



AUTORITA' DI BACINO REGIONALE SINISTRA SELE

Via A. Sabatini, 3-84121 Salerno-tel.089.236922-fax.0892582774



Progetto di Piano Stralcio Erosione Costiera

Ai sensi dell'art. 17 commi 1 e 6 della Legge 18 maggio 1989 n. 183 s.m.i. e Legge 4 dicembre 1993 n. 493

TAV: REL. 5

RELAZIONE SPECIALISTICA "Idraulica fluviale"



Redatto da:

Segreteria Tecnica Operativa:

Dr. geol. Aniello Aloia (*aspetti geologici e siti campioni coste alte*)
Dr. geol. Saverio Maietta
Dr. geol. Filomena Moretta (*aspetti geologici e siti campioni coste alte- informatizzazione*)

Ing. Elisabetta Romano
Ing. Manlio Mugnani (*attività di pianificazione idraulico fluviale*)
Ing. M.Patrizia Positano

Arch. Antonio Tedesco (*vulnerabilità ed informatizzazione - GIS-*)
Arch. Carlo Banco (*aspetti antropici e norme di salvaguardia*)
Arch. Vincenzo Andreola

Dr. Vincenzo Liguori (*rapporti con Enti, conferenze programmatiche ed aspetti amministrativi*)
Dr. Angelo Padovano

Rag. Antonio Farina (*supporto tecnico-amministrativo*)
Geom. Giuseppe Taddeo

Il Responsabile del Procedimento:

Ing. Raffaele Doto

Consulenti e Responsabili Scientifici:

Prof. geol. Paolo Budetta (geologia)
Prof. ing. Domenico Pianese (idraulica fluviale)
Prof. ing. Mario Calabrese (idraulica marittima)
Prof. avv. Vincenzo Pepe (aspetti giuridici)

Il Segretario Generale
ing. Carlo Camilleri

Data: settembre 2005

INDICE

1. PREMESSA.....	Pag. 2
2. DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE	Pag. 2
2.1 IL MODELLO MONO-DIMENSIONALE IMPLEMENTATO.....	Pag. 3
2.2 IL MODULO IDRAULICO.....	Pag. 3
2.2.1 EQUAZIONI CHE GOVERNANO IL FENOMENO.....	Pag. 3
2.3 SOLUZIONE DELLE EQUAZIONI	Pag. 5
2.3.1 DETERMINAZIONE DELLO SCHEMA DI CALCOLO.....	Pag. 5
2.3.2 VALUTAZIONE DEL TERMINE Sf (SLOPE FRICTION).....	Pag. 5
2.4 METODI UTILIZZATI PER LA RISOLUZIONE DEL SISTEMA DI EQUAZIONI.....	Pag. 6
2.4.1 TIME MARCHING APPROACH.....	Pag. 6
2.4.2 METODO DI NEWTON – RAPHSON.....	Pag. 7
2.5 CALCOLO DEI FLUSSI.....	Pag. 8
2.5.1 IL METODO HARTEN-LAX-VAN LEER.....	Pag. 8
2.5.2 CONDIZIONI AL CONTORNO.....	Pag. 10
2.6 IL MODELLO DI TRASPORTO SOLIDO.....	Pag. 10
2.7 I DATI NECESSARI PER IL MODELLO.....	Pag. 13
3. APPLICAZIONE DEL PROGRAMMA HEC-6 PER LA VALUTAZIONE DELLE PORTATE SOLIDE.....	Pag. 15
3.1.GENERALITÀ.....	Pag. 15
3.2. GEOMETRIA DELL'ALVEO.....	Pag. 16
3.3. IDRAULICA ED IDROLOGIA.....	Pag. 17
3.4. LE EQUAZIONI UTILIZZATE PER LA DETERMINAZIONE DEL PROFILO IDRAULICO.....	Pag. 17
3.5 PERDITE DI CARICO.....	Pag. 18
3.6. TRASPORTO SOLIDO.....	Pag. 19
3.7 LE EQUAZIONI DEL TRASPORTO SOLIDO.....	Pag. 19
3.8 LE SIMULAZIONI EFFETTUATE.....	Pag. 22

1 PREMESSA

Nella presente relazione, si sintetizzano le attività svolte, nell'ambito del *Piano Stralcio per l'Erosione Costiera* e relativamente “*Trasporto Solido – Idraulica Fluviale*”, direttamente coordinate dal Prof. Ing. Domenico Pianese, Ordinario di Costruzioni Idrauliche presso la Facoltà di Ingegneria dell'Università di Napoli Federico II,

2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE

Negli ultimi anni la fascia costiera ricadente nell'area di competenza dell'Autorità di Bacino Sinistra Sele è stata interessata dall'alterazione dei naturali equilibri dinamici a causa di interventi antropici connessi all'uso del suolo ed alla difesa idrogeologica e della realizzazione di infrastrutture ed opere portuali. Tali mutamenti hanno prodotto fenomeni di erosione della costa.

Allo scopo di predisporre una strategia di interventi razionali a difesa del litorale è necessario lo studio della dinamica evolutiva di tali fenomeni erosivi e l'identificazione ed interpretazione delle relazioni esistenti tra i fenomeni naturali, le attività antropiche e le infrastrutture esistenti.

Ciò nondimeno, lo studio dell'evoluzione del litorale non può prescindere dall'analisi del trasporto solido fluviale e dalla quantificazione dell'apporto solido medio annuo che può pervenire all'area costiera.

A tal fine, nelle fasi precedenti dello studio è stato implementato un modello matematico unidimensionale capace di valutare le tendenze evolutive di breve e lungo termine dell'alveo considerato e di stimare la capacità di trasporto solido per classi granulometriche.

Le informazioni necessarie al modello matematico implementato sono i rilievi plano-altimetrici dei corsi d'acqua, le caratteristiche geometriche, l'ubicazione delle opere presenti e le curve granulometriche del materiale presente sul fondo alveo.

Allo stato attuale, il modello è stato testato, per verificarne la robustezza, precisione e velocità di convergenza sia con riferimento alle informazioni già disponibili per il fiume Testene che con riferimento alle informazioni, del tutto preliminari in quanto attualmente oggetto di approfondimenti, già disponibili per il fiume Alento. I risultati ottenuti possono essere considerati senz'altro soddisfacenti, anche se i tempi necessari sia per la simulazione idraulica che per la valutazione del trasporto solido risultano abbastanza sostenuti a causa delle tolleranze imposte per la convergenza.

2.1. Il modello mono-dimensionale implementato.

Il modello implementato è costituito, sostanzialmente, da due moduli: un primo modulo di moto permanente che consente di valutare, per un assegnato valore della portata defluente in alveo, i tiranti idrici, le velocità medie e gli sforzi di trascinamento lungo i diversi tronchi; ed un secondo modulo per la valutazione delle portate solide e delle variazioni delle quote di fondo alveo.

Le variazioni delle quote di fondo alveo sono valutate indipendentemente dalle caratteristiche idrauliche della corrente e successivamente ad esse, essendo il modello proposto del tipo disaccoppiato. Infatti, le equazioni relative ai sedimenti vengono disaccoppiate dalle equazioni di continuità e del moto dell'acqua. Ciò, perché, nell'ambito di un intervallo temporale $\Delta t_{\text{sedimenti}}$, si ritengono trascurabili gli effetti indotti dalle variazioni di fondo alveo sui livelli idrici e sulle velocità della corrente.

2.2. Il modulo idraulico.

Nel modulo idraulico le equazioni che governano i fenomeni di propagazione vengono scritte in forma conservativa ed integrale. La tecnica di risoluzione numerica applicata alle equazioni è quella del Metodo ai Volumi Finiti (FVM), che può essere visto come un metodo di discretizzazione diretta delle equazioni scritte in forma integrale. Il metodo utilizzato è anche in grado di individuare ed interpretare le discontinuità delle variabili s e Q che si verificano in corrispondenza dei risalti idraulici. L'approccio della scrittura delle equazioni in forma integrale si presenta molto robusto e preciso, e la tecnica di risoluzione numerica è anch'essa robusta ed affidabile (FVM).

