

MORFODINAMICA FLUVIALE

Prof. Enrico Foti

Fonti:

- Appunti del corso di Idraulica Fluviale del Prof. Giovanni Seminara (Università di Genova)
- "1D sediment transport morphodynamics with application to River and Turbidity Currents" del Prof. Gary Parker (NCED, USA)
- Engineering Manual on Channel Stabilization (USACE)

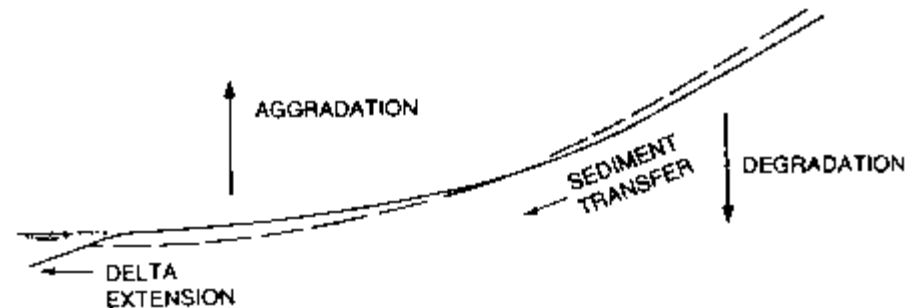
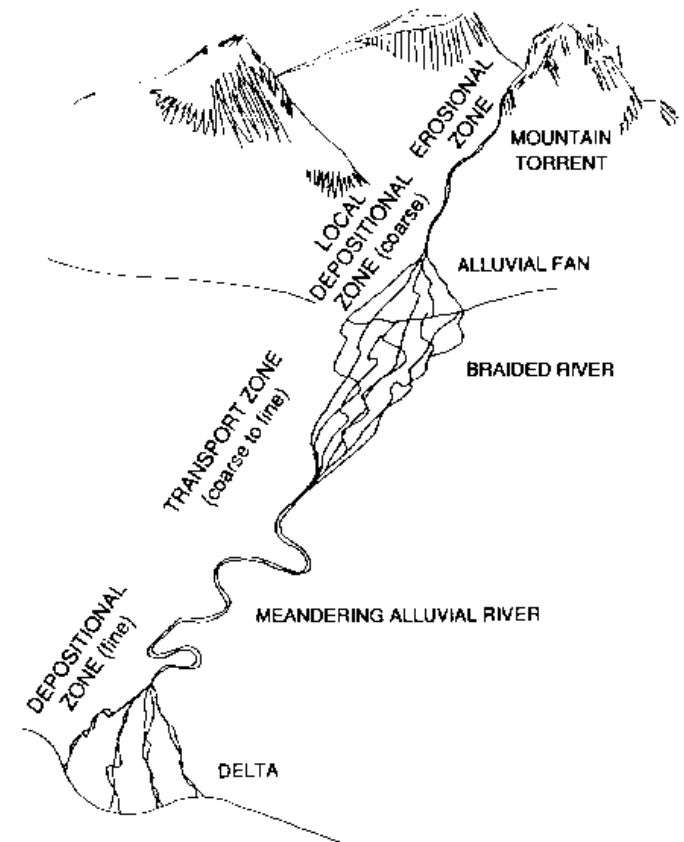
Introduzione

Contesto geomorfologico

In generale, un bacino può essere suddiviso in:

- una zona di monte erosionale di produzione di sedimenti;
- una zona centrale con fenomeni di erosione e deposizione;
- una zona a valle di deposito

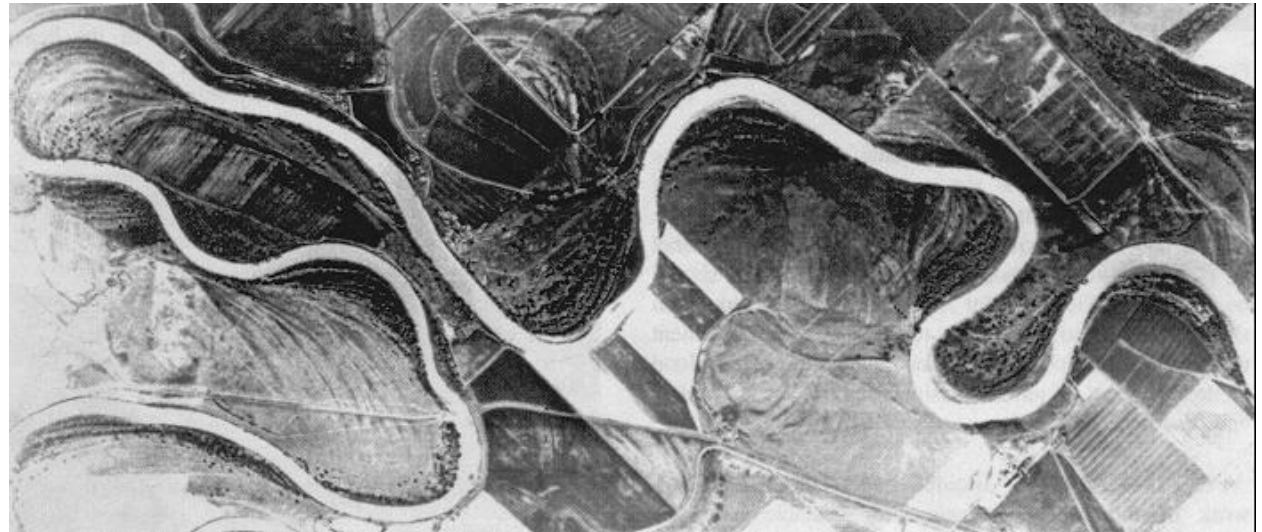
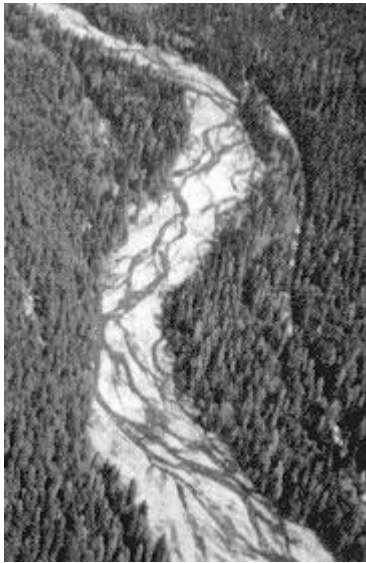
La pendenza del profilo longitudinale tende a diminuire nel tempo, attraverso erosione nelle zone di monte (*degradation*) e deposito nelle zone di valle (*aggradation*).



Introduzione

Tipologie di canali

- Torrenti montani
- Depositi alluvionali
- Alvei intrecciati
- Alvei meandriformi



Introduzione

Tipologie di canali

- Corsi d'acqua modificati (rettificazioni, allargamenti, alvei incisi)
- Corsi d'acqua regimentati (serbatoi di regolazioni)
- Delta
- Altri



Introduzione

Tipologie di canali

Table 2-1
Some Stream Channel Types and Their Characteristic Stability Problems

Channel Type	Typical Features	Stability Problems
Mountain torrents	Steep slopes Boulders Drops and chutes	Bed scour and degradation Potential for debris flows
Alluvial fans	Multiple channels Coarse deposits	Sudden channel shifts Deposition Degradation
Braided rivers	Interlacing channels Coarse sediments(usually) High bed load	Frequent shifts of main channel Scour and deposition
Arroyos	Infrequent flows Wide flat channels Flash floods High sediment loads	Potential for rapid changes in planform, profile, and cross section.
Meandering rivers	Alternating bends Flat slopes Wide floodplains	Bank erosion Meander migration Scour and deposition
Modified streams	Previously channelized Altered base levels	Meander development Degradation and aggradation Bank erosion
Regulated rivers	Upstream reservoirs Irrigation diversions	Reduced activity Degradation below dams Lowered base level for tributaries Aggradation at tributary mouths
Deltas	Multiple channels Fine deposits	Channel shifts Deposition and extension
Underfit streams	Sinuuous planform Low slope	Meander migration
Cohesive channels	Irregular or unusual planform	Variable

Introduzione

Geometria e processi dei canali

La geometria dei canali ha quattro principali componenti:

- l'andamento planimetrico,
- la sezione trasversale,
- la pendenza,
- la morfologia del fondo e la scabrezza

Introduzione

Andamento planimetrico

CHANNEL APPEARANCE	CHANNEL TYPE	TYPICAL ENVIRONMENT	TYPICAL BED AND BANK MATERIALS
	(a) Regular serpentine meanders (b) Regular sinuous meanders	Lacustrine plain	Uniform cohesive materials
	Tortuous or contorted meanders, no cutoffs	Misfit stream in glacial spillway channel	Uniform cohesive materials
	Downstream progression	Sand-filled meltwater channel	Slightly cohesive top stratum over sands
	Unconfined meanders with oxbows, scrolls	Sandy to silty deltas and alluvial floodplains	Slightly cohesive top stratum over sands
	Confined meandering	Cohesive top strata over sand substratum in steep-walled trench	Slightly cohesive top stratum over sands
	Entrenched meanders	Hard till or uniform rock	Till, boulders, soft rock
	Meanders within meanders	Underfit streams in large glacial stream spillways	Cohesive materials
	Irregularly sinuous meanders	Thin till over bedrock in plains	Hard and softer materials
	Wandering	Foothills and mountain valleys	Cobble-veneered sand
	Anastomosing	Foothills, plains. Sand bed or gravel paved rivers	Sand and gravel
	Classical braided	Glacial outwash. Foothills	Sand and gravel
	Dichotomic	Alluvial cones and fans	Gravel, sand, silt
	Irregular channel splitting	Large rivers in bedrock	Alternate sand, gravel and rock
	Rectangular channel pattern	Jointed rocks, mostly flat-lying sedimentary rocks	Rock
	Lakes and rapids (R)	Till-veneered Shield terrain	Till, cobbles, boulders, hard rock

Introduzione

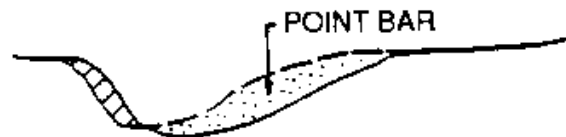
Sezione trasversale



(a) Cross-section enlargement by bed scour and bank erosion



(b) Cross-section shrinkage (straight channel) mainly by suspended sediment deposition

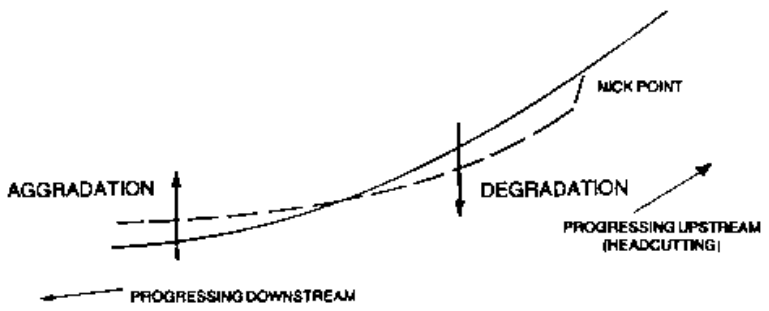
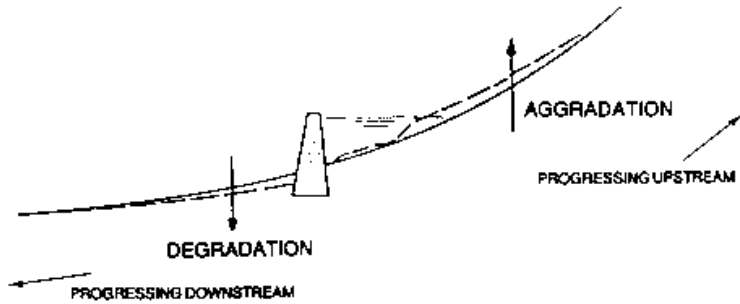
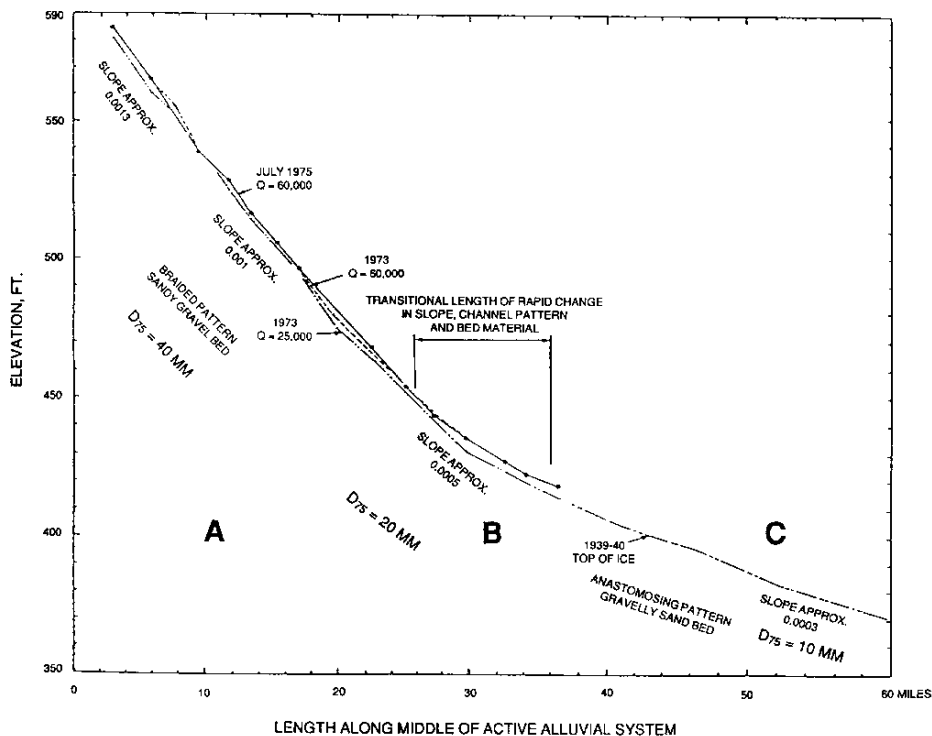
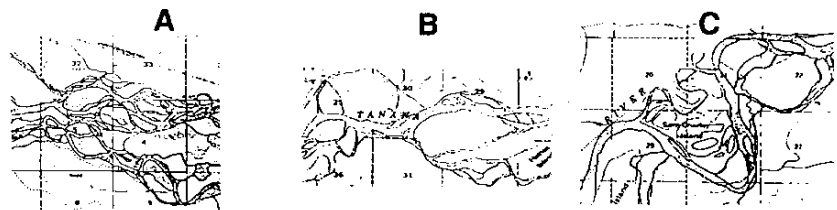


(c) Cross-section shrinkage (meandering channel) by inner bank (point bar) deposition outstripping outer bank erosion

