

Capitolo 1

I sedimenti coesivi

Premessa

I sedimenti fluviali si differenziano in base ai processi temporali di formazione, all'origine dei materiali costituenti e alla modalità con cui essi si generano; questi aspetti influenzano le proprietà delle singole particelle e la loro distribuzione spaziale. L'evoluzione temporale della formazione delle particelle solide è dovuta alla disaggregazione delle rocce metamorfiche o ignee per opera di azioni di natura fisica, meccanica, chimica e biologica. Le variazioni dello stato tensionale delle rocce, le espansioni e le contrazioni dei materiali, l'aumento della pressione interna, lo sfaldamento delle superfici, le attività organiche e le azioni antropiche sono tra i processi riconducibili alle azioni meccaniche. L'idrolisi, la chelazione, lo scambio cationico, l'ossido-riduzione e la carbonatazione sono, invece, tra i processi di origine chimica.

Per individuare una particella solida si fa riferimento alle seguenti caratteristiche: geometriche, di forma, gravimetriche e volumetriche, chimiche e mineralogiche, meccaniche, termiche ed elettromagnetiche.

Le proprietà di un deposito di sedimenti variano in funzione delle caratteristiche delle particelle solide che lo compongono, dell'ambiente e delle modalità in cui si forma. Una prima distinzione si può effettuare in base alla porosità, all'indice dei vuoti, al grado di saturazione, al contenuto d'acqua, al peso specifico del deposito bagnato, asciutto e saturo, alle relative densità e all'angolo di riposo, definito come l'angolo massimo che un ammasso forma con l'orizzontale quando è disposto in mucchio.

La curva granulometrica descrive, invece, la distribuzione delle dimensioni delle particelle del deposito. Le sue grandezze caratteristiche sono il diametro mediano, d_{50} , il coefficiente di uniformità, D_u , e il coefficiente di curvatura, D_c :

$$D_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (1.1)$$

$$D_c = \frac{d_{30}^2}{d_{10} \cdot d_{60}} \quad (1.2)$$

dove d_{10} , d_{30} e d_{60} indicano rispettivamente i diametri dei granelli tali che il 10%, il 30% e il 60% in peso dei sedimenti è di dimensione inferiore.

Le particelle solide come i limi o le argille sono caratterizzate, quando vengono immerse in acqua, dalla presenza di forze di superficie attrattive e repulsive, o da forze interparticellari, la cui risultante può dare luogo alla forza di coesione. Essa è definita come la capacità dei terreni di resistere agli sforzi di trazione e può variare da 10 kPa a 0,5 MPa. Le forze in gioco sono dovute all'attrazione elettrostatica tra gli elementi lamellari costituenti il materiale argilloso. All'aumentare del contenuto d'acqua e, quindi, della pressione interstiziale o neutrale, la struttura flocculare diviene instabile e, pertanto, si riduce sensibilmente la compattezza della massa pelitica, che assume un comportamento plastico e in alcuni casi anche fluido-viscoso. I depositi composti da sabbia e ghiaia sono invece non coesivi (o incoerenti).

1.1 I sedimenti coesivi

La presenza delle azioni coesive può essere valutata in funzione delle dimensioni delle particelle. Le forze che si sviluppano all'interno dei sedimenti coesivi sono di origine attrattiva e repulsiva, che aumentano al diminuire del diametro e all'aumentare dell'area specifica. Le forze interparticellari, per bassi valori del diametro, possono prevalere su quelle gravitazionali, dando così una caratteristica coesiva al materiale. I limi possono avere comportamento coesivo e non coesivo; ciò che distingue questi due aspetti è il diametro. Il comportamento coesivo, infatti, occorre per particelle di dimensioni inferiori ai 2 μm , mentre quello non coesivo per particelle di dimensioni tra 2 e 60 μm .

Van Rijn (2007) considera cinque classi di particelle solide di diametro inferiore a 2 mm:

- sabbia grossolana (comportamento incoerente): 0,5÷2 mm;
- sabbia fine (comportamento incoerente): 0,062÷0,5 mm;
- limo (comportamento leggermente coesivo): 32÷62 μm ;
- limo fine (comportamento abbastanza coesivo): 8÷32 μm ;
- argilla e limo molto fine (comportamento molto coesivo): 8 μm ;

Da tale classificazione è, pertanto, possibile individuare i seguenti valori-limite di diametro:

- $d_{sab} = 62 \mu\text{m}$
- $d_{lim} = 32 \mu\text{m}$
- $d_{arg} = 8 \mu\text{m}$

Essi caratterizzano un materiale incoerente se $d > d_{sab}$, leggermente coesivo se $d_{sab} < d < d_{lim}$, abbastanza coesivo se $d_{lim} < d < d_{arg}$ e molto coesivo se $d < d_{arg}$. Simili classificazioni possono essere adottate per stabilire la presenza o meno di coesione nei depositi composti da materiale uniforme e completamente inorganico.

Altre variabili che possono influenzare il comportamento del materiale sono le caratteristiche chimiche possedute dall'acqua interstiziale che circonda le superfici del deposito, le quali producono una variazione di intensità delle forze repulsive e attrattive interparticellari di superficie. Le principali caratteristiche sono il pH della soluzione, la concentrazione dei sali e quella totale degli ioni e la loro valenza, che viene valutata attraverso il SAR (*Sodium Adsorption Ratio*) e mediante la capacità di scambio cationico, CSC , definita nel prosieguo. Il SAR è definito come segue:

$$SAR = \frac{Na^{+}}{\sqrt{0,5 \cdot Ca^{++} + Mg^{++}}} \quad (1.3)$$

Altri parametri che definiscono le caratteristiche di un deposito coesivo sono la porosità, la densità e la variazione delle stesse lungo lo spessore del deposito, che forniscono informazioni sul grado di stratificazione.