2.2.1 Equazioni che governano il fenomeno.

In una corrente a pelo libero, nella quale le componenti verticali e trasversali delle velocità siano trascurabili, le equazioni del moto possono essere scritte valutando la sola componente nella direzione longitudinale.

Si ha, così, uno schema mono-dimensionale in cui, ipotizzando che le pressioni varino con legge idrostatica lungo la verticale e le sezioni trasversali del canale rimangano costanti, il moto del fluido può essere descritto da due variabili: sezione idrica σ e portata liquida Q funzioni delle due variabili indipendenti: x e t .

Nella scrittura delle equazioni del moto si sono utilizzati coefficienti di ragguaglio al fine di portare in conto la disuniformità della distribuzione delle pressioni lungo la verticale.

Nel modello proposto, la descrizione del campo di moto viene eseguita utilizzando due leggi fisiche, il principio di conservazione della massa ed il principio di conservazione della quantità di

moto, in quanto le variabili descrittive del moto non sono continue, come ad esempio in presenza di risalti idraulici.

In tali condizioni, il moto di una corrente a superficie libera in condizioni di moto vario è descritto dalle seguenti equazioni, scritte in forma differenziale:

$$\frac{\partial \sigma}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{\sigma} + K \cdot g \cdot \sigma \cdot \zeta \right) = g \cdot \sigma \cdot (i - Sf) \quad (2)$$

dove:

- a. σ = sezione idrica;
- b. Q = portata liquida;
- ζ = profondità del baricentro della sezione idrica;
- c. x = ascissa curvilinea;
- d. t = variabile temporale;
- e. K = fattore correttivo della spinta idrostatica (*Yen, 1973 e 1975*) introdotto allo scopo di portare in conto l'effetto delle pendenze di fondo e la non idrosticità nella distribuzione delle pressioni; $K = \cos^2 \theta$ dove θ = inclinazione del fondo sull'orizzontale;
- f. g = accelerazione di gravità;
- g. i = pendenza del fondo lungo la direzione x ;
- h. Sf = "slope friction".

La prima equazione traduce la continuità del fluido, l'altra è l'equazione del moto lungo l'asse x .

Usando la notazione matriciale le due equazioni su riportate si possono scrivere:

$$\frac{\partial \vec{q}}{\partial t} + \frac{\partial \vec{f}(\vec{q})}{\partial x} = \vec{b}(\vec{q})$$

dove:

$$\vec{q} = \begin{bmatrix} \sigma \\ Q \end{bmatrix}$$

$$\vec{f}(\vec{q}) = \begin{bmatrix} Q \\ \frac{Q^2}{\sigma} + K \cdot g \cdot \sigma \cdot \zeta \end{bmatrix}$$

$$\vec{b}(\vec{q}) = \begin{bmatrix} 0 \\ g \cdot \sigma \cdot (i - Sf) \end{bmatrix}$$

Il termine \vec{q} rappresenta il vettore colonna delle incognite; il secondo termine rappresenta il flusso di \vec{q} calcolato nella direzione x ; infine l'ultimo termine rappresenta il vettore colonna dei termini noti.

2.3. Soluzione delle equazioni

2.3.1 Determinazione dello schema di calcolo.

Il metodo dei volumi finiti (FVM) fa coincidere il volume finito in cui si è suddiviso il dominio col volume rispetto a cui si scrivono le equazioni stesse. Nel caso di un modello monodimensionale, il grigliato di calcolo è ottenuto dall'interpolazione delle sezioni del rilievo plano-altimetrico dell'alveo. Ogni tronco ottenuto costituisce un volume finito di controllo ed è delimitato da due sezioni consecutive.

A tal fine è stata implementata una routine interna al modello idraulico capace di generare per interpolazione un numero di sezioni maggiore di quello fornito dal rilievo, una volta note le caratteristiche geometriche di queste ultime. Fissata la lunghezza di ogni singolo tronco in cui si vuole suddividere la complessiva lunghezza del corso d'acqua, la routine riesce ad individuare le sezioni del rilievo disposte a monte e valle, che costituiscono i dati di input, e crea delle nuove sezioni interpolando i punti geometrici delle sezioni note. I nuovi tronchi generati sono delimitati a monte e a valle dalle nuove sezioni e/o da quelle del rilievo a secondo della loro lunghezza progressiva. La scelta del passo di interpolazione delle sezioni viene eseguita in riferimento alle lunghezze originarie del rilievo, scegliendo un passo che sia minore della lunghezza più piccola del rilievo. A questo punto è possibile calcolare per interpolazione la quota di fondo nel centro tratto e la pendenza di fondo secondo la direzione longitudinale.

$$i_s = -\frac{dz}{ds} = \tan \vartheta$$

Il tipo di approccio utilizzato consente di considerare anche sezioni dalla geometria irregolare.

2.3.2 Valutazione del termine Sf (slope friction).

Nel caso di correnti idriche a superficie libera, la slope friction viene in genera stimata con la formula di Chezy o con quella di Gauckler – Strickler, che vengono applicate forzatamente a condizioni di moto vario e non uniforme.

Utilizzando la formula di Chezy si ha:

$$S_f = \frac{v^2}{K_{Ch}^2 \cdot R} = \frac{v \cdot |v|}{K_{Ch}^2 \cdot R}$$

dove v è la velocità media valutata nel centro tratto; R è il raggio idraulico; K_{Ch} è il coefficiente di scabrezza di Chezy.

Utilizzando la formula di Gauckler – Strickler si ha:

$$S_f = \frac{v^2}{K_s^2 \cdot R^{4/3}} = \frac{v \cdot |v|}{K_s^2 \cdot R^{4/3}}$$

dove v è la velocità media valutata nel centro tratto; R è il raggio idraulico; K_{Ch} è il coefficiente di scabrezza di Gauckler – Strickler.

È da notare che in entrambe le espressioni la slope friction assume lo stesso segno della velocità media.

2.4 Metodi utilizzati per la risoluzione del sistema di equazioni.

Le equazioni di conservazione della massa (1) e di conservazione della quantità di moto (2) vengono scritte per tutti i tratti in cui è stato suddiviso il corso d'acqua, pertanto il sistema risolutivo del problema è costituito dalle $2n$ equazioni in $2n$ incognite, essendo n il numero complessivo dei tratti individuati. Per la risoluzione numerica del sistema di equazioni si è preferito far riferimento a due diversi metodi: il “time \square n erodi approach” e il metodo di Newton – Raphson.

2.4.1 Time marching approach.

Il metodo del “time \square n erodi approach” proposto vale in generale per il moto vario, ma nel caso in esame si è proceduto ad imporre la costanza nel tempo delle condizioni al contorno nelle sezioni di monte e di valle, il che consente di ricostruire un profilo di moto permanente.

I tiranti di primo tentativo sono quelli ottenuti considerando condizioni di moto uniforme. Pertanto, quello che il modello è in grado di simulare con questo approccio è un moto permanente che tende asintoticamente al moto vario, ma risulta anche capace di simulare un moto vario in senso stretto.

Le equazioni sono state scritte in forma esplicita; tutte le caratteristiche idrauliche vengono calcolate all'istante $t+\Delta t$ a partire dai valori assunti dalle stesse nell'istante precedente t . Un metodo esplicito risulta da preferire ad un metodo implicito allorquando le equazioni che governano il fenomeno ammettono soluzioni discontinue ed il problema è dominato dalla propagazione di onde con forti gradienti di flusso.

In genere un metodo esplicito risulta stabile se si soddisfa la condizione di Courant sul rapporto tra i valori degli intervalli temporali e spaziali di calcolo Δt e Δx .

