

| | | | |
|---|---|------------------------------------|---------------------------|
|  | PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small> | COMMESSA NR/20047 | UNITÀ 00 |
| | LOCALITÀ REGIONI TOSCANA E UMBRIA | LSC-137/ALL. A | |
| | PROGETTO Rifacimento Metanodotto Sansepolcro – Foligno e opere connesse | Pagina 1 di 31 | Rev. 0 |

Progetto:

RIFACIMENTO METANODOTTO SANSEPOLCRO – FOLIGNO
E OPERE CONNESSE

STUDIO IDROLOGICO-IDRAULICO

ATTRAVERSAMENTO TORRENTE AFRA
CON TRIVELLAZIONE ORIZZONTALE CONTROLLATA
IN COMUNE DI SANSEPOLCRO (AR)



| | | | | | |
|-------------|--------------------|------------------|-------------------|------------------|-------------|
| 0 | Emissione | Polloni | Battisti | Luminari | 30.09.2021 |
| Rev. | Descrizione | Elaborato | Verificato | Approvato | Data |

| | | | |
|---|---|------------------------------------|---------------------------|
|  | PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small> | COMMESSA NR/20047 | UNITÀ 00 |
| | LOCALITÀ REGIONI TOSCANA E UMBRIA | LSC - 137/ALL. A | |
| | PROGETTO Rifacimento Metanodotto Sansepolcro – Foligno e opere connesse | Pagina 2 di 31 | Rev. 0 |

INDICE

| | | |
|------------|---|-----------|
| 1 | PREMESSA..... | 3 |
| 2 | LOCALIZZAZIONE DELL'AREA | 4 |
| 3 | CARATTERISTICHE IDROLOGICHE | 6 |
| 4 | STUDIO IDRAULICO..... | 9 |
| 4.1 | Studio Piano Strutturale Sansepolcro | 9 |
| 4.2 | Modellazione locale | 11 |
| 4.2.1 | Metodologia adottata | 12 |
| 4.2.2 | Ricostruzione dei livelli di piena | 14 |
| 4.3.3 | Risultati della modellazione | 14 |
| 5 | RISCHI IDRAULICI..... | 17 |
| 5.1 | Erosione di fondo alveo | 17 |
| 5.2 | Approfondimento di fondo alveo | 18 |
| 5.3 | Erosione spondale | 18 |
| 5.4 | Cambio di percorso e taglio di meandro | 19 |
| 5.5 | Stima dello spessore di erosione generalizzata in caso di evento critico | 19 |
| 5.6 | Approfondimenti localizzati (buche in alveo)..... | 21 |
| 5.7 | Risultati delle verifiche | 24 |
| 6 | CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE..... | 25 |

ALLEGATO 1: RISULTATI DELLA MODELLAZIONE IDRAULICA

| | | | |
|---|---|------------------------------------|---------------------------|
|  | PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small> | COMMESSA NR/20047 | UNITÀ 00 |
| | LOCALITÀ REGIONI TOSCANA E UMBRIA | LSC - 137/ALL. A | |
| | PROGETTO Rifacimento Metanodotto Sansepolcro – Foligno e opere connesse | Pagina 3 di 31 | Rev. 0 |

1 PREMESSA

La presente relazione è relativa allo studio idrologico e idraulico in corrispondenza dell'attraversamento del T. Afra da parte del "Metanodotto Sansepolcro-Foligno DN 400 (16") – DP 75 bar", alla progressiva PK 6+239 km, che ricade nel territorio del comune di Sansepolcro (AR).

Tale studio è di supporto alla Relazione di Compatibilità Idraulica LSC-137 (alla quale è allegato), volta a dimostrare come l'intervento in progetto, che risulta non altrimenti localizzabile, "non costituisce significativo ostacolo al libero deflusso e/o significativa riduzione dell'attuale capacità d'invaso".

Scopo dello studio è di valutare le caratteristiche idrauliche del corso d'acqua per quanto attiene le portate di massima piena al colmo con i relativi livelli idrici e di definire i parametri idraulici in corrispondenza del tratto di torrente interessato dagli interventi, permettendo pertanto la corretta progettazione delle opere.

Sono stati tenuti in conto i precedenti studi idraulici effettuati in ambito PAI e Piano Strutturale del comune di Sansepolcro, mirati in particolare alla modellazione del tratto di corso di interesse per il progetto in oggetto.

Le elaborazioni idrauliche eseguite hanno avuto lo scopo di caratterizzare le caratteristiche locali della corrente, verificandone la congruità con i risultati ottenuti dai precedenti studi, in considerazione anche dell'attuale conformazione morfologica dell'alveo. La modellazione è stata compiuta in condizione di moto permanente con portata duecentennale (come previsto da NTA di AdB Tevere) tramite il programma di calcolo HEC-RAS, vers. 6.0.0.

Per effettuare la modellazione si sono condotti specifici rilievi topografici, nonché accurati sopralluoghi da parte di tecnici esperti. Sono state inoltre eseguite indagini geognostiche in loco.

Il progetto di attraversamento, comprensivo di planimetria, profilo, caratteristiche geometriche e strutturali della condotta e caratteristiche delle eventuali opere di ripristino e protezione è raffigurato nell'elaborato grafico allegato allo Studio di impatto ambientale (SIA):

- AT-20047- L01-02 Attraversamento Torrente Afra

al quale si rimanda per approfondimenti.

| | | | |
|---|---|-----------------------------|-------------------------|
|  | PROGETTISTA  consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori | COMMESSA NR/20047 | UNITÀ 00 |
| | LOCALITÀ REGIONI TOSCANA E UMBRIA | LSC - 137/ALL. A | |
| | PROGETTO Rifacimento Metanodotto Sansepolcro – Foligno e opere connesse | Pagina 4 di 31 | Rev. 0 |

2 LOCALIZZAZIONE DELL'AREA

L'area in cui si colloca l'intervento in oggetto è localizzata lungo il corso d'acqua del T. Afra nella parte terminale del suo sviluppo compresa tra la superstrada SS 3bis e la sua confluenza in Tevere. Ricade nel territorio del comune Sansepolcro presso la località Trebbio, in provincia di Arezzo. Nello stralcio allegato in Fig. 2/A, tratto dalla base cartografica IGM a scala 1:25.000, si riporta la localizzazione del sito.

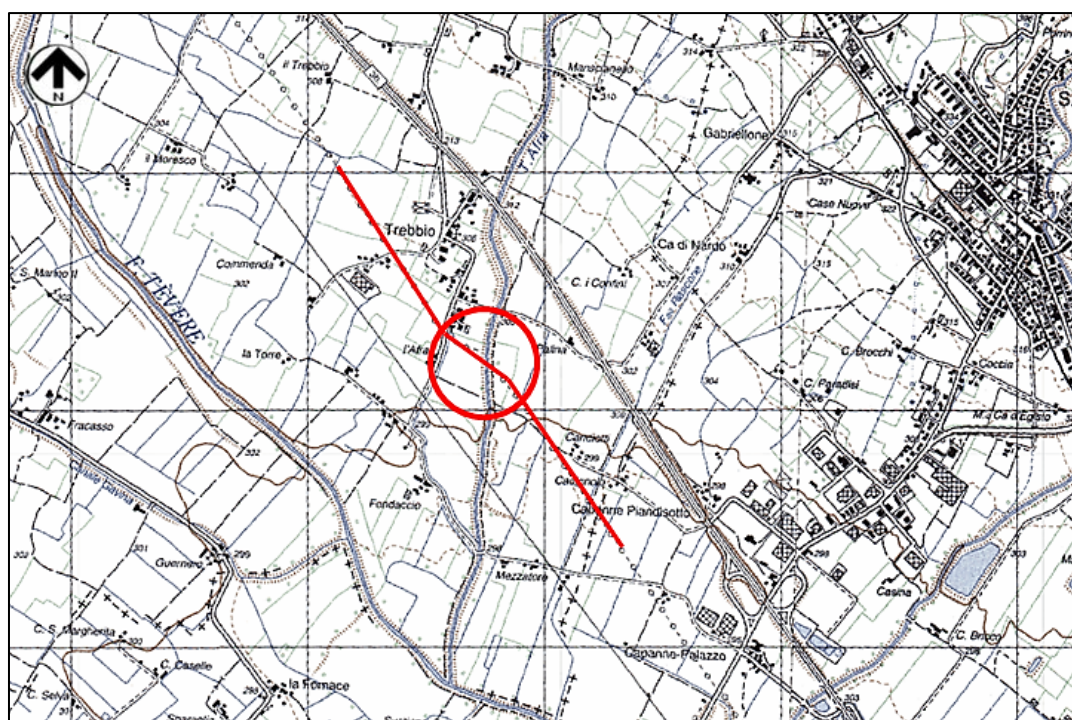


Figura 2/A – Inquadramento a scala 1:25.000 con indicata la posizione dell'attraversamento in studio

A livello della cartografia CTR della regione Umbria, l'attraversamento si ubica nel foglio 289060, di cui si riporta il particolare con la localizzazione dell'opera in progetto (v. Fig. 2/B).

In tale immagine il tracciato in progetto è individuato dalla linea in colore rosso, il metanodotto in fase di dismissione dalla linea di colore verde e l'area di attraversamento del corso d'acqua con cerchio rosso. E' indicato schematicamente con sagoma rettangolare il tratto di condotta in subalveo la cui installazione è prevista tramite posa con la metodologia trenchless della trivellazione orizzontale controllata. In Figura 2/C viene riportata anche la ubicazione su immagine aerea Google.

| | | | |
|---|---|-----------------------------|--------------------|
|  | PROGETTISTA  consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori | COMMESSA NR/20047 | UNITÀ 00 |
| | LOCALITA' REGIONI TOSCANA E UMBRIA | LSC - 137/ALL. A | |
| | PROGETTO Rifacimento Metanodotto Sansepolcro – Foligno e opere connesse | Pagina 5 di 31 | Rev. 0 |