Berlamont *et al.* (1993) individuano ventotto parametri per la definizione dei materiali coesivi in base alle loro proprietà:

1. parametri fisico-chimici del fluido in moto sul deposito:

- clorinità;
- temperatura;
- contenuto di ossigeno disciolto;
- potenziale *redox*;
- pH ;
- ioni Na-, K-, Mg-, Ca-, Fe-, Al-;
- SAR ;
- concentrazione dei sedimenti in sospensione;

2. proprietà fisico-chimiche del deposito:

- clorinità;
- temperatura;
- contenuto di ossigeno disciolto;
- potenziale *redox*;
- pH ;

- ioni Na-, K-, Mg-, Ca-, Fe-, Al-;
 - capacità di scambio cationico (*CSC*);
 - contenuto di material organico;
 - presenza di gas;
 - densità del deposito e suo andamento con lo spessore;
 - area specifica;
 - composizione mineralogica;
 - distribuzione granulometrica e contenuto di sabbia;
3. caratteristiche della strutture del deposito:
- consolidazione: curva di consolidazione e profilo di densità; permeabilità; pressione interstiziale e tensione effettiva;
 - parametri geologici: tensioni limite di plasticizzazione; viscosità di Bingham; angolo di riposo;
 - limiti di Atterberg;
4. interazione acqua-sedimenti:
- velocità di sedimentazione: funzione della concentrazione dei sedimenti in sospensione, della dimensione dei flocculi e della salinità;
 - tensione critica dei sedimenti;
 - tensione critica ad erosione;
 - tasso di erosione.

La capacità di scambio cationico è definito come l'indice di appiccicosità posseduta dalla superficie delle particelle solide.

Parametri aggiuntivi che intervengono nella caratterizzazione di un deposito erosivo sono: la densità e la variazione della stessa lungo lo spessore del deposito.

1.2 Forze interparticellari

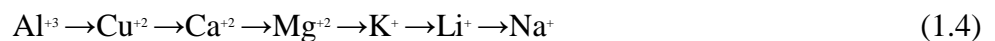
La struttura di un deposito coesivo dipende dalla presenza delle forze interparticellari, che si esplicano lungo le superfici di contatto delle particelle solide. A loro volta, esse sono funzione dell'elettrolisi acquosa, del doppio strato elettrico, della capacità di scambio cationico, degli effetti del *pH* e della concentrazione di ioni sulla carica superficiale di una particella solida.

L'elettrolisi acquosa è determinata dalla presenza di sola acqua e aria tra i pori dei depositi. L'acqua interstiziale contiene molecole di varia natura e, quando un atomo di esse, inizialmente neutro, acquista o cede uno o più elettroni, si determina la produzione di ioni. Analizzando una molecola di NaCl, il campo elettrico prodotto dai cationi di Na^+ attrae la molecola d'acqua

attraverso l'ossigeno O^{2-} ; invece gli ioni Cl^- attraggono la molecola dipolare d'acqua dalla parte dell'idrogeno. Le molecole d'acqua dunque si insinuano tra il sodio e il cloro, portando alla suddivisione delle molecole di $NaCl$. Le molecole d'acqua circondano i due ioni, scambiandosi con le altre molecole d'acqua libere. La soluzione che si forma è definita 'elettrolito'.

Il doppio strato elettrico è caratterizzato dalla presenza di determinati ioni sulla superficie di una particella, che, essendo immersa in acqua e possedendo cariche elettriche, assorbe i relativi controioni. Per effetto dell'agitazione termica le molecole d'acqua cercano di idratare i controioni, facendo in modo che parte di essi rimangano in prossimità della superficie della particella, formando dei complessi sferici interni; altri, invece, subendo con maggiore intensità il processo di idratazione, compongono dei complessi esterni. I controioni idrati rimangono nei pressi della superficie solida per effetto della loro carica, mentre gli ioni e i cationi idrati, che si diffondono in prossimità della superficie solida, formano il doppio strato elettrico (*double layer*). Le molecole di acqua nelle vicinanze della particella solida risentono del campo elettrico, esercitato dalla superficie del solido, ruotando per allineare i loro atomi di idrogeno se essa è carica negativamente. Se la presenza di sali è elevata si forma un elettrolito denso che si dispone a una certa distanza dalla superficie solida oltre il doppio strato elettrico.

La capacità di scambio cationico è dettata dal movimento dei controioni idrati, che, uscendo o entrando nel doppio strato elettrico, possono essere sostituiti da altri ioni. Tale sostituzione è controllata dalle agitazioni di natura termica, dalla quantità di ioni e controioni presenti in soluzione. La valenza e la dimensione degli ioni, inoltre, stabiliscono la priorità nello scambio degli stessi. Maggiore, infatti, è la valenza, maggiori sono le forze di attrazione di Coulomb; minore è la dimensione, maggiore risulta la vicinanza tra le superfici degli ioni. I principali ioni che si possono scambiare, in ordine decrescente della capacità di scambio posseduta, sono:



Il numero di cariche scambiabili è definito capacità di scambio cationico o controionico (*CSC*) (*counterion/cation exchange capacity*) del minerale. Esso è legato alla densità di carica superficiale ρ_{cs} e all'area specifica della particella solida S_a :

$$CSC \approx S_a \cdot \rho_{cs} \text{ (C/g o } m_{eq}/\text{g)} \quad (1.5)$$

La sua unità di misura è il Coulomb o i milliequivalenti per unità di massa del deposito asciutto.

Il *pH* ha influenza sulla capacità di scambio cationico, poiché da esso dipende la densità di carica superficiale. Una relazione empirica tra il *pH* e la *CSC*, per terreni aventi caratteristiche mineralogiche simili, è stata sviluppata da Foth e Turk (1972):

$$pH = \frac{a' - CSC - HS}{b'} \quad (1.6)$$

dove a' e b' variano in funzione della natura mineralogica del deposito e HS è il valore percentuale del grado di saturazione di ioni H:

$$HS = \frac{\text{concentrazione di acidi scambiati}}{CSC} \cdot 100 \quad (1.7)$$

Analogamente, si può determinare il grado di saturazione basica (GSB):

$$GSB = \frac{\text{concentrazione di basi scambiati}}{CSC} \cdot 100 \quad (1.8)$$

Il pH e la concentrazione di ioni influenzano la carica superficiale della particella solida e il potenziale dei diversi strati. Una particella solida immersa in una soluzione acquosa possiede delle cariche superficiali che possono essere compensate da ioni assorbiti. La protonazione è l'assorbimento di ioni H^+ da parte della superficie caricata negativamente, per la presenza di ioni OH^- ; viceversa, l'assorbimento di ioni OH^- da parte di superfici con prevalenza di H^+ è detto deprotonazione.

Le forze di superficie interagenti tra due particelle solide di forma e dimensioni generiche, che non superano qualche decina di μm , immerse in una soluzione acquosa e poste a una generica distanza tra loro, possono essere di natura repulsive e attrattive. L'origine di tali azioni è dovuta alla presenza di alcuni processi chimici, che a loro volta permettono la formazione di una serie di forze elettrostatiche. L'entità delle forze è funzione delle seguenti caratteristiche delle particelle: il materiale, la forma e le dimensioni, oltre ad alcune caratteristiche chimiche della soluzione in cui si trovano. Tra queste si annoverano il pH , la concentrazione e valenza totale di ioni, il potenziale presente in prossimità delle due superfici e la temperatura, che si riduce all'aumentare della distanza di separazione. Le forze repulsive sono dovute al doppio strato elettrico e alla repulsione tra due corpi aventi stessa carica o forze di Born. Quelle attrattive sono le forze di van der Waals e la forza di Coulomb.

