

SEDIMENTOLOGIA

La **sedimentologia** è lo studio dei processi di formazione, trasporto e deposizione di materiale che si accumula come sedimento in ambienti marini e continentali ed eventualmente poi si trasforma in roccia.

Uno dei principali scopi è quello di ricostruire le modalità in cui vento, acqua etc hanno trasportato e deposto il materiale.

IL TRASPORTO SEDIMENTARIO

Molto del trasporto del materiale sedimentario (la così detta frazione clastica) è di tipo meccanico (avviene essenzialmente in sospensione, rotolamento, saltazione). Modalità e tempi del trasporto meccanico variano in relazione alla velocità ed alla densità del mezzo di trasporto. Se il mezzo è acquoso (l'ambiente di sedimentazione più importante è quello marino) oppure è l'aria, il trasporto meccanico è regolato dalla meccanica dei fluidi e quindi è legato alle leggi della velocità di caduta dei gravi in un mezzo fluido ed alle leggi di moto del fluido stesso.

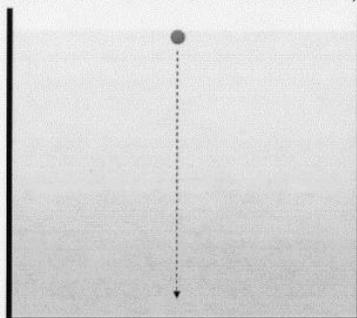
Il problema del trasporto è complesso ed ha due aspetti fondamentali: la meccanica dei fluidi e l'interazione fluido-sedimento (comportamento di un sistema misto).

DINAMICA DEI FLUIDI (aria ed acqua): CENNI

CONDIZIONI STATICHE

Come si comporta una particella solida all'interno di un fluido in condizioni
STATICHE ?

(senza movimento del fluido stesso)



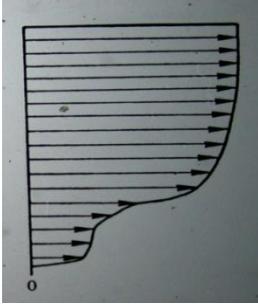
Il moto della particella è regolato dalla **LEGGE di STOKE**, che recita:

Una sfera immersa in un fluido viscoso, fermo ed indefinito, e abbandonata a se stessa senza velocità iniziale, per effetto della gravità cade con moto inizialmente accelerato. Se il diametro della sfera è abbastanza piccolo così che nella sua caduta essa non provochi la formazione di scie vorticosi (regime lamellare), la sfera raggiunge una velocità di regime alla quale si equilibrano la resistenza del mezzo e la forza motrice, proseguendo la sua caduta con moto uniforme.

Tale condizione è fondamentale per le particelle molto fini (per esempio particelle pelliche in momentanea sospensione in colonne d'acqua in assenza di idrodinamismo; es.: zone lacustri o paludi)

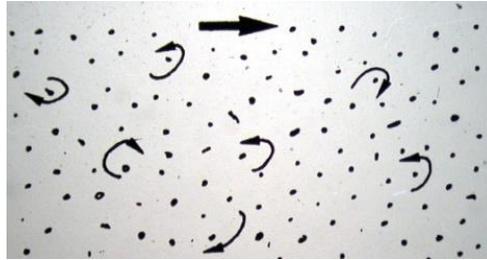
CONDIZIONI DINAMICHE

Il moto dei fluidi (flusso) avviene in due modi differenti: **flusso laminare** e **flusso turbolento**



Nel **FLUSSO LAMINARE** tutte le molecole si muovono parallelamente l'una all'altra nella direzione del trasporto. In un fluido eterogeneo, durante il flusso laminare, quasi non c'è mescolamento. Si parlerà di flusso non anastomizzato, uniforme (se la velocità in un dato istante resta costante in ogni punto) o non uniforme (se la velocità in un dato istante varia da punto a punto) e stabile (stazionario) (quando la velocità in un dato punto è costante nel tempo).

Nel **FLUSSO** molecole nel fluido si muovono in tutte le un netto movimento nella direzione del flusso turbolento i fluidi eterogenei sono mescolati. Il flusso è sempre instabile (non velocità in un dato punto varia) e non



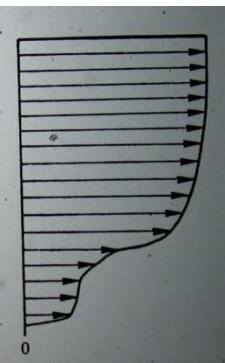
TURBOLENTO le direzioni, ma c'è trasporto. Nel strettamente stazionario (la uniforme).

Fu **REYNOLD**, nel primo 1900, a distinguere per primo i due flussi attraverso una serie di esperimenti.

Con un parametro adimensionale (**NUMERO DI REYNOLD**), definito dalla relazione fra velocità del flusso (u), spessore dello strato liquido in un canale aperto o raggio idraulico se il flusso sta in un tubo (l) e dal rapporto fra viscosità e densità del fluido (ν), $\Rightarrow Re = ul/\nu$, è possibile definire se il flusso è turbolento o laminare. In particolare $Re < 500 \Rightarrow$ **flusso laminare**, se $Re > 2000 \Rightarrow$ **flusso turbolento**. Per valori intermedi ho una zona di "transizione" \Rightarrow rugosità nella quale può verificarsi l'uno o l'altro dei due tipi di flusso in dipendenza delle condizioni esterne (rugosità del letto, piccoli disturbi etc). La rugosità del letto è particolarmente importante: su una superficie liscia il flusso può restare laminare fino ad un valore di R più elevato che su una superficie rugosa. Il valore critico più basso di R è quello al di sotto del quale il flusso rimane laminare anche se avvengono disturbi $\Rightarrow R=500$ quindi è giusto considerare un flusso laminare quando $Re < 500$.

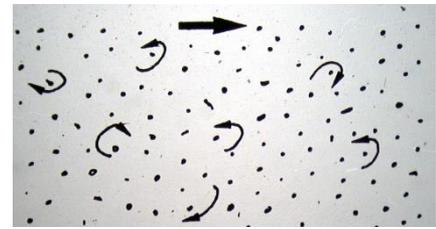
Flussi con bassa viscosità cinematica (ν), come **l'aria**, (viscosità=resistenza alla deformazione di un fluido) sono turbolenti alle basse velocità, così tutti i flussi di aria naturali che possono trasportare in sospensione sono turbolenti.

I flussi di **acqua** sono laminari solo alle velocità molto basse oppure a profondità d'acqua molto ridotte, così **i flussi turbolenti sono molto più comuni nei processi di trasporto e di deposizione dei sedimenti in ambiente acquoso**. Flussi laminari si hanno in qualche debris flow, nel movimento di ghiacciaio ed in flussi di lava, insomma in tutti quei fluidi che hanno una viscosità molto più elevata dell'acqua: flussi molto lenti o con profondità estremamente ridotte. **La più parte dei fluidi in acqua e aria che sono capaci di trasportare grandi volumi di sedimento sono turbolenti e quindi si considera quasi sempre il flusso turbolento**. Esiste però una eccezione: **in prossimità del fondo, in un flusso turbolento, si può avere il cosiddetto SOTTO-STRATO LAMINARE, cioè una zona dove il flusso, in certe condizioni è laminare. Lo strato dove il flusso può essere turbolento o laminare si chiama STRATO-LIMITE**.



STRATO-LIMITE : nella fig. si osserva che la velocità del flusso è minima presso il letto ed aumenta verso l'alto fino a raggiungere la velocità della corrente che fluisce in superficie. Alla base si osserva che il fluido viene notevolmente ritardato dalla viscosità dell'acqua e dall'attrito contro la superficie: questo è lo strato-limite e, come detto sopra, può essere turbolento o laminare (PS questo strato è legato alla presenza di forze tangenziali alla superficie che si oppongono al moto del fluido).

Shear stress: sforzo di taglio critico. E' la forza minima che devo applicare alla particella per metterla in movimento.



Il flusso laminare e quello turbolento a loro volta possono essere “**TRANQUILLO**”, con superficie di acqua liscia, o “**RAPIDO**”, con una superficie di acqua rugosa (piccole creste di onde). Questi stati della corrente sono espressi con il **NUMERO DI FROUDE**, parametro adimensionale che mette in relazione la velocità dell’acqua con la velocità alla quale le onde possono essere trasmesse nell’acqua. Semplificando è il rapporto fra la velocità della corrente e quella delle onde nella corrente.

Con numero di **Froude** < 1 un’onda può propagarsi “upstream” (sopra la corrente) poiché viaggia più veloce della corrente stessa. In questo caso si parla di stato tranquillo o flusso **SUBCRITICO O INFERIORE (SUBCRITICAL FLOW STATE)**

Con numero di **Froude** > 1 indica che la corrente è più veloce dell’onda. La corrente è rapida o **SUPERCRITICA O SUPERIORE (SUPERCRITICAL FLOW)**.

Con numero di **Froude** $= 1$ quando una corrente attraversa una fase di instabilità e turbolenza: in questo caso è sufficientemente forte da spianare le forme di fondo.

RAPPORTO FLUIDO-SEDIMENTO: esistono essenzialmente due diverse condizioni dinamiche :

1. il fluido ed i granuli in esso contenuti si comportano come fasi distinte (→ flusso tipico o normale): la deposizione avviene come semplice separazione delle particelle solide → **trasporto particellare, selettivo** (granulo per granulo),
2. solido e liquido hanno un comportamento d’insieme, come se si trattasse di un’unica fase fisica (*dispersione concentrata*) (→ flusso reologico): si ha uno “strato di sedimento in movimento” che si deposita semplicemente arrestandosi → **trasporto e deposito in massa**.

Si distingue quindi un **TRASPORTO SELETTIVO** ed uno di **MASSA**.

Il comportamento idraulico di una particella sedimentaria può essere definito sulla base dei parametri che lo condizionano, cioè dimensioni, forma e peso specifico. Poiché nei granuli più comuni le dimensioni variano molto più rispetto forma e peso specifico, **il comportamento idraulico è soprattutto funzione della granulometria** (con delle eccezioni: minerali pesanti il cui peso specifico è elevato ed i frustoli vegetali e le lamelle di mica la cui forma è fondamentale: questi granuli “anormali” tendono a concentrarsi in depositi distinti).

L’azione selettiva del trasporto si riflette sulla tessitura del deposito, ma anche dall’organizzazione geometrica dello stesso, resa visibile dalle strutture sedimentarie. Quindi un trasporto selettivo tende a dare un deposito organizzato (per es. clasti orientati), mentre un trasporto di massa lascia clasti disorganizzati (massivi, caotici etc).

TRASPORTO SELETTIVO

Il primo effetto della selezione idraulica è la separazione fra **CARICO DI FONDO (ROTOLAMENTO, SALTAZIONE)** → in genere per ghiaie e sabbie, e **CARICO SOSPESO (SOSPENSIONE)** → solitamente silt e argilla. Nel primo caso si parla di **TRAZIONE**, nel secondo di **DECANTAZIONE**, quindi avremo processi selettivi suddivisi in **trattivi** e **decantativi**.

In particolare:

ROTOLAMENTO-TRASCINAMENTO: le particelle si muovono rotolando sul fondo del flusso di aria o di acqua senza perdere contatto con la superficie del letto.

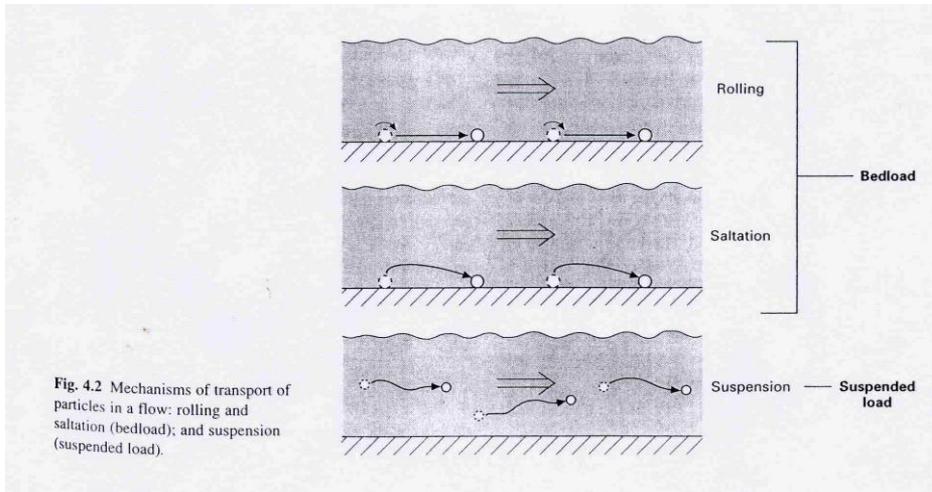


Fig. 4.2 Mechanisms of transport of particles in a flow: rolling and saltation (bedload); and suspension (suspended load).

SALTAZIONE: le particelle si muovono attraverso una serie di balzi, staccandosi quindi periodicamente dalla superficie e percorrendo un piccolo tratto nel corpo del fluido prima di ritornare a contatto con il letto.

SOSPENSIONE: quando la turbolenza entro il fluido produce sufficiente movimento le particelle si muovono nel fluido più o

meno in modo continuato senza toccare il fondo.

Table 4.1 Density and viscosity of fluid transport media.

Substance	Density (kg m ⁻³)	Viscosity (N s m ⁻²)
Air	1.3	1.78 × 10 ⁻⁵
Water	1000	1 × 10 ⁻³
Debris flows	1500 to 2600	1 × 10 ² to 1 × 10 ³

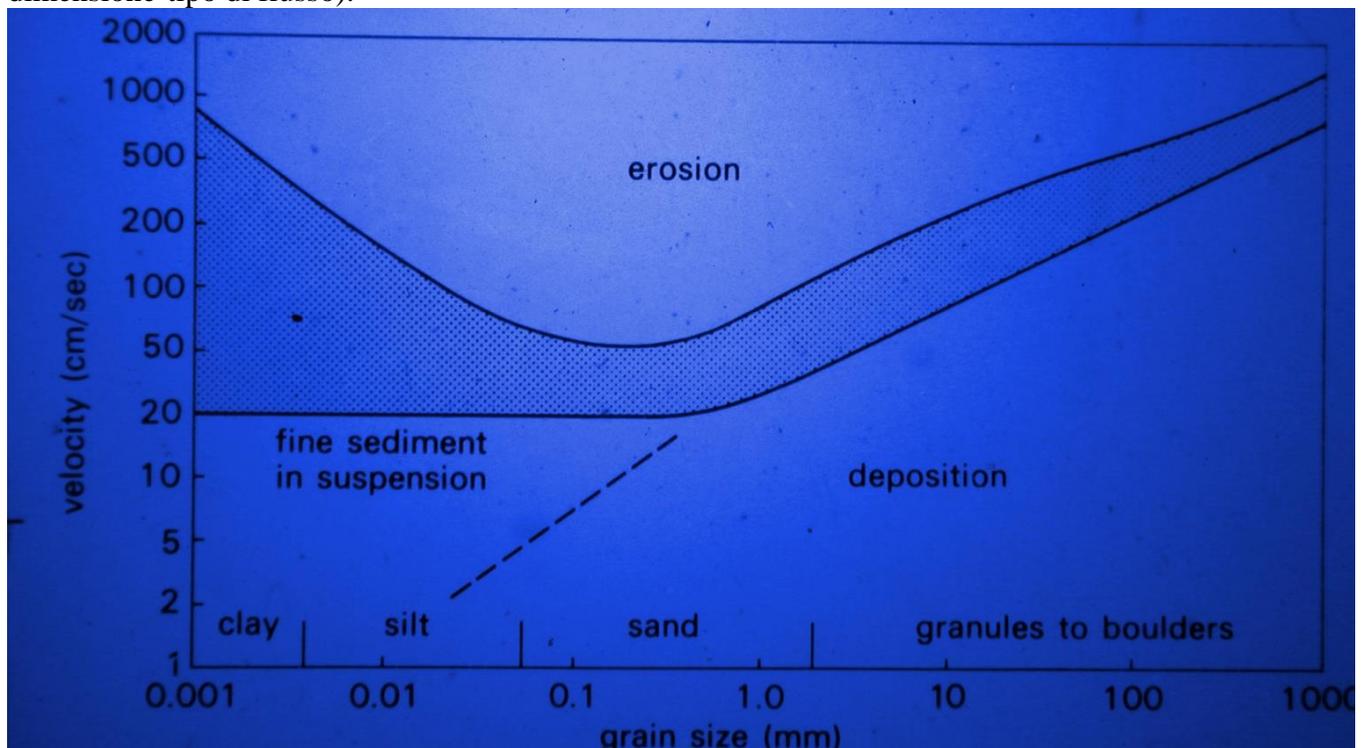
Per quanto questi processi siano sostanzialmente simili in aria ed in acqua, in aria sono richieste velocità molto più alte per muovere le particelle di una data dimensione a causa delle più basse densità e viscosità dell'aria rispetto all'acqua.

