

## Sul ripascimento di spiaggia con miscele composite di sedimenti: il caso delle spiagge di Cala Gonone (Dorgali, Sardegna)

Andrea Atzeni

Dip. Ingegneria del Territorio dell' Università di Cagliari, Piazza d'Armi 16, 09123 Cagliari.

### Riassunto

Dopo la descrizione delle caratteristiche geomorfologiche e meteo-marine dell'area costiera del Golfo di Orosei, viene esaminata la miscela prevista per la formazione dei sedimenti di ripascimento delle spiagge di Cala Gonone. Viene proposto un criterio per il calcolo della riduzione di volume subita dalla miscela di sedimenti versati ad opera del moto ondoso. Sulla base di rilievi effettuati dopo 18 mesi dal primo intervento dei lavori di ripascimento viene effettuato un bilancio dell'evoluzione dei volumi di sedimenti versati nelle spiagge di Palmasera e Sos Dorroles. Risulta che le spiagge possono aver perso una sensibile quantità del componente più fino della miscela

### Introduzione

Da qualche decennio si è affermata una nuova metodologia del ripascimento di spiagge esposte a moto ondoso intenso, imperniata sull'impiego di ghiaia e di miscele composite di sedimenti contenenti frazioni ghiaiose. Il regime dei litorali di sedimenti ghiaiosi è relativamente ben documentato dalla letteratura specialistica (si veda ad esempio: Van der Meer, 1988), mentre quello dei litorali di sedimenti composti, di cui si hanno anche esempi di ripascimento, è finora meno studiato.

È noto che il moto ondoso esercita superficialmente, in maniera tanto più netta quanto più esso è intenso, un'azione di setacciatura dei sedimenti litoranei, disponendo quelli più grossolani nella fascia della linea di riva (*beach face*) e quelli più fini nella berma emersa e nella spiaggia sommersa. Non risulta però adeguatamente esplorato l'effetto che il moto ondoso esercita filtrando alternativamente attraverso i sedimenti composti. In particolare non si conosce bene come la filtrazione del moto ondoso influisce sull'impacchettamento dei sedimenti più grossolani e come e in quale misura sia favorita la penetrazione dei sedimenti più fini nei vuoti dei suddetti.

Nella prima fase dell'intervento di ripascimento delle spiagge di Cala Gonone (Dicembre 1994+Febbraio 1995) è stata impiegata una miscela di quattro tipi di sedimenti ghiaiosi e sabbiosi. Con l'occasione, a 18 mesi dalla interruzione dei lavori, è apparso utile effettuare una campagna di rilievi topografici, integrata da alcuni campionamenti dei sedimenti versati. La campagna è stata limitata alle spiagge di Palmasera, che nel seguito verranno distinte in Palmasera A e Palmasera B, e alle adiacenti spiaggette di Sos Dorroles.

Nel Golfo di Orosei, poco a Sud del centro abitato di Cala Gonone, per l'elevata dinamicità del moto ondoso del sito, per le caratteristiche della sua batimetria (Fig. 1) e per la scarsità di sedimenti disponibili, non risulta siano mai esistite vere e proprie spiagge per cui, più che di ripascimento, deve parlarsi di realizzazione di spiagge artificiali. Il termine ripascimento può infatti essere riferito solo alla Spiaggia Centrale, prossima all'abitato di Cala Gonone, mentre per le spiagge di Palmasera

e Sos Dorroles (Fig. 2), a Sud della precedente, appare più appropriato parlare di costruzione artificiale di spiaggia.

Nel presente articolo, dopo una breve descrizione della morfologia costiera viene ricostruita la serie storica del moto ondoso del sito e valutate le altezze d'onda indicative delle profondità dei fondali interessati al trasporto solido, nonché il flusso di energia longitudinale che, com'è noto, è responsabile del trasporto litoraneo. Vengono appresso analizzati alcuni aspetti teorici riguardanti l'impacchettamento e la compenetrazione della miscela composta. Infine viene fornito un bilancio tra i volumi di sedimenti versati e quelli calcolati sulla base dei rilievi effettuati durante una apposita campagna di rilievi.