Introduzione

Profilo longitudinale

CHANNEL PATTERNS

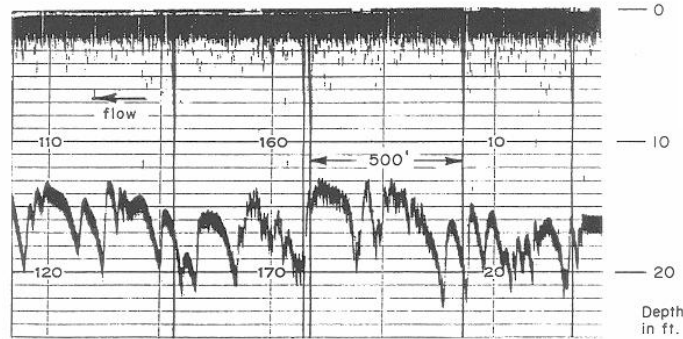


Introduzione

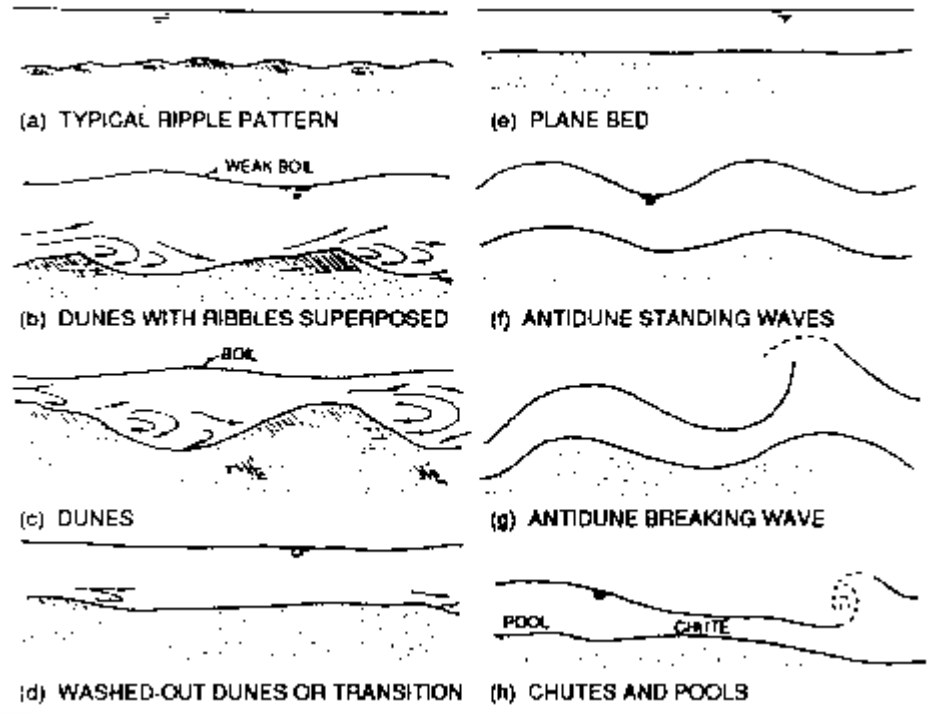
Morfologia del fondo e scabrezza



Plan



Longitudinal profile in main channel



Risposta di forme di fondo sabbiose a un aumento di portata (Simons e Richardson, 1961)

Forme di fondo sabbiose (Missouri River)

Formulazione del problema dell'evoluzione altimetrica del fondo

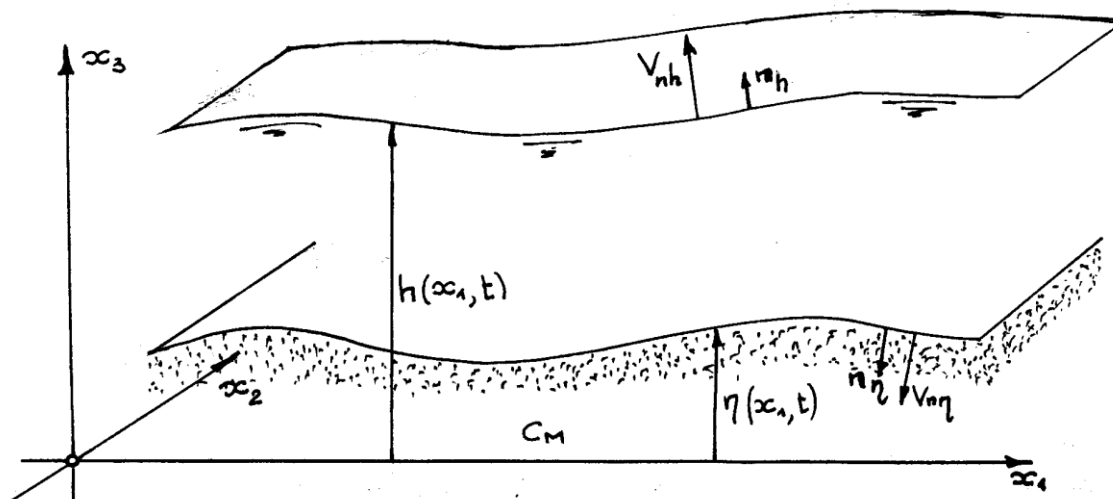
Caso 2D: Fondo trasversalmente piano

Siano x_1 , x_2 e x_3 coordinate cartesiane di un sistema di riferimento fisso con x_1 e x_2 assi orizzontali e x_3 verticale diretto verso l'alto.

Assumiamo che la miscela fluido-sedimenti defluisca nella regione V :

$$-\infty < x_1, x_2 < \infty \quad \text{e} \quad \eta(x_1, t) < x_3 < h(x_1, t)$$

con η e h quote dell'interfaccia miscuglio-ammasso e della superficie libera rispettivamente. La regione V definisce un moto piano delimitato superiormente dalla superficie libera e inferiormente dal fondo.



Formulazione del problema dell'evoluzione altimetrica del fondo

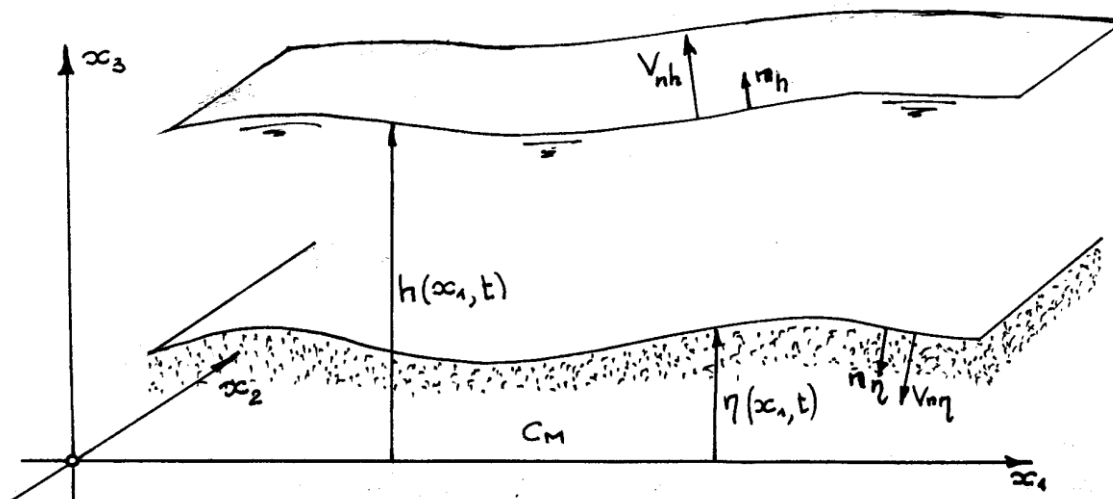
Caso 2D: Fondo trasversalmente piano

Siano x_1 , x_2 e x_3 coordinate cartesiane di un sistema di riferimento fisso con x_1 e x_2 assi orizzontali e x_3 verticale diretto verso l'alto.

Assumiamo che la miscela fluido-sedimenti defluisca nella regione V :

$$-\infty < x_1, x_2 < \infty \quad \text{e} \quad \eta(x_1, t) < x_3 < h(x_1, t)$$

con η e h quote dell'interfaccia miscuglio-ammasso e della superficie libera rispettivamente. La regione V definisce un moto piano delimitato superiormente dalla superficie libera e inferiormente dal fondo.



Formulazione del problema dell'evoluzione altimetrica del fondo

Caso 2D: Fondo trasversalmente piano

Sia $c(x_1, x_3, t)$ la concentrazione volumetrica dei sedimenti trasportati dal miscuglio: se il trasporto avviene *in sospensione* c è una funzione che assume valori non nulli sull'intera profondità della corrente. Se il trasporto è *di fondo* c assume valori non nulli solo nelle immediate vicinanze dell'interfaccia.

Sia inoltre c_M la concentrazione di massimo impaccamento caratteristica dell'ammasso, pari a $(1-p)$ con p porosità dell'ammasso.

Detto $\mathbf{q}_s(x_1, x_3, t)$ il flusso volumetrico di sedimenti, l'equazione di bilancio dei sedimenti può porsi nella forma

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{q}_s = 0$$

Formulazione del problema dell'evoluzione altimetrica del fondo

Caso 2D: Fondo trasversalmente piano

All'equazione

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{q}_s = 0$$

Vanno associate condizioni al contorno che impongono:

- i) Assenza di flusso relativo di sedimenti ortogonale alla superficie libera;
- ii) Flusso relativo di sedimenti normale all'interfaccia pari al prodotto tra velocità normale dell'interfaccia e differenza tra concentrazione del miscuglio e concentrazione dell'ammasso in corrispondenza dell'interfaccia

$$\mathbf{q}_s \cdot \mathbf{n} \Big|_{x_3=h} = V_{nh} c \Big|_{x_3=h}$$

$$\mathbf{q}_s \cdot \mathbf{n} \Big|_{x_3=\eta} = V_{n\eta} (c - c_M) \Big|_{x_3=\eta}$$

essendo $V_{n\eta}$ e V_{nh} le componenti normali delle velocità dell'interfaccia e della superficie libera rispettivamente.

Formulazione del problema dell'evoluzione altimetrica del fondo

Caso 2D: Fondo trasversalmente piano

Dal problema precedente è possibile ricavare l'equazione dell'evoluzione dell'interfaccia, mediando rispetto alla turbolenza, integrando sulla profondità, esplicitando le condizioni al contorno sulla superficie libera e sull'interfaccia.

Si ottiene

$$\frac{\partial}{\partial t} (Y\hat{C}) + (1-p) \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial Q_{s1}}{\partial x_1} = 0$$

In cui:

- $Q_{s1} = \int_{\eta}^h \langle q_{s1} \rangle dx_3$ è il flusso volumetrico integrato sulla profondità
- \hat{C} è la concentrazione media (rispetto alla turbolenza) mediata sulla profondità $Y \int_{\eta}^h C dx_3 = Y\hat{C}$

Formulazione del problema dell'evoluzione altimetrica del fondo

Caso 2D: Fondo trasversalmente piano

Nell'equazione

$$\frac{\partial}{\partial t} (Y\hat{C}) + (1-p) \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial Q_{s1}}{\partial x_1} = 0$$

Se è dominante il trasporto di fondo il primo termine risulta trascurabile rispetto ai restanti.

Se il trasporto è in sospensione e la sospensione è diluita $\hat{C} \leq 10^{-2}$ si ha in genere $Y\Delta\hat{C} \ll (1-p)\Delta\eta$ quindi anche in questo caso il primo termine risulta trascurabile.

L'equazione di evoluzione del fondo viene in genere formulata nella seguente approssimazione

$$(1-p) \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial Q_{s1}}{\partial x_1} = 0$$

che richiede la valutazione della *portata solida unitaria* Q_{s1} .

Attenzione: devono essere estese le formule di trasporto solido valide in condizioni di equilibrio al caso di moto variabile nello spazio e nel tempo.

Formulazione del problema dell'evoluzione altimetrica del fondo

Estensione al caso 3D

Nel caso generale in cui l'assetto del fondo e della superficie libera variano anche nella direzione trasversale, si ha la presenza del termine aggiuntivo:

$$Q_{s2} = \int_{\eta}^h \langle q_{s2} \rangle dx_3$$

Per cui l'equazione dell'interfaccia diventa

$$(1-p) \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial Q_{s1}}{\partial x_1} + \frac{\partial Q_{s2}}{\partial x_2} = 0$$

Formulazione del problema dell'evoluzione altimetrica del fondo

Trasporto solido di fondo su fondo con trascurabile inclinazione

In assenza di apprezzabili effetti della pendenza (longitudinale e/o trasversale) il legame tra il vettore

$$\mathbf{Q}_s = (Q_{s21}, Q_{s2})$$

e il vettore della tensione tangenziale al fondo τ si può porre come

$$\mathbf{Q}_s = Q_s(\tau_*, R_p) \frac{\boldsymbol{\tau}}{|\boldsymbol{\tau}|}$$

con $Q_s(\tau_*, R_p)$ intensità della portata solida di fondo in condizioni di equilibrio valutata con il valore τ_* della tensione di Shields costruito con il modulo $|\boldsymbol{\tau}|$ della tensione tangenziale al fondo

$$\tau_* = \frac{|\boldsymbol{\tau}|}{(\rho - \rho_s)gd}$$

e il numero di Reynolds espresso come

$$R_p = \frac{\sqrt{(s-1)gd^3}}{\nu}$$

Formulazione del problema dell'evoluzione altimetrica del fondo

Il problema di evoluzione del fondo nel caso 1D

In analogia con la teoria delle correnti a fondo fisso dell'Idraulica classica, lo studio degli assetti di equilibrio del fondo e della corrente e della loro evoluzione temporale in risposta a variazioni della geometria dell'alveo o dell'alimentazione idrica o solida può essere effettuata nell'ambito dello schema 1D, *quando la scala delle variazioni spaziali esaminate risulta molto grande rispetto alla profondità e alla larghezza del corso d'acqua.*

Sono dunque esclusi: i processi di formazione ed evoluzione di forme di fondo di piccola scala (ripples, dune e antidune) o di grande scala (barre), queste ultime essendo caratterizzate da tipici valori della lunghezza dell'ordine di alcune larghezze del fondo.

In altre parole le indagini fondate sul modello 1D si propongono di determinare l'assetto altimetrico del *fondo medio* del corso d'acqua e la sua evoluzione su scale spazio-temporali molto grandi.

Formulazione del problema dell'evoluzione altimetrica del fondo

Il problema di evoluzione del fondo nel caso 1D

La questione riveste notevole interesse applicativo sia nei confronti dell'interpretazione del processo di evoluzione naturale dei corsi d'acqua, sia per quanto riguarda gli effetti che interventi di sistemazione o regolazione dei corsi d'acqua possono indurre sul regime di trasporto solido dei sedimenti, e quindi sull'evoluzione altimetrica del fondo.

Si pensi per esempio alle conseguenze della realizzazione di un invaso con uno sbarramento: quest'ultimo intercetta non solo la portata liquida ma anche quella solida, sicchè il suo effetto sull'alveo di valle è quello di dar luogo ad un processo di erosione distribuito su un lungo tratto del corso d'acqua e persistente per un consistente periodo di tempo successivo alla costruzione.

Simili problemi si incontrano per effetto di interventi di sistemazione (i cosiddetti *drizzagni*) che, producendo artificialmente il salto di uno o più meandri, inducono nel tempo un aumento di pendenza del corso d'acqua che si realizza attraverso un progressivo processo di erosione a monte e deposito a valle.

Formulazione del problema dell'evoluzione altimetrica del fondo

Il problema di evoluzione del fondo nel caso 1D

Analogamente una consistente riduzione di portata di un corso d'acqua conseguente alla *derivazione artificiale di una portata* a fini potabili, irrigui o energetici, non essendo accompagnata dalla derivazione di una corrispondente portata solida, induce una riduzione della capacità di trasporto e quindi conseguenti fenomeni di deposito.

