0	08/2013		Venturini	Cacciatori	Venturini
Revisione	Data	Oggetto revisione	Redatto	Verificato	Approvato

REGIONE LIGURIA PROVINCIA DI GENOVA COMUNE DI GENOVA

PROTOCOLLO D'INTESA PER GLI INTERVENTI STRUTTURALI VOLTI ALLA MITIGAZIONE DELL'EMERGENZA IDRAULICA DEL BACINO DEL TORRENTE BISAGNO, ALLA RIDEFINIZIONE URBANISTICA DEL TRATTO TERMINALE ED ALLA RIQUALIFICAZIONE AMBIENTALE DELL'ALVEO E DELLE AREE CIRCOSTANTI

COMUNE DI GENOVA

AREA TECNICA - DIREZIONE MANUTENZIONE INFRASTRUTTURE E VERDE PUBBLICO

Dirigente **Ing. Stefano PINASCO**

PROGETTISTI:

A.T.I.

TECHNITAL S.p.A. (Capogruppo mandataria)
STUDIO MAIONE INGEGNERI ASSOCIATI
SGI STUDIO GALLI INGEGNERIA S.p.A.
ARTELIA GROUP S.A.

RESPONSABILE UNICO PROCEDIMENTO **Ing. Stefano PINASCO**

Staff tecnico

TECHNITAL S.p.A. (Capogruppo mandataria)
Ing. A.Scotti - Ing. S. Venturini
STUDIO MAIONE INGEGNERI ASSOCIATI
Ing. D Cerlini - Ing. M. Ferrari
SGI STUDIO GALLI INGEGNERIA S.p.A.
Ing. A.Galli - Ing. U. Galli
ARTELIA GROUP S.A.
Mr. O. Cazaillet

Intervento/Opera

SCOLMATORE DEL TORRENTE BISAGNO IN COMUNE DI GENOVA
PRIMO LOTTO: REALIZZAZIONE DELLE OPERE PER LA MESSA IN SICUREZZA IDRAULICA DEL TORRENTE FEREGGIANO (E RIVI ROVARE E NOCE)

Elaborato
TECHNITAL S.p.A.

Dott. Ing. Simone Venturini

Oggetto della tavola

RELAZIONI IDRAULICHE
Galleria di adduzione principale
Relazione idrologica ed idraulica

Scala

Data
Agosto 2013

Progetto Definitivo

Tavola N° PD1.RI.01

Codice GULP	Codice Commessa Precedente	Revisione
12383	DSU100	0

I DISEGNI E LE INFORMAZIONI IN ESSI CONTENUTE SONO PROPRIETA' ESCLUSIVA DEL COMUNE DI GENOVA E NON POSSONO ESSERE MODIFICATI, RIPRODOTTI, RESI PUBBLICI O UTILIZZATI PER USI DIFFERENTI DA QUELLI PER CUI SONO STATI REDATTI, SALVO AUTORIZZAZIONE SCRITTA.

GALLERIA DI ADDUZIONE PRINCIPALE FERREGIANO

RELAZIONE IDROLOGICA ED IDRAULICA

INDICE

1. PREMESSA 5

2. DESCRIZIONE DELLE OPERE 6

2.1. Galleria di adduzione principale Fereggiano 6
2.2. Gallerie minori 8

3. LE PORTATE DI RIFERIMENTO 10

3.1. Portata del rio Fereggiano 11
3.1.1. Portate di progetto del Fereggiano (Piano di Bacino e PD2007) 11
3.1.2. Portata del rio Noce 17
3.1.3. Portata del Rio Rovare 17
3.1.4. Portata totale 17

4. DIMENSIONAMENTO PRELIMINARE DELL'OPERA 22

4.1. Criteri di progetto 22
4.2. Dimensionamento preliminare della galleria principale 23
4.2.1. Condizioni idrauliche lungo la galleria: considerazioni preliminari 24

5. SIMULAZIONI DI FUNZIONAMENTO DELLA GALLERIA 31

5.1. Il software infoworks CS 31
5.2. Schematizzazione del sistema idraulico da simulare 32
5.3. Simulazioni – Dati di portata 35
5.4. Scenario 1 35
5.5. Scenario 2 43
5.6. Scenario 3 50

6. STUDIO DI ALCUNI ELEMENTI SINGOLARI DELLA GALLERIA 57

6.1. Gli aerofori/sfiati della galleria 57
6.2. Funzionamento degli aerofori/sfiati della galleria 58
6.2.1. Condizioni idrauliche in corrispondenza dello sbocco a mare 60
6.2.2. Sopralzo in curva 64

INDICE DELLE FIGURE

Fig. 2.1 - Tracciato di progetto della galleria Fereggiano ed opere di presa 6
Fig. 2.2 - Sezione corrente del tratto di galleria di completamento del deviatore Fereggiano prevista nel presente progetto. Elementi strutturali della sezione A0 7
Fig. 2.3 - Sovrapposizione della sezione corrente del tratto di galleria di completamento del deviatore Fereggiano con la sezione circolare corrente del tratto già costruito (progetto Italstrade) 8
Fig. 3.1 - Distribuzione delle portate massime assumendo i valori del Piano di Bacino 12
Fig. 3.2 - distribuzione delle portate massime assumendo i valori della comunicazione prot. 25909 del 14.06.2004 del Comune di Genova (situazione senza scolmatore Fereggiano) 12
Fig. 3.3 - distribuzione delle portate massime assumendo i valori della comunicazione prot. 25909 del 14.06.2004 del Comune di Genova (situazione con scolmatore Fereggiano) 13
Fig. 3.4 - Distribuzione delle portate massime in occasione dell'evento 4 Novembre 2011 (Perizia Bellini/Tubino) 14
Fig. 3.5 - Distribuzione delle portate da ottenere con le opere, assumendo a riferimento le portate stimate in occasione dell'evento 4 Novembre 2011 (Perizia Bellini/Tubino) 15
Fig. 3.6 - Idrogrammi di piena dei rii Fereggiano, Rovare e Noce (Progetto Italstrade) 21
Fig. 4.1 - Scala delle portate di una sezione circolare D = 5,20 e la policentrica di progetto – Confronto dei tiranti 26
Fig. 4.2 - Scala delle portate di una sezione circolare D = 5,20 e la policentrica di progetto – Confronto dei gradi riempimento 27
Fig. 4.3 - Andamento del numero di Froude al variare della portata convogliata 27
Fig. 4.4 - Variazione di alcuni parametri idraulici a seconda della pendenza assunta per la galleria principale 30
Fig. 5.1 - Modello InfoWorks: schema planimetrico 33
Fig. 5.2 - Scenario 1: profilo longitudinale galleria Fereggiano 39
Fig. 5.3 - Scenario 1: profilo longitudinale galleria Fereggiano – dettaglio tratto finale 40
Fig. 5.4 - Scenario 1: profilo longitudinale galleria Noce 41
Fig. 5.5 - Scenario 1: profilo longitudinale galleria Rovare 42
Fig. 5.6 - Scenario 2: profilo longitudinale galleria Fereggiano 46
Fig. 5.7 - Scenario 2: profilo longitudinale galleria Fereggiano – dettaglio tratto finale 47
Fig. 5.8 - Scenario 2: profilo longitudinale galleria Noce 48
Fig. 5.9 - Scenario 2: profilo longitudinale galleria Rovare 49
Fig. 5.10 - Scenario 3: profilo longitudinale galleria Fereggiano 53
Fig. 5.11 - Scenario 3: profilo longitudinale galleria Fereggiano – dettaglio tratto finale 54

Fig. 5.12 - Scenario 3: profilo longitudinale galleria Noce 55
Fig. 5.13 - Scenario 3: profilo longitudinale galleria Rovare 56
Fig. 6.1 - Particolari delle estremità di un aeroforo 58
Fig. 6.2 - Condizioni idrauliche allo sbocco della galleria 61
Fig. 6.3 - Spinta totale nello scolmatore al variare della portata in transito 62
Fig. 6.4 - Scala di deflusso sezione terminale dello scolmatore 63
Fig. 6.5 - Sopralzo in curva nelle variazioni planimetriche delle correnti supercritiche *(Da: Ghetti: Idraulica)* 65

INDICE DELLE TABELLE

Tab. 3.1 - Portate di riferimento disponibili 16
Tab. 3.2 - Portate di riferimento per il dimensionamento delle opere di presa 19
Tab. 3.3 - Portate estreme di verifica delle opere 20
Tab. 4.1 - Scala delle portate della galleria Fereggiano a moto uniforme, per pendenza 0,3 % (in rosso le condizioni di moto supercritico) 25
Tab. 4.2 - Scala delle portate della galleria Fereggiano a moto uniforme, per pendenza 0,4 % (in rosso le condizioni di moto supercritico) 28
Tab. 4.3 - Scala delle portate della galleria Fereggiano a moto uniforme, per pendenza 0,5 % (in rosso le condizioni di moto supercritico) 29
Tab. 5.1 - Modello InfoWorks: principali dati geometrici 34
Tab. 5.2 - Modello InfoWorks: portate in ingresso 35
Tab. 5.3 - Scenario 1: risultati per la galleria Fereggiano 37
Tab. 5.4 - Scenario 1: risultati per la galleria Noce 37
Tab. 5.5 - Scenario 1: risultati per la galleria Rovare 38
Tab. 5.6 - Scenario 2: risultati per la galleria Fereggiano 44
Tab. 5.7 - Scenario 2: risultati per la galleria Noce 44
Tab. 5.8 - Scenario 2: risultati per la galleria Novare 45
Tab. 5.9 - Scenario 3: risultati per la galleria Fereggiano 51
Tab. 5.10 - Scenario 3: risultati per la galleria Noce 51
Tab. 5.11 - Scenario 3: risultati per la galleria Novare 52
Tab. 6.1 - Caratteristiche dei 4 aerofori/sfiati lungo l'asse della galleria Fereggiano 58
Tab. 6.2 - Verifica della velocità e della depressione massimi per scenario 1 60
Tab. 6.3 - Verifica della velocità e della depressione massimi per scenario 2 60
Tab. 6.4 - Verifica della velocità e della depressione massimi per scenario 3 60
Tab. 6.5 - Valori di moto uniforme al variare della portata nello scolmatore 63

1. PREMESSA

Il presente documento costituisce la Relazione Idrologica ed Idraulica della galleria Fereggiano di adduzione delle portate di piena derivata dalle tre opere da realizzare sui rii Fereggiano, Rovare e Noce.

Per una migliore comprensione delle motivazioni che hanno portato alle scelte progettuali operate, e del funzionamento assegnato alla galleria principale, al cap. 2 è stata riportata oltre alla descrizione della galleria principale Fereggiano, anche quella relativa alle 2 gallerie minori, necessarie per consegnare alla galleria principale le portate di piena derivate dalle 2 opere di presa da realizzare sui rii Rovare e Noce.

Al cap. 3 sono riportate le portate idrologiche che sono state considerate per il dimensionamento delle opere e per la loro verifica di funzionamento in casi significativi e/o estremi

Al cap. 4 sono riportati i criteri di progetto, il dimensionamento preliminare dell'opera.

Il capitolo 5 riporta estesamente le simulazioni sviluppate con modello matematico dalle quali si evince il comportamento e le modalità di funzionamento della galleria nei vari scenari di esercizio.

2. DESCRIZIONE DELLE OPERE

2.1. Galleria di adduzione principale Fereggiano

La galleria di adduzione principale, che permette di convogliare a mare le acque di piena derivate dalle opere di presa collocate sui rii Fereggiano, Rovare e Noce, prende avvio dall'opera di presa sul torrente Fereggiano e, dopo un'ampia curva, si sviluppa in direzione nord – sud verso lo sbocco a mare collocato nei pressi dello stabilimento balneare Benvenuto, collegandosi al tratto già realizzato negli anni '90 del deviatore del rio Fereggiano.
La galleria, la cui realizzazione è prevista con il metodo di scavo tradizionale (risultando difficoltosa e non conveniente la ripresa dello scavo per soli 2.600 m circa con l'ausilio di una nuova fresa, ha sezione policentrica con diametro interno netto di 5,20 m (in aderenza a quanto già realizzato per la galleria circolare del deviatore Fereggiano), e presenta una lunghezza complessiva pari a 2.808 + 909 m (tratto esistente) = 3.717 m.



FIG. 2.1 - TRACCIATO DI PROGETTO DELLA GALLERIA FEREGGIANO ED OPERE DI PRESA

Le principali caratteristiche dell'opera sono di seguito evidenziate (la progressiva 0.00 m è collocata in corrispondenza del limite di valle dell'attraversamento di Corso Italia):

Le caratteristiche geometriche dell'opera sono le seguenti:

- sezione tipo policentrica con diametro di :5,20m
- lunghezza complessiva :909 + 2.808 = 3.717m
- quota all'imbocco a monte :12,99 m s.m.m.
- quota al filo esterno di C.so Italia :- 2,82 m s.m.m.
- scabrezza secondo Gauckler – Strickler :75 $m^{1/3}s^{-1}$

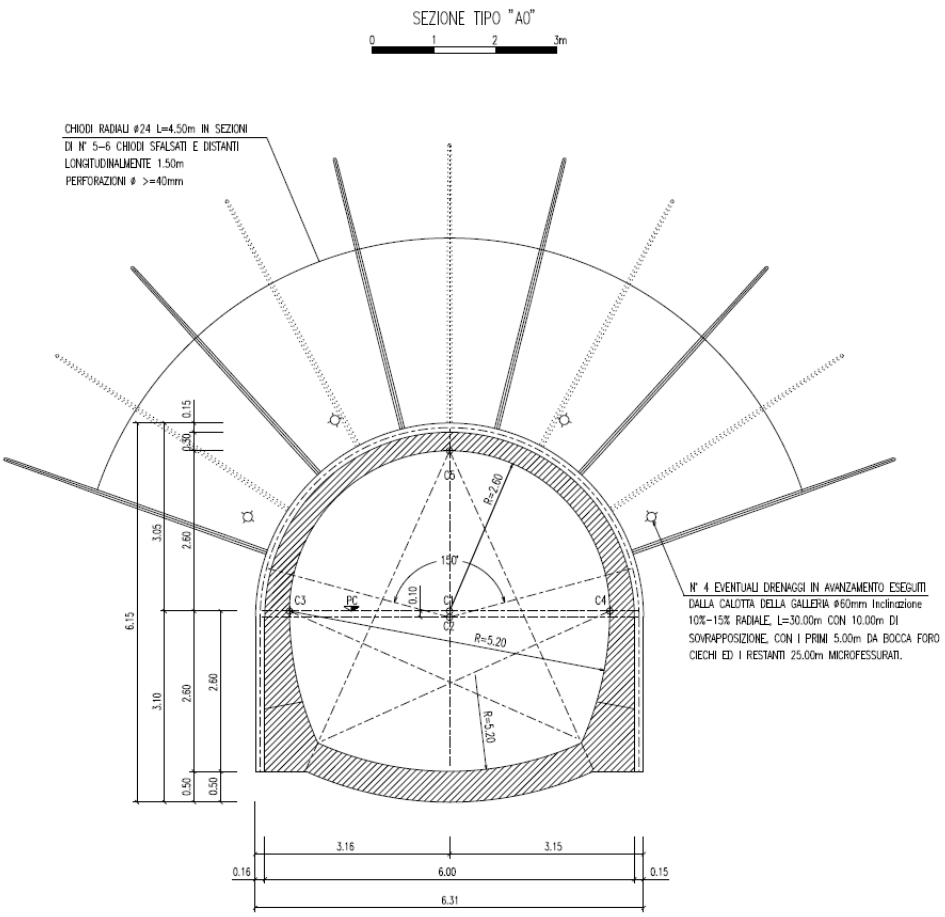


FIG. 2.2 - SEZIONE CORRENTE DEL TRATTO DI GALLERIA DI COMPLETAMENTO DEL DEVIATORE FEREGGIANO PREVISTA NEL PRESENTE PROGETTO. ELEMENTI STRUTTURALI DELLA SEZIONE A0

Il raccordo tra la sezione policentrica di progetto e quella circolare già realizzata verrà operato nei 5-6 m già scavati ma non rivestiti, ove si potranno agevolmente raccordare le due sezioni, allineando le quote di talweg evitando la formazione di gradini. Come visibile nella figura che segue, le due sezioni sono molto simili e consentono un agevole raccordo.

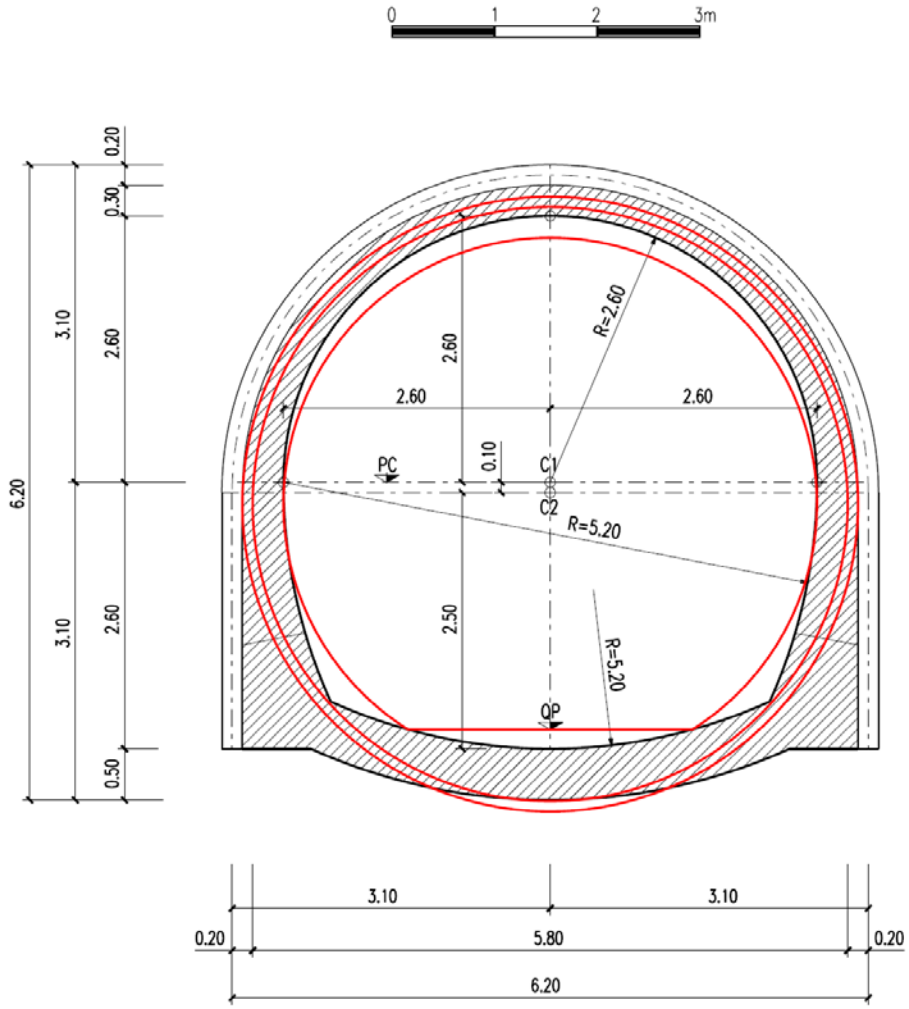


FIG. 2.3 - SOVRAPPOSIZIONE DELLA SEZIONE CORRENTE DEL TRATTO DI GALLERIA DI COMPLETAMENTO DEL DEVIATORE FEREGGIANO CON LA SEZIONE CIRCOLARE CORRENTE DEL TRATTO GIÀ COSTRUITO (PROGETTO ITALSTRADE)

Il raccordo tra le 2 sezioni andrà fatto nel tratto non rivestito (6-7 m) in maniera dolce di modo da evitare gradini o angoli bruschi.

2.2. Gallerie minori

L'adduzione a mare delle acque di piena derivate dalle opere di presa minori realizzate sui rii Rovare e Noce è assicurata dalla realizzazione di due gallerie minori che mettono in comunicazione le due prese con la galleria di adduzione Fereggiano.

La galleria a servizio della presa sul Rovare presenta le seguenti caratteristiche:

- sezione tipo policentrica con diametro di : 3,20 m
- lunghezza complessiva : 208,1 + 37,05 = 245,15 m
- quota all'imbocco a monte : 20,61 m s.m.m.
- quota allo sbocco : 9,92 m s.m.m.
- pendenza longitudinale : 3,55 %
- scabrezza secondo Gauckler – Strickler : 75 $m^{1/3}s^{-1}$

Il manufatto di collegamento della galleria minore con quella di adduzione principale è costituito da un divergente collocato sulla galleria minore, avente lunghezza di circa 37 m, pendenza sempre pari al 8,9 %, e sezione trasversale variabile da quella policentrica da 3,20 m (sezione di monte) a quella policentrica da 5,20 m nella sezione di valle.

Le caratteristiche della galleria a servizio della presa sul Noce:

- sezione tipo policentrica con diametro di : 3,20 m
- lunghezza complessiva : 220,2+34,27 = 254,47 m
- quota all'imbocco a monte : 15,64 m s.m.m.
- quota allo sbocco : 6,86 m s.m.m.
- pendenza longitudinale : 2,5 %
- scabrezza secondo Gauckler – Strickler : 75 $m^{1/3}s^{-1}$

Il manufatto di collegamento della galleria minore con quella di adduzione principale, in analogia con quanto già descritto per il Rovare, è costituito da un divergente collocato sulla galleria minore, avente lunghezza di circa 36,53 m, pendenza sempre pari al 9,76 %, e sezione trasversale variabile da quella policentrica da 3,20 m (sezione di monte) a quella policentrica da 5,20 m nella sezione di valle.

3. LE PORTATE DI RIFERIMENTO

L'attività di progettazione dei manufatti di presa sui Rii Fereggiano, Rovare e Noce è stata condotta mediante la definizione delle portate di riferimento per ciascuno di essi. In particolare, per ciascuno dei tre corsi d'acqua in corrispondenza dell'opera di presa, sono state definite le seguenti grandezze:

- la portata critica di progetto Q_p;
- la portata limite Q_i oltre la quale deve iniziare lo scarico delle acque in eccesso;
- la portata massima che si vuole derivare Q_s verso la galleria in progetto;
- la portata massima che procede nel corso d'acqua a valle del manufatto di captazione Q_v.

Alla grandezza $Q_p$sono stati attribuiti valori di portata associati ad un tempo di ritorno pari a quelli definiti nel Piano di Bacino, associati a Tr =200 anni.