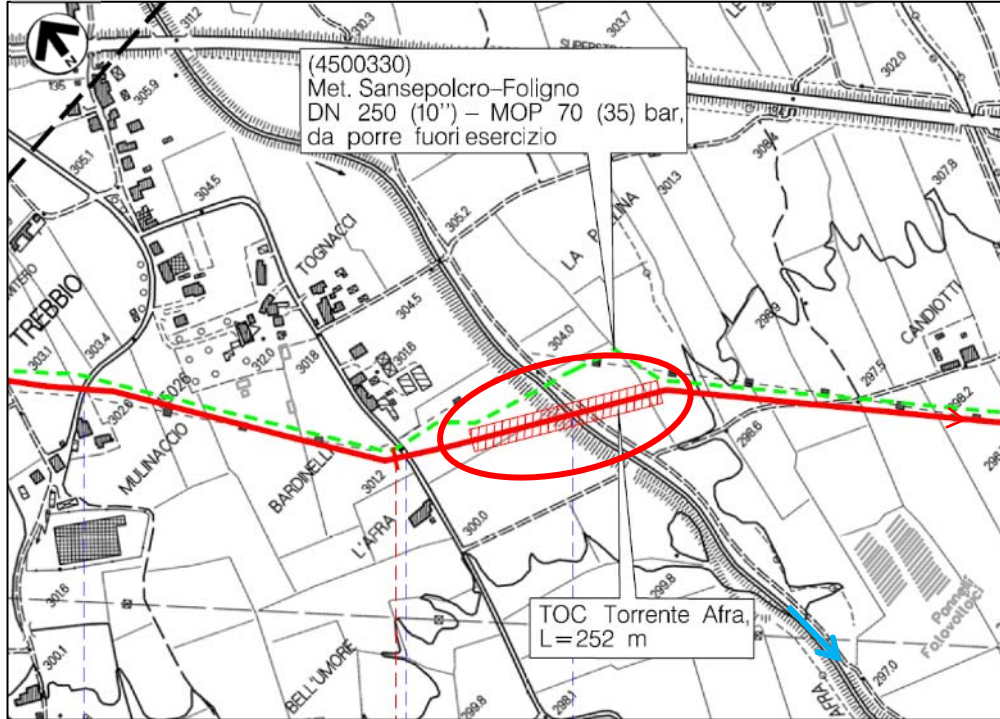


Figura 1/B – Stralcio CTR con localizzazione dell’attraversamento

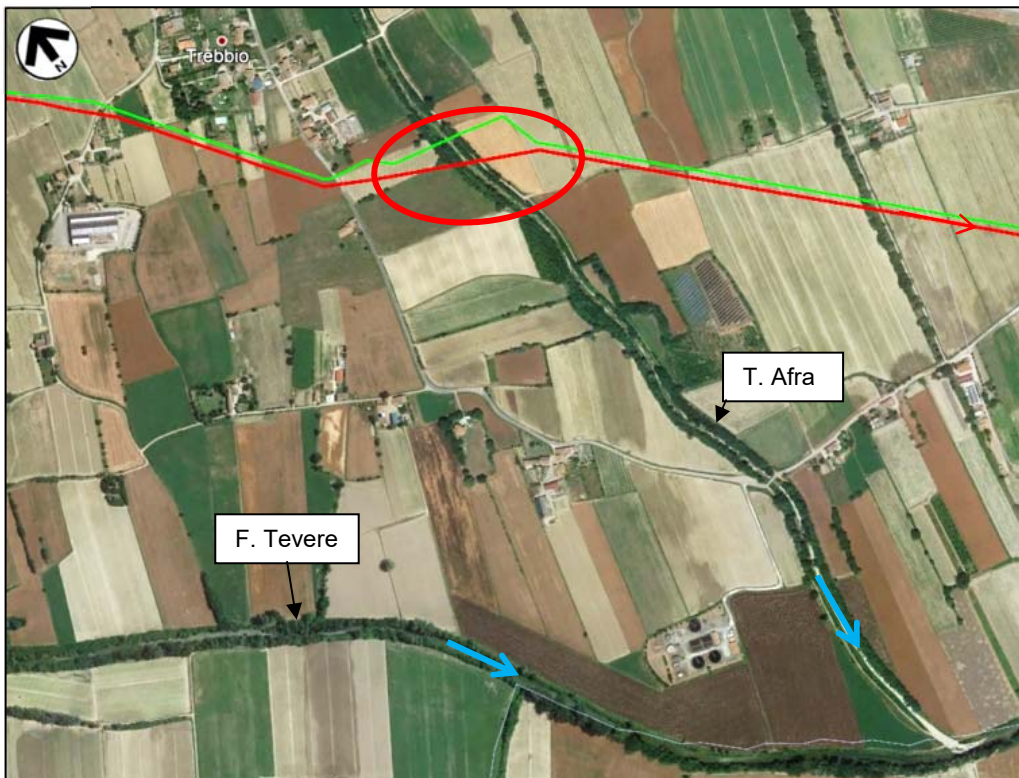


Figura 2/C – Immagine Google Earth con localizzazione della sezione di attraversamento

| | | | |
|---|---|------------------------------------|---------------------------|
|  | PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small> | COMMESSA NR/20047 | UNITÀ 00 |
| | LOCALITÀ REGIONI TOSCANA E UMBRIA | LSC - 137/ALL. A | |
| | PROGETTO Rifacimento Metanodotto Sansepolcro – Foligno e opere connesse | Pagina 6 di 31 | Rev. 0 |

3 CARATTERISTICHE IDROLOGICHE

Per la stima della portata di massima piena al colmo in funzione del tempo di ritorno ci si è riferiti a quanto risultato dallo studio idraulico riportato nella relazione idraulica del piano strutturale (PS) del comune di Sansepolcro. Nel documento “*Integrazioni alla Relazione Idraulica*” del PS si riporta la metodologia adottata per la stima della portata di massima piena al colmo utilizzata in ambito PAI, che di seguito si riporta.

Di seguito si riporta la procedura per il calcolo della portata al colmo della piena di riferimento, adottata nell’ambito degli studi propedeutici alla redazione del piano di bacino del Tevere del 1998. Tale valore è fornito dalla formula razionale:

$$Q_T = \frac{h_{d,T} \cdot k_r \cdot k_d \cdot s}{3.6 \cdot t_c}$$

dove Q_T è espressa in mc/sec.

La procedura si articola nelle seguenti fasi:

Perimetrato il bacino sotteso dalla sezione di chiusura nella quale si deve calcolare il valore della portata al colmo di piena, si individuano i seguenti parametri:

- latitudine del centroide I del bacino, espressa in gradi e millesimi di grado;
- altezza media H del bacino, espressa in m, rispetto alla sezione di chiusura;
- superficie del bacino S, espressa in kmq;
- lunghezza dell’asta L, espressa in km, a partire dal punto cinematicamente più lontano dalla sezione di chiusura.

sterni si adottano i corrispondenti valori, massimo o minimo, dei rapporti. I valori così calcolati di Z/L e Z/Y vengono inseriti nella formula:

Si calcola il tempo di corrvazione t_c (espresso in ore) utilizzando la formula:

$$t_c = \frac{4 \cdot \sqrt{S} + 1.5 \cdot L}{0.8 \cdot \sqrt{H}}$$

| | | | |
|---|---|------------------------------------|---------------------------|
|  | PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small> | COMMESSA NR/20047 | UNITÀ 00 |
| | LOCALITÀ REGIONI TOSCANA E UMBRIA | LSC - 137/ALL. A | |
| | PROGETTO Rifacimento Metanodotto Sansepolcro – Foligno e opere connesse | Pagina 7 di 31 | Rev. 0 |

Dalla tabella 2 si ricavano i valori dei termini Z/L e Z/Y in corrispondenza del valore della latitudine l del centroide. Per valori compresi nell'intervallo si interpola linearmente; mentre per valori esterni si adottano i corrispondenti valori, massimo o minimo, dei rapporti. I valori così calcolati di Z/L e Z/Y vengono inseriti nella formula:

$$s_1 = 90 \cdot \frac{Z}{L} - 11.4 \cdot \frac{Z}{Y}$$

Si calcola il valore $E[h_1]$ con la formula:

$$E[h_1] = (s_1 + 1) \cdot 29$$

dove $E[h_1]$ è espresso in mm.

Dalla tabella 1 si ricava il valore del termine K_T in funzione del tempo di ritorno e lo si inserisce nella formula:

$$h_{d,T} = K_T \cdot E[h_1] \cdot d^{0.29}$$

dove $h_{d,T}$ è espresso in mm, il pedice d e il termine d rappresentano la durata della pioggia critica espressa in ore (1, 3, 6, 12 e 24 ore) pari o immediatamente superiore al tempo di corivazione t_c e il pedice T è il tempo di ritorno prescelto.

Si calcola il valore k_r dalla formula:

$$k_r = 1 - \exp(-0.033 \cdot E[h_1] \cdot 1.1 \cdot t_c^{0.25}) + \exp(-0.033 \cdot E[h_1] \cdot 1.1 \cdot t_c^{0.25} - 0.01 \cdot s)$$

Si ricava dal grafico il valore del coefficiente di deflusso di piena (k_d) in funzione della frazione permeabile del bacino e del tempo di ritorno. Per valori del tempo di ritorno pari a 200 anni si incrementa il valore k_d relativo a 100 anni con la differenza tra questo ed il valore relativo a 50 anni. Analogamente per valori del tempo di ritorno di 500 anni si incrementa il valore k_d relativo a 200 anni con la differenza tra questo ed il valore relativo a 100 anni. La valutazione della permeabilità in termini di "parte permeabile" (% della superficie del bacino sotteso) deriva dalla tradizionale formulazione utilizzata dal Servizio Idrografico e Mareografico Nazionale (Annali Idrologici - Parte II - Elaborazioni e Studi).

| | | | |
|---|---|------------------------------------|---------------------------|
|  | PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small> | COMMESSA NR/20047 | UNITÀ 00 |
| | LOCALITÀ REGIONI TOSCANA E UMBRIA | LSC - 137/ALL. A | |
| | PROGETTO Rifacimento Metanodotto Sansepolcro – Foligno e opere connesse | Pagina 8 di 31 | Rev. 0 |

Si calcola il valore della portata al colmo di piena con la formula razionale:

$$Q_T = \frac{h_{d,T} \cdot k_r \cdot k_d \cdot S}{3.6 \cdot t_c}$$

dove Q_T è espressa in mc/sec.

Seguendo tale metodologia vengono calcolate le portate al colmo di piena ottenendo i valori sotto riportati.

| AFRA | TR 20 | TR 30 | TR 200 | TR 500 |
|--|---------------|---------------|---------------|---------------|
| dato da inserire | | | | |
| S = superficie bacino [kmq] | 30.445 | 30.445 | 30.445 | 30.445 |
| L = lunghezza asta [km] | 12.457 | 12.457 | 12.457 | 12.457 |
| H = altezza media [m] | 422 | 422 | 422 | 422 |
| parametri in funzione della latitudine 43.350 gradi di latitudine | | | | |
| z/l | 0.01075 | 0.01075 | 0.01075 | 0.01075 |
| z/y | 0.0988 | 0.0988 | 0.0988 | 0.0988 |
| Kt (identifica il tempo di ritorno) | 1.6803 | 1.8873 | 2.7036 | 3.1442 |
| t _c (vedi sotto) | 2.4800 | 2.4800 | 2.4800 | 2.4800 |
| d = durata pioggia critica [ore] | 6 | 6 | 6 | 6 |
| k _d (si ricava da un grafico) | 0.345 | 0.35 | 0.4 | 0.425 |
| dato calcolato | | | | |
| t _c = tempo corrivazione [ore] | 2.4800 | 2.4800 | 2.4800 | 2.4800 |
| S1 | -0.1588 | -0.1588 | -0.1588 | -0.1588 |
| e[h1] | 24.3942 | 24.3942 | 24.3942 | 24.3942 |
| hdt | 68.9188 | 77.4091 | 110.8902 | 128.9618 |
| kr | 0.9136 | 0.9136 | 0.9136 | 0.9136 |
| Q | 74.08 | 84.41 | 138.19 | 170.76 |

Lo studio PS riporta anche la stima effettuata con altre metodologie le quali hanno fornito risultati omogenei per la piena di tempo di ritorno di 200 anni e invece non allineati per tempi di ritorno sia inferiori che maggiori (v. Fig. 3/A).

Comunque per la piena di progetto, assunta per un tempo di ritorno pari a 200 anni, il valore pressoché identico per i vari metodi risulta essere:

$$Q_{200} = 138 \text{ m}^3/\text{s}$$

| Corso d'acqua | Metodi | Q_{\max} Tr = 20 [m ³ /s] | Q_{\max} Tr = 30 [m ³ /s] | Q_{\max} Tr = 200 [m ³ /s] | Q_{\max} Tr = 500 [m ³ /s] |
|---------------|-----------------|---|---|--|--|
| Torrente Afra | Volume d'invaso | 102.10 | 108.40 | 137.70 | 151.71 |
| | ALTO | 72.49 | 82.22 | 136.40 | 170.63 |
| | AdB Tevere | 74.08 | 84.41 | 138.19 | 170.76 |

Figura 3/A – Portate di massima piena al colmo (da Piano Strutturale Sansepolcro)

| | | | |
|---|---|------------------------------------|---------------------------|
|  | PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small> | COMMESSA NR/20047 | UNITÀ 00 |
| | LOCALITÀ REGIONI TOSCANA E UMBRIA | LSC - 137/ALL. A | |
| | PROGETTO Rifacimento Metanodotto Sansepolcro – Foligno e opere connesse | Pagina 9 di 31 | Rev. 0 |

4 STUDIO IDRAULICO

4.1 Studio Piano Strutturale Sansepolcro

Lo scopo dello studio idraulico è la valutazione delle caratteristiche di deflusso della corrente fluida, associate ad eventi di piena critici.

Il PS del comune di Sansepolcro ha eseguito una modellazione di un tratto di torrente Afra lungo 3.7 km, con numerose sezioni, due delle quali a cavallo della sezione di attraversamento, come si evidenzia in figura 4.1/A.

