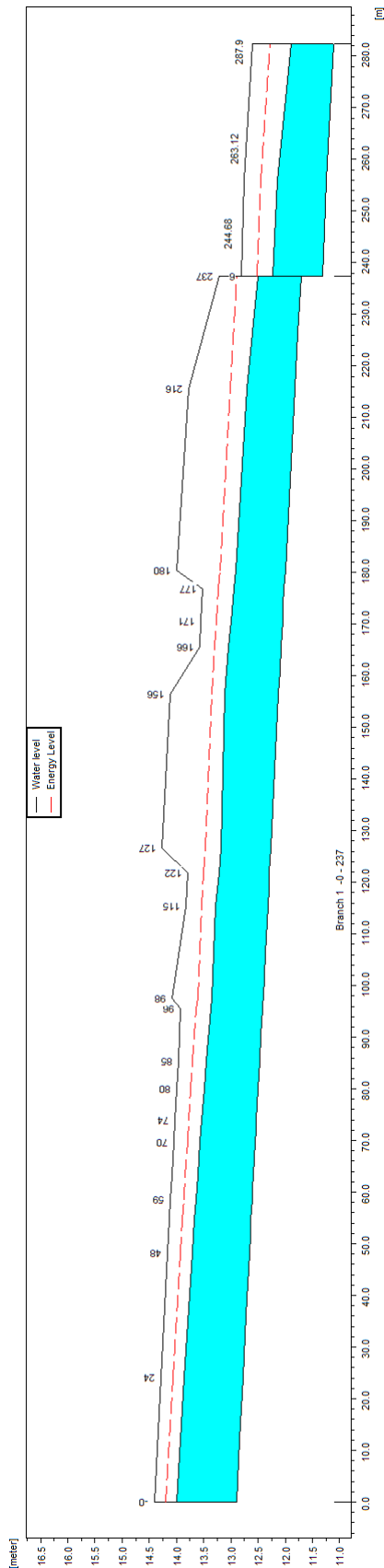


Figura 6. Profilo idraulico IN09

### 5.6.5 Interferenza pk km 1+190 - IN 08

#### Verifica post operam

L'analisi post operam è stata eseguita in regime di moto permanente impostando una pendenza del fondo canale pari a 0.004 m/m per il "ramo sud" e 0.009 m/m per il "ramo nord", utilizzando sezioni trapezoidali rivestite in massi naturali con pendenza delle scarpate 1:1.

Le opere di attraversamento presenti lungo il tratto d'asta in analisi, procedendo da monte verso valle, sono:

- Attraversamento ferroviario in progetto con tombino 2,00x2,00 m;
- Attraversamento stradale (NV06) in progetto con tombino 2,00x2,00 m.

Nell'elaborato grafico RS3H02D78PZID0002007A è riportata la traccia planimetrica delle sezioni idrauliche considerate nella simulazione.

• n° sezioni	<b>29</b>
• n° manufatti	2
➤ Tipologia	Scatolari
➤ Dimensioni	2 x 2
• Condizioni al contorno	
➤ Monte ramo sud	Q = 0.43 m <sup>3</sup> /s
➤ Monte ramo nord	Q = 2.63 m <sup>3</sup> /s
➤ Valle	Free outflow
• Coefficiente di scabrezza Manning	0.035

Ramo	SEZ	Progr.	z <sub>f</sub>	Livello idrico	Tirante idrico	Livello energetico	Froude	Velocità
-	-	m	m s.l.m.	m s.l.m.	m	m s.l.m.	-	m/s
Ramo SUD	1	6.1	14.74	14.98	0.24	15.11	1.19	1.64
Ramo SUD	2	10.4	14.58	14.86	0.28	15.02	1.23	1.85
Ramo SUD	3	17.3	14.31	14.69	0.38	14.72	0.57	0.98
Ramo SUD	4	22.2	14.29	14.67	0.38	14.70	0.62	1.04
Ramo SUD	5	25.3	14.28	14.66	0.38	14.69	0.68	1.11
Ramo SUD	6	30.1	14.26	14.65	0.39	14.68	0.83	1.29
Ramo SUD	7	35.1	14.23	14.65	0.42	14.66	0.58	0.85
Ramo SUD	8	65.8	14.12	14.65	0.53	14.65	0.40	0.65
Ramo SUD	9	71.7	14.09	14.64	0.55	14.65	0.81	1.25



**RELAZIONE IDRAULICA – OPERE MINORI**

PROGETTO	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3H	02	D.78.RI	ID.00.02.001	A	40 di 80

Ramo	Sez.	Progr.	Z <sub>f</sub>	Livello idrico	Tirante idrico	Livello energetico	Froude	Velocità
-	-	m	<i>m s.l.m.</i>	<i>m s.l.m.</i>	m	<i>m s.l.m.</i>	-	m/s
Ramo SUD	10	78.7	14.06	14.64	0.58	14.64	0.54	0.79
Ramo SUD	11	99.0	14.00	14.64	0.64	14.63	0.53	0.77
Ramo SUD	12	104.8	13.96	14.63	0.67	14.63	0.10	0.24
Ramo SUD	13	119.6	13.90	14.63	0.73	14.63	0.36	0.22
Ramo SUD	14	126.5	13.87	14.63	0.76	14.63	0.56	0.21
Ramo SUD	15	139.8	13.82	14.57	0.75	14.68	0.97	1.50
Ramo SUD	17	155.4	13.76	14.49	0.73	14.60	0.60	1.54
Ramo SUD	18	171.0	13.70	14.39	0.69	14.53	0.66	1.64
Ramo SUD	19	186.6	13.63	14.27	0.64	14.43	0.75	1.80
Ramo SUD	20	202.2	13.47	14.13	0.66	14.34	0.94	2.03
Ramo NORD	1	100.0	15.78	16.35	0.57	16.51	0.79	1.79
Ramo NORD	2	119.3	15.60	16.18	0.58	16.33	0.78	1.77
Ramo NORD	3	127.8	15.52	16.10	0.58	16.25	0.77	1.76
Ramo NORD	4	152.8	15.30	15.88	0.58	16.03	0.78	1.78
Ramo NORD	5	177.8	15.07	15.65	0.58	15.80	0.77	1.76
Ramo NORD	6	202.8	14.85	15.42	0.57	15.58	0.79	1.79
Ramo NORD	7	227.8	14.62	15.20	0.58	15.35	0.77	1.76
Ramo NORD	8	252.8	14.40	14.98	0.58	15.13	0.83	1.82
Ramo NORD	9	277.9	14.17	14.78	0.61	14.91	0.86	1.93
Ramo NORD	10	301.8	13.96	14.63	0.67	14.99	0.87	1.94

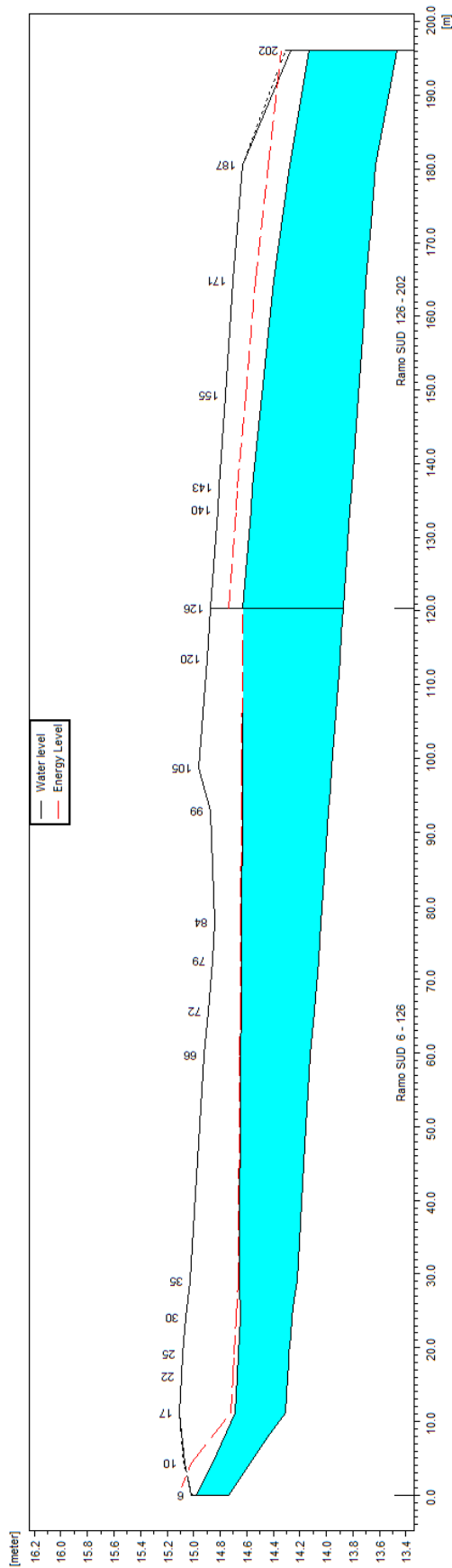
ID	Progr.	Lungh.	Z scorrimento monte	Z scorrimento valle	Altezza tombino	Z intradosso monte	Z intradosso valle
-	-	<i>m</i>	<i>m s.l.m.</i>	<i>m s.l.m.</i>	<i>m</i>	<i>m s.l.m.</i>	<i>m s.l.m.</i>
IN08 (ferroviario)	51.165	28.65	14.23	14.12	2	16.22	16.1

**RELAZIONE IDRAULICA – OPERE MINORI**

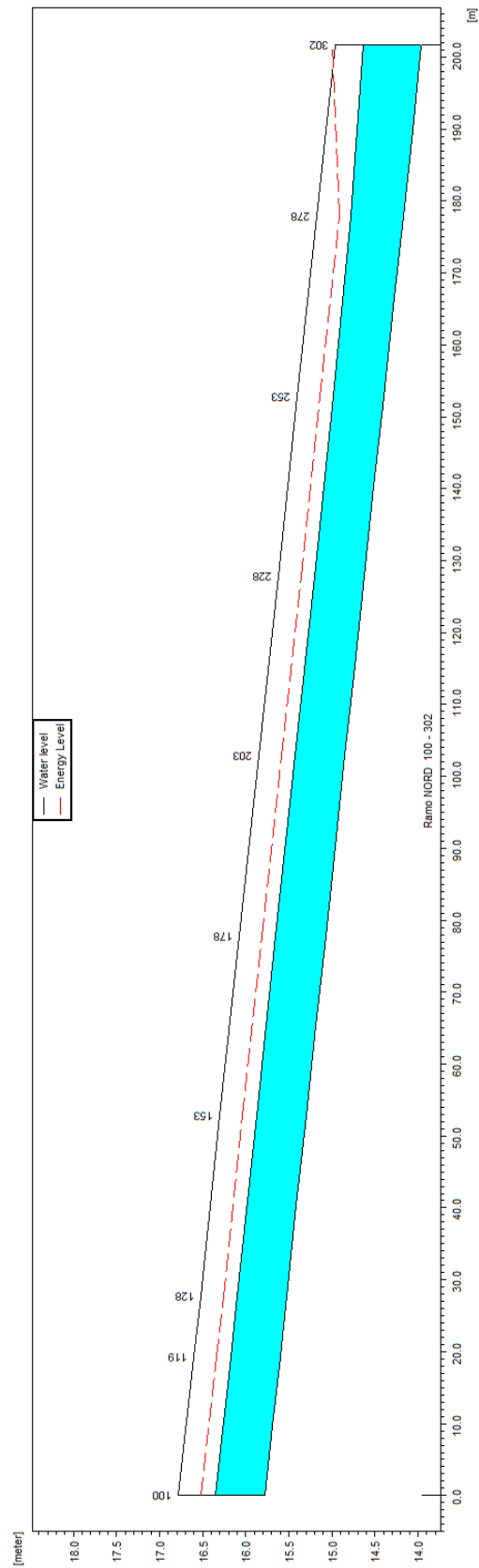
PROGETTO	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3H	02	D.78.RI	ID.00.02.001	A	41 di 80

ID	Progr.	Lungh.	Z scorrimento monte	Z scorrimento valle	Altezza tombino	Z intradosso monte	Z intradosso valle
-	-	<i>m</i>	<i>m s.l.m.</i>	<i>m s.l.m.</i>	<i>m</i>	<i>m s.l.m.</i>	<i>m s.l.m.</i>
IN08 (NV06)	87.83	13.00	14.05	14.00	2	16.06	16.0

ID	Progr.	h	GR	Q	Franco sul livello idrico	Franco sul carico totale
-	-	m	%	m <sup>3</sup> /s	m	m
IN08 (ferroviario)	51.165	0.53	26.3%	2.63	1.58	1.57
IN08 (NV06)	87.83	0.63	31.8%	2.63	1.36	1.36



a)



b)