La condizione di Courant impone che:

$$\frac{\Delta t}{\Delta x} \cdot c \leq \alpha$$

esplicitando rispetto al Δt si ha

$$\Delta t \leq \alpha \cdot \frac{\Delta x}{c}$$

dove c è la celerità di propagazione dei disturbi in una corrente a pelo libero. Poiché Δx e c sono variabili tratto per tratto, occorre ricercare la condizione per cui Δt sia minimo. La condizione di stabilità dovrebbe risultare verificata già ponendo $\alpha = 1$; nelle simulazioni effettuate si è avuto modo di osservare che per garantire la stabilità del metodo occorre porre $\alpha = 0.5$ quando si verificano forti gradienti delle caratteristiche idrauliche, ad esempio in presenza di un risalto idraulico.

Per la risoluzione delle equazioni differenziali ordinarie alla base del modello è stato necessario utilizzare un metodo appropriato, capace di garantire precisione dei risultati e rapidità di risoluzione. A tale scopo si è provveduto ad implementare il metodo di Eulero, caratterizzato da una precisione del secondo ordine.

Nel metodo di Eulero data un'equazione differenziale del 1° ordine:

$$\frac{dy}{dt} = f(y, t)$$

la formula risolutiva ha la seguente espressione:

$$y(t_0 + \Delta t) = y(t_0) + \Delta t \cdot f(y_0, t_0)$$

per cui la soluzione all'istante successivo si ottiene facilmente sulla base dei valori delle variabili note all'istante precedente.

Questo procedimento viene applicato a tutte le $2n$ equazioni nelle $2n$ incognite che formano il sistema risolutivo del problema. Il calcolo si arresta allorquando gli scarti esistenti tra i valori assunti dalle variabili in ogni singolo tratto all'istante di calcolo precedente e quello successivo sono inferiori ad un valore limite fissato a priori (10^{-7}).

2.4.2 Metodo di Newton – Raphson.

Il metodo di “Newton – Raphson” proposto vale in generale per il moto permanente, in cui si considerano invariabili nel tempo le caratteristiche idrauliche. Partendo da tiranti di primo tentativo, ottenuti da condizioni di moto uniforme, si passa a scrivere il sistema di equazioni da risolvere. Esso è un sistema di equazioni lineari, caratterizzato da una matrice dei coefficienti sparsa e non

simmetrica. Per la risoluzione di questo sistema si utilizza il solutore proposto da S.K. Gupta & K.K. Tanji (1977). Esso viene utilizzato dopo aver costruito lo Jacobiano dei coefficienti del sistema ed una matrice di appoggio, ottenuta dallo Jacobiano con l'eliminazione di tutti gli elementi nulli. Le soluzioni del sistema fornite dal solutore vengono corrette a mezzo di un coefficiente di rilassamento, che serve a garantire una maggiore stabilità; esso risulta variabile tra 0,1 e 0,9, con valori più bassi nelle prime iterazioni e valori crescenti nelle iterazioni successive. Calcolata una soluzione del sistema, si procede al controllo della convergenza valutando gli scarti esistenti tra i valori assunti dalle soluzioni, in ogni singolo tratto, all'iterazione di calcolo precedente e quella attuale e controllando che tali scarti siano inferiori ad un valore limite.

Trattandosi di un moto permanente non è necessario rispettare la condizione di Courant sul rapporto tra i valori degli intervalli temporali e spaziali di calcolo Δt e Δx .

Le equazioni che governano il moto si semplificano nel seguente modo:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad \text{essendo} \quad \frac{\partial \sigma}{\partial t} = 0 \quad (1')$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{\sigma} + K \cdot g \cdot \sigma \cdot \zeta \right) = g \cdot \sigma \cdot (i - Sf) \quad \text{essendo} \quad \frac{\partial Q}{\partial t} = 0 \quad (2')$$

2.5 Calcolo dei flussi.

Nel *Metodo dei Volumi Finiti*, nel calcolare il flusso F tra due tratti contigui si presenta un problema alla Riemann, in quanto sulle sezioni di monte e di valle che delimitano il singolo tronco di calcolo, le incognite σ e Q assumono in generale un valore diverso a destra e a sinistra pari al valore di centro tratto. Tali discontinuità potrebbero essere significative, come accade in corrispondenza dei risalti idraulici, in presenza di roll – waves o in conseguenza della propagazione di fronti di shock che si osservano durante un fenomeno di “*dam – break*”. Nel modello sviluppato si è utilizzato come risolutore approssimato dei problemi alla Riemann il metodo Harten-Lax-van Leer come proposto da Fraccarollo e Toro (1995). Tale metodo è in grado di dare un'espressione diversa al flusso a secondo del tipo di corrente, individuando, in base all'analisi delle celerità di propagazione dei disturbi, 3 distinti casi.

2.5.1 Il metodo Harten-Lax-van Leer.

Nel caso mono – dimensionale la struttura della soluzione di un problema di Riemann è quella indicata in *Figura 1*, dove u = velocità e $\Phi = gh$ = potenziale. Le due onde, che si propagano con

velocità S_L ed S_R individuano nel piano $x-t$ tre “stati” a secondo della posizione del punto rappresentativo della corrente.

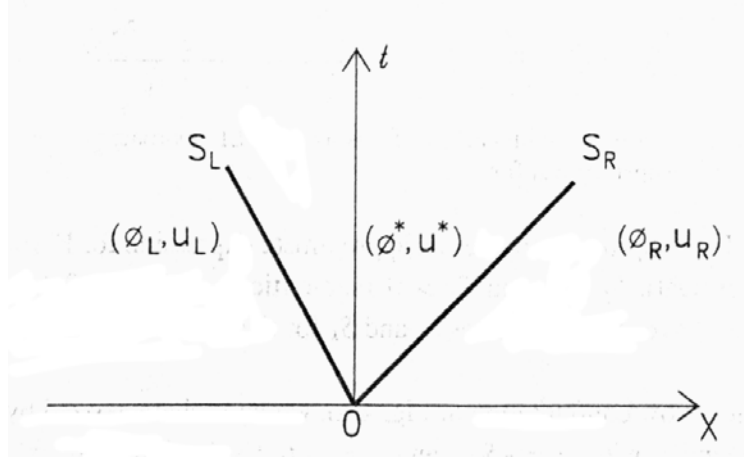


Figura 1

Il sistema di equazioni è del tipo iperbolico con due autovalori reali e distinti:

$$\lambda_1 = u - \sqrt{\Phi}$$

$$\lambda_2 = u + \sqrt{\Phi}$$

Si individuano, così, tre zone nel piano $x-t$.

Nell'approccio di HLL le celerità delle onde (“wave speeds”) S_L ed S_R vengono stimate nel seguente modo:

$$S_L = \min\{u_L - \sqrt{\Phi_L}, u_R - \sqrt{\Phi_R}\}$$

$$S_R = \max\{u_R + \sqrt{\Phi_R}, u_L + \sqrt{\Phi_L}\}$$

L'espressione del flusso intercella F_{LR} dipende dal segno delle celerità:

- i. nel caso “right supercritical” ($S_L \geq 0$) entrambe le onde principali sono dirette verso destra ed il flusso va calcolato coi valori di sinistra delle caratteristiche idrauliche:

$$F_{LR} = F_L = \begin{Bmatrix} F_{1L} \\ F_{2L} \end{Bmatrix}$$

- j. nel caso “left supercritical” ($S_R \leq 0$) entrambe le onde principali sono dirette verso sinistra, ed il flusso va calcolato coi valori di destra delle caratteristiche idrauliche:

$$F_{LR} = F_R = \begin{Bmatrix} F_{1R} \\ F_{2R} \end{Bmatrix}$$

- k. nel caso di una corrente ipocritica ($S_L < 0$ e $S_R > 0$) il flusso assume un'espressione particolare e diversa:

$$F_{LR} = F^* = \begin{Bmatrix} F_1^* \\ F_2^* \end{Bmatrix}$$

con:

$$F^* = \frac{S_R F_L - S_L F_R + S_L S_R (u_R - u_L)}{S_R - S_L}$$

Esplicitando le componenti del flusso si ha:

$$F = \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} Q \\ \frac{Q^2}{\sigma} + g \cdot \sigma \cdot \zeta \end{Bmatrix}$$

2.5.2. Condizioni al contorno.

Nelle sezioni di monte e di valle dell'alveo oggetto di studio, i valori di h e Q vanno imposti tramite idonee condizioni al contorno.

