



COMUNE DI CEMBRA LISIGNAGO
Provincia Autonoma di Trento



REALIZZAZIONE DEL COLLEGAMENTO LONA - CEMBRA
PER LA VALORIZZAZIONE DELLA VIABILITA' ESISTENTE
A SCOPO TURISTICO E AGRICOLO

PROGETTO DEFINITIVO

STUDIO DI COMPATIBILITA': RELAZIONE IDRAULICA INERENTE IL PONTE SUL TORRENTE AVISIO



E' vietata la riproduzione anche parziale di questo elaborato se non espressamente autorizzata da S.T.A. engineering

STUDIO TECNICO ASSOCIATO
Progettazione e direzione lavori di opere
infrastrutturali, idrauliche, idroelettriche ed edili

S.T.A. engineering - Studio Tecnico Associato
dott. ingg. Andrea ZANETTI, Paolo DE IORIO
Via Valentina Zambra 11, 38121 Trento
tel: 0461/82.00.90 - fax: 0461/82.95.90 - mail: info@sta.tn.it - web: www.sta.tn.it
P.Iva/C.F.: 01231190222

Elaborato n

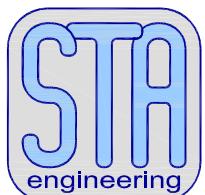
1021 - 1

Scala

Data originaria
ottobre 2021

Revislone

Riferimento
AnG 490-def



**REALIZZAZIONE DEL COLLEGAMENTO LONA – CEMBRA PER LA
VALORIZZAZIONE DELLA VIABILITA' ESISTENTE A SCOPO
TURISTICO E AGRICOLO**

**STUDIO DI COMPATIBILITA':
RELAZIONE IDRAULICA INERENTE
IL PONTE SUL TORRENTE AVISIO**

INDICE

| | | |
|-----|--|----|
| 1 | DESCRIZIONE DELL'INTERVENTO | 3 |
| 1.1 | INQUADRAMENTO DELL'AREA DI PROGETTO..... | 3 |
| | Descrizione sintetica delle opere | 3 |
| 2 | VERIFICA IDRAULICA DEL PONTE CON Q_{200} | 5 |
| 2.1 | CALCOLO PORTATA DI PIENA CON TEMPO DI RITORNO 200 ANNI..... | 5 |
| 2.2 | DETERMINAZIONE DEL PROFILO PELO LIBERO T. AVISIO CON Q_{200} | 9 |
| 2.3 | FRANCO IDRAULICO SUL PONTE..... | 10 |
| 2.4 | TRASPORTO SOLIDO..... | 10 |
| 3 | VERIFICA IDRAULICA IN FASE DI COSTRUZIONE | 12 |
| 3.1 | CALCOLO PORTATA DI PIENA CON TEMPO DI RITORNO 20 ANNI..... | 12 |
| 3.2 | DETERMINAZIONE DEL PROFILO CON Q_{20} | 15 |
| 3.3 | FRANCO IDRAULICO SUL PONTEGGIO | 16 |
| 4 | RISULTATI DEI CALCOLI | 17 |

1 **DESCRIZIONE DELL'INTERVENTO**

1.1 **INQUADRAMENTO DELL'AREA DI PROGETTO**

Il progetto in oggetto è riferito ai lavori di realizzazione di un nuovo collegamento stradale denominato “Lona-Cembra”, in val di Cembra, finalizzato alla valorizzazione della viabilità esistente a scopo turistico e agricolo. È previsto il superamento del T. Avisio mediante la costruzione di un nuovo ponte reticolare in acciaio di luce pari a 56,00 metri.

La scelta della ubicazione dell’opera è dettata dalla presenza delle viabilità esistenti che scendono dai due versanti:

- sulla sponda orografica sinistra (Lona Lases) la strada costituisce il prolungamento della viabilità di accesso alla centrale Edison. Infatti la viabilità si sviluppa scendendo dal parcheggio “centrale Edison” lungo la strada forestale esistente fino alla spalla destra del nuovo ponte.
- sulla sponda orografica destra (Cembra) si utilizza la viabilità agricola esistente che scende in prossimità della spalla sinistra del nuovo ponte.

Per i motivi sopra illustrati dunque, si può certamente affermare che l’opera di infrastrutturazione non è delocalizzabile e non contribuisce a incrementare il carico insediativo esposto a pericolo.

Descrizione sintetica delle opere

Il progetto schematicamente prevede la realizzazione del collegamento per viabilità turistico agricole tra l’abitato di Cembra e quello di Lona Lases. Sinteticamente i lavori sono così suddivisi:

- Nuovo ponte sul torrente Avisio di luce pari a circa 56 ml
- Opere stradali in sponda destra Avisio (lato Cembra)
- Opere stradali in sponda sinistra Avisio (lato Lona Lases).

Per quanto concerne il nuovo ponte, questo sarà realizzato tramite struttura reticolare in acciaio con luce di 56 m.

La pavimentazione del ponte è costituita da un tavolato incrociato in larice posato su listoni sempre di legno di larice. Le spalle del ponte hanno struttura in cemento armato (C25/30) con fondazioni su micropali.

In sinistra orografica (lato Lona) si prevedono opere di difesa spondale, costituite da una scogliera in massi ciclopici, mirate a evitare potenziali erosioni lungo il lato esterno della curva che percorre il torrente Avisio.

Si prevede di collegare il nuovo ponte con la viabilità esistente che scende da Cembra costituita da una strada con pavimentazione in cemento armato, di limitata larghezza e pendenza lungo alcune tratte pari a circa il 25%.

Sono previste opere di consolidamento della strada mediante gabbionate metalliche.

Sulla strada che scende da Cembra sono previsti gli allargamenti dei due tornanti terminali prevedendo opere di consolidamento dei versanti con reti metalliche. Si prevede di realizzare un breve tratto di barriera paramassi (80 kJ) lungo il tratto terminale della strada che scende verso la nuova spalla.

Sono previste le opere di canalizzazione idraulica delle acque meteoriche.

Lungo la strada che scende in sponda sinistra (lato Lona Lases) è prevista la realizzazione di un tombino in cemento armato sul rio di Piazzole realizzando inoltre scogliere a consolidamento dell'alveo.

Sempre lungo il versante destro sono previste opere di sistemazione forestale delle zone a maggior acclività (realizzazione di viminate).

Sono inoltre previste opere provvisionali in alveo finalizzate alla realizzazione dell'impalcato del ponte.

Con la presente relazione idraulica sono esposte le verifiche dei franchi idraulici in fase di costruzione e in fase di esercizio del nuovo ponte e delle relative opere in alveo.

Per la fase di costruzione è prevista la realizzazione di un restringimento al fine di creare due ture su cui realizzare una struttura provvisoriale necessaria per la costruzione del nuovo ponte; la verifica del franco idraulico in corrispondenza di detto restringimento è effettuata valutando la portata massima con tempo di ritorno ventennale. Il restringimento dovrà essere smobilizzato nei mesi di ottobre-novembre-dicembre.

In fase di esercizio è stata svolta la verifica della compatibilità idraulica come previsto dalla normativa vigente con portata massima bicentenaria.

Si riporta in seguito:

- il calcolo della portata massima con tempo di ritorno 200 anni partendo da misure di portata in alveo dal 1994 al 2019 utilizzando il metodo di Gumbel;
- il calcolo del profilo del pelo libero dell'alveo in fase di esercizio del ponte, dal quale risulta un franco di circa 700 cm tra pelo libero dell'acqua con portata Q_{200} e l'intradosso del ponte;
- il calcolo della portata massima con tempo di ritorno 20 anni partendo da misure di portata in alveo dal 1994 al 2019 utilizzando il metodo di Gumbel escludendo le portate massime in alveo nei mesi di ottobre-novembre-dicembre;
- il calcolo del profilo pelo libero dell'alveo in fase di costruzione del ponte, dal quale risulta un franco superiore a 100 cm in corrispondenza del restringimento in condizioni di portata massima con tempo di ritorno 20 anni.

2 VERIFICA IDRAULICA DEL PONTE CON Q₂₀₀

2.1 CALCOLO PORTATA DI PIENA CON TEMPO DI RITORNO 200 ANNI

Ai fini della determinazione della portata di piena si utilizza il metodo probabilistico di Gumbel.

Si ritiene infatti più attendibile, al fine di determinazione della portata di piena, utilizzare il metodo di calcolo probabilistico proposto da Gumbel che, sulla base delle portate massime rilevate in N anni, consente di estrapolare una curva portata/probabilità dalla quale si ricava il valore della Q₂₀₀.