Figura 7. Profili idraulici IN08: a) Ramo Sud b) Ramo Nord

### 5.6.6 Interferenze pk 2+940,00 IN16, pk km 3+010 - IN17- NI13 – NI09

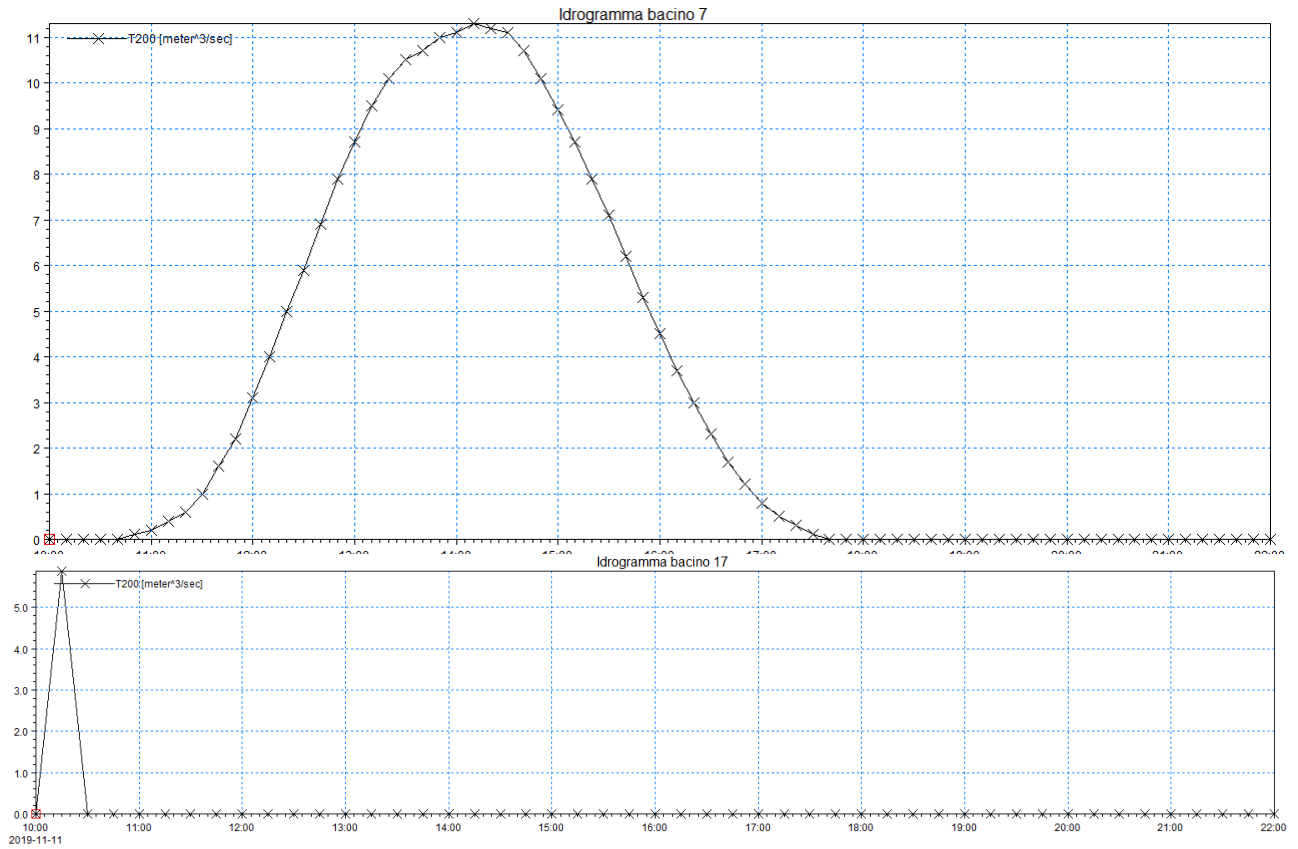
#### Verifica ante operam

L'attraversamento attualmente presente sulla linea storica è costituito da un ponte di luce 17,00 m con intradosso alla quota 9.58 m s.l.m. Il fondo alveo presenta una pendenza di 0.01 m. Nel modello geometrico è stato implementato un solo river con sezioni a monte della struttura sufficientemente larghe da rappresentare entrambi i canali confluenti nel ponte stesso.

La verifica svolta in moto vario evidenzia l'efficienza di tale opera nello smaltire i contributi dei bacini 7 e 8 con franchi inferiori a quelli prevista da norma.

Nell'elaborato grafico RS3H02D78PZID0002009A è riportata la traccia planimetrica delle sezioni idrauliche considerate nella simulazione.

• n° sezioni	<b>12</b>
• n° manufatti	1
➤ Tipologia	Viadotto
• Condizioni al contorno	
➤ Monte Vallone	Idrogramma bac 7
➤ Cardinale	Idrogramma bac 8
➤ Monte ramo sud	Free outflow
➤ Valle	
• Coefficiente di scabrezza Manning	0.045



Ramo	SEZ	Progr.	Thalweg	Livello idrico	Tirante idrico	Livello energetico	Froude	Velocità
-	-	<i>m</i>	<i>m s.l.m.</i>	<i>m s.l.m.</i>	<i>m</i>	<i>m s.l.m.</i>	-	<i>m/s</i>
<b>Ramo sud</b>	1	318.7	7.48	8.70	1.23	8.71	0.20	0.53
<b>Ramo sud</b>	2	344.6	7.19	8.72	1.53	8.75	0.30	0.92
<b>Ramo sud</b>	3	350.6	7.19	8.76	1.57	8.78	0.34	1.05
<b>Ramo sud</b>	4	353.5	7.27	8.77	1.50	8.82	0.71	1.84
<b>Ramo sud</b>	5	359.2	7.51	8.64	1.13	8.86	0.97	2.42
<b>Ramo sud</b>	6	393.2	7.08	8.34	1.27	8.58	0.75	2.17
<b>Ramo sud</b>	7	401.3	7.11	8.28	1.18	8.54	0.78	2.30
<b>Ramo sud</b>	8	416.7	6.88	8.21	1.32	8.42	0.66	2.06
<b>Ramo sud</b>	9	423.0	7.07	8.15	1.08	8.44	0.83	2.43
<b>Ramo sud</b>	10	439.3	6.79	8.03	1.24	8.31	0.80	2.42
<b>Ramo sud</b>	11	453.7	6.88	7.93	1.04	8.50	1.20	3.41
<b>Ramo sud</b>	12	469.8	6.76	7.68	0.92	8.21	1.22	3.33

**RELAZIONE IDRAULICA – OPERE MINORI**

PROGETTO	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3H	02	D.78.RI	ID.00.02.001	A	46 di 80

ID	Progr.	Lungh.	Z scorrimento monte	Z scorrimento valle	Altezza	Z intradosso monte	Z intradosso valle
-	-	<i>m</i>	<i>m s.l.m.</i>	<i>m s.l.m.</i>	<i>m</i>	<i>m s.l.m.</i>	<i>m s.l.m.</i>
	347.56	5	7.132	7.168	2.5	9.58	9.58

ID	Progr.	h	GR	Q	Franco sul livello idrico	Franco sul carico totale
-	-	<i>m</i>	%	<i>m<sup>3</sup>/s</i>	<i>m</i>	<i>m</i>
	347.56	1.57	-	11.3	0.82	0.80