Alla variabile Q_i è stato invece inizialmente associato, in accordo con il PD2007, un valore di portata che si verifica con ritorno statistico prossimo a 2 anni. La scelta è stata dettata dalla necessità di ridurre il più possibile gli eventi di scolmo e quindi l'accesso nella galleria scolmatrice del materiale solido trasportato dalla corrente e dall'esigenza di garantire un deflusso minimo all'interno del corso d'acqua di valle.

La portata da scolmare Q_s è stata valutata invece caso per caso, come si spiegherà in seguito.

Per i rii Noce e Rovare si era già deciso all'epoca del PD2007, di considerare di derivare la quasi totalità della portata di progetto, facendo comunque defluire a valle solo una portata Q_v superiore di almeno un ordine di grandezza della portata nera potenziale che potrebbe affluire nel corso d'acqua.

In proposito occorre rilevare che tutti i corsi d'acqua oggetto di derivazione sono dotati di sistemi duali destinati al convogliamento delle acque reflue aventi come destinazione il depuratore. Tuttavia, al fine di far fronte a situazioni di fallanza della rete fognaria, nel definire la portata Q_v si è tenuto conto di un certo rapporto di diluizione rispetto alla portata nera del bacino.

3.1. Portata del rio Fereggiano

Venendo allo specifico sui diversi corsi d'acqua, la portata di progetto del Rio Fereggiano è stata definita in base a quanto riportato nel Piano di Bacino del Torrente Bisagno, avendo poi cura di verificare le opere anche per le portate indicate nella relazione Bellini/Tubino redatta per conto del Tribunale di Genova a seguito degli eventi alluvionali del 4 Novembre 2011 e che eccedono le portate indicate nel Piano di Bacino.
Il riferimento ufficiale dei dati di portata (Q_p) è dato dunque dai valori di portata con TR=200 anni fissati dal Piano di Bacino dell'Autorità di Bacino ed utilizzati anche per il progetto Definitivo Generale dello Scolmatore del Bisagno del 2007. Tali valori sono:

- Fereggiano Q(200) = 90 m^3/s
- Rovare Q(200) = 26 m^3/s
- Noce Q(200) = 23 m^3/s

Si esaminano di seguito, con maggiore dettaglio, i valori di portata assunti a riferimento affiancandoli con i dati più recenti assunti da analisi condotte a valle dell'evento del 4.11.2011.

3.1.1. Portate di progetto del Fereggiano (Piano di Bacino e PD2007)

Ai valori di portata del Piano di Bacino aveva fatto riferimento il Progetto Definitivo 2007 dello scolmatore Bisagno, Fereggiano, Rovare e Noce che assumeva di derivare alla presa del Fereggiano una portata di 80 m^3/s, a fronte di un valore di portata duecentennale di 90 m^3/s all'altezza della sezione di presa, come indicato in Fig. 3.1.
Si indica di seguito la sezione di presa (all'altezza di via Pinetti – salita Ginestrato) con il numero 3, in aderenza a quanto indicato nella perizia Bellini/Tubino.

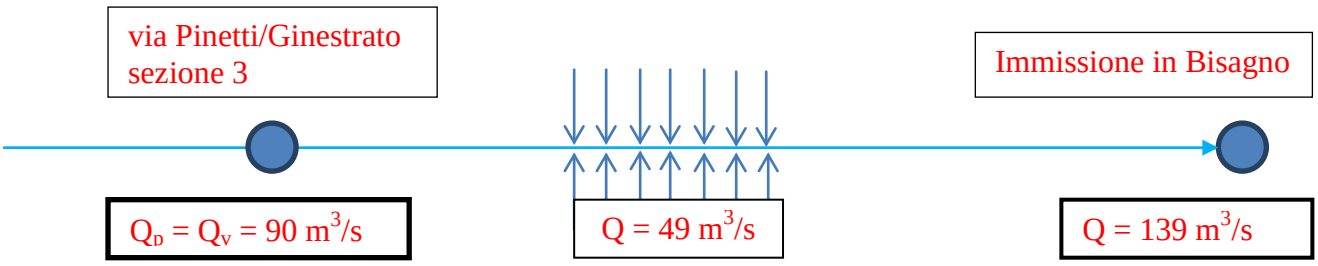


FIG. 3.1 - DISTRIBUZIONE DELLE PORTATE MASSIME ASSUMENDO I VALORI DEL PIANO DI BACINO

Nella progettazione del PD2007 si era inoltre tenuto conto della comunicazione 25909 del 14.06.2004 del Comune di Genova che stabiliva che la portata da scolmare fosse 80 m^3/s e quella da rilasciare a valle fosse 35 m^3/s, a fronte di una portata massima a valle della copertura stradale di via Pinetti di 90 m^3/s, conforme al Piano di Bacino ed a quanto previsto nello studio idraulico realizzato per conto A.S.Ter, e di una portata a valle della sezione di presa prevista in 115 m^3/s in conformità con il Piano di Bacino e con le verifiche idrauliche della nuova copertura eseguite da ITEC Engineering per conto della Regione Liguria/Comune di Genova.

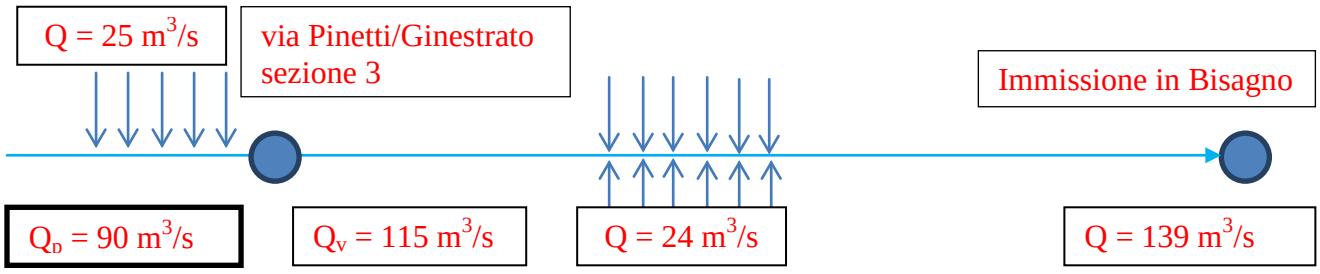


FIG. 3.2 - DISTRIBUZIONE DELLE PORTATE MASSIME ASSUMENDO I VALORI DELLA COMUNICAZIONE PROT. 25909 DEL 14.06.2004 DEL COMUNE DI GENOVA (SITUAZIONE SENZA SCOLMATORE FEREGGIANO)

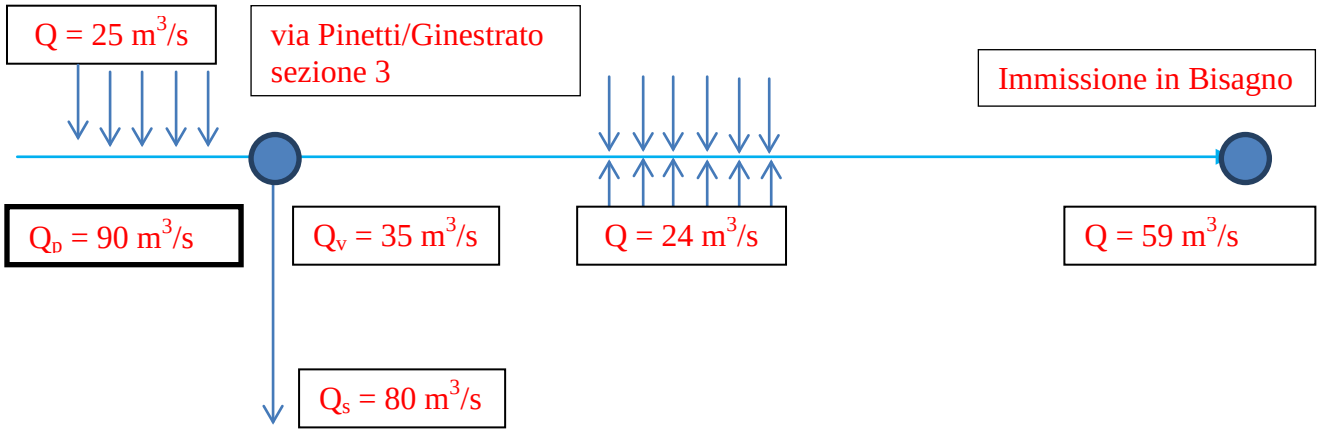


FIG. 3.3 - DISTRIBUZIONE DELLE PORTATE MASSIME ASSUMENDO I VALORI DELLA COMUNICAZIONE PROT. 25909 DEL 14.06.2004 DEL COMUNE DI GENOVA (SITUAZIONE CON SCOLMATORE FEREGGIANO)

La continuità al nodo della presa (nelle Fig. 3.2 e Fig. 3.3) è rispettata nella considerazione che la misura della portata di progetto (90 m^3/s) è fatta in una sezione a monte della stessa e tra questa sezione e quella di presa vi è un ulteriore contributo del bacino per circa 25 m^3/s. Questa precisazione non era indicata nel Piano di Bacino.

Fermo restando il fatto che i valori delle portate di progetto di riferimento pe ril dimensionamento delle opere rimangono quelli del PD2007, concordati e condivisi con l'Autorità di Bacino, in relazione ai quali dovranno essere rispettati appieno i franchi e le norme del vigente Piano di Bacino, si esaminano di seguito le portate stimate per il rio Fereggiano nella perizia eseguita per il Tribunale di Genova dal prof. Tubino e che sembrerebbero essere transitate durante l'evento del 4 Novembre 2011 al fine di analizzare se risulti possibile far si che le opere in progetto, pur con franchi ridotti, siano in grado di gestirli. Tali portate sono:

- Q alla sezione n. 3 – via Ginestrato/via Pinetti: 138 m^3/s
- Q alla sezione n. 5, all'inizio dell'ultimo tratto tombinato: 176 m^3/s

La medesima perizia stima in 65 m^3/s la massima portata transitabile nel tratto terminale coperto del Fereggiano.

Il gruppo di lavoro del Comune di Genova ha confermato che tale valore può essere assunto come valore di riferimento oltre il quale si hanno esondazioni nella parte terminale, sottolineando come le opere che andranno realizzate debbano avere caratteristiche idrauliche tali da evitare, in modo assoluto, che nel tratto terminale possa transitare una portata superiore al valore definito (65 m^3/s).

In aderenza a quanto operato nella perizia Bellini/Tubino, si assume dalla differenza tra portata stimata alla sezione 3 e quella stimata alla sezione di chiusura n. 5 che la portata generata e raccolta dal bacino afferente al rio Fereggiano compreso tra le sezioni n. 3 e n. 5, in occasione dell'evento 4 Novembre 2011, sia stata pari a 176 – 138 = 38 m^3/s come schematizzato nella Fig. 3.4.

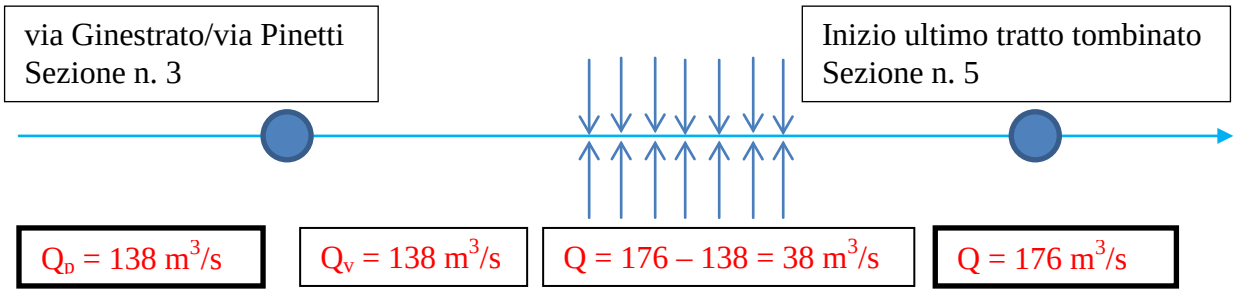


FIG. 3.4 - DISTRIBUZIONE DELLE PORTATE MASSIME IN OCCASIONE DELL'EVENTO 4 NOVEMBRE 2011 (PERIZIA BELLINI/TUBINO)

Da ciò si può dedurre che, assunto il valore massimo di portata transitabile nel tratto terminale che, facendo riferimento all'evento del 4 Novembre 2011, sarebbe potuta essere pari a 65 m^3/s, la massima portata rilasciabile a valle dell'opera di presa Fereggiano (prevista alla sezione n. 3) è 65 – 38 = 27 m^3/s.
Data dunque la portata transitata alla sezione n. 3 pari a 138 m^3/s, la portata minima che si sarebbe dovuto derivare, in occasione dell'evento del 4 Novembre 2011, per evitare l'esondazione del Fereggiano nel tatto terminale, è pari a 138 – 27 = 111 m^3/s.
Tale valore può essere assunto come portata di verifica di funzionamento estremo delle opere in progetto (cfr. Fig. 3.5).

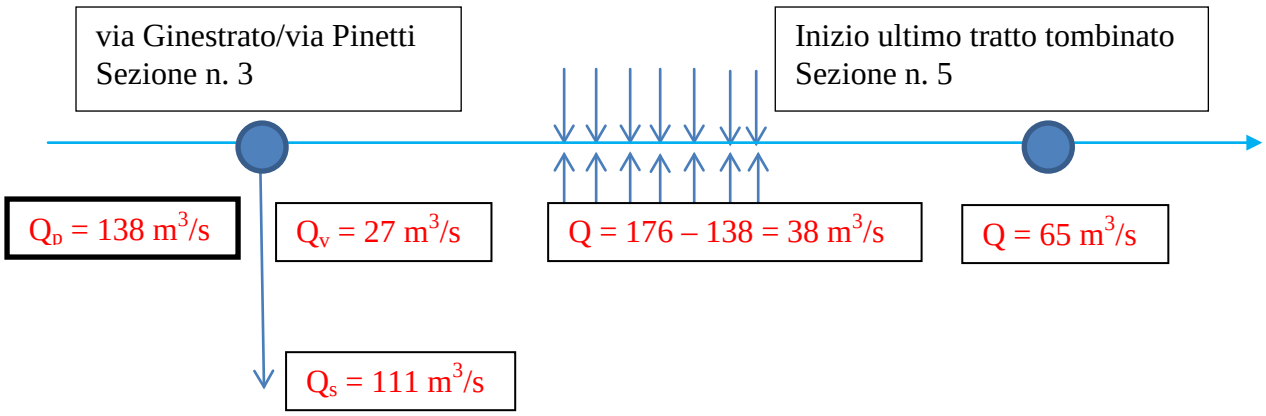


FIG. 3.5 - DISTRIBUZIONE DELLE PORTATE DA OTTENERE CON LE OPERE, ASSUMENDO A RIFERIMENTO LE PORTATE STIMATE IN OCCASIONE DELL'EVENTO 4 NOVEMBRE 2011 (PERIZIA BELLINI/TUBINO)

Il gruppo di lavoro del Comune di Genova ha chiesto di poter verificare quale sia il massimo valore di portata che possa essere smaltito dall'opera di presa Fereggiano e dalla galleria.

Dallarelazione Tubino si è ricavato infatti per la sezione di via Ginestrato/via Pinetti una portata pari a 138 m^3/s: nel progetto Italstrade era stato considerato un valore di portata nella stessa sezione pari a 137 m^3/s (associata nella relazione idrologica di progetto ad un Tr di 1000 anni).

La perizia Bellini/Tubino arriva a concludere che se all'epoca dell'evento alluvionale del 4 novembre 2011 ci fosse stato in funzione il deviatore Fereggiano, l'intera sua portata transitante nella sezione di via Ginestrato/via Pinetti avrebbe potuto essere scolmata, consentendo dunque a valle, ossia nei pressi del tratto coperto finale del Fereggiano, il transito della portata residua di 38 m^3/s, tollerata in quel tratto.

E' lecito chiedersi dunque quale sia la massima portata che il pozzo di presa e l'intera opera di presa è in grado di intercettare, fermo restando il sua ottimale dimensionamento per la portata di progetto pari a 80 m^3/s.

La medesima relazione Bellini/Tubino stima in 176 m^3/s la massima portata idrologicamente transitante (ma idraulicamente non tollerabile) nel tratto terminale all'ingresso nel Bisagno in funzione del bacino contribuente; se l'intera portata di 138 m^3/s venisse scolmata, a valle dovrebbe transitare soltanto una portata di: 176 – 138 = 38 m^3/s, sensibilmente inferiore all'attuale capacità del tratto di valle fissata nella medesima perizia in 65 m^3/s (portata massima tollerata nel tratto compreso tra la copertura di largo Merlo e la copertura terminale).

La relazione Bellini/Tubino precisa infine che il tempo di ritorno associato alla portata di 176 m^3/s nel tratto terminale è superiore a 200 anni così come la portata stimata alla sezione 3 (via Ginestrato/via Pinetti) per l'evento del 4 novembre 2011 pari a 138 m^3/s, il tutto come descritto nelle specchietto di seguito:

TAB. 3.1 - PORTATE DI RIFERIMENTO DISPONIBILI

Dati e documenti di riferimento	**Portata al picco in via Ginestrato/via Pinetti (sezione 3)**	**Portata massima stimata nel tratto terminale (sezione 5)**	**TR (anni)**
Evento 4.11.2011 (relazione Bellini/Tubino)	138 m^3/s	176 $m^{3/}$s	>200 (≈ 1000, secondo statistica progetto Italstrade)
Relazione idrologica Progetto Italstrade	137 m^3/s 124 m^3/s		1000 anni 500 anni
Piano di bacino a monte della presa (Tr = 200 anni)	90 m^3/s	139 m^3/s	200
Piano di bacino a valle della presa (Tr = 200 anni)	115 m^3/s	139 m^3/s	200

Si assume per la portata massima con la quale verificare il funzionamento dell'opera di presa sul Fereggiano ubicata alla sezione n. 3 del Fereggiano il valore di 111 m^3/s.

Con tale valore (che è superiore a quello associato a TR 200 anni dal Piano di bacino), la portata rilasciata a valle nell'evento del 4 novembre 2011 sarebbe stata 138 – 111 = 27 m^3/s.

Siccome tra la sezione 3 e la sezione 5, durante il medesimo evento, la portata è cresciuta di ulteriori, 176 – 138 = 38 m^3/s, la portata totale transitante a valle sarebbe stata 38 + 27 = 65 m^3/s compatibile con la portata massima ammessa a valle, stimata, nella medesima perizia Bellini/Tubino, (pag. 173 della Perizia) proprio i 65 m^3/s.

Si osserva infine che il TR associato alla portata di 137 m^3/s assunta nel progetto Italstrade come portata di riferimento e di dimensionamento delle opere è pari a 1000 anni. Tale è anche il TR della portata che è stata stimata per l'evento del 4 Novembre 2011 (138 m^3/s, quindi pressochè identica a quella assunta nel progetto Italstrade).

3.1.2. Portata del rio Noce

Per il Rio Noce si è deciso di derivare, così come richiesto dal Comune di Genova, la quasi totalità della portata del corso d'acqua (garantendo, in alveo, a valle dell'opera di presa un deflusso minimo stimato in 0,30 m^3/s) a causa della gravissima insufficienza idraulica dei tratti tombati a valle dell'opera di captazione. La portata da derivare è stato definita pari all'intera portata di piena nella sezione considerata, pari cioè a 23 m^3/s (portata di progetto assunta nel PD 2007).
Il progetto Italstrade associava al Rio Noce la seguente statistica di piena:
$Q(500) = 28\ m^3/s$
$Q(1000) = 30\ m^3/s$.

In occasione di incontri con il Comune di Genova svoltisi nell'ambito del progetto PD2007, lo stesso Comune ha espresso la volontà che l'opera di presa derivasse tutta la portata in arrivo dal by pass previsto nel progetto di 'Sistemazione idraulica del Rio Noce nel tratto compreso tra la scuola d'infanzia "Delia Repetto" in salita superiore Noce ed il Pozzo "Carena" all'incrocio tra via Benedetto XV e C.so Europa', in quanto la derivazione e il recapito della portata ordinaria in alveo dovrà avvenire a monte dell'opera in progetto.
La portata assunta nel PD 2007 e qui confermata (23 m^3/s), secondo la statistica del Progetto Italstrade, ha tempo di ritorno compreso tra 200 e 500 anni.

3.1.3. Portata del Rio Rovare

Considerazioni e richieste analoghe a quelle condotte per il Rio Noce, sempre da parte del Comune, hanno condotto a derivare dal Rio Rovare quasi tutta la portata di progetto, pari a 26 m^3/s come assunto nel Progetto definitivo del 2007 (il progetto Italstrade associava al Rio Rovare la seguente statistica di piena:
$Q(500) = 24\ m^3/s$,
$Q(1000) = 27\ m^3/s$.

La portata assunta nel PD 2007 e qui confermata (26 m^3/s), secondo la statistica del Progetto Italstrade, ha tempo di ritorno compreso tra 500 e 1000 anni.

3.1.4. Portata totale

Nella tabella di seguito si riportano sinteticamente i valori di portata sopra descritti e presi a riferimento per il dimensionamento dei manufatti.