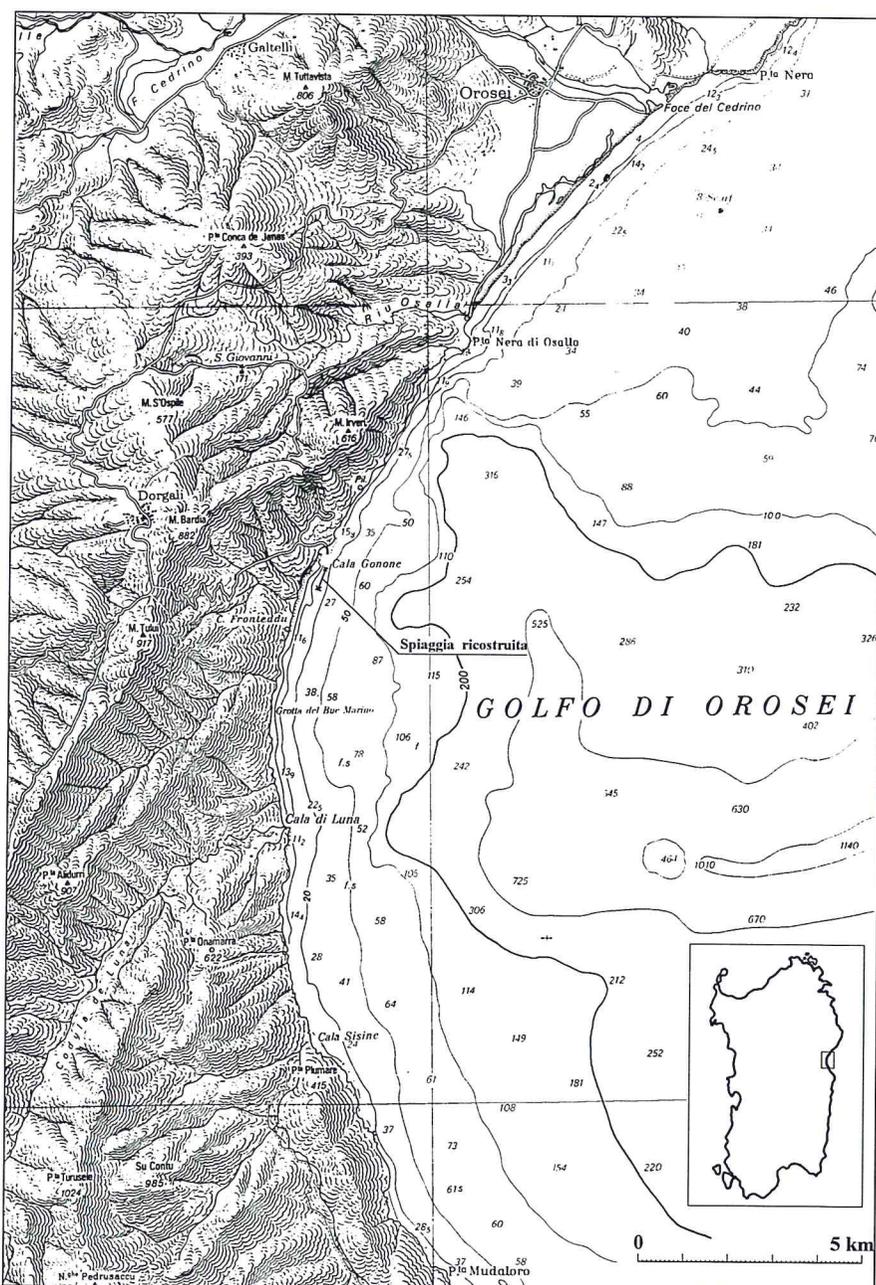


Figura 1 - Batimetria e costa del Golfo di Orosei.