Il numero delle condizioni da assegnare dipende dal tipo di corrente che si instaura: lenta o veloce. In caso di corrente lenta, vanno assegnate due condizioni al contorno, una a monte imponendo il valore di Q ed una a valle imponendo il valore di h . Se la corrente è veloce le condizioni al contorno vanno assegnate entrambe a monte, imponendo i valori di h e Q . Può anche presentarsi il caso in cui la corrente sia caratterizzata al suo interno da un risalto, per cui è veloce in un primo tratto di monte per poi diventare lenta, in tal caso è necessario imporre due condizioni al contorno a monte per la corrente veloce ed una a valle per la corrente lenta. Il modello idraulico proposto, analizzando il valore del numero di Froude sia a monte che a valle, è in grado di determinare in maniera automatica quante condizioni al contorno bisogna assegnare in entrambe le posizioni.

2.6 Il modello di trasporto solido.

Le variazioni delle quote di fondo alveo sono valutate indipendentemente dalle caratteristiche idrauliche della corrente e successivamente ad esse, essendo il modello proposto del tipo disaccoppiato. Le equazioni relative ai sedimenti vengono disaccoppiate dalle equazioni di continuità e del moto dell'acqua. Ciò, perché, nell'ambito di un intervallo temporale Δt , si ritengono trascurabili gli effetti indotti dalle variazioni di fondo alveo sui livelli idrici e sulle velocità della corrente.

In pratica, nell'ambito di ciascun intervallo temporale di calcolo Δt si procede utilizzando uno schema frazionato a tre stadi:

- nel primo stadio, ipotizzato il fondo e le sezioni trasversali come fisse, per l'assegnato valore di portata in ingresso al tronco preso in esame, si valutano i tiranti, le velocità e gli sforzi tangenziali agenti sul fondo;
- nel secondo stadio, in base alla conoscenza delle grandezze calcolate nel primo stadio, si valutano tronco per tronco le portate solide al fondo ed in sospensione e da queste le portate solide totali;
- nel terzo ed ultimo stadio, utilizzando l'equazione di continuità dei sedimenti, si valuta la variazione delle sezioni trasversali e, quindi, delle quote di fondo alveo.

Nella riproduzione dei processi evolutivi, l'intervallo temporale $\Delta t_{\text{sedimenti}}$ di calcolo deve essere valutato considerando le caratteristiche geometriche dell'alveo, le caratteristiche idrauliche della corrente che in esso si instaura, nonché le caratteristiche granulometriche di fondo alveo. Pertanto fissato un valore massimo di $\Delta t_{\text{sedimenti}}$ pari 86.400s, esso viene confrontato di volta in volta con il

valore di $\Delta t_{\text{sedimenti}}$ calcolato con l'espressione $\Delta t_{\text{calcolato_sedimenti}} = \frac{L_{\text{tratto}}}{|c|}$; ove la celerità dei

sedimenti è valutata utilizzando la formula di De Vries (1965): $c_{\text{sedimenti}} = \frac{v \cdot \frac{\partial Q_{\text{solida}}}{\partial v}}{h \cdot (1 - F_r)}$.

L'intervallo temporale posto a base di ogni singola simulazione di trasporto solido corrisponde al valore più piccolo tra i due, quello massimo e quello calcolato.

La valutazione della capacità di trasporto solido viene effettuata considerando separatamente il trasporto solido al fondo e quello in sospensione; a tale scopo si è fatto ricorso alle formule proposte da van Rijn (1984), valide per materiale uniforme con diametro variabile tra 100 e 2.000 mm.

In particolare, la portata solida al fondo viene valutata mediante la formula:

$$Q_{s_fondo} = \left\{ \frac{0.005 \cdot v \cdot h \cdot B \cdot (v - v_{cr})}{(g \cdot (s - 1) \cdot D_{50})^{0.5}} \right\}^{2.4} \cdot \left(\frac{D_{50}}{h} \right)^{1.2}$$

nella quale D_{50} è il diametro rappresentativo del materiale del fondo, v e h sono le caratteristiche idrauliche della corrente, v_{cr} è la velocità critica in corrispondenza della quale si ha l'inizio del moto; s è il rapporto tra il peso specifico del materiale solido e quello dell'acqua; B è la larghezza della parte centrale della sezione, interessata dal trasporto di fondo.

A sua volta la portata solida in sospensione è valutata mediante la seguente espressione:

$$Q_{s_sospensione} = \left(\frac{12}{5} \right) \cdot Q_{s_fondo} \cdot \left(\frac{D_{50}}{h} \right)^{-0.2} \cdot d_*^{-0.6}$$

nella quale $d_* = D_{50} \cdot \left(\frac{(s-1) \cdot g}{\nu^2} \right)^{1/3}$ essendo ν la viscosità cinematica dell'acqua.

La capacità di trasporto è legata al valore velocità critica che assume due diverse formulazioni in funzione del valore di D_{50}

$$\text{per } D_{50} < 500 \text{ mm} \quad v_{cr} = 0.19 \cdot D_{50}^{0.1} \cdot \text{Log} \left(\frac{12 \cdot \chi}{3 \cdot D_{90}} \right)$$

$$\text{per } D_{50} > 500 \text{ mm} \quad v_{cr} = 8.5 \cdot D_{50}^{0.6} \cdot \text{Log} \left(\frac{12 \cdot \chi}{3 \cdot D_{90}} \right)$$

dove $D_{90} = 3.5 \cdot D_{50}$ e χ rappresenta il perimetro bagnato.

Il vantaggio delle formule di van Rijn consiste nell'esprimere la capacità di trasporto solido al fondo ed in sospensione direttamente in funzione della velocità media della corrente e del tirante idrico, permettendo di svincolarsi dalla necessità, insita in quasi tutte le formule di trasporto solido, di portare in conto gli sforzi tangenziali agenti sul contorno.

Una volta calcolati i valori delle portate solide convogliate al fondo ed in sospensione, la portata solida Q_{tot} complessivamente convogliata sarà data $Q_{tot} = Q_{s_fondo} + Q_{s_sospensione}$.

Le condizioni al contorno si specificano solo per la sezione di monte, per la quale si assegnano i valori della $Q_{s_sospensione}$ e Q_{s_fondo} .

Note le portate solide totali, si passa a valutare il volume di materiale solido che transita in ogni tratto nell'intervallo temporale $\Delta t_{sedimenti}$ e l'area Γ_1 occupata da materiale solido in ciascuna sezione all'istante iniziale. Tale area viene valutata rispetto ad una quota di riferimento e compresa tra il punto più in alto a sinistra e quello più in alto a destra della zona centrale. L'evoluzione delle sezioni trasversali viene valutata con l'equazione di continuità dei sedimenti che scritta in termini volumetrici assume la seguente formulazione:

$$\Gamma_2 = \Gamma_1 - \frac{1}{1-p} \cdot \frac{V_j - V_{j-1}}{\Delta x}$$

dove Γ_2 è l'area occupata da materiale solido all'istante successivo; Δx è la distanza tra due successive sezioni; p è la porosità del fondo; V_j è il volume solido che transita nel tronco successivo; V_{j-1} è il volume solido che transita nel tronco precedente.

La procedura seguita per l'individuazione delle variazioni indotte sulle quote di fondo può essere così riassunta:

- una volta valutata la porta solida complessivamente convogliata dalla corrente in ciascun tronco, in base all'applicazione dell'equazione della continuità globale, si sono valutate le variazioni delle sezioni trasversali;
- note, per ciascuna sezione, le inclinazioni delle sponde rispetto alla verticale, si sono valutate, per tentativi le variazioni della quota di fondo, nell'ipotesi che le suddette inclinazioni rimanessero inalterate tanto in fase di erosione quanto in fase di deposito.