Si sottolinea in questa sede che la portata di progetto della galleria Fereggiano è pari a 96 m^3/s. Tale valore risulta da considerazioni, già formulate nel progetto preliminare e definitivo approvato, sulla non contemporaneità dei colmi di piena dei corsi d'acqua in studio: essa risulta essere la somma della portata di progetto scolmata dal Fereggiano (80 m^3/s), e di circa un terzo delle portate derivate dai due rii minori (7 m^3/s per il rio Noce + 9 m^3/s per il Rovare).
A tal proposito rimane da osservare come il Progetto Italstrade aveva riportato una analisi idrologica dei tre corsi d'acqua ed aveva stabilito che il picco di pena del Fereggiano si produce per una durata di pioggia di 60 minuti mentre per i rii minori Rovare e Noce questo avviene per una durata di 15 minuti.
Lo studio dei 3 idrogrammi aveva portato i progettisti a ritenere che il picco di piena si sarebbe formato al minuto 60 dell'evento pluviometrico di progetto, co la somma delle seguenti portate:

Fereggiano: 136,60 m^3/s
Noce: 20,61 m^3/s
Rovare: 19,11 m^3/s

Totale: 176,32 m^3/s

A tale evento era stato associato un TR di 1000 anni.
Nel PD2007 e nel precedente progetto preliminare del 2000, si era invece assunto che le portate massime di Rovare e Noce da sommare alla portata di piena TR200 del Fereggiano (pari nel PP 2000 a 35 m^3/s ed incrementata a 80 m^3/s nel PD 2007, in conformità con quanto definito nel Piano di Bacino), così come definita dal Piano di Bacino, fossero pari ad un terzo delle portate massime sicchè ne deriva:

Fereggiano: 90 m^3/s
Noce: 23/3 = 7 m^3/s
Rovare: 26/3 = 9 m^3/s

Totale: 106 m^3/s

e che le portate da derivare fossero:

Fereggiano: 80 m^3/s
Noce: 23/3 = 7 m^3/s
Rovare: 26/3 = 9 m^3/s

Totale: 96 m^3/s
In definitiva si ha dunque:

TAB. 3.2 - PORTATE DI RIFERIMENTO PER IL DIMENSIONAMENTO DELLE OPERE DI PRESA

RIO FEREGGIANO **Sup. Bacino = 3 km²**	**RIO ROVARE** **Sup. Bacino = 0.55 km²**	**RIO NOCE** **Sup. Bacino = 0.49 km²**
Q_p [m^3/s]= 90,0	Q_p [m^3/s]= 26,00	Q_p [m^3/s]= 23,00
Q_i [m^3/s]= 5,00	Q_i [m^3/s]= 0,07	Q_i [m^3/s]= 0,10
Q_s [m^3/s]= 80,00	Q_s [m^3/s]= 26,00	Q_s [m^3/s]= 23,00
Q_v [m^3/s]= 28,0	Q_v [m^3/s]= 0,30	Q_v [m^3/s]= 0,00

La portata massima contemporanea nella galleria Fereggiano con la quale verificare il funzionamento delle opere è data dalla massima portata scolmata del Fereggiano (111 m^3/s) e dai valori delle portate degli altri 2 corsi d'acqua ridotte ad un terzo per tenere conto della diversità di tempi di corrivazione dei bacini e quindi delle non contemporaneità dei picchi di piena.
La massima portata che cimenta la galleria Fereggiano (per la quale verificare le opere) è dunque pari a 111 + 9 + 7 = 127 m^3/s, avendo arrotondato i valori delle portate di Rovare e Noce.
Sulle base delle portate su menzionate, si possono individuare i 3 scenari che nella relazione idraulica di progetto sono studiati:

Scenario 1: portate duecentennali scolmate, avendo assunto a riferimento i dati del Piano di Bacino e PD2007
Fereggiano 80 m^3/s
Rovare 9 m^3/s (~ 1/3 di 26)
Noce 7 m^3/s (~ 1/3 di 23)

Totale 96 m^3/s

Scenario 2: portate estreme, con picchi da non sommare perché non contemporanei (evento 4 Novembre 2011)

Fereggiano 111 m^3/s
Rovare 9 m^3/s (~ 1/3 di 26)
Noce 7 m^3/s (~ 1/3 di 23)

Totale 127 m^3/s

Scenario 3: portate estreme, contemporanee (evento 4 Novembre 2011)

Fereggiano 111 m^3/s
Rovare 26 m^3/s
Noce 23 m^3/s

Totale 160 m^3/s

Lo scenario estremo di funzionamento delle opere è dato la somma della portata scolmata massima prevista alla presa Fereggiano (111 m^3/s) e delle massime portate degli altri due rii minori:

TAB. 3.3 - PORTATE ESTREME DI VERIFICA DELLE OPERE

RIO FEREGGIANO **Sup. Bacino = 3 km^2**	**RIO ROVARE** **Sup. Bacino = 0,55 km^2**	**RIO NOCE** **Sup. Bacino = 0,49 km^2**
Qs [m^3/s]= 111,00	Qs [m^3/s]= 26,00	Qs [m^3/s]= 23,00

Tale scenario fornisce una portata totale allo sbocco di 160 m^3/s, pari alla portata cinquecentennale assunta nel progetto Italstrade.
E' da rilevare come l'idrogramma (associato a TR = 1000 anni) del rio Fereggiano (analizzato nel progetto Italstrade) sia tale da presentare portate superiori a 111 m^3/s per una durata di quasi 25 minuti (Cfr. Fig. 3.6).
Assumendo che per tale durata, l'opera di presa sia in grado di derivare tale portata (111 m^3/s), la possibilità che essa si sommi ai valori di picco degli idrogrammi dei 2 rii minori (non a tali valori divisi per 3) è concreta e quindi lo scenario qui considerato appare comunque indicativo di una situazione realizzabile.

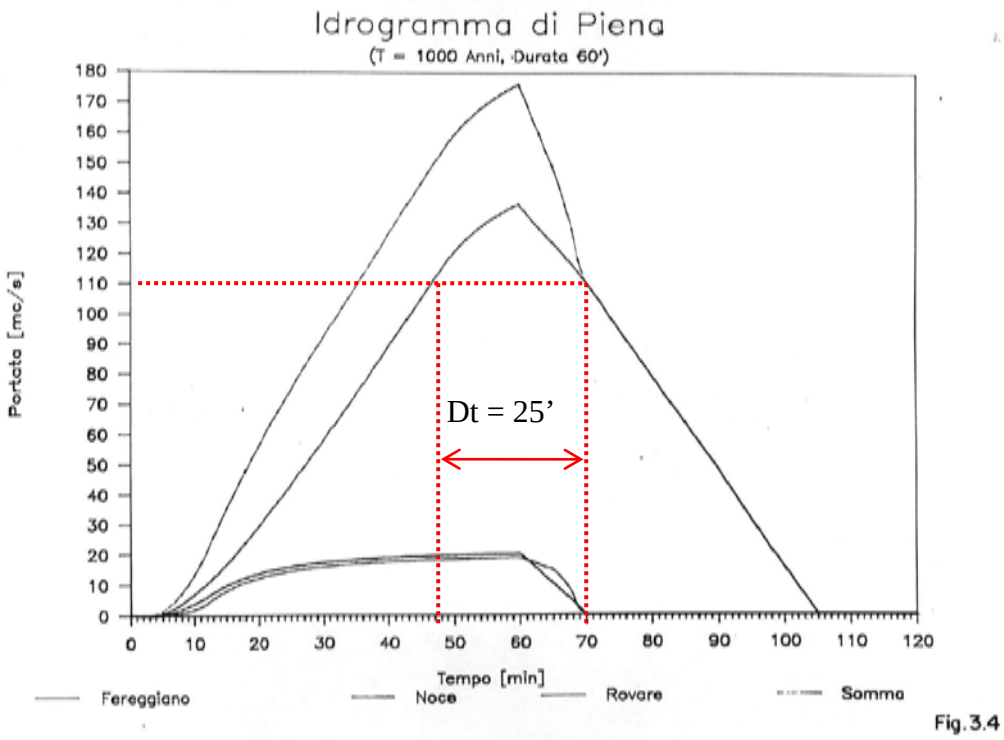


FIG. 3.6 - IDROGRAMMI DI PIENA DEI RII FEREGGIANO, ROVARE E NOCE (PROGETTO ITALSTRADE)

Quindi i tre scenari considerati si possono associare, indicativamente, ai seguenti tempi di ritorno:

- scenario 1 (Piano di bacino): TR = 200 anni
- scenario 2 (evento 4 Novembre 2011): 200<TR<500 anni
- scenario 3 (evento 4 Novembre 2011 e contemporaneità dei picchi di piena delle portate derivate): TR = 1000 anni

4. DIMENSIONAMENTO PRELIMINARE DELL'OPERA

Le caratteristiche geometriche ed idrauliche della galleria principale sono state assunte pressochè identiche a quelle del progetto Italstrade, assumendo in particolare una livelletta costante del 0,3 % escludendo il cambio di pendenza all'interno per evitare la formazione di risalti idraulici non controllati interni alla galleria.
La sezione adottata è equivalente a quella già realizzata a sezione circolare D 5,20 m.
Inoltre, a causa del notevole incremento della portata di piena derivata dall'opera di presa da realizzare sul rio Fereggiano, cresciuta da 35 ad 80 m^3/snel progetto PD 2007 e che gli eventi del 4 novembre 2011 hanno portato ad incrementare (quanto a verifica) fino a 111 m^3/s su richiesta del Comune di Genova, la galleria è stata verificata per un funzionamento in pressione come peraltro già previsto nel progetto Italstrade. Per quanto riguarda invece le altre due confluenze (Rovare e Noce), le modeste portate in gioco non hanno richiesto ulteriori approfondimenti e la soluzione è quella del PD 2007 sviluppata dal medesimo ATI di progettisti.
E' da rilevare che il funzionamento delle gallerie secondarie prevede, alla confluenza con la galleria principale, la formazione di un risalto idraulico, nel passaggio da corrente rapida e lenta.
Nei paragrafi che seguono vengono elencati i criteri di progetto che hanno guidato il dimensionamento idraulico dell'opera, i calcoli idraulici sviluppati per la galleria principale.

4.1. Criteri di progetto

La geometria della galleria principale di derivazione delle portate di piena è stata definita sulla base dei seguenti criteri di progetto:

- collocazione dell'opera di presa sul torrente Fereggiano nella posizione individuata in sede di progetto preliminare;
- collocazione dell'opera di presa sul rio Rovare nella posizione individuata in sede di progetto preliminare;
- collocazione dell'opera di presa sul rio Noce nella posizione individuata in sede di progetto preliminare;
- sviluppo del tratto già realizzato del deviatore Fereggiano per un tratto di circa 909 m al quale la galleria principale si deve collegare;
- collocazione dell'opera di sbocco a mare come prevista dal PD2007;

- raggio di curvatura minimo della galleria non inferiore a 140 m (nella curva inziale subito a valle del pozzo di immissione);
- scabrezza del rivestimento della galleria paria 75 $m^{1/3}s^{-1}$ secondo la formulazione di Gauckler – Strickler;
- sagomatura dei raccordi con le opere di presa in modo tale da permettere, attraverso tali raccordi, l'ingresso di uomini e mezzi per l'esecuzione delle periodiche ispezioni e manutenzioni ordinarie e straordinarie;
- scelta della livelletta in modo tale da esitare a mare la portata di piena di progetto senza ingenerare risalti all'interno della galleria;
- scelta della livelletta della galleria in modo tale da assicurare, in corrispondenza dell'interferenza con la linea ferroviaria esistente Genova – La Spezia, una distanza minima tra le due infrastrutture pari a 2,50 m circa (in questa sezione è prevista una sezione di intervento particolarmente robusta ed articolata, B1*);
- scelta della livelletta della galleria in modo tale da assicurare, in corrispondenza dell'interferenza con il futuro quadruplicamento della linea ferroviaria Genova – La Spezia, una distanza minima tra le due infrastrutture pari a3 m;
- scelta della livelletta di proseguimento oltre i sottopassi delle gallerie con la medesima livelletta scelta per il primo tratto e per il tratto di galleria già realizzato ossia pari a 0,3 % onde evitare che in corrispondenza di eventuali cambi di pendenza possano formarsi risalti idraulici non controllati nella galleria principale.

4.2. Dimensionamento preliminare della galleria principale

Le portate di piena di progetto che devono essere convogliate dalla galleria principali sono pari a 80 m^3/s per il torrente Fereggiano, 9 m^3/s per il rio Rovare ed infine 7 m^3/s per il rio Noce. Complessivamente quindi la galleria deve convogliare a mare una portata massima pari a 96 m^3/s.
Sulla base della geometria sopra specificata, sono state condotte le verifiche idrauliche, descritte ai paragrafi che seguono, al fine di determinare:

- le condizioni di moto in galleria al variare della portata lungo la galleria stessa, quest'ultima a seguito dell'immissione delle portate derivate dal torrente Fereggiano e dai rii Rovare e Noce;
- l'influenza della variazione del livello medio del mare sulle condizioni idrauliche di deflusso allo sbocco;

- il moto in galleria per valori prefissati di portata (80, 80+9 = 89, 80 + 9 + 7 = 96 e 127 e 160 m^3/s), secondo gli scenari delle portate di riferimento descritti al paragrafo precedente.

4.2.1. Condizioni idrauliche lungo la galleria: considerazioni preliminari

La galleria di derivazione delle portate di piena presenta, lungo il suo sviluppo, un'unica pendenza longitudinale pari al 3 ‰.
La portata derivata dal Fereggiano immessa in galleria, prima di raggiungere il mare, riceve due contributi, cioè quello proveniente dal rio Rovare (9 m^3/s) e quello proveniente dal Noce (7 m^3/s). Tali confluenze non generano problemi di sorta in quanto i due contributi sono assai modesti se comparati alla portata in arrivo da monte.
In occasione del funzionamento con le portate di scenario 1, la galleria lavora a pelo libero e con corrente in condizioni lente, prossime a quelle critiche.
Il funzionamento è stabile perché caratterizzato da una corrente tendenzialmente poco condizionabile dalle portate immesse alle due confluenze: tale corrente non risente in maniera significativa delle immissioni e prosegue nel suo moto leggermente subcritico.
L'incremento di portata dovuto alle 2 confluenze non è tale da modificare la condizione di deflusso che rimane subcritica (si veda tabella di seguito).
Per giunta, le condizioni subcritiche (associate a velocità di deflusso sempre piuttosto sostenute e superiori a 5 m/s) allontanano la possibilità di formazione di rollwaves in galleria con possibili e non auspicabili rincolli della corrente alla calotta della galleria con creazione di risacche di depressione che potrebbero lesionare la calotta ed il rivestimento.
Ne consegue che la corrente in transito verso mare presenterà unicamente dei modesti sopralzi in corrispondenza delle confluenze, per poi raccordarsi nuovamente ai valori di tirante di moto uniforme subcritico.

TAB. 4.1 - SCALA DELLE PORTATE DELLA GALLERIA FEREGGIANO A MOTO UNIFORME, PER PENDENZA 0,3 % (IN ROSSO LE CONDIZIONI DI MOTO SUPERCRITICO)

scala delle portate galleria Fereggiano - policentrica

Ks ($m^{1/3} s^{-1}$)	i	D (m)								
75	0,30%	5,2								
tirante, y (m)	**grado di riempimento, %**	**sezione liquida, A (m^2)**	**contorno bagnato, C (m)**	**raggio idrualico, RH (m)**	**velocità media, v (m/s)**	**portata, Q (m^3/s)**	**specchio liquido, b (m)**	**energia specifica, H (m)**	**Numero di Froude, Fr**	**Contributi di portata**
0	0,00%	0	0	0,00	0,00	0,00	0	0,00	0	
0,2	3,85%	0,38	2,88	0,13	1,06	0,40	2,86	0,26	0,76	
0,4	7,69%	1,075	4,20	0,26	1,66	1,78	4	0,54	0,84	
0,6	11,54%	1,93	4,68	0,41	2,28	4,39	4,4	0,86	0,94	
0,8	15,38%	2,83	5,14	0,55	2,76	7,81	4,56	1,19	0,99	
1	19,23%	3,75	5,57	0,67	3,16	11,83	4,7	1,51	1,01	
1,2	23,08%	4,7	5,96	0,79	3,51	16,48	4,82	1,83	1,02	
1,4	26,92%	5,68	6,40	0,89	3,79	21,55	4,92	2,13	1,02	
1,6	30,77%	6,67	6,73	0,99	4,08	27,24	5,06	2,45	1,03	
1,8	34,62%	7,68	7,20	1,07	4,29	32,94	5,08	2,74	1,02	
2	38,46%	8,7	7,61	1,14	4,49	39,07	5,13	3,03	1,01	
2,2	42,31%	9,73	8,01	1,21	4,68	45,50	5,17	3,31	1,01	
2,4	46,15%	10,77	8,41	1,28	4,84	52,17	5,19	3,60	1,00	
2,6	50,00%	11,80	8,82	1,34	4,99	58,85	5,2	3,87	0,99	
2,8	53,85%	12,85	9,23	1,39	5,12	65,82	5,18	4,14	0,98	
3	57,69%	13,88	9,62	1,44	5,25	72,80	5,14	4,40	0,97	
3,2	61,54%	14,9	10,03	1,49	5,35	79,69	5,06	4,66	0,95	Fereggiano
3,4	65,38%	15,90	10,44	1,52	5,44	86,46	4,95	4,91	0,94	Fereggiano + Rovare
3,6	69,23%	16,88	10,87	1,55	5,51	92,99	4,8	5,15	0,93	
3,8	73,08%	17,82	11,32	1,57	5,56	99,06	4,61	5,38	0,91	Fereggiano + Rovare + Noce
4	76,92%	18,72	11,78	1,59	5,59	104,72	4,38	5,59	0,89	
4,2	80,77%	19,57	12,26	1,60	5,61	109,80	4,1	5,80	0,87	
4,4	84,62%	20,35	12,80	1,59	5,60	113,87	3,75	6,00	0,85	
4,6	88,46%	21,06	13,38	1,57	5,56	117,06	3,32	6,17	0,83	
4,8	92,31%	21,67	14,06	1,54	5,48	118,78	2,77	6,33	0,80	
5	96,15%	22,16	14,94	1,48	5,34	118,40	2	6,45	0,76	
5,2	100,00%	22,43	16,99	1,32	4,94	110,89	0	6,45	0,69	

La galleria dall'opera di presa Fereggiano fino all'immissione del Rovare funziona a pelo libero con grado di riempimento prossimo all'80% fino ad una portata di circa 110 m^3/s che è anche la portata massima verificata in laboratorio in corrispondenza della quale non si verifica ancora l'ingolfamento del pozzo di carico (come provato dalle prove in laboratorio realizzate nell'ambito del PD2007).

La corrente è lenta (Fr = 0,87) e la velocità accettabile, ancorchè con valori ragguardevoli (5,61 m/s).

Come si vede, la corrente si mantiene sempre lenta tranne in corrispondenza di portate comprese tra 12 e 50 m^3/s quando il numero di Froude si avvicina al valore unitario, indicante una condizione di flusso di moto uniforme coincidente sostanzialmente con la condizione di moto critico.

Il confronto delle scale di portata associate ad una sezione perfettamente circolare quale era prevista nel progetto Italstrade e quella della sezione policentrica adottata, mette in evidenza una maggiore capacità di portata della sezione adottata che, a parità di grado di riempimento, convoglia una portata superiore di circa 7-9 %.

Per un grado di riempimento del 50%, le portate nei due casi sono:

- sezione circolare: 52 m^3/s
- sezione policentrica: 59 m^3/s (ossia + 9 %)

Per un grado di riempimento del 80%, le portate nei due casi sono:

- sezione circolare: 102 m^3/s
- sezione policentrica: 109 m^3/s (ossia + 9 %)

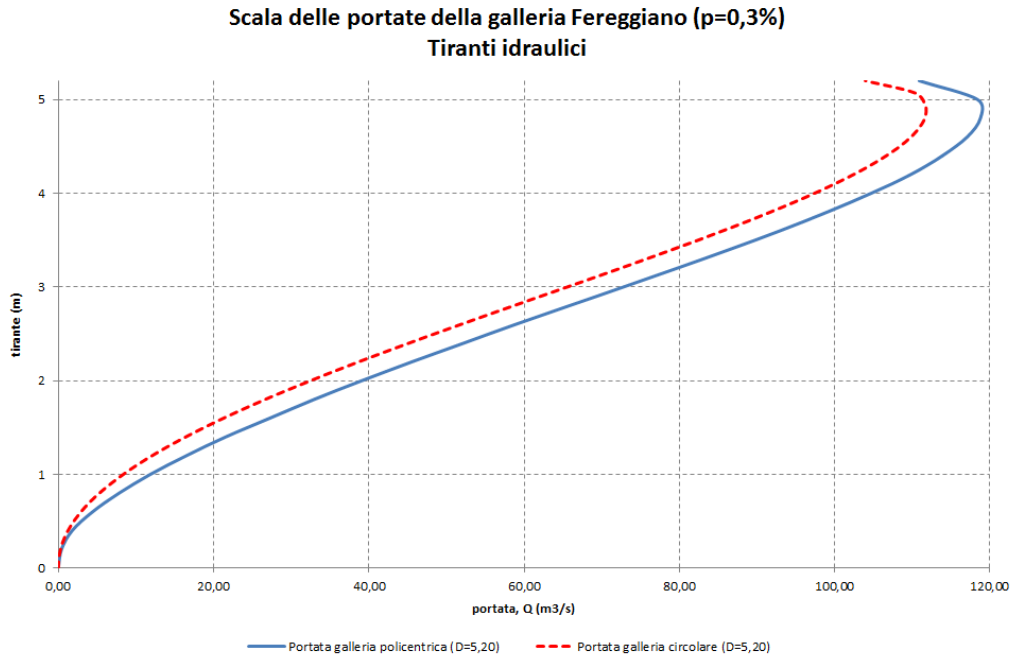


FIG. 4.1 - SCALA DELLE PORTATE DI UNA SEZIONE CIRCOLARE D = 5,20 E LA POLICENTRICA DI PROGETTO – CONFRONTO DEI TIRANTI

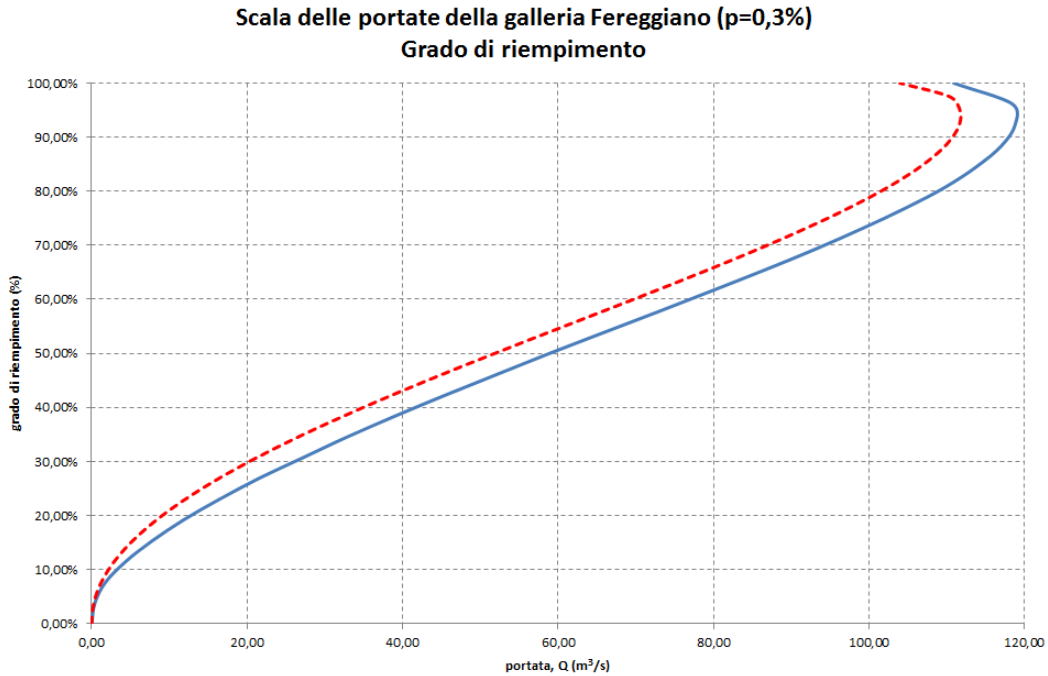


FIG. 4.2 - SCALA DELLE PORTATE DI UNA SEZIONE CIRCOLARE D = 5,20 E LA POLICENTRICA DI PROGETTO – CONFRONTO DEI GRADI RIEMPIMENTO