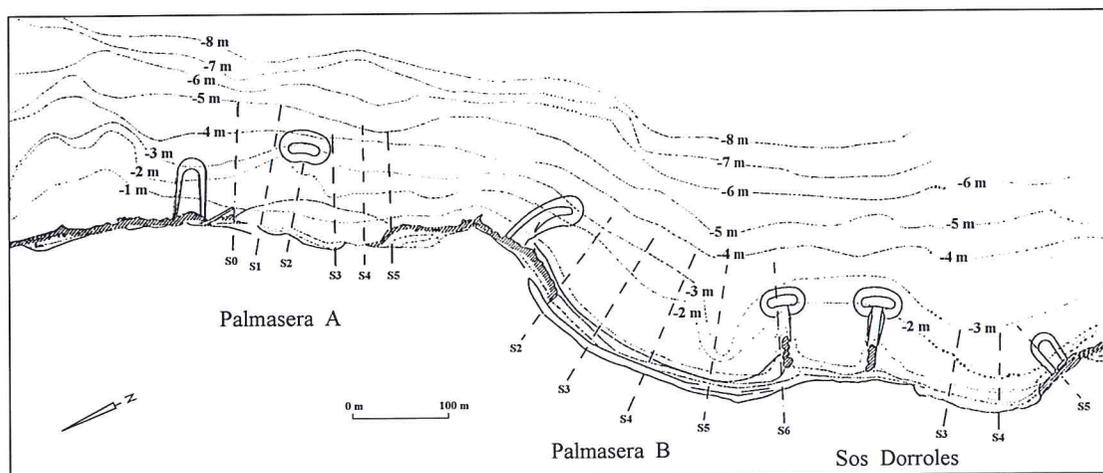


Figura 2 - Le spiagge interessate dal ripascimento ed i frangiflutti di difesa (dati batimetrici di progetto).

### Batimetria e morfologia della costa

A parte la zona Nord, dalla foce del fiume Cedrino alla foce del rio Osalla, la costa del Golfo di Orosei (Fig. 1) si presenta a picco sul mare con falesie alte anche più di 50 m e con zone ricoperte da ripide scarpate naturali di grossi massi. Per quanto riguarda la parte sommersa si osserva che nelle zone antistanti le spiagge di Cala Gonone la isobata 5 m si avvicina alla linea di riva fino a circa 100 m; nelle zone più a Sud tale distanza si riduce a meno di 80 m. La piattaforma continentale del Golfo è tra le più ristrette della Sardegna: con riferimento alla isobata 200 m, la larghezza minima, di appena 600 m, si trova tra Cala Gonone e la foce del rio Osalla. Fino alla quota di -50 m le isobate della zona antistante le spiagge hanno giacitura quasi parallela alla costa e direzione di circa 30° N (Fig. 1).

Per quanto riguarda le spiagge di Cala Gonone, la Spiaggia Centrale, antistante l'abitato, grazie al ridosso offerto dal molo di sopraflutto del porto, sorto negli anni '60 come porto di quarta classe, è diventata relativamente stabile. Invece le spiagge di Palmasera e Sos Dorroles (Fig. 2), ubicate più a Sud, sono sempre state delle piccole *tasche* contenenti modestissime quantità di sedimenti sabbiosi protetti da rocce e grandi massi basaltici. Antecedentemente all'intervento di ripascimento, i pochi sedimenti sabbiosi presenti provenivano dall'erosione della retrostante falesia la quale è costituita da un conglomerato naturale contenente un legante argilloso colore terra di Siena, una modesta componente sabbiosa ed una componente più grossolana di ciottoli calcarei più o meno elaborati dal mare. Intorno al livello del mare i ciottoli del conglomerato lasciano il posto a grossi massi basaltici di forma tondeggiante, spesso di dimensioni ciclopiche, misti a massi calcarei di minori dimensioni. All'estremità Sud della spiaggia di Sos Dorroles i massi, formando uno strato giacente a quota superiore al livello del mare, ostacolano l'azione erosiva del moto ondoso e danno luogo ad un piccolo promontorio. Ancora più a Sud, la falesia è sostituita da una ripida scarpata di massi basaltici e calcarei di varia pezzatura, ma prevalentemente ciclopici, che si estende per oltre due chilometri. Nella parte sommersa antistante le piccole spiagge si ritrovano i massi descritti, appoggiati sul fondale di calcare compatto, talvolta organizzati a formare veri e propri pennelli e scogliere parallele naturali. Si ritiene che la permanenza dei sedimenti sabbiosi sulla riva debba essere attribuita anche al riparo offerto da queste strutture naturali.

Le spiagge hanno una debole forma *ad arco*, tuttavia della loro giacitura si può individuare una direzione media. Detta direzione è stata valutata in 35° N per Palmasera A, 55° N per Palmasera B e 40° N per Sos Dorroles. Il loro sviluppo lineare è assai modesto: si va dai 150 m di Palmasera A ai 300 m di Palmasera B ed ai complessivi 300 m di Sos Dorroles.

