

**ADEGUAMENTO DELLE CONDIZIONI DI NAVIGABILITA' DELL'ALVEO DI  
MAGRA DEL FIUME PO PER NAVI DI CLASSE V<sup>^</sup> - REVERE – FERRARA.**

**PROGETTO PRELIMINARE**  
**€ 15.000.000,00**

**B) RELAZIONE IDRAULICA**

**PROGETTISTI**

Ing Ettore Alberani

Ing. Bruno Droghetti

**COLLABORATORI**

Geom. Antonio Antiga

Geom. Luigi Marco Bigoni

Geom. Vittorino Malagò

**Perizia n.**

**Visto: IL RESPONSABILE DEL PROCEDIMENTO**  
**IL DIRIGENTE**  
(Ing. Ivano Galvani)

**Prot. n.**

**Data**

## **PREMESSA**

Come noto sono già state effettuate in passato opere di regolazione dell'alveo di magra, nel tratto di Po va da foce Adda a foce Mincio, che hanno dato risultati di tipo confortante se esaminati nel loro complesso, e che si prestano ad uno studio ed a un'analisi critica indispensabile per chiunque si accinga ad affrontare problemi di tipo analogo.

A maggior ragione lo studio dei risultati conseguiti con la sistemazione di tale tronco (un vero e proprio modello a scala naturale dove sono perfettamente identificabili le geometrie da prendere a modello e, purtroppo, gli errori da evitare nonché le conseguenze che ne derivano) pare ancor più indispensabile per proseguire l'opera già intrapresa dai tecnici dell'allora Genio Civile sullo stesso fiume nonché quella, più recente ancorché di minor rilievo quantitativo, dai loro successori.

Le opere ad oggi eseguite sono nella quasi stragrande totalità dei casi opere radenti.

Queste descrivono generalmente l'intero tracciato delle sponde ed arrivano spesso ad affacciarsi, per tratti anche lunghi, sulle opposte rive nei tronchi di flesso.

Le curve adottate sono paraboliche mentre il riferimento altimetrico per la definizione della quota delle opere è la magra ordinaria; rispetto a questa si è stabilito di impostare il loro coronamento circa due metri sopra la stessa quota.

Oggi, in virtù dell'abbassamento dell'alveo di magra ordinaria del fiume, il coronamento delle opere risulta molto superiore rispetto al profilo di magra attuale.

Poiché tale divergenza di quote non è ritenuta unanimemente neutra rispetto al processo di abbassamento dell'alveo, si precisa sin d'ora che le quote di coronamento per le opere in progetto verranno fissate a livelli più bassi di quelli oggi esistenti.

Si è deciso di non riproporre integralmente nel tronco fluviale inferiore geometrie e tecniche costruttive usate nel tronco superiore per tener conto sia delle differenze idrauliche e morfologiche fra i due tronchi sia per tenere conto della evoluzione delle conoscenze e delle condizioni maturate nel frattempo.

Pertanto, nello studio planimetrico del corso idrico regolato, si è cercato di mantenere al fiume le sue caratteristiche naturali evitando forzature di cui si è potuto appurare l'effetto controproducente; ad esempio sono state scartate soluzioni in cui si riproponeva l'uso di tratti rettilinei in raccordo fra curve successive avendo verificato che in tali tratti si verificano soglie inclinate con conseguenti deviazioni imprevedibili della corrente rispetto all'asse del canale designato e con formazione di bassi fondali.

A tal fine si è cercato di assecondare, nel designare il futuro alveo di magra, le curve che già esso abbozza nelle condizioni idrometriche di interesse per la navigazione mantenendo così inalterata la lunghezza naturale del tracciato.

La regolarizzazione del tracciato medesimo è stata effettuata approssimando le curve individuate con il metodo di cui sopra con una consecuzione di clotoidi osculanti nei punti di flesso e di vertice ed aventi parametri di espansione diversi.

La simbologia adottata è la seguente:

$F_g$  = forza di gravità;

$m$  = massa;

$g$  = accelerazione di gravità;

$h_c$  = sopraelevazione del pelo liquido dovuto alla forza centrifuga;

$k$  = costante;

$i$  = pendenza del pelo liquido;

$L$  = distanza della sezione considerata dall'origine della curva;

$B$  = larghezza del tratto fluviale;

$R$  = raggio di curvatura del fiume nel tratto considerato;

$u$  = velocità della corrente;

$F_c$  = forza centrifuga.