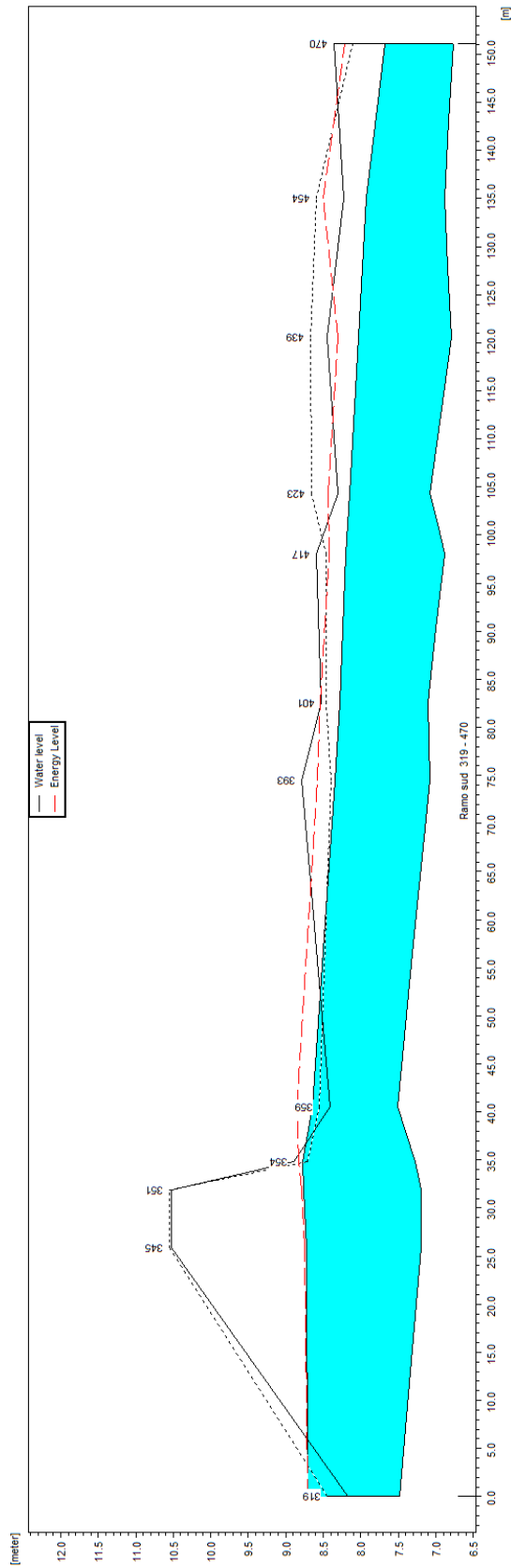


Figura 8. Profilo idraulico IN17 Ante operam

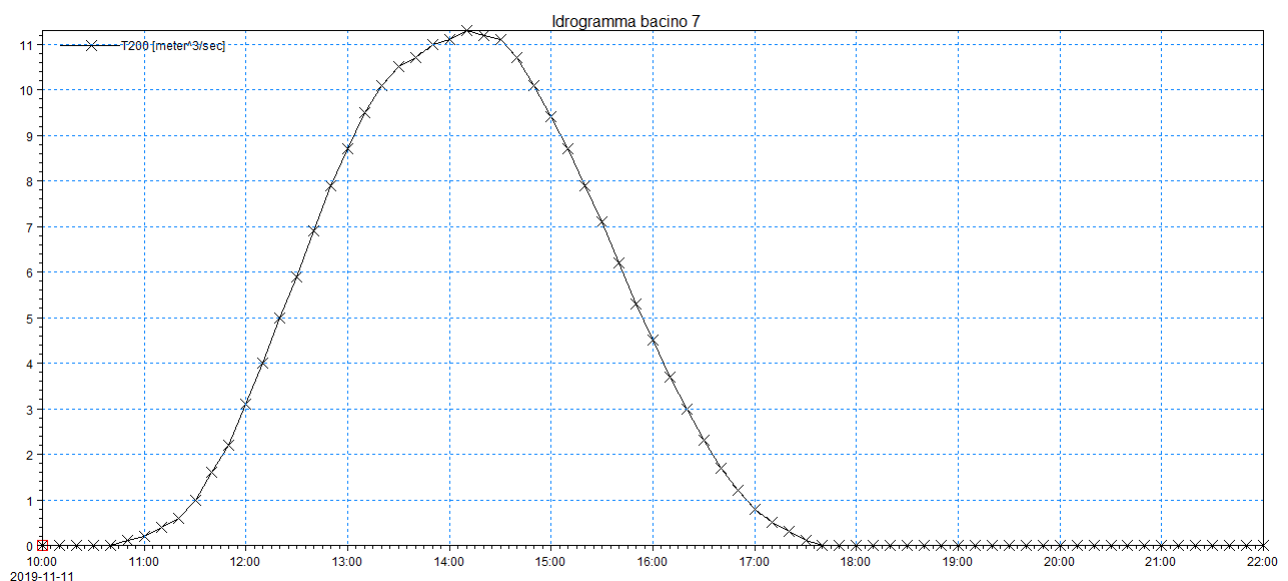


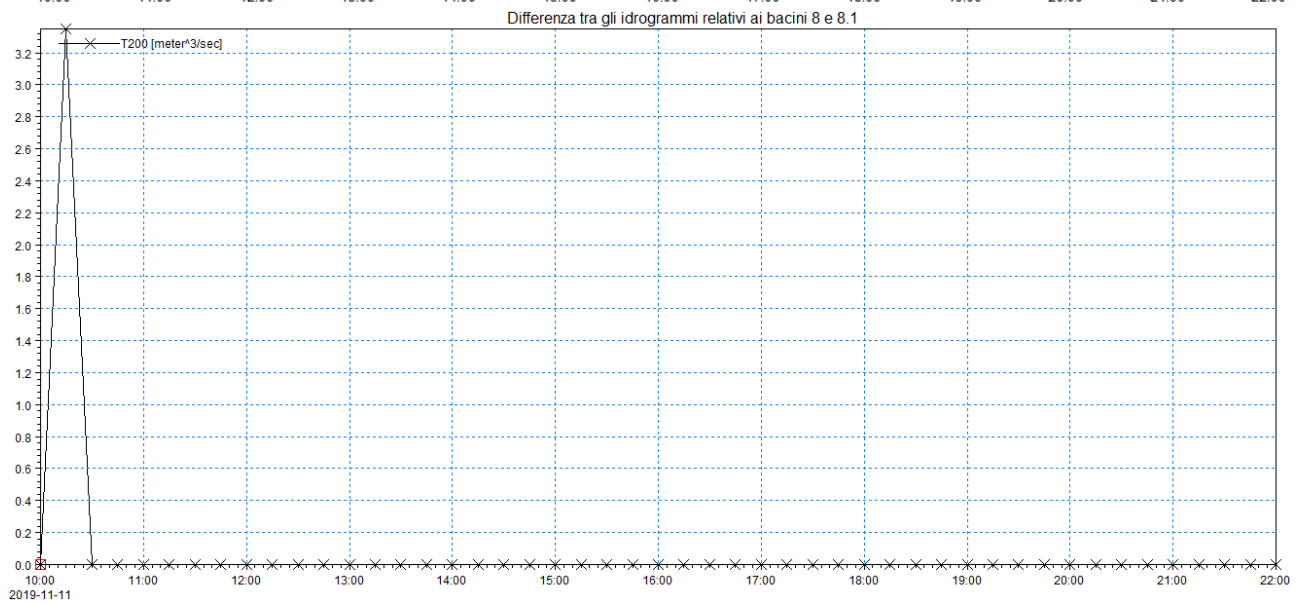
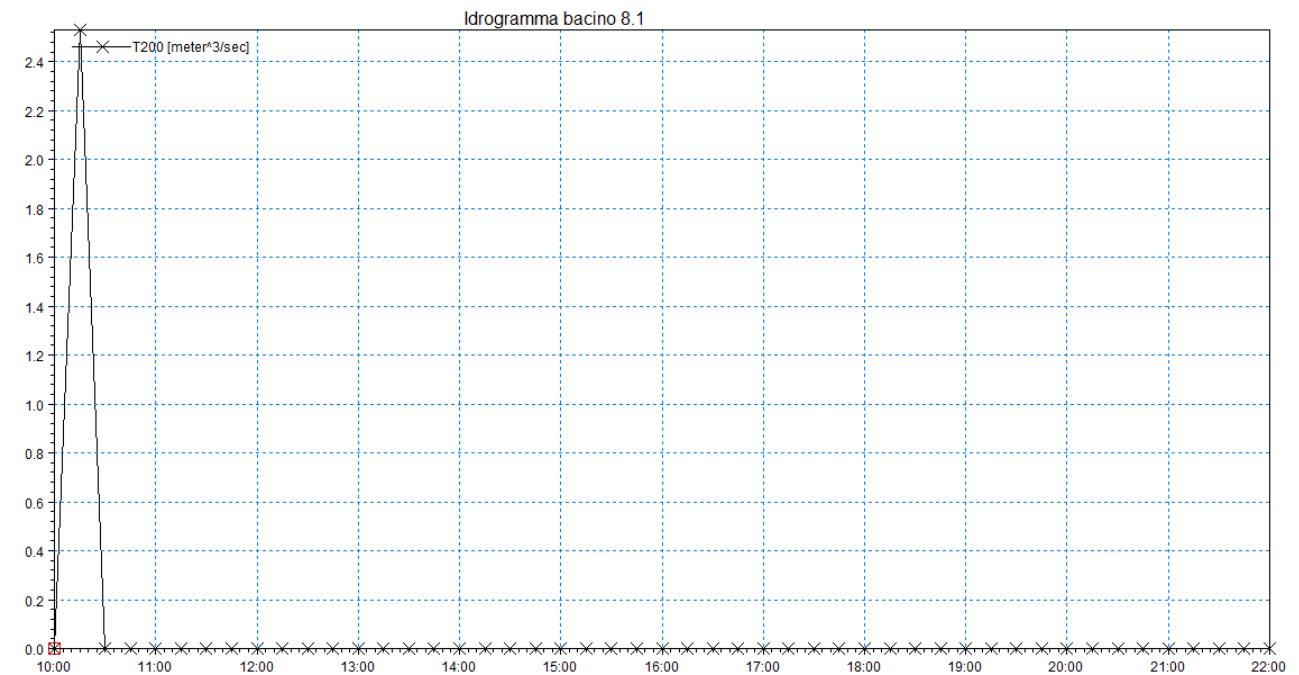
### Verifica post operam

La configurazione post operam della rete idraulica prevede la deviazione del “Vallone cardinale” all’interferenza IN 16, realizzata su viadotto VI02 e NW01, e la sistemazione del canale di bonifica comprensiva della messa in opera di 3 attraversamenti, due dei quali (IN17 e NI09) dimensionati per garantire la trasparenza idraulica delle acque provenienti dall’esondazione del fiume Simeto. Le sezioni trasversali, di forma trapezoidale con pendenza delle scarpate 1:1, hanno un rivestimento in massi naturali.

Nell’elaborato grafico RS3H02D78P7ID0002005A è riportata la traccia planimetrica delle sezioni idrauliche considerate nella simulazione.

• n° sezioni	<b>41</b>
• n° manufatti	5
<b>VI02 (Viadotto ferroviario)</b>	L=20.50 m (L <sub>NETTA</sub> =18.60m)
<b>NW01 (Viadotto stradale)</b>	L=20.50 m (L <sub>NETTA</sub> =17.10m)
<b>IN17</b>	5 x 3
<b>NI09</b>	5 x 3
<b>NI13</b>	4 x 2
• <b>Condizioni al contorno</b>	
➤ <b>Monte Vallone Cardinale</b>	Idrogramma bac 7
➤ <b>Monte ramo sud</b>	Idrogramma bac 8.1
➤ <b>Apporto distribuito ramo sud</b>	$Q = Q_{b8} - Q_{b8.1}$
➤ <b>Valle</b>	Free outflow
• <b>Coefficiente di scabrezza Manning</b>	0.035



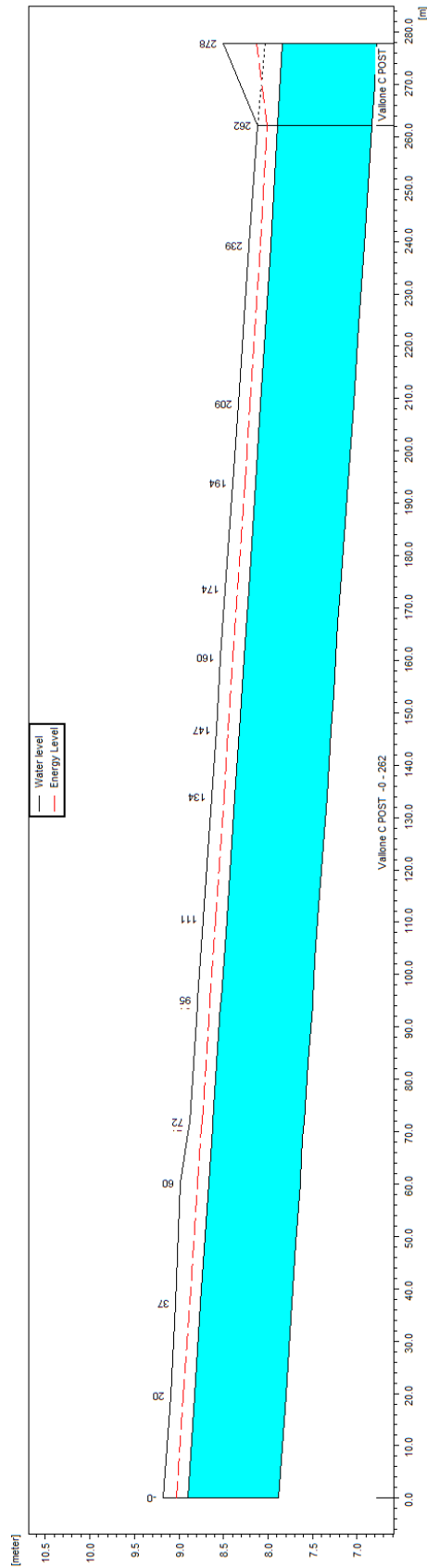


Ramo	SEZ	Progr.	z <sub>f</sub>	Livello idrico	Tirante idrico	Livello energetico	Froude	Velocità
-	-	m	m s.l.m.	m s.l.m.	m	m s.l.m.	-	m/s
Vallone C POST	1	0.00	7.88	8.90	1.02	9.03	0.56	1.57
Vallone C POST	2	19.56	7.80	8.83	1.03	8.95	0.56	1.57
Vallone C POST	3	37.24	7.73	8.76	1.03	8.88	0.56	1.57
Vallone C POST	4	60.15	7.64	8.66	1.02	8.79	0.56	1.57
Vallone C POST	5	70.92	7.60	8.62	1.02	8.75	0.56	1.58
Vallone C POST	6	71.92	7.59	8.62	1.03	8.74	0.55	1.56
Vallone C POST	7	94.21	7.50	8.53	1.03	8.65	0.55	1.56
Vallone C POST	8	95.21	7.50	8.52	1.02	8.65	0.56	1.57
Vallone C POST	9	110.53	7.44	8.46	1.02	8.59	0.56	1.57
Vallone C POST	10	133.99	7.34	8.37	1.03	8.49	0.55	1.55
Vallone C POST	11	146.71	7.29	8.32	1.03	8.45	0.55	1.55
Vallone C POST	12	160.48	7.24	8.27	1.03	8.39	0.55	1.56
Vallone C POST	13	173.56	7.19	8.22	1.03	8.34	0.56	1.57
Vallone C POST	14	193.94	7.10	8.14	1.04	8.26	0.55	1.54
Vallone C POST	15	209.02	7.04	8.08	1.04	8.20	0.54	1.54
Vallone C POST	16	239.14	6.92	7.97	1.05	8.09	0.53	1.52
Vallone C POST	17	262.17	6.83	7.89	1.06	8.01	0.53	1.51
Vallone C POST	18	277.89	6.78	7.83	1.06	8.13	3.50	3.07
Ramo SUD	1	0.00	8.51	8.96	0.45	9.01	0.50	0.97
Ramo SUD	2	21.99	8.42	8.88	0.46	8.93	0.51	0.95
Ramo SUD	3	46.69	8.33	8.79	0.46	8.84	0.50	0.96
Ramo SUD	4	55.68	8.29	8.76	0.47	8.81	0.48	0.93
Ramo SUD	5	72.80	8.22	8.71	0.49	8.75	0.48	0.90
Ramo SUD	6	80.99	8.19	8.68	0.49	8.73	0.58	0.89