### Moto ondoso

Fino alla data del progetto, nel Golfo di Orosei non sono mai stati eseguiti rilievi ondometrici di tipo strumentale. Solo da circa un decennio sono disponibili i dati rilevati da satellite. In sede di progetto, per la definizione del clima ondoso si è fatto riferimento allo "Studio delle condizioni meteo-marine nel golfo di Orosei" (All. 5 di progetto) eseguito dal A. Cicala (1988). Nel presente articolo si è ritenuto utile aggiungere un'ulteriore informazione ricorrendo alla ricostruzione della serie storica del moto ondoso del Golfo utilizzando i dati anemometrici di Capo Bellavista. Questa stazione che dispone di una estesa serie storica di dati con frequenza di acquisizione trioraria, è ubicata alla quota di 138 m e dista dall'area oggetto dello studio circa 40 Km. Per la ricostruzione del moto ondoso è stato utilizzato il metodo SMP/84 nella versione rivista da Hurdle e Stive (1989).

I dati anemometrici registrati alla stazione meteo sono stati riportati alla quota di +10 m l. m. m. mediante l'impiego della formula empirica:

$$W_{10} = -0.00175 W_s^2 + 0.84 W_s, \quad [1]$$

ove  $w_{10}$  e  $w_s$  sono le velocità del vento in m/s rispettivamente alle quote di 10 m e della stazione.

Nella Tabella 1 sono riportati i risultati della ricostruzione del moto ondoso e i parametri ritenuti interessanti per lo studio del regime di un litorale. Il calcolo del flusso longitudinale di energia è stato eseguito utilizzando la formula approssimata suggerita da SPM/84:

$$P_{ls} = 0.05 \rho g^{3/2} H_{so}^{5/2} (\cos \alpha_0)^{1/4} \sin 2\alpha_0, \quad [2]$$

ove  $\rho$  e  $g$  sono le densità dell'acqua e l'accelerazione di gravità,  $H_{so}$  è l'altezza significativa dell'onda al largo e  $\alpha_0$  l'angolo che la cresta dell'onda al largo forma con la costa oggetto del calcolo del flusso.

La seconda colonna della tabella mostra una notevole variabilità dell'altezza significativa  $H_{s, 0.137}$  avente frequenza di superamento 12 ore/anno. Conseguentemente deve ammettersi che anche la fascia costiera interessata al movimento dei sedimenti varia da un anno all'altro. Si nota però una consistente, quanto inspiegabile, riduzione del valore di  $H_{s, 0.137}$  nel passare dal primo al secondo decennio. Prescindendo da questa osservazione, il valore medio delle altezze significative è:

$$H_{s, 0.137} = 3.9 \text{ m}, \quad [3]$$

cui corrisponde nello spettro JONSVAP il periodo significativo:

$$T_s = 9.23 \text{ s}. \quad [4]$$

Le altezze d'onda  $H_{s, 0.137}$  sono state calcolate correggendo le altezze al largo dei coefficienti di shoaling e rifrazione, quest'ultimo calcolato semplicemente facendo l'ipotesi di fondale piano acclive.

Anche il flusso longitudinale netto medio annuo presenta valori molto differenti da un anno all'altro: si va dal valore massimo verso Sud di  $1513 \text{ Js}^{-1}\text{m}^{-1}$  della spiaggia Palmasera B al valore massimo verso Nord di  $278 \text{ Js}^{-1}\text{m}^{-1}$  della spiaggia Palmasera A, al valore minimo di  $1 \text{ Js}^{-1}\text{m}^{-1}$  verso Nord, ancora nella spiaggia di Palmasera B. Sono però prevalenti i valori netti verso Sud.

Opposto a quello qui ottenuto è il risultato indicato dal progettista sul flusso di energia che prevede un valore prevalente da Sud a Nord. Anche il laboratorio inglese ottiene un valore del flusso di energia diretto da Sud a Nord. Anche secondo i risultati dell'osservazione della modellazione subita dal fondale per effetto del trasporto dei sedimenti il trasporto prevalente è diretto da Sud a Nord.

Probabilmente, la causa del diverso risultato rispetto a quello riportato sopra è da attribuire alla diversa fonte di dati sul moto ondoso utilizzati in questa sede e quelli utilizzati dal progetto e dal laboratorio inglese.