PROCESSI TRATTIVI

⇒ CORRENTI TRATTIVE

(UNIDIREZIONALI UNISENSORIALI e UNIDIREZIONALI BISENSORIALI)

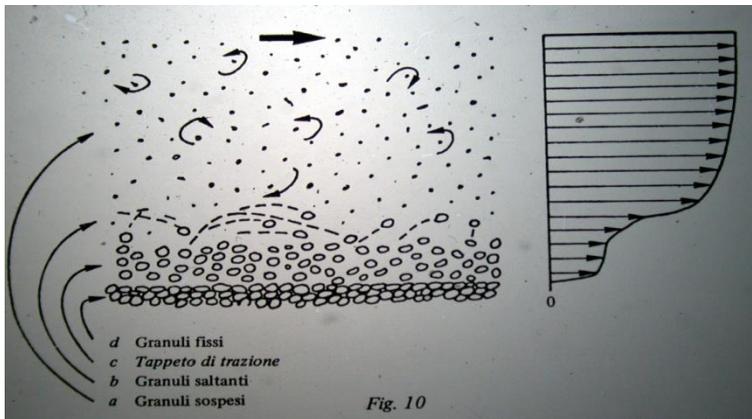
In un corpo acquoso esistono delle relazioni ben precise tra la velocità di una corrente ed il diametro dei granuli che possono essere erosi/trasportati. Questa relazione viene esplicitata nel diagramma di **Hjulstrom** (relazione velocità-dimensione) successivamente integrato da **Sundborg** (relazione velocità-dimensione-tipo di flusso).



VELOCITÀ CRITICA DI DEPOSIZIONE: relazione fra la velocità della corrente e le particelle che sono già in movimento.

VELOCITÀ CRITICA DI EROSIONE (VELOCITÀ COMPETENTE): velocità che è richiesta per erodere e quindi mettere in movimento una particella che ha una certa dimensione tramite uno sforzo, in questo caso la corrente, che è proporzionale alla velocità della corrente stessa.

Nel diagramma esiste un minimo di velocità che corrisponde ai granuli di dimensioni (0.2 – 0.5 mm): ciò significa che **le sabbie fini, sciolte, sono le più facili da erodere.**



Dal diagramma a lato si vede che una corrente trattiva non è solamente un flusso, ma uno dei modi in cui un flusso interagisce con il sedimento. Quando la pressione di taglio (tangenziale) è superata per un numero abbastanza grande di particelle, queste non si muovono più isolate, ma si radunano in file, nastri (l'uno adiacente all'altro e con velocità diverse) fino a rivestire il fondo con un intero strato scorrente che si definisce **tappeto di trazione**. Al suo interno c'è una selezione laterale (ogni nastro con particelle simili fra

loro) e verticale (i grani urtandosi fra loro o toccando il fondo si allontanano verso l'alto, causa pressione collisionale o dispersiva). Il tappeto di trazione quindi produce le parti elementari di un **deposito trattivo (lamine)** e queste tendono ad essere **gradate inversamente** (→ fatto dovuto o dal sollevamento dei granuli più voluminosi da parte della pressione che è proporzionale alla massa, o dalla discesa dei più piccoli tra i più grandi).

EVOLUZIONE del movimento per correnti trattive a regime crescente (Kramer, 1932):

- A) trasporto nullo
- B) trasporto debole : un piccolo numero di granuli è messo in movimento
- C) trasporto moderato : granuli di dimensioni medie sono messi in movimento quasi ovunque sul fondo (la vel. critica di Hjulstrom)
- D) trasporto generale : tutti i granuli presenti sono in movimento. Ciò porta un cambiamento relativamente rapido nell'aspetto del fondo.

Una volta messo in movimento, il sedimento continua a muoversi anche se la velocità di flusso cade sotto il valore critico di erosione.

La cessazione avviene ad una velocità (VELOCITÀ DI DEPOSIZIONE) che è 2/3 della vel. critica di erosione.

Come già detto, una volta che incomincia il trasporto (del materiale eroso) questo può avvenire sia come **CARICO DI FONDO (ROTOLAMENTO E SALTAZIONE)** che come **CARICO SOSPESO (SOSPENSIONE)** → la velocità di trasporto per quest'ultimo è quella della corrente.

L'azione trattiva provoca trasporto, ma anche modellamento (o rimaneggiamento) del sedimento al fondo: questo processo determina configurazioni o FORME DI FONDO (BEDFORM), che, "congelandosi", danno luogo a strutture sedimentarie.

STRUTTURA: l'insieme dei granuli che costituiscono una roccia si sedimenta in modo diverso a seconda delle diverse condizioni fisiche. I diversi modi di sedimentarsi si traducono in differenti tipi di stratificazione. La **STRATIFICAZIONE** è la più tipica struttura delle rocce sedimentarie. Per interpretare le

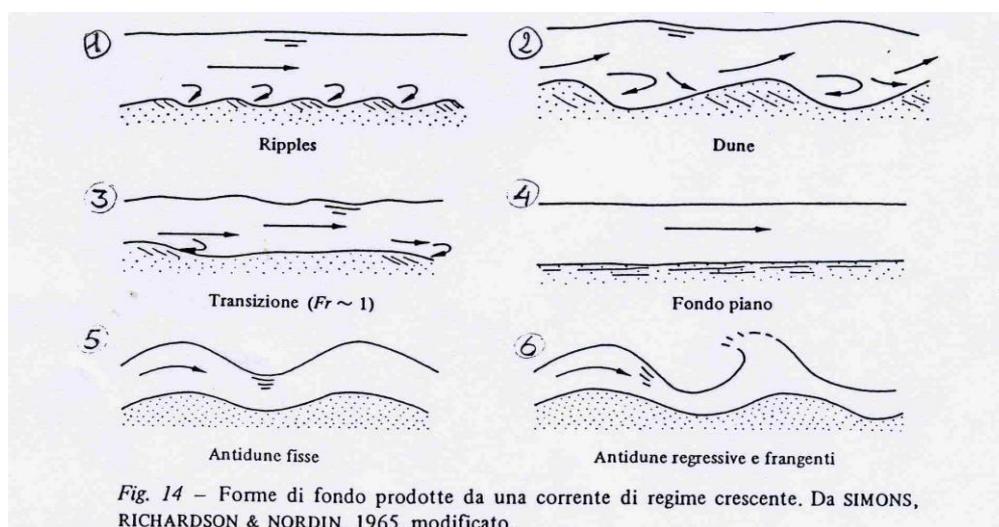
strutture sedimentarie che caratterizzano le rocce ricorriamo all'osservazione dei processi di sedimentazione che agiscono attualmente (applicazione dell'Attualismo).

Le strutture sedimentarie deposizionali sono legate alla storia deposizionale del sedimento e quindi alla presenza di un dato processo o agente dinamico che permette la messa in posto del sedimento. Alcuni tipi di fondamentali di agenti dinamici sono: correnti (idriche o atmosferiche), onde, traslazioni gravitative su pendio (trasporti in massa, scivolamenti e frane), pressione di carico, organismi; inoltre risalite di fluidi, risucchi di sedimento verso il basso, caduta di pioggia o grandine.

FORME DI FONDO E RELATIVE STRUTTURE

FORMA DI FONDO (BEDFORM) = struttura morfologica superficiale formata dall'interazione fra corrente (aria o acqua) e sedimento sul fondo: per esempio le dune di sabbia nel deserto o quelle che si trovano nel mare sono "bedforms".....(strutture sedimentarie superficiali; configurazione del fondo)

STRUTTURA associata = rapporto fra i sedimenti legato alla forma di fondo, cioè la struttura interna (per esempio stratificazione incrociata).



Lo schema evidenzia le FORME DI FONDO prodotte da **una corrente trattiva a regime crescente**.

Innanzitutto sono forme asimmetriche.

Quando la velocità della corrente raggiunge la velocità critica di erosione, che dipende dalle dimensioni delle

particelle presenti sul fondo, incomincia ad esserci movimento: le particelle subiscono erosione e trasporto e formano prima delle piccole ondulazioni del fondo (**current RIPPLES O RIPPLE DI CORRENTE**) (**increspature**) (1) (**flusso subcritico o inferiore**).

Accelerando ulteriormente la corrente si passa a forme di fondo di maggiore dimensione (2) → **DUNE (increspature più grandi)**, **SAND WAVES (flusso subcritico o inferiore)**. La forma è identica ai ripples, ma differiscono per dimensione (L = da 60 cm a centinaia di metri; H = da 5 cm a 10 m). Accelerando ulteriormente (3), la corrente attraversa una fase di instabilità e turbolenza: in questo caso è sufficientemente forte da **spianare le forme di fondo**, si ha diffusione di materiale in sospensione (4) (**flusso supercritico o superiore**): **si forma il tappeto di trazione**. In questo caso i granuli si organizzano in **nastri e lamine piane**. Per un ulteriore aumento di corrente (5) (6) il fondo si increspa di nuovo formando le **antidune**, alte fino ad 1 metro e lunghe fino 6-7 m. **Nelle antidune si ha erosione sul lato a valle e deposito su quello a monte**: sono regressive o fisse.

A questo punto, non si formano nuove strutture anche aumentando la velocità della corrente; se la corrente rallenta bruscamente il fondo si appiattisce, se la diminuzione è graduale si ripetono a ritroso le configurazioni sopra dette.

Diversi tipi di forme e strutture si formano in funzione della velocità della corrente, ma anche della granulometria: se il materiale è molto fine la sequenza non è completa: ci sarà ripple e poi si passa direttamente al regime di flusso superiore e mancano le dune. Se il materiale è molto grosso (>0.6mm) si formano subito i megaripples (forme intermedie fra ripples e dune). Se invece il materiale è una sabbia

media e fine la sequenza è completa. In genere le forme grandi (dune, sandwave) sono costituite da sabbia da fine a grossolana e da ghiaia, non da sabbia molto fine.

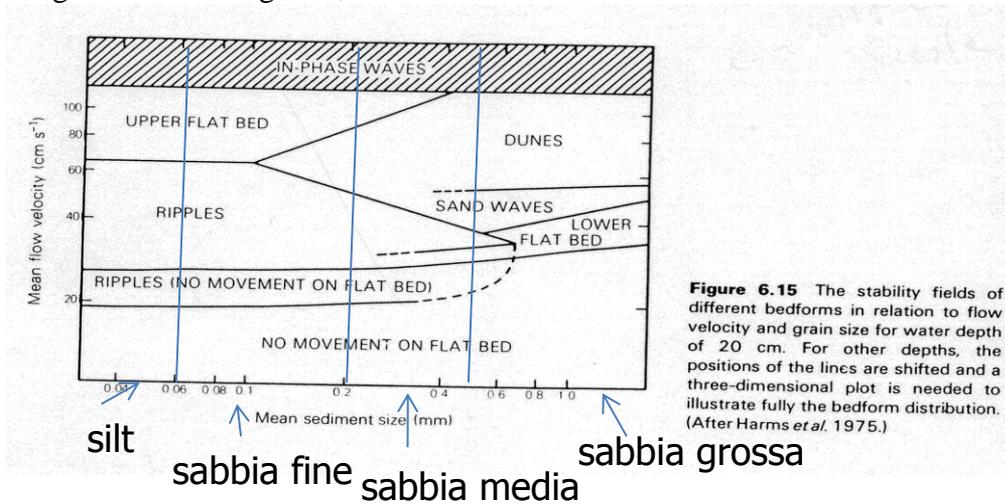
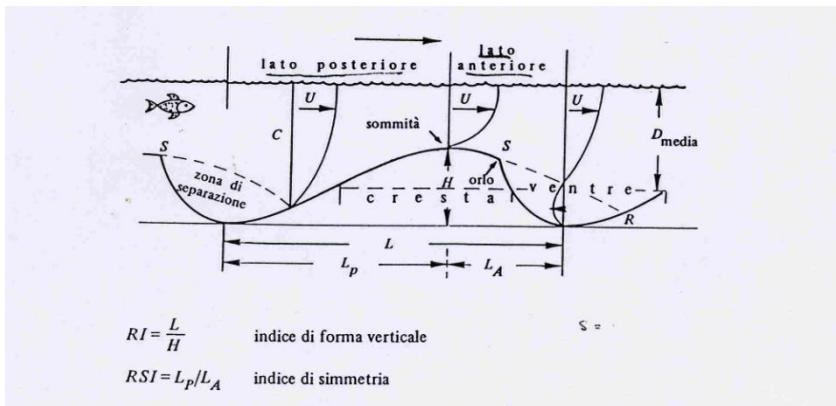


Figure 6.15 The stability fields of different bedforms in relation to flow velocity and grain size for water depth of 20 cm. For other depths, the positions of the lines are shifted and a three-dimensional plot is needed to illustrate fully the bedform distribution. (After Harms *et al.* 1975.)

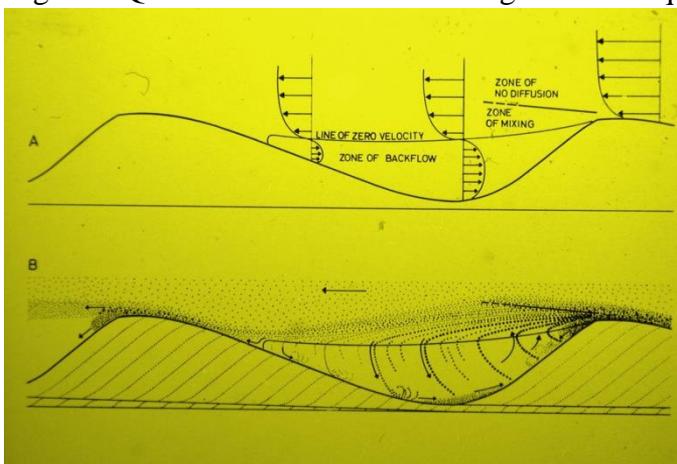
RIPPLE : è una forma di fondo trattiva di piccole dimensioni che si forma in regime unidirezionale unisensoriale. **Ha una geometria composta da una cresta e da un ventre compreso fra due creste. La distanza fra due creste adiacenti è la lunghezza L mentre H è l'altezza.**



L'indice di forma verticale : L/H e serve per definire le caratteristiche e la granulometria ed il tipo di flusso in cui questa forma di fondo è stata generata. La forma è asimmetrica: la parte sopracorrente è più dolce, mentre la parte sottocorrente è più ripida. In generale la "wavelength" (L) è meno di 50 cm, mentre l'H raramente supera i 3 cm. Per dimensioni maggiori si parla

di dune o sand waves. Le granulometrie coinvolte, per quando riguarda i ripples sono **la sabbia (comunemente medio-fine) ed il silt grossolano**.