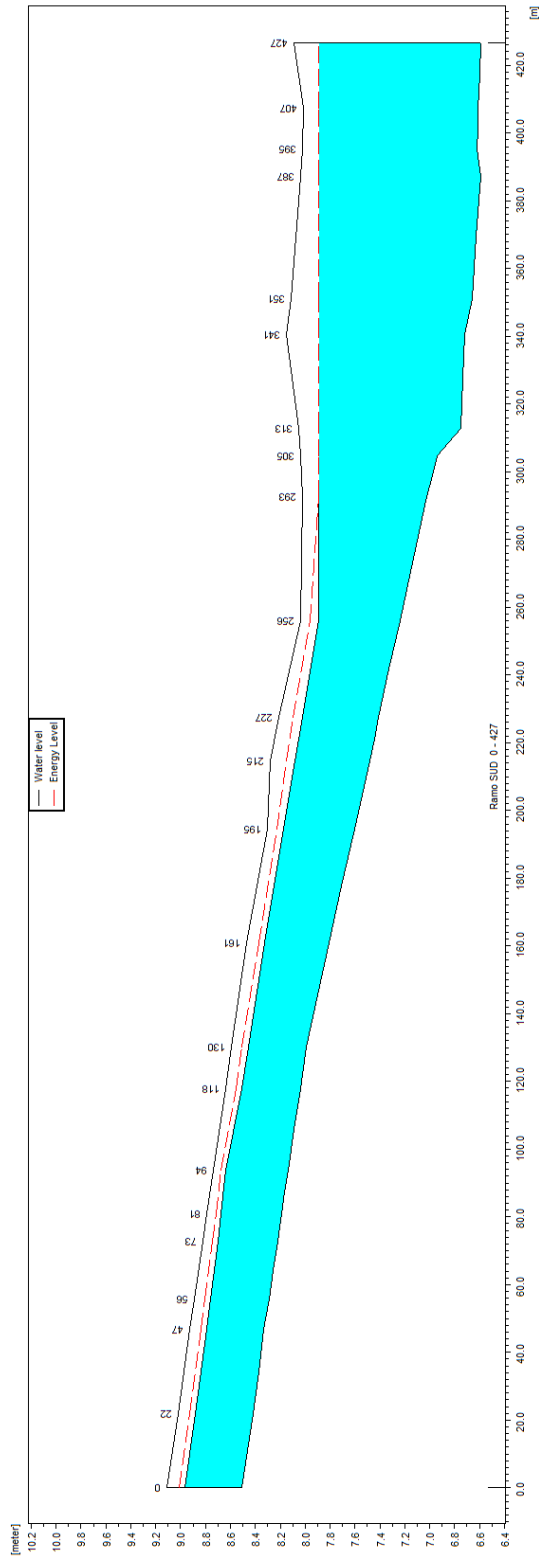
Ramo	Sez	Progr.	zf	Livello idrico	Tirante idrico	Livello energetico	Froude	Velocità
-	-	m	m	m s.l.m.	m	m s.l.m.	-	m/s
Ramo SUD	7	93.84	8.14	8.65	0.51	8.69	0.45	0.86
Ramo SUD	8	117.75	8.04	8.51	0.47	8.55	0.48	0.95
Ramo SUD	9	130.16	7.99	8.46	0.47	8.51	0.50	0.99
Ramo SUD	10	161.05	7.81	8.32	0.51	8.37	0.49	1.00
Ramo SUD	11	194.62	7.60	8.18	0.58	8.23	0.49	1.02
Ramo SUD	12	214.64	7.48	8.08	0.60	8.15	0.51	1.13
Ramo SUD	13	227.41	7.41	8.02	0.61	8.10	0.54	1.21
Ramo SUD	14	255.95	7.24	7.89	0.65	7.96	0.53	1.21
Ramo SUD	15	292.75	7.02	7.89	0.87	7.89	0.56	1.25
Ramo SUD	16	304.68	6.94	7.89	0.95	7.89	0.58	1.26
Ramo SUD	17	312.71	6.89	7.89	1.00	7.89	0.62	1.25
Ramo SUD	18	340.52	6.73	7.89	1.16	7.89	0.47	1.08
Ramo SUD	19	351.25	6.71	7.89	1.18	7.89	0.47	1.01
Ramo SUD	20	387.19	6.65	7.89	1.24	7.89	0.50	0.96
Ramo SUD	21	395.19	6.62	7.89	1.27	7.89	0.52	0.94
Ramo SUD	22	407.36	6.61	7.89	1.28	7.89	0.36	0.95
Ramo SUD	23	426.73	6.59	7.89	1.30	7.89	0.37	0.96

ID	Ramo	Progr.	Lungh.	Z scorrimento monte	Z scorrimento valle	h tombino	Z intradosso monte	Z intradosso valle
-	-	-	m	m s.l.m.	m s.l.m.	m	m s.l.m.	m s.l.m.
NI13	Sud	105.79	21.9	8.145	8.04	2.00	10.15	10.04
IN17	Sud	327.59	27.51	6.9	6.72	3.00	9.9	9.72
NI09	Sud	369.51	31.72	6.7	6.65	3.00	9.7	9.65
VI02	VC Post	83.42	13.4	7.59	7.50	-	11.43	11.43
<b>NW01</b>	VC Post	120.88	13.4	7.44	7.34	-	11.17	11.17

ID	Ramo	Progr.	h	GR	Q	L.I.	L.E:	Franco sul livello idrico	Franco sul carico totale
-		-	<i>m</i>	%	<i>m<sup>3</sup>/s</i>	<i>m slm</i>	<i>m slm</i>	<i>m</i>	<i>m</i>
NI13	Sud	105.79	0.51	25.5%	2.45	-	-	1.50	1.46
IN17	Sud	327.11	1.16	38.7%	5.8	-	-	1.84	1.84
NI09	Sud	371.13	1.24	41.3%	5.8	-	-	1.76	1.76
VI02	VC Post	83.42	1.03	-	11.3	8.57	8.70	2.86	2.73
<b>NW01</b>	VC Post	120.88	1.03	-	11.3	8.40	8.52	2.77	3.65



a)



b)

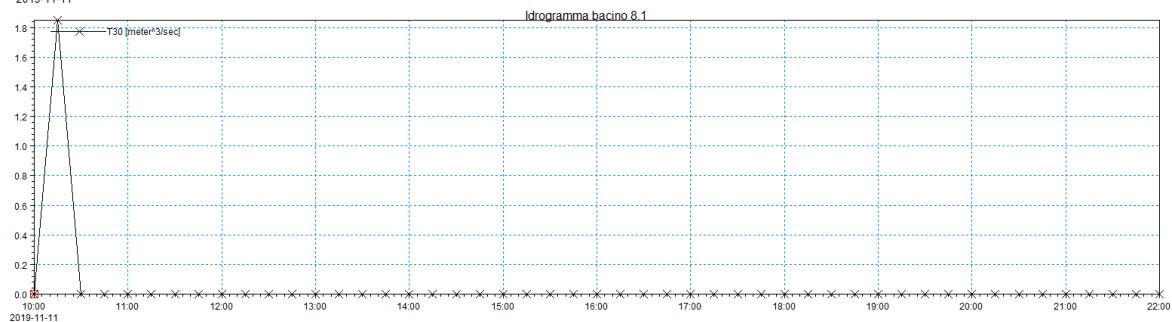
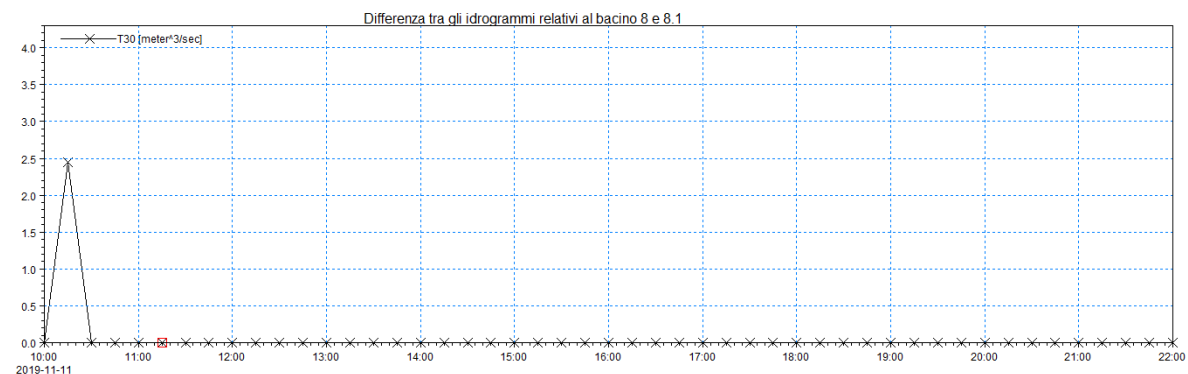
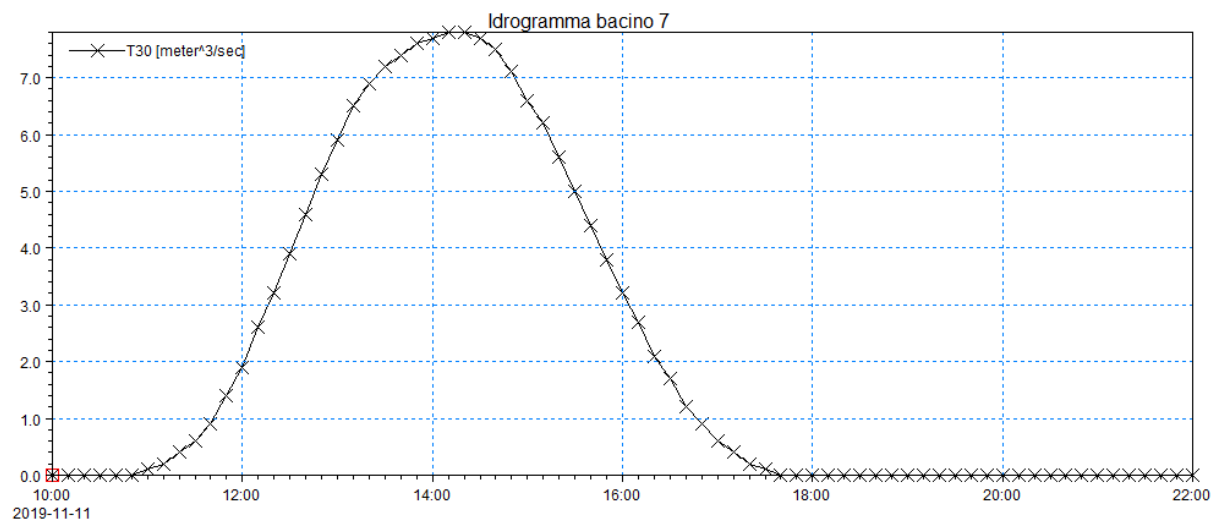
Figura 9. Profili idraulici IN 16-17 post operam: a) Vallone C Post b) Ramo Sud

## Verifica nella fase transitoria

E' stata eseguita una terza simulazione relativa alla rete idraulica IN16-17-NI09-NI13, per studiare la condizione dei deflussi nella fase transitoria corrispondente alla configurazione con:

- sistemazione idraulica del ramo sud effettuata
- realizzazione di IN17-NI08-NI12
- deviazione temporanea del Vallone cardinale nel tombino di nuova realizzazione IN 17

La verifica, svolta in moto vario, garantisce la capacità delle opere IN 17 e NI09 di smaltire gli idrogrammi di piena associati a un tempo di ritorno di 30 anni relativi ai bacini 7 e 8.





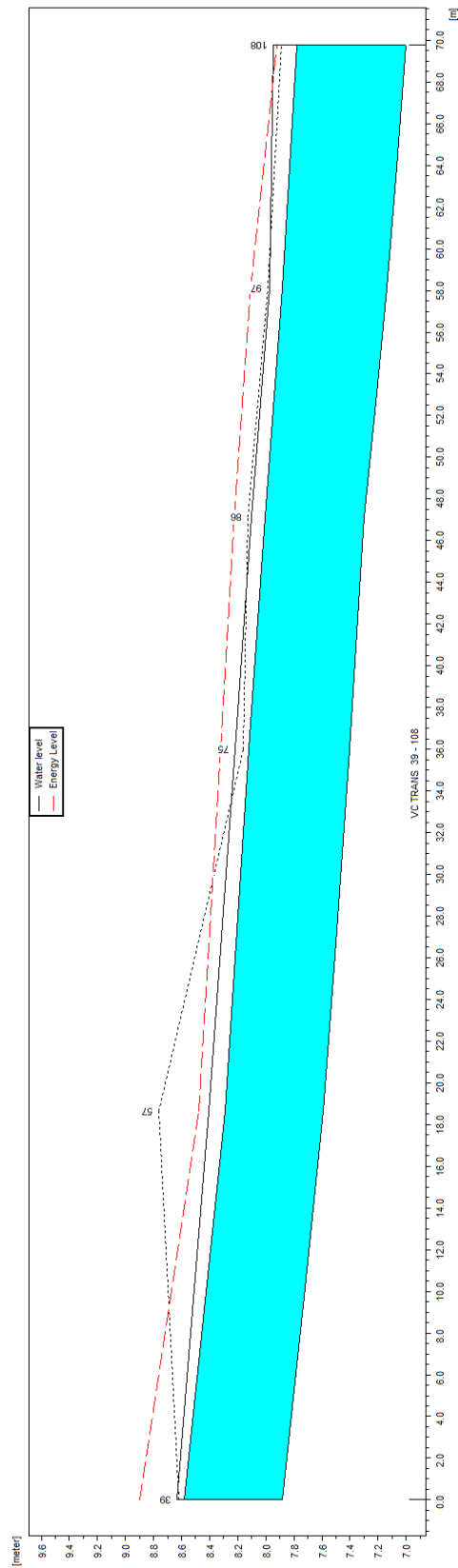
• n° sezioni	<b>31</b>
• n° manufatti	<b>3</b>
➤ Tipologia	Scatolari
➤ Dimensioni	
<b>IN17</b>	5 x 3
<b>NI09</b>	5 x 3
<b>NI13</b>	4 x 2
• Condizioni al contorno	
➤ Monte Vallone Cardinale	Idrogramma bac 7 Tr=30
➤ Monte ramo sud	Idrogramma bac 8.1 Tr=30
➤ Apporto distribuito ramo sud	$\Delta Q$ b8-b8.1 Tr=30
➤ Valle	Free outflow
• Coefficiente di scabrezza Manning	0.035 (ramo sud)