In particolare la curva di probabilità della portata ha la seguente equazione:

$$P(Q \leq Q_i) = e^{-e^{-(\alpha(Q-u))}}$$

Si rileva che la funzione dipende dai parametri α e u incogniti, che sono incogniti.

La frequenza di NON superamento di un determinato evento in generale vale:

$$F(Q \leq Q_i) = 1 - P(Q \leq Q_i) = 1 - e^{-e^{-(\alpha(Q-u))}}$$

essendo “ T_r ” il tempo di ritorno, “ N ” il numero di eventi utilizzati e il pedice “ i ” rappresenta il numero corrispondente all’evento ordinato in modo crescente ($i=1$ evento con valore minimo; $i=N$ evento con valore massimo).

Quindi si ha:

$$P(Q \leq Q_i) = e^{-e^{-(\alpha(Q-u))}} = 1 - e^{-1/T_r} = F(Q \leq Q_i)$$

e introducendo una variabile causale $y = \alpha(Q-u)$ si ha:

$$P(Q \leq Q_i) = 1 - e^{-1/T_r} = e^{-e^{-y}}$$

Invertendo la sopra riportata formula si ottiene:

$$y = -\ln[-\ln(1 - 1/T_r)] = -\ln[-\ln(F_i)]$$

I valori di α e u si calcolano con il metodo dei momenti in funzione dei due seguenti parametri statistici:

- 1) Media dei valori: $Q_m = 1/N \sum Q_i = \bar{Q} = 0,57725$ (numero di Eulero)
- 2) Varianza dei valori: $Var(Q) = 1/(N-1) \sum (Q_i - Q_m)^2 = \sigma^2 = \pi^2/6$

Risulta quindi:

$$\pi^2/6 = \alpha^2 Var(Q)$$

da cui si ricava α mentre si ha:

$$0.5772 = \alpha \cdot Q_m - u \alpha$$

da cui si ricava u .

Ai fini della determinazione degli eventi storici si utilizzano i dati rilevati dall’Ufficio Dighe della P.A.T. riguardanti le portate orarie nel periodo compreso tra il 01/06/1994 ed il 30/11/2019 alla stazione di misura posta sul fiume Avisio a Lavis. Da tale analisi vengono esclusi gli anni 2005 e 2006 poiché i dati dal 18/03/2005 al 13/10/2006 non vengono forniti a causa di un intervento straordinario di manutenzione dell’alveo che ha modificato la sezione idraulica.

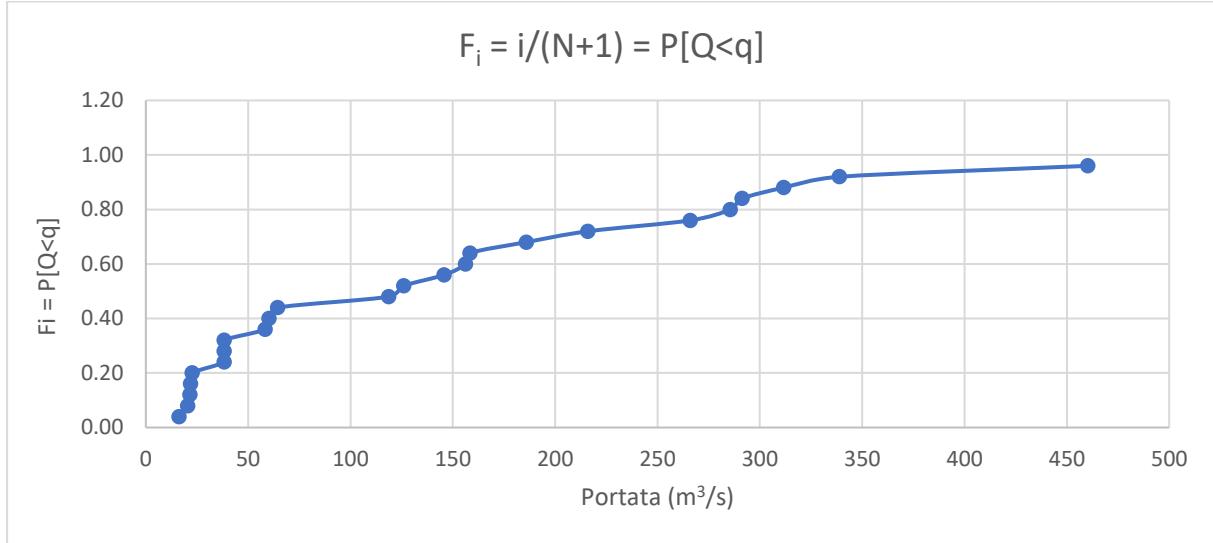
Si riporta la procedura di calcolo da cui risulta che la portata Q₂₀₀, che risulta pari a 648 m³/s.

Di seguito si riportano le portate massime annuali desunte dall'analisi dei dati forniti dall'Ufficio Dighe della P.A.T. a Lavis ordinate in modo crescente:

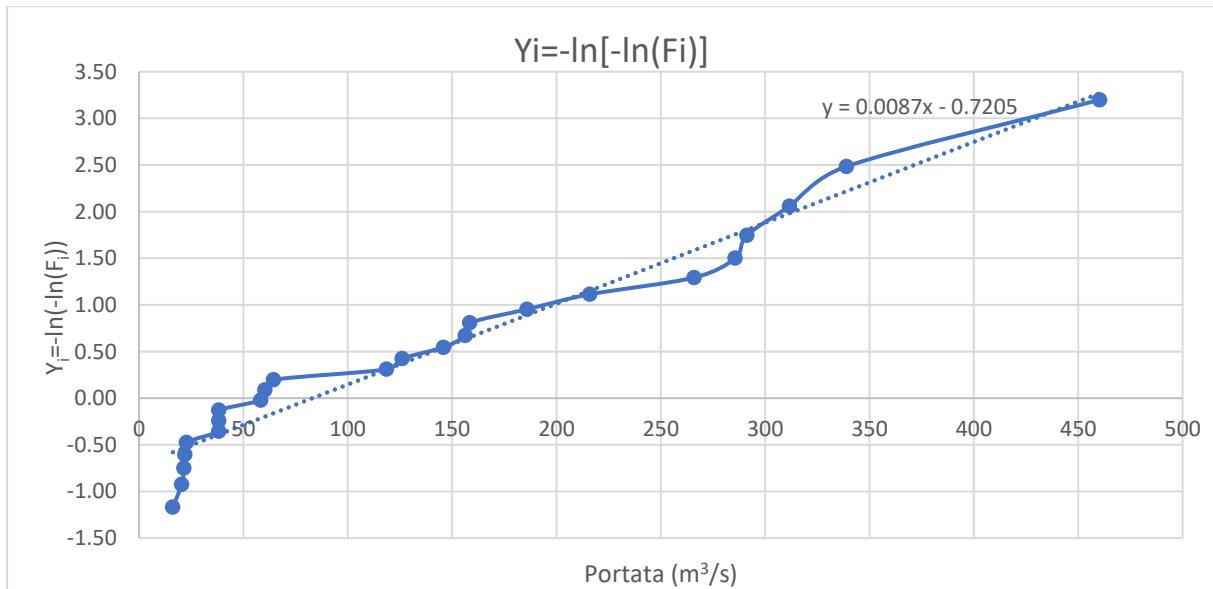
| POSIZIONE | ANNO | $Q_{\max} (\text{m}^3/\text{s})$ | $F_i = i/(N+1)$ | $Y_i = -\ln[-\ln(F_i)]$ |
|-----------|------|----------------------------------|-----------------|-------------------------|
| 1 | 2007 | 16,17 | 0,04 | -1,1690 |
| 2 | 2017 | 20,4 | 0,08 | -0,9265 |
| 3 | 2016 | 21,5 | 0,12 | -0,7515 |
| 4 | 2003 | 21,86 | 0,16 | -0,6057 |
| 5 | 2015 | 22,62 | 0,20 | -0,4759 |
| 6 | 1994 | 38,24 | 0,24 | -0,3557 |
| 7 | 1995 | 38,24 | 0,28 | -0,2413 |
| 8 | 2001 | 38,24 | 0,32 | -0,1305 |
| 9 | 2009 | 58,29 | 0,36 | -0,0214 |
| 10 | 2004 | 60,24 | 0,40 | 0,0874 |
| 11 | 2011 | 64,35 | 0,44 | 0,1973 |
| 12 | 2010 | 118,62 | 0,48 | 0,3093 |
| 13 | 2019 | 126,06 | 0,52 | 0,4248 |
| 14 | 1996 | 145,8 | 0,56 | 0,5450 |
| 15 | 1997 | 156,23 | 0,60 | 0,6717 |
| 16 | 1999 | 158,37 | 0,64 | 0,8068 |
| 17 | 2012 | 185,87 | 0,68 | 0,9528 |
| 18 | 2013 | 216,02 | 0,72 | 1,1132 |
| 19 | 2008 | 266,01 | 0,76 | 1,2930 |
| 20 | 2002 | 285,6 | 0,80 | 1,4999 |
| 21 | 2000 | 291,31 | 0,84 | 1,7467 |
| 22 | 2014 | 311,58 | 0,88 | 2,0570 |
| 23 | 1998 | 338,92 | 0,92 | 2,4843 |
| 24 | 2018 | 460,27 | 0,96 | 3,1985 |

Di conseguenza si ricava che il valore della portata media Q_m risulta pari a 144 m^3/s mentre la $\text{Var}(Q)$ risulta 15719 m^6/s^2 .