Genesi: la corrente trasporta nastri di grani per bedload fino alla cresta accumulando una certa quantità di grani. Quando si arriva ad una soglia critica questi grani ruzzolano (per gravità) per il pendio sottocorrente provocando una microfrana (avalanching) che mette in posto delle lamine oblique secondo un angolo di attrito (angolo di riposo del sedimento che può arrivare a 30-40°) che è legato alla granulometria, forma e angolo di attrito interno: il nuovo angolo di riposo è quello gravitativamente stabile e coincide con l'angolo della stratificazione incrociata che si vede in affioramento. Quindi mentre sul lato sopracorrente (posteriore) si ha trazione e trasporto, su quello sottocorrente (anteriore) si ha deposito. Ogni lamina è ricoperta dalla lamina successiva o parte di lamina. Il lato



frontale e l'intera struttura si accrescono e avanzano o migrano così sottocorrente. Risultato di questa corrente trattiva è la messa in posto di **lamine frontali** → **foresets** (avanzamento dei ripples). Poiché il lato frontale della struttura non subisce praticamente erosione, le relative lamine, tra loro concordanti ed inclinate rispetto al piano di stratificazione, vengono facilmente preservate. Esse rappresentano quindi un buon indicatore del regime subcritico.

La corrente arrivata sulla cresta abbandona il bordo (punto di separazione → separazione dello strato limite → backflow: distacco delle particelle) e galleggia fino alla cresta successiva mentre sul ventre si forma un flusso di verso contrario che modella la parte bassa del foreset.

Quanto detto per il ripple **vale anche per le altre forme (megaripple, dune, sand waves) di dimensioni maggiori.**

In particolare, la **DUNA** è una forma trattiva asimmetrica; cresta ondulata; sabbia da fine a grossolana (>0.2 mm). Spessore dei sets > 5 cm

La **SAND WAVE** è una forma trattiva asimmetrica; cresta rettilinea; sabbia da fine a grossolana ... segue la DUNA

ALCUNE DEFINIZIONI

Current ripples: sono le forme subacquee più piccole che si sviluppano con i silt o le sabbie medie: non si formano con sabbie delle dimensioni superiori a 0,6 mm. L'altezza di un ripple è compresa tra 0,5 e 5 cm e l'intervallo tra le due creste è compreso tra 10 e 60 cm. In proiezione orizzontale possiamo distinguere creste diritte (ripples bidimensionali, 2D) e creste irregolari (ripples tridimensionali, 3D). Per alcuni il passaggio tra 2D e 3D è legato alle condizioni del flusso, in modo particolare dalla velocità e dalla profondità, ma non tutti gli autori sono d'accordo; quindi potrebbe non essere molto corretto interpretare una paleo-corrente su questi indizi.

Megaripples: sono differenti dai ripples da un punto di vista della dinamica di formazione. Si formano a profondità maggiori dei ripples ed hanno dimensioni che vanno, per l'altezza, tra 10 e 200 cm e per la distanza tra le creste tra 1 e 4 m. Le loro dimensioni aumentano con l'aumentare della profondità.

Sand wave: sono forme più grandi dei megaripple: sono meno rilevate ed hanno creste più diritte. Dune: simili alle sand waves ma con cresta ondulata. Le dune sono di regime superiore rispetto alle sand waves (ma sempre subcritico).

Antiduna: Sono completamente differenti dalle forme descritte prima. Sono simmetriche in sezione verticale con creste arrotondate. Si muovono in direzione opposta alla corrente e si sviluppano con correnti molto veloci e poco profonde e sono in fase con le onde di superficie. Si conservano molto difficilmente perché appena la velocità della corrente diminuisce tendono a trasformarsi in forme piane (plane bed).

Plane beds: prodotti da correnti d'acqua unidirezionali – Sotto certe condizioni di corrente la superficie della sabbia diventa appiattita ed orizzontale. Questa forma è chiamata plane bed o flat bed e si ottiene con correnti molto veloci con conseguente rapido trasporto di sedimenti.

I sottili ed inclinati livelli (foresets) danno luogo alle CROSS LAMINAE (lamine incrociate) e la struttura sedimentaria che ne deriva (quindi l'associazione delle lamelle fossili) prende il nome di **CROSS LAMINATION (laminazione incrociata) nel caso di ripples o di CROSS BEDDING (stratificazione incrociata) nel caso di dune e sand waves.**

La **STRATIFICAZIONE INCROCIATA (CROSS BEDDING = in letteratura inglese) o LAMINAZIONE INCROCIATA** è una struttura sedimentaria data dal "congelamento" di queste forme (dovute solo quindi a corrente trattiva) ⇒ quindi con questo termine si intende **la registrazione complessiva del fenomeno, che comprende anche le superfici di trazione ed erosione, che si ha quando il trasporto cessa, e quindi le forme di fondo diventano statiche e possono essere velocemente seppellite da altri sedimenti** (si ha quindi la conservazione delle forme → struttura).

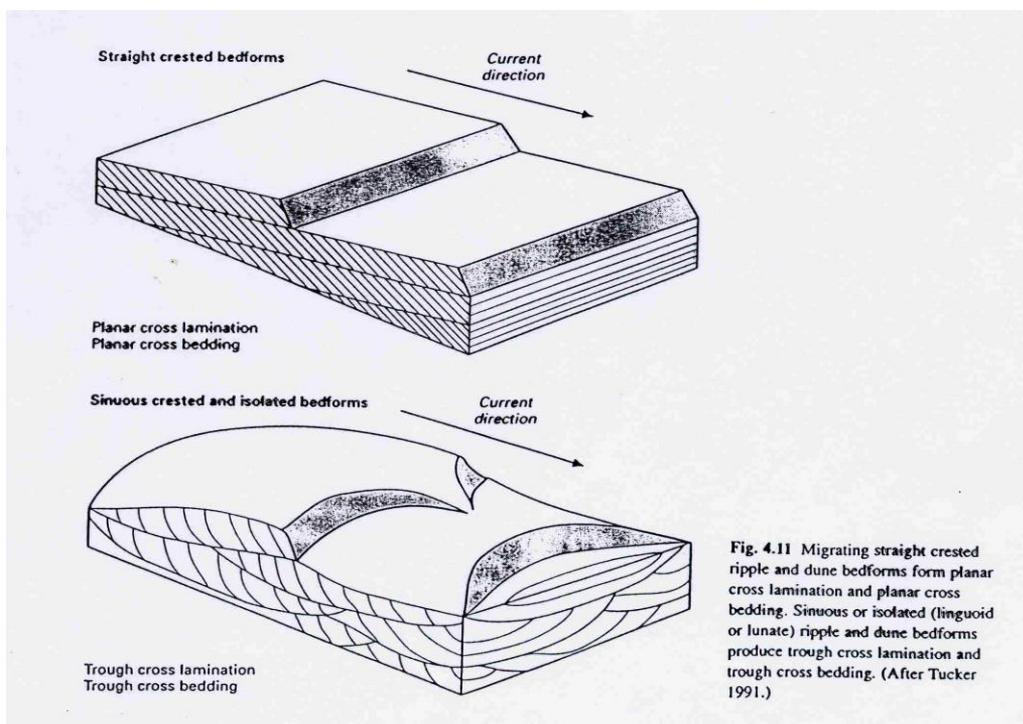
PS stratificazione incrociata perché c'è una discordanza angolare fra gli strati (uno strato = superficie topografica in un dato momento).

Si possono avere 2 tipi di stratificazione incrociata:

La raffigurazione tridimensionale della stratificazione incrociata mostra come si può risalire alla direzione della corrente: si tiene conto delle immersioni dei foresets. Questa stratificazione incrociata è fatta da foresets che si sovrappongono direttamente senza contatti erosivi basali e con lamine frontali piatte: **STRATIFICAZIONE INCROCIATA TABULARE (PLANAR CROSS BEDDING)**. Questa struttura è prodotta dalla migrazione di ripples a corrente bassa (idem per le forme di maggiori dimensioni) → forme di fondo lineari.

La **STRATIFICAZIONE INCROCIATA A FESTONI O CONCAVA (TROUGH (truogolo) CROSS BEDDING)** si ha quando le forme di fondo si fanno via via più sinuose fino a diventare discontinue: in pratica si ha l'erosione ed il successivo riempimento di docce o truogoli che si formano nei ventri delle forme di fondo quando la corrente si focalizza per l'incurvarsi delle creste (concentrazione della corrente che erode in modo concentrato proprio davanti alla cresta del ripple e si crea una struttura erosiva che ha una forma conica con la punta verso la corrente; questa struttura verrà poi colmata dalla duna che avanza).

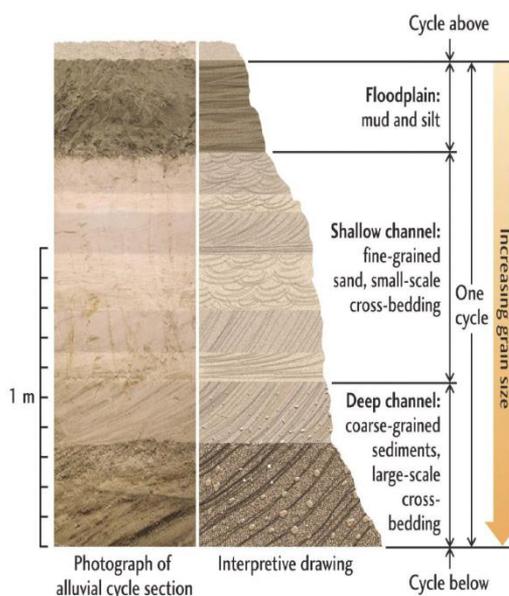
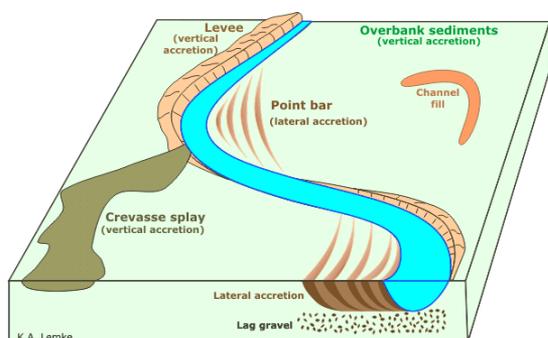
Quindi la stratificazione incrociata tabulare ha la cresta rettilinea ed il contatto basale non è erosivo, mentre quella a festoni è ondulata ed il contatto basale è erosivo.



STRATIFICAZIONE INCROCIATA LONGITUDINALE O EPSILON CROSS BEDDING: è una struttura trattiva a grande scala (quelle fin qui viste sono di piccola e medio scala, più o meno riproducibili in laboratorio). Si forma in un fiume con meandri. In particolare, consideriamo il caso di una barra laterale, o barra di sponda che cresce da una riva verso il centro del canale. Se questo è fortemente sinuoso si ha la **cosidetta barra di meandro (point-bar)** e in questo caso l'accrescimento della barra su una sponda (convessa) è concomitante con l'erosione della sponda opposta (concava). Le superfici di accrescimento sono inclinate, ma non sono dei veri e propri foreset perché:

1. l'accrescimento laterale è dovuto ad una migrazione del sistema canale-barra trasversalmente alla direzione di flusso
2. l'inclinazione è sempre minore dell'angolo di riposo
3. il meccanismo trattivo nella parte inferiore della barra, ma in quella superiore c'è il contributo della decantazione.

Ogni strato (evento di crescita) è costituito da strati minori, con strutture e granulometria di rango via via inferiore dal piede alla sommità del pendio deposizionale.



STRATIFICAZIONE PARALLELA

Quando la corrente aumenta, le forme di fondo o mancano (fondo piano) o sono caratterizzate da un basso rilievo (antidune). Il risultato sedimentario è la LAMINAZIONE PARALLELA.

Questa laminazione può essere orizzontale o inclinata (incrociata) a basso angolo ($\leq 15^\circ$). Il tipo orizzontale (concordante) e quello inclinato (discordante) sono spesso associati, ma non facili da distinguere.

Non si conoscono esempi fossili convincenti di antidune: il profilo delle antidune è effimero a causa delle ripetute cancellazioni dovute alla frangenza; esso si conserva quando si verifica un seppellimento immediato (per cessazione improvvisa della corrente).

MA ATTENZIONE:

Esistono in realtà due tipi di meccanismi che producono le **laminazioni parallele**:

- 1) per **TRAZIONE**: può avvenire con corrente unidirezionale, ma anche in regime oscillatorio (moto ondoso).
- 2) per **DECANTAZIONE**: pioggia di materiale fine in ambiente tranquillo. Queste strutture in particolare si possono conservare se non ci sono successivi fenomeni di bioturbazione.

Attraverso la granulometria si può distinguere un meccanismo dall'altro: granulometria grossolana → meccanismo di trazione, granulometria fine → meccanismo di decantazione. Purtroppo però non è una regola!! Bisogna quindi fare altre osservazioni: per esempio vedere se ci sono, all'interno del sedimento laminato, delle lineazioni causate dalle singole particelle trascinate dal regime trattivo (per esempio iso-orientamento dei minerali micacei).

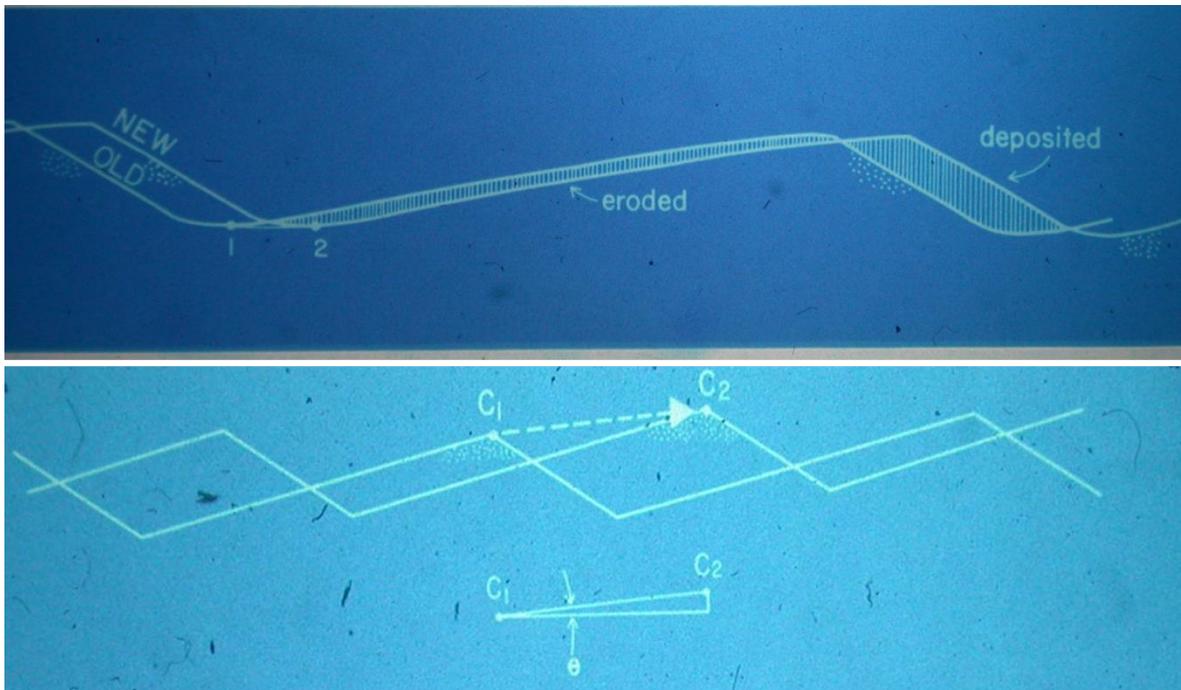
PROGRADAZIONE ED AGGRADAZIONE DI UNA FORMA TRATTIVA

A questo punto va fatta un'altra considerazione: un ripple o un'onda di sabbia si sposta con **un effetto trattivo cioè lo spostamento è basato sullo stesso numero di granuli cioè senza una deposizione in più, avendo un'erosione sul dorso del ripple e una frana oltre la cresta**. Mai si aggiunge materiale esterno. Quindi il fondale non cresce ma si sposta. Il fenomeno si chiama **PROGRADAZIONE**. Quello contrario (crescere in altezza) **AGGRADAZIONE**.