Per capire l'origine delle forze occorre fare riferimento a una serie di processi di natura chimica ed elettrochimica. I doppi strati elettrici di due particelle solide immerse in una soluzione acquosa, entrando in contatto tra loro, interagiscono spostando parte delle molecole d'acqua e degli ioni idrati in essi presenti. Il campo elettrico, che si genera in tali strati, dà luogo a forze di repulsione. L'entità di queste azioni, a parità di altre condizioni, è legata alle caratteristiche della struttura del doppio strato e al suo spessore, quindi alla lunghezza di Debye-Huckel.

Per le superfici solide aventi stessa carica elettrica esistono anche azioni repulsive, la cui origine è simile a quella delle forze di Coulomb che si generano tra due cariche elettriche di stesso segno. Queste azioni sono note come forze di Born; esse dipendono dalla forma e dalla dimensione delle particelle solide, riducendosi di intensità all'aumentare della distanza di separazione dei due corpi.

L'ulteriore azione repulsiva ha origine per il fenomeno dell'idratazione chimica, per questo definita forza di idratazione. Considerando, infatti, le particelle solide come un soluto immerso in un solvente polare (costituito da acqua), si ha un'interazione che permette la formazione di uno schieramento di molecole d'acqua lungo la superficie di separazione compresa tra il solido e il solvente. La presenza di tali molecole libere d'acqua crea una schermatura, che causa lo sviluppo delle forze di idratazione. Le azioni repulsive tendono ad annullarsi quando la distanza di separazione tra due particelle solide supera qualche decina di Å. Le attrazioni intermolecolari deboli si rappresentano con le forze di van der Waals, che in chimica sono suddivise in tre categorie:

- forza dipolo-dipolo, se le molecole hanno dipoli permanenti che ne consentono la loro interazione;
- forza dipolo-dipolo indotto, se una o più molecole con dipolo permanente inducono un dipolo in una molecola o atomo apolare;
- forza di dispersione, se hanno origine per uno spostamento del centro delle cariche positive rispetto a quello delle cariche negative degli atomi, provocato dalla presenza di una fluttuazione delle stesse.

In questo modo, in un certo istante si forma un dipolo che induce un ulteriore dipolo in un altro atomo, cosicché anche due atomi o molecole apolari possono essere attratti tra loro.

La relazione più diffusa per il calcolo del potenziale è quella di Lennard-Jones, la cui origine è empirica. Nel caso in cui siano presenti due corpi composti da più molecole o atomi, la forza attrattiva di superficie si ottiene considerando i singoli contributi delle diverse coppie di molecole che interagiscono tra due corpi macroscopici. In tale circostanza il potenziale, $\Phi(r')$, che si genera tra due molecole, si ottiene dalla 1.9:

$$\Phi(r') = \frac{C_L}{r'^6} \quad (1.9)$$

dove: r' è la distanza intercorrente tra le singole molecole e C_L è una costante di interazione.

La forza di attrazione, $f(r')$, che si esplica tra due atomi è rappresentata, invece, dal gradiente del potenziale:

$$f(r') = -\nabla[\Phi(r')] \quad (1.10)$$

Dunque, la forza risultante attrattiva, F_{vdw} , è stata ricavata da Hamaker, avanzando le seguenti ipotesi:

- sovrapposizione degli effetti;
- continuità del corpo;
- uniformità del corpo: la densità per ogni corpo si mantiene costante su tutto il volume.

$$F_{vdw} = \rho_1 \rho_2 \int_{V_1} \int_{V_2} f(z) \cdot dV_2 \cdot dV_1 \quad (1.11)$$

dove $\rho_1 V_1$ e $\rho_2 V_2$ indicano rispettivamente il prodotto tra la densità e il volume di due corpi di generica forma.

La doppia integrazione di volume fornisce la ‘costante di Hamaker’, H :

$$H = \pi^2 \cdot C_L \cdot \rho_1 \cdot \rho_2 \quad (1.12)$$

Nel caso di particelle d’argilla o di limo, esse può essere determinata attraverso la teoria di Lifshitz E. M. (1956). Israelachvili (1992), per la stima della costante, si basa sull’adattamento dell’ipotesi di sovrapposizione degli effetti considerata da Hamaker, esprimendo H in funzione delle permittività elettriche nei mezzi che interagiscono, al variare della frequenza del campo elettromagnetico. La concentrazione c_0 di ioni può far variare la costante di Hamaker attraverso l’influenza che essa ha sulla permittività del mezzo. Nel caso di depositi in argilla o limi, la possibilità di ricavare una relazione tra H , c_0 , CSC , pH e SAR potrebbe aiutare a capire in che modo le forze di coesione contribuiscano alla resistenza all’erosione dei depositi coesivi.

1.3 Comportamento dei depositi di sola argilla e delle miscele coesive

Per le argille minerali Mahmood *et al.* (2001) dimostrano l’importanza di considerare forme delle singole particelle differenti da quella sferica. Le particelle di questi materiali si presentano in natura con una forma piatta esagonale, avente un proprio spessore. Le facce parallele di maggiore superficie hanno carica negativa permanente, mentre lungo i bordi le cariche elettriche sono positive.

Nei depositi costituiti solamente da argilla, le caratteristiche erosive variano al variare del tipo di legame esistente tra le singole particelle:

- F-F (*face to face*) interazione tra due facce piane;
- F-E (*face to edge*) interazione tra una faccia piana e un semicilindro di diametro pari allo spessore della particella di argilla;
- E-E (*edge to edge*) interazione tra due semicilindri di diametro pari allo spessore della particella di argilla.

Mahmood *et al.* (2001) proposero delle relazioni per le azioni di repulsione dovute al doppio strato elettrico, all’idratazione e alle forze di Born. Per determinare le forze di idratazione agenti tra due superfici piane, E_H , posti a una certa distanza, z , l’autore considerò la nota relazione dell’energia per unità di superficie:

$$E_H = K_1 \cdot l_c \cdot e^{-\frac{z}{l_c}} \quad (1.13)$$

in cui K_1 è una costante e l_c la lunghezza caratteristica della forza.