Procedendo in tal modo si è tenuto conto solo grossolanamente dell'effettiva variazione della geometria delle sezioni. Pur tuttavia, si è ritenuto che la procedura adottata, molto semplice dal punto di vista concettuale e di modellazione, non conducesse a risultati sostanzialmente meno significativi di quelli ottenibili utilizzando una modellazione delle variazioni della geometria dell'alveo capace di portare in conto anche i fenomeni di erosione e di franamento delle sponde.

2.7 I dati necessari per il modello.

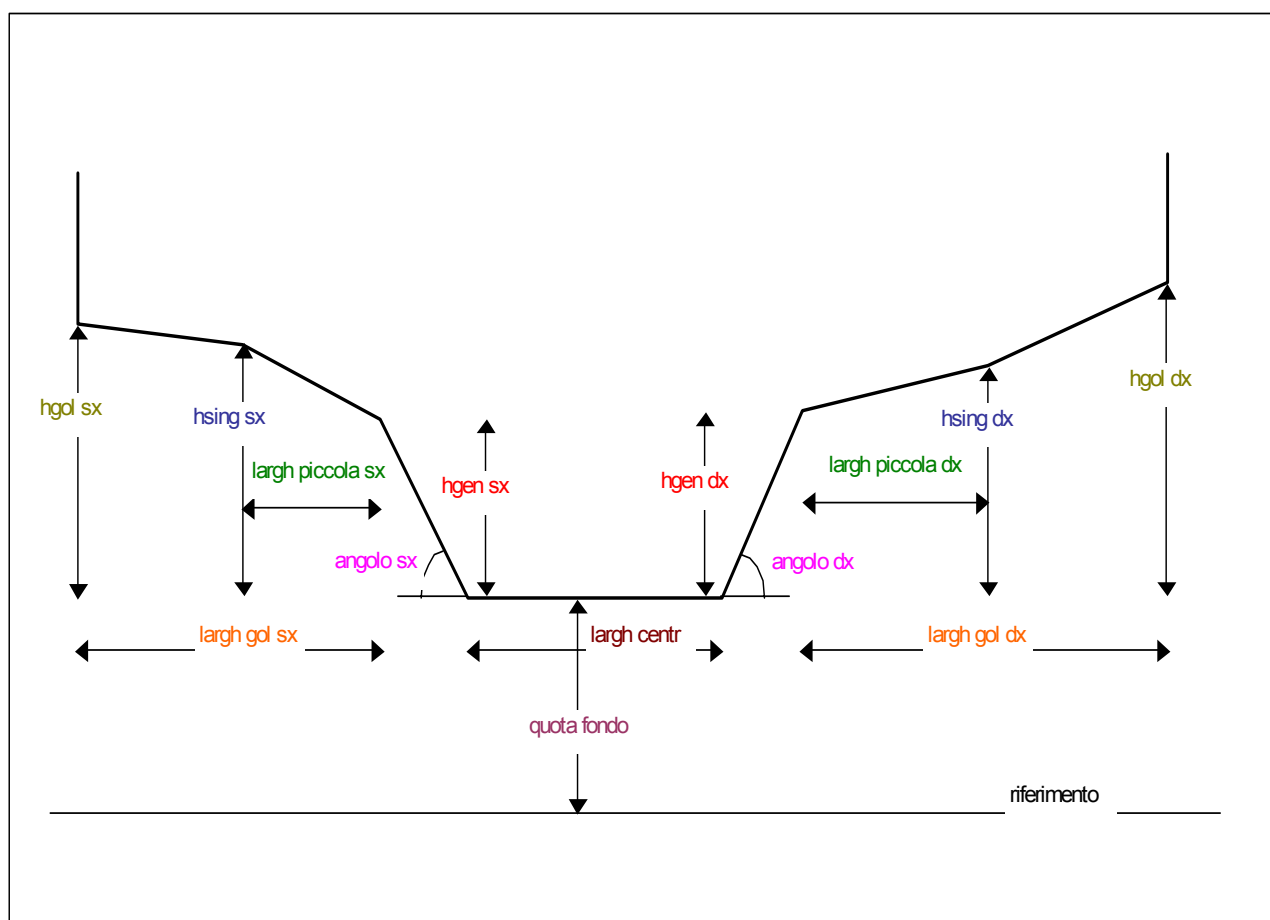
Per l'utilizzazione del modello di evoluzione fluviale è necessaria una gran mole di dati a partire dai quali è possibile ricostruire le condizioni iniziali e al contorno necessarie per la risoluzione del sistema di equazioni risolvente del problema idraulico e del trasporto solido. In particolare, per quanto riguarda le condizioni iniziali risultano indispensabili sia la conoscenza della geometria dell'alveo che delle quote e delle granulometrie di fondo all'inizio della simulazione che si intende effettuare. In riferimento, invece, alle condizioni al contorno necessarie per la risoluzione delle equazioni, esse dipendono dal tipo di corrente che si instaura; in caso di corrente lenta, vanno assegnate due condizioni al contorno, una a monte imponendo un valore di portata liquida Q ed una a valle imponendo un valore di h , che nella fattispecie può essere o il tirante di moto uniforme o il livello medio del mare. Nel caso di corrente veloce le condizioni al contorno vanno assegnate entrambe a monte, imponendo un valore di portata liquida ed un valore del tirante ad esempio quello relativo alle condizioni di stato critico.

Può anche verificarsi il caso in cui la corrente sia caratterizzata al suo interno da un risalto, per cui è veloce in un primo tratto di monte per poi diventare lenta, in tal caso è necessario vanno imposte due condizioni al contorno a monte per la corrente veloce ed una a valle per la corrente lenta.

In definitiva, i dati necessari per l'utilizzazione del modello sono, da un lato, quelli relativi ai valori della portata defluente nei vari tronchi, alle caratteristiche geometriche dell'alveo e alle granulometrie presenti sul fondo all'inizio della simulazione; dall'altro il materiale solido in arrivo da monte.

La geometria dell'alveo viene fornita attraverso i rilievi piano – altimetrici, pertanto devono essere noti il profilo longitudinale dell'asta fluviale, le sezioni trasversali con l'indicazione dell'ubicazione planimetrica e delle coordinate dei punti battuti.

Avendo a disposizione tutte queste informazioni si passa a schematizzare geometricamente le



sezioni rilevate come rappresentato nella figura precedente.

Tale schematizzazione geometrica si rende necessaria ai fini della valutazione della variazione delle sezioni trasversali indotte da fenomeni di erosione e/o deposito; il modello implementato, infatti, è capace di valutare le variazioni della quota di fondo nell'ipotesi che l'inclinazione delle sponde rispetto alla verticale rimanga costanti. In tal modo la variazione della geometria della sezione viene ottenuta come una traslazione rigida del fondo.

In genere, le sezioni fornite dai rilievi sono ubicate a distanze notevoli l'una dall'altra. Tuttavia il modello è capace, utilizzando un'apposita routine, di interpolare le sezioni del rilievo, immesse secondo lo schema precedente, ottenendo un numero maggiore di sezioni di calcolo con una spaziatura che può essere fissata a priori. L'interpolazione delle sezioni è necessaria in quanto il

modello utilizza come tecnica di risoluzione numerica delle equazioni il Metodo ai Volumi Finiti (FVM) che necessita di Δx piuttosto piccoli, per non compromettere la stabilità del metodo.

3. APPLICAZIONE DEL PROGRAMMA HEC-6 PER LA VALUTAZIONE DELLE PORTATE SOLIDE.

3.1. Generalità.

Allo scopo di effettuare una prima valutazione delle portate solide defluenti nelle sezioni terminali dei bacini dei fiumi esaminati, si è utilizzato il modello unidimensionale noto con l'acronimo di HEC-6 (Hydraulic Engineering Center), in grado di modellare i fenomeni di trasporto solido e di evoluzione d'alveo che si sviluppano, sia sulla media che sulla lunga scala temporale, lungo le aste fluviali.