La duna quindi prograda. Un sedimento che aggrada è quello pelagico: cresce in altezza → **sedimentazione per decantazione**.

Può succedere che durante il meccanismo di spostamento qualche granello che viaggia in sospensione venga depositato (succede per esempio se la corrente trasporta un carico abbondante in sospensione e perde velocità: quindi cede sedimento): allora i due fenomeni convivono → **il fondale prograda e si alza (aggrada) → strutture di decantazione e trazione. (per esempio in torbiditi o in depositi di piena fluviale)**.

Per esprimere e quantificare questa crescita del fondale si introduce L'ANGOLO DI CLIMB: quantifica il materiale caduto dalla sospensione.



Come si misura: si unisce il punto della discesa del ripple al momento C1 con quello della cresta al momento C2. Il segmento forma un angolo con l'orizzontale che è l'angolo di climb.

Per la progradazione l'angolo vale "0"

Per l'aggradazione l'angolo vale "90"

Molto spesso i due processi sono combinati quindi l'angolo cambia. Un angolo di climb elevato corrisponde a quelli che si chiamano **RIPPLES RAMPICANTI**. Questi si formano con molto materiale che casca dalla sospensione e si formano quando abbiamo una corrente che decelera o mollando il

materiale trasportato in precedenza. Ciò succede in una torbidite, alla base della superficie deposizionale. Questo tipo di CLIMBING RIPPLE è tipico di sospensioni che decelerano in cui c'è una quantità di materiale che casca dalla sospensione facendo crescere l'interfaccia deposizionale.

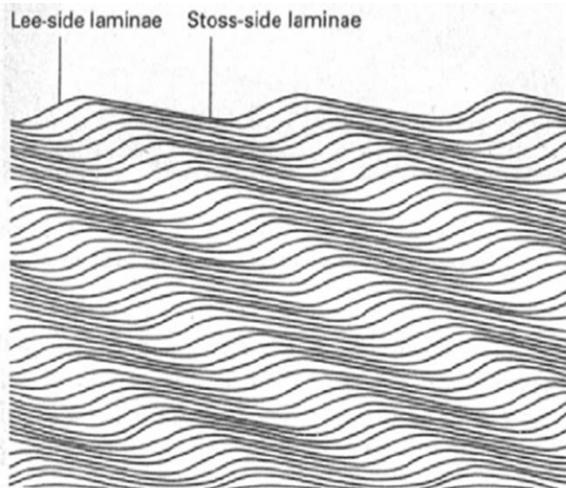


Fig. 4.12 Climbing ripple cross lamination produced by rapid deposition from a flow carrying a high proportion of sand. (After Collinson & Thompson 1982.)



FORMAZIONE DEI RIPPLES RAMPANTI

minimo spostamento → situazione di partenza (treno di ripples asimmetrici) → D = DECANTAZIONE T = TRAZIONE

$D > T$ $D = T$ $D < T$

rampa rampa

I ripples si sovrappongono migrando lungo superfici inclinate

Corrente trattiva (T) + cospicua decantazione di materiale (D)

rampe

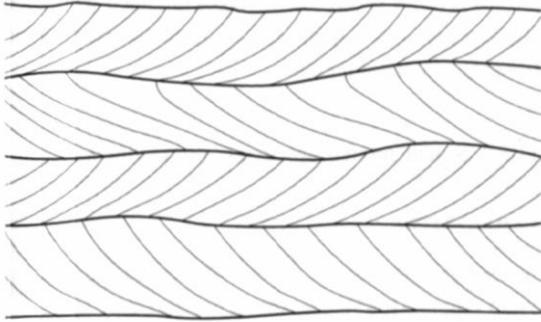
CORRENTI TIDALI

Fra le correnti **UNIDIREZIONALI BISENSORIALI**, va considerato anche un processo trattivo con senso di moto alternato: le **correnti tidali o di marea**. Esse sono caratterizzate da un flusso verso terra ed un riflusso verso mare.

L'energia in gioco dipende dall'escursione di marea. Le correnti di marea, intese come agenti trattive, possono essere trascurate nelle zone caratterizzate da un'escursione di marea $< 2\text{m}$.

Flusso e riflusso possono essere considerati come correnti indipendenti: riescono ognuna a realizzare un proprio equilibrio con il fondo. Le loro strutture più tipiche sono ripple e dune, con il lato posteriore delle dune increspato da ripple.

Herring-bone cross stratification



La stratificazione che frequentemente si ottiene è quella a **lisca di pesce (herringbone)**. Questa struttura è dovuta a inversione di flusso periodico, entrante e uscente. Queste strutture sono facilmente identificabili come processo genetico, ma sono rare: infatti il meccanismo di marea, corrente unidirezionale bisensoriale, prevede sempre un flusso prevalente sull'altro e di fatto la registrazione delle correnti di marea è sempre molto squilibrata e mai simmetrica: il flusso che forma un treno di sandwave e di ripple non è mai ugualmente intenso al flusso di ritorno. Di fatto quindi i veri "herring-bone" non si formano. Quello che molto spesso si registra fossile è un flusso prevalente

unidirezionale e unisensoriale ed un flusso di ritorno subordinato, che smussa gli angoli dei ripples principali ed ha sempre una componente inferiore. Un esempio sono i ripples sopra le dune formati dal flusso contrario al principale.

MOTO ONDOSO CORRENTE UNIDIREZIONALE BISENSORIALE

Il moto ondoso può essere considerato come una corrente che inverte il senso su breve periodo e quindi in esso si possono riconoscere i due opposti regimi trattivi. La trazione si ha solo in acqua bassa, quando la profondità non supera la metà della lunghezza dell'onda. Questa profondità, detta livello di base, varia da condizioni normali (5-10m circa) a condizioni di tempesta (caso estremo anche 200m – onde di tsunami). Le particelle si muovono secondo orbite circolari in mare profondo e secondo orbite ellittiche vicino alla costa che diventano oscillazioni orizzontali vicino alla base della colonna acqua (pavimento marino).

Ripple e megaripple (alcuni autori in questi casi parlano di ripples e sandwaves) sono le forme di fondo. Sulla battigia si accumulano lamine debolmente inclinate verso mare.

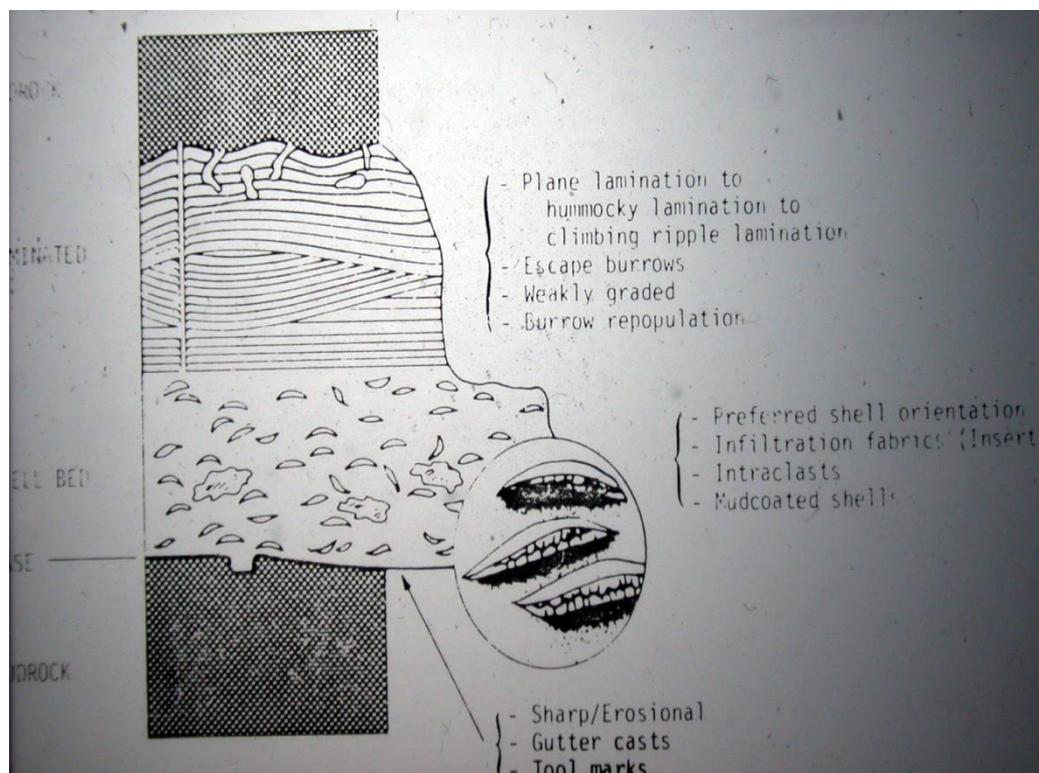
I ripples da corrente erano asimmetrici, avevano lamine frontali depositate sottocorrente. Nel caso di correnti orbitali in acqua alta, o comunque in condizioni di acqua calma, quando cioè l'energia dell'onda è bassa, non si sente molto sul fondo, abbiamo dei ripples che hanno una struttura con forma simmetrica e formano una struttura che prende il nome di **CHEVRON**. Le creste dei ripple sono nette, appuntite ed i grani non riescono a superare le creste. Aumentando l'energia, i grani vengono portati temporaneamente in sospensione durante ogni oscillazione e le creste tendono ad arrotondarsi. In acqua bassa incomincia ad essere rilevante la corrente traslatoria unidirezionale (trazione) che fa sì che l'onda possa creare ripples analoghi a quelli di corrente, da cui quindi sono difficili da distinguere. In pratica quando le onde "sentono il fondo" la sua parte inferiore viene rallentata dall'attrito mentre quella superiore si tramuta in una corrente trattiva unisensoriale.

Quando si distinguono due direzioni delle creste dei ripples che si incrociano con un certo angolo, si parla di **RIPPLES DA ONDE DI INTERFERENZA**. Per esempio sulle spiagge dove l'onda di ritorno viaggia ad una angolazione diversa da quella delle onde principali.

STRUTTURE LEGATE A TEMPESTE

STORMLAY (TEMPESTITE) = strato di tempesta: in questo strato c'è una gamma di strutture gradate (simili alle torbiditi – vedi più avanti). **Tutte le volte** che si ha una corrente che decelera c'è una caduta del materiale in sospensione, prima il più grossolano e via via il più fine. Alla base c'è una superficie erosionale che corrisponde alla fase di culmine della velocità della corrente. In questo caso si ha una

particolare struttura erosionale detta **CUTTER-CAST** (grondaia) (base della tempeste). Quando l'intensità della corrente decresce inizia la deposizione: per primo il materiale grossolano (per esempio le conchiglie). Se ci sono le conchiglie, queste verranno depositate con la concavità verso il basso (sono così più stabili). In questo caso, quando la corrente decelera ulteriormente incomincia a depositarsi il fango. Nella concavità delle conchiglie lo spazio rimane vuoto e durante la fase diagenetica si formerà cemento.



Poi incominciano a formarsi le prime lamine parallele. Poi, al di sopra, si hanno altre strutture concave verso l'alto associate ad altre concave verso il basso. A queste seguono i ripples.

L'abbinamento di queste forme (corrente combinata), viene generato solamente da una tempesta.

PS: forme associate a sabbia media e fine

STRUTTURE SEDIMENTARIE DI DECANTAZIONE E ACCRESCIMENTO (SAND-MUD MIXTURES)

Il particolare modo di combinarsi e mescolarsi di sabbia e pelite legato all'azione di correnti e/o onde provoca altre strutture deposizionali che rientrano nelle **strutture deposizionali da decantazione** (pelite) e **trazione** (sabbia):

FLASER BEDDING
WAVY BEDDING
LENTICULAR BEDDING

Quindi queste strutture sono generate dalla presenza contemporanea di sabbia e pelite (situazione tipica, per esempio, di ambiente di marea)

Via via che la marea sale, l'attrito fa scemare la velocità delle correnti tidali, avendo velocità maggiori all'esterno della piana tidale e minima all'interno. Questo fa sì che la sabbia mescolata con un po' di

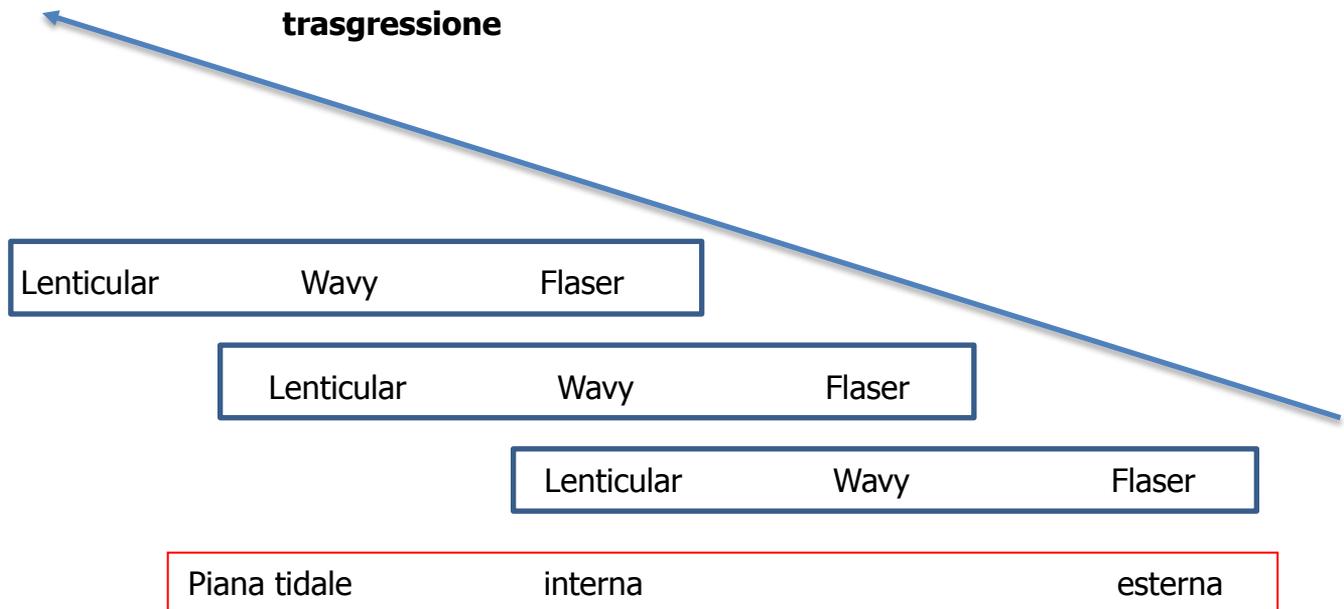
argilla (FLASER) predomina all'esterno della piana tidale e l'argilla con un po' di sabbia (LENTICULAR) predomina all'esterno.