Per la valutazione delle forze di Born, utilizzò un'integrazione simile a quella sviluppata da Hamaker per il caso delle forze di van der Waals. L'energia di repulsione, E_B , è stata, quindi, ottenuta mediante la seguente relazione:

$$E_B = \frac{H \cdot \sigma_c^6}{7560} \cdot \left[\frac{8r + z_c}{(2r + z_c)^7} + \frac{6r - z_c}{z_c^7} \right] \quad (1.14)$$

dove: r indica il raggio della sfera, H la costante di Hamaker, σ_c il diametro caratteristico delle molecole e z_c è la distanza tra i due corpi. Mediante l'energia di repulsione è possibile ricavare il valore della forza di repulsione per unità di superficie.

Le forze repulsive, E_E^{LSA} , generate dalla presenza di un doppio strato elettrico sono state valutate facendo riferimento all'energia tra due corpi piani di potenziale ϕ_1 e ϕ_2 , valutata da Gregory (1975) attraverso la sovrapposizione degli effetti:

$$E_E^{LSA} = 32 \cdot \varepsilon_p \cdot L_D \left(\frac{K \cdot T}{e \cdot v_v} \right) \cdot \tanh \left(\frac{e \cdot v_v \cdot \phi_1}{4 \cdot K \cdot T} \right) \cdot \tanh \left(\frac{e \cdot v_v \cdot \phi_2}{4 \cdot K \cdot T} \right) \cdot \exp(-L_D \cdot z_c) \quad (1.15)$$

dove: ε_p indica la permittività del mezzo, K la costante di Boltzman, v_v la valenza degli ioni presenti nel doppio strato, L_D la lunghezza caratteristica di Debye-Hückel e T la temperatura assoluta.

Le forze di van der Waals sono state determinate mediante la procedura di Hamaker. In letteratura si ricorda la procedura di Israelachvili (1992).

1.4 Azioni interparticellari nei limi

Nei limi la valutazione delle singole azioni repulsive a causa dell'aumento dell'area specifica potrebbe risultare superflua; pertanto, si considera la sola forza per unità di superficie, dovuta al doppio strato elettrico, ricavata da Israelachvili (1992) per due corpi sferici di diametro d_c :

$$F_R = \frac{L_D \cdot \sigma^2}{\varepsilon_w \cdot d_c} \cdot \exp \left(-\frac{z_c}{L_D} \right) \quad (1.16)$$

dove L_D è la lunghezza caratteristica di Debye-Hückel, ε_w la permittività dell'acqua, σ il diametro di collisione e z_c la distanza tra i corpi.

Nel caso in cui le particelle superano la distanza di 10-20 Å, il principale contributo alla azioni interparticellari è dato dalla forze di van der Waals e dal doppio strato elettrico, trattata dalla teoria DLVO (Derjaguin, Landau, Verwey, Overbeek, 1940). Essa ci indica il legame quantitativo tra le forze per unità di superficie e la mutua distanza tra due particelle solide al variare della concentrazione totale degli elettroliti acquosi o degli ioni. Dalla Fig. 1.1, relativa alla teoria DLVO, si può vedere come all'aumentare della concentrazione c_0 si riducono le forze repulsive, finché le forze attrattive predominano a qualsiasi distanza di separazione.

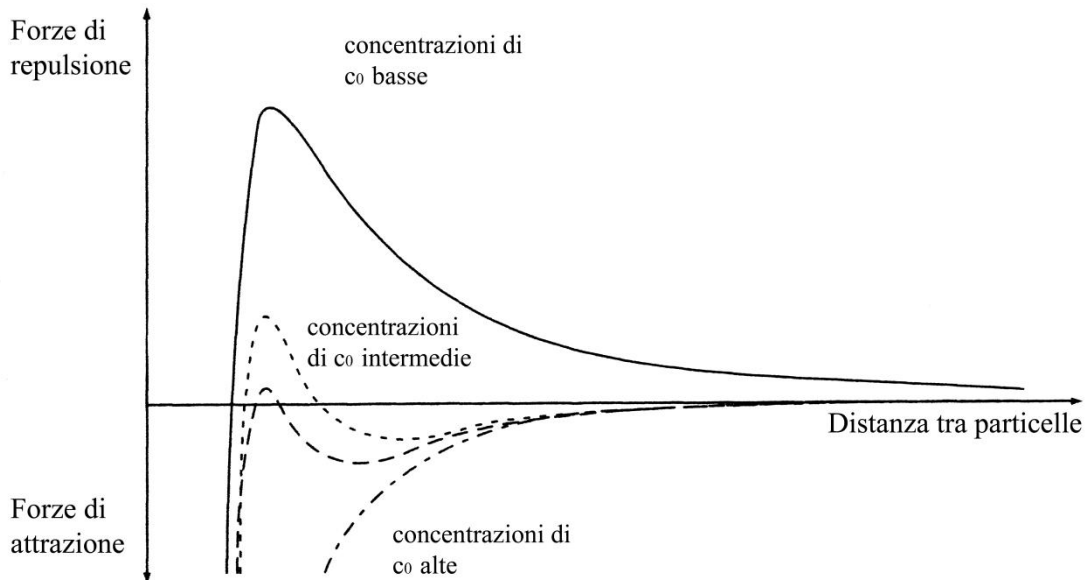


Figura 1.1. Forze interparticellari per unità di superficie (teoria DLVO) al variare della distanza di separazione e della concentrazione totale di ioni.

Tra le forze di superficie, infine, ricordiamo le forze di cementazione. Esse si attivano nei casi in cui sono presenti forze che tendono a far allontanare le particelle solide opportunamente cementate. Si può, quindi, considerare un diametro disposto intorno le particelle solide relativo a uno strato di materiale cementato, di spessore t_{cem} , che ci consente di determinare il diametro dell'area di contatto d_{cont} :

$$d_{cont} = 4 \cdot t_{cem} \cdot d_c \quad (1.17)$$

in cui d indica il diametro delle particelle solide.

La forza di attrazione, dunque, sarà:

$$F_{cem} = \pi \cdot t_{cem} \cdot d_c \cdot \sigma_{ten} \quad (1.18)$$

dove σ_{ten} indica la tensione di rottura a trazione.

1.5 Depositi di argilla

Le caratteristiche erosive variano in funzione del tipo di legame presente tra le singole particelle (F-F, F-E, E-E).