Tale modello non risulta del tutto affidabile nei casi in cui, come succede nei corsi d'acqua suddetti, la corrente viene ad attraversare, più volte, lo stato critico, con passaggi da veloce a lenta e viceversa. Ciò in quanto il codice, essendo basato sull'equazione di conservazione dell'energia e non su quella di conservazione della quantità di moto, non è in grado di simulare il passaggio da corrente veloce a lenta, che avviene tramite un risalto idraulico. In alternativa alla simulazione della presenza di un eventuale risalto, il codice impone il passaggio attraverso una condizione di stato critico.

Il software HEC-6 utilizza, per la sua simulazione dei fenomeni di erosione/deposito, una tecnica "disaccoppiata" (o, per meglio dire, "frazionata"): in base a tale approccio, le variazioni delle quote di fondo alveo sono valutate indipendentemente dalle caratteristiche idrauliche della corrente e successivamente ad esse. Pertanto, le equazioni relative al trasporto dei sedimenti e all'evoluzione morfologica delle quote di fondo alveo vengono disaccoppiate dalle equazioni di continuità e del moto dell'acqua.

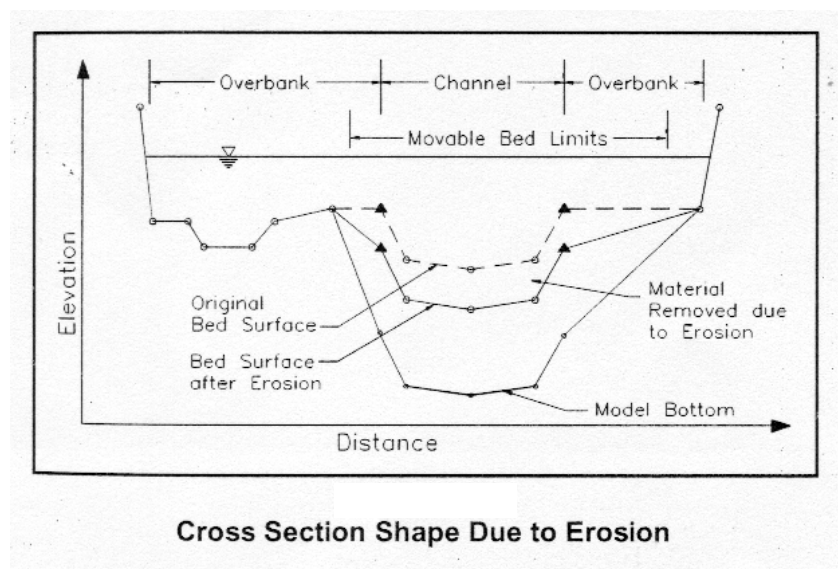
Assegnato un n erodibi in ingresso al tratto d'alveo da esaminare, HEC-6 lo schematizza come una successione di moti permanenti, in ognuno dei quali si può considerare un valore costante della portata defluente, con valori eventualmente diversi da un intervallo temporale di calcolo all'altro. Più in particolare, essendo stato concepito per simulazioni a lunga scala temporale, come dato di input è possibile fornire un n erodibi con portate costanti in intervalli di tempo di giorni o frazioni di giorni. Utilizzando l'equazione di continuità dei sedimenti vengono calcolate, in ogni intervallo di tempo ed in ogni sezione, le variazioni della portata solida totale, del volume delle diverse frazioni granulometriche erose o depositate, della superficie libera della corrente e delle quote di fondo delle sezioni.

L'immissione dei dati consta di tre parti: una prima parte, di gestione della geometria del corso d'acqua; una seconda, relativa all'idraulica ed all'idrologia e, l'ultima, relativa ai sedimenti.

Va tenuto presente che HEC-6 utilizza le unità di misura del sistema anglosassone. Pertanto, le lunghezze sono espresse in piedi, le portate in cfs (piedi cubici al secondo), etc.

3.2 Geometria dell'alveo.

La geometria dell'alveo da analizzare viene descritta attraverso le sezioni di cui sono specificate le coordinate dei punti (ascisse e ordinate) e le distanze di ognuna dalla successiva. Fissati gli estremi sinistro e destro entro cui può avvenire l'erosione, la deformazione complessiva della sezione si concretizza in una traslazione rigida dei punti del fondo interni ai due estremi, con un raccordo delle sponde laterali, come schematizzato nella Figura seguente:



E' anche possibile definire dei limiti per il fondo mobile diversi dagli estremi della sezione, il che risulta utile nei casi in cui, come ad esempio in quello del tratto terminale del F. Testene, le banchine laterali si presentano rivestite.

Ogni sezione, poi, viene suddivisa in tre sottosezioni, una interna ("main channel") e due esterne ("left overbank" e "right overbank"), in ognuna delle quali è possibile specificare un diverso coefficiente di scabrezza di Manning.

Infine, va indicata la massima profondità di erosione che si può avere in ogni sezione. Nei casi presi in esame, tale valore è stato settato, pressoché ovunque, a 30 piedi (circa 10 m), oppure a zero nel caso di soglia non erodibile.

Per l'immissione dei dati geometrici delle sezioni si è utilizzato il programma di creazione di files di input sviluppato, in linguaggio "Visual Basic 6.0", dall'ing. Iavarone, che si allega in calce alla presente relazione.

3.3 Idraulica ed idrologia.

Come si già avuti modo di dire in precedenza, l'idrogramma in ingresso al tronco da esaminare viene approssimato come una successione di portate in condizioni di moto permanente, ognuna delle quali è ipotizzata costante per una fissata durata. Il profilo di corrente viene valutato per ogni singola portata ed è risolto utilizzando le equazioni di continuità e dell'energia. La perdita di carico continua viene valutata a mezzo della formula di Manning; il coefficiente di scabrezza n di Manning può, a sua volta, essere assunto costante o variabile per le tre sottosezioni in cui è suddivisa la sezione. Le perdite di energia localizzate derivanti da fenomeni di espansione e/o contrazione delle sezioni vengono portate in conto a mezzo di opportuni coefficienti, moltiplicativi dell'altezza cinetica della corrente. Per l'esecuzione dei calcoli, risulta inoltre necessario specificare, ulteriormente, una condizione al contorno di valle, che viene stabilita o imponendo un valore del tirante (ad esempio, quello dato dalla differenza tra la quota media del mare e il fondo della sezione terminale) o fornendo la curva h - Q .

3.4. Le equazioni utilizzate per la determinazione del profilo idraulico.

Per la valutazione della capacità di trasporto solido è necessario conoscere velocità della corrente liquida, profondità, larghezza ed energia persa. L'equazione dell'energia è risolta noti i parametri idraulici in ogni singola sezione:

$$W \cdot S_2 + \frac{\alpha_2 \cdot V_2^2}{2 \cdot g} = W \cdot S_1 + \frac{\alpha_1 \cdot V_1^2}{2 \cdot g} + h_e \quad (3)$$

dove:

g = accelerazione di gravità;

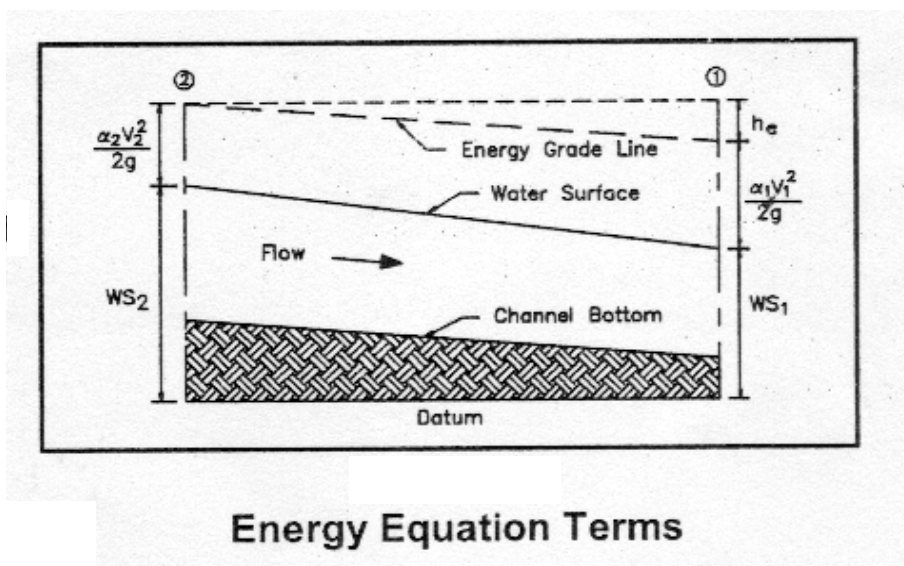
h_e = energia persa;

V_1, V_2 = velocità medie nelle sezioni delimitanti ogni singolo tratto;

$W \cdot S_1, W \cdot S_2$ = quota della superficie libera della corrente nelle sezioni delimitanti di ogni singolo tratto;

α_1, α_2 = coefficienti correttivi dell'altezza cinetica che tengono conto dell'effettiva distribuzione delle velocità nelle sezioni di monte e valle.