FLASER bedding : prevalenza di sabbia che contiene lenticelle concave verso l'alto di pelite. Si adagiano durante la stanca della marea nel ventre dei ripples.

WAVY bedding : situazione intermedia dove sia sabbia che pelite formano degli strati continui

LENTICULAR bedding : prevalenza di pelite e contiene sabbia che forma dei ripples (lenti)

Se riconosciamo una sequenza costituita, dal basso verso l'alto, da lenticular, wavy, flaser, siamo di fronte ad una successione verticale che indica l'avanzamento, cioè la trasgressione del mare.



PROCESSI MASSIVI E TRASPORTO DI MASSA

Questi processi possono agire sia in ambiente subaereo che subacqueo. Vi rientrano svariati fenomeni (valanghe, attività esplosiva dei vulcani, ghiacciai, creep.....). Viene qui considerato sedimento già accumulato e “parcheggiato” in attesa di venire rimobilizzato (RISEDIMENTAZIONE) da un processo massivo.

In un processo massivo l'energia è legata soprattutto alla massa ed alla sua distribuzione (densità dei solidi e dei fluidi, concentrazione dei solidi etc). Il materiale può essere totalmente fine, molto grossolano o misto: non vi è un limite massimo di competenza.

Un trasporto di massa catastrofico lascia come “firma” la **gradazione granulometrica** (PS se non specificato si intende gradazione diretta – grani grossi alla base e via via più fini verso l'alto-, altrimenti si specifica “gradazione inversa”), una base erosiva e/o un graduale ritorno alla calma o un arresto improvviso: nel primo caso si ha uno “strato gradato”, nel secondo uno “strato massiccio o caotico”. Possono essere associate strutture erosive e deformative.

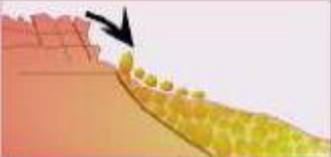
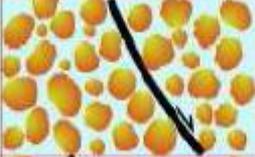
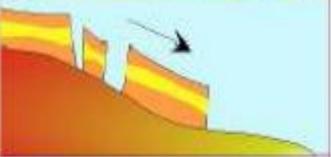
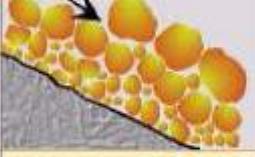
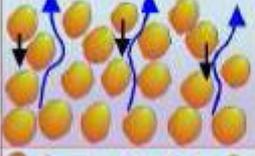
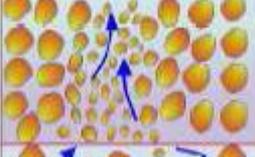
Vediamo ora le principali caratteristiche dei principali processi di massa.

FLUSSI GRAVITATIVI (MASS FLOWS o GRAVITY FLOWS)

Miscele di fluido e di detrito si possono muovere per gravità attraverso diversi tipi di meccanismi che possono essere agire individualmente o in modo combinato. Condizione necessaria è che ci sia un gradiente topografico. **La differenza fra flusso gravitativo e corrente trattiva è che quest'ultima effettua un trasporto selettivo, agisce singolarmente granulo su granulo. Nei flussi gravitativi, invece, c'è un trasporto di massa.**

Un flusso gravitativo agisce e sussiste in funzione del sedimento che contiene, cioè è materiale più denso della massa d'acqua pulita circostante e si sposta verso il basso in modo concorde con la forza di gravità.

Nello **schema** sottostante, dal basso vs l'alto, c'è un aumento della densità del flusso: nella parte superiore ci sono gli **SLIDES** cioè scivolamenti in massa (frane), ma non sono flussi gravitativi: la differenza è che mentre la colata ha un comportamento plastico con infiniti piani di taglio, la frana avviene attraverso un limitato numero di piani di taglio.

		MECCANISMI GENETICI		TIPI di SEDIMENTI	
disgiuntiva		CROLLO di BLOCCHI Il distacco avviene lungo le fratture		DETRITI di FRANA depositi a grana grossolana prossimi alla zona di distacco	
		SCOLLAMENTO Il distacco si verifica lungo superfici piane		STRUTTURE TABULARI di SCOLLAMENTO le varie unità sono separate da fratture subverticali	
		SCIVOLAMENTO Il distacco si verifica lungo superfici concave		STRUTTURE PIEGATE da SCIVOLAMENTO le frecce indicano i movimenti relativi delle varie porzioni	
plastica		FLUSSO GRANULARE I granuli perdono coesione per effetto di pressioni anomale o variazione di pendenza del substrato		LENTI di MATERIALE ARENACEO gli spessori non superano il decimetro	
		FLUSSO di DETRITI l'equilibrio instabile è rotto dall'aumento del carico o dalla perdita di coesione tra i vari componenti		DEPOSITI DETRITICI sono caotici poiché non si è realizzata la separazione delle frazioni con diversa granulometria	
fluidale		LIQUEFAZIONE la discesa di alcuni granuli, provoca la migrazione verso l'alto del fluido che avvolge completamente gli altri		ARENARIE CONVOLUTE stratificazione pressoché assente rimpiazzata da strutture deformazionali caotiche	
		FLUIDIFICAZIONE flussi ascendenti di fluidi canalizzati		ARENARIE a PILASTRI I pilastri indicano la posizione dei condotti di risalita dei fluidi	
		CORRENTI di TORBIDA flussi turbolenti di materiale con granulometria molto disomogenea		TORBIDITI sedimenti composti costituiti da una successione di prodotti che passano da arenarie grossolane sino ad argille	

I flussi gravitativi in senso stretto sono:

CORRENTI (FLUSSI) DI TORBIDA (TURBIDITY CURRENT)

(**turbolenza:** la turbolenza serve per spostarsi cioè è la componente della corrente verso l'alto, mantenendo in sospensione le particelle)

FLUSSI FLUIDIFICATI (LIQUEFIED FLOWS)

(**corrente ascensionale:** flussi di acqua ascendente, con moti verticali del flusso: spesso questo meccanismo è meno efficace ed agisce da “spalla” ai moti turbolenti)

FLUSSI GRANULARI (GRAIN FLOWS)

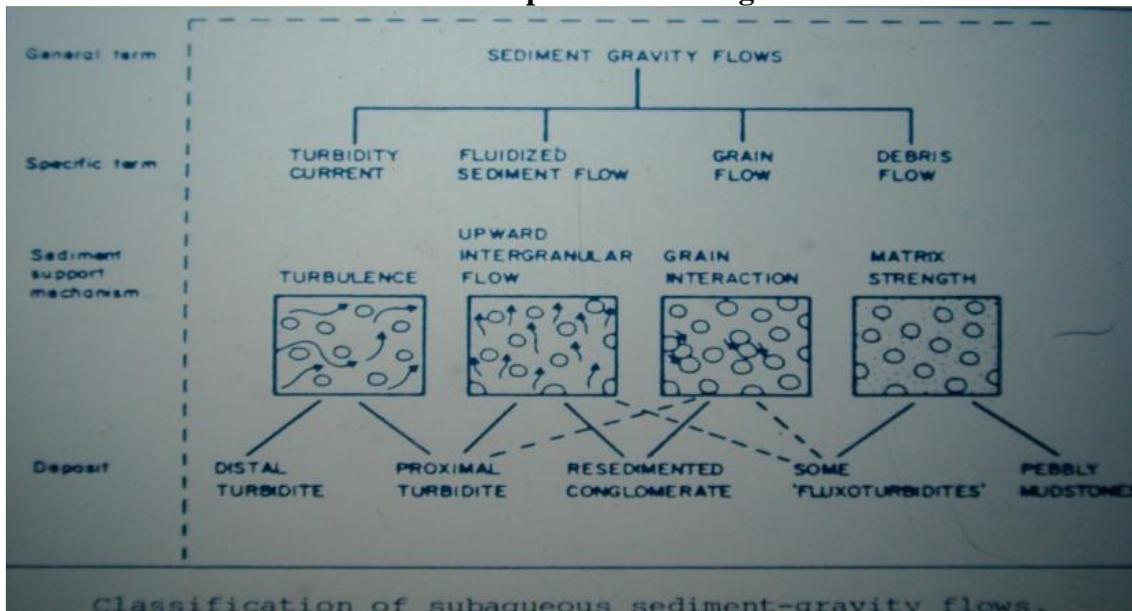
(**collisione:** interazione fra i granuli che si scostano a vicenda. Il fenomeno si chiama pressione dispersiva o interazione granulare))

COLATE (DEBRIS FLOWS – MUD FLOWS)

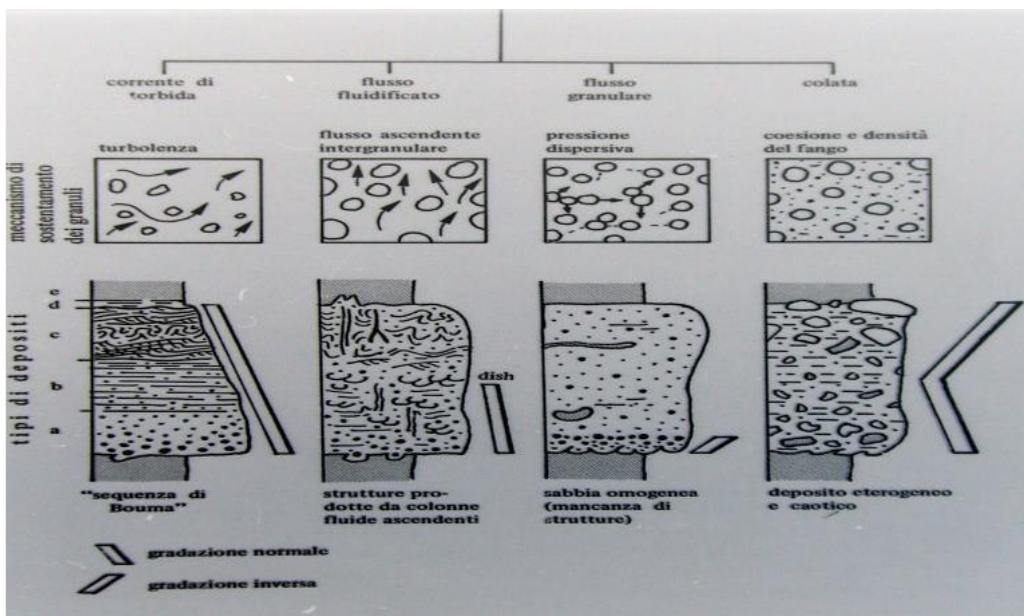
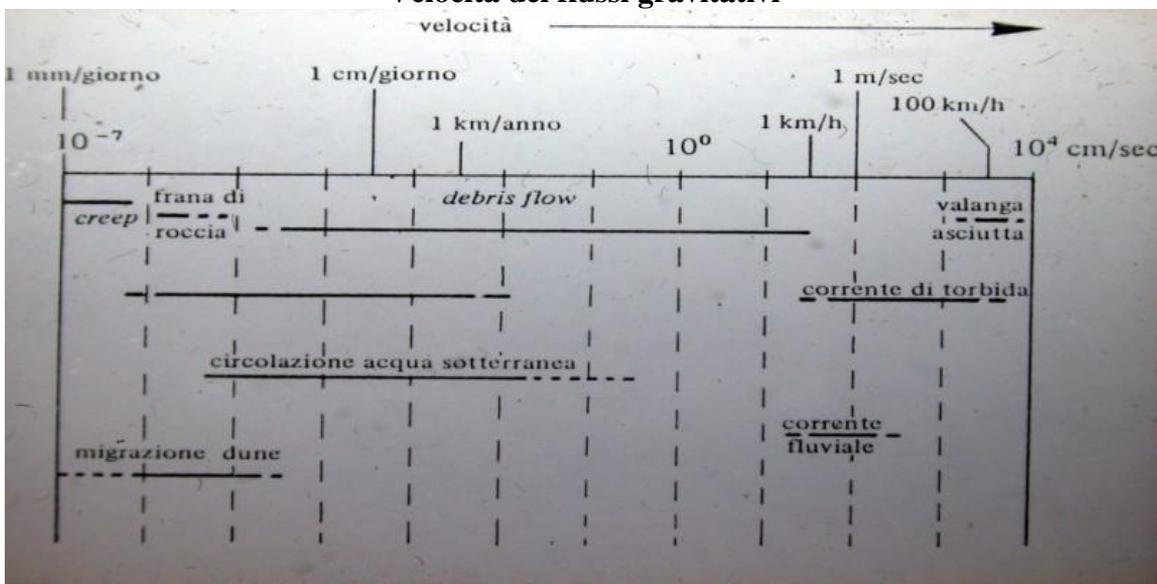
(**plasticità:** dovuta alla coesione data dal fango)

(fra parentesi in grassetto il “motore” dei fenomeni)

Meccanismi di trasporto dei flussi gravitativi



Velocità dei flussi gravitativi

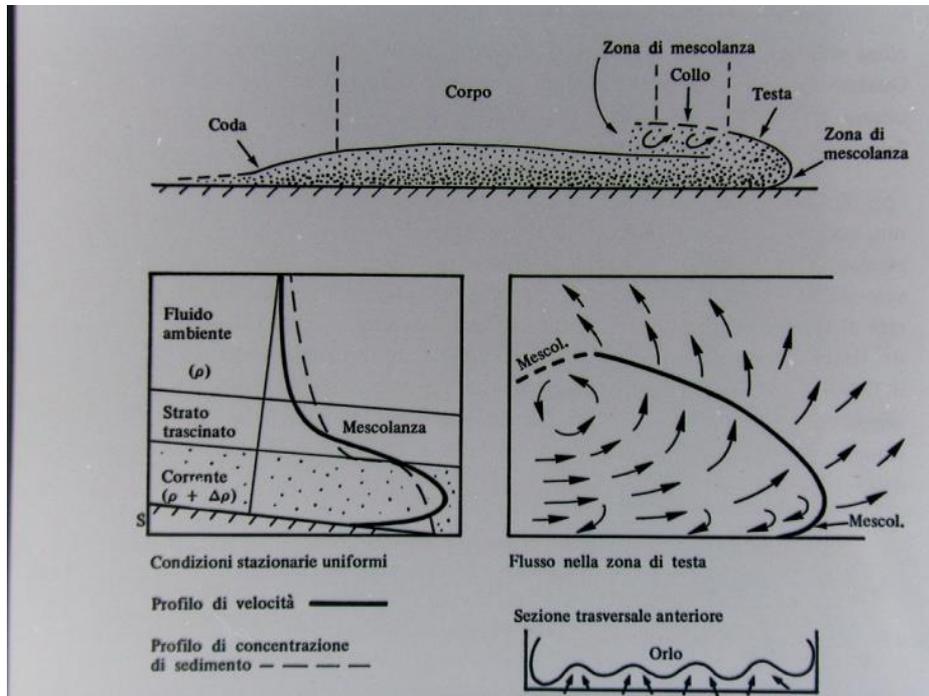


Dalle correnti di torbidità alle colate c'è un aumento della densità.