L'andamento della F_i viene riportato nel seguente grafico:



Per la determinazione dei parametri incogniti della distribuzione di Gumbel si utilizzano sia il metodo dei momenti sia la regressione lineare. Dal momento che la regressione lineare assegna i parametri che forniscono un valore di portata bicanteraria maggiore si riporta tale stima. Dal seguente grafico:

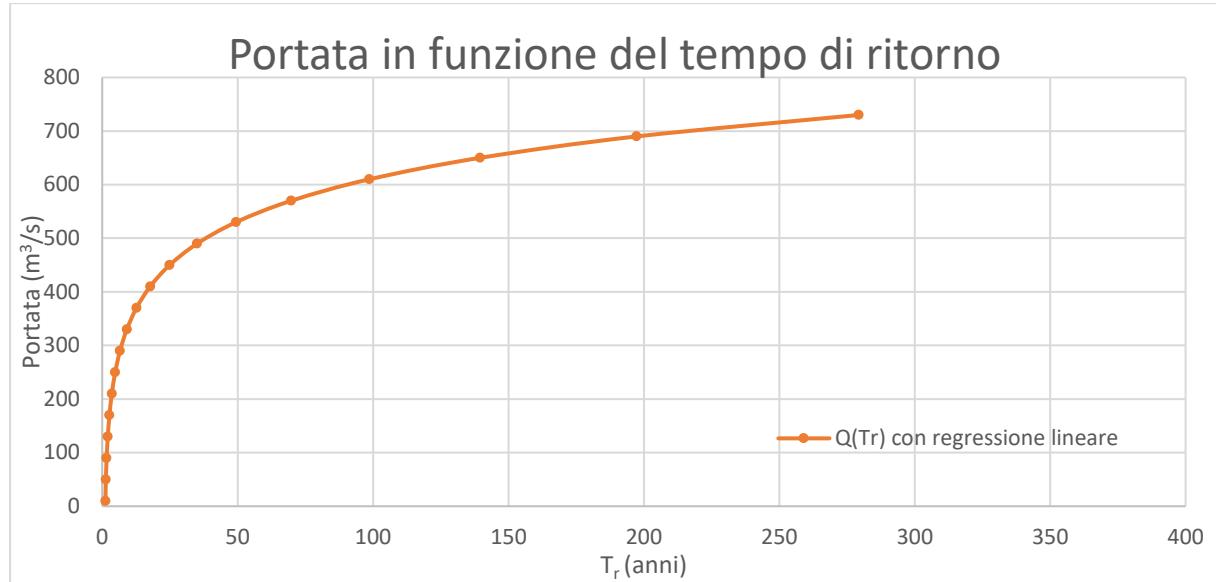


si ricavano i valori di a e b pari rispettivamente a 0.0087 e -0.7205, per cui si ha che:

$$\alpha = a = 0.009$$

$$u = -b/a = 82.816.$$

Di conseguenza, si è ora in grado di scrivere l'espressione di Gumbel e quindi di graficare l'andamento della portata in funzione del tempo di ritorno, che risulta:



Fissato T_r pari a 200 anni si ha che $P(Q \leq Q_i) = 1 - 1/T_r = 0.995$ e quindi si è ora in grado, dall'espressione di Gumbel, di ricavare la portata bicenteneria pari a $683 \text{ m}^3/\text{s}$.

Tale portata è da riferirsi al bacino imbrifero che ha sezione di chiusura in prossimità dell'idrometro di Lavis.

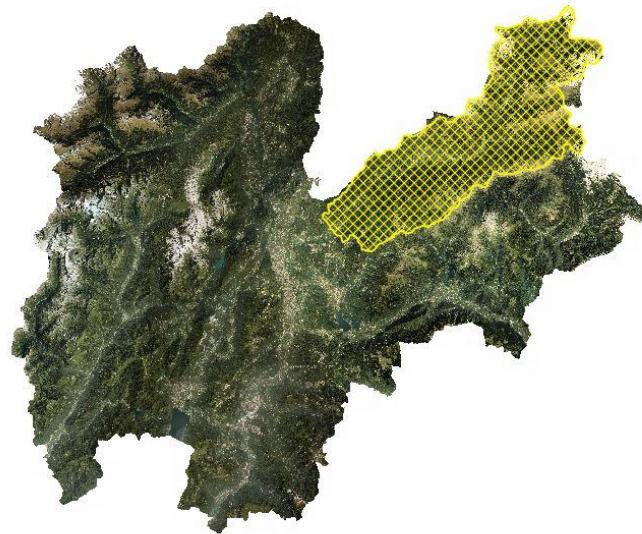


Figura 1. Area del bacino imbrifero con sezione di chiusura presso il nuovo ponte di collegamento.

Dal momento che il nostro ponte è localizzato a monte di tale idrometro si procede a determinare l'area del bacino imbrifero con chiusura nel punto della localizzazione di tale manufatto. In Figura 1 si riporta l'estrazione del bacino di interesse. L'area di tale bacino risulta pari a 883.7 km^2 mentre l'area

del bacino imbrifero con sezione di chiusura presso l'idrometro di Lavis è pari a 931.5 km². Raggiungendo la portata bicentenaria con tali aree risulta che, al ponte di nuova costruzione, la portata con tempo di ritorno pari a 200 anni è 648 m³/s.

2.2 DETERMINAZIONE DEL PROFILO PELO LIBERO T. AVISIO CON Q₂₀₀

Il calcolo idraulico viene effettuato sulla base di criteri energetici: trattandosi di un corso d'acqua in corrente veloce viene prima calcolato il carico effettivo (e l'altezza del tirante d'acqua) nella sezione a monte, poi viene determinato il profilo di moto permanente ($dh/dx \neq 0$) utilizzando il metodo delle differenze finite.

Nell'elaborare i profili di rigurgito si sono adottate quali quote di fondo dell'alveo quelle desunte dal rilievo Lidar.

I profili sono stati sviluppati partendo 100 m a monte della sezione dove verrà costruito il ponte in acciaio e sono stati tracciati per un tratto della lunghezza complessiva di 220 m, terminando quindi circa 120 m a valle della localizzazione del nuovo manufatto.

Le sezioni di calcolo sono poste a interasse di 20 m, salvo i locali infittimenti delle stesse in prossimità del nuovo ponte e in punti di interesse.

Ogni sezione è stata definita geometricamente considerandola trapezia, schematizzandola secondo il disegno in Figura 2.

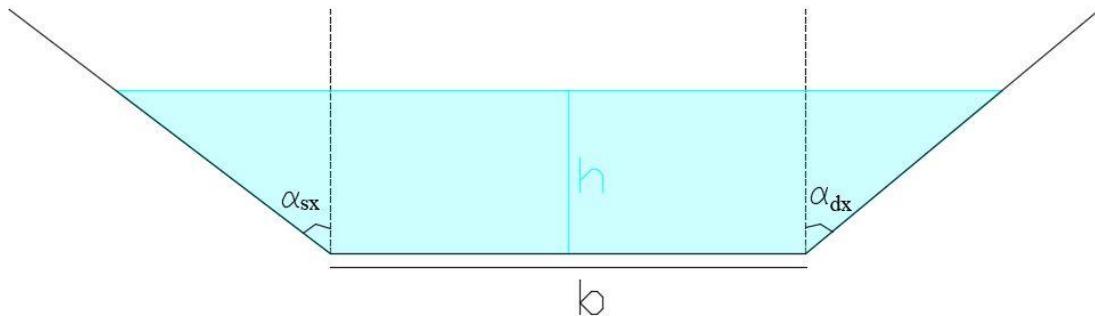


Figura 2. Schematizzazione della sezione del fiume.