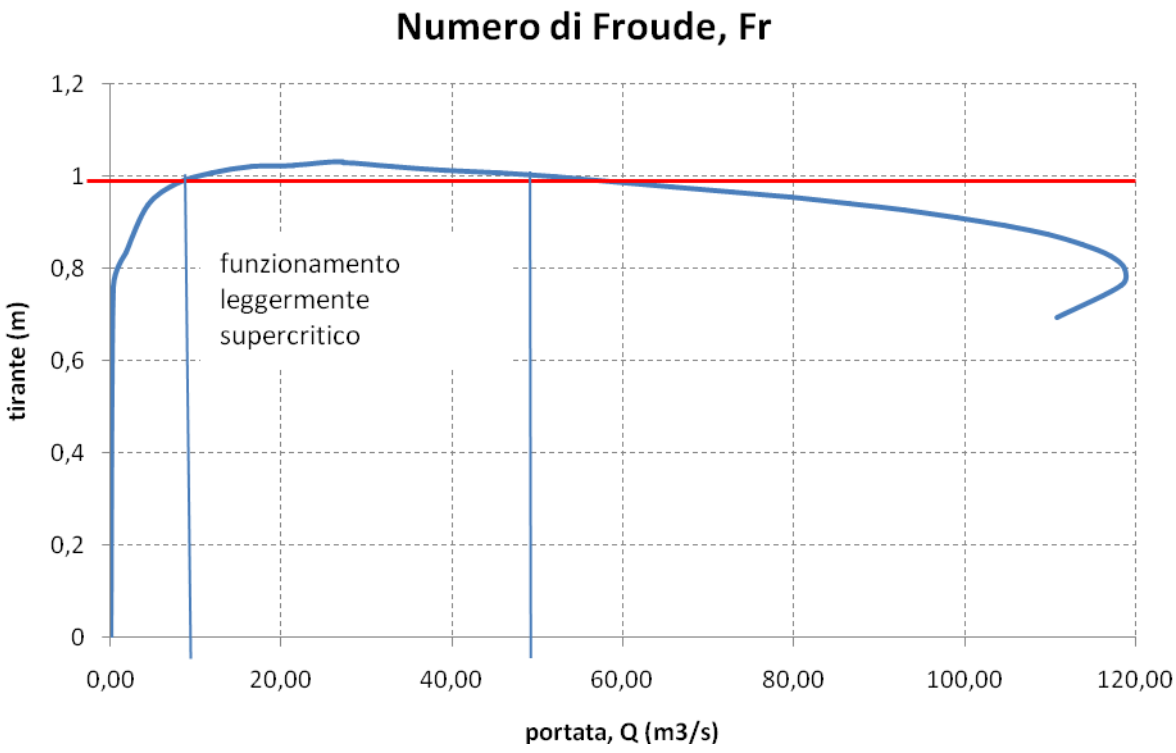


FIG. 4.3 - ANDAMENTO DEL NUMERO DI FROUDE AL VARIARE DELLA PORTATA CONVOGLIATA

La massima portata di moto uniforme a pelo libero si ha per un grado di riempimento del 92 % ed è pari a 118 m^3/s.

Oltre tale valore si può ritenere che la galleria lavori in pressione.

In effetti, come si può vedere in seguito, nelle simulazioni di funzionamento a moto permanente della galleria, per lo scenario 1 associato ad una portata massima inferiore a 118 m^3/s (96 m^3/s, portata max allo sbocco), la galleria lavora sempre a pelo libero.

Per lo scenario 2 (127 m^3/s, portata massima allo sbocco associata all'evento del 4 Novembre 2011), la galleria lavora in pressione per lungo tratto e ritorna a pelo libero in prossimità del cambio di pendenza di valle, all'inizio del tratto a ferro di cavallo allorquando si ha anche un significativo incremento della sezione utile.

A titolo puramente indicativo si riportano di seguito anche i calcoli delle capacità di portata della galleria per pendenza superiori pari a 0,4 % e 0,5 %.

Si può notare come, aumentando la pendenza, si estenda il campo di portata entro il quale la galleria funziona in condizioni supercritiche, anche se i numeri di Froude rimangono sempre nell'intorno del valore unitario.

TAB. 4.2 - SCALA DELLE PORTATE DELLA GALLERIA FEREGGIANO A MOTO UNIFORME, PER PENDENZA 0,4 % (IN ROSSO LE CONDIZIONI DI MOTO SUPERCRITICO)

scala delle portate galleria Fereggiano - policentrica										
Ks ($m^{1/3}$ s^{-1})	i	D (m)								
75	0,40%	5,2								
tirante, y (m)	grado di riempimento, %	sezione liquida, A (m^2)	contorno bagnato, C (m)	raggio idrualico, RH (m)	velocità media, v (m/s)	portata, Q (m^3/s)	specchio liquido, b (m)	energia specifica, H (m)	Numero di Froude, Fr	Contributi di portata
0	0,00%	0	0	0,00	0,00	0,00	0	0,00	0	
0,2	3,85%	0,38	2,88	0,13	1,23	0,47	2,86	0,28	0,88	
0,4	7,69%	1,075	4,20	0,26	1,91	2,06	4	0,59	0,97	
0,6	11,54%	1,93	4,68	0,41	2,63	5,07	4,4	0,95	1,08	
0,8	15,38%	2,83	5,14	0,55	3,19	9,02	4,56	1,32	1,14	
1	19,23%	3,75	5,57	0,67	3,64	13,66	4,7	1,68	1,16	
1,2	23,08%	4,7	5,96	0,79	4,05	19,03	4,82	2,04	1,18	
1,4	26,92%	5,68	6,40	0,89	4,38	24,88	4,92	2,38	1,18	
1,6	30,77%	6,67	6,73	0,99	4,72	31,45	5,06	2,73	1,19	
1,8	34,62%	7,68	7,20	1,07	4,95	38,03	5,08	3,05	1,18	
2	38,46%	8,7	7,61	1,14	5,19	45,12	5,13	3,37	1,17	
2,2	42,31%	9,73	8,01	1,21	5,40	52,54	5,17	3,69	1,16	
2,4	46,15%	10,77	8,41	1,28	5,59	60,24	5,19	3,99	1,15	
2,6	50,00%	11,80	8,82	1,34	5,76	67,96	5,2	4,29	1,14	
2,8	53,85%	12,85	9,23	1,39	5,91	76,00	5,18	4,58	1,13	
3	57,69%	13,88	9,62	1,44	6,06	84,07	5,14	4,87	1,12	Fereggiano
3,2	61,54%	14,9	10,03	1,49	6,18	92,02	5,06	5,14	1,10	Fereggiano + Rovare
3,4	65,38%	15,90	10,44	1,52	6,28	99,84	4,95	5,41	1,09	
3,6	69,23%	16,88	10,87	1,55	6,36	107,37	4,8	5,66	1,07	Fereggiano + Rovare + Noce
3,8	73,08%	17,82	11,32	1,57	6,42	114,39	4,61	5,90	1,05	
4	76,92%	18,72	11,78	1,59	6,46	120,92	4,38	6,13	1,03	
4,2	80,77%	19,57	12,26	1,60	6,48	126,79	4,1	6,34	1,01	
4,4	84,62%	20,35	12,80	1,59	6,46	131,49	3,75	6,53	0,98	
4,6	88,46%	21,06	13,38	1,57	6,42	135,17	3,32	6,70	0,96	
4,8	92,31%	21,67	14,06	1,54	6,33	137,15	2,77	6,84	0,92	
5	96,15%	22,16	14,94	1,48	6,17	136,71	2	6,94	0,88	
5,2	100,00%	22,43	16,99	1,32	5,71	128,04	0	6,86	0,80	

TAB. 4.3 - SCALA DELLE PORTATE DELLA GALLERIA FEREGGIANO A MOTO UNIFORME, PER PENDENZA 0,5 % (IN ROSSO LE CONDIZIONI DI MOTO SUPERCRITICO)

scala delle portate galleria Fereggiano - policentrica										
Ks ($m^{1/3} s^{-1}$)	i	D (m)								
75	0,50%	5,2								
tirante, y (m)	grado di riempimento, %	sezione liquida, A (m^2)	contorno bagnato, C (m)	raggio idrualico, RH (m)	velocità media, v (m/s)	portata, Q (m^3/s)	specchio liquido, b (m)	energia specifica, H (m)	Numero di Froude, Fr	Contributi di portata
0	0,00%	0	0	0,00	0,00	0,00	0	0,00	0	
0,2	3,85%	0,38	2,88	0,13	1,37	0,52	2,86	0,30	0,98	
0,4	7,69%	1,075	4,20	0,26	2,14	2,30	4	0,63	1,08	
0,6	11,54%	1,93	4,68	0,41	2,94	5,67	4,4	1,04	1,21	
0,8	15,38%	2,83	5,14	0,55	3,56	10,08	4,56	1,45	1,27	
1	19,23%	3,75	5,57	0,67	4,07	15,28	4,7	1,85	1,30	
1,2	23,08%	4,7	5,96	0,79	4,53	21,28	4,82	2,24	1,32	
1,4	26,92%	5,68	6,40	0,89	4,90	27,82	4,92	2,62	1,32	
1,6	30,77%	6,67	6,73	0,99	5,27	35,16	5,06	3,02	1,33	
1,8	34,62%	7,68	7,20	1,07	5,54	42,52	5,08	3,36	1,32	
2	38,46%	8,7	7,61	1,14	5,80	50,45	5,13	3,71	1,31	
2,2	42,31%	9,73	8,01	1,21	6,04	58,75	5,17	4,06	1,30	
2,4	46,15%	10,77	8,41	1,28	6,25	67,36	5,19	4,39	1,29	
2,6	50,00%	11,80	8,82	1,34	6,44	75,98	5,2	4,71	1,27	
2,8	53,85%	12,85	9,23	1,39	6,61	84,97	5,18	5,03	1,26	Fereggiano
3	57,69%	13,88	9,62	1,44	6,77	93,99	5,14	5,34	1,25	Fereggiano + Rovare + Noce
3,2	61,54%	14,9	10,03	1,49	6,90	102,88	5,06	5,63	1,23	
3,4	65,38%	15,90	10,44	1,52	7,02	111,62	4,95	5,91	1,22	
3,6	69,23%	16,88	10,87	1,55	7,11	120,05	4,8	6,18	1,20	
3,8	73,08%	17,82	11,32	1,57	7,18	127,89	4,61	6,43	1,18	
4	76,92%	18,72	11,78	1,59	7,22	135,19	4,38	6,66	1,15	
4,2	80,77%	19,57	12,26	1,60	7,24	141,75	4,1	6,87	1,13	
4,4	84,62%	20,35	12,80	1,59	7,22	147,01	3,75	7,06	1,10	
4,6	88,46%	21,06	13,38	1,57	7,18	151,13	3,32	7,22	1,07	
4,8	92,31%	21,67	14,06	1,54	7,08	153,34	2,77	7,35	1,03	
5	96,15%	22,16	14,94	1,48	6,90	152,85	2	7,42	0,98	
5,2	100,00%	22,43	16,99	1,32	6,38	143,15	0	7,28	0,89	

Il confronto dei parametri idraulici (Fr, v e y) evidenzia come non vi sia una sostanziale differenza di comportamento nei tre casi esaminati.

Si ritiene pertanto che la scelta di un'unica livelletta (0,3%) sia accettabile e, per le ragioni su menzionate, preferibile.

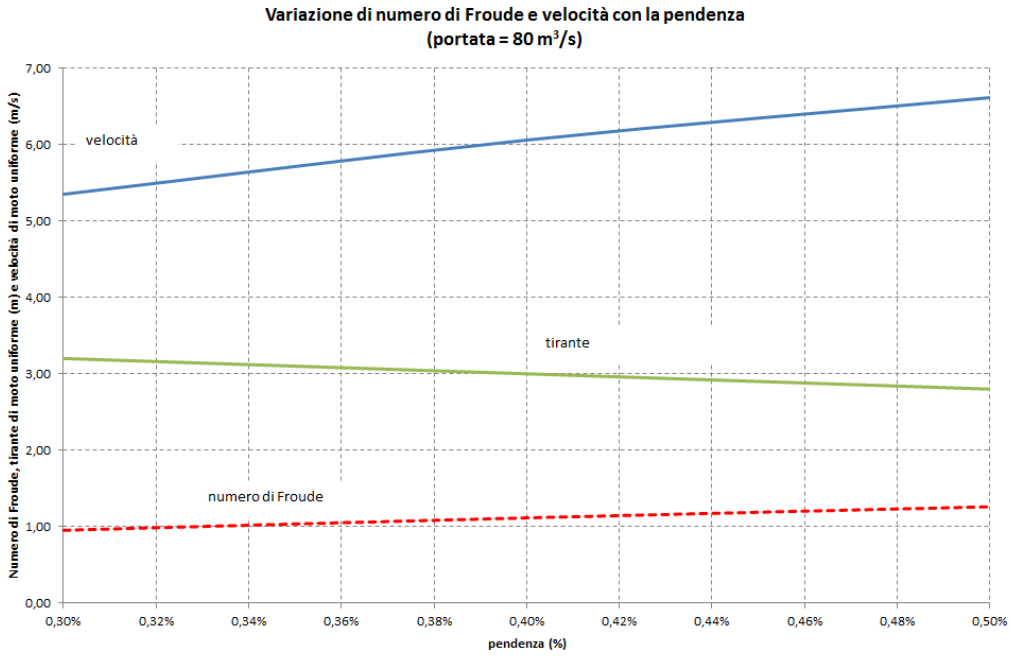


FIG. 4.4 - VARIAZIONE DI ALCUNI PARAMETRI IDRAULICI A SECONDA DELLA PENDENZA ASSUNTA PER LA GALLERIA PRINCIPALE

Nel grafico si vede bene come il numero di Froude, sia per le varie pendenze considerate, sempre prossimi a valore unitario.

5. SIMULAZIONI DI FUNZIONAMENTO DELLA GALLERIA

Poiché, come indicato al cap. 3, si rende necessario verificare il funzionamento della galleria in diversi scenari (ne abbiamo assunti 3 rappresentativi), si è ritenuti opportuno simulare il funzionamento con un modello matematico che è ritenuto uno dei più potenti disponibili in commercio.
Di seguito si illustrano le caratteristiche del modello e poi i risultati delle simulazioni svolte.

5.1. Il software infoworks CS

Il software InfoWorks CS della Innovyze permette il calcolo idraulico a moto vario, integrando le equazioni di continuità e del moto. In particolare InfoWorks CS utilizza le equazioni di De Saint Venant complete, risolvendole con una approccio detto dei 4 punti di Priessman. Le equazioni di De Saint Venant sono le equazioni che stanno alla base del moto in condotta, che integrate correttamente, permettono di ricostruire i profili idraulici a moto vario in un reticolo di drenaggio. Le equazioni sono le seguenti:

$$\frac{\partial A}{\partial t}+\frac{\partial Q}{\partial x}=0 \qquad (1)$$

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

dove:

- A area bagnata del condotto;
- Q portata;
- x distanza lungo l'asse del condotto;
- t tempo;
- g costante gravitazionale;
- H carico idraulico totale dato da z+h;
- z quota dello scorrimento;
- h livello idrico;
- S_f cadente piezometrica.

In particolare, la (1) è l'equazione di continuità in moto vario in assenza di afflussi e deflussi laterali, la (2) è l'equazione del momento della quantità di moto.
Per essere integrate le equazioni devono essere opportunamente semplificate e linearizzate, in modo che il sistema di equazioni possa essere risolto con la teoria delle matrici. Lo schema di linearizzazione usato da InfoWorks CS è quello dei 4 punti di Priessmann mentre il risolutore adottato è quello di Newton-Raphson.
Le equazioni di cui sopra sono valide fino a quando la condotta non entra in pressione. Per permettere a InfoWorks di simulare anche situazioni di condotte in pressione, senza problemi nella transizione da uno stato all'altro, il motore di calcolo adotta la tecnica dello slot, per il quale si ipotizza una piccola fessura alla sommità della condotta, fino al piano campagna. Così facendo il motore di calcolo non incontra nessuna discontinuità efficace nella transizione da moto a gravità a quello in pressione. La cadente piezometrica viene computata con le equazioni di Colebrook-White o di Manning-Strickler.

5.2. Schematizzazione del sistema idraulico da simulare

Di seguito si riportano lo schema planimetrico ed i principali dati geometrici del modello allestito.

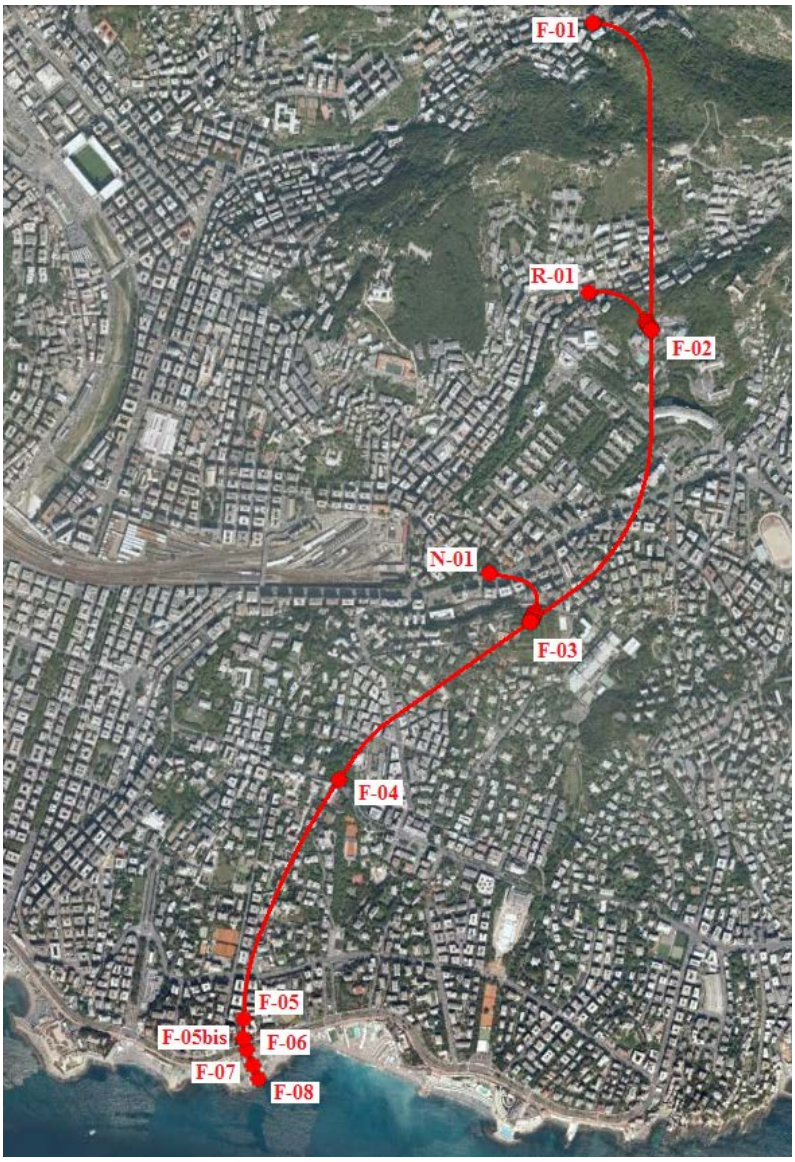


FIG. 5.1 - MODELLO INFOWORKS: SCHEMA PLANIMETRICO

TAB. 5.1 - MODELLO INFOWORKS: PRINCIPALI DATI GEOMETRICI

	ID Nodo di Monte	ID Nodo Valle	Lung. (m)	Forma	Largh. (mm)	Altezza (mm)	Ks ($m^{1/3}s^{-1}$)	Scorr. Monte (m s.m.m.)	Scorr. Valle (m s.m.m.)	Pend. (%)
Fereggiano	F-01	F-02	1026,20	POLIC	5200	5200	75	13,00	9,92	0,3
	F-02	F-03	1018,30	POLIC	5200	5200	75	9,92	6,86	0,3
	F-03	F-04	763,30	POLIC	5200	5200	75	6,86	4,57	0,3
	F-04	F-05	808,90	CIRC	5200	5200	75	4,57	2,14	0,3
	F-05	F-05bis	62,00	VAR.	4000	6000-8775	75	2,14	-0,94	5,0
	F-05bis	F-06	38,00	VAR.	4000	8775-10660	75	-0,94	-2,82	5,0
	F-06	F-07	54,00	RECT	6000	6500	75	-2,82	-3,05	0,4
	F-07	F-08	45,00	RECT	14000	9500	75	-6,00	-6,00	0,0
Rovare	N-01	N-02	220,20	POLIC	3200	3200	75	15,64	10,20	2,5
	N-02	N-03	10,00	POLIC	3700	3700	75	10,20	9,22	9,8
	N-03	N-04	9,90	POLIC	4200	4200	75	9,22	8,25	9,8
	N-04	N-05	10,10	POLIC	4700	4700	75	8,25	7,26	9,8
	N-05	F-03	4,10	POLIC	5200	5200	75	7,26	6,86	9,8
Noce	R-01	R-02	208,10	POLIC	3200	3200	75	20,61	13,23	3,5
	R-02	R-03	10,00	POLIC	3700	3700	75	13,23	12,22	10,1
	R-03	R-04	10,00	POLIC	4200	4200	75	12,22	11,22	10,1
	R-04	R-05	10,00	POLIC	4700	4700	75	11,22	10,21	10,1
	R-05	F-02	2,90	POLIC	5200	5200	75	10,21	9,92	10,1

5.3. Simulazioni – Dati di portata

La simulazioni sono state condotte allo scopo di verificare il sistema in corrispondenza di 3 scenari:

1. Scenario 1: portate duecentennali scolmate, avendo assunto i dati del Piano di Bacino e PD2007;
2. Scenario 2: portate estreme, con picchi da non sommare perché non contemporanei (evento 4 Novembre 2011);
3. Scenario 3: portate estreme, contemporanee (evento 4 Novembre 2011)

Le corrispondenti portate in ingresso nel sistema sono riportate nella seguente Tab. 5.2.

TAB. 5.2 - MODELLO INFOWORKS: PORTATE IN INGRESSO

SCENARIO	Portata Fereggiano (m^3/s)	Portata Rovare (m^3/s)	Portata Noce (m^3/s)	Portata totale (m^3/s)
1	80	9	7	96
2	111	9	7	127
3	111	26	23	160

I risultati delle 3 simulazioni condotte sono riportate di seguito.