Questi problemi ed altri analoghi richiedono che la progettazione strettamente idraulica sia accompagnata da valutazioni di natura morfodinamica ottenibili attraverso l'adozione di un modello unidimensionale per la corrente trattata come corrente a fondo mobile.

Formulazione del problema dell'evoluzione altimetrica del fondo

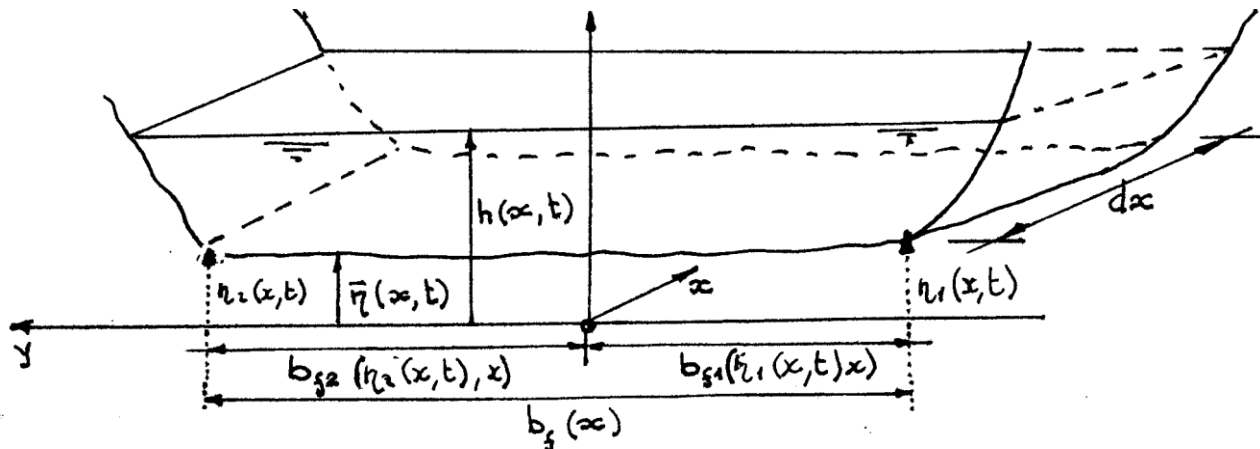
Il problema di evoluzione del fondo nel caso 1D

Formulazione

L'equazione di evoluzione del fondo in generale si scrive:

$$(1-p) \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial Q_{sx}}{\partial x} + \frac{\partial Q_{sy}}{\partial y} = 0$$

in cui x e y sono rispettivamente le coordinate cartesiane longitudinale e trasversale.



Formulazione del problema dell'evoluzione altimetrica del fondo

Il problema di evoluzione del fondo nel caso 1D

Formulazione

In termini unidimensionali si può fare riferimento alla quota media del fondo $\bar{\eta}$ e alla portata solida per unità di larghezza mediata sulla sezione \bar{Q}_{sx}

$$(1-p)b_f \frac{\partial \bar{\eta}}{\partial t} + \frac{\partial (b_f \bar{Q}_{sx})}{\partial x} = q_{sl}$$

in cui si è assunto che le sponde siano inerodibili e che b_f sia la larghezza del fondo erodibile alla generica sezione x e che sia possibile avere apporti laterali q_{sl} (positivo/negativo per apporti/sottrazioni).

Nell'ambito dello schema unidimensionale non è possibile descrivere la distribuzione trasversale della tensione che la corrente liquida esercita sul fondo (che dipende dagli effetti dei moti secondari) per determinare la portata solida unitaria media.

Formulazione del problema dell'evoluzione altimetrica del fondo

Il problema di evoluzione del fondo nel caso 1D

Formulazione

Si adotta di norma l'approssimazione

$$\bar{Q}_{sx} = Q_s(\bar{\tau}_*, R_p)$$

essendo $\bar{\tau}_*$ la tensione di Shields costruita con la tensione media al fondo. Si noti che l'approssimazione introdotta può essere piuttosto severa in prossimità di forti variazioni della profondità nella sezione (come accade nelle anse di corsi d'acqua caratterizzate da grande curvatura).

La valutazione di $\bar{\tau}_*$ accoppia il problema morfodinamico con quello idrodinamico. Infatti

$$\bar{\tau}_* = \frac{Q^2}{C^2 \Omega^2 (s-1) dg}$$

con C conduttanza media della sezione.

Formulazione del problema dell'evoluzione altimetrica del fondo

Il problema di evoluzione del fondo nel caso 1D

Formulazione

Riepilogando, il sistema completo è quindi dato dalle seguenti equazioni

$$\left\{ \begin{array}{l}
 \frac{\partial \Omega}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \\
 \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\beta Q^2}{\Omega} \right) + g \Omega \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{Q^2}{\Omega C^2 R} = 0 \\
 (1-p)b_f \frac{\partial \bar{\eta}}{\partial t} + \frac{\partial (b_f \bar{Q}_{sx})}{\partial x} = q_{sl} \\
 \bar{Q}_{sx} = Q_s(\bar{\tau}_*, R_p) \\
 \bar{\tau}_* = \frac{Q^2}{C^2 \Omega^2 (s-1) dg}
 \end{array} \right.$$

} Idrodinamica

} Evoluzione del fondo

} Trasporto solido

} Accoppiamento idro-morfodinamico

Formulazione del problema dell'evoluzione altimetrica del fondo

Modello 1D: profili di equilibrio nelle correnti fluviali

Il caso di brevi tronchi di corsi d'acqua

Se il tronco d'acqua è abbastanza breve, si può considerare che in esso sia la portata liquida, sia la granulometrica non subiscano variazioni spaziali apprezzabili.

Nell'ipotesi di stazionarietà, le equazioni che governano l'idrodinamica e l'equazione di evoluzione del fondo impongono:

$$\left\{ \begin{array}{l} Q = \text{cost} \\ \frac{d}{dx} \left(\frac{\beta Q^2}{\Omega} \right) + g\Omega \frac{dh}{dx} + \frac{Q^2}{\Omega C^2 R} = 0 \\ \frac{d(b_f \bar{Q}_s)}{dx} = 0 \end{array} \right.$$

Il sistema va risolto con due condizioni al contorno (a monte o a valle).

Formulazione del problema dell'evoluzione altimetrica del fondo

Modello 1D: profili di equilibrio nelle correnti fluviali

Il caso degli alvei cilindrici: l'assetto uniforme

Il carattere cilindrico dell'alveo implica in particolare che deve risultare costante la larghezza del fondo b_f . La continuità dei sedimenti impone che, in condizioni di equilibrio, risulti

$$Q_s = \text{cost}$$

Posta costante la pendenza del fondo, deve risultare

$$\bar{\tau}_* = \text{cost}$$

Ne segue che, per la continuità della fase liquida, l'area della sezione e quindi la profondità della corrente devono essere costanti. Dall'equazione del moto si ricava infine che la pendenza motrice deve essere costante e quindi la corrente risulta uniforme.

Formulazione del problema dell'evoluzione altimetrica del fondo

Modello 1D: profili di equilibrio nelle correnti fluviali

Il caso degli alvei cilindrici: l'assetto uniforme

Considerando delle variazioni di larghezza della sezione, possono anche essere tratte le seguenti considerazioni:

-Una riduzione della larghezza della sezione conduce a profondità di moto uniforme superiori e pendenze del fondo superiori: tale osservazione trova importante applicazione nella pratica di restringere i corsi d'acqua al fine di rendere un alveo più agevolmente navigabile;

-Un aumento di larghezza della sezione conduce a profondità di moto uniforme inferiori e pendenze superiori: ciò suggerisce che la pratica di allargare i corsi d'acqua per agevolare il deflusso delle portate di piena va esaminata con cautela, poiché i due effetti citati agiscono in senso opposto rispetto alla riduzione dei livelli della superficie libera.

Formulazione del problema dell'evoluzione altimetrica del fondo

Modello 1D: profili di equilibrio nelle correnti fluviali

Il caso degli alvei cilindrici: presenza di significative variazioni della pendenza longitudinale.

Supposto che, per effetto di situazioni localizzate, le caratteristiche idrodinamiche della corrente e l'assetto del fondo in una sezione assegnata si mantengano costanti nel tempo, ma distinte da caratteristiche uniformi. E' in questo caso ancora possibile che si realizzi una configurazione di equilibrio? Esistono profili di moto permanente non uniforme in correnti a fondo mobile a larghezza costante?

Per avere l'equilibrio dinamico della corrente in presenza di equilibrio del fondo, è necessario considerare la dipendenza della portata solida (che dovrebbe essere costante) dalla pendenza locale del fondo.

Formulazione del problema dell'evoluzione altimetrica del fondo

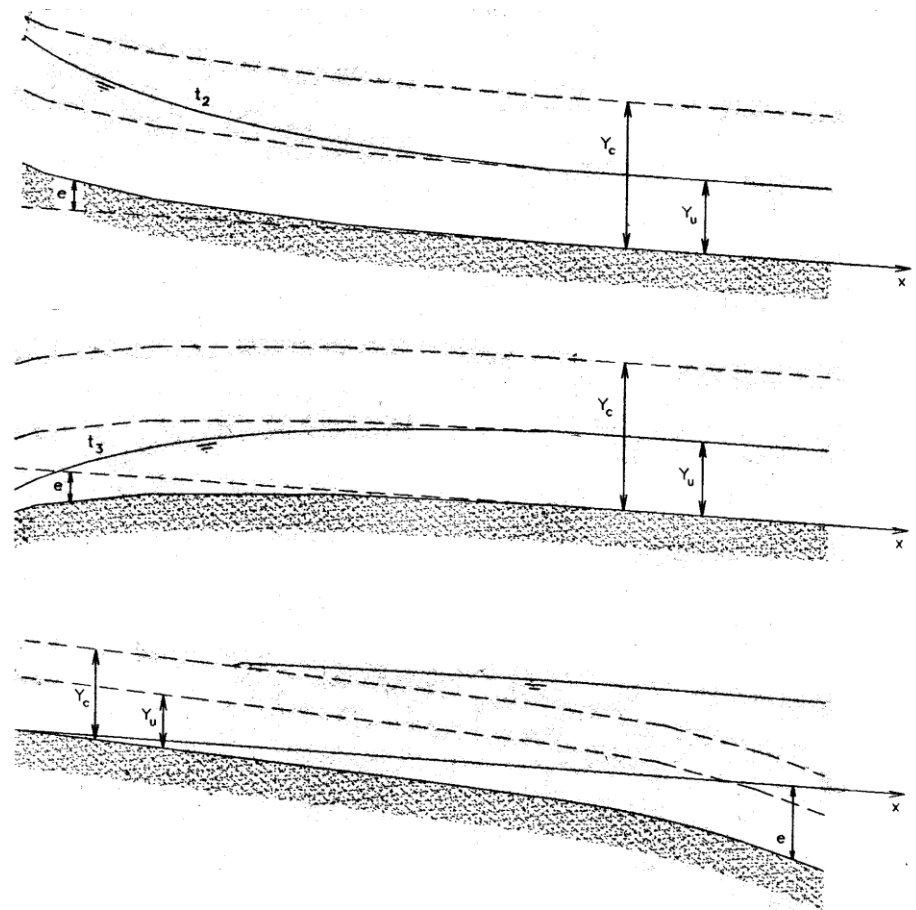
Modello 1D: profili di equilibrio nelle correnti fluviali

Il caso degli alvei cilindrici: presenza di significative variazioni della pendenza longitudinale.

Nel caso alvei a forte pendenza, l'assetto uniforme

$$\frac{d\eta}{dx} \rightarrow 0, \frac{dY}{dx} \rightarrow 0$$

si raggiunge verso valle con correnti veloci e fondo con pendenza decrescente (crescente) verso valle per profili di tipo F2 (F3). Profili di tipo F1 sono associati a pendenze crescenti verso valle.



Formulazione del problema dell'evoluzione altimetrica del fondo

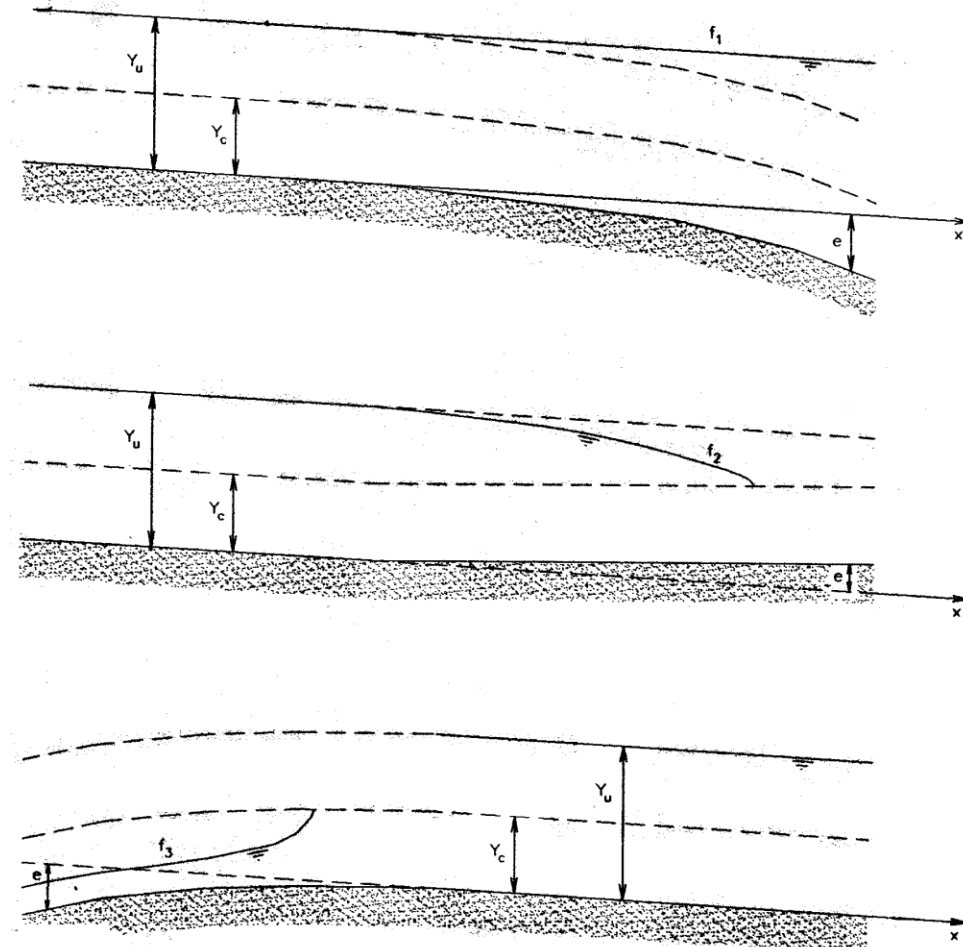
Modello 1D: profili di equilibrio nelle correnti fluviali

Il caso degli alvei cilindrici: presenza di significative variazioni della pendenza longitudinale.

Nel caso alvei a debole pendenza, l'assetto uniforme

$$\frac{d\eta}{dx} \rightarrow 0, \frac{dY}{dx} \rightarrow 0$$

si raggiunge asintoticamente verso monte con fondo a pendenza decrescente verso valle (profili tipo D2) o crescente verso valle (profili tipo D1). Profili tipo D3 sono associati a pendenze del fondo crescenti verso valle.