Per ogni sezione sono stati calcolati l'area A_i , il contorno bagnato C_i in funzione di h e conseguentemente il raggio idraulico $R_i = A_i/C_i$ e la velocità $U_i = Q_{200}/A_i$.

Sulla base dei dati come sopra illustrati, si è proceduto al calcolo del tirante idrico attraverso un criterio di bilancio di energia, ovvero:

- nota l'energia nella sezione di monte pari a $E_i = z_i + h_i + v_i^2/2g$
- considerata la dissipazione di energia per unità di lunghezza pari a $J_i = U_i^2/(k_s^2 * R_i^{4/3})$ tra due sezioni, dove k_s è il coefficiente di Gauckler-Strickler e assunto pari a $37 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$

- si calcola l'energia della sezione subito a valle come $E_{i+1} = E_i - (J_i + J_{i+1})/2 \cdot D_x$, in cui D_x è la distanza tra le due sezioni e come $E_{i+1} = z_{i+1} + h_{i+1} + v_{i+1}^2/2g$
- infine eguagliando le due espressioni di E_{i+1} si ottiene un'equazione con unica incognita, il tirante idraulico h che viene così determinato.

Si evidenzia che dal calcolo effettuato, il profilo della corrente è sempre contenuto nel sistema arginale del corso d'acqua e non interferisce con il ponte. Si rimanda alla tabella di calcolo riportata successivamente ed al relativo profilo.

2.3 FRANCO IDRAULICO SUL PONTE

Il ponte di cui è necessario verificare il franco idraulico in relazione al profilo che si forma quando transita la Q_{200} è quello di nuova costruzione che ha lo scopo di collegare Cembra e Lona.

La quota inferiore dell'impalcato è pari a 419,14m slm e si localizza nelle due sezioni di appoggio.

Dal calcolo del profilo di moto permanente alla sez.18 in asse al ponte, elaborato per la Q_{200} si ha una quota del pelo libero pari a 412,71 m slm.

Nella sezione 17, posta 2,62 m a monte della sez. 18, la quota del pelo libero dell'acqua risulta pari a 412.78 m slm mentre nella sez. 19, posta 2.49 m a valle della sez. 18 la quota del pelo libero dell'acqua risulta pari a 412.45 m slm.

Valutando la situazione più prudenziale, ovvero considerando il pelo libero subito a monte del ponte, il franco idraulico risultante è pari a oltre 6 m, ampiamente maggiore del franco minimo prescritto dalle NTC pari a $1.5 \div 2$ m e prescritto dal PGUAP di 1,00 m.

2.4 TRASPORTO SOLIDO

Insieme alla portata liquida, anche il trasporto solido gioca un ruolo centrale nel determinare le modalità di deflusso. Sia durante gli eventi di piena sia durante i periodi di morbida vi è un costante rimodellamento del fondo dell'alveo dovuto al trasporto del materiale proveniente sia dal corso d'acqua stesso sia dall'intero bacino, in funzione delle sue caratteristiche geologiche e della copertura vegetale.

Come per la modellazione idrologica, l'intensità del trasporto solido reale dipende dalle condizioni del bacino che precedono l'evento considerato. La condizione del bacino antecedente è rappresentata dalla disponibilità dei sedimenti resi prontamente disponibili sia dall'alveo stesso sia dalle aree sorgenti di sedimenti lungo la rete idrografica.

Per valutare la portata solida si utilizza il concetto di capacità di trasporto, ovvero la capacità che un flusso liquido possiede di veicolare una certa portata solida, quando il fiume, non mutando il suo profilo di fondo, riceve da monte un'alimentazione solida esattamente pari a quella che la corrente stessa è in

grado di smaltire. È ovvio che questa condizione richiede che vi sia una disponibilità di materiale sufficiente, ma se così non fosse la corrente trasporta tutto ciò che è disponibile e la portata solida effettiva sarà inferiore alla capacità di trasporto.

Per la valutazione della quantità di materiale mobilizzato nel corso dell'evento di piena è possibile fare riferimento alla formula proposta da Smart e Jaeggy (1983), che nella sua formulazione semplificata risulta:

$$Q_s = 2.5 i^{1.6} Q \left(1 - \frac{\tau_c}{\tau}\right)$$

dove Q_s è la portata solida, i la pendenza del fondo, τ_c lo sforzo tangenziale di incipiente trasporto solido e τ lo sforzo tangenziale medio sul contorno.

Trascurando lo sforzo tangenziale critico si ottiene:

$$Q_s = 2.5 i^{1.6} Q$$

Considerando sia la portata di picco liquido ($648 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) che la pendenza media del tratto oggetto d'intervento (0.0205) si ottiene una portata solida Q_s pari a $3.22 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. La concentrazione volumetrica C_v , a parità di sezione, è data dal rapporto tra la portata solida Q_s e la portata liquida Q e quindi risulta pari a 0.0049. Tale concentrazione è tipica dei fenomeni di *bedload transport*, ovvero il trasporto di fondo. Il materiale si sposta quindi rotolando sul fondo oppure attraverso un'alternanza di piccoli salti, durante i quali il materiale si alza ad una distanza relativamente piccola dal fondo, dell'ordine della dimensione stessa della particella.

L'incremento alla portata dato dal trasporto solido è quindi pari solamente allo 0.49% della portata liquida e di conseguenza, dato che il franco risulta ampiamente maggiore del franco minimo prescritto, risulta trascurabile ai fini della verifica.

3 VERIFICA IDRAULICA IN FASE DI COSTRUZIONE

Durante la fase di cantiere, il ponteggio necessario per la costruzione del ponte è posizionato in parte in alveo causando un restringimento della sezione utile. Si esegue una verifica idraulica ai fini di garantire condizioni di sicurezza alle opere provvisionali e durante tutta la fase di cantiere.

Per eseguire questa verifica idraulica si adotta una procedura similare a quella adottata per la verifica idraulica del ponte in condizioni di esercizio.

3.1 CALCOLO PORTATA DI PIENA CON TEMPO DI RITORNO 20 ANNI

Per svolgere questa verifica idraulica si utilizza una portata con tempo di ritorno pari a 20 anni che viene determinata utilizzando sempre il metodo probabilistico di Gumbel.

Per la determinazione si usano i valori di portate orarie dell'Avisio misurate all'idrometro di Lavis nel periodo compreso tra il 01/06/1994 ed il 30/11/2019. Da tale analisi vengono esclusi gli anni 2005 e 2006 poiché i dati dal 18/03/2005 al 13/10/2006 non vengono forniti a causa di un intervento straordinario di manutenzione dell'alveo che ha modificato la sezione idraulica. Inoltre non si considerano, per ogni anno analizzato, i valori misurati dal 1 ottobre al 31 dicembre.

Si esegue quindi la medesima procedura adottata per la determinazione della portata con tempo di ritorno di 200 anni.