La struttura del deposito è principalmente influenzata dal pH e dalla concentrazione totale di ioni presente in acqua; infatti, per bassi valori di pH le facce delle particelle risultano caricate negativamente e i bordi positivamente. In questo caso, le forze elettrostatiche attrattive predominano sulle altre, favorendo il legame di tipo F-E. Un deposito in cui tale legame prevale, a parità di altre condizioni, presenta un maggiore volume e una densità inferiore rispetto agli altri casi, a causa dell'elevato spazio che occupano gli aggregati.

All'aumentare del pH , anche le cariche lungo i bordi divengono negative. Se il deposito è stato formato dalla sedimentazione di alte concentrazioni di particelle solide, le forze di van der Waals sovrastano quelle repulsive, facendo prevalere il legame di tipo F-F; si ha, quindi, un deposito più denso e compatto. Il legame E-E è relativo a una condizione intermedia, in cui possono essere presenti anche aggregazioni di tipo F-F e F-E, poiché non esiste una forza attrattiva o repulsiva che s'impone sulle altre. Nella Fig. 1.2 si riportano le diverse tipologie di interazione, così come ipotizzate da van Olphen (1977) e Hillier (1995), dove si distingue il caso della flocculazione, relativa all'associazione tra più particelle che formano dei flocculi, da quello dell'aggregazione, concernente l'unione tra più flocculi.

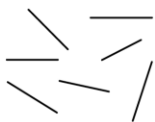
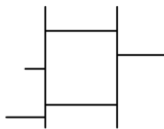
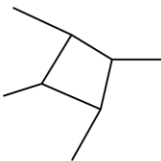

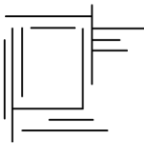


Singole particelle di argilla.			
Esempio di associazione tra singole particelle	Flocculazione tipo F-E 	Flocculazione tipo E-E 	Aggregazione tipo F-F 
Unione tra più flocculi e particelle.	Flocculazione tipo F-E e aggregazione tipo F-F 	Flocculazione tipo E-E e aggregazione tipo F-F 	Flocculazione tipo E-E e E-F e aggregazione tipo F-F 

Figura 1.2. Modalità di associazione tra le particelle di argilla
(Ravisangar *et al.*, 2005; van Olphen, 1977; Hillier, 1995).

Mahmood *et al.* (2001) valutarono sperimentalmente le singole azioni di attrazione e repulsione sopra elencate, con riferimento all'effettiva forma delle particelle di argilla e al tipo di interazione che può verificarsi. A parità di condizioni chimiche, le azioni attrattive risultarono maggiori per il legame F-F, per poi ridursi di intensità passando ai legami F-E e E-E. I massimi valori delle azioni repulsive e attrattive, inoltre, furono ottenuti per pH prossimo a 5. Ravisangar *et al.* (2005) utilizzarono caolinite della Georgia (USA) chimicamente inattiva ma reagente con acidi e basi (il cui grado industriale è indicato come *Hydrite Flat D*) e con distribuzione granulometrica ottenuta mediante una tecnica di centrifugazione. Essi studiarono l'influenza del pH e della concentrazione totale di ioni sulla struttura di un deposito argilloso. Per diametri inferiori a 2 μm essa assume la

forma piatta, esagonale e sottile, con spessore di 0,75 nm, mentre per diametri maggiori si ha una struttura costituita da un accumulo di particelle elementari opportunamente legate tra loro. Il deposito presentava una dimensione media delle particelle di 0,95 μm , il limite di liquidità era compreso tra 4,2 e 5,2, l'area specifica era pari a 7 m^2/g , valutata mediante la relazione di BET (Brunauer, Emmett e Teller, 1938) e basata sull'assorbimento isoterma di gas di azoto.

Le prime osservazioni sperimentali hanno indicato che, se la concentrazione totale di ioni è di 0,004 M con $\text{pH}=4,5$, le particelle si uniscono, formando dei flocculi e favorendo l'individuazione di una separazione tra la miscela e l'acqua chiarificata. M sta per molarità ovvero le moli di soluto presenti in un 1 litro di soluzione. Per valori, invece, compresi tra 0,004 M e $\text{pH}=8,8$, non si riesce a individuare una separazione tra acqua chiarificata e deposito. Tuttavia si può osservare una zona di deposito di particelle sedimentate che assumono una struttura di tipo F-F, con deposito più denso del precedente, che aumenta di spessore nel tempo con l'aumento delle particelle che sedimentano (Figura 1.3). Per valori di pH minori di 5,5, risulta più contenuta la variazione di densità con la profondità del deposito. Per concentrazione di 0,004 M e $\text{pH}=7,6$, la densità varia con gradiente maggiore rispetto al caso precedente, mentre per concentrazioni di 0,1 M il comportamento è analogo al caso del pH minore di 5,5. Gli autori hanno potuto sviluppare, dunque, le seguenti considerazioni: per bassi valori del pH esiste un legame di tipo F-E, poiché le facce sono caricate negativamente e i bordi positivamente; pertanto, prevalendo le attrazioni tra cariche opposte rispetto a quelle di van der Waals, si ha la formazione di flocculi. Per bassi valori del pH , l'alta concentrazione totale di ioni tende a comprimere il doppio strato elettrico e a favorire la presenza di legami di tipo F-F e F-E; per alti valori, invece, si ha non solo il legame F-F, ma anche quello F-E, generato da azioni di natura cinetica.

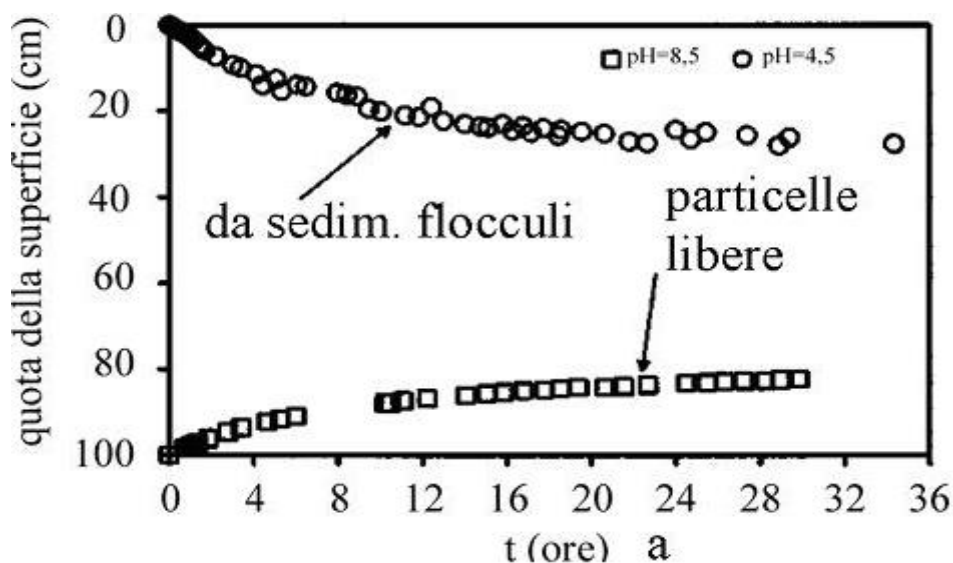


Figura 1.3. Caratteristiche di sedimentazione della caolinite: andamento della quota della superficie del deposito nel tempo;