Nonostante che anche l'osservazione morfologica del fondo indichi un trasporto prevalente verso Sud, si ritiene che il flusso di energia calcolato sopra sia aderente alla realtà, almeno se inteso come valore medio nel lungo periodo. La relazione di A. Cicala sul clima anemometrico del Tirreno Cen-

trale, allegata al progetto, indica chiaramente che i venti del primo quadrante e, quindi, il moto ondoso che ne consegue sono molto più frequenti e intensi dei venti del secondo quadrante, tranne che in estate, ove il quadrante meridionale è arricchito dalle brezze, ossia da quegli eventi anemometrici locali scarsamente influenti nella formazione del moto ondoso sia per la corta durata, sia per la non elevata intensità, sia infine per il piccolo specchio di mare interessato.

Con riferimento ai valori medi dei dati di moto ondoso riportati nella Tabella 1, si ritiene di poter affermare che le tre piccole spiagge sono fortemente sollecitate. In particolare si può constatare che il limite della zona litoranea interessata al trasporto dei sedimenti sabbiosi si spinge (CUR; 1989) fino alla profondità:

$$d_i = 1.75 H_{s,0.137} = 6.8 \text{ m.} \quad [5]$$

Nella fascia litoranea compresa tra la linea di riva e la isobata  $d_i = 6.8 \text{ m}$  il trasporto di sedimenti sabbiosi, se questi sono presenti, è notevole.

**Tabella 1-** altezze significative del moto ondoso con frequenze di superamento pari a 12 ore/anno ( $H_s 0.137$ ) e flusso longitudinale netto per anno dell'energia del moto ondoso.

Anno	$H_s 0.137$ (m)	Flusso longitudinale (J/s/m)					
		Palmasera A		Palmasera B		Sos Dorroles	
		Verso Sud	Verso Nord	Verso Sud	Verso Nord	Verso Sud	Verso Nord
54	3.6	133	85	260	16	168	66
55	4.6	349	74	216	14	317	55
56	5.1	477	33	713	4	563	23
57	7.8	595	50	1513	2	843	15
58	4.8	525	59	723	7	601	43
59	5.8	385	244	820	22	486	161
60	3.1	100	278	223	32	113	201
61	5.4	914	137	1024	12	980	100
62	3.3	133	113	223	19	160	90
63-70	-	-	-	-	-	-	-
71	4.4	275	383	208	87	249	322
72	3.0	204	56	133	7	172	37
73	3.4	654	8	245	1	526	6
74	2.2	175	23	105	1	151	16
75	3.4	163	120	47	25	100	99
76	2.5	300	80	192	6	241	34
77	-	-	-	-	-	-	-
78	2.4	280	9	81	1	220	5
79	3.1	368	116	161	16	304	90
80	2.4	280	105	179	3	237	73
MEDIE	3.9	351	110	392	15	357	80
Flusso netto medio		241		377		277	

Il flusso netto longitudinale di energia è indicatore del trasporto litoraneo potenziale dei sedimenti. Il suo valore medio calcolato è in grado di produrre trasporto di sedimenti composti da sabbie medio-fini per un volume dell'ordine di  $400 \div 600 \text{ mila m}^3/\text{anno}$ . Altrettanto non si può dire per i sedimenti ghiaiosi, assai più difficilmente mobilizzabili.

Considerate le caratteristiche morfologiche, di cui si è detto nel precedente paragrafo 1, e tenuto conto delle sollecitazioni idrodinamiche esposte sopra, si può concludere che difficilmente una costa sabbiosa potrebbe permanere in condizioni di equilibrio tale da fronteggiare la sollecitazione ondosa della zona.

### Sedimenti in situ

Durante gli studi conoscitivi di supporto al progetto di ripascimento è stata eseguita una campagna di campionamento dei sedimenti. In particolare, come risulta dalla relazione di progetto, nell'estate del 1988 i sedimenti sono stati campionati sistematicamente lungo 17 sezioni trasversali con prelievi in corrispondenza della linea di riva e delle isobate 2, 4, 7 e 10 m. Su 85 punti di campionamento individuati sono stati prelevati 61 campioni, mentre nei restanti 24 punti non è stato possibile effettuare il prelievo per la presenza di sola roccia oppure di *prateria a posidonia oceanica*.