Formulazione del problema dell'evoluzione altimetrica del fondo

Modello 1D: profili di equilibrio nelle correnti fluviali

Alvei non cilindrici: alvei a sezione rettangolare

In questo caso la profondità all'equilibrio cresce se l'alveo si restringe e viceversa.

Si può dimostrare che:

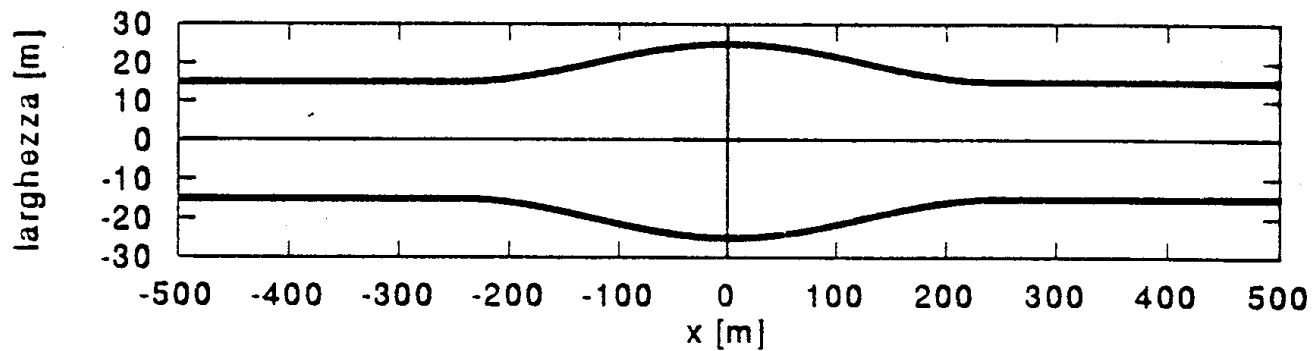
- in corrispondenza di allargamenti si ha sempre un innalzamento del fondo di equilibrio e all'equilibrio un innalzamento del profilo della superficie libera.
- in corrispondenza di restringimenti si ha sempre un abbassamento del fondo e all'equilibrio un abbassamento del profilo della superficie libera;

Formulazione del problema dell'evoluzione altimetrica del fondo

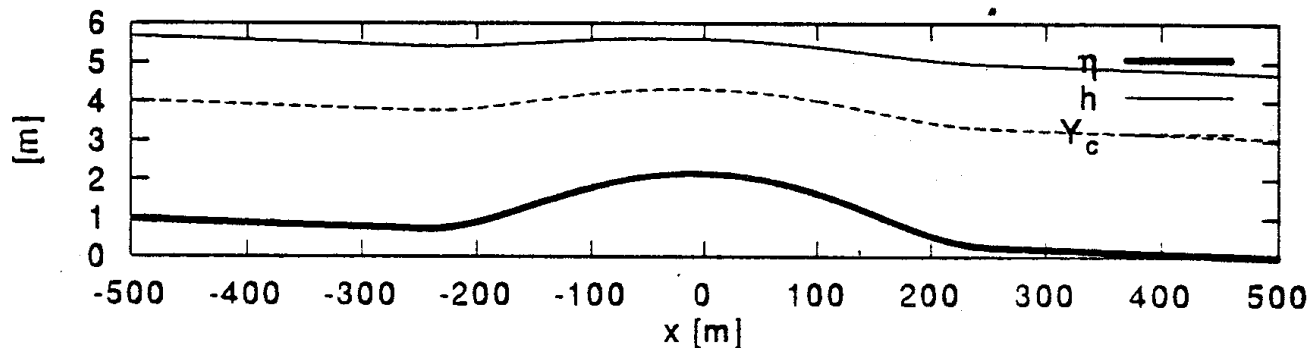
Modello 1D: profili di equilibrio nelle correnti fluviali

Alvei non cilindrici: alvei a sezione rettangolare

Allargamento di un alveo a debole pendenza



a)

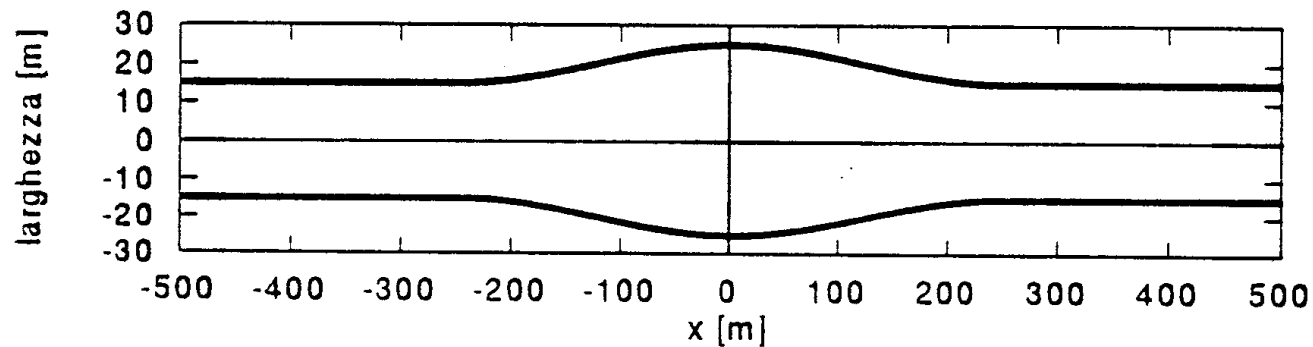


Formulazione del problema dell'evoluzione altimetrica del fondo

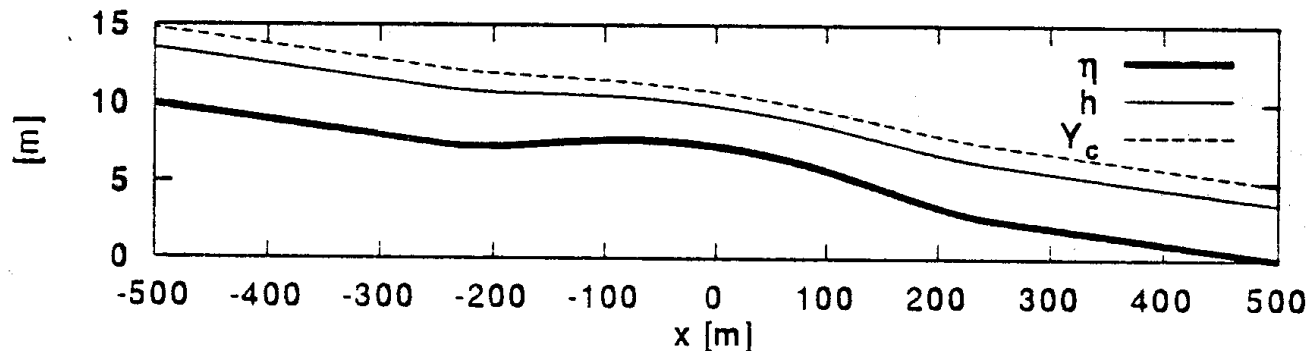
Modello 1D: profili di equilibrio nelle correnti fluviali

Alvei non cilindrici: alvei a sezione rettangolare

Allargamento di un alveo a forte pendenza



b)

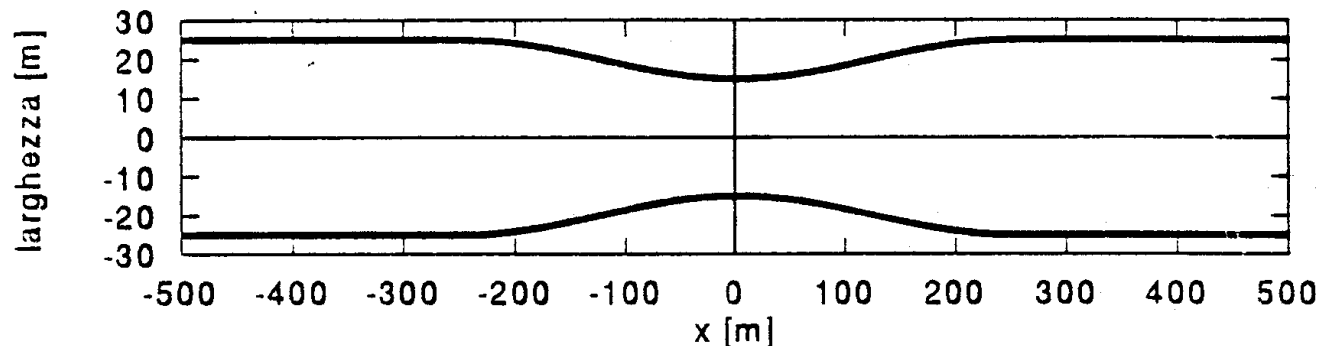


Formulazione del problema dell'evoluzione altimetrica del fondo

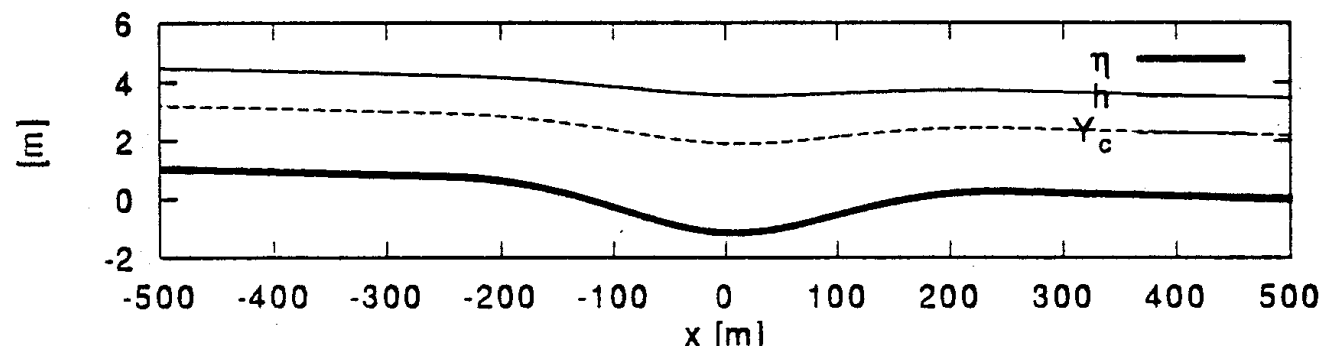
Modello 1D: profili di equilibrio nelle correnti fluviali

Alvei non cilindrici: alvei a sezione rettangolare

Restringimento di un alveo a debole pendenza



a)

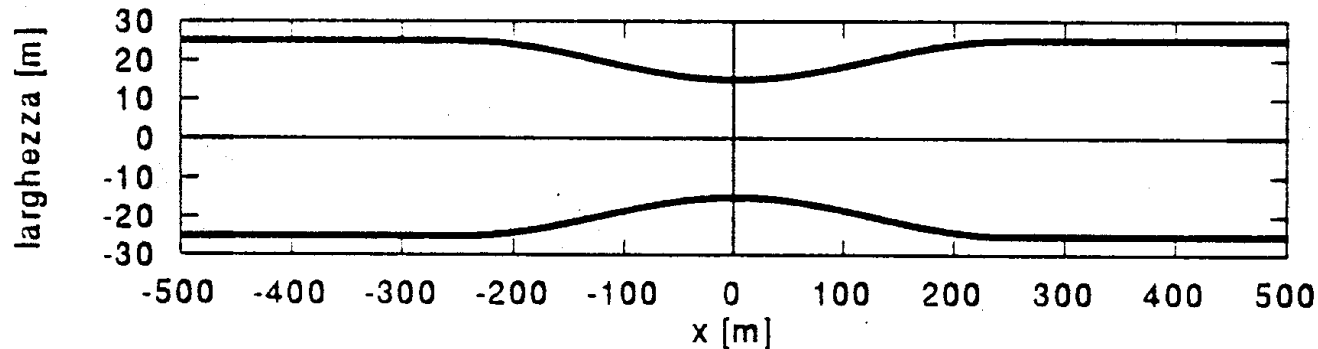


Formulazione del problema dell'evoluzione altimetrica del fondo

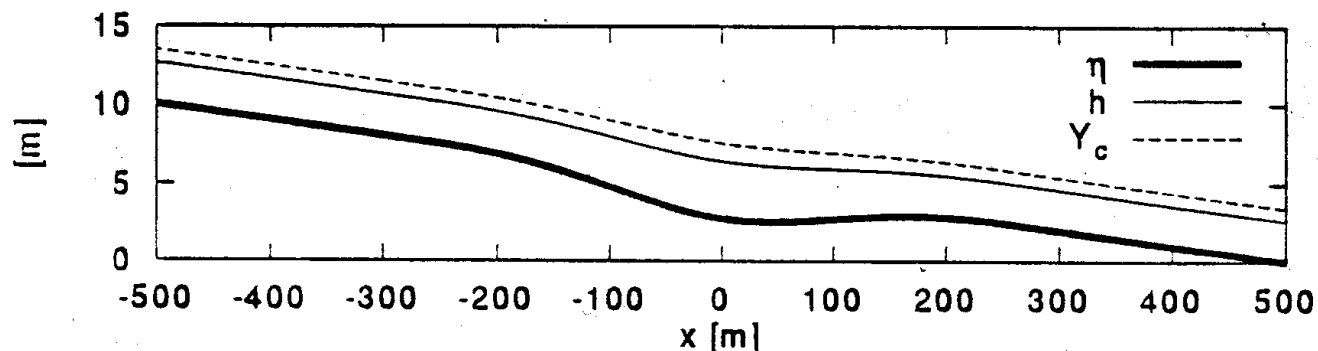
Modello 1D: profili di equilibrio nelle correnti fluviali

Alvei non cilindrici: alvei a sezione rettangolare

Restringimento di un alveo a forte pendenza



b)



Formulazione del problema dell'evoluzione altimetrica del fondo

Modello 1D: profili di equilibrio nelle correnti fluviali

Un'importante considerazione: allargamenti locali dell'alveo non portano stabili benefici al deflusso.

Non è infrequente il caso in cui vengono pianificati interventi, anche onerosi economicamente, di allargamenti di alvei finalizzati ad un miglioramento della capacità di deflusso in tronchi soggetti ad accentuati rischi di esondazione. Tali interventi possono portare benefici a breve termine ma vengono nel tempo vanificati dalla naturale tendenza della corrente a depositare sedimenti nel tronco allargato.

Ne consegue peraltro che, nel transitorio successivo all'intervento, gran parte della portata solida contribuisce al ripascimento del tronco allargato con ciò depauperando il tronco di valle dell'apporto dei sedimenti intercettati

Altre conseguenze di interventi di questo tipo riguardano le caratteristiche di stabilità del fondo e la tendenza dell'alveo a dar luogo alla formazione di megaforme di fondo, le barre, che portano la corrente a divagare.

Formulazione del problema dell'evoluzione altimetrica del fondo

La sezione di equilibrio dei corsi d'acqua rettilinei

L'analisi della configurazione di equilibrio della sezione trasversale è di rilevanza concettuale perché consente di rispondere alla domanda: perché un corso d'acqua naturale, in una certa sezione, ha una certa larghezza? Dal punto di vista pratico, la conoscenza della sezione di equilibrio consente in linea di principio di progettare canali "stabili", cioè tali da non produrre significativa erosione né depositi, nonché di prevedere la risposta di un alveo all'esecuzione di interventi di manutenzione.