In particolare:

- sezione 01 180 m a monte
- sezione 0 200 m a valle

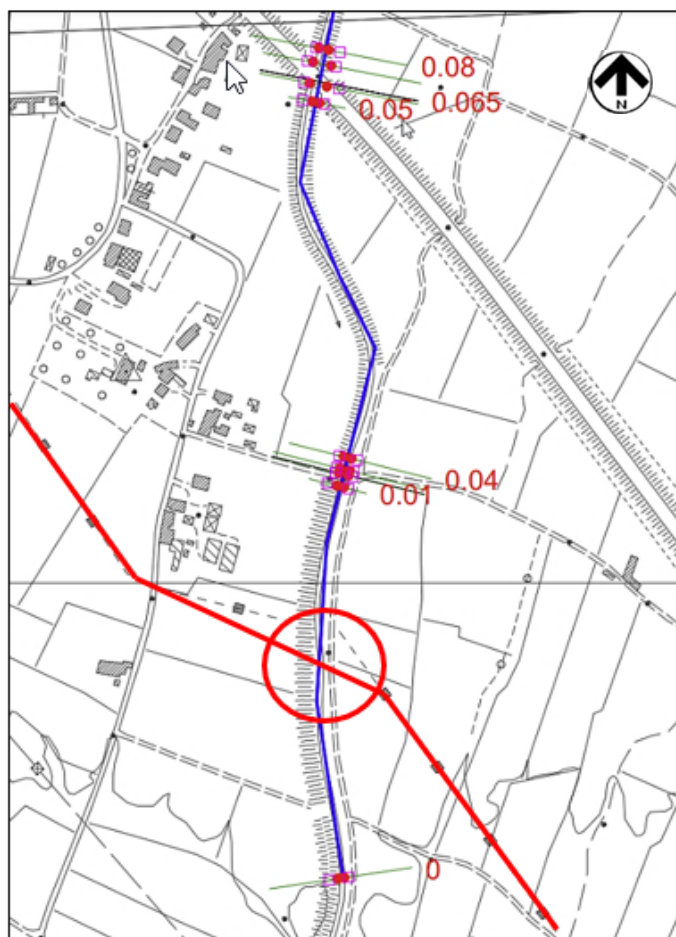


Figura 4.1/A – Stralcio della mappa con riportate le sezioni di modellazione dello studio idraulico PS (in rosso tracciato metanodotto)

| | | | |
|---|---|------------------------------------|---------------------------|
|  | PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small> | COMMESSA NR/20047 | UNITÀ 00 |
| | LOCALITÀ REGIONI TOSCANA E UMBRIA | LSC - 137/ALL. A | |
| | PROGETTO Rifacimento Metanodotto Sansepolcro – Foligno e opere connesse | Pagina 10 di 31 | Rev. 0 |

Dalla modellazione eseguita da PS è emerso che nel tratto prossimo alla località Trebbio, a valle della E45 Orte-Ravenna il torrente Afra tracima oltre le sommità arginali in varia misura a fronte di eventi di 20, 30, 200 e 500 anni.

La propagazione dell'allagamento nella piana circostante gli argini segue la morfologia del terreno con modesti battenti che vengono limitati da ostacoli di altezza anche modesta.

I profili idrici ottenuti da tale modellazione (v. Fig. 4.1/B), mostrano che i livelli idrici sono superiori alle sommità arginali in corrispondenza dei ponti mentre presso la sezione di attraversamento essi sono pressoché al loro livello.

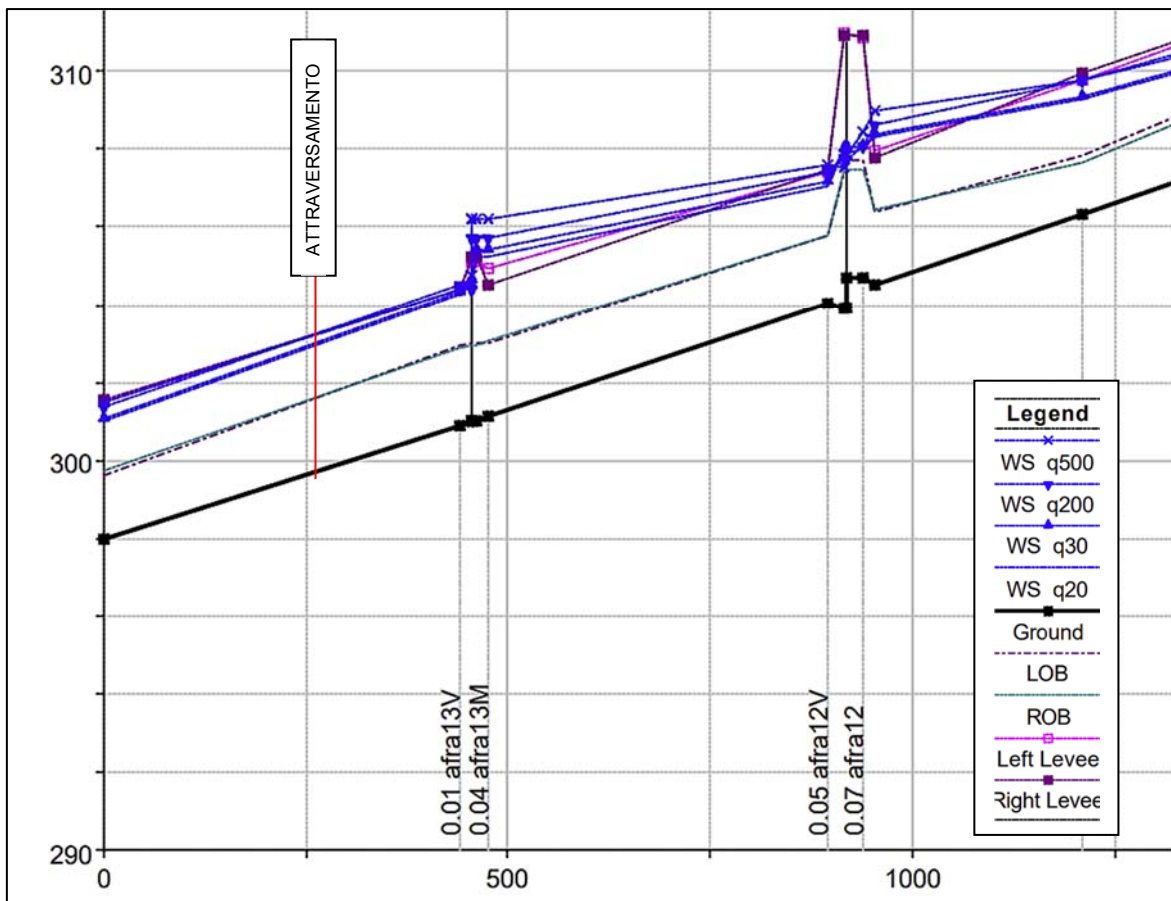


Figura 4.1/B – Profilo longitudinale della modellazione idraulica PS

Più nel dettaglio, nelle sezioni idrauliche di seguito riportate (sezioni a cavallo della sezione di attraversamento) (v. Fig. 4.1/C) e dalla tabella numerica (v. Fig. 4.1/D) si nota come in quella 180 m a monte (la sez. 01, in corrispondenza di un ponticello) i livelli idrici della piena duecentennale si trovano a quota più elevata delle sommità arginali mentre nella sezione posta più a valle (sez. 0) i livelli rimangono entro i rilevati arginali.

| | | | |
|---|---|------------------------------------|---------------------------|
|  | PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small> | COMMESSA NR/20047 | UNITÀ 00 |
| | LOCALITÀ REGIONI TOSCANA E UMBRIA | LSC - 137/ALL. A | |
| | PROGETTO Rifacimento Metanodotto Sansepolcro – Foligno e opere connesse | Pagina 11 di 31 | Rev. 0 |

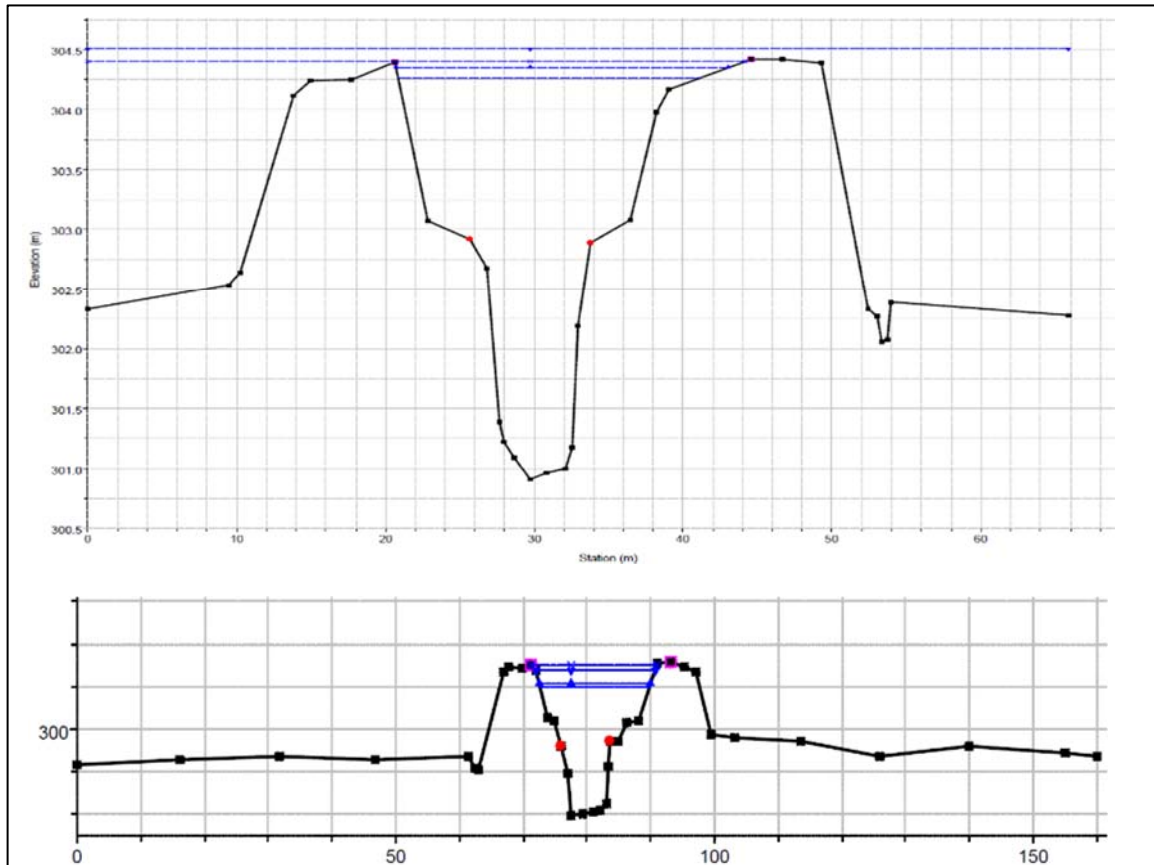


Figura 4.1/C – Sezioni idrauliche sez. 01 (in alto) e sez. 0 (in basso), rispettivamente a monte e a valle dell'attraversamento

| Torrente Afra | | | | | | | | |
|---------------|---------|--------------------|------------|------------------------|----------------------|-----------------|----------|--------------|
| Sezione | Portata | Quota fondo canale | Quota W.S. | Franco sponda sinistra | Franco sponda destra | Altezza critica | Velocità | N. di Froude |
| 0.01 | 102.1 | 300.91 | 304.27 | 0.13 | 0.15 | 304.03 | 3.82 | 0.74 |
| | 108.4 | 300.91 | 304.35 | 0.05 | 0.07 | 304.12 | 3.91 | 0.75 |
| | 138.19 | 300.91 | 304.51 | -0.11 | -0.09 | 304.4 | 2.01 | 0.37 |
| | 170.76 | 300.91 | 304.4 | 0 | 0.02 | 304.4 | 3.96 | 0.75 |
| 0 | 102.1 | 297.99 | 300.98 | 0.51 | 0.59 | 300.98 | 4.23 | 0.83 |
| | 108.4 | 297.99 | 301.05 | 0.44 | 0.52 | 301.05 | 4.32 | 0.83 |
| | 138.19 | 297.99 | 301.39 | 0.1 | 0.18 | 301.39 | 4.62 | 0.84 |
| | 170.76 | 297.99 | 301.49 | 0 | 0.08 | 301.49 | 1.15 | 0.21 |

Figura 4.1/C – Parametri idraulici da modellazione PS Sansepolcro (evidenziato in rosso la piena Tr= 200)

4.2 Modellazione locale

Per confronto con la modellazione del torrente Afra eseguita nell'ambito del PS del comune di Sansepolcro, è stata condotta una verifica locale sempre a moto permanente in corrispondenza della sezione di attraversamento, sulla base dell'attuale situazione geometrica dell'alveo ricostruita tramite sezioni rilevate allo scopo.

| | | | |
|---|---|------------------------------------|---------------------------|
|  | PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small> | COMMESSA NR/20047 | UNITÀ 00 |
| | LOCALITÀ REGIONI TOSCANA E UMBRIA | LSC - 137/ALL. A | |
| | PROGETTO Rifacimento Metanodotto Sansepolcro – Foligno e opere connesse | Pagina 12 di 31 | Rev. 0 |

4.2.1 Metodologia adottata

L'elaborazione è stata eseguita per un tratto di fiume esteso a cavallo dell'attraversamento da parte del gasdotto in progetto per una lunghezza di circa 500 m, prendendo in considerazione il valore di portata relativo al tempo di ritorno di 200 anni (tempo di ritorno prescritto da NTA di AdB Tevere) pari a $Q_{200} = 138 \text{ m}^3/\text{s}$, valore uguale a quello adottato nello studio PS.