5.4. Scenario 1

La verifica dello scenario 1 ha evidenziato il funzionamento a pelo libero dell'intero sistema.
Si riportano di seguito le tabelle con i principali parametri idraulici ottenuti ed i profili idraulici.
Si rileva:

- passaggio in critica nella SEZ F-05 con una velocità localmente maggiore 6 m/s;
- formazione di risalto idraulico a monte delle immissioni Noce e Rovare;
- la corrente è lenta ma tende ad accelerare fino al passaggio in critica sul cambio di pendenza al passaggio di sezione tra la circolare e quella a ferro di cavallo, per poi accelerare bruscamente sullo scivolo ricavato nella gal-

leria a ferro di cavallo e tornare lenta nel manufatto di sbocco ove dissipa l'energia in modo molto rapido grazie all'allargamento brusco di sezione;

- è da notare una velocità molto elevata nel tratto di scivolo interno alla galleria a ferro di cavallo: quel tratto di scivolo va curato particolarmente in sede di progettazione esecutiva quanto ad armatura e copriferro del getto;
- nelle gallerie secondarie avviene un comportamento opposto: la corrente è rapida al piede del pozzo di presa per poi subire una decelerazione, anche tramite risalto idraulico, nelle vicinanze della confluenza con la galleria principale.

Nei profili di seguito, i parametri idraulici si riferiscono al nodo immediatamente riportato a sinistra, nel cartiglio del profilo.
Nelle tabelle riassuntive, i parametri si riferiscono, laddove non specificato, alla sezione di monte del tratto cui si riferiscono.
Nelle tabelle e nei cartigli del profilo si indica con US i parametri idraulici che si riferiscono alla sezione upstream (a monte) e con DS quelli che si riferiscono alla sezione downstream (a valle).

TAB. 5.3 - SCENARIO 1: RISULTATI PER LA GALLERIA FEREGGIANO

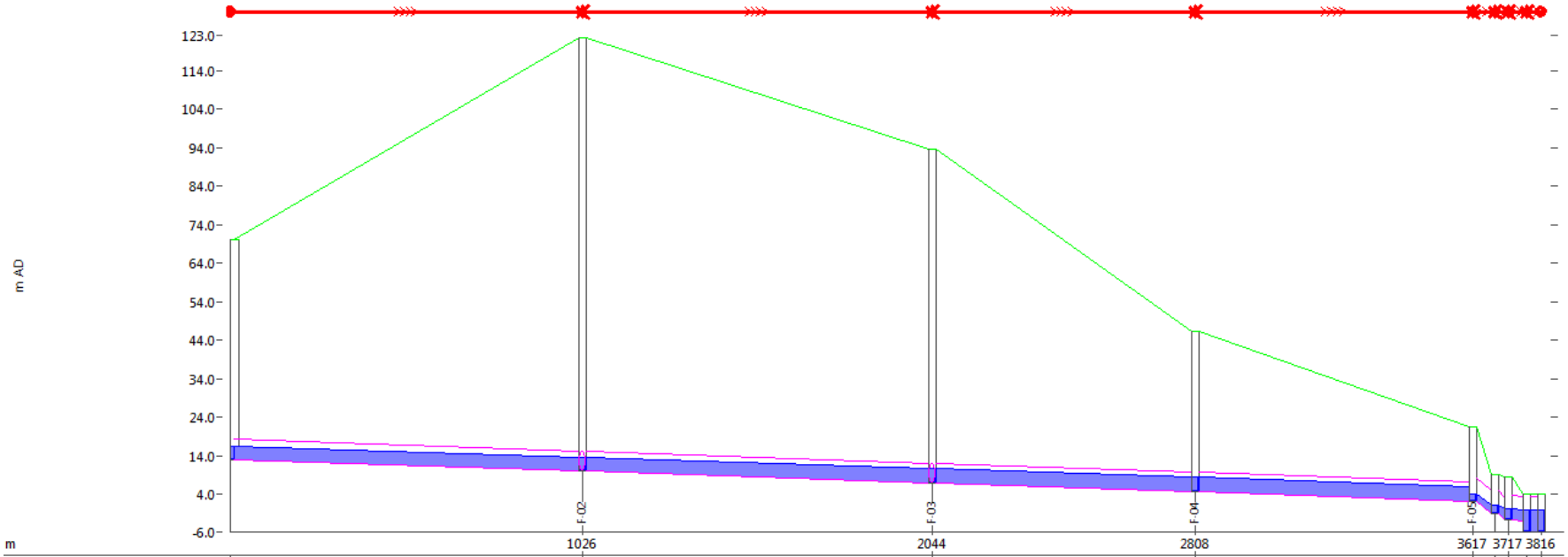
ID nodo monte	ID nodo valle	Forma sez.	Altezza sez. (m)	Portata (m^3/s)	Grado riemp. (%)	Tirante monte (m)	Numero Froude monte	Velocità monte (m/s)	Tirante valle (m)	Numero Froude valle	Velocità valle (m/s)
F-01	F-02	POLIC	5,20	80,00	71%	3,34	0,92	5,21	3,67	0,78	4,76
F-02	F-03	POLIC	5,20	89,00	74%	3,66	0,87	5,29	3,86	0,80	5,04
F-03	F-04	POLIC	5,20	96,00	75%	3,85	0,86	5,44	3,90	0,85	5,38
F-04	F-05	CIRC	5,20	96,00	75%	3,90	0,92	5,62	3,75	**1,00**	5,85
F-05	F-05bis	VAR.	6,00-8,78	96,00	35%	1,85	3,05	**13,00**	2,11	**2,50**	**11,37**
F-05bis	F-06	VAR.	8,78-10,66	96,00	50%	2,11	2,50	**11,37**	2,99	**1,48**	**8,02**
F-06	F-07	RECT	6,50	96,00	47%	2,99	0,99	5,35	3,05	0,96	5,24
F-07	F-08	RECT	9,50	96,00	63%	6,00	0,15	1,14	6,00	0,15	1,14

TAB. 5.4 - SCENARIO 1: RISULTATI PER LA GALLERIA NOCE

ID nodo monte	ID nodo valle	Forma sez.	Altezza sez. (m)	Portata (m^3/s)	Grado riemp. (%)	Tirante monte (m)	Numero Froude monte	Velocità monte (m/s)	Tirante valle (m)	Numero Froude valle	Velocità valle (m/s)
N-01	N-02	POLIC	3,20	7,00	21%	0,63	**2,16**	4,80	0,68	**1,90**	4,40
N-02	N-03	POLIC	3,70	7,00	41%	0,68	**1,72**	3,95	1,51	0,42	1,50
N-03	N-04	POLIC	4,20	7,00	59%	1,51	0,38	1,35	2,47	0,16	0,77
N-04	N-05	POLIC	4,70	7,00	73%	2,47	0,15	0,69	3,45	0,08	0,49
N-05	F-03	POLIC	5,20	7,00	74%	3,45	0,08	0,44	3,85	0,06	0,40

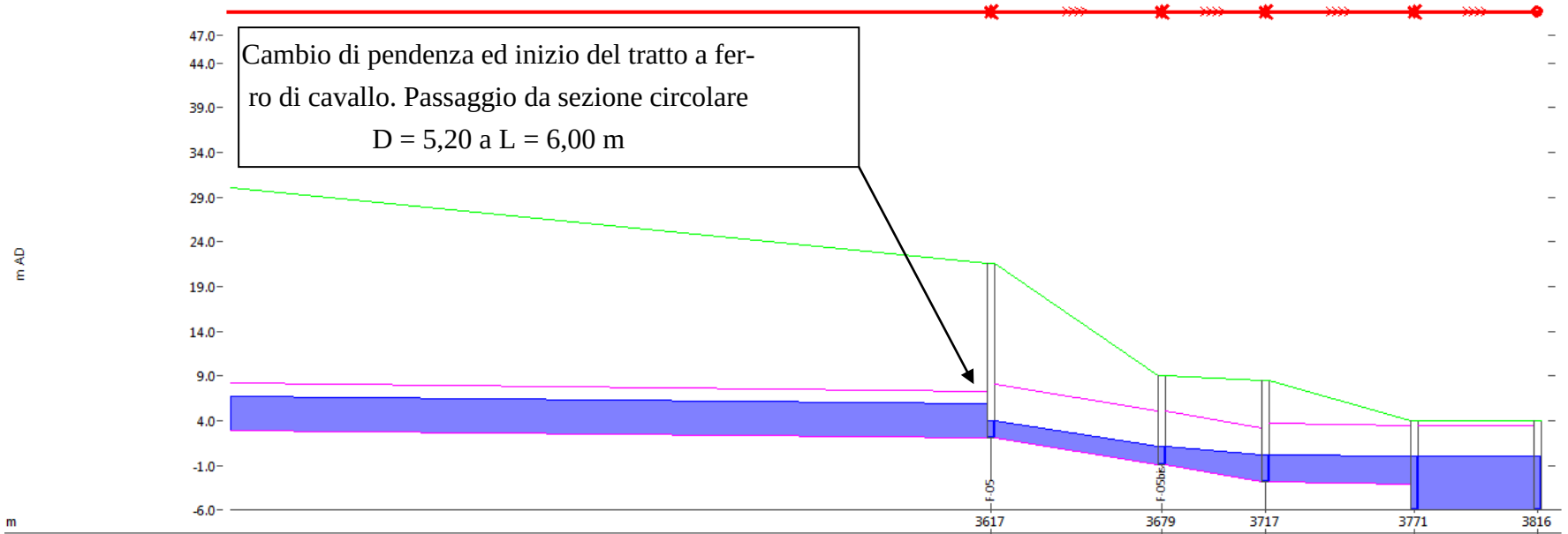
TAB. 5.5 - SCENARIO 1: RISULTATI PER LA GALLERIA ROVARE

ID nodo monte	ID nodo valle	Forma sez.	Altezza sez. (m)	Portata (m^3/s)	Grado riemp. (%)	Tirante monte (m)	Numero Froude monte	Velocità monte (m/s)	Tirante valle (m)	Numero Froude valle	Velocità valle (m/s)
R-01	R-02	POLIC	3,20	9,00	20%	0,65	**2,65**	5,97	0,65	**2,65**	5,97
R-02	R-03	POLIC	3,70	9,00	38%	0,64	**2,46**	5,46	1,39	0,62	2,13
R-03	R-04	POLIC	4,20	9,00	57%	1,39	0,56	1,92	2,37	0,22	1,03
R-04	R-05	POLIC	4,70	9,00	72%	2,37	0,21	0,93	3,38	0,11	0,64
R-05	F-02	POLIC	5,20	9,00	70%	3,38	0,10	0,58	3,66	0,09	0,54



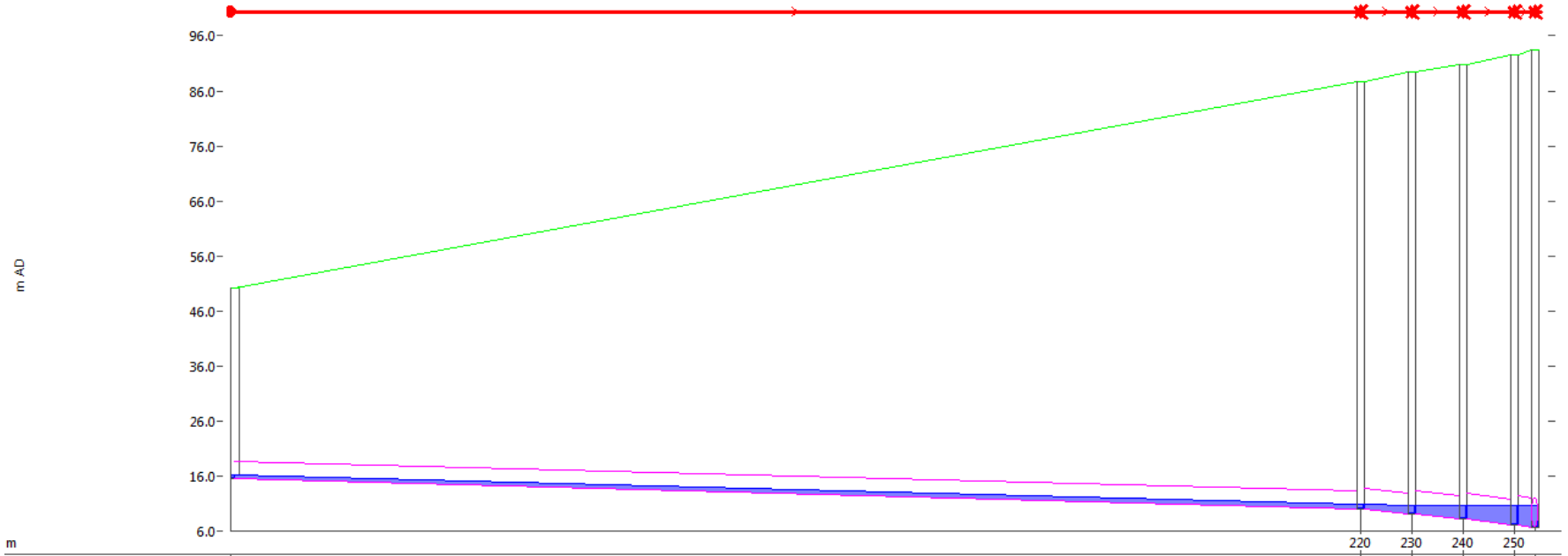
Link		F-01.2	F-02.1	F-03.1	F-04.2				
Lunghezza (m)		1026.2	1018.3	763.3	808.9	-	-	-	-
ID Forma		POLIC	POLIC	POLIC	CIRC	-	-	-	-
Altezza (mm)		5200	5200	5200	5200	-	-	-	-
Livello Scorrimento Monte (m AD)		13.000	9.920	6.860	4.570	-	-	-	-
Livello Scorrimento Valle (m AD)		9.920	6.860	4.570	2.140	-	-	-	-
Pendenza (%)		0.300	0.300	0.300	0.300	-	-	-	-
US Tirante (m)		3.344	3.663	3.851	3.896	-	-	-	-
US Portata (m3/s)		80.00	89.00	96.00	96.00	-	-	-	-
US Numero Froude		0.922	0.874	0.864	0.923	-	-	-	-
US Velocità (m/s)		5.213	5.294	5.442	5.624	-	-	-	-
DS Tirante (m)		3.666	3.855	3.896	3.753	-	-	-	-
DS Portata (m3/s)		80.00	89.00	96.00	96.00	-	-	-	-
DS Numero Froude		0.784	0.800	0.847	0.995	-	-	-	-
DS Velocità (m/s)		4.755	5.039	5.381	5.849	-	-	-	-
Node	F-01	F-02	F-03	F-04	F-05				
Livello Terreno (m AD)	70.000	122.500	93.530	46.290	21.590				
Livello (m AD)	16.365	13.583	10.711	8.466	3.987				

FIG. 5.2 - SCENARIO 1: PROFILO LONGITUDINALE GALLERIA FEREGGIANO



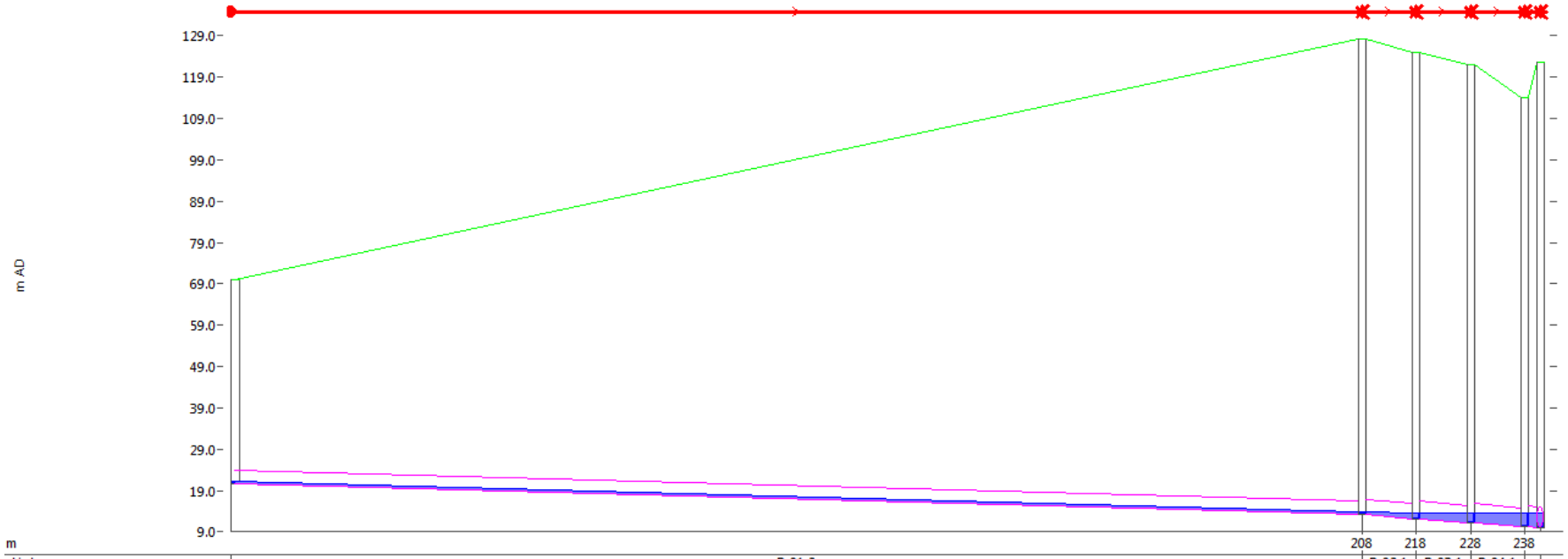
Link		F-05.1	F-05bis.1	F-06.1	F-07.1	
Lunghezza (m)		62.0	38.0	54.0	45.0	
ID Forma		VAR.	VAR.	RECT	RECT	
Altezza (mm)		6000	6000	6500	9500	
Livello Scorrimento Monte (m AD)		2.140	-0.935	-2.820	-6.000	
Livello Scorrimento Valle (m AD)		-0.935	-2.820	-3.050	-6.000	
Pendenza (%)		4.960	4.960	0.426	0.000	
US Tirante (m)		1.847	2.111	2.993	6.002	
US Portata (m3/s)		96.00	96.00	96.00	96.00	
US Numero Froude		3.054	2.499	0.987	0.149	
US Velocità (m/s)		12.998	11.370	5.345	1.142	
DS Tirante (m)		2.111	2.994	3.053	6.000	
DS Portata (m3/s)		96.00	96.00	96.00	96.00	
DS Numero Froude		2.498	1.480	0.958	0.149	
DS Velocità (m/s)		11.368	8.017	5.242	1.143	
Node	F-05	F-05bis	F-06	F-07	F-08	
Livello Terreno (m AD)	21.590	9.000	8.490	4.000	4.000	
Livello (m AD)	3.987	1.176	0.173	0.002	0.000	

FIG. 5.3 - SCENARIO 1: PROFILO LONGITUDINALE GALLERIA FEREGGIANO – DETTAGLIO TRATTO FINALE



Link		N-01.1				N-02.2	N-03.2	N-04.2	-
Lunghezza (m)		220.2				10.0	9.9	10.1	4.1
ID Forma		POLIC				POLIC	POLIC	POLIC	-
Altezza (mm)		3200				3700	4200	4700	-
Livello Scorrimento Monte (m AD)		15.640				10.200	9.218	8.245	-
Livello Scorrimento Valle (m AD)		10.200				9.218	8.245	7.259	-
Pendenza (%)		2.471				9.797	9.797	9.797	-
US Tirante (m)		0.631				0.677	1.511	2.471	-
US Portata (m3/s)		7.00				7.00	7.00	7.00	-
US Numero Froude		2.161				1.722	0.380	0.150	-
US Velocità (m/s)		4.803				3.946	1.350	0.694	-
DS Tirante (m)		0.677				1.511	2.471	3.453	-
DS Portata (m3/s)		7.00				7.00	7.00	7.00	-
DS Numero Froude		1.902				0.421	0.161	0.082	-
DS Velocità (m/s)		4.398				1.500	0.768	0.489	-
Node	N-01					N-02	N-03	N-04	-
Livello Terreno (m AD)	50.230					87.670	89.390	90.870	-
Livello (m AD)	16.272					10.877	10.729	10.716	-

FIG. 5.4 - SCENARIO 1: PROFILO LONGITUDINALE GALLERIA NOCE



Link		R-01.2			R-02.1	R-03.1	R-04.1	-
Lunghezza (m)		208.1			10.0	10.0	10.0	-
ID Forma		POLIC			POLIC	POLIC	POLIC	-
Altezza (mm)		3200			3700	4200	4700	-
Livello Scorrimento Monte (m AD)		20.610			13.230	12.223	11.216	-
Livello Scorrimento Valle (m AD)		13.230			12.223	11.216	10.209	-
Pendenza (%)		3.547			10.073	10.073	10.073	-
US Tirante (m)		0.649			0.640	1.388	2.373	-
US Portata (m3/s)		9.00			9.00	9.00	9.00	-
US Numero Froude		2.646			2.457	0.564	0.208	-
US Velocità (m/s)		5.970			5.455	1.918	0.934	-
DS Tirante (m)		0.649			1.388	2.373	3.375	-
DS Portata (m3/s)		9.00			9.00	9.00	9.00	-
DS Numero Froude		2.646			0.624	0.223	0.110	-
DS Velocità (m/s)		5.970			2.130	1.031	0.643	-
Node	R-01			R-02	R-03	R-04	-	
Livello Terreno (m AD)	69.920			128.260	-	-	-	
Livello (m AD)	21.259			13.870	13.611	13.589	-	

FIG. 5.5 - SCENARIO 1: PROFILO LONGITUDINALE GALLERIA ROVARE

5.5. Scenario 2

La verifica dello scenario 2 ha rilevato un funzionamento a pressione per la galleria Fereggiano e un profilo di rigurgito nei tratti terminali delle immissioni Rovare e Noce. Si riportano di seguito le tabelle con i principali parametri idraulici ottenuti ed i profili idraulici.
Si rileva:

- passaggio in critica nella SEZ F-05 con una velocità localmente maggiore 6 m/s;
- formazione di risalto idraulico lungo le gallerie Noce e Rovare;
- la corrente lungo la galleria Fereggiano è in pressione (la linea piezometrica è superiore al cielo della galleria) con passaggio a pelo libero con creazione delle condizioni di corrente critica sul cambio di pendenza al passaggio di sezione tra la circolare e quella a ferro di cavallo, per poi accelerare bruscamente sullo scivolo ricavato nella galleria a ferro di cavallo e tornare lenta nel manufatto di sbocco ove dissipa l'energia in modo molto rapido grazie all'allargamento brusco di sezione;
- il ritorno alle condizioni di pelo libero avvengono a circa 600 m dal cambio di pendenza e di sezione, quindi all'incirca alla progressiva 700 m;
- è da notare una velocità molto elevata nel tratto di scivolo interno alla galleria a ferro di cavallo: quel tratto di scivolo va curato particolarmente in sede di progettazione esecutiva quanto ad armatura e copriferro del getto;
- nelle gallerie secondarie il funzionamento è in pressione nel tratto terminale, determinato dalle condizioni di valle della galleria principale. La corrente è rapida ai piedi del pozzo di presa e diventa lenta, fortemente decelerata, nell'avvicinarsi alla confluenza, con formazione di un risalto lungo l'asse della galleria minore.