CORRENTI DI TORBIDA (TURBIDITY CURRENT)

Il deposito associato prende il nome di **torbidite**.

E' un trasporto che avviene in sospensione (turbolenza) e si verifica quando c'è un gradiente topografico; la messa in moto è dovuta ad uno shock sismico o alla rottura di equilibrio per accumulo.



E' costituita da una testa (zona di massima turbolenza, quindi erosione: la turbolenza è data dall'attrito del corpo con la massa d'acqua circostante) da un corpo e da una coda. Quando la corrente di torbida arriva in fondo alla scarpata inizia a decelerare e si ha il deposito.

Il flusso della corrente di torbida è tutt'altro che stazionario ed uniforme, ma può considerarsi tale per il tratto del percorso in cui la corrente è in equilibrio con il fondo: infatti nelle parti alte del pendio la corrente

acquista velocità ed energia e può erodere, alla base del pendio rallenta e perde capacità di trasporto abbandonando gran parte del suo carico. Vi sarà un tratto intermedio in cui si verificano condizioni di equilibrio: qui il flusso sarà stazionario ed uniforme (almeno durante il passaggio del corpo centrale).

La parte più avanzata della testa è leggermente sollevata dal fondo a causa dell'attrito: il suo orlo (vedi fig.) visto in pianta è ondulato: il fluido che sta sotto si insinua sotto l'orlo formando gallerie vorticose e mescolandosi con la torbida (strutture erosive).

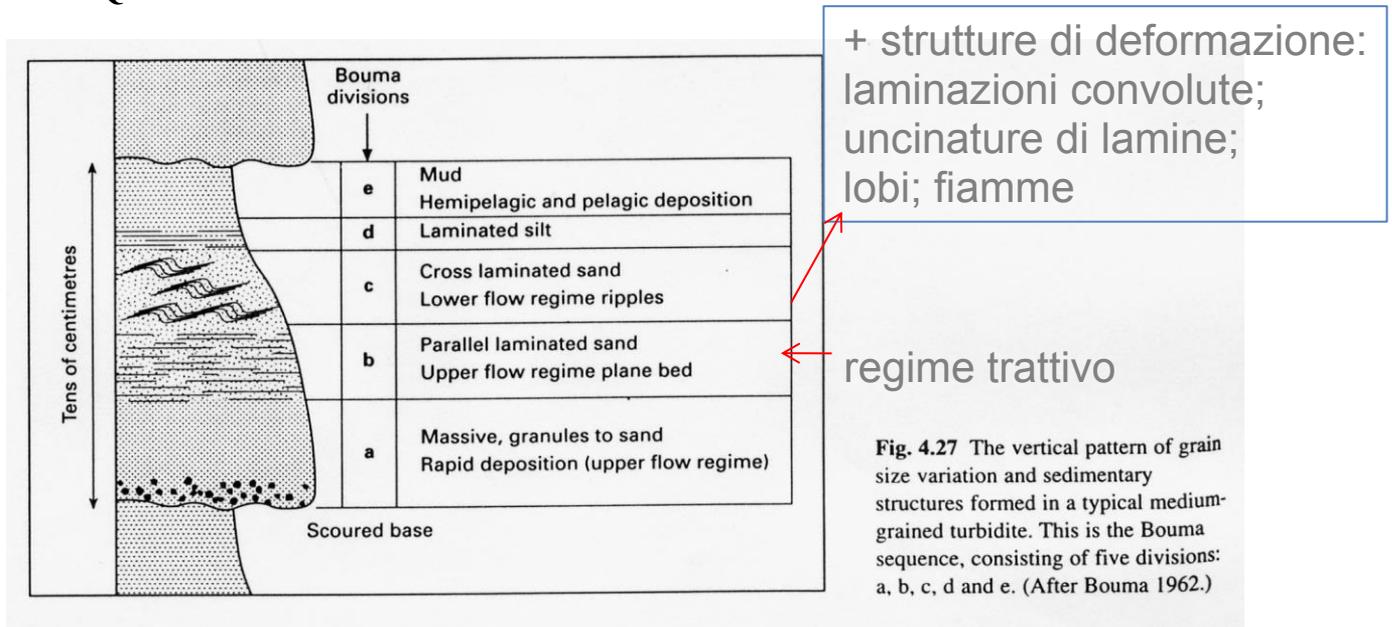
Altre zone di mescolanza sono localizzate nella parte posteriore della testa (collo) ed in parte sopra il corpo (strato trascinato).

Testa: parte più turbolenta: moti ascendenti nella parte superiore, discendenti in quella inferiore (vedi fig): all'impatto dei vortici o degli oggetti trascinati sul fondo si ha erosione e quindi impronte erosive riempite da sabbia al passaggio del corpo.

Corpo: deposita: qui si ha la più parte dei materiali sospesi.

La torbidite è un evento → tempo breve (mentre il materiale che si deposita per decantazione, per esempio una sedimentazione pelagica, non viene considerato un evento in quanto si deposita nell'arco di tempo molto ampio). Si tratta di una corrente di densità in cui l'eccesso di densità è causato da un carico di sedimenti in sospensione. (PS: per il movimento è sufficiente una differenza laterale di densità per cui basta una inclinazione del pendio anche minima – dell'ordine di 1°).

LA SEQUENZA DI BOUMA



Il deposito di una corrente di torbida presenta una sequenza di strutture caratteristiche, l'insieme delle quali viene definito **SEQUENZA DI BOUMA**. La sequenza completa è caratterizzata da 5 intervalli (fra parentesi le granulometrie generalmente coinvolte):

Ta = materiale massivo più grossolano che presenta una gradazione diretta: è gradato perché per gravità i grani più grossi si depositano più in basso di quelli più fini, ma ci sono anche grani fini perché la corrente non è in grado di separare le frazioni granulometriche. In questo intervallo ci possono anche essere degli intraclasti cioè frammenti di fango angolosi strappati dal fondo dalla corrente stessa. (da granules a sand). Nell'intervallo a si trovano spesso sparsi o concentrati in livelli e tasche di spessore variabile degli inclusi plastici cioè frammenti di fango semiconsolidato (mud chips) erosi durante il percorso o incorporati dalla corrente all'origine.

Tb = intervallo a laminazione parallela: la corrente si è alleggerita del grosso ed agisce una trazione sui granuli stessi : regime trattivo. (sand)

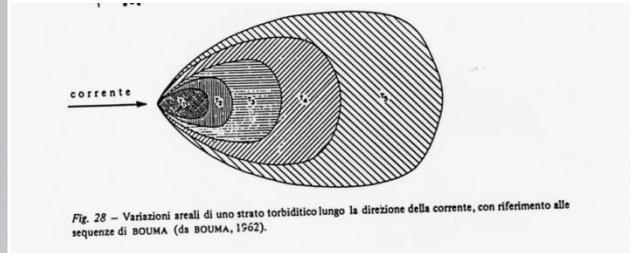
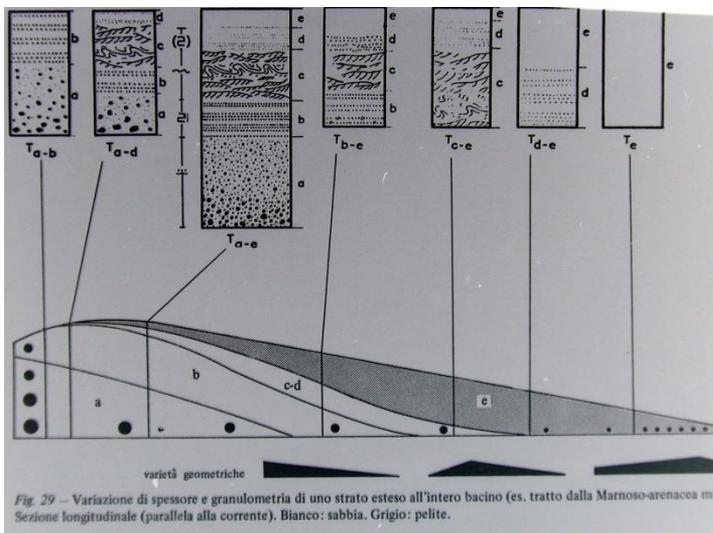
Tc = strutture cross laminated: sono ripples (sand). In questo intervallo si possono osservare anche altri tipi di strutture, se la sedimentazione è molto rapida: sono strutture di deformazione idroplastica: laminazioni convolute, arricciature, uncinature di lamine, lobi , fiamme.

Td = lamine parallele, ma meno accentuate: il materiale è più fine. (silt): incomincia il deposito lento di particelle più fini (silt appunto). La velocità è ormai bassa (<10 cm/sec) : Le lamine non sono trattive, ma di decantazione del materiale della coda della torbida. A volte questo intervallo non esiste o il passaggio è talmente brusco che compare una piccola sup. erosiva.

Te = miscela di materiale fine (fango) legato alla torbidite associato a materiale pelagico in posto (generalmente c'è anche del plancton). In realtà questo intervallo è praticamente indistinguibile dalla sedimentazione autoctona.

La base della sequenza è erosiva!!

Non sempre queste unità sono tutte presenti. Nello schema variazioni areali e sezione longitudinale:

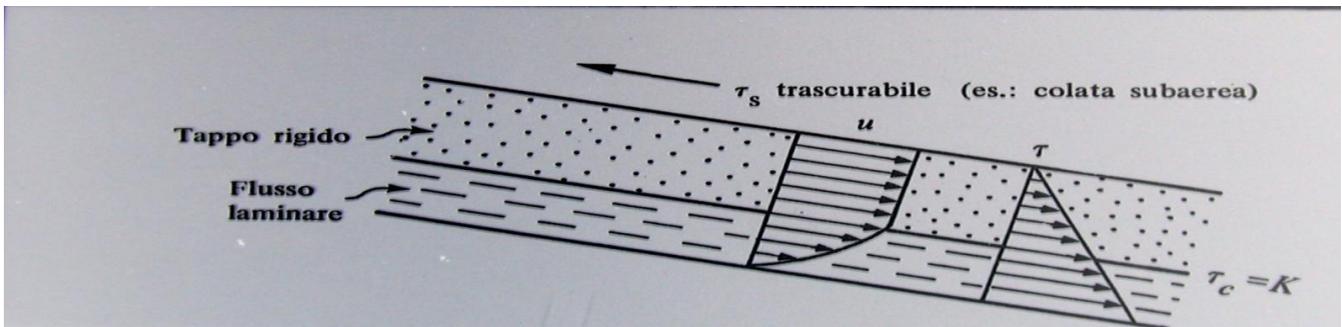


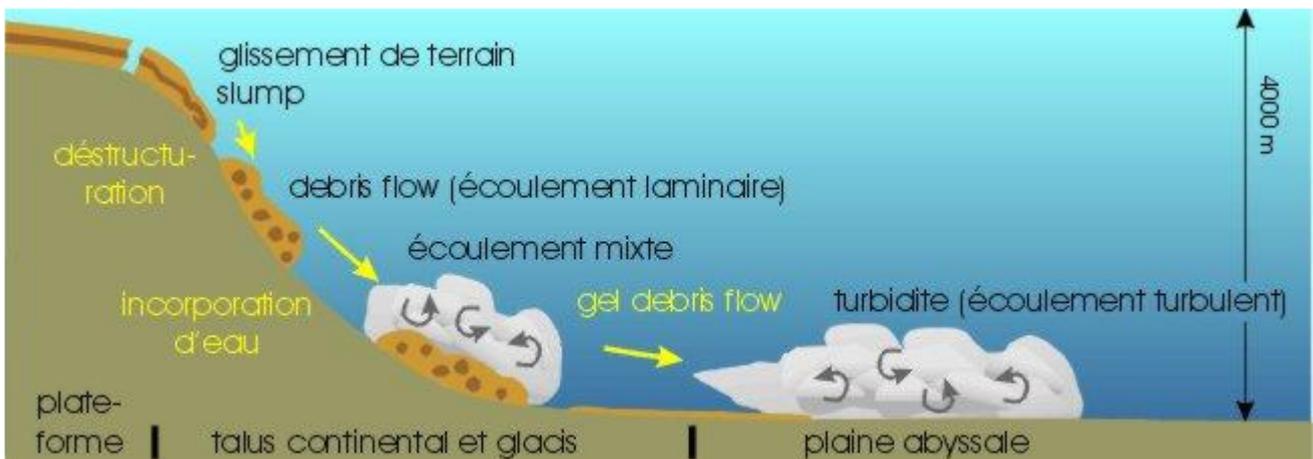
FLYSCH: indica una sequenza di torbiditi il cui innesco è tettonico. E' un termine che ha significato geodinamico legato all'evoluzione di una catena montuosa (fase di innalzamento). Sopra il flysch, alla fine, si ha generalmente il deposito di MOLASSA. Quando c'è una stasi tettonica, non c'è il flysch, ma solo singole torbiditi.

Flussi fluidificati: deformano l'intervallo Tb di una torbidite ed avvengono contemporaneamente alla deposizione. E' un meccanismo accessorio che agisce nelle fasi iniziali di deposizione di una torbidite. Il materiale che si deposita arriva in acqua in pressione e quindi a forte velocità. L'acqua contenuta fra i granuli scappa verso l'alto durante la fase di deposizione e si formano i "camini" (pillars) che sono delle discontinuità verticali. In cima al camino si forma un "vulcanetto", fatto di sabbia, spesso troncato, spazzato da eventi torbiditici successivi. Fra i camini si formano le strutture a "piatto" (dish): sono strutture simmetriche dovute a deformazione delle lamine per "intrusione" dei camini. Queste forme possono essere più o meno disturbate e diventano più complesse dando origine a LAMINAZIONI CONVOLUTE. Il flusso fluidificato quindi si sovrappone alla torbida.

Flussi granulari: deposizione estremamente rapida: non c'è gradazione diretta, quindi il materiale grossolano è privo di strutture. Può esistere però alla base una gradazione inversa alla base perché i granuli sbattono fra loro formando un effetto setaccio che trattiene il granulo più grosso, che quindi si ritrova a galleggiare sul materiale più fine. Fra i granuli c'è sabbia e mai fango. Si formano con gradienti topografici molto grandi.

Colate di detrito: flusso molto concentrato e molto denso: clasti che flottano nel fango. Privo di strutture (aspetto massivo) e poco assortito. Può essere anche un mud flow (colata di fango). Le colate non hanno base erosiva.





Ulteriori approfondimenti nel seminario della dott.ssa Lucchi (OGS)

PROCESSI MASSIVI: FRANE

Nello schema iniziale c'era una prima tipologia di "tipi di trasporto" che non abbiamo ancora accennato: sono le frane.

Frane subacquee e subaree hanno una genesi sostanzialmente simile, ma quelle subacquee sono più importanti nella genesi di rocce sedimentarie.

In condizioni normali il sedimento subacqueo è drenato, cioè la pressione d'acqua la suo interno se ne può uscire sotto l'effetto del carico litostatico. Quindi frane subacquee avvengono solo quando ci sono pendenze superiori a 15°-20° (cosa piuttosto rara e comunque estremamente localizzata: inoltre spesso queste sup. sono prive di sedimenti ... fianchi canyon, scarpate di faglia etc).

In condizioni non drenate (e quindi sotto-consolidate) invece l'acqua interstiziale trasmette pressione al sedimento con una componente di alleggerimento verso l'alto: e quindi si annulla alla base la resistenza al taglio e si innesca il processo franoso.