La forza centrifuga  $F_c = \frac{mu^2}{R}$ , componendosi con la forza di gravità  $F_g = mg$ , produce una sopraelevazione trasversale  $h_c$  del livello dell'acqua sulla sponda esterna rispetto a quello della sponda interna; la pendenza trasversale media è  $i_t = \frac{F_c}{F_g} = \frac{u^2}{Rg} = \frac{h_c}{B}$  da cui  $h_c = \frac{Bu^2}{Rg}$ .

Questa sopraelevazione sulla sponda concava riduce il valore della pendenza longitudinale lungo la stessa sponda nel tratto di monte, dove  $h_c$  si produce, e lo aumenta nel tratto di valle, dove  $h_c$  deve andare riducendosi fino ad annullarsi nel flesso.

Assunto che il variare della pendenza e della velocità longitudinale si debba distribuire con continuità lungo l'intero sviluppo dei due rami della curva, quello di monte e quello di valle, si potrà, per ognuno dei due rami della curva, scrivere per ogni sezione:

$$h_c = k H I = k i L$$

si ricava  $B u^2 / g R = k i L$  e di conseguenza  $R = u^2 B / g k i L$  dove, ponendo

$$u^2 B / g k i = a^2 \quad \text{si ottiene} \quad R L = a^2$$

La curva nella quale la curvatura  $1/R$  è proporzionale allo sviluppo dell'arco è una clotoide, dimostrando così la bontà della scelta iniziale.

Una attenta osservazione dei livelli a cui passano le diverse portate del Po e dei fondali che ad esse sono associati dai rilievi quotidiani dei meatori, hanno portato alla decisione di adottare, per il coronamento delle opere di sistemazione dell'alveo, quote equivalenti a 850 mc./sec con l'obiettivo di ottenere fondali di circa m. 2,80 anche a portate di 550 mc/sec; la differenza di quota fra le due portate è di 60 cm circa nelle sezioni considerate.

Con questo tipo di impostazione non si dovrebbero avere effetti negativi sul processo di abbassamento del letto del fiume, così come testimoniato dal Documento di lavoro n° 4 in data 27/10/2000 dell'Autorità di Bacino del Fiume Po con titolo "Adeguamento del Sistema Idroviario-Padano Veneto: Approfondimenti di studio sull'assetto geomorfologico ed idraulico del Po e sulle interazioni con le opere esistenti ed in progetto".

Lo studio sopraccitato infatti, in una analisi del tratto Foce Panaro - Occhiobello, ipotizza la realizzazione di opere radenti con quota di coronamento più alta di 0,7 m. rispetto alla scelta effettuata in questo progetto ottenendone il seguente risultato

"...complessivamente c'è meno attività di trasporto solido nella situazione con il progetto di navigazione..." (par. 2.6.5.1. Evoluzione morfologica del fondo).

Nello stesso studio si afferma inoltre che, indipendentemente dalla esecuzione o meno di opere di navigazione, si ha una stabilità globale del fondo alveo in tutto il tratto da Cremona a Volta Grimana registrata nell'intervallo fra gli anni 1984 ed il 1999; se detta stabilità può, tuttavia, essere messa in discussione per il futuro nel caso di forte incremento delle escavazioni a monte di Ferrara

altrettanto non sembra potersi dire a valle della stessa città in quanto proprio in quel tratto il fondo alveo ha già raggiunto quote medie prossime o inferiori allo zero sul medio mare.

Allo stesso modo lo studio sopraccitato ha dimostrato che le stesse opere di navigazione non hanno alcun influsso sulle portate di piena ed anzi, al paragrafo successivo, si afferma che “*Dall’analisi della figura 40 (omessa) si può notare che l’alveo sistemato è idraulicamente più efficiente per le portate basse e per le portate di piena mentre nei regimi idrologici intermedi i livelli ottenuti nella situazione attuale sono più bassi di quelli di progetto*”.

Per quanto sopra detto si può pensare che sia le quote di coronamento sia le quote di imposta delle opere in progetto possano ritenersi valide per lungo tempo.