I diametri medi dei numerosi campioni prelevati sono risultati molto variabili: si va dalle sabbie grosse e i ciottoli campionati in molti punti della linea di riva alle sabbie medie dei campioni prelevati nelle zone sommerse. Una completa trattazione sulle caratteristiche dei sedimenti della costa di Cala Gonone si trova nello studio di Pranzini e Mania (1996).

### Sedimenti scelti per il ripascimento

Il materiale impiegato nella prima fase del ripascimento era composto da una miscela di quattro granulometrie: tre costituite da calcare compatto delle cave di Orosei passato al frantoio e una da sabbia di mare prelevata dal rio di Osalla in occasione della realizzazione di una diga.

Nella Tabella 2 (Mulas, 1994) sono riportate le caratteristiche morfometriche dei componenti ritenuti idonei per la definizione della miscela dei sedimenti da impiegare nel ripascimento. Come mostra la tabella, a parte il componente rappresentato dal campione *D* che presenta un indice di sfericità molto basso a causa della forma piatta dei granuli, tutti gli altri componenti presentano un alto indice di sfericità ed un arrotondamento compreso tra *subangolare* e *subarrotondato*. La componente sabbiosa, che in base al diametro medio è classificabile al limite tra *molto grossolana* e *grossolana*, è quasi esclusivamente composta da quarzo plagioclasio e feldspati (Mulas, 1994).

Tabella 2 - Caratteristiche morfometriche dei campioni rappresentativi delle miscele impiegate nel ripascimento (calcare compatto:  $\gamma_g = 2.700 \text{ t/m}^3$ ; quarzo:  $\gamma_g = 2.650 \text{ t/m}^3$ )

Parametro morfometrico	Campione			
	B (mezzanella)	C (graniglia)	D (risone)	F (sabbia di mare)
Indice di sfericità	0.7 ÷ 0.8	0.8	0.3 ÷ 0.6	0.8
Indice di arrotondamento	0.3	0.4	0.4 ÷ 0.5	0.5
Peso di volume in mucchio ( $t/m^3$ )	1.211	1.364	1.439	1.701
Diametro medio (mm)	15.8	10.2	4.06	1.01
Classazione ( $\phi$ ) (scala descrittiva)	0.40 Ben assortito	0.70	0.74	0.90 Moderatamente assortito

Per la miscela, in un primo tempo, è stata proposta la composizione di frazioni uguali dei quattro tipi di sedimenti, ma all'atto esecutivo risulta che le proporzioni dei quattro componenti messi in opera siano state diverse (mezzanello 16.8%; graniglia 17.8%, risone 34.0%, sabbia 31.4%). Risulta che in sede di realizzazione dell'intervento siano intervenuti diversi contrasti tra la Direzione e dei Lavori e l'Impresa sul mancato rispetto delle caratteristiche granulometriche dei materiali che quest'ultima tendeva ad attribuire solo al deterioramento dei vagli.

Nel seguito, allo scopo di mettere in evidenza l'effetto della composizione della miscela sul bilancio dei sedimenti versati si faranno due ipotesi:

- I. La composizione della miscela è stata ottenuta come previsto in un primo momento, ossia da frazioni uguali in volume dei quattro componenti;
- II. La composizione della miscela è quella effettivamente messa in opera, formata dalle sopradette frazioni componenti (mezzanello 16.8%; graniglia 17.8%, risone 34.0%, sabbia 31.4%).

Per quanto riguarda la quantità del volume versato, per entrambe le ipotesi si ammette che essa sia stata determinata sui pennelli di rifornimento mediante il computo dei volumi dei singoli materiali componenti scaricati dagli autocarri.

Si suppone, inoltre, che l'azione del mare abbia effettuato una redistribuzione dei sedimenti versati e che tale redistribuzione abbia prodotto una evoluzione della miscela verso forme più stabili del sedimento.

#### ***Valutazioni teoriche sull'evoluzione delle miscele composite.***

Per effetto del moto ondoso, l'evoluzione verso forme più stabili della miscela versata è solo un'ipotesi che ha bisogno di essere verificata sperimentalmente. Per il momento, essa si fonda su due considerazioni:

1. L'oscillazione del moto ondoso sulla riva, in fase di risalita, favorisce la filtrazione dell'acqua carica dei sedimenti più fini nei vuoti dei sedimenti più grossi; a cavallo dell'inversione del moto di filtrazione la turbolenza diminuisce e nella successiva fase di ritiro l'acqua, meno turbolenta, lascia sul posto i sedimenti fini, favorendo così la riduzione di porosità della miscela. Inoltre, sempre nella fase di risalita, l'aumento della pressione neutrale favorisce lo spostamento relativo dei granuli più grossolani;
2. Nella fase di ritiro, come è stato osservato con prove sperimentali, la filtrazione, in uno con la riduzione della pressione neutrale, favorisce lo spostamento relativo dei granuli più grossolani a formare un traliccio sempre più stabile ossia, ancora, verso una riduzione della porosità della miscela.