I calcoli del profilo in moto permanente sono stati eseguiti per mezzo della costruzione di un modello numerico, utilizzando il codice HEC-RAS, Hydrologic Engineering Center - River Analysis System, prodotto dall'U.S. Army Corps of Engineers, di cui ampi riferimenti bibliografici sono disponibili in letteratura a riguardo sia delle basi teoriche, sia dello sviluppo numerico delle equazioni, sia di esperienze analoghe di applicazione già maturate in Italia e nel mondo.

Per le simulazioni è stata utilizzata la versione 6.0.0, che simula il flusso monodimensionale in condizioni stazionarie di fluidi verticalmente omogenei in qualsiasi sistema di canali o aste fluviali.

Il modello Hec-Ras permette di calcolare, per canali naturali od artificiali, il profilo idrico di correnti gradualmente variate ed in condizioni di moto stazionario (sia in regime di corrente lenta che di corrente veloce).

La scelta di operare con un modello che simuli le condizioni di moto permanente, scaturisce dalle seguenti considerazioni:

- la verifica idraulica considera un tratto limitato dell'asta fluviale nell'intorno della zona di interesse;
- il dimensionamento dell'intervento non dipende dallo sviluppo temporale dell'evento di piena, ma solo dal massimo valore di livello idrico raggiunto durante l'evento stesso e dai regimi delle velocità previste.

Le equazioni di conservazione del volume e della quantità di moto (equazioni di De Saint Venant) risolte nel modello sono derivate sulla base delle seguenti assunzioni:

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

Integrando le equazioni di conservazione della massa e della quantità di moto ed introducendo la resistenza idraulica (attrito) e le portate laterali adottate si ottiene:

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

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

dove:

A : area della sezione bagnata (m^2);

| | | | |
|---|---|------------------------------------|---------------------------|
|  | PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small> | COMMESSA NR/20047 | UNITÀ 00 |
| | LOCALITÀ REGIONI TOSCANA E UMBRIA | LSC - 137/ALL. A | |
| | PROGETTO Rifacimento Metanodotto Sansepolcro – Foligno e opere connesse | Pagina 13 di 31 | Rev. 0 |

| | | |
|----------|---|--|
| C | : | coefficiente di attrito di Chezy ($m^{1/2}/s$); |
| g | : | accelerazione di gravità (m/s^2); |
| h | : | altezza del pelo libero rispetto ad un livello di riferimento orizzontale (m); |
| Q | : | portata (m^3/s); |
| R | : | raggio idraulico (m); |
| α | : | coefficiente di distribuzione della quantità di moto; |
| q | : | portata laterale addotta (m^3/s). |

Assetto geometrico

HEC-RAS richiede la schematizzazione del corso d'acqua con tratti successivi di lunghezza variabile individuati alle estremità da sezioni di geometria nota. La posizione delle sezioni trasversali va scelta in modo da descrivere in maniera adeguata il tratto considerato prevedendo, in linea di massima, sezioni più fitte nei tratti dove la geometria trasversale dell'alveo risulta molto variabile e più rade nei tratti in cui la geometria si mantiene piuttosto uniforme. In ogni sezione sono individuati l'alveo principale e le golene, i relativi coefficienti di Manning (scabrezza) e le eventuali arginature. Il modello è in grado di simulare gli effetti indotti sui livelli dalla presenza di sezioni singolari quali ponti, tombini, stramazzi ed ostruzioni dell'alveo.

Nel caso della modellazione in oggetto non si è fatto riferimento ad alcuna ramificazione dell'alveo simulato, implementando modelli completamente monodimensionali sulla base della geometria dell'alveo.

Condizioni al contorno

Le condizioni al contorno sono necessarie per stabilire il livello del pelo libero dell'acqua all'estremità del sistema (a monte e/o a valle). In un regime di corrente lenta, la condizione al contorno necessaria è quella di valle (se la corrente è lenta non si risente di ciò che accade a monte), mentre nel caso di corrente veloce vale l'opposto. Se invece viene effettuato un calcolo in regime di flusso misto, allora le condizioni al contorno devono essere definite a valle e a monte.

Calcolo della velocità di deflusso

Il valore della velocità media, calcolato dal modello in riferimento alla geometria complessiva di ogni sezione trasversale, è oggetto di una reinterpretazione all'interno della sezione trasversale per la corretta valutazione del valore della velocità di deflusso da attribuire all'alveo e alla zona golenale (qualora presente) e da considerare nel calcolo del carico totale.

Il calcolo è eseguito in riferimento alle seguenti formulazioni, che si basano sulla conservazione del valore della pendenza motrice per l'intera sezione:

$$Q = k_s \cdot A \cdot R^{2/3} \cdot i^{1/2}$$

è l'equazione di Chezy, scritta con la notazione di Gauckler-Strickler per la scabrezza, con:

- k_s coefficiente di scabrezza di Strickler
- A area della sezione bagnata (m^2)
- R raggio idraulico (m)
- i pendenza motrice.

Si assume che la scabrezza possa variare lungo i singoli tratti di una sezione, e che la pendenza motrice sia costante nei tratti compresi tra due sezioni del modello.

| | | | |
|---|---|------------------------------------|---------------------------|
|  | PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small> | COMMESSA NR/20047 | UNITÀ 00 |
| | LOCALITÀ REGIONI TOSCANA E UMBRIA | LSC - 137/ALL. A | |
| | PROGETTO Rifacimento Metanodotto Sansepolcro – Foligno e opere connesse | Pagina 14 di 31 | Rev. 0 |

Risultati dei calcoli idraulici

Oltre ai valori di portata e di livello calcolati direttamente dal codice di calcolo, il modello fornisce in output anche i valori dell'area, larghezza del pelo libero, della velocità, dell'altezza d'acqua e del numero di Froude per ogni sezione di calcolo. E' fornita anche la linea del carico totale ottenuta come:

$$H = h + \alpha \frac{V^2}{2g}$$

dove:

- h livello idrico (m)
- α coefficiente di ragguglio
- V velocità media nella sezione trasversale (m/s)
- g accelerazione di gravità (m/s²).

4.2.2 Ricostruzione dei livelli di piena

La verifica idraulica ha lo scopo di valutare i livelli idrici raggiunti dalla piena di progetto nel tratto di interesse ed i relativi parametri idraulici, in situazione ante e post intervento, qualora diverse. Per la caratterizzazione geometrica del tratto di alveo del torrente Afra in studio ci si è basati su di serie di 3 sezioni trasversali allo scopo rilevate, la cui ubicazione è riportata nella immagine aerea di **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata..**

In tal modo si attualizza la morfologia del tratto di corso, rispetto ai rilievi utilizzati per la modellazione del PS, rilevati ormai parecchi anni orsono.

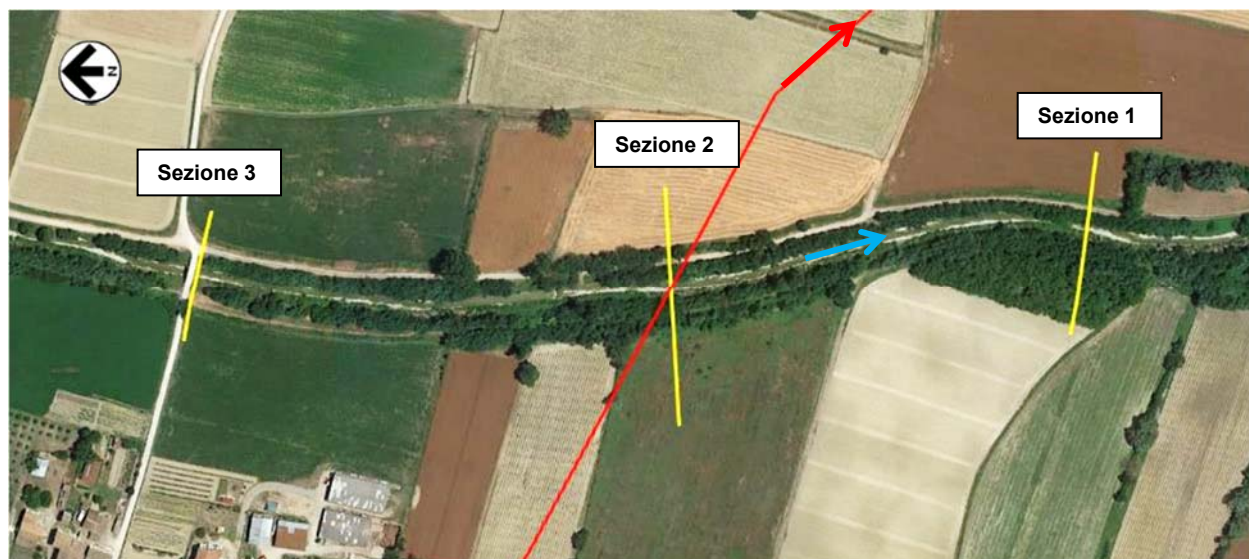


Figura 4.2.2/A – Stralcio della mappa con riportate le sezioni di modellazione idraulica locale

4.3.3 Risultati della modellazione

I risultati della modellazione sono riportati in allegato 1, dove figurano il profilo idrico, le sezioni indicanti i livelli raggiunti dalle portate di piena di progetto nonché le tabelle di dettaglio con i vari parametri idraulici per le singole sezioni che interessano il tracciato del metanodotto in esame.

| | | | |
|---|---|------------------------------------|---------------------------|
|  | PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small> | COMMESSA NR/20047 | UNITÀ 00 |
| | LOCALITÀ REGIONI TOSCANA E UMBRIA | LSC - 137/ALL. A | |
| | PROGETTO Rifacimento Metanodotto Sansepolcro – Foligno e opere connesse | Pagina 15 di 31 | Rev. 0 |

I valori dei principali parametri vengono riassunti nella tabella di seguito riportata (v. Fig. 4.3.3/A). Si ricorda che essi sono relativi ad un evento critico di tempo di ritorno 200 anni. In figura 4.3.3/B è riportato il profilo longitudinale con il livello idrico duecentennale.