Ramo	SEZ	Progr.	z <sub>f</sub>	Livello idrico	Tirante idrico	Livello energetico	Froude	Velocità
-	-	m	m s.l.m.	m s.l.m.	m	m s.l.m.	-	m/s
Ramo SUD	1	0.00	8.51	8.89	0.38	8.92	0.48	0.87
Ramo SUD	2	21.99	8.42	8.80	0.38	8.84	0.47	0.85
Ramo SUD	3	46.69	8.33	8.71	0.38	8.75	0.49	0.87
Ramo SUD	4	55.68	8.29	8.68	0.39	8.71	0.47	0.85
Ramo SUD	5	72.80	8.22	8.62	0.40	8.65	0.49	0.83
Ramo SUD	6	80.99	8.19	8.59	0.40	8.62	0.457	0.82
Ramo SUD	7	93.84	8.14	8.55	0.41	8.58	0.45	0.79
Ramo SUD	8	117.75	8.04	8.45	0.41	8.49	0.44	0.78
Ramo SUD	9	130.16	7.99	8.42	0.43	8.45	0.45	0.83
Ramo SUD	10	161.05	7.81	8.30	0.49	8.34	0.45	0.87
Ramo SUD	11	194.62	7.60	8.17	0.57	8.22	0.46	0.93
Ramo SUD	12	214.64	7.48	8.09	0.61	8.14	0.48	1.06
Ramo SUD	13	227.41	7.41	8.03	0.62	8.10	0.51	1.15
Ramo SUD	14	255.95	7.24	7.90	0.66	7.97	0.51	1.19
Ramo SUD	15	292.75	7.02	7.80	0.78	7.80	0.55	1.28
Ramo SUD	16	304.68	6.94	7.80	0.86	7.80	0.58	1.34

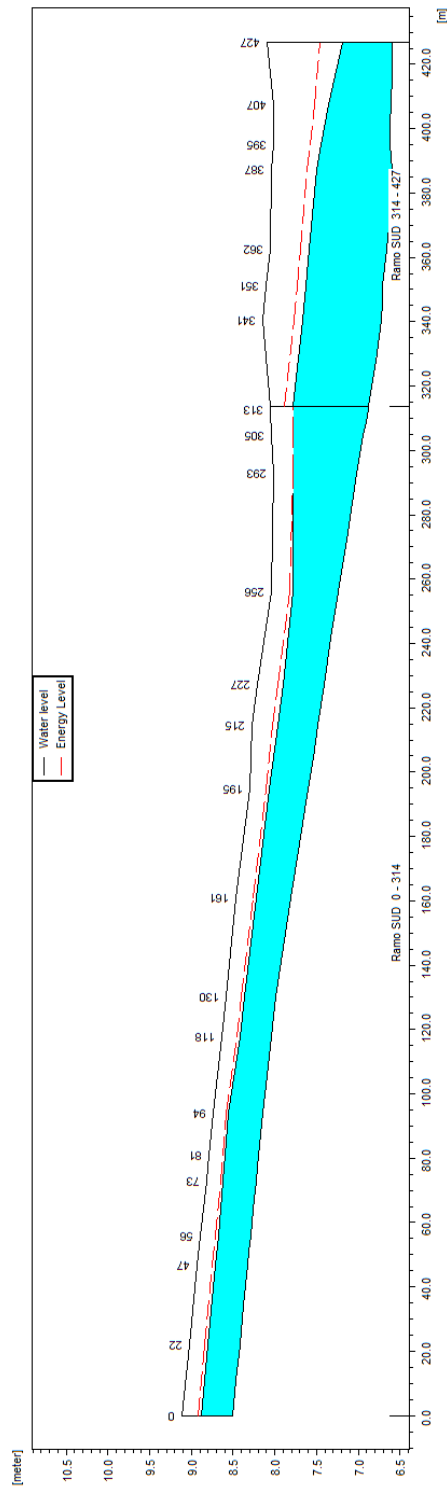
Ramo	Sez	Progr.	zf	Livello idrico	Tirante idrico	Livello energetico	Froude	Velocità
-	-	m	m s.l.m.	m s.l.m.	m	m s.l.m.	-	m/s
Ramo SUD	17	312.71	6.89	7.80	0.91	7.80	0.69	1.45
Ramo SUD	19	340.52	6.73	7.69	0.96	7.79	0.57	1.46
Ramo SUD	20	351.25	6.71	7.65	0.94	7.75	0.52	1.39
Ramo SUD	21	387.19	6.65	7.53	0.88	7.65	0.57	1.50
Ramo SUD	22	395.19	6.62	7.45	0.83	7.58	0.63	1.62
Ramo SUD	23	407.36	6.61	7.35	0.74	7.52	0.75	1.84
Ramo SUD	24	426.73	6.59	7.19	0.60	7.46	1.37	2.31
Vall.Card TRANS	1	38.65	7.88	8.58	0.70	8.90	1.04	2.52
Vall.Card TRANS	2	57.29	7.59	8.29	0.70	8.48	0.79	1.91
Vall.Card TRANS	3	74.65	7.40	8.13	0.73	8.32	0.82	1.97
Vall.Card TRANS	4	85.80	7.30	8.01	0.71	8.23	0.92	2.07
Vall.Card TRANS	5	96.75	7.14	7.89	0.75	8.11	1.00	2.08
Vall.Card TRANS	6	108.44	7.00	7.80	0.80	7.93	0.99	1.81

ID	Progr.	Lungh	Z scorrimento monte	Z scorrimento valle	h tombino	Z intradosso monte	Z intradosso valle
-	-	m	m s.l.m.	m s.l.m.	m	m s.l.m.	m s.l.m.
NI13	105.79	21.9	8.14	8.04	2	10.04	9.99
IN17	327.59	27.51	6.9	6.75	3	9.94	9.89
NI09	369.51	31.72	6.7	6.65	3	9.69	9.65

ID	Progr.	h	GR	Q	Franco sul livello idrico	Franco sul carico totale
-	-	m	%	m <sup>3</sup> /s	m	m
NI13	105.79	0.43	21.3%	11.3	1.57	1.58
IN17	327.11	0.91	30.4%	11.3	2.09	2.10
NI09	371.13	0.92	30.6%	11.3	2.08	1.98



a)



b)

Figura 10. Profili idraulici IN17 – fase transitoria: a) VC Trans b) Ramo Sud

## 6 VERIFICA DELLE CONDIZIONI D'INCIPIENTE EROSIONE

Le inalveazioni in progetto prevedono due diverse tipologie di rivestimento:

1. Rivestimento con materassi di Tipo Reno e Gabbioni
2. Rivestimento con massi naturali

Nella seguente tabella viene riportata, per ciascuna sistemazione, la tipologia di rivestimento prevista:

Pk [km]	ID Interferenza	Tipologia d'intervento in progetto	Tipologia di rivestimento
0+475	IN07	Deviazione canali con adeguamento delle sezioni idrauliche di forma trapezoidale rivestite con massi naturali. Raccordo tra tombino e canale con massi naturali.	Rivestimento con massi naturali
0+737	IN18A-B	Realizzazione nuovo canale (sezione rettangolare) rivestito con materassi Reno a monte del tombino di progetto; a valle, raccordo con il canale esistente mediante materassi Reno.	Rivestimento con materassi Tipo Reno
1+160	IN09	Sistemazione idraulica del canale mediante materassi Reno lungo tutta la lunghezza dell'intervento	Rivestimento con materassi Tipo Reno
1+190	IN08	Sistemazione idraulica di due canali di sezione trapezoidale rivestiti con massi naturali. Raccordo tra tombino e canale con massi naturali.	Rivestimento con massi naturali
2+940	IN16	Realizzazione di un nuovo canale di sezione trapezoidale rivestito con massi naturali. Raccordo tra tombino e canale con massi naturali.	Rivestimento con massi naturali
3+125	NI13	Sistemazione idraulica del canale con sezioni di forma trapezoidale e rivestimento con massi naturali. Raccordo tra tombino e canale con massi naturali.	Rivestimento con massi naturali
3+010	IN17-NI08	Sistemazione idraulica del canale con sezioni di forma trapezoidale e rivestimento con massi naturali. Raccordo tra tombino e canale con massi naturali.	Rivestimento con massi naturali

*Tabella 5 - Tipologia di rivestimento inalveazioni per la linea ferroviaria di progetto*

Nei paragrafi seguenti si riportano i risultati delle verifiche delle condizioni di incipiente erosione effettuate per i canali rivestiti in materassi Tipo Reno e gabbioni.

## 6.1 Rivestimento in Materassi Tipo Reno e Gabbioni

Si riportano di seguito i valori della velocità massima della corrente in corrispondenza delle sezioni rivestite a valle dei manufatti in progetto, indicando la progressiva dell'interferenza, il tipo di rivestimento in materassi tipo reno e gabbioni, ed il diametro minimo del materiale di riempimento ( $d$ ) ed il valore della massima velocità della corrente ( $V$ ).

Pk [km]	ID Interferenza	Tipologia rivestimento	$d_{50}$ (m)	V (m/s)
0+737	IN18	materassi	0.125	2.77
1+160	IN09	materassi	0.125	2.7

Tabella 6 - Verifica dei rivestimenti delle per le opere in progetto

Come si evince dalla precedente riportata tabella il valore massimo della velocità di deflusso della corrente risulta sempre inferiore a 6.4 m/s.

Prove di laboratorio mostrano che i rivestimenti in materassi tipo "Reno" dello spessore di 30 cm e riempimento con pezzatura variabile tra 100-150 mm presentano una velocità critica (primo movimento) di 5,0 m/s e velocità limite (massima deformazione) di 6,4 m/s.

I gabbioni, invece, dello spessore di 50 cm e riempimento con pezzatura variabile tra 120-250 mm presentano una velocità critica (primo movimento) di 6,4 m/s e velocità limite (massima deformazione) di 8,0 m/s.

Type	Thickness (m)	Filling stones		Critical velocity (*)	Limit velocity (*)
		stone size	$d_{50}$		
Reno mattress	0,15-0,17	70-100	0.085	3.5	4.2
		70-150	0.110	4.2	4.5
	0,23-0,25	70-100	0.085	3.6	5.5
		70-150	0.120	4.5	6.1
	0,30	70-120	0.100	4.2	5.5
		100-150	0.125	5.0	6.4
Gabions	0,50	100-200	0.150	5.8	7.6
		120-250	0.190	6.4	8.0

Tabella XX - Velocità critica e Limiti di velocità per materassi reno e gabbioni

## 6.2 Rivestimento in massi naturali

Per quanto riguarda i rivestimenti in progetto per le inalveazioni relative alle interferenze, è stata condotta una verifica delle condizioni di incipiente erosione in corrispondenza delle sezioni critiche (ovvero maggiormente

sollecitate), mediante due approcci, il primo basato sulla teoria di Shields e il secondo proposto dal FHWA (*Federal Highway Administration - U.S. Department of Transportation*).

### 6.2.1 Approccio secondo la teoria di Shields

La metodologia basata sulla teoria di Shields, secondo cui il moto del materiale di diametro minore o uguale a  $d$  e peso specifico  $\gamma_s$  ha origine quando la tensione tangenziale  $\tau_0$  dovuta alla corrente supera il valore critico  $\tau_{cr}$ , funzione della dimensione del materiale e delle caratteristiche geometriche dell'alveo.

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

$$\tau_0 = \xi \cdot \gamma_w \cdot R_H \cdot i \quad [\text{N/m}^2]$$

con:

$\xi$  coefficiente che tiene conto della distribuzione delle tensioni tangenziali; è assunto pari a 1 per il fondo alveo e 0.75 in corrispondenza delle sponde;

$\gamma_w$  è il peso specifico del fluido (9'810 N/m<sup>3</sup>);

$R_H$  è il raggio idraulico (m);

$i$  è la pendenza locale della linea dell'energia (m/m).

I valori della  $\tau_0$  devono essere confrontati con le tensioni tangenziali critiche che mobilitano il materiale sul fondo e sulle sponde. Il valore critico  $\tau_{cr}$  che mobilita un masso di diametro  $d$  con peso specifico  $\gamma_s$  in assenza di coesione ed in regime turbolento ha la seguente espressione, tratta dall'articolo "Criteri di dimensionamento e di verifica delle stabilizzazioni di alveo e di sponda con massi sciolti e massi legati" di Armanini e Scotton, Università degli Studi di Trento - Atti del Corso di Aggiornamento "Moderni criteri di sistemazione degli alvei fluviali" a cura del Politecnico di Milano:

$$\left\{ \begin{array}{l} \tau_{cr, fondo} = (\gamma_s - \gamma_w) \cdot d \cdot \left[ 0.06 \cdot \left( 1 + 0.67 \cdot \frac{\sqrt{d}}{\sqrt{y_0}} \right) \right] \cdot \left( \cos \alpha - \frac{\sin \alpha}{\tan \varphi} \right) \\ \tau_{cr, sponde} = \tau_{cr, fondo} \cdot \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \vartheta}{\sin^2 \varphi}} \end{array} \right. \quad [\text{N/m}^2]$$

con:

$\gamma_s$  peso specifico dei massi, pari a 26'000 N/m<sup>3</sup>;

$\gamma_w$  peso specifico del fluido, pari a 9'810 N/m<sup>3</sup>;

$d$  diametro del masso (m);

$y_0$  tirante idrico (m);

$\alpha$  angolo di inclinazione del fondo alveo rispetto all'orizzontale;

$\vartheta$  angolo di inclinazione delle sponde del corso d'acqua rispetto all'orizzontale;

$\phi$  angolo di attrito dei massi, pari a  $46^\circ$ , in base a dati di letteratura.