Nei profili di seguito, i parametri idraulici si riferiscono al nodo immediatamente riportato a sinistra, nel cartiglio del profilo.
Nelle tabelle riassuntive, i parametri si riferiscono, laddove non specificato, alla sezione di monte del tratto cui si riferiscono.
Nelle tabelle e nei cartigli del profilo si indica con US i parametri idraulici che si riferiscono alla sezione upstream (a monte) e con DS quelli che si riferiscono alla sezione downstream (a valle).

TAB. 5.6 - SCENARIO 2: RISULTATI PER LA GALLERIA FEREGGIANO

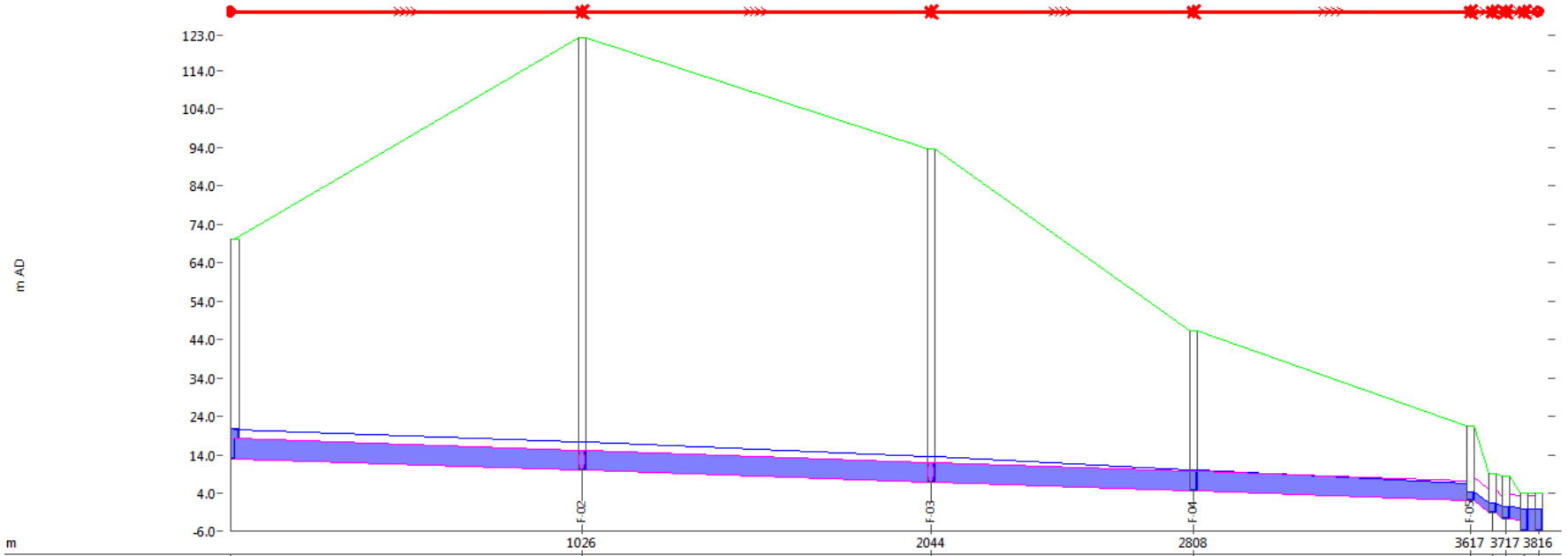
ID nodo monte	ID nodo valle	Forma sez.	Altezza sez. (m)	Portata (m^3/s)	Grado riemp. (%)	Tirante / Carico piezometrico monte (m)	Numero Froude monte	Velocità monte (m/s)	Tirante valle (m)	Numero Froude valle	Velocità valle (m/s)
F-01	F-02	POLIC	5,20	111,00	100%	7,65	0,10	4,85	7,39	0,10	4,85
F-02	F-03	POLIC	5,20	120,00	100%	7,37	0,11	5,25	6,55	0,11	5,27
F-03	F-04	POLIC	5,20	127,00	100%	6,53	0,12	5,57	5,57	0,34	5,63
F-04	F-05	CIRC	5,20	127,00	100%	5,57	0,36	5,80	4,29	**1,00**	**6,78**
F-05	F-05bis	VAR.	6,00-8,78	127,00	42%	2,19	**3,13**	**14,49**	2,49	**2,58**	**12,74**
F-05bis	F-06	VAR.	8,78-10,66	127,00	55%	2,49	**2,58**	**12,74**	3,28	**1,71**	**9,68**
F-06	F-07	RECT	6,50	127,00	50%	3,28	**1,14**	**6,46**	3,28	**1,14**	**6,46**
F-07	F-08	RECT	9,50	127,00	63%	6,00	0,20	1,51	6,00	0,20	1,51

TAB. 5.7 - SCENARIO 2: RISULTATI PER LA GALLERIA NOCE

ID nodo monte	ID nodo valle	Forma sez.	Altezza sez. (m)	Portata (m^3/s)	Grado riemp. (%)	Tirante / Carico piezometrico monte (m)	Numero Froude monte	Velocità monte (m/s)	Tirante valle (m)	Numero Froude valle	Velocità valle (m/s)
N-01	N-02	POLIC	3,20	7,00	100%	0,64	**2,14**	4,77	3,20	0,10	0,84
N-02	N-03	POLIC	3,70	7,00	100%	3,20	0,11	0,68	4,18	0,02	0,61
N-03	N-04	POLIC	4,20	7,00	100%	4,18	0,05	0,49	5,15	0,01	0,47
N-04	N-05	POLIC	4,70	7,00	100%	5,15	0,02	0,38	6,13	0,01	0,38
N-05	F-03	POLIC	5,20	7,00	100%	6,13	0,01	0,31	6,53	0,01	0,31

TAB. 5.8 - SCENARIO 2: RISULTATI PER LA GALLERIA NOVARE

ID nodo monte	ID nodo valle	Forma sez.	Altezza sez. (m)	Portata (m^3/s)	Grado riemp. (%)	Tirante / Carico piezometrico monte (m)	Numero Froude monte	Velocità monte (m/s)	Tirante valle (m)	Numero Froude valle	Velocità valle (m/s)
R-01	R-02	POLIC	3,20	9,00	100%	0,65	**2,63**	5,95	4,07	0,03	1,04
R-02	R-03	POLIC	3,70	9,00	100%	4,07	0,04	0,78	5,07	0,02	0,78
R-03	R-04	POLIC	4,20	9,00	100%	5,07	0,01	0,61	6,07	0,01	0,60
R-04	R-05	POLIC	4,70	9,00	100%	6,07	0,01	0,48	7,08	0,01	0,48
R-05	F-02	POLIC	5,20	9,00	100%	7,08	0,01	0,39	7,37	0,01	0,39



Link		F-01.2	F-02.1	F-03.1	F-04.2			
Lunghezza (m)		1026.2	1018.3	763.3	808.9			
ID Forma		POLIC	POLIC	POLIC	CIRC			
Altezza (mm)		5200	5200	5200	5200			
Livello Scorrimento Monte (m AD)		13.000	9.920	6.860	4.570			
Livello Scorrimento Valle (m AD)		9.920	6.860	4.570	2.140			
Pendenza (%)		0.300	0.300	0.300	0.300			
US Tirante (m)		7.647	7.365	6.531	5.571			
US Portata (m3/s)		111.00	120.00	127.00	127.00			
US Numero Froude		0.101	0.110	0.117	0.363			
US Velocità (m/s)		4.848	5.247	5.573	5.801			
DS Tirante (m)		7.385	6.551	5.571	4.285			
DS Portata (m3/s)		111.00	120.00	127.00	127.00			
DS Numero Froude		0.101	0.110	0.341	0.997			
DS Velocità (m/s)		4.853	5.266	5.627	6.784			
Node	F-01		F-02	F-03	F-04		F-05	
Livello Terreno (m AD)	70.000		122.500	93.530	46.290		21.590	
Livello (m AD)	20.803		17.285	13.391	10.141		4.331	

FIG. 5.6 - SCENARIO 2: PROFILO LONGITUDINALE GALLERIA FEREGGIANO

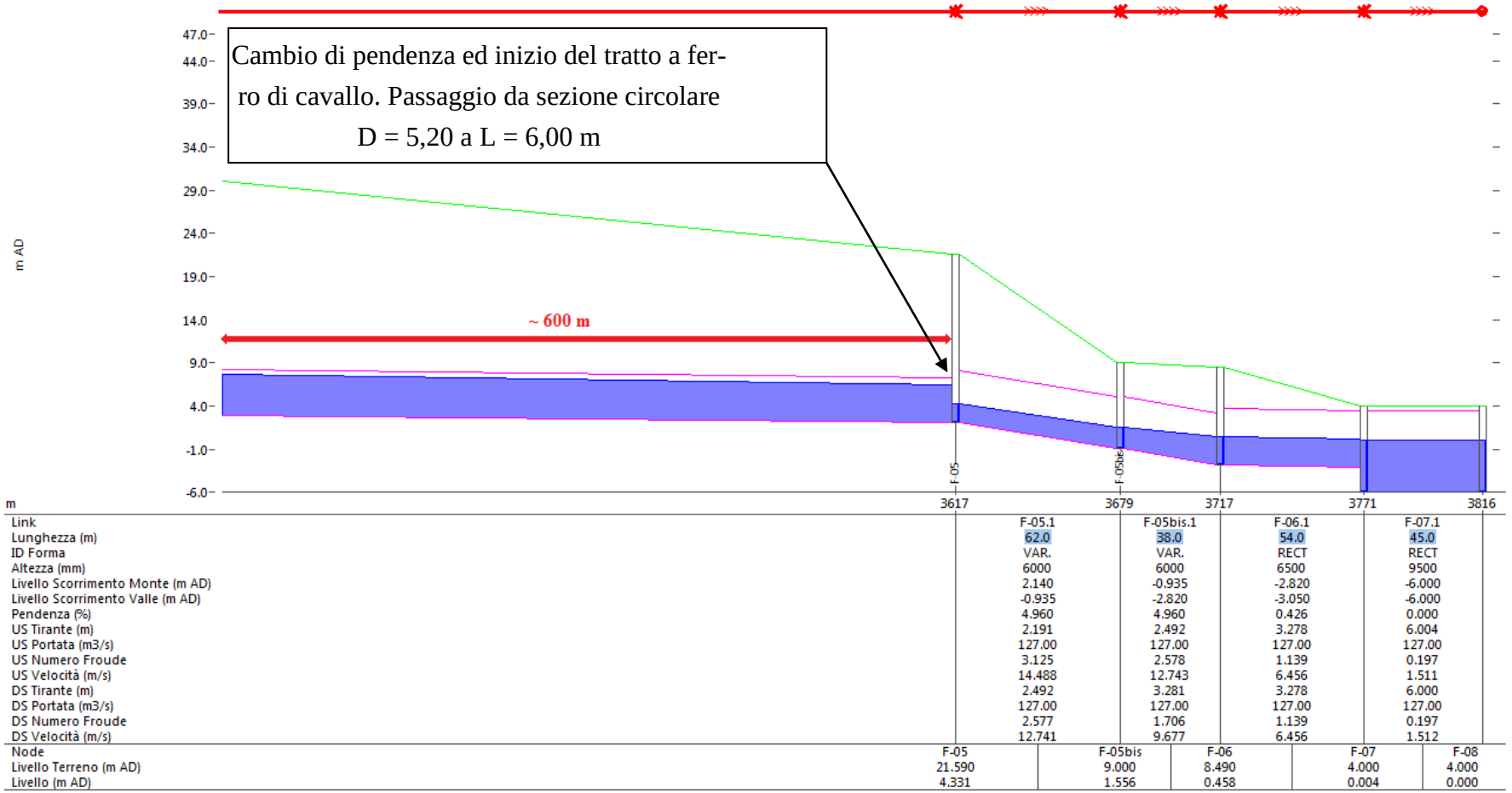
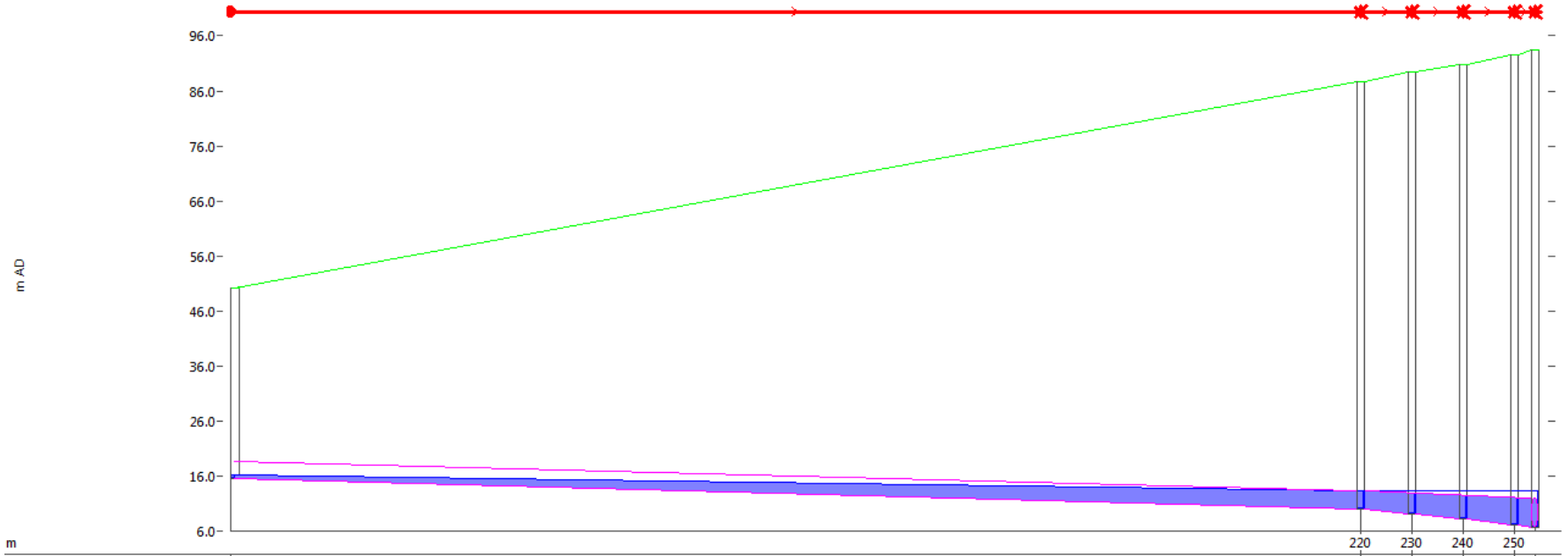
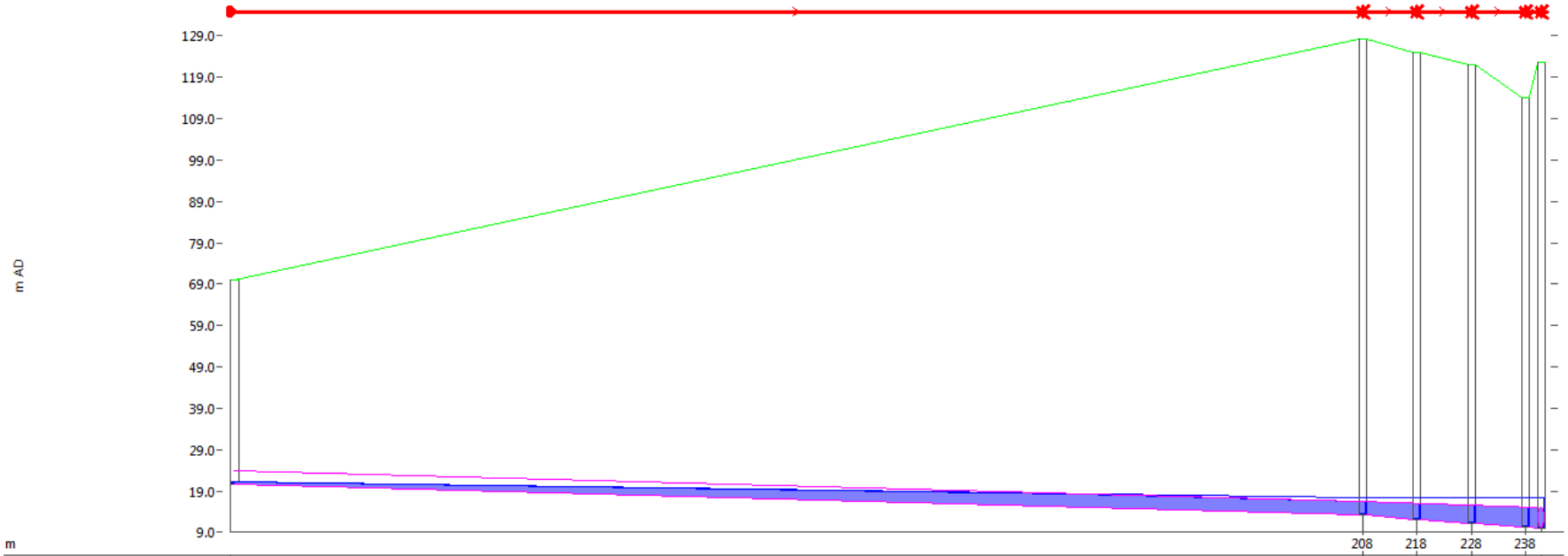


FIG. 5.7 - SCENARIO 2: PROFILO LONGITUDINALE GALLERIA FEREGGIANO – DETTAGLIO TRATTO FINALE



Link		N-01.1				N-02.2	N-03.2	N-04.2	-
Lunghezza (m)		220.2				10.0	9.9	10.1	4.1
ID Forma		POLIC				POLIC	POLIC	POLIC	-
Altezza (mm)		3200				3700	4200	4700	-
Livello Scorrimento Monte (m AD)		15.640				10.200	9.218	8.245	-
Livello Scorrimento Valle (m AD)		10.200				9.218	8.245	7.259	-
Pendenza (%)		2.471				9.797	9.797	9.797	-
US Tirante (m)		0.635				3.200	4.178	5.149	-
US Portata (m3/s)		7.00				7.00	7.00	7.00	-
US Numero Froude		2.140				0.107	0.050	0.019	-
US Velocità (m/s)		4.771				0.683	0.487	0.378	-
DS Tirante (m)		3.200				4.178	5.149	6.133	-
DS Portata (m3/s)		7.00				7.00	7.00	7.00	-
DS Numero Froude		0.096				0.022	0.011	0.008	-
DS Velocità (m/s)		0.837				0.609	0.471	0.376	-
Node	N-01					N-02	N-03	N-04	-
Livello Terreno (m AD)	50.230					87.670	89.390	90.870	-
Livello (m AD)	16.275					13.400	13.397	13.394	-

FIG. 5.8 - SCENARIO 2: PROFILO LONGITUDINALE GALLERIA NOCE



Link		R-01.2			R-02.1	R-03.1	R-04.1	-
Lunghezza (m)		208.1			10.0	10.0	10.0	-
ID Forma		POLIC			POLIC	POLIC	POLIC	-
Altezza (mm)		3200			3700	4200	4700	-
Livello Scorrimento Monte (m AD)		20.610			13.230	12.223	11.216	-
Livello Scorrimento Valle (m AD)		13.230			12.223	11.216	10.209	-
Pendenza (%)		3.547			10.073	10.073	10.073	-
US Tirante (m)		0.650			4.065	5.068	6.072	-
US Portata (m3/s)		9.00			9.00	9.00	9.00	-
US Numero Froude		2.632			0.044	0.014	0.011	-
US Velocità (m/s)		5.949			0.784	0.606	0.483	-
DS Tirante (m)		4.065			5.068	6.072	7.077	-
DS Portata (m3/s)		9.00			9.00	9.00	9.00	-
DS Numero Froude		0.028			0.019	0.014	0.011	-
DS Velocità (m/s)		1.043			0.778	0.603	0.481	-
Node	R-01				R-02	R-03	R-04	-
Livello Terreno (m AD)	69.920				128.260	-	-	-
Livello (m AD)	21.261				17.295	17.291	17.288	-

FIG. 5.9 - SCENARIO 2: PROFILO LONGITUDINALE GALLERIA ROVARE

5.6. Scenario 3

La verifica dello scenario 3 ha rilevato un funzionamento a pressione per la galleria Fereggiano ed anche per le gallerie minori Rovare e Noce.
Si riportano di seguito le tabelle con i principali parametri idraulici ottenuti ed i profili idraulici.
Si rileva:

- passaggio in critica nella SEZ F-05 con una velocità prossima a 8 6 m/s;
- formazione di risalto idraulico a monte delle immissioni Noce e Rovare;
- la corrente lungo la galleria Fereggiano è in pressione (la linea piezometrica è superiore al cielo della galleria) fino al piede del pozzo di presa con passaggio a pelo libero con creazione delle condizioni di corrente critica sul cambio di pendenza al passaggio di sezione tra la circolare e quella a ferro di cavallo, per poi accelerare bruscamente sullo scivolo ricavato nella galleria a ferro di cavallo e tornare lenta nel manufatto di sbocco ove dissipa l'energia in modo molto rapido grazie all'allargamento brusco di sezione;
- il ritorno alle condizioni di pelo libero avvengono a circa 200 m dal cambio di pendenza e di sezione, quindi all'incirca alla progressiva 300 m;
- è da notare una velocità molto elevata nel tratto di scivolo interno alla galleria a ferro di cavallo: quel tratto di scivolo va curato particolarmente in sede di progettazione esecutiva quanto ad armatura e copriferro del getto;
- nelle gallerie secondarie il funzionamento è in pressione fino al piede del pozzo di presa, determinato dalle condizioni di valle della galleria principale. La corrente è lenta, fortemente decelerata.