In sintesi, in relazione al tratto di interesse per i lavori in oggetto, si può osservare quanto segue:

- la piena duecentennale ($Q = 138 \text{ m}^3/\text{s}$) non è contenuta per poco dall'argine sinistro che viene sormontato nella sezione 1 e 2, cioè quella di attraversamento, provocando esondazione;
- una portata di poco inferiore, pari a $125 \text{ m}^3/\text{s}$, è tuttavia smaltibile da tali sezioni a piene rive;
- i battenti idrici in alveo hanno valori di circa 3.60
- la velocità del flusso è di circa 3.5 m/s.

| | | | |
|---|---|-----------------------------|--------------------|
|  | PROGETTISTA  consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori | COMMESSA NR/20047 | UNITÀ 00 |
| | LOCALITA' REGIONI TOSCANA E UMBRIA | LSC - 137/ALL. A | |
| | PROGETTO Rifacimento Metanodotto Sansepolcro – Foligno e opere connesse | Pagina 16 di 31 | Rev. 0 |

| Sezione | Portata | Quota fondo | Livelli idrici | Battenti idrici | Vel. golena sin | Vel. canale | Vel. golena dx | n. Froude |
|---------|---------------------|-------------|----------------|-----------------|-----------------|-------------|----------------|-----------|
| | (m ³ /s) | (m) | (m) | (m) | (m/s) | (m/s) | (m/s) | - |
| 1 | 138 | 300.85 | 304.53 | 3.68 | - | 3.82 | - | 0.78 |
| 2 | 138 | 299.14 | 302.76 | 3.62 | - | 3.40 | - | 0.77 |
| 3 | 138 | 297.73 | 301.30 | 3.57 | - | 3.35 | - | 0.74 |

Tabella 4.4.3/A - Principali parametri idraulici nel tratto modellato
 (in grassetto: sezione di attraversamento)

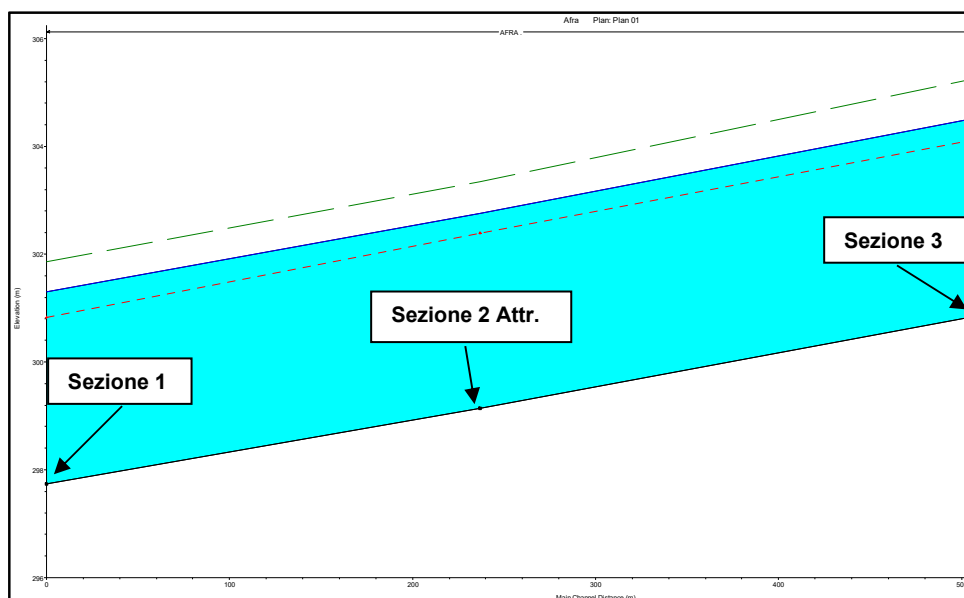


Figura 4.4.3/B – Profilo longitudinale con livello idrico 200ennale

| | | | |
|---|---|------------------------------------|---------------------------|
|  | PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small> | COMMESSA NR/20047 | UNITÀ 00 |
| | LOCALITÀ REGIONI TOSCANA E UMBRIA | LSC - 137/ALL. A | |
| | PROGETTO Rifacimento Metanodotto Sansepolcro – Foligno e opere connesse | Pagina 17 di 31 | Rev. 0 |

5 RISCHI IDRAULICI

I rischi cui è soggetta una tubazione in corrispondenza di un attraversamento fluviale, o di un tratto di parallelismo, sono i seguenti:

1. Erosione di fondo alveo
2. Approfondimento di fondo alveo
3. Erosione spondale e relativo spostamento laterale dell'alveo
4. Cambio di percorso e taglio di meandro

5.1 Erosione di fondo alveo

L'erosione del fondo alveo può aver luogo a seguito della velocità della corrente rispetto ad una situazione di equilibrio, come avviene in concomitanza con le fasi di piena e in corrispondenza di zone singolari come anse, confluenze, restringimenti. Si distingue tra erosione generale lungo un tratto di corso ed erosione locale (v. Figura).

L'erosione generale avviene a seguito di complesse interazioni tra flusso idrico, trasporto solido e morfologia del canale in genere in fase di piena. Erosione "intermittente" ha luogo durante piene in corsi d'acqua a fondo mobile quando il fondo alveo si abbassa per asportazione del materiale al fondo in corrispondenza delle massime portate (quindi massima velocità), per poi essere soggetto a sedimentazione nelle code di piena, quando la velocità diminuisce.

L'occorrenza di questo pericoloso fenomeno risulta di difficile riscontro a posteriori perché spesso non si ha una variazione del profilo di fondo pre e post piena, ma, appunto per questo, rappresenta un serio pericolo per le tubazioni installate sotto i fondi alveo a letto mobile, che possono risultare danneggiate (abrasione della protezione, bugnatura, ecc.) senza che ce ne sia evidenza, se non con esami tipo passaggio di pig.

L'erosione locale si verifica a causa di un'accelerazione della corrente a causa di una ostruzione o costrizione del flusso in corrispondenza di pile e spalle dei ponti, scogliere, massi o grossi tronchi presenti sul fondo che determinano vortici con aumento della velocità e conseguente erosione locale dei sedimenti.

I valori della profondità d'erosione possono essere stimati quantitativamente, seppur con grande cautela, sulla base delle caratteristiche idrauliche e morfologiche del corso, come indicato nel successivo paragrafo.

| | | | |
|---|---|------------------------------------|---------------------------|
|  | PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small> | COMMESSA NR/20047 | UNITÀ 00 |
| | LOCALITÀ REGIONI TOSCANA E UMBRIA | LSC - 137/ALL. A | |
| | PROGETTO Rifacimento Metanodotto Sansepolcro – Foligno e opere connesse | Pagina 18 di 31 | Rev. 0 |

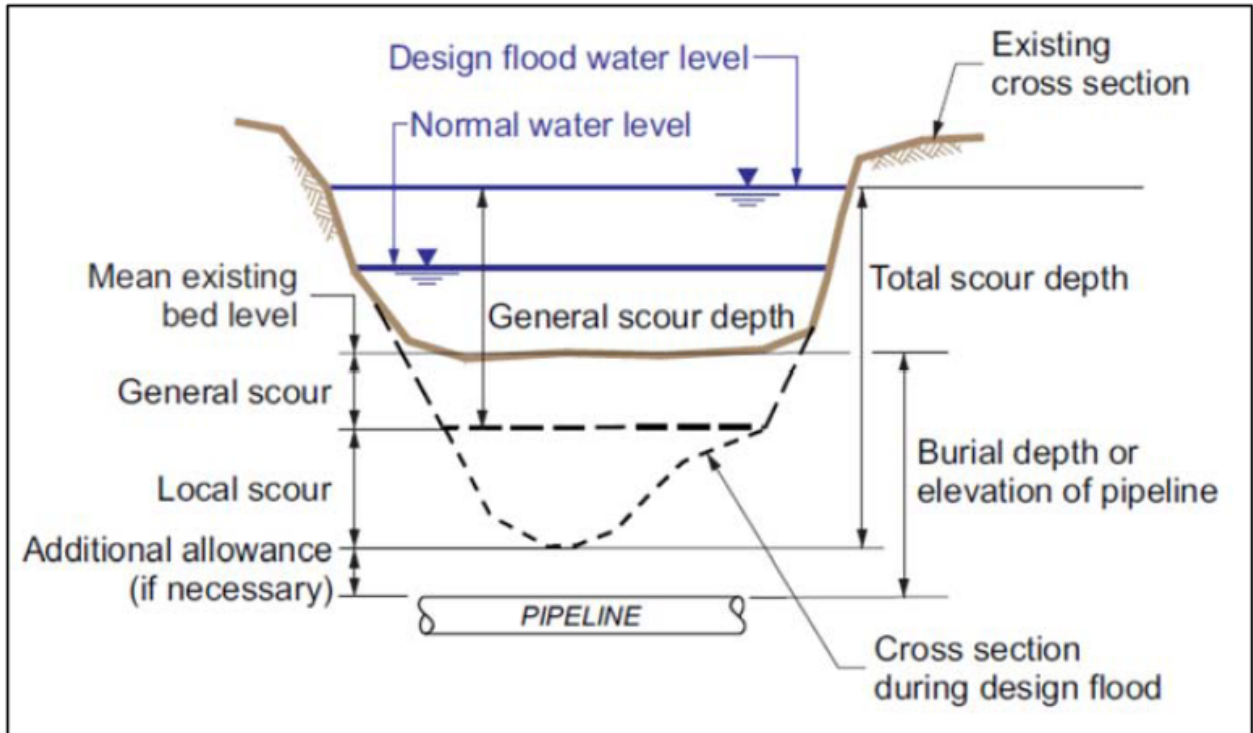


Figura 5.1/A – Schema di erosione generale e locale (da Veldeman, 2008)

5.2 Approfondimento di fondo alveo

Mentre per erosione di fondo si intende il fenomeno causato dal singolo evento di piena, il termine approfondimento si rivolge alla modellazione che interessa in genere lunghi tratti fondo alveo a seguito di prolungati periodi di flusso. Si potrebbe chiamare tendenza evolutiva all'approfondimento del fondo alveo.

Questo fenomeno è il risultato di un complicato processo di modellazione della morfologia del canale che tende a trovare un equilibrio con il regime di flusso.

Esso può aver luogo per aumento delle portate nel tempo, per diminuzione del materiale solido disponibile, per modifiche alla tipologia di corso (ad es. da multicursale a monocursale).

La stima della tendenza evolutiva necessita del confronto di profili fluviali rilevati in tempi diversi, nonché di osservazioni su manufatti presenti lungo il corso da tempo.

5.3 Erosione spondale

Le complesse modalità di trasporto e deposito del materiale alluvionale e le variazioni di velocità lungo il profilo e le sezioni fluviali, possono comportare l'erosione e lo spostamento laterale delle sponde. Tale fenomeno risulta accentuato nella parte esterna delle anse e dei meandri e nei corsi d'acqua a rami intrecciati. L'erosione può svilupparsi lentamente su lunghi periodi, ma anche nel breve volgere di una piena. La stima dell'esistenza del fenomeno si basa su osservazioni morfologiche delle sponde, delle condizioni della copertura vegetazionale e quando disponibili da misure topografiche effettuate nel tempo. Più difficile risulta stimare la potenzialità del processo quando esso non si è ancora manifestato o è quiescente da tempo.

| | | | |
|---|---|------------------------------------|---------------------------|
|  | PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small> | COMMESSA NR/20047 | UNITÀ 00 |
| | LOCALITÀ REGIONI TOSCANA E UMBRIA | LSC - 137/ALL. A | |
| | PROGETTO Rifacimento Metanodotto Sansepolcro – Foligno e opere connesse | Pagina 19 di 31 | Rev. 0 |

Il processo erosivo delle sponde comporta forti rischi per le curve di discesa/risalita delle tubazioni, che, se non localizzate a sufficiente distanza, possono venir direttamente coinvolte dal flusso idrico.

5.4 Cambio di percorso e taglio di meandro

In particolari situazioni il corso d'acqua può abbandonare il suo percorso e formare un nuovo canale. Tipiche situazioni sono in corrispondenza delle conoidi in ambiente montano, dove l'elevato trasporto solido può provocare al cambio di pendenza improvvisi depositi e ostruzioni del corso, di corsi d'acqua a rami intrecciati con passaggio da un ramo all'altro e di meandri nelle zone di bassa pianura con la formazione del cosiddetto "*taglio di meandro*". La differenza tra i vari processi è che nei primi due casi il fenomeno si compie in genere nel corso di un singolo evento di piena, mentre nell'ultimo progressivamente su tempi molto più lunghi.

Condotte posizionate in corrispondenza delle zone di nuovo percorso del fiume sono ovviamente a rischio di essere coinvolte dal fenomeno. In particolare potrebbe accadere che il flusso si imponesse lungo la trincea di posa della tubazione, grazie alla generale minore resistenza dei terreni di riempimento rispetto al terreno in posto.

5.5 Stima dello spessore di erosione generalizzata in caso di evento critico

L'erosione generale del fondo di un corso d'acqua corrisponde all'abbassamento del letto che si può verificare durante una piena in un tratto di corso. La possibilità che una tubazione venga esposta a causa dell'erosione in un evento di piena si stima tramite la valutazione del massimo spessore di fondo alveo asportabile dalla piena di dato periodo di ritorno. Se la quota della generatrice superiore della condotta è superiore al livello di erosione previsto, allora la tubazione è da considerarsi vulnerabile nei confronti dell'evento di piena considerato.