Tale relazione, a differenza di quella formulata da Shields (la quale è da ritenersi valida nel caso di particelle omogenee, non coesive, su fondo orizzontale, con scabrezza relativa sufficientemente piccola), tiene conto degli effetti legati alla pendenza del fondo alveo, alla pendenza delle sponde e alla sommergenza  $d/y_0$  relativamente bassa.

Dalla tabella sottostante si evidenzia che il passaggio dell'onda di piena non è in grado di mobilitare massi del diametro medio previsto per ogni rivestimento in progetto:

- 0.30 m per i massi naturali di prima categoria.

Di seguito si riportano gli esiti delle verifiche per gli inalveamenti con massi naturali in progetto, dalle quali risultano fattori di sicurezza nel rapporto fra le tensioni critiche e quelle al fondo alti.

WBS	Tipo di rivestimento	$h$ [m]	$i$ [m/m]	$d$ [m]	$\tau_{0\text{fondo}}$ [N/m <sup>2</sup> ]	$\tau_{cr,\text{fondo}}$ [N/m <sup>2</sup> ]	FS		$\tau_{cr,\text{spende}}$ [N/m <sup>2</sup> ]	FS	
							$t_{cr,\text{fondo}}$ $t_{0\text{fondo}}$	$\tau_{0\text{spende}}$ [N/m <sup>2</sup> ]		$t_{cr,\text{spende}}$ [N/m <sup>2</sup> ]	$t_{cr,\text{spende}}$ $t_{0\text{fondo}}$
IN07	massi	0.54	0.01	0.3	29.49	437.0	14.82	22.12	80.24	3.63	
IN08	massi	0.53	0.004	0.3	15.04	438.3	29.15	11.28	80.49	7.14	
	massi	0.63	0.004	0.3	17.19	426.2	24.79	12.89	78.26	6.07	
IN16	massi	1.03	0.004	0.3	14.29	396.8	27.77	10.72	72.87	6.80	
NI13	massi	0.5	0.004	0.3	16.82	442.7	26.31	12.62	81.29	6.44	
IN17	massi	1.16	0.006	0.3	50.79	390.7	7.69	38.09	71.75	1.88	
NI09	massi	1.24	0.002	0.3	17.84	387.5	21.71	13.38	71.15	5.32	

Tabella 7- Verifica dell'erosione del rivestimento previsto per le inalveazioni di progetto

## 6.2.2 Approccio secondo la FHWA

Seguendo questo approccio, il diametro minimo di progetto è stato determinato a partire dai valori massimi della velocità e del tirante ottenuti dalle modellazioni idrauliche in corrispondenza del tratto oggetto di sistemazione.

La FHWA propone la seguente formula per determinare il diametro minimo dei massi:

$$d_{50} = 0.001 * \frac{v_a^3}{d_{avg}^{0.5} * K^{1.5}} * C_{sg} * C_{sf}$$



dove:

$d_{50}$ : dimensione del diametro medio dei massi della scogliera;

$v_a$ : velocità media della corrente nell'alveo principale;

$d_{avg}$ : tirante medio nell'alveo principale;

K1: si calcola con la formula riportata al paragrafo precedente;

$$C_{sg} = \frac{2.12}{(S_g - 1)^{1.5}}$$

in cui  $S_g$  è il peso del masso espresso in  $[t/m^3]$ ;

$$C_{sf} = \left( \frac{FS}{1.2} \right)^{1.5}$$

in cui FS è il fattore di stabilità che dipende dalla corrente, dalla geometria del corso d'acqua e da eventuali azioni ondose e assume i valori riportati in **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata..**

Condizione	Intervallo del fattore di stabilità FS
Correnti uniformi; tratti rettilinei o dolcemente curvi con $R/W > 30$ (raggio di curvatura R e larghezza del canale W); azione delle onde o di materiale galleggiante minimo; bassa (o nulla) incertezza nella definizione dei parametri di progetto.	1.0 - 1.2
Correnti gradualmente varie; curvature moderate ( $10 < R/W < 30$ ); azione di onde e di materiale galleggiante moderata.	1.3 - 1.6
Correnti prossime alla condizione critica; forti curvature ( $R/W < 10$ ); impatto potenzialmente forte di materiale galleggiante e di onde generate dal vento e dall'azione di natanti (0.3 – 0.61 m); moto turbolento e significativa incertezza nella definizione dei parametri di progetto.	1.6 - 2.0

Tabella 8- Valori di FS da assumersi nel dimensionamento

Da un punto di vista teorico si deve precisare che questa trattazione è stata sviluppata fondandosi sull'ipotesi iniziale di moto uniforme o gradualmente vario e il fattore di stabilità è utilizzato per tenere conto di circostanze in cui questa ipotesi venga meno (colate, impatti dovuti al ghiaccio oppure a onde generate dal vento o da natanti o situazioni caratterizzate da incertezza delle condizioni idrauliche) e per incrementare, quindi cautelativamente, la dimensione dei massi che andranno a costituire la protezione. In merito al fattore di stabilità FS, questo è stato tarato sulla base di circa 30 rilievi effettuati in situ dall'USGS intorno agli anni '80 nelle quali le combinazioni delle grandezze alla base della formula per il calcolo del  $d_{50}$  sono risultate comprese nei seguenti intervalli:


- pendenze del profilo idrico comprese nei valori 0.00006-0.0162;

- tirante compreso nei valori 1.5-14.8 m;
- velocità medie nel canale dell'ordine 0.7-4.0 m/s;
- valori di portata compresi tra 36.3-2180 m<sup>3</sup>/s;
- d<sub>50</sub> compreso tra 0.15-0.70 m;
- sezioni del canale sia simmetriche che non.

La formulazione appena descritta sarebbe limitatamente applicabile alle condizioni di moto uniforme o di moto gradualmente vario, in tratti caratterizzati da andamento rettilineo, o con curve morbide, e per sezioni uniformi; ciò nonostante le esigenze di progetto rendono utilizzabile questa formulazione anche in tutte le altre condizioni.

WBS	Asta	v <sub>m</sub> m/s	h <sub>m</sub> m	S <sub>g</sub> t/m <sup>3</sup>	C <sub>Sg</sub> -	C <sub>Sf</sub> -	□ °	K1 -	d <sub>50</sub> m
IN07	Ramo Est	1.55	0.30	2.6	1.05	1.26	45	0.18	0.11
	Ramo Ovest	1.27	0.50	2.6	1.05	1.26	45	0.18	0.05
IN08	Ramo Sud	1.15	0.56	2.6	1.05	1.26	45	0.18	0.03
	Ramo Nord	1.81	0.59	2.6	1.05	1.26	45	0.18	0.13
IN16-17	Vall. Cardinale	1.64	1.03	2.6	1.05	1.26	45	0.18	0.07
	Ramo Sud	1.03	0.76	2.6	1.05	1.26	45	0.18	0.02

Tabella 9- Diametro minimo massi secondo l'approccio FHWA

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA–CATANIA–PALERMO INTERRAMENTO PISTA AEROPORTO FONTANAROSSA					
	PROGETTO RS3H	LOTTO 02	CODIFICA D.78.RI	DOCUMENTO ID.00.02.001	REV. A	FOGLIO 66 di 80

## 7 COMPATIBILITÀ IDRAULICA COMPATIBILITÀ IDRAULICA

Nello studio effettuato è stata valutata la compatibilità idraulica degli attraversamenti minori dell'infrastruttura di progetto con il territorio, ed è stata analizzata la sicurezza del corpo ferroviario e stradale, identificando in termini di funzionalità e sicurezza i manufatti di presidio idraulico più opportuni, garantendo la minima interferenza delle opere con il normale deflusso delle acque.

Gli strumenti normativi presi a riferimento nella valutazione della compatibilità idraulica delle opere di progetto sono:

- NTC 2018 “Aggiornamento delle Norme tecniche per le costruzioni” di cui al D.M. 17 gennaio 2018 e relativa circolare applicativa del 21 gennaio 2019, n. 7 “Istruzioni per l’applicazione dell’Aggiornamento delle Norme tecniche per le costruzioni”;
- Manuale di Progettazione RFI 2019;
- Piano Stralcio per l’Assetto Idrogeologico (P.A.I.) dell’Area Territoriale tra i bacini idrografici del F. Simeto e del F. Alcantara (095), approvato con Decreto del Presidente della Regione Sicilia n.270 del 2/07/2007 (pubblicato sulla GURS n. 43 del 14 settembre 2007) e successivamente aggiornato con:

(I) D.P.R.S. n. 534 del 25/09/2008, pubblicato sulla G.U.R.S. n.52 del 14/11/2008, relativamente al Comune di Catania;

(II) D.P.R.S. n. 285 del 18/07/2011, pubblicato sulla G.U.R.S. n.37 del 02/09/2011, relativamente ai Comuni di Acireale e Piedimonte Etneo;

(III) D.P.R.S. n. 318 del 21/10/2014, pubblicato sulla G.U.R.S. n.52 del 12/12/2014, relativamente ai Comuni di Aci Castello, Aci San’Antonio, Catania, Mascalucia, Milo, Misterbianco, Sant’Alfio, Santa Venerina e Trecastagni;

(IV) D.P.R.S. n. 45 del 20/02/2015, pubblicato sulla G.U.R.S. n.17 del 24/04/2015, relativamente al Comune di Catania;

(V) D.P.R.S. n. 201 del 09/06/2015, pubblicato sulla G.U.R.S. n.30 del 24/07/2015, relativamente ai Comuni di Aci Castello e Aci Catena;

(VI) D.P.R.S. n. 114 del 04/04/2017, pubblicato sulla G.U.R.S. n.21 del 19/05/2017, relativamente ai Comuni di Aci Catena, Misterbianco, Valverde e Zafferana Etnea;

(VII) D.P.R.S. n. 235 del 05/06/2017, pubblicato sulla G.U.R.S. n.30 del 21/07/2017, relativamente al Comune di Calatabiano;

Nella Relazione di Piano sono individuate le aree soggette a pericolosità idraulica attraverso l'individuazione, la localizzazione e la caratterizzazione degli eventi alluvionali che abbiano prodotto effetti sul territorio, in particolare danni a persone o cose, o semplicemente, abbiano creato condizioni di disagio o allarme. Tale individuazione è un importante strumento che ha condotto alla delimitazione delle aree a potenziale rischio inondazione.

Dagli elaborati grafici annessi al PAI si evince come l'infrastruttura ferroviaria di progetto, in corrispondenza degli attraversamenti minori oggetto della presente relazione, non intercetti le perimetrazioni del Piano di Bacino o attraversi aree classificate come "aree a pericolosità idraulica".

Il PAI, inoltre, non fornisce indicazioni relativamente al dimensionamento delle opere di attraversamento dei corsi d'acqua, ma indica nel metodo VAPI Sicilia il riferimento per la stima delle massime precipitazioni dell'area.

## 7.1 Studio idrologico

Lo studio idrologico è stato condotto con l'obiettivo di valutare, con i modelli proposti in letteratura, le portate al colmo di piena nei corsi d'acqua interessati dalle opere in progetto.

Le stime delle portate sono state effettuate mediante l'applicazione del metodo WFIUH per i bacini di estensione superiore a 1 kmq e con il metodo razionale per i bacini inferiori a 1kmq, a partire dai dati di precipitazione calcolati con l'analisi statistica metodo VAPI per la Regione Sicilia, in riferimento alla piena con frequenza 200 anni.

Le stime condotte sono riportate nelle Relazione Idrologica annessa.


## 7.2 Verifiche idrauliche

Gli attraversamenti sui corsi d'acqua sono stati verificati sulla base delle prescrizioni tecniche del Manuale di Progettazione RFI 2019 e delle NTC 2018 e relativa Circolare applicativa.

Per le opere minori, oggetto della presente relazione, la piena di riferimento ha frequenza 200 anni in quanto trattasi di bacini con area inferiore a 10 km<sup>2</sup>.

Lo studio idraulico è stato eseguito mediante simulazioni in moto permanente e, in alcuni casi, in moto vario considerando un tratto significativo del corso d'acqua sia a monte che a valle di ciascun attraversamento.

Per quanto non espressamente indicato, valgono per analogia le prescrizioni di cui al Capitolo 3 del presente documento.

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA–CATANIA–PALERMO INTERRAMENTO PISTA AEROPORTO FONTANAROSSA					
<b>RELAZIONE IDRAULICA – OPERE MINORI</b>	PROGETTO RS3H	LOTTO 02	CODIFICA D.78.RI	DOCUMENTO ID.00.02.001	REV. A	FOGLIO 68 di 80

### 7.3 Sistemazioni idrauliche

Gli interventi previsti in alveo a monte e a valle dei manufatti di attraversamento sono stati definiti utilizzando opere di protezione di tipo “elastico” quali materassi di tipo Reno e gabbioni, che costituiscono un’affidabile protezione degli stessi dall’azione erosiva della corrente di piena.