Il problema della determinazione della sezione di equilibrio può essere affrontato adottando:

- Relazioni empiriche;
- Un approccio meccanico (o razionale).

Formulazione del problema dell'evoluzione altimetrica del fondo

La sezione di equilibrio dei corsi d'acqua rettilinei: relazioni empiriche

Leopold e Maddock (1953) hanno analizzato i dati sulle portate giornaliere relativi a un gran numero di stazioni di misura installate in diversi corsi d'acqua statunitensi. Hanno così trovato i valori di larghezza B , profondità Y e velocità media U rilevati nei giorni in cui la portata giornaliera assumeva un valore prossimo alla media annua, al fine di determinare le seguenti leggi di potenza:

$$B = aQ^b, \quad Y = cQ^f, \quad U = kQ^m$$

con

$$b = 0.5, \quad f = 0.4, \quad m = 0.1$$

mentre a , c e k dipendono dal particolare bacino, gli esponenti appaiono caratterizzati da un sorprendente grado di universalità.

Formulazione del problema dell'evoluzione altimetrica del fondo

La sezione di equilibrio dei corsi d'acqua rettilinei: approccio razionale (in assenza di trasporto solido)

Basandosi su alcune semplificazioni (es. effetto delle tensioni di Reynolds trascurabili) Glover e Florey (1951) hanno trovato:

$$\frac{B}{Y_0} = 3.14\phi^{-1.038}, \quad \frac{\Omega}{BY_0} = 0.66\phi^{0.021}, \quad \frac{P}{Y_0} = 3.59\phi^{-0.950}$$

in cui Y_0 è la profondità in corrispondenza della linea d'asse, ϕ è l'angolo di riposo del materiale espresso in radianti.

Utilizzando la formula di Strickler, si ottiene

$$Q = 1.437 k_s \sqrt{i_f} \phi^{-1.06} Y_0^{8/3}$$

La portata che il canale può effettivamente convogliare è determinata non appena si precisi la granulometria dei sedimenti del fondo erodibile, infatti

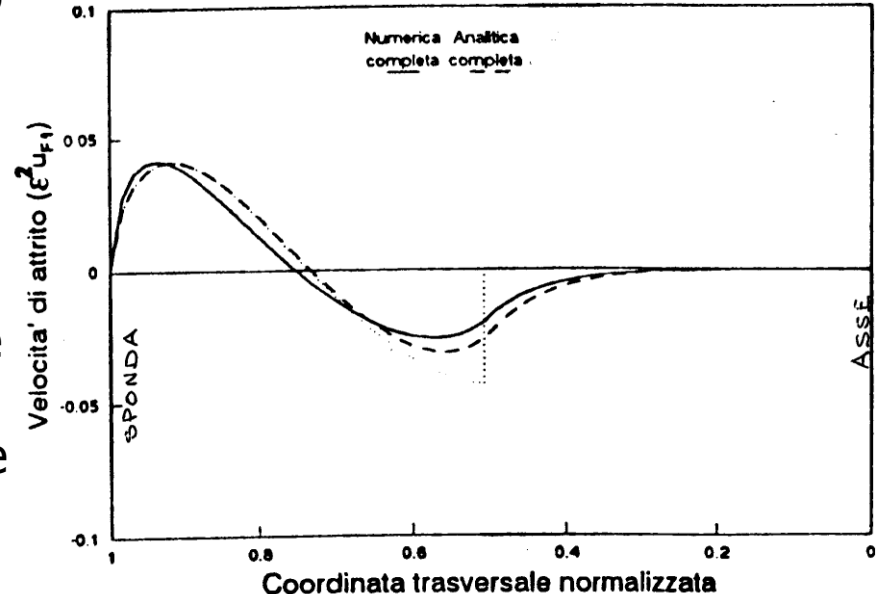
$$\frac{\tau|_{y=0}}{\rho} = g Y_0 = (s-1) g \tau_{*co}$$

Formulazione del problema dell'evoluzione altimetrica del fondo

Sezione di equilibrio in presenza di trasporto solido di fondo dominante (alvei in granulometria grossolana)

E' possibile avere condizioni di equilibrio dinamico, che consentano a una corrente a fondo mobile di trasportare sedimenti nella sua regione centrale mantenendo le sponde in equilibrio?

Parker (1978) ha dimostrato che l'effetto della redistribuzione della quantità di moto dà luogo ad una riduzione della tensione al fondo procedendo dall'asse verso la sponda: la regione centrale può dunque trasportare sedimenti con le sponde in equilibrio, purchè la tensione si riduca lateralmente procedendo dall'asse della sezione fino a raggiungere il valore critico in corrispondenza del piede delle sponde.



Formulazione del problema dell'evoluzione altimetrica del fondo

Sezione di equilibrio in presenza di trasporto solido di fondo dominante (alvei in granulometria grossolana)

Parker (1978) ottiene un valore della tensione di Shields in asse τ_{*0} all'equilibrio che eccede il valore critico del 14-16%, valore assai debolmente variabile con la scabrezza assoluta del fondo.

Assumendo la sezione sufficientemente larga da poter confondere raggio idraulico e profondità in asse, assumendo la tensione critica pari a 0.03, valore appropriato in alvei a granulometria grossolana, si ha

$$\frac{Y_c}{d_{50}} = 1.15(s-1)\tau_{*c}i_f^{-1} = 0.057i_f^{-1}$$

Utilizzando la forma di equilibrio della sezione (regione centrale orizzontale, connessa a due regioni spondali caratterizzate da profilo di equilibrio di sezioni "stabili") e utilizzando una distribuzione logaritmica delle velocità in direzione normale al fondo, si ottiene la portata defluente nella sezione di equilibrio

$$Q = 0.036d\sqrt{(s-1)g}di_f^{-1.217}B\left(1 - 2.23\frac{Y_c}{B}\right)$$

Formulazione del problema dell'evoluzione altimetrica del fondo

Sezione di equilibrio in presenza di trasporto solido di fondo dominante (alvei in granulometria grossolana)

Infine, integrando la distribuzione della portata solida per unità di larghezza associata al valore locale della tensione di Shields, si ha

$$Q_s = 0.4610^{-5} d \sqrt{(s-1)gd} i_f^{-0.278} B \left(1 - 4.52 \frac{Y_c}{B} \right)$$

Formulazione del problema dell'evoluzione altimetrica del fondo

Sezione di equilibrio in presenza di trasporto solido in sospensione dominante (alvei in sabbia)

In questo caso, rispetto agli alvei in granulometria grossolana, la sponda si assume in *equilibrio dinamico*, anziché statico.

L'equilibrio, secondo Parker (1978) sussiste perché si instaura un bilancio tra flusso laterale di sedimenti trasportati in sospensione dalla regione centrale, in cui la concentrazione è massima, verso le sponde e il flusso di sedimenti trasportati al fondo in corrispondenza delle pareti spondali che, per effetto gravitazionale, dirigono i sedimenti verso la regione centrale.

E' implicita in tale schema l'ipotesi che siano trascurabili altri due effetti:

1. il ruolo dei moti secondari indotti nel piano della sezione dall'anisotropia della turbolenza;
2. Il ruolo della coesione delle sponde.

Formulazione del problema dell'evoluzione altimetrica del fondo

Sezione di equilibrio in presenza di trasporto solido in sospensione dominante (alvei in sabbia)

Secondo Ikeda e Izumi (1991) si ha:

$$B_s = F_1(S, \hat{d})Y_0$$

$$P = \left[1 + 2F_2(S, \hat{d})(Y_0 / B_c)\right]Y_0$$

$$\Omega = \left[1 + 2F_3(S, \hat{d})(Y_0 / B_c)\right]Y_0 B_c$$

$$Q = \left(gY_0S / C_f\right) \left[1 + (3F_3 - F_2)(Y_0 / B_c)\right]Y_0 B_c$$

$$B = \frac{Q}{\left(gY_0^3S / C_f\right)^{1/2}} (2F_1 + F_2 - 3F_3)Y_0$$

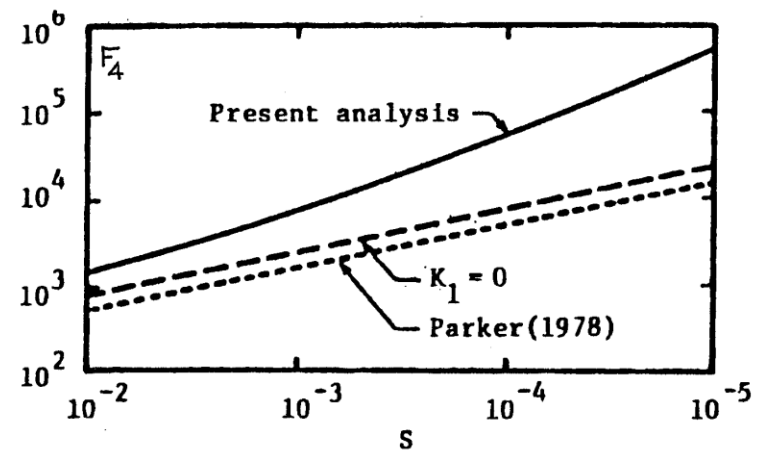
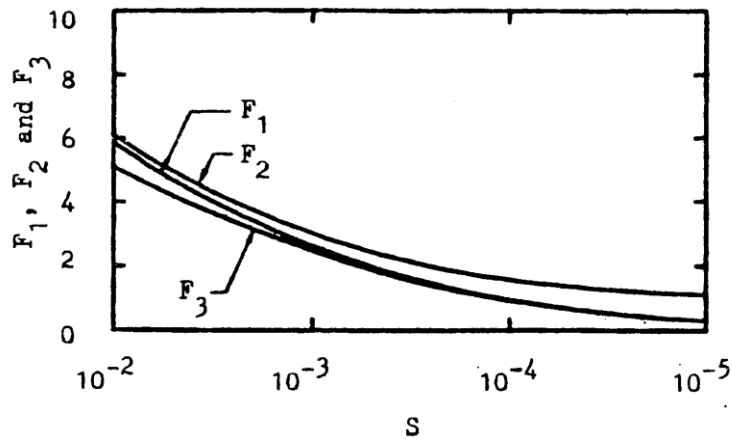
$$Y_0 = F_4(S, \hat{d})d$$

in cui B è la larghezza della superficie libera, B_s è la larghezza della sponda definita convenzionalmente come la regione in cui la profondità non eccede il 99% della profondità in asse, F_1, F_2, F_3 sono funzioni di S e \hat{d} , parametro adimensionale che misura il diametro medio dei sedimenti.

Formulazione del problema dell'evoluzione altimetrica del fondo

Sezione di equilibrio in presenza di trasporto solido in sospensione dominante (alvei in sabbia)

Le funzioni, F_1 , F_2 , F_3 sono riportate nelle figure (caso in cui $d=0.2\text{ mm}$)



Formulazione del problema dell'evoluzione altimetrica del fondo

Erosione superficiale e collasso delle sponde in alvei con sponde coesive

Le parti vallive dei corsi d'acqua sono caratterizzate tipicamente da sponde in materiale fine, contenenti cioè una porzione significativa di limo e argilla. In questo caso esse sono dotate di apprezzabile coesione che dà luogo ad una resistenza all'erosione spondale dovuta ai legami elettrochimici tra le particelle. Ma le caratteristiche di coesione dipendono dai cicli di imbibimento ed essiccamento subiti dal materiale, oltre che da fattori biologici, quali l'evoluzione subita dall'eventuale erosione spondale.

I meccanismi di erosione spondale in alvei con sponde coesive sono classificabili come:

1. Erosione superficiale
2. Collasso delle sponde



Formulazione del problema dell'evoluzione altimetrica del fondo

Erosione superficiale e collasso delle sponde in alvei con sponde coesive

Erosione superficiale

Questo meccanismo opera in modo pressochè continuo: particelle superficiali vengono asportate dalla corrente, laddove la tensione tangenziale agente sulla sponda eccede il valore critico caratteristico del materiale spondale (coesivo) nel suo attuale stato di imbibimento.

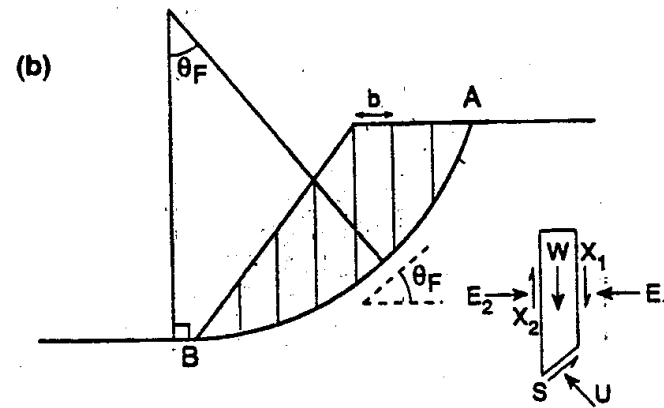
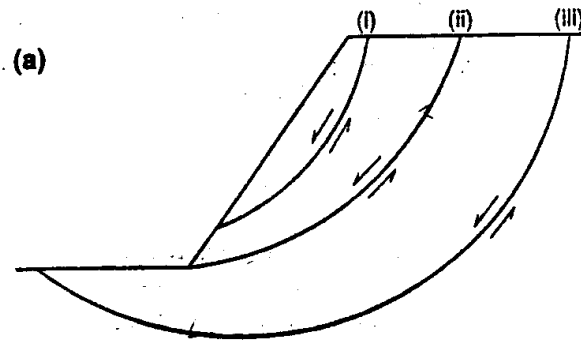
Collasso delle sponde

Si tratta di un meccanismo che agisce in modo intermittente, tipicamente in occasione degli eventi di piena. Essenzialmente, il meccanismo è simile a quello che determina l'instabilità dei pendii: il collasso avviene quando, per effetto per esempio di un aumento dello scavo al piede di una sponda, si forma una superficie di slittamento sulla quale le forze destabilizzanti (gravitazionali) eccedono quelle stabilizzanti (coesive e di attrito).

Formulazione del problema dell'evoluzione altimetrica del fondo

Erosione superficiale e collasso delle sponde in alvei con sponde coesive

Collasso delle sponde

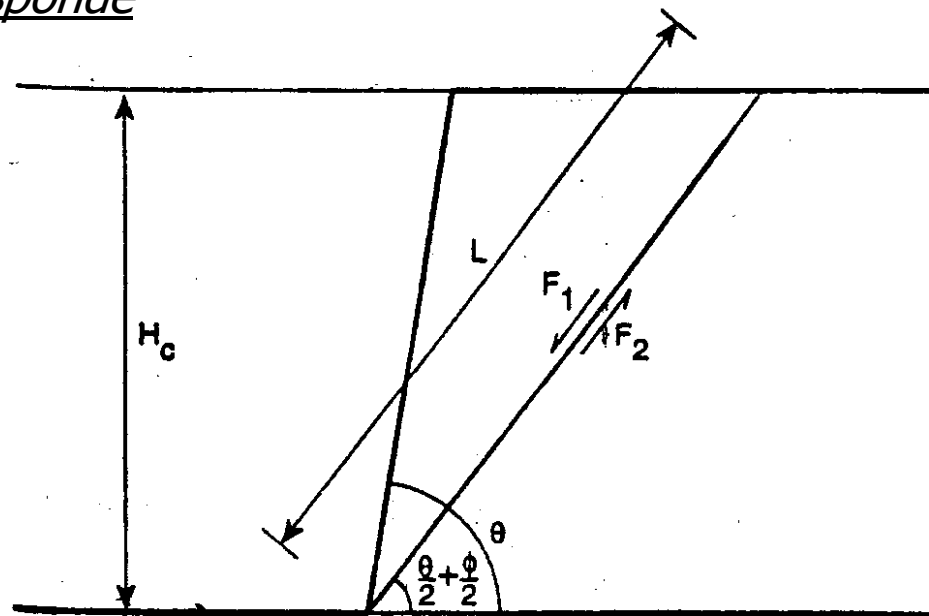


Schema di collasso spondale per rotazione lungo superfici di slittamento (*rotational slip failure*). La divisione in conci verticali è usata per la verifica di stabilità.