Il fenomeno è rappresentato da abbassamenti spesso transitori e reversibili dell'alveo a fondo mobile in fase di piena di difficile valutazione sia sperimentale che analitica. Essi dipendono dalle caratteristiche idrodinamiche della corrente e dal tipo di materiale costituente il fondo.

Le ricerche condotte portano ad interpretare il fenomeno nei terreni prevalentemente sabbiosi come la conseguenza di una pronunciata ondulazione del fondo che, ad opera dei cavi, incide il profilo d'alveo. Poiché il sistema di tali dune trasla verso valle, tutto l'alveo gradatamente viene interessato dalla massima depressione dei cavi.

Negli alvei torrentizi con terreni grossolani (ghiaia e ciottoli), invece, il fenomeno consiste nel rapido ed intenso modellamento del fondo con formazione di profondi solchi divaganti tra le sponde.

Il fenomeno dell'aratura di fondo è di difficile modellazione a causa delle numerosissime variabili che entrano in gioco e soprattutto delle condizioni locali, difficilmente prevedibili, che governano la dinamica del fenomeno stesso.

| | | | |
|---|---|------------------------------------|---------------------------|
|  | PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small> | COMMESSA NR/20047 | UNITÀ 00 |
| | LOCALITÀ REGIONI TOSCANA E UMBRIA | LSC - 137/ALL. A | |
| | PROGETTO Rifacimento Metanodotto Sansepolcro – Foligno e opere connesse | Pagina 20 di 31 | Rev. 0 |

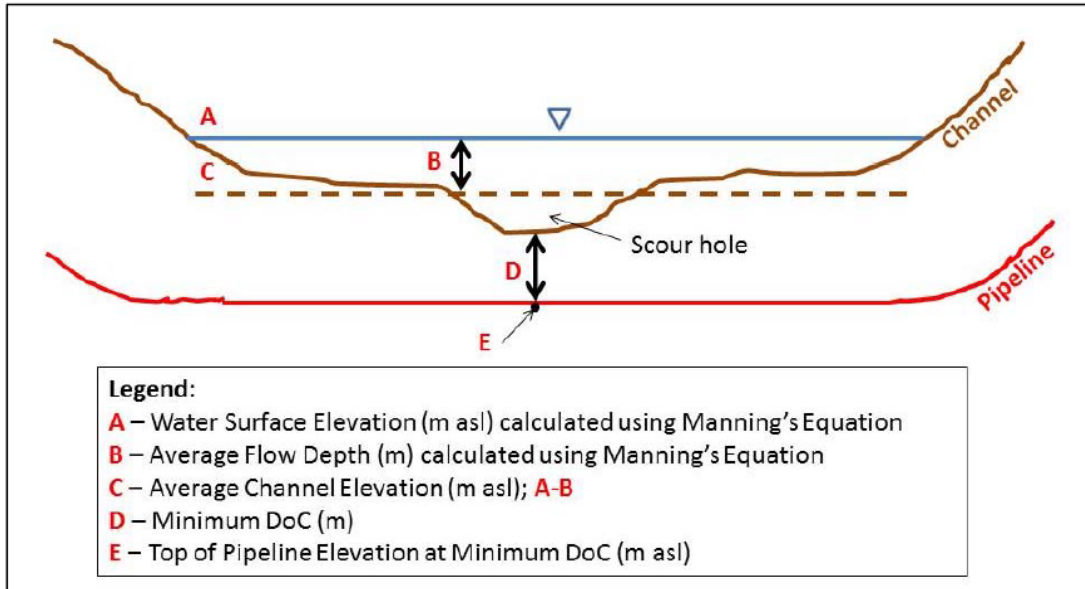


Figura 5.5/A – Schema di calcolo dell’erosione di fondo (da Veldeman, 2008)
 (DoC=depth of cover, spessore di copertura)

La stima dello spessore di erosione per una data portata di progetto è assai problematica stanti i vari parametri che in effetti governano il fenomeno: geometria della sezione, caratteristiche del sedimento in posto, trasporto solido, caratteristiche del flusso idrico, ecc.; pertanto, al di là delle trattazioni analitiche, richiede grande sensibilità ed esperienza.

Tra i metodi analitici di facile approccio si segnala quello proposto da *Yamremko and Cooper (1983)* che assume la proporzionalità dello spessore di erosione in corrispondenza di un dato evento idrologico critico con l’altezza idrometrica media (=rapporto tra area del flusso e perimetro bagnato) secondo la seguente relazione:

$$d_s = z_n \cdot d_m$$

dove: d_s = spessore dell’erosione al di sotto del letto
 d_m = altezza idrometrica al di sopra del livello medio del canale inciso
 z_n = fattore di correzione, funzione della morfologia del canale (v. Tab. 5.5/A)

| Channel Morphology | Correction Factor (z-factor) |
|--------------------|------------------------------|
| Straight Reach | 0.25 |
| Moderate Bend | 0.5 |
| Severe Bend | 0.75 |

Tabella 5.5/A – Fattore empirico di correzione
 (da Joyce and Chandler, 2004)

| | | | |
|---|---|------------------------------------|---------------------------|
|  | PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small> | COMMESSA NR/20047 | UNITÀ 00 |
| | LOCALITÀ REGIONI TOSCANA E UMBRIA | LSC - 137/ALL. A | |
| | PROGETTO Rifacimento Metanodotto Sansepolcro – Foligno e opere connesse | Pagina 21 di 31 | Rev. 0 |

Simile al metodo soprariportato di *Yamremko and Cooper*, si può far ricorso al metodo cosiddetto *Regime di Neill* (1964) secondo il quale:

$$d_s = z'_n \cdot d_i \cdot (q_i/q_p)^m$$

dove: d_s = spessore dell'erosione al di sotto del letto

d_i = altezza idrometrica sopra il livello medio del canale inciso in caso di piene rive

z'_n = fattore di correzione, funzione della morfologia del canale (v. Tab. 5.5/B)

q_i, q_p = rispettivamente la portata unitaria nel caso di piene rive e di piena di progetto

m = esponente pari a $0.67 \div 0.85$ in funzione della granulometria.

| Channel Morphology | Correction Factor (z-factor) |
|--------------------|---------------------------------|
| Straight Reach | 0.5 |
| Moderate Bend | 0.6 |
| Severe Bend | 0.7 |

Tabella 5.5/B – Fattore empirico di correzione
(da Pemberton and Lara, 1984)

In Italia è anche prassi utilizzare una prudenziale generalizzazione, proposta da Zanovello¹, che valuta l'erosione di fondo transitoria durante le piene pari al 50% del battente idrico sul livello medio del fondo, indipendentemente dalla natura del fondo e dal regime di corrente.

Nel tratto in esame si calcola che eventuali fenomeni di erosione generalizzata potrebbero avere una profondità massima di 0.95 m, in assenza di opere di protezione e stabilizzazione d'alveo.

5.6 Approfondimenti localizzati (buche in alveo)

Essi consistono in fenomeni di scavo localizzato, che si producono nel letto di un fiume in genere in fase di piena, dovuti perlopiù ai seguenti motivi:

- allontanamento della corrente dalle condizioni di moto uniforme e creazione di filetti particolarmente veloci
- presenza di ostacoli trasversali al moto
- irregolarità geometriche dell'alveo.

In qualche caso essi sono ben prevedibili, come ad es. in corrispondenza di manufatti (pile di ponti, testa di pennelli, a valle di briglie, etc.); in altri casi essi dipendono da situazioni contingenti, spesso casuali, che si vengono a produrre in fase di piena (tronchi d'albero, trovanti, etc.).

Il meccanismo che porta alla formazione delle buche può avvenire secondo i due seguenti schemi:

¹ Zanovello A., Sulle variazioni di fondo alveo durante le piene. L'Energia elettrica, XXXIV, n. 8; 1959.

| | | | |
|---|---|------------------------------------|---------------------------|
|  | PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small> | COMMESSA NR/20047 | UNITÀ 00 |
| | LOCALITÀ REGIONI TOSCANA E UMBRIA | LSC - 137/ALL. A | |
| | PROGETTO Rifacimento Metanodotto Sansepolcro – Foligno e opere connesse | Pagina 22 di 31 | Rev. 0 |

- vena veloce superficiale con sottostante zona di turbolenza in cui il materiale di fondo viene eroso all'indietro, indi sollevato e portato via dalla vena superficiale
- vena veloce aderente al fondo che trasporta il materiale verso valle, con sovrastante zona di turbolenza.

La buca non si approfondisce indefinitamente, ma tende ad una condizione d'equilibrio con pendenze prossime all'angolo di riposo del materiale d'alveo. La profondità della buca (s) è di incerta stima; fra le numerose relazioni proposte dagli Autori si ricordano le seguenti:

$$s = 0,378 \cdot H^{0,5} \cdot q^{0,35} + 2,15 \cdot a \quad (\text{Schoklitsch})^2$$

$$s = 0,65 \cdot (H-h') \cdot q^{3/5} \cdot D_{90}^{-2/5} - h \quad (\text{Eggemberger})$$

$$s = h \cdot (1,82 - 1,64(1 - e^{-(\lg \tau / \rho v^2 + 7)})) \cdot (94 - 8 \lg \tau_c / \rho v^2)^{-1} \cdot 10^3 \quad (\text{Adami})^3$$

Nel presente studio è stata utilizzata la relazione di Schoklitsch nella quale:

- s** = profondità massima della buca sulla quota media dell'alveo (m);
H = $h + v^2/2g$: carico totale a monte della buca (m);
h = altezza idrometrica sul livello medio del fondo⁴;
v = velocità media nell'alveo inciso (m/s);
q = Q/L: portata per unità di larghezza dell'alveo (m³/s m);
Q = portata nell'alveo inciso (m³/s);
L = larghezza dell'alveo inciso (m);
a = dislivello delle quote d'alveo a monte e a valle della buca.

E' stato eseguito il calcolo per la sezione di attraversamento, utilizzando i valori dei parametri output del programma di calcolo Hec Ras per tale sezione, come riportato nella seguente tabella:

| | | |
|-----------------------|----------|--------------------------|
| Altezza canale | h_{ch} | 1,91 m |
| Velocità canale | v_{ch} | 3,31 m/s |
| Portata canale | Q_{ch} | 125,00 m ³ /s |
| Larghezza canale | L_{ch} | 19,80 m |
| Portata unitaria | q_{ch} | 6,31 m ³ /s/m |
| Carico totale | H_{ch} | 2,00 m |
| Dislivello buca | a | 0,01 m |
| Approf. local. | s | 1,04 m |

Il calcolo ha evidenziato che nella sezione di attraversamento gli approfondimenti localizzati possono avere una profondità di 1.04 m dal livello medio dell'alveo.

² Schoklitsch. A, Stauraum verlandung und kolkbewehr, Springer Ed., Vienna, 1935.

³ Adami A., Fenomeni localizzati ed erosioni negli alvei, Atti "Moderne vedute sulla meccanica dei fenomeni fluviali", CNR; P.F. Conservazione del suolo, 1979.

⁴ Hydr Depth C Hydraulic depth in channel (channel flow area/topwidth of channel flow)

| | | | |
|---|---|------------------------------------|---------------------------|
|  | PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small> | COMMESSA NR/20047 | UNITÀ 00 |
| | LOCALITÀ REGIONI TOSCANA E UMBRIA | LSC - 137/ALL. A | |
| | PROGETTO Rifacimento Metanodotto Sansepolcro – Foligno e opere connesse | Pagina 23 di 31 | Rev. 0 |

Nel tratto in esame si calcola che eventuali buche, in assenza di opere di protezione del fondo alveo, potrebbero avere una profondità massima di 2.2 m.