Tali interventi costituiscono il raccordo fra il canale in c.a. previsto allo sbocco del manufatto di attraversamento e l’alveo naturale.

Gli interventi di sistemazione ripropongono la sagoma delle sezioni attuali d’alveo e incidono solo localmente sulle pendenze longitudinali dei corsi d’acqua.

Le sistemazioni idrauliche sono state progettate in generale con lo scopo di:

- assicurare con il periodo di ritorno previsto la sicurezza dell’infrastruttura ferroviaria;
- diminuire le eventuali condizioni di rischio garantendo l’officiosità idraulica dei corsi d’acqua;
- non alterare le condizioni di deflusso idrico e solido nel tratto oggetto di studio;
- impedire divagazioni che possano andare ad interessare le opere in progetto;
- assicurare che l’evoluzione della livelletta d’alveo non approfondisca l’incisione esistente in corrispondenza dell’opera di attraversamento;
- evitare le conseguenze derivanti dai fenomeni di erosione localizzata.

Particolari accorgimenti sono stati adottati per una corretta manutenzione delle opere, onde poter ridurre al minimo gli interventi atti a garantirne l’efficienza idraulica dei manufatti.

### 7.4 Analisi di compatibilità idraulica

L’infrastruttura ferroviaria e stradale di progetto, come già accennato in precedenza, è esterna alle perimetrazioni delle aree a pericolosità idraulica del PAI.

La verifica di compatibilità idraulica viene pertanto eseguita in riferimento al cap. 5.1.2.3 delle NTC 2018 e relativa circolare applicativa, e al Manuale di Progettazione RFI 2019, dove vengono specificate le seguenti condizioni minime:

Ponti:

- Piena di riferimento Tr 200 anni;

- Franco idraulico minimo sul livello di massima piena 1,50 m;
- Franco minimo sul carico idraulico totale 0.5 m;

Tombini:

- Piena di riferimento Tr 200 anni;
- Franco idraulico minimo sul livello di massima piena 0,50 m ed un riempimento massimo pari a 2/3 dell'altezza libera (G.R. max 67%);
- i tratti del corso d'acqua immediatamente prospicienti l'imbocco e lo sbocco del manufatto devono essere protetti da fenomeni di scalzamento e/o erosione;

In riferimento all'ultimo punto relativamente alla compatibilità idraulica dei tombini si rimanda al precedente capitolo dove sono analizzate le protezioni dall'erosione previste in progetto in corrispondenza dell'imbocco e dello sbocco.

Per la verifica dei punti precedenti relativamente ai franchi idraulici si riporta nella tabella seguente per ciascun attraversamento la progressiva, l'identificativo dell'interferenza, la portata di progetto, la quota di intradosso di ciascun manufatto, la quota del livello idrico (L.I.) stimato in corrispondenza della sezione di monte, il valore del franco idraulico ed il grado di riempimento (G.R.). Nel caso del ponte ferroviario (VI02) e stradale (NW01) in progetto sul Vallone Cardinale viene riportata a seguire anche la verifica sul livello del carico idraulico (Livello C.I.) ed il relativo franco sull'intradosso del manufatto in progetto.

Pk [km]	ID Interferenza	Q <sub>200</sub> (mc/s)	Quota intradosso (m.s.l.m.)	L.I. (m.s.l.m.)	Franco idraulico (m)	G.R. (%)
0+070.00	NI02-IN44	8.91	17.25	16.98	0.57	66
0+475.00	IN07	0.47	18.61	17.69	0.92	39
0+737.00	IN18A	18.01	14.10	13.38	0.72	64
1+160.00	IN09	6.51	14.4	13.36	1.04	48
		6.51	14.26	13.18	1.09	46
		6.51	14	12.92	1.08	46
		6.51	13.31	12.23	1.08	46
1+190.00	IN08	2.63	16.22	14.65	1.47	26.4
3+080.00	IN17	5.8	9.89	7.89	1.84	38.7


Figura 11 - Verifica del franco idraulico per le opere ferroviarie esistenti ed in progetto

Pk [km]	ID Interferenza	L <sub>NETTA</sub> (m)	Q <sub>200</sub> (mc/s)	Quota intradosso (m.s.l.m.)	L.I. (m.s.l.m.)	Franco L.I. (m)	L.E. (m.s.l.m.)	Franco L.E. (m)
2+963.17	VI02	18.60	11.30	11.43	8.57	2.86	8.70	2.73
	NW01	17.10	11.30	11.17	8.40	2.77	8.52	2.65

*Figura 12 - Verifica del franco sul carico idraulico per i ponti in progetto*

*Date le caratteristiche del territorio e del corso d'acqua si esclude che si possa verificare nella sezione oggetto dell'attraversamento (VI02-NW01) il transito di tronchi di rilevanti dimensioni.*

Alla luce delle precedenti considerazioni, la configurazione finale di progetto risulta idraulicamente compatibile con le norme della legislazione vigente di protezione dai rischi idraulici e con la conformazione odierna dei luoghi.

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA–CATANIA–PALERMO INTERRAMENTO PISTA AEROPORTO FONTANAROSSA					
<b>RELAZIONE IDRAULICA – OPERE MINORI</b>	PROGETTO RS3H	LOTTO 02	CODIFICA D.78.RI	DOCUMENTO ID.00.02.001	REV. A	FOGLIO 71 di 80

## BIBLIOGRAFIA

- AA. VV. *Manuale di Ingegneria Civile e Ambientale*, Zanichelli ESAC, Bologna, 2003.
- Cannarozzo M., D'Asaro F., Ferro V., *Valutazione delle piene in Sicilia*, Istituto di Idraulica dell'Università di Palermo e GNDCI (Gruppo Nazionale per la difesa dalle Catastrofi Idrogeologiche), Palermo, 1993.
- Caroni E., D'Alpaos L., Fattorelli S., Rossi F., Ubertini L., Versace P., Marchi E., *Valutazione delle piene*, C.N.R. °165, 1982.
- Da Deppo L., Datei C., Salandin P., *Sistemazione dei corsi d'acqua*, Edizioni Libreria Cortina, Padova, 2004.
- G. Ferreri, V. Ferro, Una espressione monomia della curva di probabilità pluviometrica, per durate inferiori all'ora, valida nel territorio siciliano. Bollettino dell'Ordine degli Ingegneri della Provincia di Palermo, 1-2, 1989
- Ferro V., *La sistemazione dei bacini idrografici*, McGraw-Hill, Milano, 2006.
- Ghetti A., *Idraulica*, Edizioni Libreria Cortina, Padova, 1996.
- Lo Bosco D., Leonardi G., Scopelliti F., *Il dimensionamento delle opere idrauliche a difesa del corpo stradale*, Quaderno di Dipartimento - Serie Didattica, Università degli Studi Mediterranea di Reggio Calabria, 2002.
- Maione U., *Appunti di idrologia 3. Le piene fluviali*, La Goliardica Pavese, 1977
- Marani M., *Processi e modelli dell'Idrometeorologia*, Dispense, 2005.
- Prescrizioni generali per la progettazione di RFI (PTP).
- Regione Siciliana, Assessorato Territorio e Ambiente, *Piano Stralcio di Bacino per l'Assetto Idrogeologico (P.A.I.) – Bacinoidrografico del Fiume Simeto, Area Territoriale tra il bacino del Fiume Simeto e il bacino del Fiume San Leonardo, Lago di Pergusa, Lago di Maletto – Relazione*, 2005.
- Regione Siciliana, Assessorato Territorio e Ambiente, *Piano Stralcio di Bacino per l'Assetto Idrogeologico della Regione Siciliana – Relazione Generale*, 2004.
- Regione Siciliana, Osservatorio delle Acque dell'Agenzia Regionale per i Rifiuti e le Acque (ARRA), *Annali Idrologici*, disponibili presso [www.osservatorioacque.it](http://www.osservatorioacque.it).
- Rossi F., Fiorentino M., Versace P., *Two component extreme value distribution for Flood Frequency Analysis*, Water Resources Research, Vol. 20, N.7, 1984.
- Ven Te Chow, *Open-channel hydraulics*, McGraw-Hill Book Company, USA, 1959.
- Circolare 2 febbraio 2009, n. 617, *Istruzioni per l'applicazione delle "Nuove norme tecniche per le costruzioni"* di cui al D.M. 14 gennaio 2008.





DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA-CATANIA-PALERMO

INTERRAMENTO PISTA AEROPORTO FONTANAROSSA

**RELAZIONE IDRAULICA - OPERE MINORI**

PROGETTO	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3H	02	D.78.RI	ID.00.02.001	A	72 di 80

DM 14 gennaio 2008, *Nuove norme tecniche per le costruzioni*, Gazzetta Ufficiale n. 29 del 4 febbraio 2008 - Suppl. Ordinario n. 30.

## APPENDICE A - IL CODICE DI CALCOLO DHI MIKE 11

MIKE 11 è un software in grado di simulare il flusso monodimensionale, stazionario e non, di fluidi verticalmente omogenei in qualsiasi sistema di canali o aste fluviali. Sviluppato a partire dagli anni '70 dal DHI (Danish Hydraulic Institute), rappresenta lo stato dell'arte nella modellistica matematica in ambito fluviale e riferimento nell'ambito della modellistica idrodinamica monodimensionale. Caratteristiche del codice sono la velocità di calcolo e l'efficienza del robusto motore di simulazione idrodinamica (risolve le equazioni complete del De St.Venant), la struttura logica e sequenziale per l'inserimento e gestione dei dati di input (geometrie, serie storiche ecc.) ed i molteplici strumenti di interpretazione e visualizzazione dei risultati, in grado di garantire un'ottima rappresentazione degli studi condotti (rappresentazione di sezioni, profili, piani quotati, anche in ambiente GIS). La grande flessibilità del codice di calcolo permette di integrare, attraverso specifici moduli, le applicazioni idrodinamiche con fenomeni idrologici, trasporto solido, advezione-dispersione, qualità delle acque, ecologia, rendendo MIKE 11 uno strumento indispensabile per affrontare e risolvere molteplici problemi d'ingegneria fluviale quali, ad esempio:

- studi di idraulica fluviale e di propagazione dell'onda di piena;
- studi di idrologia e idrogeologia;
- supporto alla progettazione e gestione di opere idrauliche;
- analisi della rottura dighe;
- analisi del trasporto solido e morfologia fluviale;
- modelli di previsione in tempo reale e di supporto decisionale;
- analisi dei fenomeni di intrusione del cuneo salino in fiumi ed estuari;
- studi di valutazione della qualità delle acque sia superficiali che sotterranee;
- analisi dello stato ecologico dei corsi d'acqua

MIKE 11 è costituito dai seguenti moduli:

- HD (idrodinamico): simulazione del flusso in canali a pelo libero, costituisce la base per ulteriori moduli aggiuntivi;
- RR (afflussi-deflussi): modulo che consente, partendo dai dati meteorologici (pioggia, temperature, evapotraspirazione, ecc...), su bacini naturali o artificiali, di ricostruire attraverso l'utilizzo di modelli idrologici (NAM, UHM, Drift, ecc...) le portate idriche in assegnate sezioni di calcolo;
- AD (advezione-dispersione): simulazione del processo di advezione e dispersione di una sostanza in soluzione o in sospensione di qualsiasi natura nel corpo idrico, eventualmente caratterizzata da una cinetica di decadimento lineare;
- ECOlab (ecologico): simulazione di una serie di processi qualitativi, tra i quali il ciclo BODDO con nitrificazione-denitrificazione, il ciclo del fosforo, l'eutrofizzazione, il trasporto di metalli pesanti ecc

- ST (trasporto sedimenti): simulazione del trasporto solido di materiale non coesivo, in modalità disaccoppiata (senza variazione della geometria del fondo alveo) o accoppiata (calcolo delle trasformazioni morfologiche);
- FF/DA (previsioni in tempo reale): il modulo consente, assimilando i dati misurati in tempo reale su un bacino e/o corso d'acqua, di correggere la simulazione idrodinamica al fine di garantire una affidabilità massima sulla previsione di un evento di piena.

Particolarmente efficace risulta la possibilità di poter integrare il codice MIKE 11, con altri codici di calcolo della famiglia MIKE quali: MIKE 21 (MIKE FLOOD), per simulare in maniera combinata fenomeni 1D e 2D; MIKE SHE, per la modellazione di corpi idrici superficiali e sotterranei; WEST, per simulare in dettaglio i processi nell'impianto di trattamento ed il relativo impatto sul corso d'acqua recettore; MOUSE (MIKE URBAN FLOOD), simula le interferenze tra il corso d'acqua e la rete di drenaggio. Di seguito si descrive il codice MIKE 11 HD.