Formulazione del problema dell'evoluzione altimetrica del fondo

Erosione superficiale e collasso delle sponde in alvei con sponde coesive

Collasso delle sponde

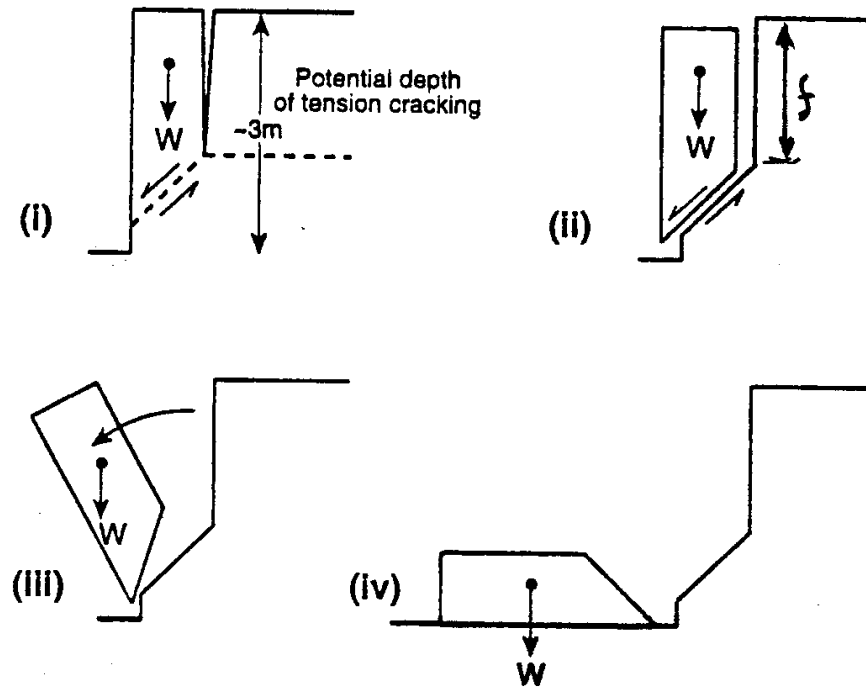


Schema di collasso spondale lungo superfici di scorrimento piane, tipico di sponde ripide (*plane slip failure*).

Formulazione del problema dell'evoluzione altimetrica del fondo

Erosione superficiale e collasso delle sponde in alvei con sponde coesive

Collasso delle sponde



Schema di collasso di sponde ripide e profondamente fratturate (*toppling failure*).

Formulazione del problema dell'evoluzione altimetrica del fondo

Erosione superficiale e collasso delle sponde in alvei con sponde coesive

Collasso delle sponde: sponde composite

Un ultimo meccanismo di collasso spondale riguarda sponde composite, sponde cioè a struttura stratificata in cui è tipicamente presente uno strato superficiale in materiale più fine e parzialmente coesivo, derivante dai processi di deposito e successivo consolidamento dei sedimenti trasportati in sospensione dalle acque di esondazione, sovrapposto su uno strato in materiale più grossolano (ghiaia sabbiosa).

Il carattere composito della sponda può dar luogo ad erosione dello strato inferiore ed allo scoprimento dello strato superficiale, con possibile formazione di una configurazione a mensola. Quest'ultima aggetta entro l'alveo e può subire il collasso (*cantilever failure*) con diversi meccanismi (slittamento lungo piani verticali, rotazione o distacco).

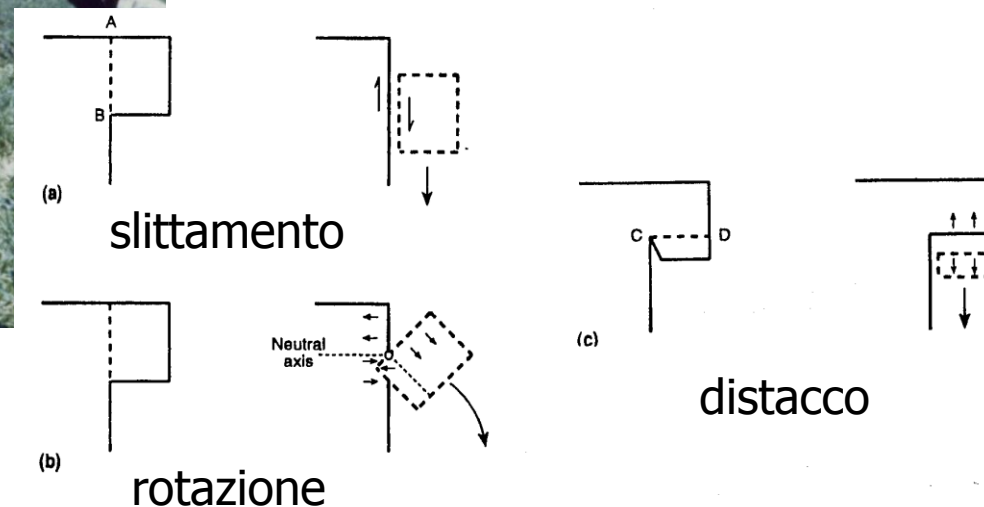
Formulazione del problema dell'evoluzione altimetrica del fondo

Erosione superficiale e collasso delle sponde in alvei con sponde coesive

Collasso delle sponde: sponde composite



Schema del meccanismo di collasso spondale del tipo cantilever.



Formulazione del problema dell'evoluzione altimetrica del fondo

Erosione superficiale e collasso delle sponde in alvei con sponde coesive

Collasso delle sponde: cicli di essiccamento/imbibimento

Il collasso delle sponde è poi influenzato in maniera sensibile dai cicli di essiccamento ed imbibimento delle sponde. In particolare, le elevate temperature estive possono produrre fenomeni di essiccamento e frattura superficiale con l'eventuale distacco di frammenti di sponda.

Inoltre, le caratteristiche di stabilità della sponda variano nel corso degli eventi di piena. Per valori bassi della portata, la parte superiore della sponda si trova in uno stato di parziale saturazione, con la presenza di una frangia capillare (l'effetto delle tensioni capillari stabilizza la sponda).

Al crescere del livello della superficie libera della corrente si ha un flusso filtrante dalla corrente verso la sponda con la formazione di una regione di sponda satura, che riduce l'effetto stabilizzante delle tensioni capillari. Inoltre l'aumento della tensione al fondo fa sì che la corrente rimuova eventuali depositi di materiale precedentemente collassato al piede della sponda.

Formulazione del problema dell'evoluzione altimetrica del fondo

Erosione superficiale e collasso delle sponde in alvei con sponde coesive

Collasso delle sponde: cicli di essiccamento/imbibimento

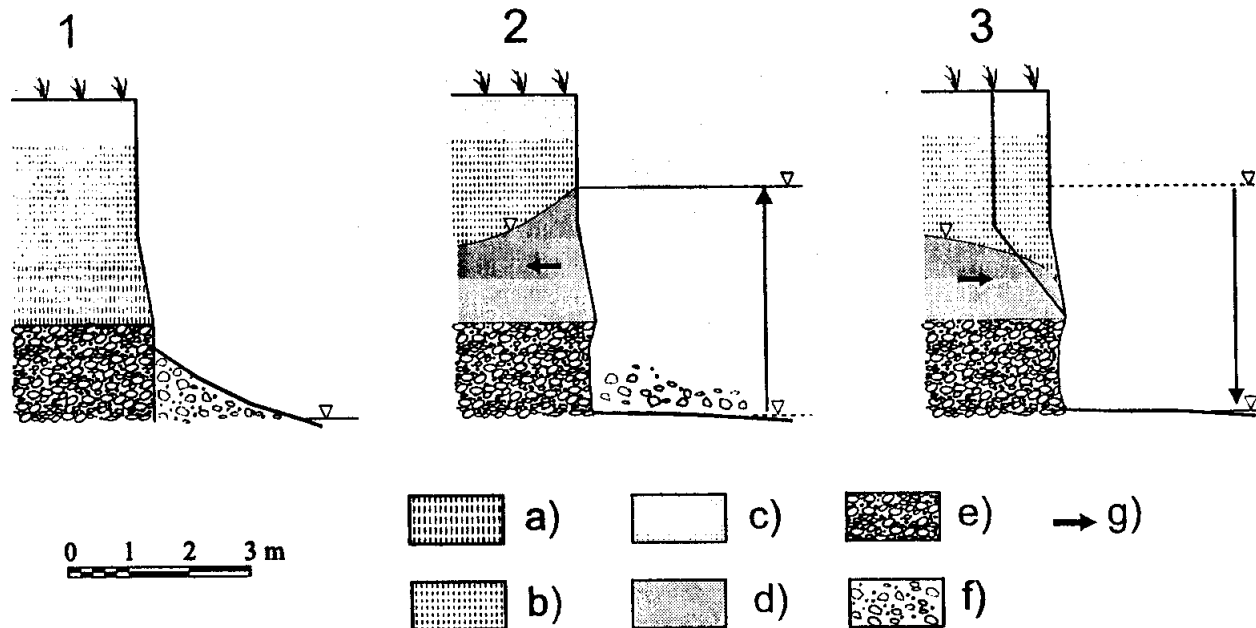
Ciò può indurre l'irripidimento della sponda stessa. Nella fase di decadimento della piena si ha un processo inverso di filtrazione dalla sponda verso il corso d'acqua.

Il conseguente abbassamento del livello della falda è tuttavia un processo assai più lento dell'abbassamento del livello della corrente. Ne consegue un effetto destabilizzante sulla sponda, dovuta all'aumento del peso specifico del materiale spondale, alla riduzione delle tensioni capillari ed alla scomparsa dell'effetto di confinamento da parte della corrente fluviale. Non è quindi infrequente il verificarsi di collassi spondali nella fase di decadimento della piena.

Formulazione del problema dell'evoluzione altimetrica del fondo

Erosione superficiale e collasso delle sponde in alvei con sponde coesive

Processi spondali durante un evento di piena



1. Fase di magra; 2. Fase di crescita della piena; 3. Fase di decadimento della piena.

a) Frangia capillare; b) Zona a parziale saturazione; c) Zona di suolo umido; d) Zona satura; e) Ghiaia densamente compattata; f) Ghiaia sciolta.

Formulazione del problema dell'evoluzione altimetrica del fondo

Erosione superficiale e collasso delle sponde in alvei con sponde coesive

Altri agenti di collasso spondale e osservazioni

L'erosione spondale è strettamente connessa alla *capacità della corrente di rimuovere i sedimenti collassati al piede della sponda*, che, se la corrente ha insufficiente capacità di trasporto, formano una berma di protezione della sponda da ulteriori collassi.

Il *ruolo della vegetazione* è molto complesso e rivela effetti sia stabilizzanti che destabilizzanti. In particolare la vegetazione riduce l'erosione superficiale per le seguenti cause (Gray e Liser, 1982; Choppin e Richards, 1990) :

- fogliame e residui vegetali intercettano le precipitazioni e riducono la compattazione del suolo dovuta all'impatto delle gocce;
- gli apparati radicali trattengono le particelle di suolo;
- l'aumento di scabrezza riduce la velocità in prossimità delle sponde e induce il deposito di sedimenti in sospensione;
- gli apparati radicali aumentano la permeabilità del suolo riducendo l'effetto delle pressioni interstiziali.

Formulazione del problema dell'evoluzione altimetrica del fondo

Erosione superficiale e collasso delle sponde in alvei con sponde coesive

Altri agenti di collasso spondale e osservazioni

Un ultimo meccanismo di collasso che merita di essere menzionato è il *sifonamento*: Tale processo è legato al fatto che sponde contenenti sabbia, limo e argilla sono caratterizzate da una conduttività idraulica che, nella direzione orizzontale, risulta molto maggiore rispetto alla componente relativa alla direzione verticale.

Il flusso filtrante verso l'alveo nella fase di decadimento della piena può quindi catturare ed asportare sedimenti dagli strati sabbiosi. Tale processo può indebolire il sostegno meccanico che gli strati profondi della sponda forniscono agli strati sovrastanti meno permeabili, con la possibile formazione di fratture potenzialmente destabilizzanti.

Formulazione del problema dell'evoluzione altimetrica del fondo

Erosione superficiale e collasso delle sponde in alvei con sponde coesive

Altri agenti di collasso spondale e osservazioni

Inoltre gli apparati radicali svolgono un'azione stabilizzante rispetto al collasso trasferendo parte delle tensioni alle radici, almeno quando la superficie di slittamento non sia tutta inferiore allo strato interessato dalla presenza di apparati radicali.

Infine la vegetazione riduce il livello di umidità del suolo intercettando parte delle precipitazioni e restituendo parte dell'umidità all'atmosfera attraverso il fenomeno dell'evapotraspirazione.

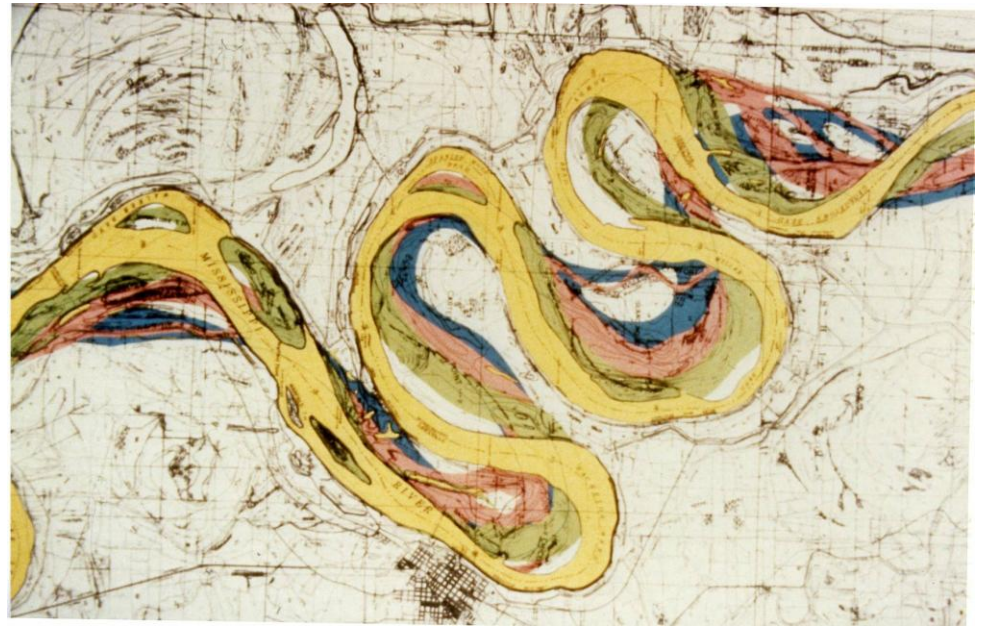
D'altra parte costituisce un agente destabilizzante il fatto che le radici possono penetrare in eventuali fessure presenti nel terreno e nelle rocce causando instabilità locale. Inoltre il peso delle strutture arboree sovraccarica la sponde. Infine la sollecitazione del vento sulle strutture arboree produce un momento destabilizzante agente sull'ammasso spondale.