1.6 Miscele di sedimenti

Uno dei problemi da affrontare riguarda la caratterizzazione strutturale delle miscele di sedimenti e l'individuazione della presenza o meno delle forze di coesione. Un'analisi fu condotta da van Ledden *et al.* (2004), con riferimento ai fenomeni dovuti alle correnti idriche, nell'ipotesi che:

- il comportamento a erosione delle miscele sia influenzato esclusivamente da fattori fisici, trascurando i parametri di natura chimica e biologica;
- la coesione è dovuta alla sola argilla, considerando il limo come sedimento non coesivo;
- il deposito è saturo e la resistenza a erosione aumenta al diminuire del contenuto d'acqua;
- la miscela è uniforme con la profondità ed è disposta orizzontalmente;
- il flusso idrico erodente ha velocità media minore di 1 m/s, considerando dunque solo erosione di superficie.

Per distinguere le diverse classi granulometriche, si utilizza la classificazione di van Ledden *et al.* (2004) riportata in tabella (1.1), che mostra le dimensioni e le frazioni di sabbia in peso e in volume, rispettivamente $p_{p,sab}$ e $p_{v,sab}$:

Tabella 1.1 Classificazione delle particelle solide (van Ledden *et al.*, 2004).

Materiale	Dimensione (mm)	Frazione in peso	Frazione in volume
Sabbia	0,063/2	$p_{p,sab} = \frac{V_{sab}}{V_{tot}}$	$p_{v,sab} = \frac{W_{sab}}{W_{tot}}$
Limo	0,004/0,063	$p_{p,sab} = \frac{V_{lim}}{V_{tot}}$	$p_{v,sab} = \frac{W_{lim}}{W_{tot}}$
Argilla	<0,04	$p_{p,sab} = \frac{V_{arg}}{V_{tot}}$	$p_{v,sab} = \frac{W_{arg}}{W_{tot}}$

dove V_{sab} , V_{lim} e V_{arg} sono rispettivamente i pesi delle frazioni di sabbia, limo e argilla, mentre W_{sab} , W_{lim} e W_{arg} indicano i rispettivi volumi.

Per caratterizzare le miscele, solitamente, si utilizza il contenuto d'acqua e i limiti di Atterberg; in particolare Mitchell (1976) lega l'indice di plasticità, PI , e l'indice di attività, AI , attraverso la seguente relazione:

$$PI = AI \cdot (p_{p,arg} - p_{p,off}) \quad (1.19)$$

dove $p_{p,off}$ è la percentuale in peso di argilla detta di compensazione (*offset*), pari alla minima frazione di argilla necessaria affinché la miscela assuma un comportamento plastico. Generalmente

si assume $p_{p,off} = 0,05 \div 0,10$; questo parametro segna il passaggio dalle miscele non coesive a quelle coesive. Van Ledden *et al.* (2004) proposero di classificare le miscele dell'estuario Westerschelde secondo il diagramma riportato in Fig. 1.4, in cui alla linea continua orizzontale (rossa) corrisponde $p_{p,arg} = 0,075$. Tale valore deriva dalla media aritmetica dei limiti dell'intervallo in cui varia $p_{p,off}$, risultando a rigore: miscela non coesiva per $p_{p,arg} < 0,05$, coesiva per $p_{p,arg} > 0,1$ e con caratteristiche intermedie per $0,05 < p_{p,arg} < 0,1$. Le linee tratteggiate in verde (angolo inferiore sinistro) indicano il confine della zona in cui ricadono le miscele con struttura predominante di sabbia; tale limite cambia in funzione del contenuto d'acqua. Le linee tratteggiate in blu (angolo inferiore destro), analogamente, indicano il confine delle miscele con struttura predominante di limo, per diversi valori di contenuto d'acqua.

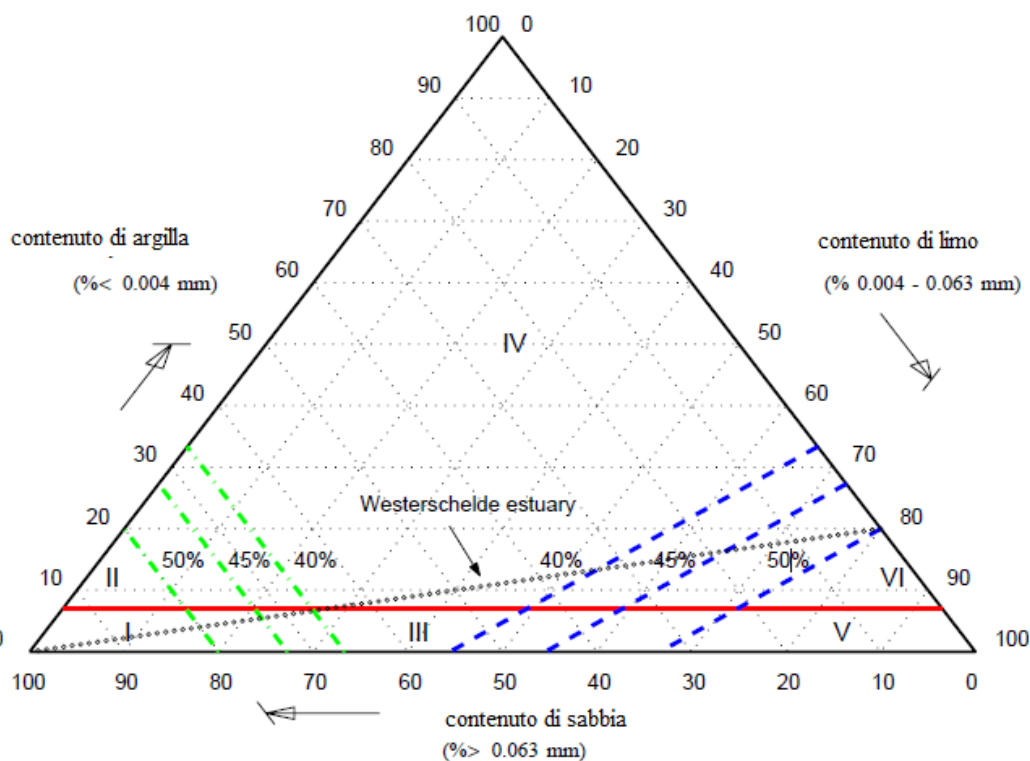


Figura 1.4. Classificazione strutturale delle miscele e individuazione delle stesse sull'estuario del fiume Schelde.