## **Modulo idrodinamico HD**

Il modulo idrodinamico HD rappresenta il “cuore” del codice di calcolo MIKE 11 ed è in grado di simulare il flusso idrico monodimensionale, stazionario e non, di fluidi verticalmente omogenei in qualsiasi sistema di canali o aste fluviali. Attraverso l'utilizzo di HD è possibile simulare:

- portate laterali;
- condizioni di corrente veloce o lenta;
- flusso libero o rigurgitato in corrispondenza di sfioratori;
- differenti regole operative di funzionamento di serbatoi o invasi;
- resistenze localizzate e perdite di carico concentrate;
- casse d'espansione;
- condizioni di flusso quasi - bidimensionale sulle pianure alluvionali;
- azione del vento;
- nodi idraulici (biforcazioni e confluenze).

L'adozione del programma di simulazione MIKE 11 consente la soluzione del problema idrodinamico di moto vario con uno schema di soluzione numerica molto efficiente, che limita i tempi di calcolo consentendo una adeguata rappresentazione dell'evolversi temporale dei transitori idraulici legati al passaggio dell'onda di piena.

### ***Descrizione delle condizioni di moto simulate***

Il modello consente di attivare tre diverse descrizioni del moto, mediante tre differenti formulazioni matematiche:

- Approccio dell'"onda cinematica". Le condizioni di moto sono calcolate imponendo il bilancio tra le forze di gravità e di attrito. Questa semplificazione non permette di simulare gli effetti di rigurgito.
- Approccio dell'"onda diffusiva". Oltre alle forze di gravità ed attrito viene tenuto conto del gradiente idrostatico in modo tale da poter valutare anche gli effetti a monte delle condizioni al contorno di valle e quindi simulare i fenomeni di rigurgito.
- Approccio dell'"onda dinamica". Utilizzando le equazioni complete del moto, comprese le forze di accelerazione, è possibile simulare con questa formulazione transitori veloci, flussi di marea ecc.

In funzione del tipo di problema da risolvere è possibile scegliere la descrizione del moto più appropriata. Ognuna delle tre formulazioni consente di simulare sia sistemi idrici ramificati che reti idrauliche con maglie chiuse.

### ***Equazioni generali di De Saint Venant***

MIKE 11, risolve le equazioni di conservazione del volume e della quantità di moto (equazioni di De Saint Venant) che sono derivate sulla base delle seguenti assunzioni:

- il fluido (acqua) è incomprimibile ed omogeneo, cioè senza significativa variazione di densità;
- la pendenza del fondo è piccola;
- le lunghezze d'onda sono grandi se paragonate all'altezza d'acqua, in modo da poter considerare in ogni punto parallela al fondo la direzione della corrente: è cioè trascurabile la componente verticale dell'accelerazione e su ogni sezione trasversale alla corrente si può assumere una variazione idrostatica della pressione.

Integrando le equazioni di conservazione della massa e della quantità di moto si ottiene:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \alpha \frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial h}{\partial x} = 0$$

ed introducendo la resistenza idraulica (attrito) e le portate laterali addotte:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = q$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \alpha \frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{gQq}{C^2AR} = 0$$

Dove:

A= area della sezione bagnata (m<sup>2</sup>)

C= coefficiente di attrito di Chezy (m<sup>1/2</sup> s<sup>-1</sup>)

g= accelerazione di gravità (m s<sup>-2</sup>)

h= altezza del pelo libero rispetto ad un livello di riferimento orizzontale (m);

Q= portata (mc/s)

R= raggio idraulico (m)

α= coefficiente di distribuzione della quantità di moto;

q= portata laterale addotta (m<sup>2</sup> s<sup>-1</sup>)

### SIMULAZIONE DELLE CORRENTI VELOCI CON L'APPROCCIO DELL'ONDA DINAMICA

Per le correnti veloci viene applicata una equazione "ridotta" del moto, ottenuta trascurando il termine non lineare:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{gQ^2}{C^2AR} = 0$$

La descrizione del moto è tanto più accurata quanto meno rapidamente variabile è la velocità della corrente. Il vantaggio di questa schematizzazione è rappresentato dal fatto che è possibile ottenere una soluzione stabile con la stessa metodologia usata per le correnti lente. Nella transizione tra corrente lenta e veloce viene applicata una riduzione graduale del termine non lineare.

#### ***Approssimazione dell'onda diffusiva***

L'approssimazione dell'"onda diffusiva" consiste nel trascurare, nelle equazioni generali di De Saint Venant, tutti i termini legati alla quantità di moto:

$$gA \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{gQ^2}{C^2AR} = 0$$

Questa formulazione assicura ancora la descrizione dell'effetto di rigurgito attraverso il termine  $\frac{\partial h}{\partial x}$ . Per ragioni di stabilità questo termine viene smorzato; ciò significa che vengono risolti soltanto fenomeni di rigurgito relativamente stazionari (confrontati con lo step di tempo utilizzato).

### ***Descrizione in corrispondenza di strutture***

Dal punto di vista matematico la descrizione della corrente attraverso stramazzi o soglie e sezioni trasversali strette è abbastanza simile. Sono diversi i tipi di strutture che possono essere simulate:

#### **Tipo 1. Stramazzo a larga soglia**

Il programma automaticamente determina le caratteristiche di funzionamento standard dello stramazzo sulla base della geometria e dei coefficienti di perdita di carico specificati dall'utente. Viene assunta una distribuzione idrostatica delle pressioni sulla soglia e vengono utilizzati diversi algoritmi per la simulazione del deflusso libero e di quello rigurgitato.

#### **Tipo 2. Relazione Q-h**

Nel caso in cui le condizioni standard di funzionamento (tipo 1) dello stramazzo non risultino adeguate (ad esempio quando è evidente una significativa curvatura delle linee di corrente) è possibile specificare le relazioni Q-h (portate-livelli) valide per la data struttura. La relazione Q-h viene utilizzata per il deflusso libero in condizioni critiche, mentre per il deflusso rigurgitato (o sommerso) vengono utilizzati gli stessi algoritmi della struttura "tipo 1".

#### **Tipo 3. Tombino**

Un tombino può essere descritto mediante diversi algoritmi validi per condizioni di deflusso critico, rigurgitato o a "tubo pieno". Il funzionamento a "tubo pieno" è a sua volta suddiviso in deflusso libero a valle, flusso rigurgitato e flusso sommerso: il codice calcola in automatico una relazione Q-h che contempla tutti i casi di deflusso critico allo sbocco del tombino. La portata critica è determinata da una formulazione di stramazzo a larga soglia quando l'imbocco è libero e da una formulazione di luce sotto battente quando l'imbocco è sommerso.

#### **Tipo 4. Relazione Q-t**

E' possibile inserire una qualsiasi relazione Q-t esterna per descrivere ad esempio il deflusso da una diga o un pompaggio. Questa relazione sostituisce localmente l'equazione di conservazione della quantità di moto.

#### **Tipo 5. Relazione $Q = A(Z_{j1}) \cdot Z_{j2}$**

Il deflusso nell'ambito di una struttura può essere posto in relazione, in modo dinamico, a due qualsiasi variabili indipendenti del sistema consentendo di simulare regole operative particolari. Il deflusso da un vaso può per esempio essere correlato alla portata in ingresso e al livello nell'vaso (o al livello a valle di esso).

#### **Tipo 6. Strutture mobili**

E' possibile simulare la presenza di strutture mobili con condizioni di deflusso di tipo sfioro o luce sotto battente. Viene assegnata la geometria fissa della struttura (larghezza, quota del fondo per sistemi a sfioro tipo ventola, quota del livello massimo della paratoia per sistemi con luce sotto battente) ed una regola

operativa che determina la quota della parte mobile della struttura in funzione di una delle seguenti condizioni idrodinamiche calcolate dal modello: un livello, una differenza di livelli, una portata, una differenza di portate, il tempo. Il modulo simula dinamicamente la variazione della geometria della struttura ed il flusso che ne consegue.

### **Tipo 7. Ponti**

In MIKE 11 possono essere utilizzate diverse formulazioni da letteratura per il calcolo del deflusso attraverso i ponti e del conseguente effetto di rigurgito. In particolare sono implementati i modelli della FHWA (Federal Highway Administration USA, WSPRO method) e della USBPR (US Bureau of Public Roads), modelli per la simulazione della presenza delle pile (Nagler e Yarnell), modelli per il libero deflusso attraverso ponti ad arco (Biery & Delour, HR method). Tutti i precedenti metodi di calcolo possono essere integrati con il calcolo del moto in pressione e con il calcolo del sormonto della struttura (tombini e stramazzi).

#### ***Resistenza d'attrito***

MIKE 11 consente di utilizzare due diverse formulazioni della resistenza d'attrito: l'espressione di Chezy e quella di Strickler. Secondo la formula di Chezy, nell'equazione del moto il termine di resistenza risulta pari a:

$$\tau_r = \frac{g Q Q}{C^2 A R}$$

dove C è il coefficiente di attrito di Chezy. Secondo la formula di Strickler, lo stesso termine diventa:

$$\tau_r = \frac{g Q Q}{M^2 A R^{4/3}}$$

dove M è il coefficiente di Strickler, pari a  $1/n$ , essendo n il coefficiente di Manning.

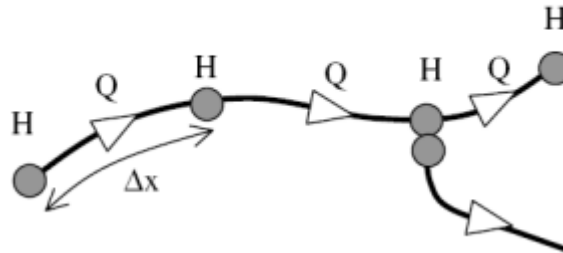
#### ***Condizioni iniziali***

Le condizioni iniziali possono essere specificate dall'utente oppure essere calcolate automaticamente. Nel secondo caso viene usata la formula di Chezy per determinare i livelli idrici e le portate da considerare all'inizio della simulazione su tutta la rete o schema idraulico. In alternativa a queste due opzioni è possibile anche assumere come condizioni iniziali i risultati di una precedente simulazione effettuata sullo stesso schema idraulico.

#### ***Metodo di soluzione***

La soluzione del sistema di equazioni è indipendente dall'approccio modellistico seguito (cinematico, diffusivo, dinamico). Le equazioni generali di De Saint Venant sono trasformate in un sistema di equazioni implicite alle

differenze finite secondo una griglia di calcolo con punti Q e h alternati tra loro, nei quali la portata Q e il livello idrico h, rispettivamente, sono determinati ad ogni passo temporale (schema di Abbott a 6 punti).



La griglia di calcolo viene generata dal modello in base alle richieste dell'utente:

- i punti Q sono posizionati sempre a metà tra due punti h vicini;
- la distanza tra due punti h può essere variabile;
- ad ogni sezione trasversale d'alveo viene assegnato un punto h;
- ad ogni struttura viene assegnato un punto Q.

### **Condizioni al contorno**

In MIKE 11 le condizioni al contorno sono distinte in esterne ed interne. Le condizioni al contorno interne sono: legami tra punti nodali, strutture, portate interne. Le condizioni al contorno esterne sono: valori costanti di h e Q, valori di h e Q variabili nel tempo, relazioni tra h e Q (ad es. scala di deflusso per una sezione d'alveo).

### **Definizione dei passi di calcolo**

La scelta ottimale dei passi di calcolo Dx (spazio) e Dt (tempo) da utilizzare nell'ambito di una simulazione è molto importante perché questi parametri possono condizionare pesantemente la stabilità del calcolo numerico e quindi i risultati stessi della simulazione. Esistono due differenti criteri per determinare correttamente i passi di calcolo Dx e Dt. Essi sono descritti nel seguito.

- 1) Criterio di Courant

$$Cr = \frac{\sqrt{g \cdot d + V}}{Dx} \cdot Dt$$

dove:

Cr = numero di Courant;



d = altezza d'acqua media;

V = velocità media della corrente;

g = accelerazione di gravità;

Dt, Dx = passi di calcolo.

Il numero di Courant esprime quanti Dx vengono percorsi da un'onda, causata da una piccola perturbazione, che si muove in un intervallo di tempo Dt unitario.

Per correnti lente ( $Fr < 1$ ), il valore massimo del numero di Courant deve essere inferiore a 20.

## 2) Criterio della velocità.

Il criterio della velocità stabilisce che i passi Dx e Dt di calcolo siano definiti in modo tale che la corrente si muova di uno spazio Dx in un tempo maggiore di Dt, e cioè:

$$V * Dt < Dx$$

dove V è velocità media della corrente. In definitiva entrambi i criteri esprimono il concetto che, per un dato passo di tempo Dt, Dx deve essere maggiore di un valore definito; contemporaneamente sia Dt che Dx devono essere inferiori a valori prestabiliti, in modo da descrivere correttamente il fenomeno in esame. Il modello DHI/MIKE 11 genera automaticamente una griglia di calcolo sulla quale i nodi che rappresentano le altezze d'acqua sono localizzati in corrispondenza delle sezioni trasversali di rilievo. Nel caso in cui la distanza tra due sezioni sia maggiore di Dx, vengono inseriti ulteriori nodi intermedi di calcolo, distanti fra loro Dx o meno.