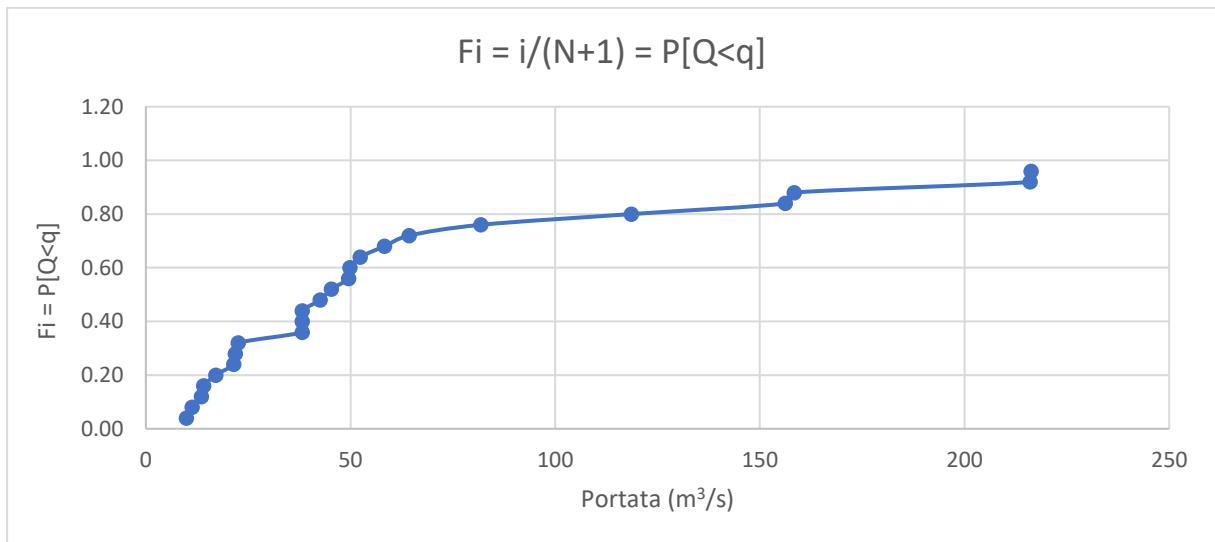
Di seguito si riportano le portate massime dei primi nove mesi desunte dall'analisi dei dati forniti dall'Ufficio Dighe della P.A.T. a Lavis ordinate in modo crescente:

| POSIZIONE | ANNO | Q_{\max} (m ³ /s) | $F_i = i/(N+1)$ | $Y_i = -\ln[-\ln(F_i)]$ |
|-----------|------|--------------------------------|-----------------|-------------------------|
| 1 | 1996 | 9,89 | 0,04 | -1,1690 |
| 2 | 2007 | 11,32 | 0,08 | -0,9265 |
| 3 | 2004 | 13,6 | 0,12 | -0,7515 |
| 4 | 2017 | 14,17 | 0,16 | -0,6057 |
| 5 | 2003 | 17,13 | 0,20 | -0,4759 |
| 6 | 2016 | 21,5 | 0,24 | -0,3557 |
| 7 | 2000 | 21,86 | 0,28 | -0,2413 |
| 8 | 2015 | 22,62 | 0,32 | -0,1305 |
| 9 | 1994 | 38,24 | 0,36 | -0,0214 |
| 10 | 1995 | 38,24 | 0,40 | 0,0874 |
| 11 | 2001 | 38,24 | 0,44 | 0,1973 |
| 12 | 2018 | 42,59 | 0,48 | 0,3093 |
| 13 | 2012 | 45,34 | 0,52 | 0,4248 |
| 14 | 2014 | 49,55 | 0,56 | 0,5450 |
| 15 | 1998 | 49,87 | 0,60 | 0,6717 |
| 16 | 2019 | 52,41 | 0,64 | 0,8068 |
| 17 | 2009 | 58,29 | 0,68 | 0,9528 |

| | | | | |
|----|------|--------|------|--------|
| 18 | 2011 | 64,35 | 0,72 | 1,1132 |
| 19 | 2008 | 81,89 | 0,76 | 1,2930 |
| 20 | 2010 | 118,62 | 0,80 | 1,4999 |
| 21 | 1997 | 156,23 | 0,84 | 1,7467 |
| 22 | 1999 | 158,37 | 0,88 | 2,0570 |
| 23 | 2013 | 216,02 | 0,92 | 2,4843 |
| 24 | 2002 | 216,31 | 0,96 | 3,1985 |

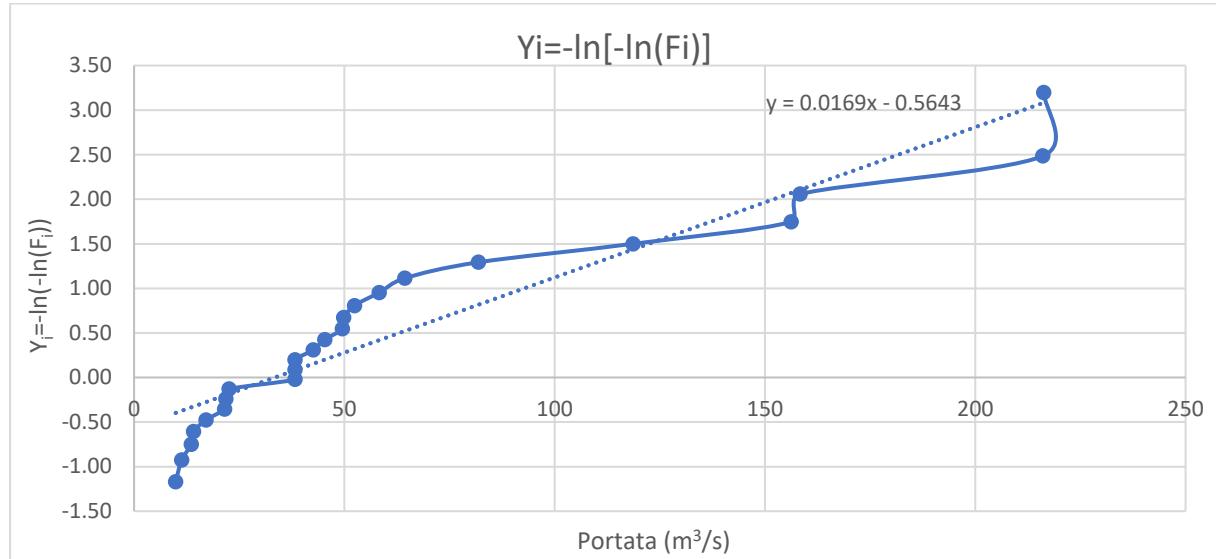
Di conseguenza si ricava che il valore della portata media Q_m risulta pari a $65 \text{ m}^3/\text{s}$ mentre la $\text{Var}(Q)$ risulta $3852 \text{ m}^6/\text{s}^2$.

L'andamento della F_i viene riportato nel seguente grafico:



Per la determinazione dei parametri incogniti della distribuzione di Gumbel si utilizzano sia il metodo dei momenti sia la regressione lineare. Anche per questo scenario la regressione lineare assegna i parametri che forniscono un valore di portata bicentenaria maggiore si riporta tale stima.

Dal seguente grafico:

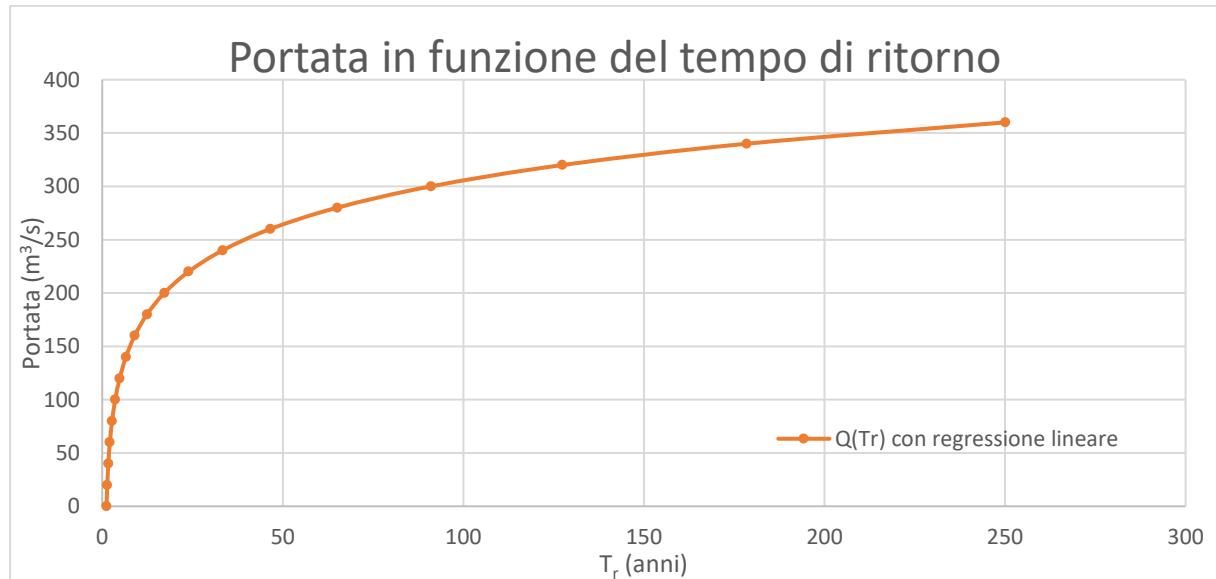


si ricavano i valori di a e b pari rispettivamente a 0.0169 e -0.5643, per cui si ha che:

$$\alpha = a = 0.017$$

$$u = -b/a = 33.391.$$

Di conseguenza, si è ora in grado di scrivere l'espressione di Gumbel e quindi di graficare l'andamento della portata in funzione del tempo di ritorno, che risulta:



Fissato T_r pari a 20 anni si ha che $P(Q \leq Q_i) = 1 - 1/T_r = 0.95$ e quindi si è ora in grado, dall'espressione di Gumbel, di ricavare la portata bicenteneria pari a $210 m^3/s$.