Formulazione del problema dell'evoluzione altimetrica del fondo

L'assetto di equilibrio del fondo in alvei meandriiformi

Gli alvei in natura presentano per lo più un andamento curvilineo della linea d'asse, spesso con una spiccata periodicità spaziale.

Tale andamento, che evolve nel tempo sulla scala temporale associata al processo dell'erosione spondale, viene usualmente denominato meandriiforme dal noti del fiume (Menderes in turco) che nasce nell'Anatolia centrale e scorre con andamento estremamente sinuoso verso il Mar Egeo.



Evoluzione planimetrica del fiume Mississippi nel periodo 1930-1970 (G. Parker)

Formulazione del problema dell'evoluzione altimetrica del fondo

L'assetto di equilibrio del fondo in alvei meandriiformi

I meandri naturali hanno vita di *durata finita*, estinguendosi quando due rami adiacenti si avvicinano al punto che, in occasione di un evento di piena, essi vengono connessi attraverso una rotta, processo noto come *taglio di meandro* (*meander cutoff*).

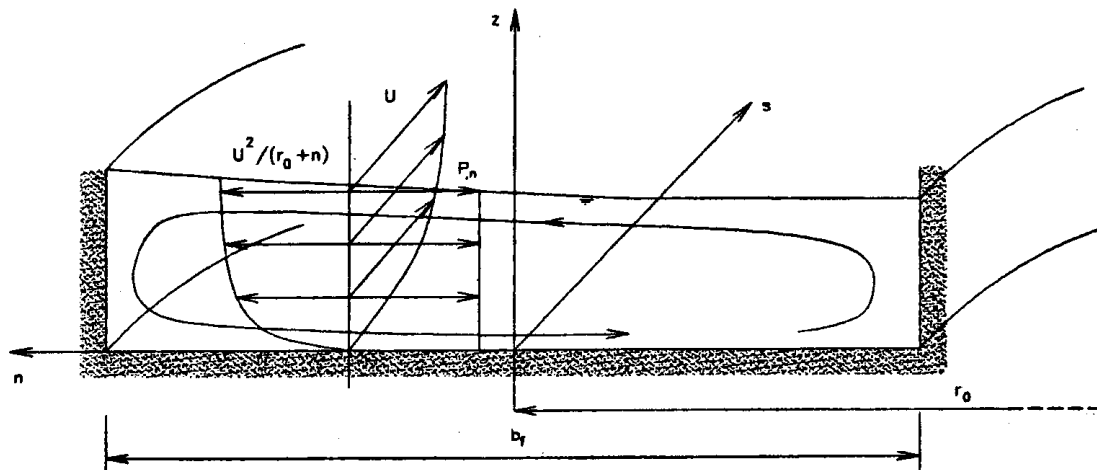
Il carattere curvilineo delle linee di corrente induce *una deformazione dell'assetto topografico del fondo* la cui determinazione risulta rilevante per i problemi ingegneristici legati alla navigazione fluviale, alla difesa spondale e, in generale, al controllo dell'assetto planimetrico dei corsi d'acqua.

Formulazione del problema dell'evoluzione altimetrica del fondo

Idrodinamica ed assetto di equilibrio in alvei a curvatura costante

Canali a fondo fisso

Se consideriamo il moto pienamente sviluppato a valle dell'imbocco della curva, si nota che la superficie libera si deve inclinare per compensare il gradiente trasversale di pressione e la variazione di tensione tangenziale che si origina da un moto trasversale secondario rivolto verso l'esterno della curva in prossimità della superficie libera e verso l'interno della curva in prossimità del fondo. Questo moto dà origine a un moto elicoidale delle particelle.



Formulazione del problema dell'evoluzione altimetrica del fondo

Idrodinamica ed assetto di equilibrio in alvei a curvatura costante

Canali a fondo fisso

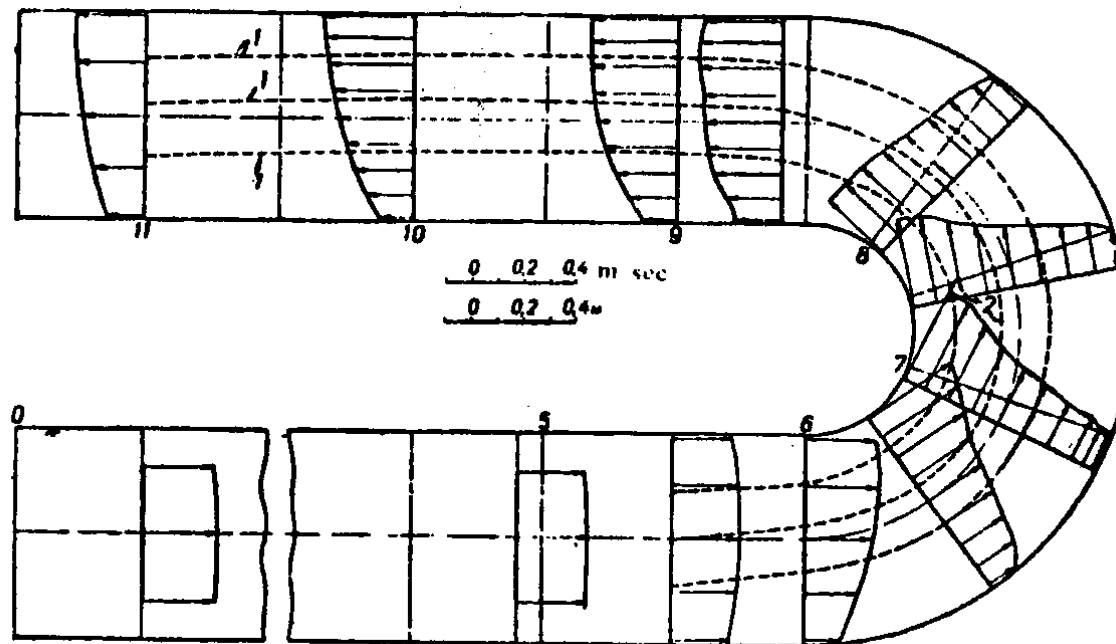
Dall'analisi del campo del moto, si nota che la tensione longitudinale nasce da due contributi:

- Il primo è quello legato alla gravità, che risulta lievemente modificato rispetto al caso rettilineo, in quanto la pendenza del fondo varia nella direzione trasversale (effetto *vortice libero*, per cui la corrente accelera nella regione interna e decelera in quella esterna)
- Il secondo interpreta il *trasporto trasversale di quantità di moto longitudinale* associato all'effetto del moto secondario e dà luogo a un effetto che contrasta il primo. Infatti pur avendo la velocità trasversale media nulla nella direzione verticale, non risulta nullo il trasporto di quantità di moto che essa induce (si ha un flusso di quantità di moto positivo nella regione esterna, per cui si ha un'accelerazione della corrente, e negativo in quella interna, per cui la corrente decelera). L'effetto è comunque debole, perché il moto secondario è debole, sia perché le variazioni trasversali della velocità longitudinale sono significative solo negli strati limite di parete.

Formulazione del problema dell'evoluzione altimetrica del fondo

Idrodinamica ed assetto di equilibrio in alvei a curvatura costante

Canali a fondo fisso



Sviluppo del moto in canali a curvatura costante e fondo fisso: il filone più veloce del moto si sposta dalla sponda interna alla sponda esterna man mano che l'effetto vortice libero viene controbilanciato dal trasporto trasversale di quantità di moto longitudinale (Rozvoskij, 1957)

Formulazione del problema dell'evoluzione altimetrica del fondo

Idrodinamica ed assetto di equilibrio in alvei a curvatura costante

Canali a fondo erodibile

Il carattere erodibile del fondo, insieme all'effetto del moto secondario, danno luogo all'instaurarsi di una pendenza trasversale del fondo. Il meccanismo attraverso il quale si instaura tale pendenza dipende dal tipo di trasporto solido dominante.

Formulazione del problema dell'evoluzione altimetrica del fondo

Idrodinamica ed assetto di equilibrio in alvei a curvatura costante

Canali a fondo erodibile: dominante trasporto solido al fondo

A causa del moto secondario, si realizzano delle tensioni tangenziali trasversali agenti sul fondo e dirette dall'esterno verso l'interno della curva. Se il fondo è erodibile tali tensioni danno luogo a una deviazione del trasporto solido di fondo dalla direzione longitudinale.

Ciò si traduce nell'instaurarsi di:

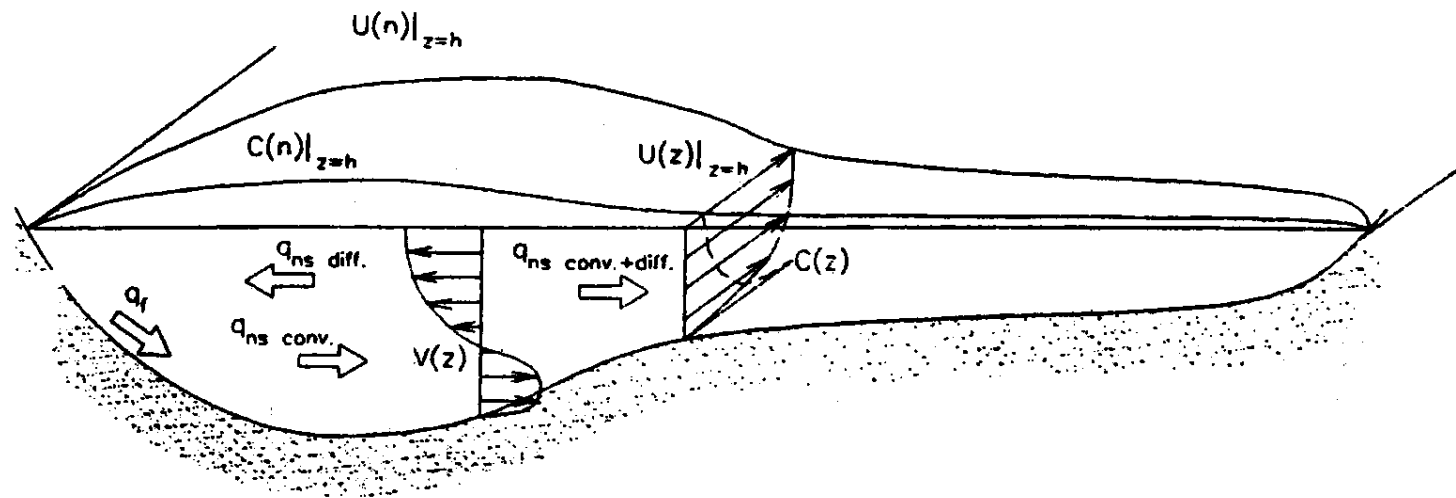
- una pendenza trasversale del fondo;
- uno scavo della sponda esterna e un deposito sulla sponda interna;
- una modifica della pendenza longitudinale i_{fd} rispetto al caso rettilineo i_{fur} necessaria per consentire alla corrente di trasportare la stessa portata solida con una distribuzione trasversale della tensione al fondo significativamente diversa dalla distribuzione uniforme rispetto al caso di un alveo rettilineo (Seminara e Solari, 1998).

Formulazione del problema dell'evoluzione altimetrica del fondo

Idrodinamica ed assetto di equilibrio in alvei a curvatura costante

Canali a fondo erodibile: dominante trasporto in sospensione

Facciamo per semplicità l'ipotesi che l'alveo sia sufficientemente largo perché la distribuzione trasversale dei profili di concentrazione possa ritenersi in equilibrio con i valori locali della tensione di Shields (valori crescenti dall'interno verso l'esterno della curva, così come le velocità).



Formulazione del problema dell'evoluzione altimetrica del fondo

Idrodinamica ed assetto di equilibrio in alvei a curvatura costante

Canali a fondo erodibile: dominante trasporto in sospensione

- Nella regione centrale si ha un flusso convettivo diretto verso l'interno, poiché la concentrazione è massima in prossimità del fondo dove il moto secondario è diretto verso l'interno della curva. Si ha inoltre un flusso diffusivo diretto verso l'interno, essendo la concentrazione crescente verso l'esterno. Ne segue che nella regione centrale la componente di trasporto in sospensione produce un contributo additivo rispetto al trasporto al fondo → si instaura una pendenza trasversale del fondo superiore al caso di trasporto solido al fondo dominante;
- Nella regione di parete esterna il flusso convettivo è ancora diretto verso l'interno ma il flusso diffusivo è diretto verso l'esterno.

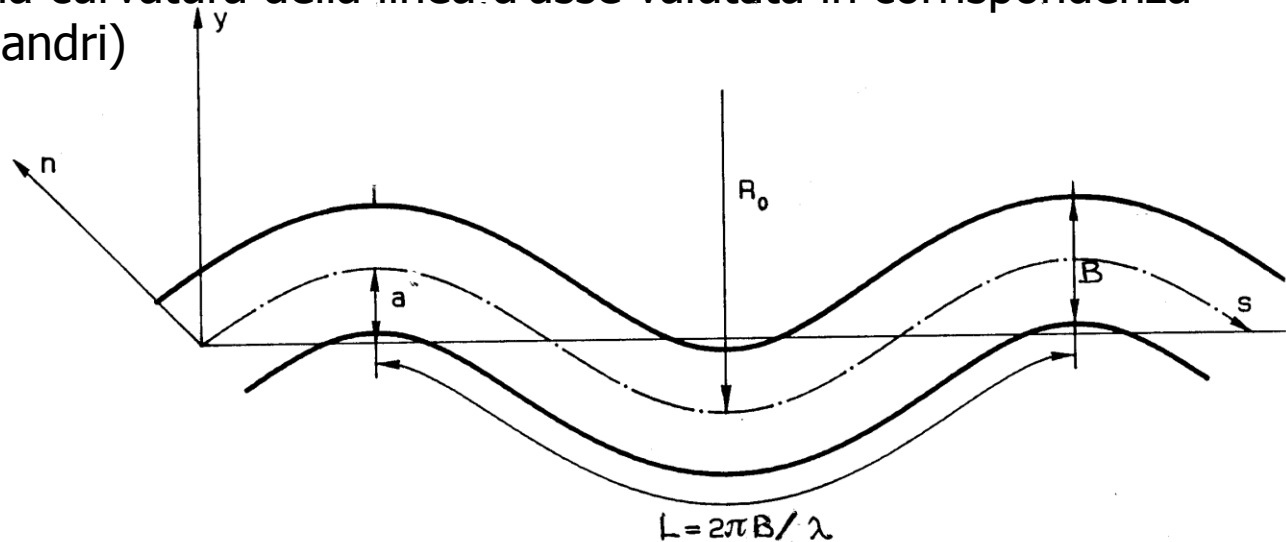
Formulazione del problema dell'evoluzione altimetrica del fondo

Idrodinamica ed assetto del fondo in alvei meandriiformi

L'assetto planimetrico di un alveo meandriiforme può essere descritto assegnando il raggio di curvatura r_0 della linea d'asse in funzione della coordinata curvilinea s corrente lungo l'asse. Poniamo dunque

$$\frac{1}{r_0(s)} = \frac{1}{R_0} C(s)$$

con $(1/R_0)$ valore di curvatura che si può ritenere caratteristico della linea d'asse (per esempio, in una sequenza regolare di meandri naturali $1/R_0$ si può assumere pari alla curvatura della linea d'asse valutata in corrispondenza dell'apice dei meandri)



Formulazione del problema dell'evoluzione altimetrica del fondo

Idrodinamica ed assetto del fondo in alvei meandriiformi

Tipicamente in natura si ha

$$\frac{B}{R_0} \ll 1$$

Inoltre la distribuzione dei meandri può spesso approssimarsi nella forma

$$C(s) = \cos \lambda s$$

Con λ numero d'onda intrinseco del meandro, che assume valori tipici intorno a $2\pi/(10B)$ nello stadio infantile e può ridursi fino a valori 6-7 volte minori nello stadio maturo prossimo al taglio dei meandri.