Diametro limite dei clasti

Si è proceduto alla determinazione del diametro limite dei clasti trasportabili dalla piena, utilizzando il procedimento di Shields secondo il quale sussiste la relazione sottoriportata che lega la spinta idrodinamica su particelle di granulometria uniforme e la distribuzione delle velocità lungo la verticale:

$$\tau_o / [(\gamma_s - \gamma_w)d] = f [(d(ghi)^{1/2} / \mu)] = f (V^* d / \mu)$$

in cui:

- τ_o = tensione tangenziale (kg/m^2);
- γ_s = peso specifico delle particelle (kg/m^3);
- γ_w = peso specifico dell'acqua (1000 kg/m^3);
- d = diametro medio del materiale di fondo ($d = d_{50}$) (m);
- g = accelerazione di gravità ($g = 9.81 \text{ m/s}^2$);
- h = profondità della corrente idrica (m);
- i = pendenza del fondo alveo;
- μ = viscosità cinematica (m^2/s);
- V^* = velocità d'attrito (m/s);

Si ha inoltre:

$$V^* = (\tau_o / \delta)^{1/2} \quad \text{e} \quad \tau_o = (V^* X)^2$$

in cui:

- δ = densità dell'acqua ($= 102 \text{ kg} \cdot \text{s}^2/\text{m}^4$);
- V = velocità media della corrente idrica (m/s);
- X = coefficiente di scabrezza.

Queste ultime grandezze sono note per cui è possibile determinare il valore di " τ_o " e di " V^* "; inoltre, per valori di " V^*d / μ " maggiori di 500, che nei corsi d'acqua naturali si verificano con alvei ciottolosi, il valore " $\tau_o / [(\gamma_s - \gamma_w)d]$ " è costante ed è pari a 0.06, cioè:

$$\tau_o / [(\gamma_s - \gamma_w)d] = 0.06$$

Esplicitando tale relazione in funzione dell'unica incognita si otterrà il diametro limite dei clasti trasportabili:

$$d = \tau_o / [0.06 (\gamma_s - \gamma_w)]$$

Sulla base dei risultati della modellazione idraulica è emerso che nella sezione interessata dall'attraversamento del metanodotto in progetto la corrente può esercitare nel canale una tensione tangenziale massima in caso di piena duecentennale $\tau_o = 129 \text{ N/m}^2$, cui corrisponde una capacità di trasporto massima di un clasto di circa 15 cm. Questo in corrispondenza dell'alveo attivo, mentre in golena tale capacità di trasporto risulta sensibilmente inferiore, dell'ordine centimetrico.

| | | | |
|---|---|------------------------------------|---------------------------|
|  | PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small> | COMMESSA NR/20047 | UNITÀ 00 |
| | LOCALITÀ REGIONI TOSCANA E UMBRIA | LSC - 137/ALL. A | |
| | PROGETTO Rifacimento Metanodotto Sansepolcro – Foligno e opere connesse | Pagina 24 di 31 | Rev. 0 |

5.7 Risultati delle verifiche

Sulla base dei risultati delle verifiche idrauliche effettuate, delle informazioni cartografiche e di immagini aeree riprese in periodi diversi, nonché dei sopralluoghi condotti in posto, si possono effettuare le seguenti osservazioni:

- stabilità planimetrica: essendo l'alveo definito da rilevati arginali, con le sponde fissate dalla vegetazione, si ritiene che il corso d'acqua risulti planimetricamente stabile;
- stabilità altimetrica: non si sono osservati evidenti segni di tendenza all'approfondimento generalizzato dell'alveo;
- approfondimenti temporanei in fase di piena: gli spessori di fondo alveo mobilizzabili temporaneamente in fase di piena si sono stimati, utilizzando la metodologia sopra riportata, in circa 0.95 m, e la profondità di buche locali in alveo risulta pari a circa 1.04 m.

| | | | |
|---|---|------------------------------------|---------------------------|
|  | PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small> | COMMESSA NR/20047 | UNITÀ 00 |
| | LOCALITÀ REGIONI TOSCANA E UMBRIA | LSC - 137/ALL. A | |
| | PROGETTO Rifacimento Metanodotto Sansepolcro – Foligno e opere connesse | Pagina 25 di 31 | Rev. 0 |

6 CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Il tracciato del metanodotto in oggetto “*Metanodotto Sansepolcro-Foligno DN 400 (16”) – DP 75 bar*” attraversa l’alveo del torrente Afra alla progressiva PK 6+239 km, nel territorio del comune di Sansepolcro (AR).

La sezione prevista di attraversamento si localizza nell’ambito della parte terminale del corso d’acqua, poco distante dalla sua confluenza in Tevere. L’alveo, inciso nel fondovalle pianeggiante tiberino, è limitato da rilevati arginali fissati da vegetazione arborea.

L’alveo ha una larghezza di fondo di circa 7 m e di circa 20 m tra le sommità interne degli argini. Il terreno che costituisce il fondo alveo è costituito in superficie da alluvione fluviale grossolana, mentre già a debole profondità sono presenti terreni sabbiosi limosi.

Lo studio idrologico-idraulico, condotto per il tratto terminale del torrente dal Piano Strutturale del comune di Sansepolcro e integrato, nell’ambito del presente studio, da una modellazione locale, ha evidenziato i parametri della corrente di piena in corrispondenza dell’attraversamento. La piena 200ennale non è contenuta per poco nella sezione di attraversamento sormontando pertanto l’argine sinistro e provocando esondazione nei campi circostanti. Il battente idrico a piene rive risulta di 3.62 m e la velocità del flusso nel canale è di 3.4 m/s.

Sulla base di tali parametri si sono stimati anche gli eventuali massimi approfondimenti che l’alveo, qualora privo di interventi di protezione, potrebbe subire in fase di piena critica. Lo spessore mobilizzabile di fondo alveo risulta di 0.95 m e la profondità di approfondimenti localizzati 1.04 m.

La tecnica di installazione della condotta in subalveo prevista dal progetto tramite la metodologia trenchless della TOC ad elevata profondità (profondità minima dal fondo alveo 10 m) permette l’attraversamento sicuro e senza interferenze con l’alveo né con i rilevati arginali, senza necessità di alcun intervento di protezione dell’alveo.

| | | | |
|---|---|------------------------------------|---------------------------|
|  | PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small> | COMMESSA NR/20047 | UNITÀ 00 |
| | LOCALITÀ REGIONI TOSCANA E UMBRIA | LSC - 137/ALL. A | |
| | PROGETTO Rifacimento Metanodotto Sansepolcro – Foligno e opere connesse | Pagina 26 di 31 | Rev. 0 |

ALLEGATO 1

RISULTATI DELLA MODELLAZIONE IDRAULICA

Tr= 200 anni

| | | | |
|---|---|------------------------------------|---------------------------|
|  | PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small> | COMMESSA NR/20047 | UNITÀ 00 |
| | LOCALITÀ REGIONI TOSCANA E UMBRIA | LSC - 137/ALL. A | |
| | PROGETTO Rifacimento Metanodotto Sansepolcro – Foligno e opere connesse | Pagina 27 di 31 | Rev. 0 |

LEGENDA

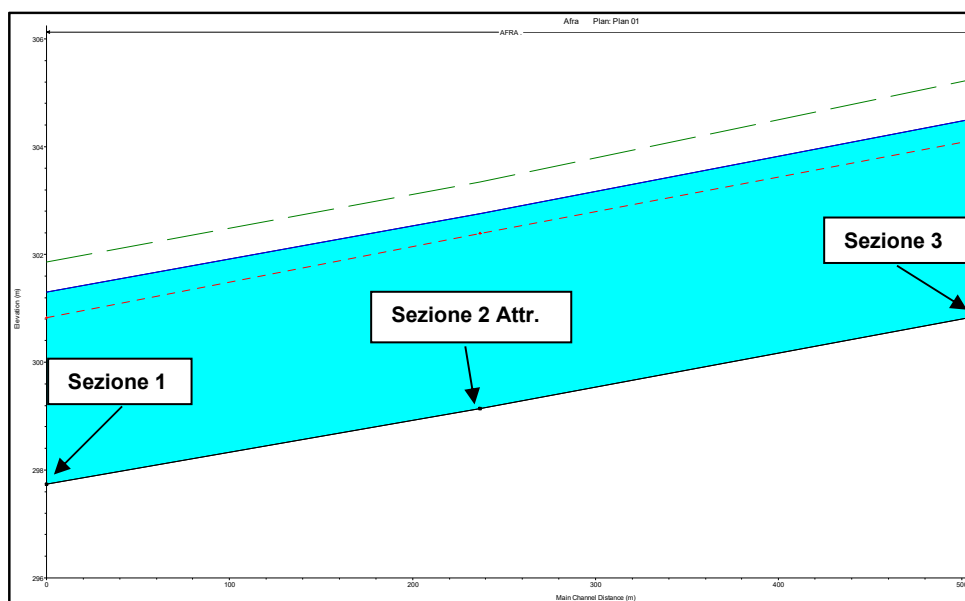
| | |
|-----------------------------|--|
| Reach | Ramo fluviale |
| River Sta | Sezione fluviale |
| Q Total (m ³ /s) | Portata complessiva defluente nell'intera sezione trasversale |
| Min Ch El (m) | Minima quota dell'alveo nel canale principale |
| W.S. Elev (m) | Quota del pelo libero |
| Crit W.S. (m) | Quota critica del pelo libero |
| E.G. Elev (m) | Quota della linea del carico totale per il profilo liquido calcolato |
| E.G. Slope (m/m) | Pendenza della linea del carico totale |
| Vel Chnl (m/s) | Velocità media nel canale principale |
| Flow Area (m ²) | Area totale della sezione liquida effettiva |
| Top Width (m) | Larghezza superficiale della sezione liquida |
| Froude # Chl | Numero di Froude nell'alveo principale |
| EG PF.... | Linea del carico totale per il profilo liquido calcolato |
| WS PF.... | Linea del pelo libero per il profilo liquido calcolato |
| Ground | Profilo del terreno |
| Bank Sta | Limite della sponda fluviale |

| | | | |
|---|---|-----------------------------|-------------------------|
|  | PROGETTISTA  consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori | COMMESSA NR/20047 | UNITÀ 00 |
| | LOCALITÀ REGIONI TOSCANA E UMBRIA | LSC - 137/ALL. A | |
| | PROGETTO Rifacimento Metanodotto Sansepolcro – Foligno e opere connesse | Pagina 28 di 31 | Rev. 0 |

TABELLA RIASSUNTIVA DEI RISULTATI DELLA MODELLAZIONE

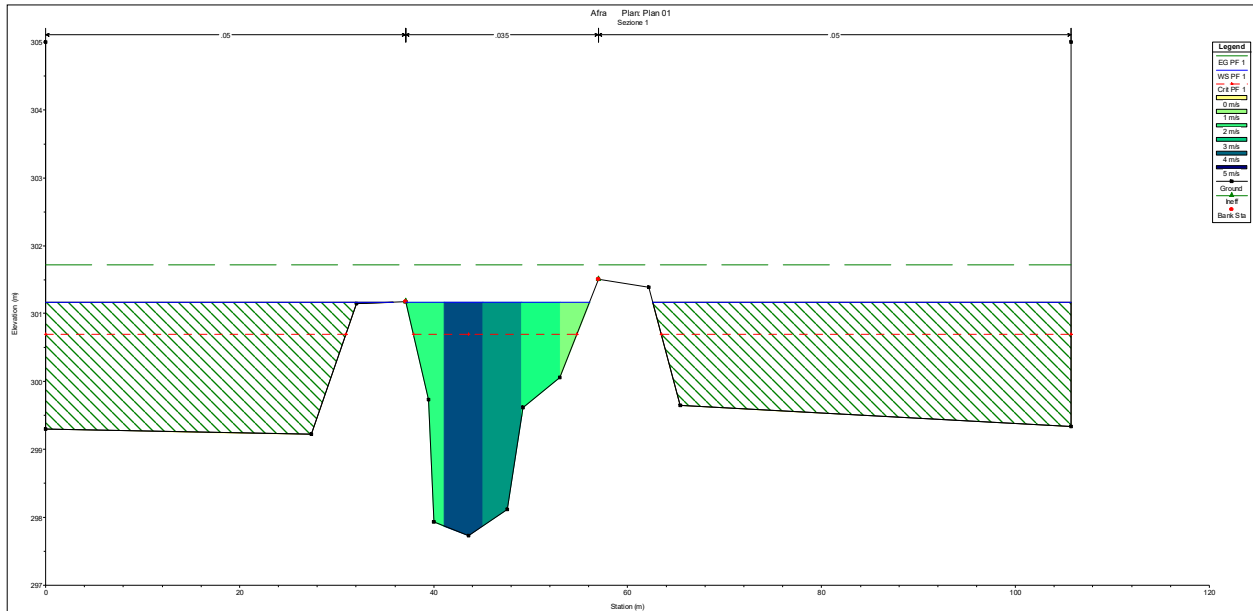
| Sezione | Portata | Quota fondo | Livelli idrici | Battenti idrici | Vel. golena sin | Vel. canale | Vel. golena dx | n. Froude |
|---------|---------------------|-------------|----------------|-----------------|-----------------|-------------|----------------|-----------|
| | (m ³ /s) | (m) | (m) | (m) | (m/s) | (m/s) | (m/s) | - |
| 1 | 138 | 300.85 | 304.53 | 3.68 | - | 3.82 | - | 0.78 |
| 2 | 138 | 299.14 | 302.76 | 3.62 | - | 3.40 | - | 0.77 |
| 3 | 138 | 297.73 | 301.30 | 3.57 | - | 3.35 | - | 0.74 |