Le zone I, III e V comprendono miscele incoerenti; le zone II, IV e VI individuano quelle coesive. Alcuni studiosi, tra cui Torfs (1995), giunsero alla conclusione che le miscele assumevano comportamento coesivo se la percentuale di materiale fine superava il 7÷13%.

Per la classificazione strutturale in ambiente marino, van Ledden *et al.* (1994) riportano il seguente abaco (Fig. 1.5):

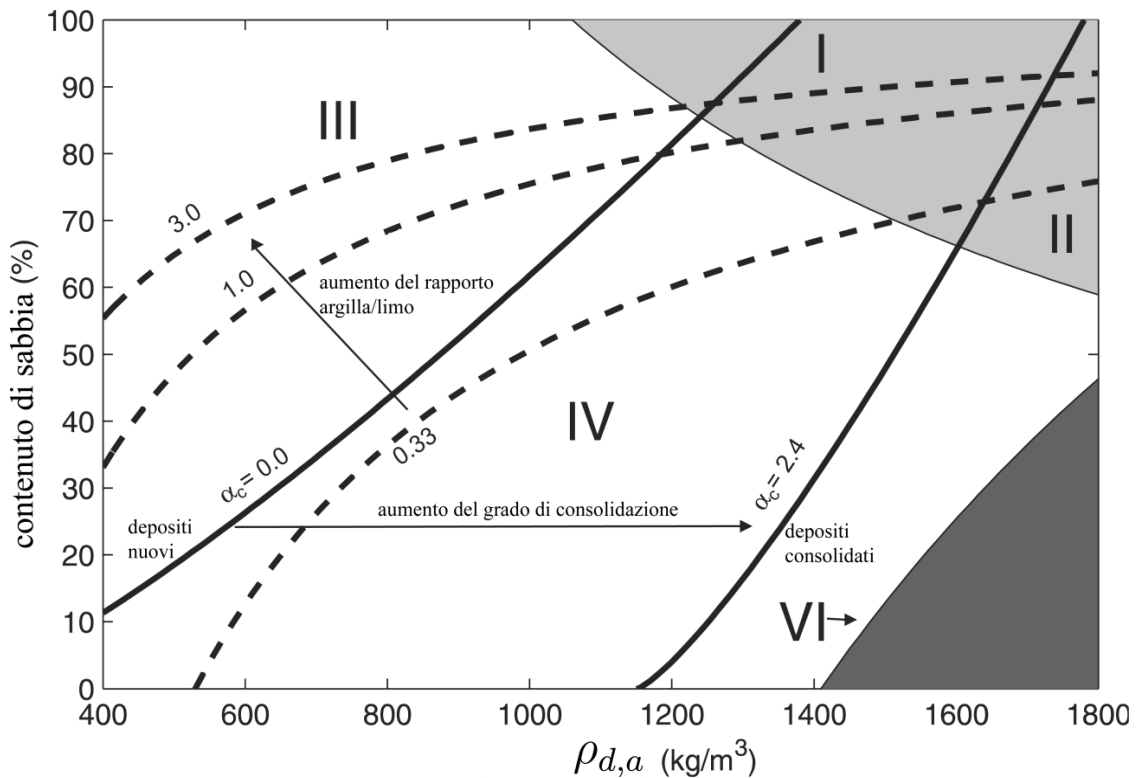


Figura 1.5. Classificazione strutturale delle miscele tipiche di un ambiente marino (van Ledden *et al.*, 2004)

dove α_c è un coefficiente di consolidazione e $\rho_{d,a}$ la densità del deposito asciutto.

Si noti come le linee tratteggiate separano le miscele coesive da quelle non coesive al variare del rapporto $p_{p,arg}/p_{p,lim}$, mentre le linee continue indicano i punti a pari grado di consolidazione. La lettura del seguente abaco mostra come le strutture predominanti di limo risultano rare; infatti, la classe V è assente e le miscele della classe VI si possono formare solo per piccoli rapporti di $p_{p,arg}/p_{p,lim}$:

- le classi principali sono la I (in cui predominano le sabbie e le miscele non coesive) e la IV (in cui predominano le argille e le miscele coesive);
- per alti valori di $p_{p,arg}/p_{p,lim}$ (>3) prevale la classe II;
- per bassi valori del rapporto tra la porzione di argilla e quella di limo $p_{p,arg}/p_{p,lim}$ ($<0,33$) prevale la classe III.

I sedimenti naturali sono biologicamente attivi; infatti, la presenza dei batteri ne modifica le caratteristiche d'erosione nello spazio e nel tempo. La stabilità dei sedimenti viene influenzata mediante l'apporto di due contributi: la biodestabilizzazione e la biostabilizzazione.

Per la biostabilizzazione si osserva che la zona superficiale di un deposito ha un comportamento coesivo a causa della secrezione di sostanze polimeriche extracellulari da parte dei batteri che ricoprono le particelle solide e le collegano tra loro. Un ulteriore contributo è svolto dalla presenza di microfitobenthos, comprendente alghe microscopiche fotoautotrofiche, che si sviluppano

mediante l'energia solare. Durante la secrezione delle suddette sostanze si ha un consumo di ossigeno, con conseguente rilascio di anidride carbonica, che può alterare la struttura del deposito, attivando il fenomeno della biodegradazione. Ciò favorisce lo sviluppo di processi anaerobici, tendenti a ridurre la resistenza all'erosione.

1.7 Formazione dei depositi

Le particelle di materiale coesivo possono legarsi tra loro, formando aggregati chiamati 'flocculi'. Tale processo è legato al tipo di materiale solido, alle caratteristiche della corrente e a diversi fattori che possono accrescere o meno le dimensioni dei flocculi. Il deposito si può definire 'totale' se le particelle solide e i flocculi in sospensione si depositano tutti sul fondo, 'parziale' qualora solo una parte tenda a raggiungere il letto.