Nelle frane durante il movimento la massa scivola senza deformarsi (anche se si può rompere in vari blocchi e originare una megabreccia).

Morfologicamente e cinematicamente le frane si riconducono a due tipi base:

GLIDE: frane a scorrimento piano-parallelo (in genere in corpi eterolitici) → superficie distacco e scorrimento formano una L

SLUMP: frane a scorrimento rotazionale (in genere in corpi omogenei) → superficie distacco e scorrimento formano una superficie curva:

listrica

Se in una data zona il fenomeno si ripete più volte, esso si può sviluppare in modo regressivo quando ogni distacco destabilizza la porzione a monte del pendio, o progressivo quando la massa destabilizza il pendio a valle.

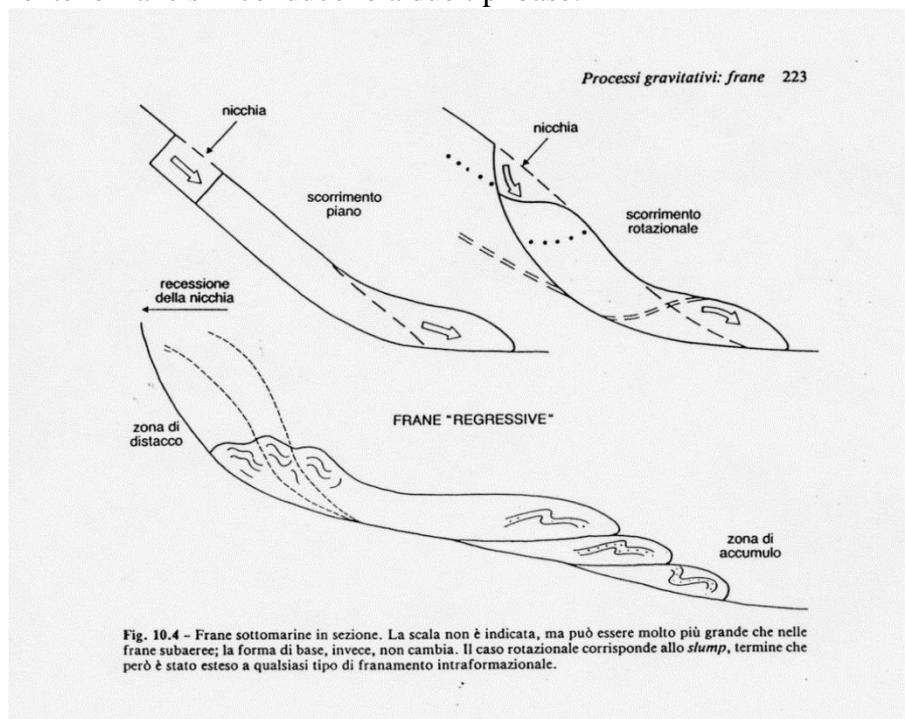


Fig. 10.4 - Frane sottomarine in sezione. La scala non è indicata, ma può essere molto più grande che nelle frane subaree; la forma di base, invece, non cambia. Il caso rotazionale corrisponde allo *slump*, termine che però è stato esteso a qualsiasi tipo di franamento intraformazionale.

STRUTTURE EROSIONALI

Sono il prodotto di un evento erosivo.

Quando si conserva la struttura in originale, in positivo, il termine usato è **MARK**.

Quando struttura non è conservata in originale, ma come modello (**CONTROIMPRONTA**), il calco prende il nome di **CAST**.

Il termine **SOLE MARK** è un termine generico per indicare le strutture erosionali di piccole dimensioni.

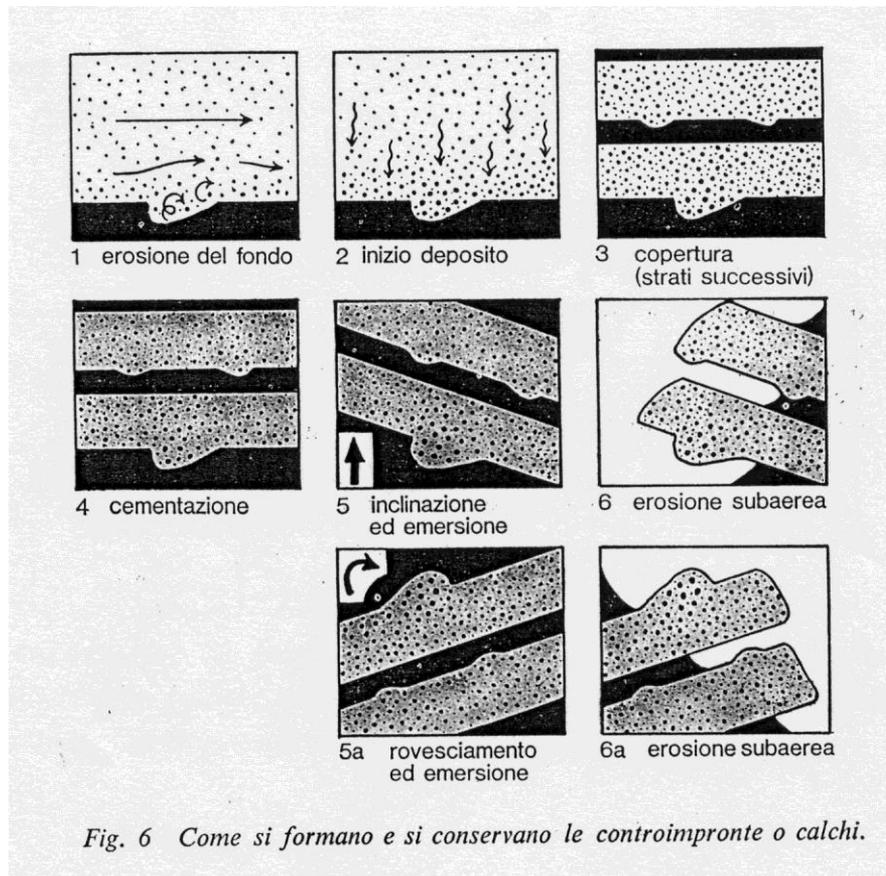


Fig. 6 Come si formano e si conservano le controimpronte o calchi.

Se si considera il meccanismo che ha prodotto l'erosione si usa la seguente terminologia:
SCOUR MARKS → prodotte da un **vortice turbolento** che causa erosione

TOOL MARKS → prodotte dall'**impatto di un corpo**, un oggetto (per es. ciottoli) portato dalla corrente

vortice e impatto sono agenti e non cause

A seconda della modalità con cui avviene questa erosione si hanno diverse "categorie" di strutture erosionali. Gran parte di queste strutture è preservata alla base di un evento deposizionale (per es: una torbidite).

Agenti erosivi sono le correnti idriche, il vento, le onde e la turbolenza.

Affinché le strutture erosionali si conservino sono necessarie alcune condizioni. Va ricordato che è molto più facile che si conservi un evento erosivo in un sedimento fine che in uno grossolano (questo anche perché il successivo riempimento in genere è grossolano ed ha la stessa litologia e quindi non si riesce a distinguere). Nella figura un esempio (fig.6): suppongo di avere il letto costituito da sedimenti fini

(plastici, come le peliti). Quando arriva l'evento di energia (per esempio una corrente di torbida) si innescano fenomeni di turbolenza → erosione. Si crea una struttura erosiva che viene "tappata" dal materiale (più sabbioso) portato dalla coda della corrente pochi attimi dopo. L'evento si può ripetere successivamente. Suppongo una successiva fase orogenica: si ha emersione del materiale. La pelite, meno resistente rispetto alla sabbia all'erosione aerea, che sta attorno alla parte erosa in acqua dalla corrente viene erosa in ambiente subaereo e resta la sabbia come **MODELLO (CALCO → CAST)**, insomma il "negativo". Questo tipo di struttura quindi **non viene conservata in originale ma come modello** (che si chiama anche **CONTROIMPRONTA**). Quindi il **cast è il riempimento**. **Attenzione:** Se gli strati vengono inclinati di un angolo inferiore a 90°, mantengono la loro polarità (basso-alto) (caso 5-6); se vengono verticalizzati o rovesciati, invertono la polarità (caso 5a-6a). Non si può allora riconoscere la struttura sedimentaria in base alla posizione attuale, ma bisogna ricostruire la posizione originari, cioè la polarità, conoscendo bene la morfologia della struttura.

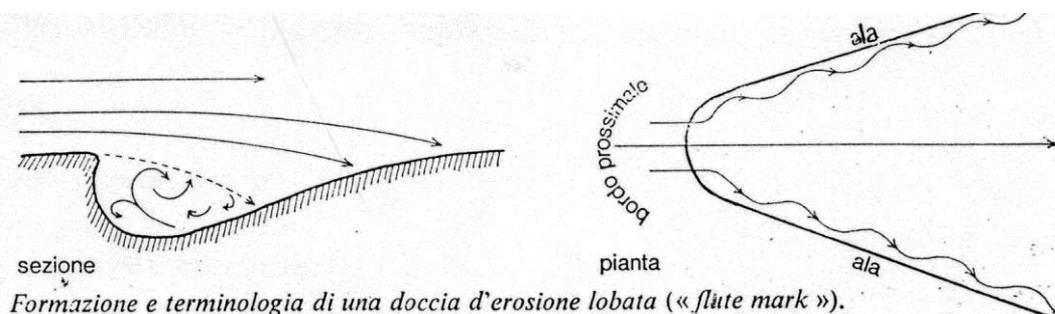
Le strutture erosionali si ritrovano in un ampia gamma di ambienti deposizionali. Sono prodotti tipici di ambienti con sedimentazione episodica e sono particolarmente comuni in successioni torbiditiche dove **il sole mark è preservato come cast alla base della torbidite che sta sopra**. Molte strutture sono direzionali e quindi permettono di operare una ricostruzione delle paleocorrenti.

ESEMPI:

SCOUR MARK → struttura a "mezza luna", asimmetrica. E' il risultato di vortici (agente) legati alla presenza di un ostacolo (causa). Hanno dimensioni generalmente piccole e possono essere presenti come impronte singole o ricoprenti tutta la superficie. Nell'ambito di questo gruppo di strutture ricordiamo: .

FLUTE CAST → struttura di riempimento a forma di "flute", o **FLUTE MARK** → struttura di erosione sempre a forma di "flute". La struttura, in positivo o come controimpronta, è dovuta a flusso vorticoso che erode il letto e crea una depressione successivamente riempita da altro sedimento. E' una struttura asimmetrica in sezione. Dimensioni: da 5 a 50 cm lungo e ampio da 1 a 20cm. I flute possono essere presenti isolatamente o associati.

I flute indicano condizioni turbolente in regime di flusso sia superiore (più sviluppati) che inferiore.



GUTTER CAST → struttura erosiva lineare a "grondaia" propria di tempesti. E' simmetrica. Dimensioni decimetriche. Può avere un profilo ad U o a V. Generalmente alla base di materiale arenaceo

TOOL MARK → strutture da impatto

Una ulteriore distinzione di queste strutture viene fatta in base alle modalità con le quali l'oggetto ha "strusciato" sul fondo o ha impattato il fondo.

Esistono quindi impronte da impatto singolo, da rotolamento, da rimbalzo

Impatto singolo:

BOUNCE MARK: impatto breve

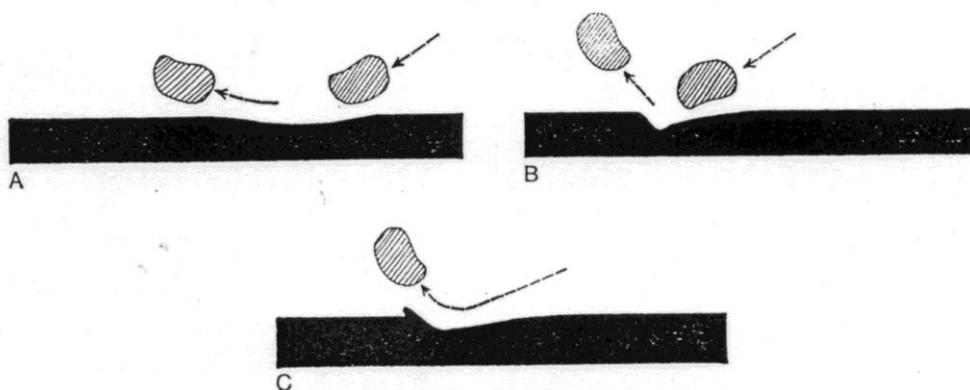
PROD MARK: impronta più profonda

BRUSH MARK: impronta profonda, come il prod, ma presenta dei corrugamenti sul bordo anteriore o distale dovuti alla spinta laterale esercitata dall'oggetto sul fango antistante il solco

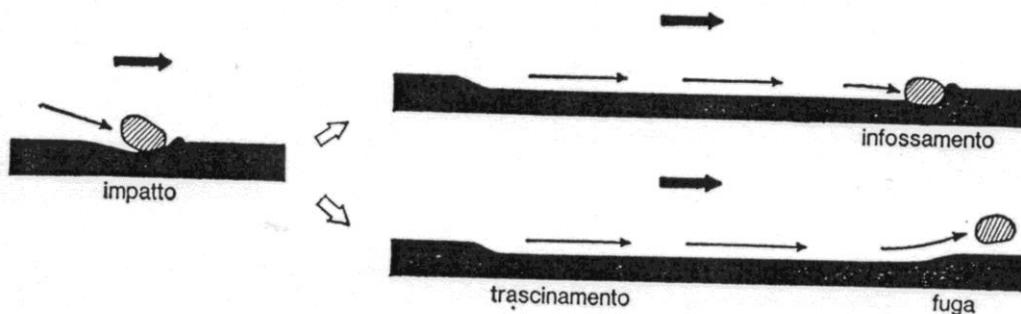
PS: in genere conservati più facilmente come cast

GROOVE CAST → (controimpronta di trascinamento) è una controimpronta ed è troppo piccola per definirne il verso (vedi campione museo): è dovuta ad un oggetto trascinato sul fondo che generalmente non si conserva.

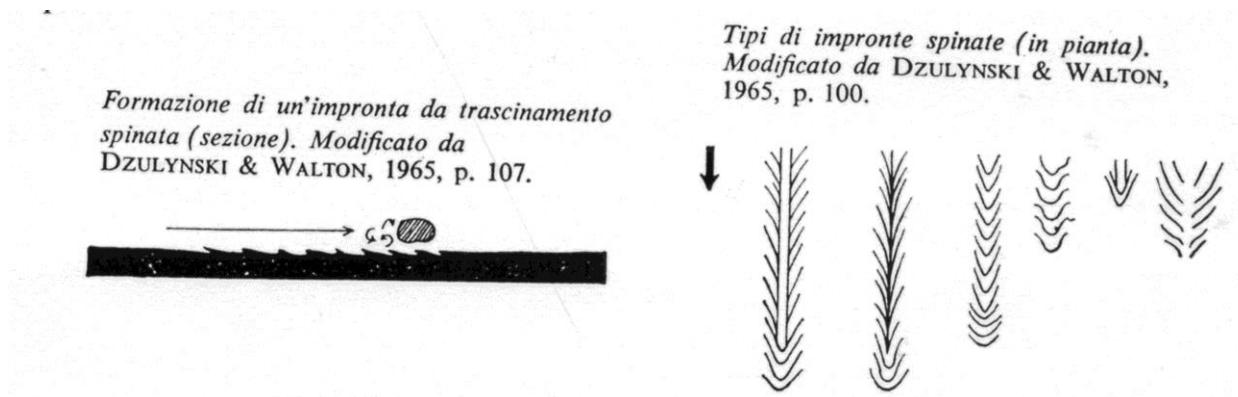
Formazione delle impronte da impatto: A «bounce mark», B «prod mark», C «brush mark» (sezione). Modificato da DZULYNSKI & WALTON, 1965, p. 107.