PROFILO LONGITUDINALE CON LIVELLO DUECENTENNALE

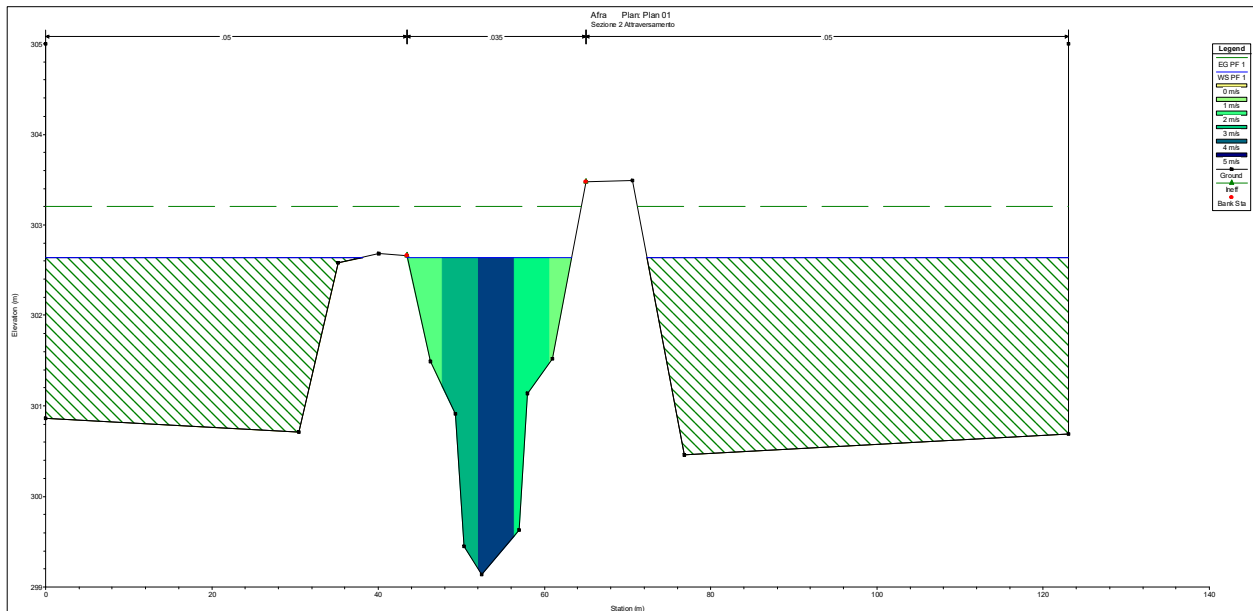


| | | | |
|---|---|-----------------------------|-------------------------|
|  | PROGETTISTA  consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori | COMMESSA NR/20047 | UNITÀ 00 |
| | LOCALITA' REGIONI TOSCANA E UMBRIA | LSC - 137/ALL. A | |
| | PROGETTO Rifacimento Metanodotto Sansepolcro – Foligno e opere connesse | Pagina 29 di 31 | Rev. 0 |

SEZIONI (da valle a monte)

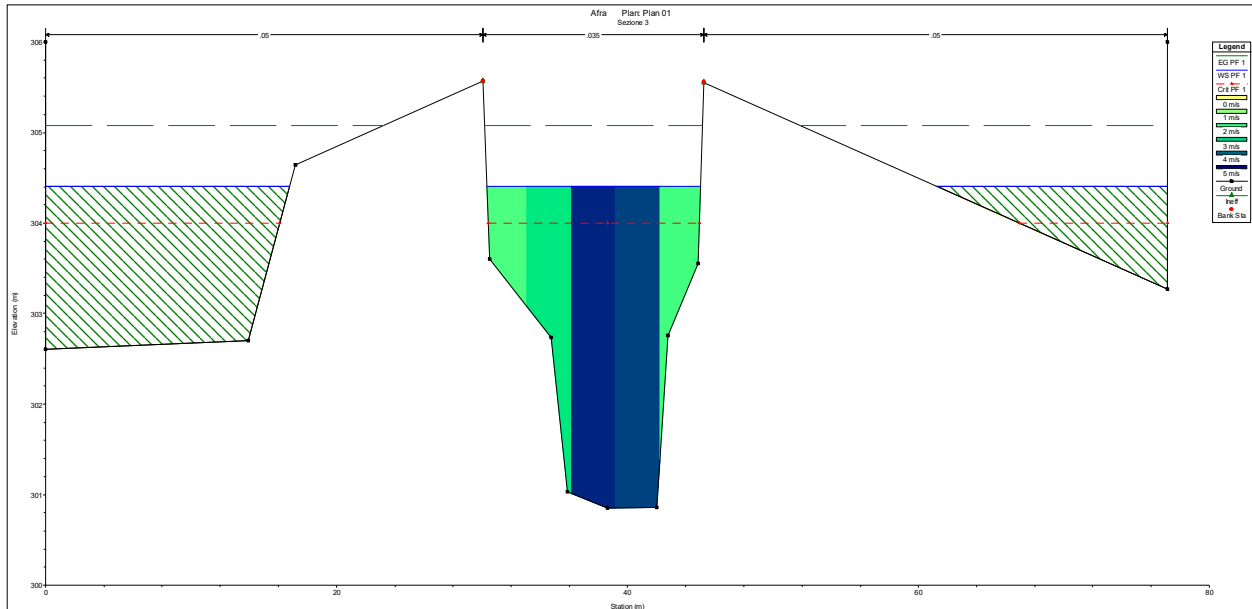


SEZIONE 1



SEZIONE 2 Attraversamento

| | | | |
|---|---|-----------------------------|--------------------|
|  | PROGETTISTA  consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori | COMMESSA NR/20047 | UNITÀ 00 |
| | LOCALITA' REGIONI TOSCANA E UMBRIA | LSC - 137/ALL. A | |
| | PROGETTO Rifacimento Metanodotto Sansepolcro – Foligno e opere connesse | Pagina 30 di 31 | Rev. 0 |



SEZIONE 3

RISULTATI DI DETTAGLIO (da valle a monte)

| Plan: Plan 01 AFRA . RS: 1 Profile: PF 1 | | | | | |
|--|----------|----------------------|---------|---------|----------|
| E.G. Elev (m) | 301.71 | Element | Left OB | Channel | Right OB |
| Vel Head (m) | 0.54 | Wt. n-Val. | | 0.035 | |
| W.S. Elev (m) | 301.17 | Reach Len. (m) | | | |
| Crit W.S. (m) | 300.70 | Flow Area (m2) | | 38.39 | |
| E.G. Slope (m/m) | 0.006002 | Area (m2) | 57.02 | 38.39 | 69.68 |
| Q Total (m3/s) | 125.00 | Flow (m3/s) | | 125.00 | |
| Top Width (m) | 97.90 | Top Width (m) | 35.85 | 18.95 | 43.10 |
| Vel Total (m/s) | 3.26 | Avg. Vel. (m/s) | | 3.26 | |
| Max Chl Dpth (m) | 3.44 | Hydr. Depth (m) | | 2.03 | |
| Conv. Total (m3/s) | 1613.4 | Conv. (m3/s) | | 1613.4 | |
| Length Wtd. (m) | | Wetted Per. (m) | | 21.53 | |
| Min Ch El (m) | 297.73 | Shear (N/m2) | | 104.99 | |
| Alpha | 1.00 | Stream Power (N/m s) | | 341.81 | |
| Frctn Loss (m) | | Cum Volume (1000 m3) | | | |
| C & E Loss (m) | | Cum SA (1000 m2) | | | |

SEZIONE 1

| | | | |
|---|---|------------------------------------|---------------------------|
|  | PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small> | COMMESSA NR/20047 | UNITÀ 00 |
| | LOCALITA' REGIONI TOSCANA E UMBRIA | LSC - 137/ALL. A | |
| | PROGETTO Rifacimento Metanodotto Sansepolcro – Foligno e opere connesse | Pagina 31 di 31 | Rev. 0 |

| Plan: Plan 01 AFRA . RS: 2 Profile: PF 1 | | | | | |
|--|----------|----------------------|---------|---------|----------|
| E.G. Elev (m) | 303.20 | Element | Left OB | Channel | Right OB |
| Vel Head (m) | 0.56 | Wt. n-Val. | | 0.035 | |
| W.S. Elev (m) | 302.64 | Reach Len. (m) | 236.83 | 236.83 | 236.83 |
| Crit W.S. (m) | | Flow Area (m2) | | 37.78 | |
| E.G. Slope (m/m) | 0.006527 | Area (m2) | 61.40 | 37.78 | 100.32 |
| Q Total (m3/s) | 125.00 | Flow (m3/s) | | 125.00 | |
| Top Width (m) | 108.68 | Top Width (m) | 38.21 | 19.80 | 50.68 |
| Vel Total (m/s) | 3.31 | Avg. Vel. (m/s) | | 3.31 | |
| Max Chl Dpth (m) | 3.50 | Hydr. Depth (m) | | 1.91 | |
| Conv. Total (m3/s) | 1547.2 | Conv. (m3/s) | | 1547.2 | |
| Length Wtd. (m) | 236.83 | Wetted Per. (m) | | 22.01 | |
| Min Ch El (m) | 299.14 | Shear (N/m2) | | 109.85 | |
| Alpha | 1.00 | Stream Power (N/m s) | | 363.48 | |
| Frctn Loss (m) | 1.48 | Cum Volume (1000 m3) | 14.02 | 9.02 | 20.13 |
| C & E Loss (m) | 0.01 | Cum SA (1000 m2) | 8.77 | 4.59 | 11.10 |

SEZIONE 2 Attraversamento

| Plan: Plan 01 AFRA . RS: 3 Profile: PF 1 | | | | | |
|--|----------|----------------------|---------|---------|----------|
| E.G. Elev (m) | 305.08 | Element | Left OB | Channel | Right OB |
| Vel Head (m) | 0.68 | Wt. n-Val. | | 0.035 | |
| W.S. Elev (m) | 304.40 | Reach Len. (m) | 271.12 | 271.12 | 271.12 |
| Crit W.S. (m) | 304.00 | Flow Area (m2) | | 34.33 | |
| E.G. Slope (m/m) | 0.007091 | Area (m2) | 26.77 | 34.33 | 8.97 |
| Q Total (m3/s) | 125.00 | Flow (m3/s) | | 125.00 | |
| Top Width (m) | 47.29 | Top Width (m) | 16.77 | 14.69 | 15.83 |
| Vel Total (m/s) | 3.64 | Avg. Vel. (m/s) | | 3.64 | |
| Max Chl Dpth (m) | 3.55 | Hydr. Depth (m) | | 2.34 | |
| Conv. Total (m3/s) | 1484.5 | Conv. (m3/s) | | 1484.5 | |
| Length Wtd. (m) | 271.12 | Wetted Per. (m) | | 18.44 | |
| Min Ch El (m) | 300.85 | Shear (N/m2) | | 129.45 | |
| Alpha | 1.00 | Stream Power (N/m s) | | 471.33 | |
| Frctn Loss (m) | 1.84 | Cum Volume (1000 m3) | 25.97 | 18.80 | 34.95 |
| C & E Loss (m) | 0.04 | Cum SA (1000 m2) | 16.22 | 9.26 | 20.12 |

SEZIONE 3