Nei profili di seguito, i parametri idraulici si riferiscono al nodo immediatamente riportato a sinistra, nel cartiglio del profilo.
Nelle tabelle riassuntive, i parametri si riferiscono, laddove non specificato, alla sezione di monte del tratto cui si riferiscono.
Nelle tabelle e nei cartigli del profilo si indica con US i parametri idraulici che si riferiscono alla sezione upstream (a monte) e con DS quelli che si riferiscono alla sezione downstream (a valle).

TAB. 5.9 - SCENARIO 3: RISULTATI PER LA GALLERIA FEREGGIANO

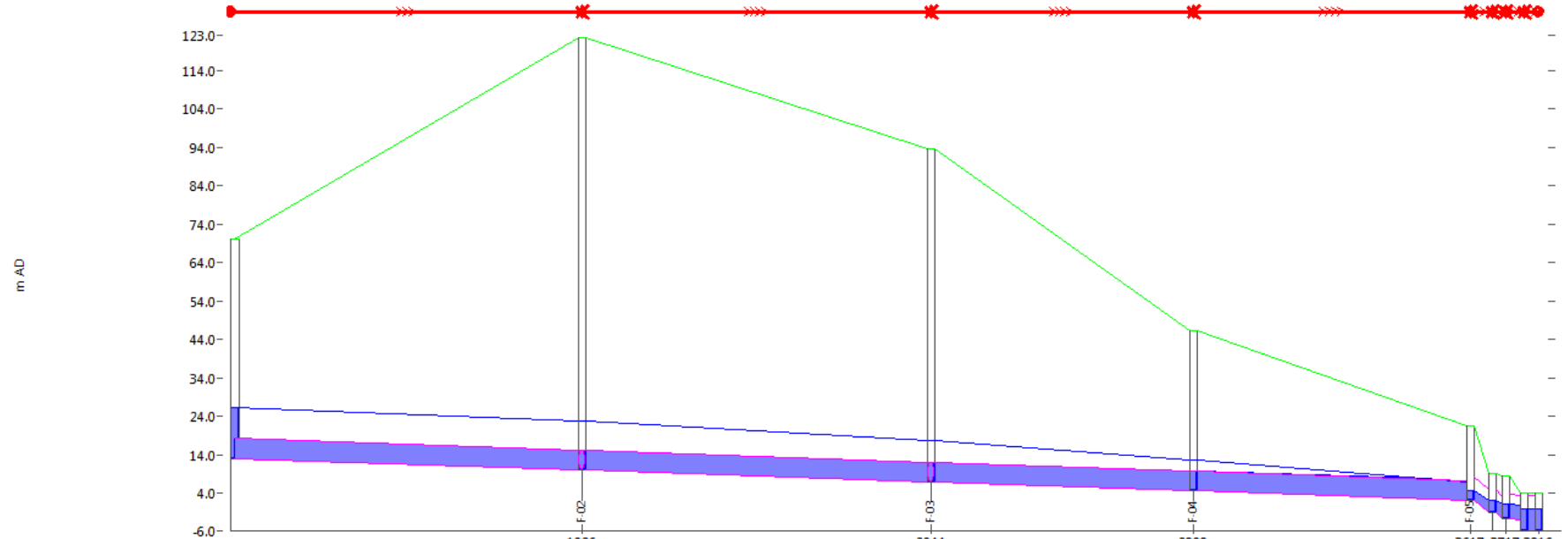
ID nodo monte	ID nodo valle	Forma sez.	Altezza sez. (m)	Portata (m^3/s)	Grado riemp. (%)	Tirante / Carico piezometrico monte (m)	Numero Froude monte	Velocità monte (m/s)	Tirante valle (m)	Numero Froude valle	Velocità valle (m/s)
F-01	F-02	POLIC	5,20	111,00	100%	13,18	0,10	4,74	12,91	0,10	4,74
F-02	F-03	POLIC	5,20	137,00	100%	12,90	0,12	5,85	10,92	0,12	5,90
F-03	F-04	POLIC	5,20	160,00	100%	10,90	0,14	**6,89**	8,04	0,15	**6,98**
F-04	F-05	CIRC	5,20	160,00	100%	8,04	0,16	**7,18**	4,68	**1,00**	**7,95**
F-05	F-05bis	VAR.	6,00-8,78	160,00	50%	2,59	**3,07**	**15,45**	3,02	**2,44**	**13,25**
F-05bis	F-06	VAR.	8,78-10,66	160,00	65%	3,02	**2,44**	**13,25**	3,91	**1,65**	**10,22**
F-06	F-07	RECT	6,50	160,00	60%	3,91	**1,10**	6,83	3,91	**1,10**	**6,83**
F-07	F-08	RECT	9,50	160,00	63%	6,01	0,25	1,90	6,00	0,25	1,91

TAB. 5.10 - SCENARIO 3: RISULTATI PER LA GALLERIA NOCE

ID nodo monte	ID nodo valle	Forma sez.	Altezza sez. (m)	Portata (m^3/s)	Grado riemp. (%)	Tirante / Carico piezometrico monte (m)	Numero Froude monte	Velocità monte (m/s)	Tirante valle (m)	Numero Froude valle	Velocità valle (m/s)
N-01	N-02	POLIC	3,20	23,00	100%	2,65	0,56	3,11	7,59	0,07	2,60
N-02	N-03	POLIC	3,70	23,00	100%	7,59	0,05	1,96	8,56	0,05	1,95
N-03	N-04	POLIC	4,20	23,00	100%	8,56	0,04	1,52	9,52	0,04	1,51
N-04	N-05	POLIC	4,70	23,00	100%	9,52	0,03	1,22	10,50	0,03	1,21
N-05	F-03	POLIC	5,20	23,00	100%	10,50	0,02	0,99	10,90	0,02	0,99

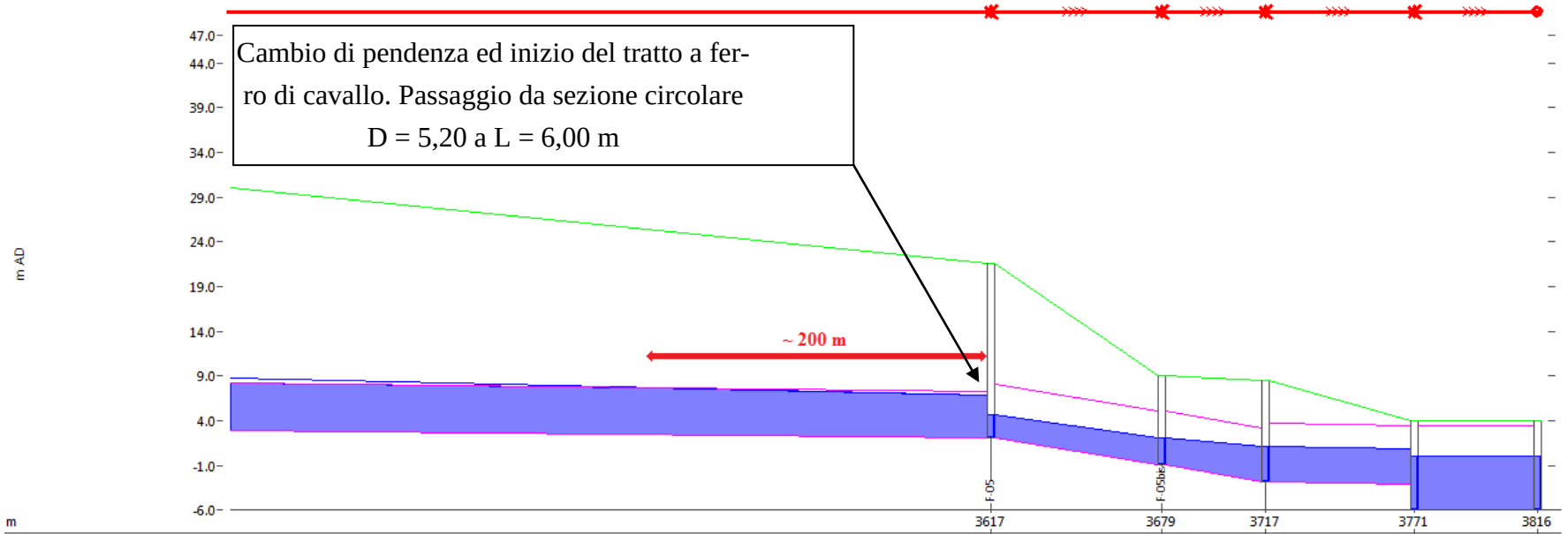
TAB. 5.11 - SCENARIO 3: RISULTATI PER LA GALLERIA NOVARE

ID nodo monte	ID nodo valle	Forma sez.	Altezza sez. (m)	Portata (m^3/s)	Grado riemp. (%)	Tirante / Carico piezometrico monte (m)	Numero Froude monte	Velocità monte (m/s)	Tirante valle (m)	Numero Froude valle	Velocità valle (m/s)
R-01	R-02	POLIC	3,20	26,00	100%	2,86	0,53	3,31	9,63	0,08	2,90
R-02	R-03	POLIC	3,70	26,00	100%	9,63	0,05	2,19	10,62	0,05	2,18
R-03	R-04	POLIC	4,20	26,00	100%	10,62	0,04	1,70	11,61	0,04	1,69
R-04	R-05	POLIC	4,70	26,00	100%	11,61	0,03	1,36	12,61	0,03	1,35
R-05	F-02	POLIC	5,20	26,00	100%	12,61	0,02	1,11	12,90	0,02	1,11



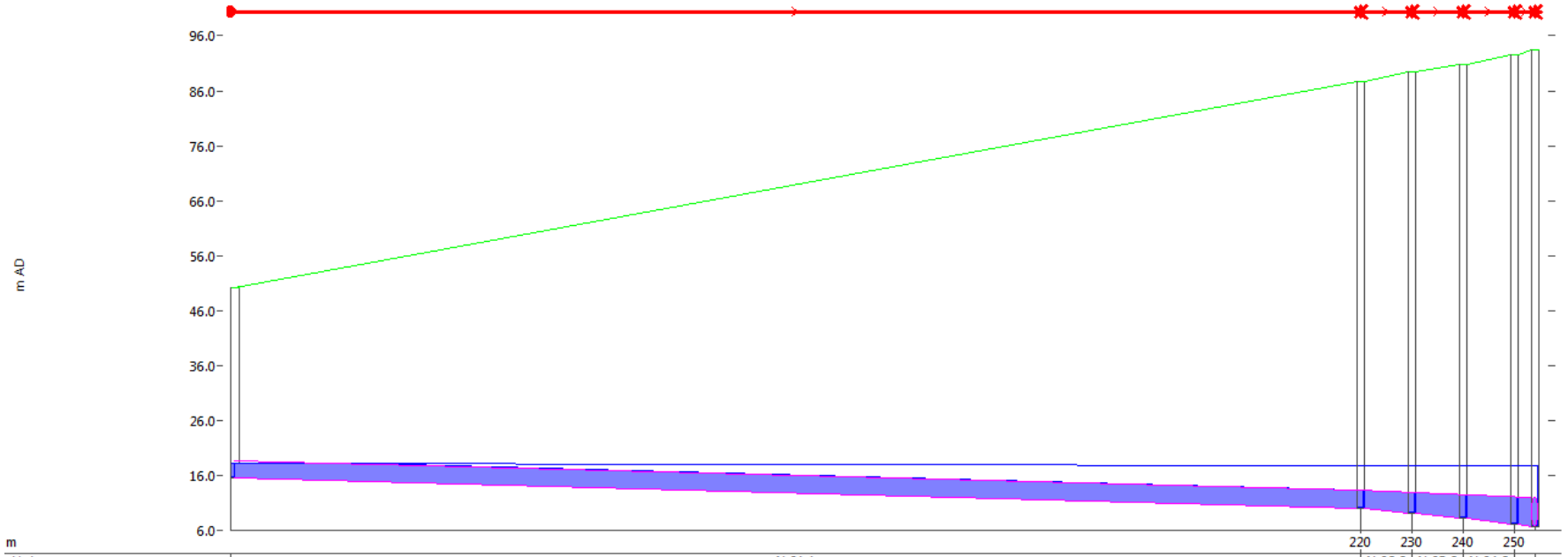
Link		F-01.2	F-02.1	F-03.1	F-04.2	-	-	-
Lunghezza (m)		1026.2	1018.3	763.3	808.9	-	-	-
ID Forma		POLIC	POLIC	POLIC	CIRC	-	-	-
Altezza (mm)		5200	5200	5200	5200	-	-	-
Livello Scorrimento Monte (m AD)		13.000	9.920	6.860	4.570	-	-	-
Livello Scorrimento Valle (m AD)		9.920	6.860	4.570	2.140	-	-	-
Pendenza (%)		0.300	0.300	0.300	0.300	-	-	-
US Tirante (m)		13.175	12.901	10.896	8.037	-	-	-
US Portata (m3/s)		111.00	137.00	160.00	160.00	-	-	-
US Numero Froude		0.098	0.121	0.143	0.157	-	-	-
US Velocità (m/s)		4.736	5.852	6.893	7.184	-	-	-
DS Tirante (m)		12.913	10.918	8.037	4.680	-	-	-
DS Portata (m3/s)		111.00	137.00	160.00	160.00	-	-	-
DS Numero Froude		0.098	0.122	0.145	0.999	-	-	-
DS Velocità (m/s)		4.741	5.901	6.977	7.947	-	-	-
Node	F-01	F-02	F-03	F-04	F-05			
Livello Terreno (m AD)	70.000	122.500	93.530	46.290	21.590			
Livello (m AD)	26.261	22.821	17.756	12.607	4.729			

FIG. 5.10 - SCENARIO 3: PROFILO LONGITUDINALE GALLERIA FEREGGIANO



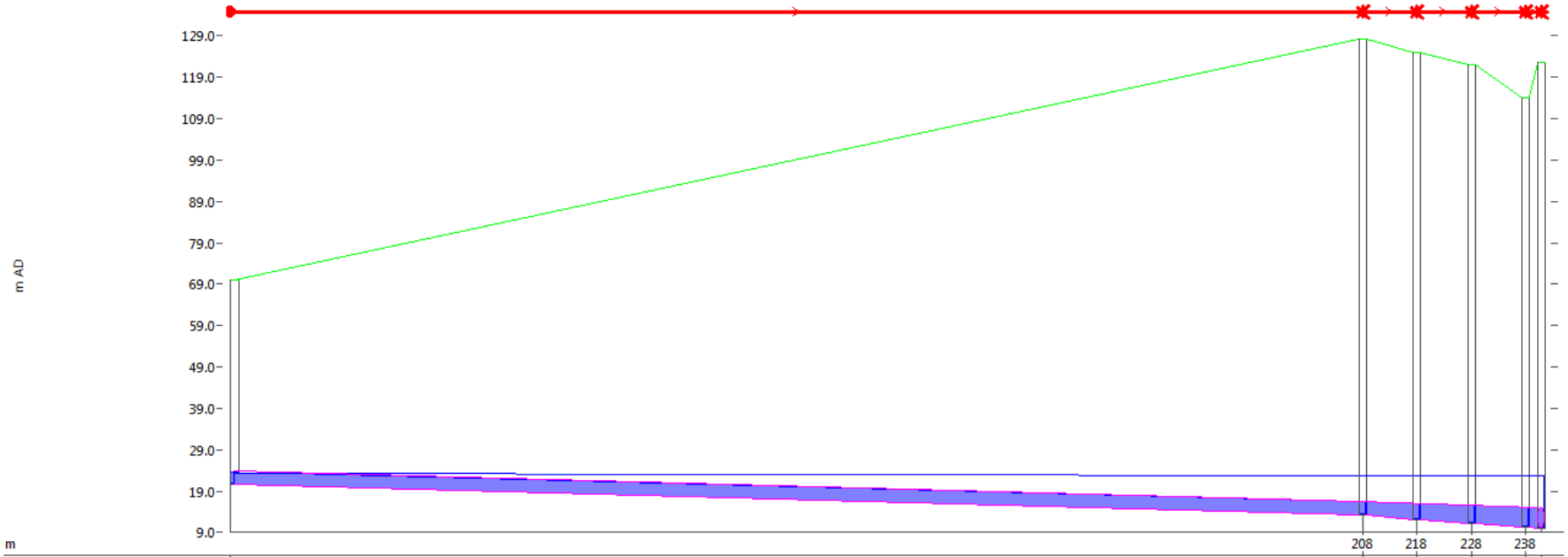
Link		F-05.1	F-05bis.1	F-06.1	F-07.1
Lunghezza (m)		62.0	38.0	54.0	45.0
ID Forma		VAR.	VAR.	RECT	RECT
Altezza (mm)		6000	6000	6500	9500
Livello Scorrimento Monte (m AD)		2.140	-0.935	-2.820	-6.000
Livello Scorrimento Valle (m AD)		-0.935	-2.820	-3.050	-6.000
Pendenza (%)		4.960	4.960	0.426	0.000
US Tirante (m)		2.589	3.019	3.906	6.007
US Portata (m3/s)		160.00	160.00	160.00	160.00
US Numero Froude		3.067	2.436	1.103	0.248
US Velocità (m/s)		15.453	13.251	6.827	1.903
DS Tirante (m)		3.019	3.914	3.906	6.000
DS Portata (m3/s)		160.00	160.00	160.00	160.00
DS Numero Froude		2.435	1.649	1.103	0.248
DS Velocità (m/s)		13.248	10.219	6.827	1.905
Node	F-05	F-05bis	F-06	F-07	F-08
Livello Terreno (m AD)	21.590	9.000	8.490	4.000	4.000
Livello (m AD)	4.729	2.083	1.086	0.007	0.000

FIG. 5.11 - SCENARIO 3: PROFILO LONGITUDINALE GALLERIA FEREGGIANO – DETTAGLIO TRATTO FINALE



Link		N-01.1				N-02.2	N-03.2	N-04.2	-
Lunghezza (m)		220.2				10.0	9.9	10.1	4.1
ID Forma		POLIC				POLIC	POLIC	POLIC	-
Altezza (mm)		3200				3700	4200	4700	-
Livello Scorrimento Monte (m AD)		15.640				10.200	9.218	8.245	-
Livello Scorrimento Valle (m AD)		10.200				9.218	8.245	7.259	-
Pendenza (%)		2.471				9.797	9.797	9.797	-
US Tirante (m)		2.652				7.588	8.555	9.519	-
US Portata (m3/s)		23.00				23.00	23.00	23.00	-
US Numero Froude		0.563				0.048	0.035	0.026	-
US Velocità (m/s)		3.105				1.959	1.521	1.215	-
DS Tirante (m)		7.588				8.555	9.519	10.499	-
DS Portata (m3/s)		23.00				23.00	23.00	23.00	-
DS Numero Froude		0.068				0.048	0.035	0.026	-
DS Velocità (m/s)		2.601				1.948	1.513	1.209	-
Node	N-01					N-02	N-03	N-04	-
Livello Terreno (m AD)	50.230					87.670	89.390	90.870	-
Livello (m AD)	18.309					17.788	17.773	17.764	-

FIG. 5.12 - SCENARIO 3: PROFILO LONGITUDINALE GALLERIA NOCE



Link		R-01.2	R-02.1	R-03.1	R-04.1	-
Lunghezza (m)		208.1	10.0	10.0	10.0	-
ID Forma		POLIC	POLIC	POLIC	POLIC	-
Altezza (mm)		3200	3700	4200	4700	-
Livello Scorrimento Monte (m AD)		20.610	13.230	12.223	11.216	-
Livello Scorrimento Valle (m AD)		13.230	12.223	11.216	10.209	-
Pendenza (%)		3.547	10.073	10.073	10.073	-
US Tirante (m)		2.862	9.628	10.618	11.614	-
US Portata (m3/s)		26.00	26.00	26.00	26.00	-
US Numero Froude		0.526	0.053	0.039	0.030	-
US Velocità (m/s)		3.307	2.188	1.701	1.360	-
DS Tirante (m)		9.628	10.618	11.614	12.614	-
DS Portata (m3/s)		26.00	26.00	26.00	26.00	-
DS Numero Froude		0.076	0.053	0.039	0.029	-
DS Velocità (m/s)		2.900	2.175	1.692	1.354	-
Node	R-01		R-02	R-03	R-04	-
Livello Terreno (m AD)	69.920		128.260	-	-	-
Livello (m AD)	23.494		22.858	22.841	22.830	-

FIG. 5.13 - SCENARIO 3: PROFILO LONGITUDINALE GALLERIA ROVARE

6. STUDIO DI ALCUNI ELEMENTI SINGOLARI DELLA GALLERIA

6.1. Gli aerofori/sfiati della galleria

La galleria Fereggiano ha un comportamento idraulicamente diverso a seconda della porta che convoglia: fino a 110 m3/s è in grado di convogliare le portate a pelo libero, oltre tale valore di portata, la galleria funziona in pressione.
Quando funziona a pelo libero, per evitare che piccole sacche di depressione possano rincollare la corrente al soffitto della galleria con pericoli di cavitazione e danni al rivestimento, è necessario garantire un corretto re-integro d'aria.
Viceversa, quando la galleria tende a lavorare in pressione, è bene che l'aria possa essere correttamente espulsa dalla galleria onde non venire inglobata nella corrente.
Perché ciò avvenga correttamente, sono previsti a servizio della galleria 3 + 4 aerofori/sfiati: 1 per ciascuna delle 3 opere di presa, come già previsto nel PD2007 aventi prevalentemente la funzione di aerofori, poiché le gallerie minori del progetto avevano sempre funzionamento a pelo libero, e 4 lungo l'asse della galleria Fereggiano.
Questi 4 sono così ubicati:

- Giardini Casu – progressiva 870 (tratto galleria esistente)
- Via Forte san Martino – progressiva 1.730 m
- Giardini dell'Ospedale Generale san Martino – progressiva 2.370 m
- Via Pasquale Berghini – progressiva 2.900 m

Gli aerofori/sfiati sono costituiti da (Cfr. Fig. 6.1):

- perforazione in roccia D=300 mm
- rivestimento del foro con tubo camicia in acciaio s = 6 mm D = 250 mm
- intasamento dell'intercapedine tubo-roccia con magrone Rck150;
- finitura di estremità superiore con manufatto fuori terra, altezza 1,80 m in calcestruzzo e rivestimento in mattoni e copertura con grigliato a maglia 5x5 cm resistenza 400 Kg/m^2;
- raccordo con la calotta della galleria, all'estremo inferiore, con corona circolare saldata al piede del tubo e bullonatura alla struttura della galleria, previo inghisaggio nella calotta della galleria di una pista di acciaio di rinforzo con ringrosso locale dello spessore del getto.