Si osservi che l'equazione precedente non predice un andamento sinusoidale in coordinate cartesiane, sebbene abbia un andamento comunque simmetrico. In natura in realtà si ha un irripidimento a monte (*skewing*) durante la fase di sviluppo avanzato. Per ovviare a tale inconveniente si possono anche includere terze armoniche con i coefficienti di ingrossamento e distorsione, C_F e C_S , e scrivere (Kinoshita, 1961)

$$C(s) = \cos \lambda s + (C_F \cos(3\lambda s) + C_S \cos(3\lambda s))$$

Formulazione del problema dell'evoluzione altimetrica del fondo

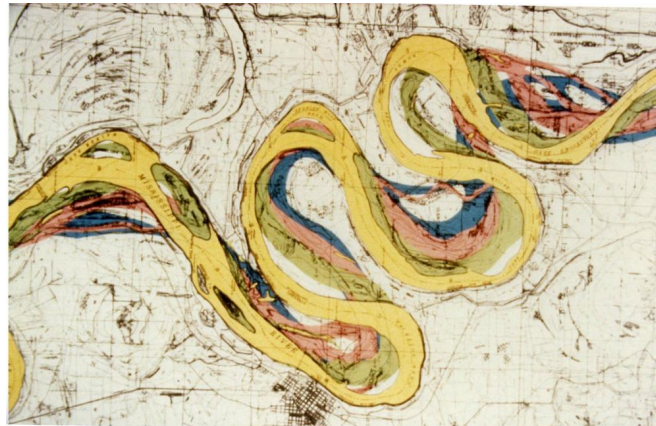
Idrodinamica ed assetto del fondo in alvei meandriformi



Esempio di irripidimento dei meandri (Peace River, Canada)



*Mississippi nel periodo
1930-1970 (G. Parker)*



Formulazione del problema dell'evoluzione altimetrica del fondo

Idrodinamica ed assetto del fondo in alvei meandriiformi

Il carattere variabile della curvatura della corrente presenta un'importante conseguenza idrodinamica: accanto al moto secondario originato dallo squilibrio tra azione centrifuga e gradiente trasversale della pressione (perciò detto *moto secondario centrifugo*) si sviluppa un'ulteriore componente del moto secondario, e quindi del trasporto solido, indotta dalla disuniforme topografia del fondo (*moto secondario topografico*).

In una sequenza regolare di meandri, se l'unico contributo al moto secondario fosse quello dovuto alla curvatura e le variazioni spaziali della curvatura fossero sufficientemente lente da consentire un immediato adattamento del moto secondario al valore locale della curvatura, allora, come nel caso a curvatura costante si potrebbe assumere che le ampiezze della velocità trasversale, delle perturbazioni del fondo e della superficie libera proporzionali al valore locale della curvatura. L'assetto topografico che ne deriverebbe darebbe luogo a un accumulo di sedimenti (barra puntuale forzata) in prossimità delle sponde convesse e ad uno scavo localizzato in prossimità delle sponde concave.

Formulazione del problema dell'evoluzione altimetrica del fondo

Idrodinamica ed assetto del fondo in alvei meandriiformi

Massimo deposito e massimo scavo sarebbero esattamente in fase con il massimo della curvatura.

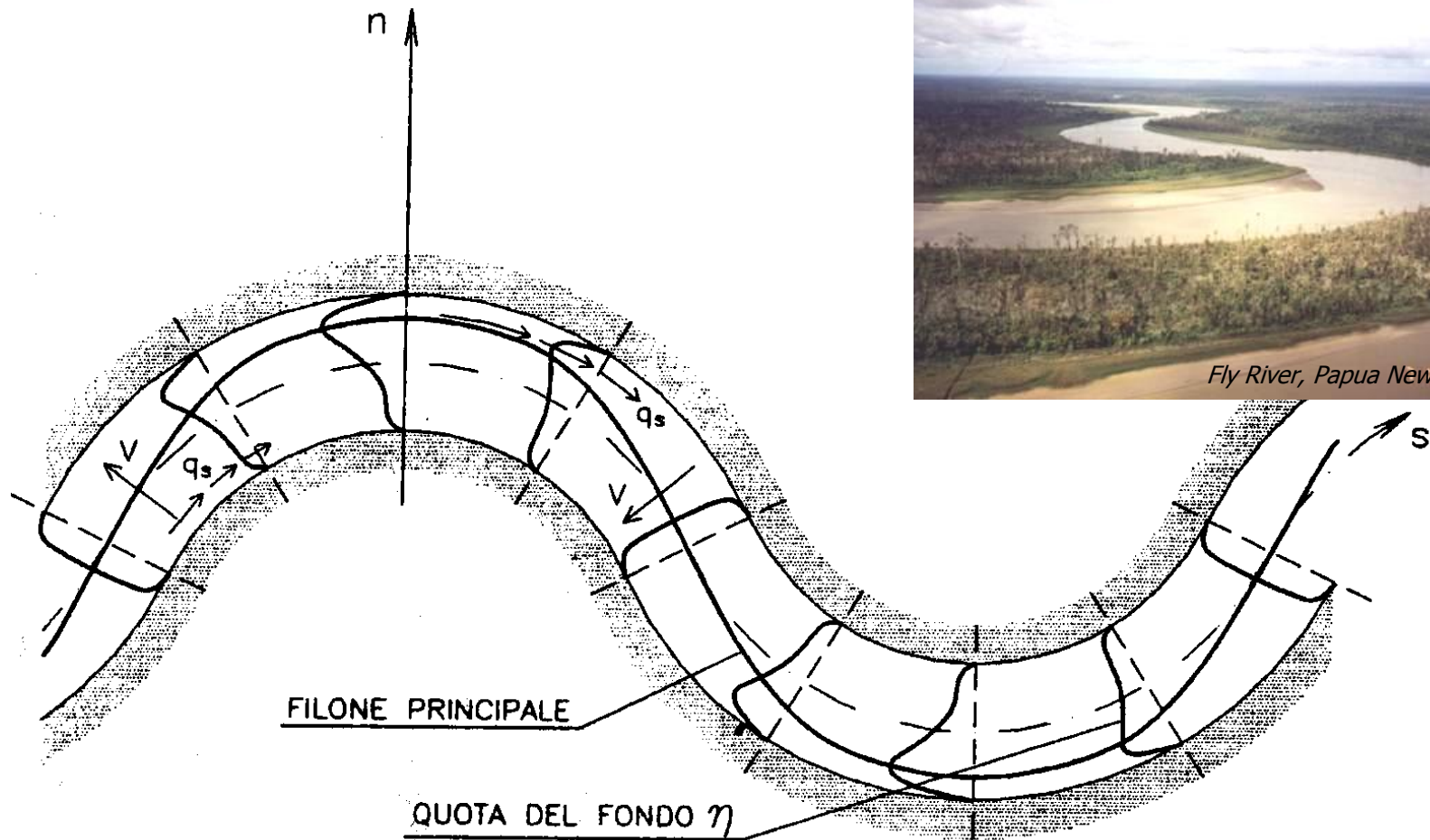
Tuttavia tale assetto non risulterebbe in equilibrio, poiché variazioni di velocità e profondità inducono per continuità una componente topografica del moto secondario, che risulta positiva (ovvero diretta verso la sponda concava) nel tratto ascendente della barra (a monte dell'apice della curva) e negativa nel tratto discendente.

Inoltre, procedendo verso l'esterno della curva si ha una riduzione del moto secondario, fino al suo annullarsi in corrispondenza della sponda concava.

In altre parole, l'effetto del moto secondario topograficamente indotto è quello di un progressivo spostamento del filone principale della corrente da una sponda concava alla successiva. Ovvero una sorta di ulteriore meanderizzazione della corrente all'interno dell'alveo già meandriiforme.

Formulazione del problema dell'evoluzione altimetrica del fondo

Idrodinamica ed assetto del fondo in alvei meandriformi



Formulazione del problema dell'evoluzione altimetrica del fondo

Idrodinamica ed assetto del fondo in alvei meandriiformi

Dal punto di vista della dinamica dei sedimenti:

- il moto secondario topograficamente indotto produce un effetto di scavo lungo la sponda interna e di deposito lungo la sponda esterna;
- la variazione longitudinale della portata, al contrario, dà luogo a un deposito lungo la sponda interna e uno scavo lungo quella esterna.

A questi effetti va aggiunto il ruolo del trasporto solido trasversale e longitudinale di quantità di moto.

E' il bilancio di questi effetti che dà luogo all'assetto topografico complessivo e in particolare alla localizzazione del massimo scavo rispetto all'apice della curva.

Formulazione del problema dell'evoluzione altimetrica del fondo

Idrodinamica ed assetto del fondo in alvei meandriiformi

Tale bilancio dipende dal valore assunto da diversi parametri che caratterizzano la geometria dell'alveo e il trasporto solido, e precisamente:

- il rapporto di curvatura del meandro $\nu = B/R_0$;
- il rapporto larghezza profondità $\beta = B/Y_u$;
- il numero d'onda del meandro $\lambda = 2\pi B/L_{mi}$;
- il parametro di Shields associato al moto uniforme medio $\tau_* = Y_u j_f (s-1) d_s$;
- la scabrezza relativa del moto uniforme medio $d_s = d/Y_u$;

La determinazione dell'assetto topografico del fondo in funzione dei valori assunti dai parametri adimensionali richiede, in generale, una modellazione analitica o numerica che consiste nella risoluzione delle equazioni bidimensionali del moto, accoppiate alla forma bidimensionale dell'equazione di continuità dei sedimenti in cui il modulo della portata solida di fondo viene espresso in funzione delle caratteristiche locali del moto.

Formulazione del problema dell'evoluzione altimetrica del fondo

Idrodinamica ed assetto del fondo in alvei meandriformi

Si può inoltre generare un meccanismo di risonanza per il quale la curvatura degli alvei meandriformi assume il ruolo di un effetto forzante che, sotto particolari condizioni, eccita una risposta naturale del sistema corrente liquida-fondo erodibile con caratteristiche analoghe a quelle dell'effetto forzante.

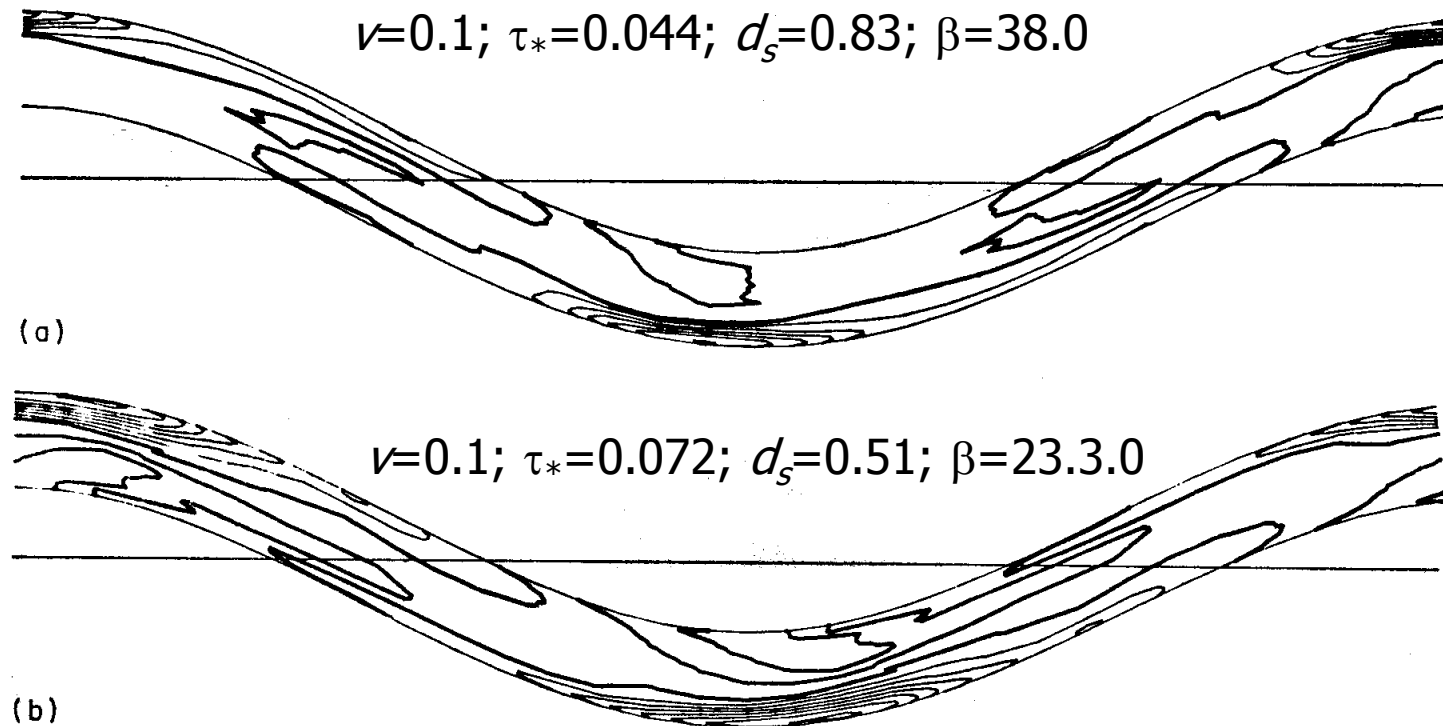
Conseguenza della risonanza è che, fissato il rapporto β , al crescere del numero d'onda la posizione del massimo scavo si sposta, sulla sponda esterna, dal tratto di monte rispetto all'apice della curva al tratto valle.

Addirittura, per grandi valori di λ , lo scavo massimo può addirittura realizzarsi sulla sponda convessa, anziché su quella concava.

Formulazione del problema dell'evoluzione altimetrica del fondo

Idrodinamica ed assetto del fondo in alvei meandriformi

Si osservi che il massimo scavo si sposta da valle a monte dell'apice della curva al crescere del rapporto β .



Formulazione del problema dell'evoluzione altimetrica del fondo

Idrodinamica ed assetto del fondo in alvei meandriformi

La posizione dello scavo e della barra dipendono fortemente dal numero d'onda.