La forma del traliccio è misurabile attraverso la *densità di impacchettamento (packing density)* che è definita dal rapporto tra il volume occupato dai granuli ed il volume complessivo, ossia coincide, numericamente, con il complemento ad uno delle porosità:

$$\rho = \frac{V_g}{V} = \frac{V - V_v}{V} = 1 - n, \quad [6]$$

essendo  $\rho$  la densità di impacchettamento,  $V_g$  il volume occupato dai granuli,  $V_v$  il volume dei vuoti,  $V = V_g + V_v$  il volume complessivo ed  $n$  la porosità.

Allen (1970) ha dimostrato che, a parte la densità dell'impacchettamento cubico, i sedimenti monogranulari di forma ellissoidica, come possono essere considerati singolarmente i campioni B, C ed F della miscela impiegata a Cala Gonone, hanno densità di impacchettamento uguale a quella dei campioni sferici di diametro uniforme. Le sfere monodiametro, opportunamente ordinate, possono assumere quattro forme di impacchettamento: cubica, tetragonale, ortorombica e romboedrica. La forma di impacchettamento cubica (densità: 0,521) ha densità minima, quella romboedrica (densità: 0,74) massima. Misure eseguite su campioni monogranulari sferici hanno mostrato che i granuli as-

sumono densità di impacchettamento variabile all'interno dei limiti nominati sopra e dipendenti dalla velocità con la quale i granuli vengono introdotti nel contenitore: maggiore è la velocità di introduzione, minore è la densità di impacchettamento. Questa può essere aumentata spillando l'acqua dal contenitore, operazione che in natura corrisponde alla filtrazione prodotta dal ritiro dell'onda.

Scott (1960) ha constatato che la densità di impacchettamento di granuli sferici monogranulari, disposti a caso, può raggiungere valori compresi tra il minimo di 0,60 ed il massimo di 0,64, limiti questi che comprendono il valore medio (0,63) delle densità di impacchettamento estreme.

È stato dimostrato (Fraser, 1935) che in una miscela binaria di granuli sferici con il rapporto tra i diametri di 1:6.3 la porosità è minima quando le percentuali dei due componenti è di 0.25 per il componente più fino e 0.75 per quello più grossolano. Al tendere a zero del rapporto tra i diametri, ossia al tendere all'infinito del diametro maggiore, le sfere più piccole possono occupare il 64% dei vuoti lasciati dalle sfere più grandi. In queste condizioni si ottiene la porosità minima pari a 0.13 quando la composizione è di 26.65% delle sfere più piccole e del 73.35% di quelle più grandi. Risulta che la porosità della miscela varia molto più con il rapporto dei diametri che con la composizione. I diametri devono esser considerevolmente differenti per ottenere la minima porosità della miscela.

In considerazione della non grande differenza dei diametri dei componenti *B* e *C* impiegati a Cala Gonone, si suppone che essi si comportino come un componente unico e si assume per essi una densità di impacchettamento di partenza pari alla densità media dei due. Questa ipotesi consente di schematizzare la miscela come composta da tre soli componenti, la qual cosa alleggerisce considerevolmente la trattazione analitica.

Esistono due parametri limitanti del contenimento dei granuli minori all'interno dei vuoti lasciati dai granuli maggiori: il *rapporto critico di ingresso* che rappresenta il rapporto tra il diametro minimo capace di passare attraverso i vuoti e il diametro dei granuli delimitanti i vuoti stessi; il *rapporto critico di occupazione* che rappresenta il rapporto tra il diametro massimo di un granulo che può rimanere contenuto nel vuoto, senza ostacolare il traliccio, e il diametro dei granuli che delimitano tale vuoto.