Tale portata è da riferirsi al bacino imbrifero che ha sezione di chiusura in prossimità dell'idrometro di Lavis. Dal momento che il nostro ponte è localizzato a monte di tale idrometro si procede a

determinare l'area del bacino imbrifero con chiusura nel punto della localizzazione di tale manufatto. In figura 1 si riporta l'estrazione del bacino di interesse. L'area di tale bacino risulta pari a 883.7 km^2 mentre l'area del bacino imbrifero con sezione di chiusura presso l'idrometro di Lavis è pari a 931.5 km^2 . Raggiungendo la portata bicanteria con tali aree risulta che, al ponte di nuova costruzione, la portata con T_r pari a 20 anni è $200 \text{ m}^3/\text{s}$.

3.2 DETERMINAZIONE DEL PROFILO CON Q_{20}

Il calcolo idraulico viene effettuato sempre sulla base di criteri energetici: trattandosi di un corso d'acqua in corrente veloce viene prima calcolato il carico effettivo (e l'altezza del tirante d'acqua) nella sezione a monte, poi viene determinato il profilo di rigurgito per moto permanente ($dh/dx \neq 0$) utilizzando il metodo delle differenze finite.

Giunti alla sezione immediatamente a monte del breve restringimento localizzato si è interrotto il calcolo come sopra specificato, per analizzare più in dettaglio il punto singolare.

Non avendo la corrente energia sufficiente per il superamento del restringimento, la corrente supera il restringimento in condizioni di minima energia H_{cr} e quindi il restringimento diventa sezione di controllo e si stabilisce l'altezza critica. Di conseguenza a monte si ha un profilo di corrente lenta che si raccorda con una corrente veloce tramite un risalto mentre a valle del restringimento si ha una corrente veloce. Sia valle sia a monte del restringimento si ricava il profilo mediante il solito criterio energetico. A monte del restringimento si egualia l'energia critica specifica H_{cr} con H_m , energia specifica nella sezione a monte, determinando il tirante a monte iterativamente e poi si procede con il bilancio dell'energia. A valle del restringimento si ha l'energia specifica H_v pari a H_{cr} a cui si sottraggono le perdite date dall'equazione di Borda. Iterativamente si trova il tirante h_v e poi si riprende il calcolo del tirante idrico attraverso il criterio di bilancio dell'energia.

Nell'elaborare questo profilo di rigurgito si sono adottate quali quote di fondo dell'alveo quelle desunte dal rilievo Lidar.

I profili sono stati sviluppati utilizzando lo stesso numero di sezioni adoperate per il precedente caso di studio e sono sempre state schematizzate considerandole un trapezio dal punto di vista geometrico.

Il restringimento causato dall'ingombro dei ponteggi in alveo riduce la sezione utile.

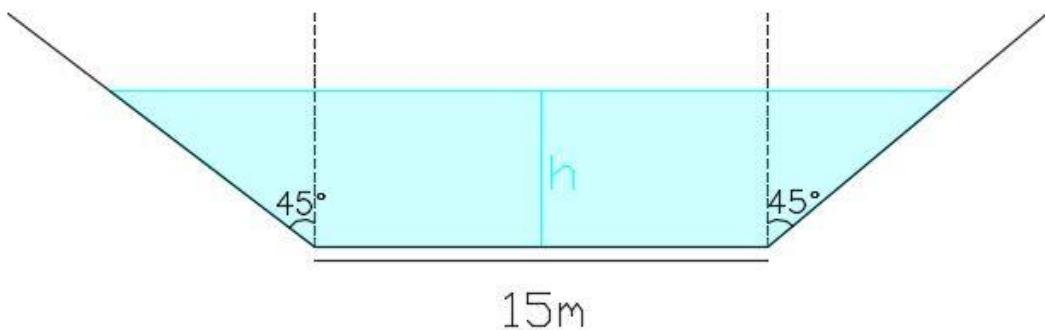


Figura 3. Schematizzazione del restringimento causato dal ponteggio.

In Figura 3 è rappresentata la sezione del restringimento. Longitudinalmente la presenza dei ponteggi causa un breve restringimento localizzato di lunghezza pari a 15 m.

Si rimanda alla tabella di calcolo riportata successivamente ed al relativo profilo.

3.3 FRANCO IDRAULICO SUL PONTEGGIO

L'estradosso della platea di fondazione del ponteggio si trova a una quota pari a 414.30 m slm.

Dal calcolo del profilo di moto permanente alla sez.18 in asse al ponte, elaborato per la Q_{20} si ha una quota del pelo libero pari a 412,88 m slm.

Nella sezione 14, posta 11.96 m a monte della sez. 18, la quota del pelo libero dell'acqua risulta pari a 414.04 m slm mentre nella sez. 20, posta 4.50 m a valle della sez. 18 la quota del pelo libero dell'acqua risulta pari a 411.55 m slm.

Considerando la sezione del restringimento, ovvero dove la corrente assume altezza critica, si ha quindi un **franco adeguato pari a oltre 1 m slm**.

Anche considerando la quota del pelo libero a monte del restringimento, rimane un franco pari a 0.3 m, comunque sufficiente considerando che si riferisce a opere provvisionali, che rimarranno in alveo per il solo tempo utile al varo del ponte. Si sottolinea inoltre che nell'elaborare il profilo di rigurgito sono state adottate quali quote di fondo dell'alveo quelle desunte dal rilievo Lidar. È appurato che il rilievo laser altimetrico effettuato dalla Provincia Autonoma di Trento non rilevi il fondo alveo per i fiumi ed i laghi, bensì il pelo libero dell'acqua. Considerando la portata transitante in alveo nel periodo di rilevazione si è calcolato un tirante idraulico medio nell'Avisio pari a circa 30 cm. Questo tirante va a rappresentare un ulteriore franco in quanto in via cautelativa non si è proceduto a sottrarre tale misura alla quota misurata dal rilievo.

4 **RISULTATI DEI CALCOLI**

Si riportano di seguito i tabulati delle elaborazioni idrauliche per il calcolo del profilo in moto permanente dell'alveo nei seguenti casi:

- Q_{200} stato attuale senza nuove opere;
- Q_{20} stato di cantiere.

a. PROFILO ALVEO CON Q_{200} - STATO DI ESERCIZIO

| PROFILO DI RIGURGITO FORMULA DI Gaukler Strickler | | | | | | | | | | con: $Q=648\text{m}^3/\text{s}$ |
|---|--|--|--|--|--|--|--|--|--|---------------------------------|
| CALCOLO PROFILO DI MOTO PERMANENTE $dh/dx \neq 0$ | | | | | | | | | | |

PORATA IN ALVEO
coeff. Strickler

$$Q = 648.00 \text{ m}^3/\text{s}$$

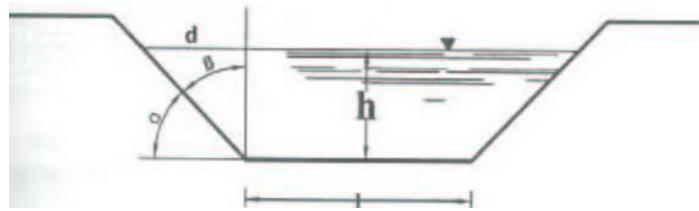
$$ks = 37.00 \text{ m}^{1/3}\text{s}^{-1}$$