La seguente figura illustra i termini dell'equazione (3)



3.5 Perdite di carico.

Nota la geometria dell'alveo, le caratteristiche geometriche delle sezioni e la lunghezza dei tratti, l'energia persa h_e viene valutata come somma di due termini: il primo relativo alle perdite di carico continue ed il secondo a quelle di tipo localizzate:

$$h_e = h_f + h_o \quad (4)$$

Le sezioni trasversali vengono suddivise in sottosezioni costituite da strisce verticali, aventi le medesime caratteristiche idrauliche nella direzione del flusso.

Le perdite di carico continue vengono così calcolate:

$$h_f = \left[\frac{Q}{K'_t} \right]^2$$

nella quale:

Q = portata liquida;

$$K'_t = \sum_{j=1}^{NSS} \left[\frac{1,49}{n_j} \right] \cdot \frac{(A_2 + A_1)_j \cdot \left[\frac{R_2 + R_1}{2} \right]^{2/3}}{L_j^{1/2}}$$

essendo:

A_1, A_2 = aree delle sezioni idriche delimitanti il tratto in esame;

NSS = numero totale delle sottosezioni in cui è stata suddivisa la singola sezione trasversale;

L_j = lunghezza della j-esima striscia tra due sottosezioni;

n = coefficiente di scabrezza di Manning;

R_1, R_2 = raggi idraulici delle sezioni di monte e valle del tratto considerato.

Le perdite di carico localizzate vengono così calcolate:

$$h_o = C_L \cdot \left[\frac{\alpha_2 \cdot v_2^2}{2 \cdot g} - \frac{\alpha_1 \cdot v_1^2}{2 \cdot g} \right]$$

dove C_L è un coefficiente che tiene conto delle espansioni e contrazioni laterali delle sezioni, e che assume valore positivo nel caso di espansione e negativo nel caso di contrazioni.

3.6. Trasporto solido.

La portata solida in ingresso è correlata alla portata liquida. I valori delle portate solide corrispondenti alle portate liquide per la sezione di monte dell'asta principale e per le sezioni di immissione dei tributari vanno forniti come dati di input, insieme alla curva granulometrica del materiale che si immette. Per la valutazione del trasporto solido lungo l'alveo, poi, è necessario fornire al programma la granulometrica del materiale di fondo alveo, immettendo le curve granulometriche in diverse sezioni; il programma stesso, poi, provvede ad effettuare in automatico l'interpolazione tra le curve delle sezioni successive.

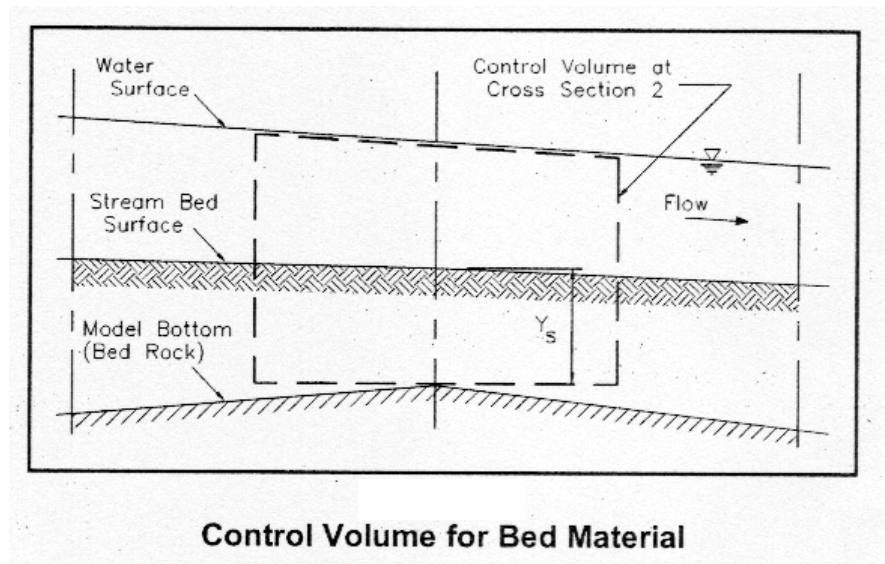
E' possibile utilizzare diverse formule di trasporto solido. Nelle simulazioni effettuate si è scelto di utilizzare la formula di Meyer-Peter & Muller (1948).

HEC-6 utilizza la classificazione granulometrica dell'American Geophysical Union, secondo la quale si individuano le seguenti classi: argilla (particelle con $d < 0.004\text{mm}$), quattro classi per il limo ($0.004 < d < 0.0625\text{mm}$), cinque classi per la sabbia ($0.0625 < d < 2.0\text{mm}$), cinque classi per la ghiaia ($2.0 < d < 64\text{mm}$), due classi per i ciottoli ($64 < d < 256\text{mm}$), tre classi per i massi ($256 < d < 2048\text{mm}$).

Note le caratteristiche idrauliche fornite dal profilo idraulico precedentemente risolto, la capacità di trasporto solido viene valutata in ogni sezione. Per ogni singolo valore della portata liquida in ingresso viene calcolato il corrispondente valore della portata solida a valle.

3.7 Le equazioni del trasporto solido.

Ogni singola sezione rappresenta un volume di controllo, la cui larghezza coincide con la larghezza della parte centrale della sezione e la cui profondità si estende dalla quota di pelo libero allo strato roccioso o altra formazione geologica che costituisce lo strato superficiale del letto. Qualora non dovesse esistere lo strato roccioso delimitante l'altezza massima di erosione del letto, HEC-6 assegna un'altezza massima di default. La seguente figura illustra lo schema adottato per la definizione del volume di controllo:



L'equazione di continuità dei sedimenti viene scritta per questo volume di controllo, mentre l'equazione dell'energia viene scritta per ogni singola sezione.

Utilizzando un valore approssimato e medio della sezione, il volume solido viene fornito dalla seguente espressione:

$$V_{sed} = B_o \cdot Y_s \cdot \frac{L_u + L_d}{2}$$

dove:

B_o = larghezza del letto;

L_u, L_d = lunghezza del tratto di monte e di quello di valle;

V_{sed} = volume dei sedimenti con riferimento al volume di controllo;

Y_s = profondità del volume di controllo;

Il volume liquido per un tirante pari a D assume la seguente espressione:

$$V_{sed} = B_o \cdot D \cdot \frac{L_u + L_d}{2}$$

L'ipotesi posta a base dell'equazione di continuità dei solidi è che la concentrazione del materiale solido sospeso sia trascurabile, quindi non è necessario specificare la concentrazione di materiale solido costituente il letto nel volume di controllo.

I parametri idraulici, la granulometria del letto e la capacità di trasporto solido vengono considerate uniformemente distribuiti lungo il volume di controllo.