La stabilità del tubo camicia è data dall'appoggio dello tesso alla platea di base ricavata all'estremità superiore al pano campagna sopra la quale si appoggia un anello circolare saldato al tubo e rinforzato con opportuni fazzoletti in acciaio.
Le profondità dei vari aerofori sono le seguenti:

TAB. 6.1 - CARATTERISTICHE DEI 4 AEROFORI/SFIATI LUNGO L'ASSE DELLA GALLERIA FEREGGIANO

Aeroforo ubicazione	Quota piano campagna (m s.m.m.)	Quota tetto galleria (m s.m.m.)	Lunghezza (m)
Giardini Casu – progr.870 m(tratto galleria esistente)	43,00	4,50 + 5,20 = 9,70	33,30
Via Forte san Martino – progr-1.730 m	80, 00	7,00 + 5,20 = 12,20	67,80
Giardini dell'Ospedale Generale san Martino – progr.2.370 m	70,00	9,00 + 5,20 = 14,20	55,80
Via Pasquale Berghini – progr.2.900 m	85,00	10,60 + 5,20 = 15,80	69,20

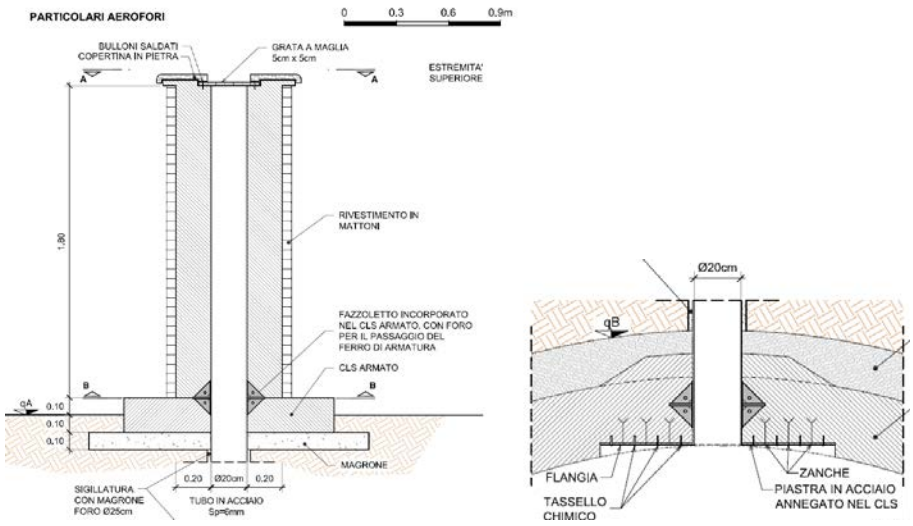


FIG. 6.1 - PARTICOLARI DELLE ESTREMITÀ DI UN AEROFORO

6.2. Funzionamento degli aerofori/sfiati della galleria

Il funzionamento degli aerofori come sfiati, ovvero come elementi di espulsione dell'aria, è piuttosto semplice e non richiede particolari dimensionamenti.

L'aria tende a muoversi verso l'alto e come in un acquedotto è importante che trovi nei punti convessi delle vie di espulsione.
Lungo la galleria vi sono 4 aerofori + 3 subito a valle delle opere di presa sicché l'aria ha sufficienti punti di espulsione.
A differenza di una tubazione di acquedotto, in questo caso la galleria ha una pendenza monotona sicché le bolle d'aria tenderanno sempre a migrare verso monte fino al primo sfiato utile dal quale saranno espulse.
La pressione dell'acqua interna alla galleria è in grado di espellere l'aria (che tende sempre ad andare verso l'alto): gli sfiati hanno la funzione di consentire l'espulsone dell'aria affinché essa non rimanga intrappolata nel flusso con pericolosi incrementi di pressione.
Viceversa, l'aerazione, ossia il re-integro d'aria quando la galleria lavora a pelo libero merita un minimo di attenzione al fine di determinare la sezione minima utile per gli aerofori.
L'espressione che determina la portata d'aria è la seguente:

$$Q_a = 0{,}03Q(F-1)^{1{,}06}$$

ove, al solito, Q indica la portata e F il numero di Froude.
Dalla relazione ben si comprende come essa fornisca valori reali e positivi di portata solo se il numero di Froude è maggiore di 1, ossia se la corrente è in condizioni supercritiche.
Come si è visto, ciò accade per un campo di portate relativamente basso.
Per portate tra 10 e 50 m^3/s circa, la corrente è, in moto uniforme, veloce, con un numero di Froude di poco superiore all'unità
Per questi casi, si assume nel calcolo un valore di 1,1.
E' bene che negli aerofori la velocità dell'aria non superi mai i 50 m/s per evitare rumori o sibili fastidiosi segno di velocità troppo elevate e di elevate perdite di carico del flusso interno all'aeroforo.
La depressione che genera il flusso d'aria richiesto è data dall'espressione:

$$\Delta = \frac{\gamma_a}{\gamma} \cdot \left(1 + k_i + \frac{fL}{d} + k_s\right) \cdot \frac{u^2}{2g}$$

dove si assume:
k_i = 0,5, k_s = 1, f = 0,02, rapporto tra pesi specifici di aria ed acqua: 1,3 x 10^{-3} (aria secca). L è la lunghezza dell'aeroforo e d il suo diametro.
Date le caratteristiche degli aerofori assunti a progetto si ha:

TAB. 6.2 - VERIFICA DELLA VELOCITÀ E DELLA DEPRESSIONE MASSIMI PER SCENARIO 1

L (m)	d (mm)	Depressione (m)	F	Q (m^3/s)	Q_a (m^3/s)	u (m/s)	
33,30	0,25	1,26	1,1	96	0,25	12,6	< 50 m/s
67,80	0,25	2,19	1,1	89	0,23	11,7	< 50 m/s
55,80	0,25	1,46	1,1	80	0,21	10,5	< 50 m/s
69,20	0,25	1,81	1,1	80	0,21	10,5	< 50 m/s

TAB. 6.3 - VERIFICA DELLA VELOCITÀ E DELLA DEPRESSIONE MASSIMI PER SCENARIO 2

L (m)	d (mm)	Depressione (m)	F	Q (m^3/s)	Q_a (m^3/s)	u (m/s)	
33,30	0,25	2,21	1,1	127	0,33	16,7	< 50 m/s
67,80	0,25	3,98	1,1	120	0,31	15,8	< 50 m/s
55,80	0,25	2,81	1,1	111	0,29	14,6	< 50 m/s
69,20	0,25	3,48	1,1	111	0,29	14,6	< 50 m/s

TAB. 6.4 - VERIFICA DELLA VELOCITÀ E DELLA DEPRESSIONE MASSIMI PER SCENARIO 3

L (m)	d (mm)	Depressione (m)	F	Q (m^3/s)	Q_a (m^3/s)	u (m/s)	
33,30	0,25	3,51	1,1	160	0,42	21,0	< 50 m/s
67,80	0,25	5,19	1,1	137	0,36	18,0	< 50 m/s
55,80	0,25	2,81	1,1	111	0,29	14,6	< 50 m/s
69,20	0,25	3,48	1,1	111	0,29	14,6	< 50 m/s

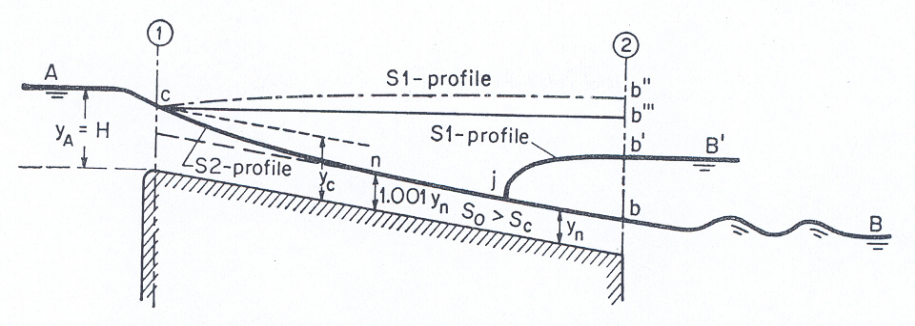
Come si vede, la velocità si mantiene sempre al di sotto dei 50 m/s e la depressione sempre sotto i 5 m (tranne nell'aeroforo di via Forte san Martino ove, il limite di 5 m viene leggermente superato – 5,19 m c.a.)
Non esiste una regola p una normativa che stabilisca la depressione massima accettabile in un aeroforo ma si ritiene che 5 m di depressione sia un valore accattabile e del tutto confrontabile, per esempio, con analoghi valori che vengono assunti a base della progettazione di sistemi fognari a depressione.

6.2.1. Condizioni idrauliche in corrispondenza dello sbocco a mare

Come evidenziato dalle valutazioni di carattere idraulico descritte in precedenza, il funzionamento della galleria di adduzione delle acque di piena, a partire dallo scivolo di raccordo avviene in condizioni supercritiche, e quindi non è influenzabile da quanto può avvenire a valle, cioè allo sbocco a mare, quantomeno per condizioni meteomarine che si possono considerare medie nel paraggio.

In corrispondenza dell'immissione della galleria del Fereggiano, avente sezione rettangolare di luce netta b x h = 6,00 x 6,50 m e pendenza 4,25‰, nell'opera di sbocco del Bisagno, perennemente rigurgitata da mare, pertanto, le condizioni idrauliche che si possono verificare sono le seguenti (Fig. 6.2):

- sino a che la spinta (solo contributo idrostatico) determinata dal mare (M_v) è inferiore alla spinta di moto uniforme della portata scolmata dal Fereggiano (M_m), il profilo di moto nella scolmatore si presenta invariato sino alla sezione rettangolare terminale, e si raccorda al livello del mare attraverso una variazione di livello (hydraulic drop) che corrisponde alla dissipazione del carico cinetico della corrente in uscita dalla galleria;



(Da: Ven Te Chow: Open - channel Hydraulics)

FIG. 6.2 - CONDIZIONI IDRAULICHE ALLO SBOCCO DELLA GALLERIA

- quando la spinta del mare è pari alla spinta totale della corrente di moto uniforme proveniente da monte, si avrà la formazione di un risalto ubicato esattamente in corrispondenza della sezione terminale dello scolmatore;
- quando infine la spinta a mare (M_v) è superiore alla spinta di moto uniforme proveniente da monte (M_m), si avrà che la spinta totale di valle (M_v) è superiore a quella della corrente in arrivo da monte (M_m), e quindi il risalto che si formerà non sarà più collocato al termine dello scolmatore ma si sposterà, in galleria, raccordandosi secondo un profilo S1.

La curva M(y), cioè la spinta totale della corrente in funzione del suo tirante d'acqua, che è data dalla relazione seguente:

$$M(y) = y_G A + \frac{Q^2}{gA}$$

dove si intende:

$M(y)$	spinta totale per unità di peso del fluido (m^3)
y_G	profondità del baricentro della sezione liquida rispetto al pelo libero (m)
A	sezione liquida (m^2)
Q	portata (m^3/s)
g	accelerazione di gravità (m/s^2)

Le due altezze di moto supercritico e subcritico coniugate nel risalto presentano la stessa spinta totale $M(y)$ e pertanto, sostituendo i valori numerici, si ottengono i valori di tirante d'acqua y_2 per le portate in galleria pari a 30, 60, 90, 97, 120, 127 e 160 m^3/s. Nella Fig. 6.3 viene riportato l'andamento della spinta totale della corrente nello scolmatore in funzione del tirante d'acqua, al variare della portata convogliata in galleria.

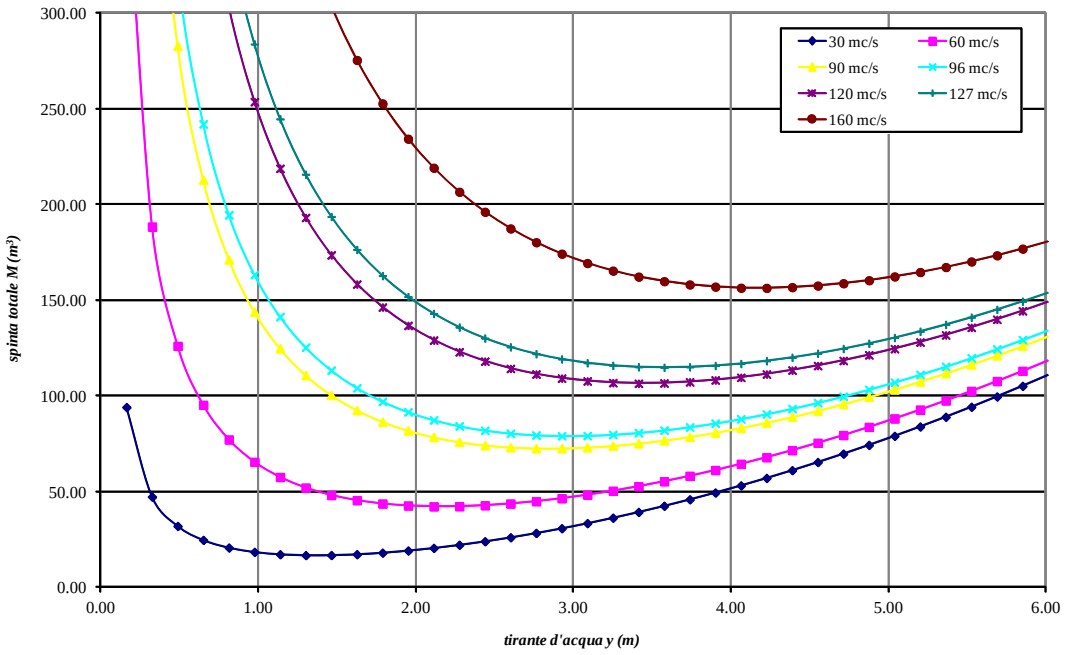


FIG. 6.3 - SPINTA TOTALE NELLO SCOLMATORE AL VARIARE DELLA PORTATA IN TRANSITO

Nella Tab. 6.5 invece vengono forniti i valori significativi di moto uniforme per i sette valori di portata considerati.

TAB. 6.5 - VALORI DI MOTO UNIFORME AL VARIARE DELLA PORTATA NELLO SCOLMATORE

portata (m^3/s)	***30***	***60***	***90***	***96***	***120***	***127***	***160***
tirante di moto uniforme (m)	1.154	1.864	2.496	2.618	3.091	3.226	3.850
grado di riempimento (y/D)	0.18	0.29	0.38	0.40	0.48	0.50	0.59
velocità (m/s)	4.33	5.36	6.01	6.11	6.47	6.56	6.93
aera (m^2)	6.92	11.18	14.98	15.71	18.55	19.36	23.10
Numero di Froude	1.29	1.25	1.21	1.21	1.18	1.17	1.13

Dalle analisi delle condizioni di deflusso, sulla base delle considerazioni di spinta in precedenza illustrate, emerge che la scala di deflusso in corrispondenza della sezione terminale scatolare, considerando un livello di valle pari allo 0 medio mare, risulta essere conforme a quanto sotto riportato.

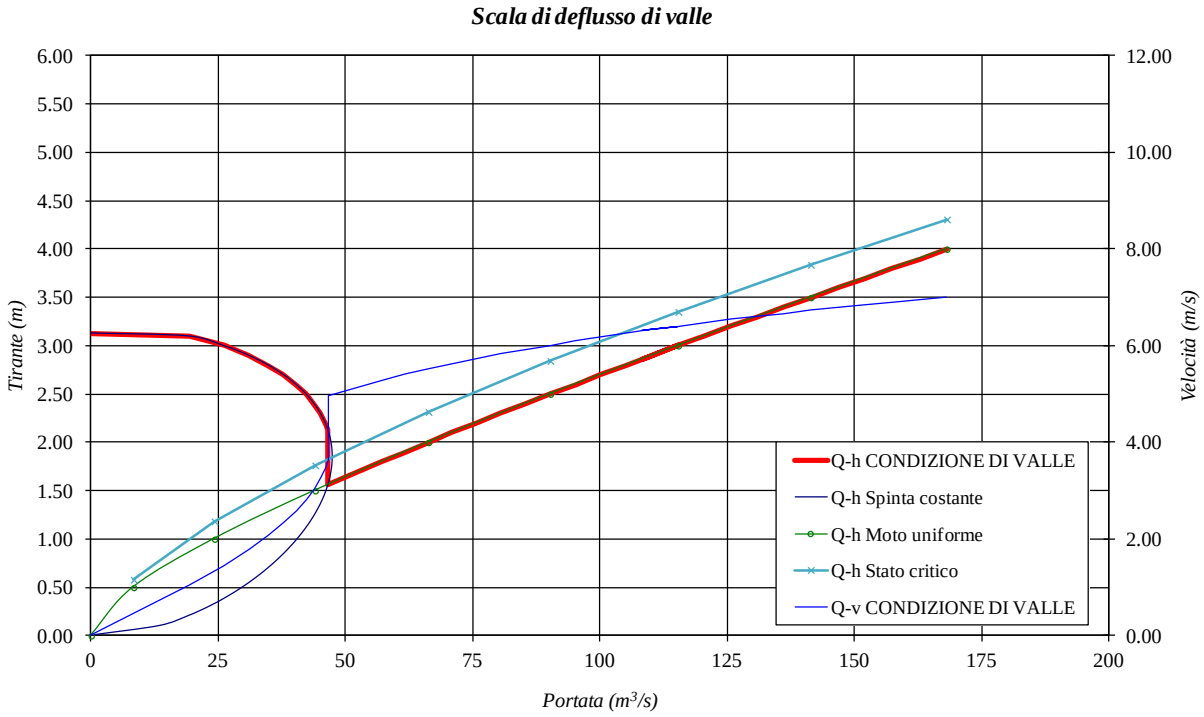


FIG. 6.4 - SCALA DI DEFLUSSO SEZIONE TERMINALE DELLO SCOLMATORE

I tiranti che si ottengono sono sempre ampiamente compatibili con le altezze tuli dei manufatti (sempre superiori o uguali a 6,50 m).
In sostanza si può concludere che, in assenza di moto ondoso e con il livello a mare pari a 0,00 m s.m.m., lo sbocco a mare presenta un risalto quando il valore di

portata scende al disotto di circa 45 m^3/s, mentre per valori superiori si verranno a determinare condizioni di efflusso libero in condizioni di moto uniforme supercritico, con valori di velocità compresi tra 5 m/s ed un massimo di 7 m/s in corrispondenza della portata di 160 m^3/s.
Ciò equivale a dire che il risalto si forma solo per portate piccole quando i fenomeni dissipativi sono facilmente controllabili internamente ai manufatti.
Per le portate più elevati, la corrente ha una energia ed una spinta tale da uscire in mare in condizioni di moto supercritico e provocando in mare tutti i fenomeni dissipativi.

6.2.2. Sopralzo in curva

E' noto che, poiché in una corrente supercritica le perturbazioni non possono propagarsi a monte della posizione ove sono state generate, l'effetto di un cambiamento di direzione del flusso genera una serie di perturbazioni di altezza finita che prendono avvio dal punto dove è iniziata la deviazione angolare del flusso stesso.
Nel caso in esame, avendo un moto confinato su due lati, il flusso in galleria, in corrispondenza delle deviazioni planimetriche, verrà interessato da una serie di fronti d'onda stazionari che si intersecano tra loro e che generano una variazione del tirante d'acqua incrementando e diminuendo il valore di una quantità definita e pari a $\Delta y/2$, come evidenziato nella Fig. 6.5.
L'incremento del tirante d'acqua, valutato come differenza tra il valore massimo ($y + 0.5\Delta y$) ed il valore minimo ($y - 0.5\Delta y$), è dato dalla seguente formulazione:

$$\Delta y = \frac{2v^2 B}{g r_m}$$

dove si intende:

- v velocità della corrente (m/s)
- B larghezza del canale (m)
- g accelerazione di gravità (m/s^2)
- r_m raggio di curvatura (m)

Tale formulazione, che è stata determinata per una sezione rettangolare, è valida con buona approssimazione anche per la sezione circolare.

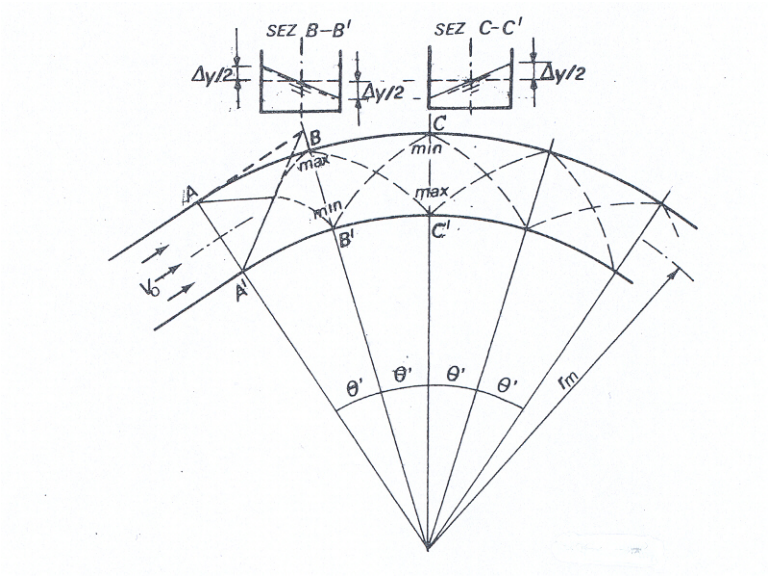


FIG. 6.5 - SOPRALZO IN CURVA NELLE VARIAZIONI PLANIMETRICHE DELLE CORRENTI SUPERCRITICHE *(DA: GHETTI: IDRAULICA)*

L'angolo θ' richiesto per lo sviluppo del massimo incremento di livello (y + 0.5Δy) è dato dalla seguente relazione:

$$\tan\theta' = \frac{B}{\left(r_m + \frac{B}{2}\right)\tan\beta_0}$$

dove si ha:

$$\beta_0 = arcsin\left(\frac{1}{F_r}\right)$$

con il seguente significato dei parametri:

F_r numero di Froude della corrente

B larghezza del canale (m)

r_m raggio di curvatura (m)

Considerando i diversi valori del raggio di curvatura che si incontrano lungo lo sviluppo della galleria, ed i diversi valori che assume il numero di Froude in funzione del valore di portata che fluisce lungo la galleria, si possono stimare i valori di sopralzo del tirante d'acqua.

Il caso di maggior interesse è quello della curva a valle del pozzo Fereggiano che ha raggio di 140 m.
Con i dati di flusso ricavati in quel punto, il massimo sovralzo, allorquando la galleria funziona a pelo libero, risulta di 15 cm che sommato al tirante associato alla portata di scenario 1 consente di avere sempre una corrente a pelo libero senza rincolli alla calotta.
Per gli scenari 2 e 3, il funzionamento della galleria cambia completamente da pelo libero a pressione e appare privo di significato il calcolo del sovralzo in curva.