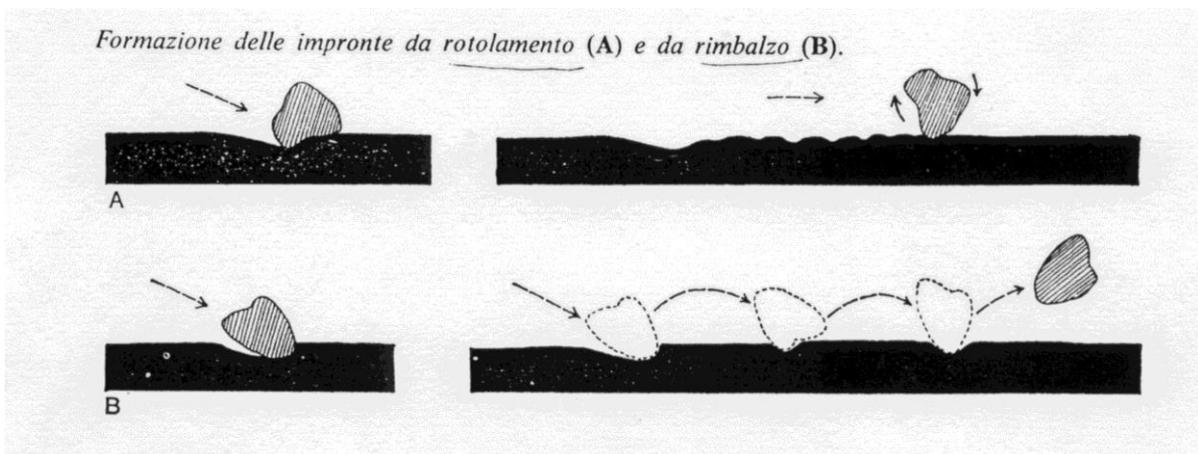
Formazione di un solco di erosione da trascinamento («groove mark»), con e senza conservazione dell'oggetto scavatore.



CHEVRON CAST : impronte da trascinamento spinate: sono calchi a forma di lisca di pesce.



Impronte di rotolamento (**ROLL CAST**) e rimbalzo (**SKIP CAST**).



Strutture erosionali a scala più grande

struttura a **CANALE (CHANNEL)** (canale di erosione) è una struttura permanente (cast e mark). E' una tipica forma di ambiente fluviale, delta, estuario.

SLUMP-SCAR → sono le superfici lungo le quali scorrono gli slump. Queste superfici sono preservate se vengono riempiti da sedimenti successivi.

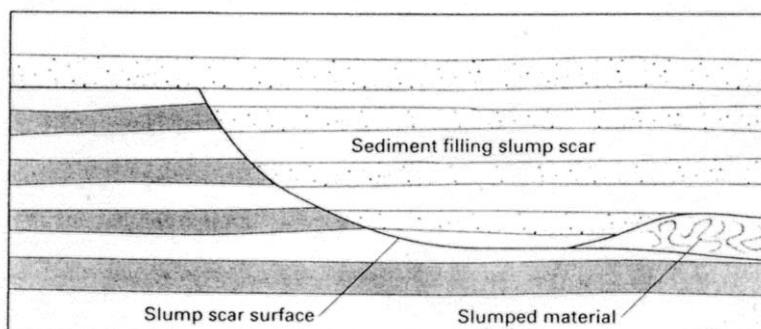


Fig. 4.32 Slump scars produced by movement of a mass of material on a failure surface.

ALTRE STRUTTURE

Alcune STRUTTURE DEFORMATIVE:

Sono deformazioni penecontemporanee, che interessano cioè i sedimenti durante la deposizione o poco dopo, quindi quando non sono ancora litificati. La meccanica di deformazione può essere legata ad agenti fisici, chimici o biologici.

AGENTI FISICI

Strutture legate alla GRAVITÀ → non hanno vergenza, ma puntano verso il centro della terra. Sono STRUTTURE DI CARICO o LOAD CASTS, dove per carico si intende la pressione litostatica.

Quando ci sono materiali a densità diversa interstratificati fra di loro, si ha un sistema instabile e si possono creare diverse strutture. Una di queste strutture sono i BALL AND PILLOW - PSEUDONODULI (agente : terremoto)

RAIN DROP: piccoli crateri che si possono fossilizzare in negativo (casts) → sono gocce di pioggia. Struttura tipica di ambienti aridi

CONVOLUZIONI: sono lamine parallele deformate da load-casts associati a corrente di trascinamento (frequente nelle torbiditi). Generalmente le convoluzioni si trovano in materiale fini e siltiti, non in quelli più grossolani: i sedimenti devono essere saturi (di acqua) soffice e leggermente coesivo, dal comportamento duttile e soggetto a sforzo di taglio o semplicemente a “collasso gravitativo”.

SLUMPING: coevi alla deposizione che interessa la deformazione (cioè deformazioni che avvengono prima della diagenesi). Hanno una vergenza (indicano cioè un verso).

Le fratture, per definizione, avvengono a materiale già litificato: sono quindi postdiagenetiche. Però queste fratture possono essere riempite per riflusso o per risucchio dei sedimenti dall'alto:

FILONI SEDIMENTARI (DICCO se è discordante) → sono iniezioni più o meno forzate in rocce incassanti (fratturate per attività tettonica) di materiale ancora plastico. Se il materiale si infila lungo un piano di strato si parlerà di FILONE SEDIMENTARIO CONCORDANTE (O SILL O FILONE STRATO). Il filone sedimentario si ha in genere in fase di rifting ed è quindi legato ad un fenomeno tettonico.

Attenzione: se il riempimento è avvenuto per deposizione, cioè il materiale non è fluito, non si parla di filone sedimentario. In questo caso si osservano strati paralleli: questa è una frattura beante sul fondo del mare.

MUD CRAKS (FANGHI POLIGONALI) → si formano in tutti gli ambienti dove c'è una sedimentazione fine. Sono fanghi secchi **dovuti a contrazione** per essiccamento (fessure di contrazione).

Si possono fossilizzare e nelle fratture si deposita materiale grossolano (microbreccioline, in pratica frammenti di fango secco) che sigilla la struttura.

La struttura a fanghi poligonali è presente anche in ambienti profondi (e non solo subaerei). Questo perché il fenomeno di contrazione può avvenire anche senza deidratazione. I minerali argillosi si possono contrarre per fenomeni di sineresi (variazioni di salinità che modificano il reticolo cristallino delle argille che contraggono).

Quindi i mud-craks sono subaerei solo se associati a strutture subaeree, per es gocce di pioggia, o tee pee.

AGENTI CHIMICI: danno strutture diagenetiche o secondarie

Strutture a TEE PEE : **strutture dovute ad espansione**. Si trovano in ambiente sia attuale (Chott → Africa settentrionale), sia nel fossile.

Meccanismo di formazione:

1° fase: fango poligonale

2° fase: evaporazione intensa, quindi nelle lastre si ha deposizione di sali evaporitici e quindi espansione laterale: quando i lastroni si toccano, si deformano e danno luogo a guglie.

Non sempre ci sono evaporiti. Basta che nelle fratture (che devono essere tante) ci sia cemento carbonatico (quindi un ambiente carbonatico) che questo cemento si espande e forma una struttura di questo genere. Molti tee pee si formano in ambiente subaereo, ma esiste attualmente anche la formazione in ambiente subacqueo.

BIRD-EYES → serie di forellini circolari riempiti di cemento: sono strutture tipiche di sedimenti carbonatici (si trovano anche nelle peliti, ma in esse non si ha la cementazione precoce, quindi non c'è conservazione). Si conserva invece dove c'è cementazione precoce → quindi in ambiente inter-sopratidale → fossilizzazione di bolle di gas (da cui i buchi) intrappolate nel sedimento carbonatico che subito cementa. Il gas è dovuto o ad un effetto dinamico, oppure a decomposizione di sostanza organica.

HARDGROUND → è una cementazione precoce presente in tutti gli ambienti. Nel caso di noduli di Fe-Mn, l'ambiente è profondo: Fe e Mn sono precipitati in ambiente profondo caratterizzato da scarsa sedimentazione, se non addirittura sedimentazione assente. Indicano quindi quasi una lacuna stratigrafica. Esistono inoltre anche gli hardground intesi come crostoni legati a fasi di emersione.

NODULO → è una struttura diagenetica dovuta a precipitazione di sale entro un sedimento ospite: ci deve essere una discontinuità nel sedimento (per esempio tane di organismi) dove si concentrano i sali presenti nel liquido interstiziale. Composizione: calcite o evaporite o selce o Fe-Mn. I calcarei nodulari (nel calcare ammonitico) presentano una "esasperazione" dei noduli

STILOLITI → strutture sedimentarie di tipo chimico (dissoluzione)

STILOLITE → superficie di dissoluzione ed area irregolare messa in evidenza da colori più scuri (rossi o verdi) legati al fatto che il materiale insolubile contenuto nei carbonati che si sono discolti si sono accumulati (ossidi, argille). E' una struttura presente in quasi tutti i carbonati. E' una forma legata alla diversa costituzione dei carbonati, disomogeneità che influenzano la dissoluzione del carbonato. La dissoluzione avviene per carico litostatico; è quindi una struttura tardiva ed è per questo che si sviluppa più o meno parallelamente ai piani di strato.

Si ritiene che la dissoluzione delle stiloliti "mangi" molto sedimento: se un calcare è spesso 60 m, probabilmente in origine era più spesso del 30%.

Le stiloliti sono quindi superfici secondarie (gli strati sono superfici primarie) che spesso ricalcano le superfici primarie.

Se le superfici stilolitiche intersecano i piani di strato più o meno perpendicolarmente, sono dovute a stress compressivo (tettonica).

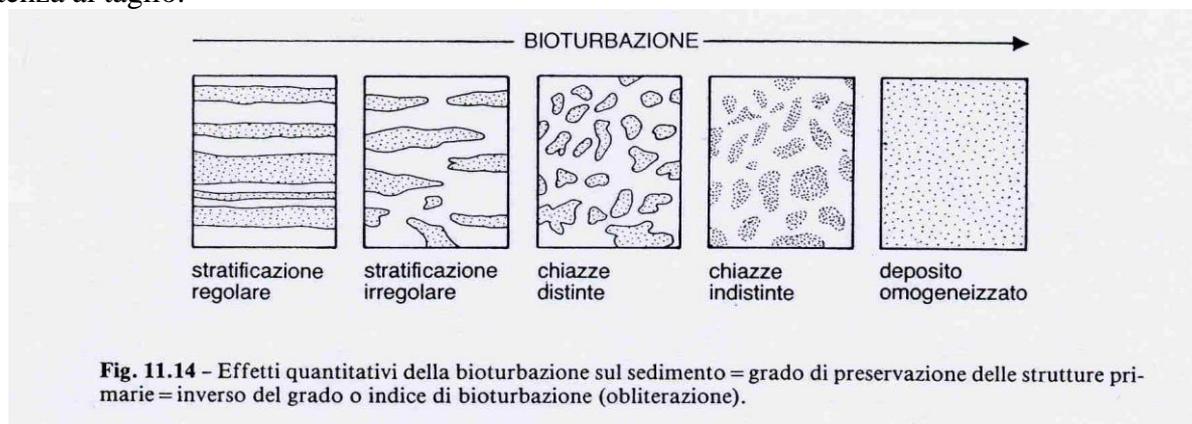
Strutture BIOGENICHE

BIOTURBAZIONI e strutture legate ad organismi (ICNITI o TRACCE FOSSILI)

Oltre ai fossili costituiti da resti più o meno completi di parti dell'organismo stesso, ve ne sono altri che non fanno parte dell'organismo in quanto tale. Molti esseri viventi del passato, infatti, hanno lasciato prove della loro presenza e del loro modo di vita sotto forma di tracce ed impronte fossili. La disciplina che si occupa delle tracce fossili (ICNITI) è la ICNOLOGIA. Le icniti sono importanti quindi perché la loro presenza indica che l'animale che le ha prodotte viveva proprio lì e non c'è stato trasporto. **Attenzione: nelle tracce non c'è il fossile, ma solo il modello.**

Le icniti, che si trovano solo in rocce sedimentarie marine e continentali dal Precambriano superiore all'Olocene si conservano come strutture sedimentarie all'interno o alla superficie degli strati.

BIOTURBAZIONE: i vari tipi di rielaborazione e deformazione che subiscono i sedimenti, non ancora litificati, ad opera di organismi sono indicati con il termine di BIOTURBAZIONE. La bioturbazione avviene ad opera di organismi bentonici che vivono sopra o sotto l'interfaccia deposizionale, fino a profondità massima di un metro o poco più (e comunque in funzione dell'ossigeno e delle sostanze nutritive a disposizione). La bioturbazione si manifesta con una grande varietà di forme (che poi ritroviamo come icniti) che riflettono la diversità degli organismi, il loro tipo di attività ...etc. In generale un sedimento bioturbato tende ad essere destabilizzato perché diminuiscono porosità, addensamento, attrito interno e resistenza al taglio.



Il grado (o indice) di bioturbazione è legato all'abbondanza ed all'attività del benthos e quindi ai fattori che controllano quest'ultimo: ossigenazione, tasso di deposizione, mobilità del fondo. Per quanto riguarda l'ossigenazione, se non c'è ossigeno, no organismi: quindi in condizioni asfittiche (anossiche, euxiniche, anaerobiche), no bioturbazione. Per quanto riguarda il tasso di deposizione del sedimento, la bioturbazione è correlata ad esso inversamente: alto tasso, no bioturbazione perché l'infauna non ha avuto tempo di rielaborare il sedimento; basso tasso, sedimento omogeneizzato dalla bioturbazione. Mobilità: in pratica dipende dalla granulometria: più bioturbati i fanghi (mottling → tipo melange) meno le sabbie (→ più energia, + dinamismo → meno favorevole alla vita).

Nella sabbia ci possono essere le "vie di fuga" → strutture verticali. Inoltre + vita = ben ossigenato, quindi anche il colore dà indicazioni.

Per esempio un fango rosso (max ossigenazione) è + bioturbato di quello nero (anossico e per altro in genere laminato, il che indica che non c'è stata bioturbazione).

PS: le tracce fossili si possono distruggere, ma non rimaneggiare, quindi sono autoctone: quindi la bioturbazione è un buon indicatore ambientale.

UNA TRATTAZIONE PIU' COMPLETA ED APPROFONDATA SULLE ICNITI VIENE AFFRONTATA NEL CORSO DI PALEOTOLOGIA A CUI SI RIMANDA

STROMATOLITI

Sono strutture organo-sedimentarie finemente laminate dovute all'attività di comunità di microrganismi fotosintetici bentonici tra i quali predominano i procarioti (alghe azzurre cioè cianobatteri e batteri comuni tipo batteri termofili) subordinatamente possono partecipare anche microscopiche alghe eucariote. Sono presenti prevalentemente in ambienti carbonatici.

PS: Poiché il termine stromatolite è usato anche con altri significati, si è proposto di usare il termine di **microbialite per descrivere depositi organo-sedimentari formati in seguito a processi microbiotici.**

LE STROMATOLITI SONO STATE TRATTATE NEL CORSO DI GEOLOGIA 1, CUI SI RIMANDA