Risultati positivi sono pervenuti, pure, da uno studio appositamente redatto dall’Università degli studi di Ferrara ove si confermano sia l’efficacia che la neutralità nei confronti delle piene delle opere di navigazione designate dal progetto di cui la presente relazione è parte integrante.

Poiché uno dei risultati da ricercare nella presente fase progettuale è la quota di coronamento delle opere di regolazione si sono utilizzate le scale di deflusso fornite dall’ufficio idrografico di ARPA relative a giorni in cui si è verificata la portata di progetto per le sezioni più prossime al luogo dei lavori e, quando quest’ultimo si trovava in località intermedia fra due idrometri ufficiali, si è determinata la pendenza del tronco e si è interpolata la quota.

Si ritiene, infatti, che tale procedimento sintetizzi nella migliore delle maniere i vari eventi che, lungo il corso del fiume e con costanza nello stesso periodo, ne determinano la quota (deflusso delle acque meteoriche, il prelievo per usi irrigui ed alimentari, l’evapotraspirazione, ecc...).

Si precisa che sono state necessarie alcune correzioni in quanto i dati ufficiali riportano imprecisioni di non poco conto.

Il tracciato che si intende proporre ha larghezza pari a poco più di 200 metri e configurazione planimetrica, come già detto in premessa, designata da una serie di clotoidi le cui caratteristiche vengono sintetizzate nella tabella seguente:

TRATTO CASTELMASSA FICAROLO					
CURVA  (Il pedice M significa "monte"  e quello V significa "Valle")	RAGGIO MINIMO	PARAMETRO DI ESPANSIONE	LUNGHEZZA DELLA CLOTOIDE	RAGGIO DELLE OPERE DI REGOLAZIONE	ANGOLO AL VERTICE
1 C <sub>V</sub>	M. 1700	MQ. 3186225	M. 1874,250	M. 1900	1,026094
2 C <sub>M</sub>	M. 1200	MQ. 1872792	M. 1560,660	M. 1580	1,036251
2 C <sub>V</sub>	M. 1200	MQ.1254399	M. 1045,333	M. 1580	1,036251
3 C <sub>M</sub>	M. 2900	MQ. 5895183	M. 2032,22	M. 4400	0,742545
3 C <sub>V</sub>	M. 2900	MQ. 5522499	M. 1904,310	M. 4400	0,742545
4 C <sub>M</sub>	M. 800	MQ. 595984	M. 744,980	M. 900	0,9790123
4 C <sub>V</sub>	M. 800	MQ. 688890	M. 861,125	M. 900	0,9790123
5 C <sub>M</sub>	M. 900	MQ. 2073600	M. 2182,00	M. 1150	1,687012
TRATTO PALANTONE - OCCHIOBELLO					
CURVA  (Il pedice M significa "monte"  e quello V significa "Valle")	RAGGIO MINIMO	PARAMETRO DI ESPANSIONE	LUNGHEZZA DELLA CLOTOIDE	RAGGIO DELLE OPERE DI REGOLAZIONE	ANGOLO AL VERTICE
1 P <sub>V</sub>	M. 1700	MQ. 1612900,	M. 1377,585	M. 1950	0,8100
2 P <sub>M</sub>	M. 1320	MQ. 1612900	M. 1221,894	M. 1950	0,8500386
2 P <sub>V</sub>	M. 1000	MQ. 774400	M. 744,400	M. 1800	0,8500386
3 P <sub>M</sub>	M. 800	MQ. 722500	M. 903,125	M. 1250	1,301698
3 P <sub>V</sub>	M. 1680	MQ. 4161600	M. 2477,143	M. 1900	1,301698
4 P <sub>M</sub>	M. 1000	MQ. 2540836	M. 1625,625	M. 1250	1,625625

La profondità di progetto dell'alveo deriva dalla forza centrifuga data alla corrente tramite la curvatura imposta al tracciato.

Tale profondità deve essere non inferiore a m 2,80 per un periodo che sia economicamente utile agli operatori fluviali da poter permettere la navigabilità del fiume regolato a navi della V classe

Europea di navigazione a pieno carico; il presente progetto è impostato per garantire la navigabilità nell'arco dell'intero anno, eccezion fatta per le annate in cui si verificano magre eccezionali.