Uno studio accurato sulla velocità di sedimentazione degli aggregati è stato svolto da McAnally e Mehta (2002), dimostrando come essa aumenti all'aumentare della concentrazione di particelle in sospensione, per poi ridursi al successivo incremento della concentrazione stessa.

Per la valutazione della velocità di sedimentazione esistono in letteratura diverse relazioni. Per basse concentrazioni tale velocità è proporzionale alla concentrazione delle particelle solide e alla tensione tangenziale, mentre per alte concentrazioni si introduce un valore di concentrazione limite, che designa il passaggio tra i due casi. Mehta e Lott (1987) correlarono la velocità di caduta del flocculo con quella di una particella solida avente stessa densità e dimensione, cercando di stimare il diametro medio dei flocculi, d_f , in funzione di quello mediano delle particelle in sospensione e della densità media dei flocculi:

$$d_f = 15,8 \cdot \left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho_f - \rho} \right)^{0,5} \cdot d_{50}^{0,1} \quad (1.20)$$

in cui ρ_f è la densità dei flocculi, ρ_s quella del sedimento e ρ quella dell'acqua.

Da studi effettuati, si può osservare come il comportamento a deposito dei materiali coesivi dipenda dalla tensione tangenziale espressa dalla corrente idrica, dai fenomeni di turbolenza, dalla velocità di sedimentazione, dalle caratteristiche delle particelle solide, dalla concentrazione delle stesse, dalle caratteristiche degli ioni e dalla profondità d'acqua (Fig. 1.6).

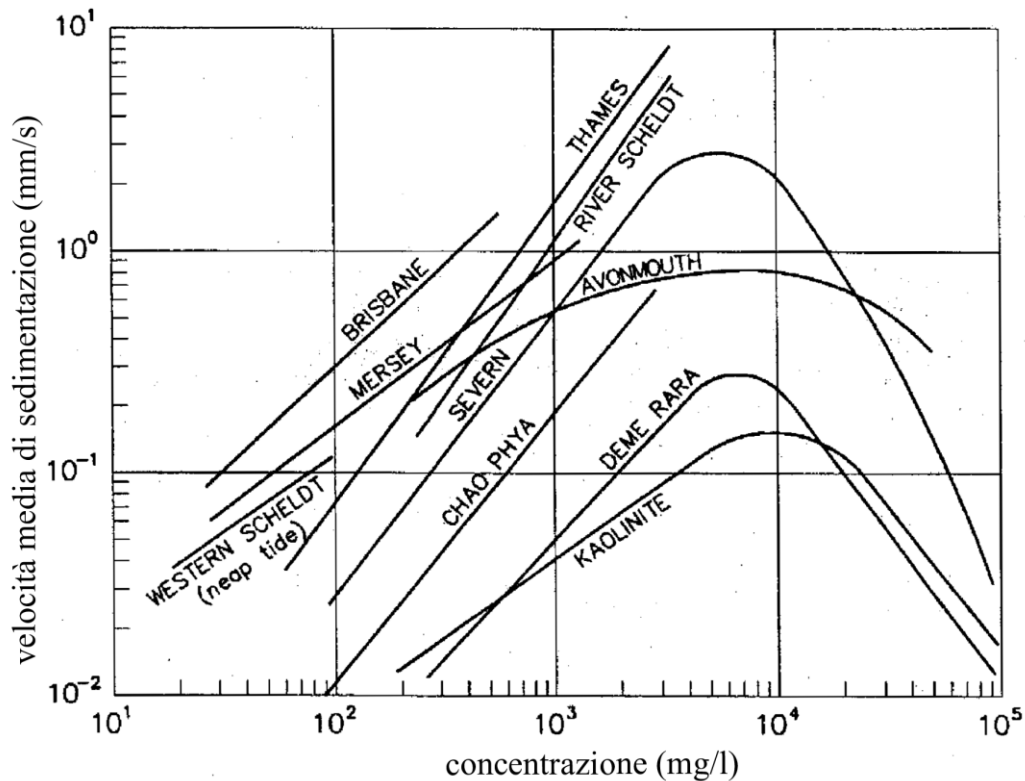


Figura 1.6. Velocità di sedimentazione in funzione della concentrazione in sospensione per particelle solide di diversa natura (van Rijn, 1993)

Per la determinazione della quantità di materiale depositato, occorre conoscere la tensione tangenziale critica sotto cui si ha il deposito totale, nonché un ulteriore valore, maggiore del precedente, che ne determini il deposito parziale. Se il valore di tensione sul fondo è compreso tra i due suddetti limiti, allora si avrà che una parte di sedimento si deposita sul fondo, mentre l'altra parte rimane in sospensione.

Un ulteriore importante processo da analizzare è la consolidazione, che si distingue in 'primaria' e 'secondaria'. La primaria ha inizio quando le forze peso superano quelle che l'acqua interstiziale esplica attraverso i pori presenti tra il materiale solido, cessando quando le forze interstiziali sono completamente dissipate e il deposito raggiunge il più alto grado di consolidazione. La secondaria, invece, è causata dalla presenza di deformazioni plastiche sul letto del fiume; essa inizia durante la consolidazione primaria e può durare settimane o mesi. La consolidazione di un deposito si valuta in funzione della variazione di densità nel tempo, determinabile attraverso diverse relazioni proposte in letteratura.

In ambito erosivo, è necessario distinguere tra depositi soffici e densi. I primi sono quelli ottenuti mediante sedimentazione di flocculi non consolidati o parzialmente consolidati, aventi basse densità. I secondi, invece, sono quelli che raggiungono un elevato grado di consolidazione, o quelli ottenuti dalla sedimentazione delle singole particelle solide con grado di consolidazione medio-alto,

aventi elevata densità e contenuto idrico inferiore al 100%. Esistono anche i depositi realizzati in laboratorio senza un grado di consolidazione, con comportamento tipico dei depositi soffici.

Sul grado di consolidazione, studi recenti (Lin e Wu, 2013), basati su osservazioni dirette del fenomeno di consolidazione dei sedimenti fini, mostrano un modello numerico monodimensionale per il calcolo del trasporto solido dei materiali coesivi.

Esso si basa sul processo di consolidazione dei sedimenti fini, definito attraverso la compattazione naturale dei flocculi, ovvero sotto l'influenza dell'azione gravitazionale, che provoca l'espulsione dell'acqua interstiziale e, quindi, un aumento delle forze di attrazione interparticellari e della densità dell'unità di volume asciutto, che va influenzare la tensione tangenziale al fondo.