| sez. | commenti | FONDO | | | | DATI SEZIONE IDRULICA, i | | | | | | | | | | ENERGIA | | | | | |
|------|----------|--------|-------|----------------------|-------------|--------------------------|----------------------|--------|-------------------------------|-------------------------------|------------------|--------------|------------------|----------|--------------------------------|---------|----------------|--|---|--|-------------------------------|
| | | Prog | Dx | prog. verso monte | quota fondo | tirante d'acqua h | quota pelo libero | base B | ang.sp. Dx (rispetto vert) | ang.sp. Sx (rispetto vert) | contorno bagnato | area sezione | Raggio idraulico | velocità | n° di Frude | L/V | pendenza fondo | dissipaz. energia per unità di lungh. i | energia <i>i+1</i> | energia <i>i</i> | energia specifica. i |
| | | | | xi | zi | hi | zi+hi | Bi | adx | asx | Ci | Si | Ri = Si/Ci | vi | Fri = vi/(g·hi) ^{0.5} | if | () | () | E _{i+1} = E _i + 0.5 · (J _{i+1} · Dx) | E _i = zi + hi + vi ² /2g | Hi = hi + vi ² /2g |
| 29 | | 300.00 | 0.00 | 0.00 | 407.11 | 3.8439 | 410.95 | 20.38 | 45 | 61 | 33.73 | 99.02 | 2.94 | 6.54 | 1.07 | V | 0.0005 | 0.00744 | 413.1387 | 413.1391 | 6.0277 |
| 28 | | 280.00 | 20.00 | 20.00 | 407.12 | 3.5564 | 410.68 | 20.38 | 45 | 61 | 32.73 | 90.18 | 2.76 | 7.19 | 1.22 | V | 0.0006 | 0.00977 | 413.3103 | 413.3108 | 6.1892 |
| 27 | | 260.00 | 20.00 | 40.00 | 407.24 | 2.2270 | 409.47 | 21.72 | 64 | 82 | 42.71 | 71.00 | 1.66 | 9.13 | 1.95 | V | 0.0005 | 0.03090 | 413.7170 | 413.7170 | 6.4744 |
| 26 | | 240.00 | 20.00 | 60.00 | 407.25 | 2.0776 | 409.33 | 21.72 | 64 | 82 | 41.31 | 64.82 | 1.57 | 10.00 | 2.21 | V | 0.0064 | 0.04003 | 414.4256 | 414.4263 | 7.1732 |
| 25 | | 220.00 | 20.00 | 80.00 | 408.53 | 2.1918 | 410.72 | 21.72 | 64 | 82 | 42.38 | 69.53 | 1.64 | 9.32 | 2.01 | V | 0.021341463 | 0.03280 | 415.1538 | 415.1538 | 6.6211 |
| 24 | | 210.16 | 9.84 | 89.84 | 408.74 | 1.9931 | 410.73 | 22.23 | 77 | 82 | 45.31 | 66.93 | 1.48 | 9.68 | 2.19 | V | 0.025590551 | 0.04069 | 415.5151 | 415.5154 | 6.7724 |
| 23 | | 200.00 | 10.16 | 100.00 | 409.00 | 1.9635 | 410.96 | 22.23 | 77 | 82 | 44.96 | 65.61 | 1.46 | 9.88 | 2.25 | V | 0.101321586 | 0.04306 | 415.9404 | 415.9406 | 6.9375 |
| 22 | | 193.19 | 6.81 | 106.81 | 409.69 | 2.2205 | 411.91 | 21.72 | 64 | 82 | 42.65 | 70.73 | 1.66 | 9.16 | 1.96 | V | 0.061538462 | 0.03124 | 416.1934 | 416.1934 | 6.5008 |
| 21 | | 185.39 | 7.80 | 114.61 | 410.17 | 2.2853 | 412.46 | 21.72 | 64 | 82 | 43.26 | 73.47 | 1.70 | 8.82 | 1.86 | V | 0.004016064 | 0.02805 | 416.4246 | 416.4246 | 6.2522 |
| 19 | | 182.90 | 2.49 | 117.10 | 410.18 | 2.2687 | 412.45 | 21.72 | 64 | 82 | 43.11 | 72.76 | 1.69 | 8.91 | 1.89 | V | 0.075862069 | 0.02883 | 416.4953 | 416.4954 | 6.3129 |
| 18 | | 180.00 | 2.90 | 120.00 | 410.40 | 2.3075 | 412.71 | 21.72 | 64 | 82 | 43.47 | 74.41 | 1.71 | 8.71 | 1.83 | V | 0.026717557 | 0.02705 | 416.5763 | 416.5764 | 6.1740 |
| 17 | | 177.38 | 2.62 | 122.62 | 410.47 | 2.3073 | 412.78 | 21.72 | 64 | 82 | 43.47 | 74.40 | 1.71 | 8.71 | 1.83 | V | 0.034482759 | 0.02706 | 416.6471 | 416.6472 | 6.1748 |
| 16 | | 175.35 | 2.03 | 124.65 | 410.54 | 2.1208 | 412.66 | 22.23 | 77 | 82 | 46.79 | 72.76 | 1.56 | 8.91 | 1.95 | V | 0.004103967 | 0.03215 | 416.7072 | 416.7072 | 6.1647 |
| 14 | | 168.04 | 7.31 | 131.96 | 410.57 | 2.0715 | 412.64 | 22.23 | 77 | 82 | 46.21 | 70.49 | 1.53 | 9.19 | 2.04 | V | 0.014925373 | 0.03516 | 416.9526 | 416.9532 | 6.3806 |
| 13 | | 160.00 | 8.04 | 140.00 | 410.69 | 2.0355 | 412.73 | 22.23 | 77 | 82 | 45.80 | 68.85 | 1.50 | 9.41 | 2.11 | V | 0.019743337 | 0.03757 | 417.2445 | 417.2450 | 6.5522 |
| 12 | | 149.87 | 10.13 | 150.13 | 410.89 | 1.9980 | 412.89 | 22.23 | 77 | 82 | 45.36 | 67.15 | 1.48 | 9.65 | 2.18 | V | 0.002026342 | 0.04032 | 417.6388 | 417.6391 | 6.7461 |
| 11 | | 140.00 | 9.87 | 160.00 | 410.91 | 2.7781 | 413.69 | 18.87 | 25 | 77 | 34.25 | 70.88 | 2.07 | 9.14 | 1.75 | V | 0.028815368 | 0.02314 | 417.9520 | 417.9520 | 7.0394 |
| 10 | | 130.63 | 9.37 | 169.37 | 411.18 | 2.7979 | 413.98 | 18.87 | 25 | 77 | 34.36 | 71.52 | 2.08 | 9.06 | 1.73 | V | 0.028222013 | 0.02256 | 418.1660 | 418.1661 | 6.9835 |
| 9 | | 120.00 | 10.63 | 180.00 | 411.48 | 2.2664 | 413.75 | 21.53 | 73 | 76 | 38.61 | 67.44 | 1.75 | 9.61 | 2.04 | V | 0.026104418 | 0.03205 | 418.4563 | 418.4563 | 6.9734 |
| 8 | | 110.04 | 9.96 | 189.96 | 411.74 | 2.7971 | 414.54 | 18.87 | 25 | 77 | 34.35 | 71.49 | 2.08 | 9.06 | 1.73 | V | 0.000996016 | 0.02258 | 418.7283 | 418.7283 | 6.9858 |
| 7 | | 100.00 | 10.04 | 200.00 | 411.75 | 2.7199 | 414.47 | 18.87 | 25 | 77 | 33.93 | 69.02 | 2.03 | 9.39 | 1.82 | V | 0.02498 | 0.02498 | 418.9672 | 418.9670 | 7.2143 |
| 6 | risalto | 120.00 | 10.63 | 180.00 | 411.48 | 1.956 | 412.68 | 21.53 | 73 | 76 | 30.54 | 30.93 | 1.01 | 6.47 | 1.89 | V | 0.026104418 | 0.03003 | 414.8089 | 414.8089 | 3.3276 |
| | | 110.04 | 9.96 | 189.96 | 411.74 | 1.4897 | 413.23 | 18.87 | 25 | 77 | 27.12 | 33.42 | 1.23 | 5.98 | 1.57 | V | 0.000996016 | 0.01980 | 415.0568 | 415.0570 | 3.3159 |
| | | 100.00 | 10.04 | 200.00 | 411.75 | 1.3908 | 413.14 | 18.87 | 25 | 77 | 26.57 | 30.87 | 1.16 | 6.48 | 1.75 | V | 0.02510 | 0.02510 | 415.2817 | 415.2822 | 3.5309 |
| | | 80.00 | 20.00 | 220.00 | 412.25 | 1.3900 | 413.64 | 18.87 | 25 | 77 | 26.56 | 30.85 | 1.16 | 6.48 | 1.76 | V | 0.02515 | 0.02515 | 415.7842 | 415.7842 | 3.5329 |

b. PROFILO ALVEO CON Q_{20} - STATO DI CANTIERE

| PROFILO DI RIGURGITO FORMULA DI Gaukler Strickler | | | | | | | | | | con: $Q=200\text{m}^3/\text{s}$ |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| CALCOLO PROFILO DI MOTO PERMANENTE $dh/dx \neq 0$ | | | | | | | | | |
<th colspan