La validità dei ragionamenti sopra effettuati la possiamo riscontrare nel tratto di Po che intercorre fra Cremona e Foce Mincio ove possiamo riscontrare curve ben eseguite la cui consecuzione permette una navigabilità di efficienza paragonabile a quella oggi in programma benché il naviglio in riferimento avesse, negli anni in cui sono stati eseguite, portata di 600 tonnellate.

Come già indicato in premessa si è cercato di dare un tracciato all'alveo di magra del fiume che fosse determinato da un susseguirsi di curve e controcurve; ciò è stato fatto per dare alla corrente la forza centrifuga di cui essa necessita in ogni suo punto per rimanere concentrata entro un alveo di larghezza limitata e, di conseguenza, sufficientemente profondo per permettere il passaggio di navi di V° classe europea di navigazione.

La relazione che lega le curvature dell'alveo del fiume alla profondità media che esso assume è stata definita dal Fargue, ingegnere dei Ponts et Chaussées, negli anni intorno al 1863 durante i propri studi per migliorare il deflusso della Garonna nei pressi di Bordeaux; essa è la seguente ( così come riportata da G. Supino ) :

$$Y_m = 1,50 \times ( 1 + \sqrt{C_m^2 + 1,21 C_m} )$$

ove  $Y_m$  è la profondità media del tratto considerato cioè di quella parte di fiume compresa tra due soglie ( bassi fondali, la cui posizione corrisponde circa alle inversioni di curvatura del fiume ) successive e  $C_m$  corrisponde all'angolo esterno che sta fra le tangenti estreme alla curva.

Il Fargue elaborò pure altre leggi relative al comportamento dei fiumi nei tratti di pianura, che tuttavia vengono qui omesse per brevità e per l'interesse limitato che esse hanno ai fini della presente relazione; ciò che, invece, è di interesse sta nel fatto che la relazione sopradescritta ha trovato positivo riscontro nell'ambito delle sistemazioni fluviali europee ovvero in una casistica idraulica sufficientemente varia da far supporre che essa possa ritenersi valida pure nel progetto in argomento.

Le risultanze della verifica di progetto mediante le formule di Fargue sono esposte nella seguente tabella:

<i>CURVA</i>	<i>ANGOLO DI MONTE</i>	<i>ANGOLO DI VALLE</i>	<i>ANGOLO TOTALE FRA LE TANGENTI ESTERNE ALLA CURVA</i>	<i>PROFONDITA' MEDIA SECONDO FARGUE</i>
<b>TRATTO CASTELMASSA - FICAROLO</b>				
1 C	0,513047	0,513047	1,026094	3,772112658
2 C	0,622194	0,414057	1,036251	3,788510356
3 C	0,3508466	0,328394	0,6792406	3,199208659
4 C	0,4656125	0,5382031	1,0038156	3,73608831
5 C	1,1488089	1,1177827	2,2665916	5,710704212
<b>TRATTO PALANTONE - OCCHIOBELLO</b>				
1P	0,405	0,405	0,81	3,418710504
2P	0,4628386	0,3872	0,8500386	3,484944014
3P	0,5644531	0,7372449	1,301698	4,21225231
4P	0,8128125	0,8128125	1,625625	4,720518825

I tipi costruttivi previsti, già largamente sperimentati nella sistemazione dell'alveo a monte di foce Mincio ed in altre opere lungo il medio Po, sono i seguenti:

- a) **Pennelli longitudinali;**
- b) **Pennelli trasversali;**
- c) **Difese di sponda;**

Le tecnologie costruttive, per quanto riguarda la tipologia a) e b), sono principalmente quelle relative alle opere in pietrame sciolto su base sacconi di sabbia; la posa in opera avverrà quasi esclusivamente con gru su pontone galleggiante.

Per quanto riguarda la tipologia c) verrà utilizzato esclusivamente pietrame posato su filtro in geotessuto.

La sequenza di esecuzione degli interventi ha pari importanza rispetto a quella della loro progettazione.

Poiché è ovvio che non tutti gli interventi progettati possono essere realizzati contemporaneamente bisognerà eseguire prioritariamente quelli la cui esecuzione apporterà immediato e tangibile beneficio alla navigazione e che permetterà di mantenere fasi transitorie, nell'attesa della esecuzione degli interventi successivi, che non discostino il canale che si crea temporaneamente dal canale progettato.

Le fasi transitorie verranno governate mediante draghe il cui onere è già stato previsto in progetto.