Le variazioni delle quote di fondo alveo vengono valutate con l'equazione di continuità dei sedimenti :

$$\frac{\partial G}{\partial x} + B_o \cdot \frac{\partial Y_s}{\partial t} = 0 \quad (5)$$

dove:

B_0 = larghezza del letto;

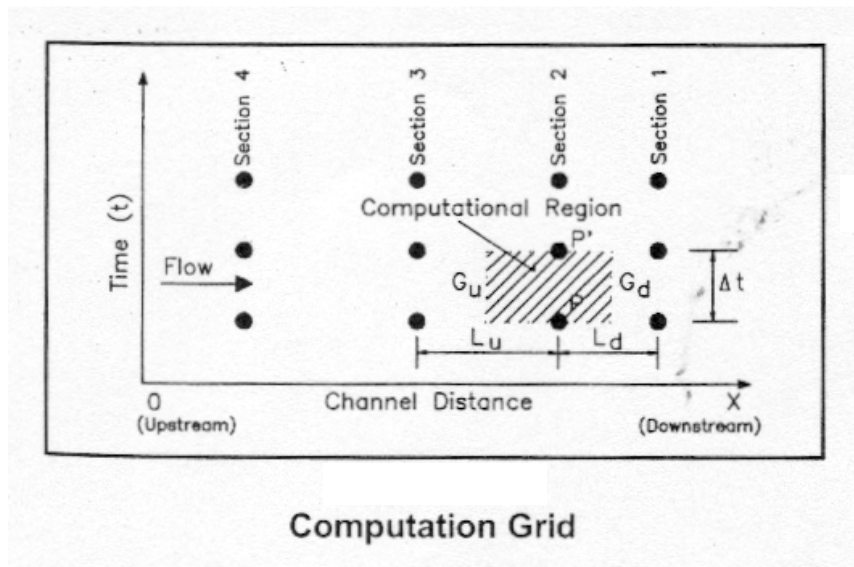
t = istante di calcolo;

G = portata media di sedimenti (ft^3/sec) nell'intervallo temporale di calcolo Δt ;

x = ascissa curvilinea;

Y_s = profondità dei sedimenti nel volume di controllo.

La (5) va risolta con il metodo delle differenze finite utilizzando un opportuno grigliato di calcolo come rappresentato nella figura successiva:



La formulazione della (5) alle differenze finite è stata fornita da *Exner*:

$$\frac{G_d - G_u}{0.5 \cdot (L_d + L_u)} + \frac{B_{sp} \cdot (Y'_{sp} - Y_{sp})}{\Delta t} = 0 \quad (6)$$

da cui ricavando Y'_{sp} si ha:

$$Y'_{sp} = Y_{sp} - \frac{\Delta t}{0.5 \cdot B_{sp}} \cdot \frac{G_d - G_u}{L_d - L_u}$$

dove:

B_{sp} = larghezza del letto valutata nel punto P, centro del volume di controllo individuato;

G_u, G_d = portate solide valutate in corrispondenza delle sezioni di monte e valle delimitanti il volume di controllo;

L_u, L_d = lunghezze dei tratti tra le sezioni di monte e valle;

Y_{sp}, Y'_{sp} = profondità dei sedimenti al primo e al successivo passo temporale;

0.5 = coefficiente di forma del volume di controllo dipendente dalle larghezze delle sezioni di monte e valle e dalla lunghezze dei tratti;

Δt = intervallo temporale di calcolo.

La capacità di trasporto solido per ogni singola \square ranulometrica viene valutata per assegnate condizioni idrauliche all'inizio dell'intervallo di tempo e non viene ricalcolata durante questo intervallo. Si suppone, infatti, l'intervallo temporale di calcolo tanto piccolo che le variazioni delle quote del letto indotte da fenomeni di erosione o deposito non influenzano il trasporto solido.

E' possibile specificare il numero di iterazioni da effettuare nella risoluzione dell'equazione di Exner.

3.8 Le simulazioni effettuate.

Alla presente relazione vengono allegate le stampe dei files di output relativi alle simulazioni effettuate per i bacini di Testene, Solofrone, Fiumarella, nonché alla rete idrografica formata da Alento, Palistro e Badolato.

In tutti i casi esaminati, si è ipotizzato di avere una portata liquida costante e pari a $1/20$ della portata media annua, supponendo tale valore come rappresentativo della portata di modellamento.

Le simulazioni sono state eseguite a lunga scala temporale, per un periodo pari a 1 anno, ma suddiviso in 14400 step di calcolo. Il numero di iterazioni sull'equazione di Exner è stato posto pari a 200.

Per l'apporto solido dai versanti si sono utilizzati i dati forniti dall'ing. Fabio Vivenzio relativi al calcolo con il modello USPED.

Nelle stampe dei files di output, per brevità, non si sono inseriti i risultati relativi ai singoli step di calcolo, ma si sono inserite soltanto le tabelle riassuntive finali. Inizialmente vengono riportate le caratteristiche geometriche e granulometriche delle sezioni, le caratteristiche degli ingressi di materiale solido, i volumi di controllo di materiale solido nelle diverse sezioni. Seguono, poi, le tabelle riassuntive del calcolo di trasporto solido. In esse è possibile leggere le variazioni del fondo alveo, il trasporto solido che si ha alle diverse sezioni, espresso in tonnellate al giorno e suddiviso tra sabbie e limi, nonché le tonnellate di sedimenti che attraversano ogni sezione ed il volume di sedimenti eroso o depositato.

Si riportano, infine, i profili finali degli alvei, ed i parametri relativi ai sedimenti, così come forniti dall'output del programma HEC-6.

Qui di seguito si sono sintetizzati in una tabella i risultati relativi all'apporto solido alla foce di ognuno dei suddetti corsi d'acqua, in quanto rilevanti ai fini dello studio dei fenomeni erosivi lungo la costa.

	Apporto solido alla foce (<i>tonn/giorno</i>)	
	Limo	Sabbia
Solofrone	<i>8</i>	<i>49</i>
Testene	<i>1</i>	<i>32</i>
Alento	<i>3</i>	<i>0</i>
Fiumarella	<i>1</i>	<i>166</i>

Più in dettaglio, si riportano di seguito gli apporti solidi alla foce relativi ad ognuno dei corsi d'acqua esaminati, suddivisi per classi granulometriche:

<u>SOLOFRONE</u>	
Classe granulometrica	Apporto solido (tonn/giorno)
Limo molto fine (0.004-0.008 mm)	1.38
Limo fine (0.008-0.016 mm)	0.80
Limo medio (0.016-0.031 mm)	2.41
Limo grosso (0.031-0.062 mm)	3.44
Sabbia molto fine (0.062-0.125 mm)	3.58
Sabbia fine (0.125-0.25 mm)	6.78
Sabbia media (0.25-0.5 mm)	8.32
Sabbia grossa (0.5-1 mm)	10.22
Sabbia molto grossa (1-2 mm)	20.25

<u>TESTENE</u>	
Classe granulometrica	Apporto solido (tonn/giorno)
Limo grosso (0.031-0.062 mm)	0.63
Sabbia molto fine (0.062-0.125 mm)	0.33
Sabbia fine (0.125-0.25 mm)	0.83
Sabbia media (0.25-0.5 mm)	2.49
Sabbia grossa (0.5-1 mm)	4.15
Sabbia molto grossa (1-2 mm)	6.40
Ghiaia molto fine (2-4 mm)	6.75
Ghiaia fine (4-8 mm)	10.81

<u>ALENTO</u>	
Classe granulometrica	Apporto solido (tonn/giorno)
Limo molto fine (0.004-0.008 mm)	0.63
Limo fine (0.008-0.016 mm)	0
Limo medio (0.016-0.031 mm)	0
Limo grosso (0.031-0.062 mm)	1.94
Sabbia molto fine (0.062-0.125 mm)	0.14

<u>FIUMARELLA</u>	
Classe granulometrica	Apporto solido (tonn/giorno)
Limo grosso (0.031-0.062 mm)	0.57
Sabbia molto fine (0.062-0.125 mm)	1.01
Sabbia fine (0.125-0.25 mm)	1.80
Sabbia media (0.25-0.5 mm)	4.66
Sabbia grossa (0.5-1 mm)	6.62
Sabbia molto grossa (1-2 mm)	11.49
Ghiaia molto fine (2-4 mm)	14.62
Ghiaia fine (4-8 mm)	127.12