Sez. di monte



GEOMETRIA:

larghezza del canale: $B = 22.73$ m
 altezza pelo libero: $h_0 = 1.30$ m
 pendenza del fondo: $if = 0.01800$
 inclinazione canale: $\beta_{sx} = 82^\circ$ $\beta_{dx} = 77^\circ$
 area: $d_{sx} = 9.27$ m $d_{dx} = 5.64$ m
 contorno bagnato: $A = 39.31$ mq
 raggio idraulico: $C = 37.88$ m
 $Rh = A/C = 1.0378$ m

IDRAULICA:

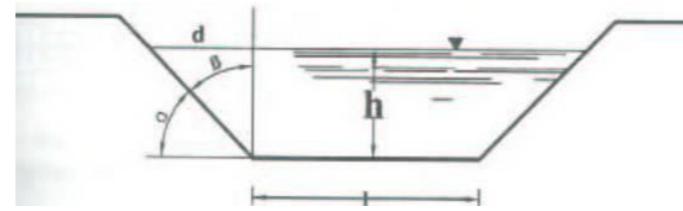
coeff. Strickler: $ks = 37$ $m^{1/3}/s$
 coeff. di Chézy: $C = Ks \cdot Rh^{1/6} = 37.23$
 velocità: $v = C \cdot (Rh \cdot if)^{0.5} = 5.09$ m/s
 portata: $Q = v \cdot A = 200.00$ mc/s
 N°Froude= 1.423888

Calcolo dell'altezza critica (fisso Q)

ricercando il minimo dell'energia in funzione di h

| | | |
|--|-----------------------|----------------------|
| $Q = 200.00$ mc/s | $d(h)_{sx} = 12.18$ m | $d(h)_{dx} = 7.41$ m |
| $A(h) = 55.68$ mq | | |
| $H = h + Q^2 / (A^2 \cdot 2 \cdot 9.906) = 2.37$ m | | |
| $h = hc$ t.c. $E = E_{min}$ | $hc = 1.71$ m | |

Sez. restringimento



GEOMETRIA:

larghezza del canale: $B = 15.00$ m
 altezza pelo libero: $h_0 = 1.56$ m
 pendenza del fondo: $if = 0.03011$
 inclinazione canale: $\beta_{sx} = 45^\circ$ $\beta_{dx} = 45^\circ$
 area: $d_{sx} = 1.56$ m $d_{dx} = 1.56$ m
 contorno bagnato: $A = 25.78$ mq
 raggio idraulico: $C = 19.40$ m
 $Rh = A/C = 1.3285$ m

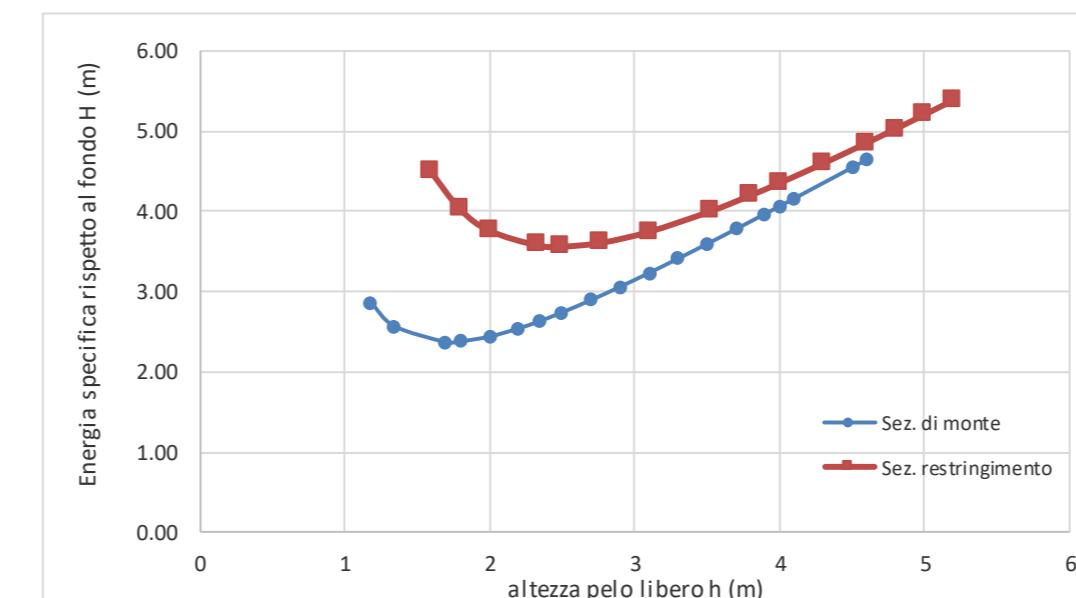
IDRAULICA:

coeff. Strickler: $ks = 37$ $m^{1/3}/s$
 coeff. di Chézy: $C = Ks \cdot Rh^{1/6} = 38.79$
 velocità: $v = C \cdot (Rh \cdot if)^{0.5} = 7.76$ m/s
 portata: $Q = v \cdot A = 200.00$ mc/s
 N°Froude= 1.985648

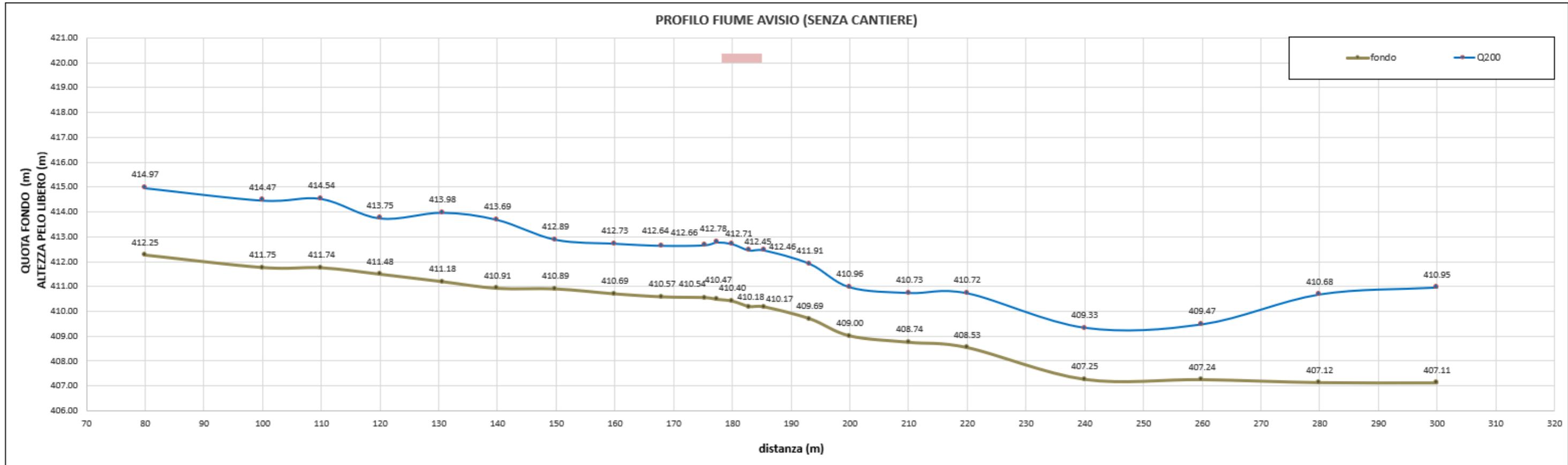
Calcolo dell'altezza critica (fisso Q)

ricercando il minimo dell'energia in funzione di h

| | | |
|--|----------------------|----------------------|
| $Q = 200.00$ mc/s | $d(h)_{sx} = 2.48$ m | $d(h)_{dx} = 2.48$ m |
| $A(h) = 43.34$ mq | | |
| $H = h + Q^2 / (A^2 \cdot 2 \cdot 9.906) = 3.57$ m | | |
| $h = hc$ t.c. $E = E_{min}$ | $hc = 2.48$ m | |



a. PROFILO ALVEO CON Q₂₀₀ - STATO DI ESERCIZIO



b. PROFILO ALVEO CON Q₂₀ - STATO DI CANTIERE