Il rapporto critico di ingresso dipende dal tipo di impacchettamento dei granuli di dimensioni maggiori: se l'impacchettamento è cubico il diametro critico è pari al 41,4% del diametro dei granuli più grossi. Il rapporto critico di occupazione è più grande del rapporto critico di ingresso e vale 0,732 per l'impacchettamento cubico, mentre per l'impacchettamento romboedrico, essendo presenti due tipi di vani, esso può valere 0,414 e 0,225.

Nella Tabella 3 sono riportati i diametri critici medi di ingresso e di occupazione compatibili con i tre componenti di maggiore diametro della miscela impegnata a Cala Gonone, nell'ipotesi, abbastanza verosimile per i componenti *B* e *C*, ma non valida per il componente *D*, che il loro impacchettamento possa considerarsi assimilabile a quello dei granuli sferici. La tabella mostra che il diametro medio della sabbia ( $D_m=1.01 \text{ mm}$ ) costituente il quarto componente (denominato *F*) è inferiore a quasi tutti i diametri di ingresso. Inoltre i diametri di occupazione del componente di maggior diametro è quasi sempre maggiore anche del diametro medio del componente *D*, mentre solo il diametro di ingresso del traliccio cubico è maggiore del diametro medio di quest'ultimo. Conseguentemente appare plausibile che il componente più fino, nel rimaneggiamento prodotto dal moto ondosso, possa andare ad occupare i vuoti lasciati liberi dai componenti di più grande diametro. In teoria i granuli del componente *F* possono penetrare ed essere alloggiati nei vuoti dei componenti *B* e *C* senza alterare i tralicci di questi ultimi. Mentre per quanto riguarda il componente *D* esso partecipa alla miscela in forma "refrattaria" in quanto non è in grado di alloggiare il componente più fino, né di penetrare nei vuoti dei componenti più grossi. La miscela di Cala Gonone può quindi essere ridotta ad un composto di tre frazioni:

1. Quella più grossolana, composta dai componenti *B* e *C*, considerati come un tutt'uno;
2. Quella media, composta dal componente *D*, considerato non attivo nella miscelazione;
3. Quella fina, composta dal componente *F*.

Tabella 3 - Diametri critici medi di ingresso e di occupazione (mm) dei granuli minori nel traliccio dei granuli superiori della miscela.

Traliccio	Componente					
	B		C		D	
	Ingresso	occupaz.	ingresso	occupaz.	Ingresso	occupaz.
cubico	6.5	11.6	4.2	7.5	1.9	3.0
romboedrico	2.4	–	1.6	–	0.6	–
romboedrico 1	–	6.5	–	4.2	–	1.9
romboedrico 2	–	3.6	–	2.3	–	0.9

### Determinazione della riduzione di volume.

Nella schematizzazione proposta, la riduzione di volume può essere attribuita esclusivamente all'aumento di densità di impacchettamento dei componenti più grossolani ed alla penetrazione del componente più fino nei vuoti dei primi. I due effetti sono contrastanti: un aumento della densità di impacchettamento comporta una riduzione dei vuoti e quindi della possibilità di compenetrazione.

Detti  $V_B$ ,  $\tau_B$  e  $V_C$ ,  $\tau_C$  rispettivamente i volumi e le relative percentuali dei componenti  $B$  e  $C$  e detta  $\rho$  la loro densità di impacchettamento iniziale media e  $\rho'$  la loro densità finale, per definizione si ha:

$$\rho' = \frac{(V_B + V_C)_g}{(V_B + V_C) \frac{(V_B + V_C)}{V_B + V_C}} = \frac{\rho}{\frac{(V_B + V_C)}{V_B + V_C}}, \quad [7]$$

da cui si ricava:

$$\frac{\Delta(V_B + V_C)}{V} = (\tau_B + \tau_C) \left( 1 - \frac{\rho}{\rho'} \right), \quad [8]$$

essendo  $\Delta(V_B + V_C)$  la riduzione di volume della miscela attribuibile all'impacchettamento dei componenti  $B$  e  $C$ . Per la condizione di normalizzazione:

$$\tau_B + \tau_C + \tau_D + \tau_F = 1 \quad [9]$$

l'eq. (8) può anche essere espressa in funzione delle percentuali dei componenti  $D$  ed  $F$ :

$$\frac{\Delta(V_B + V_C)}{V} = \frac{\Delta V_{imp}}{V} = [1 - (\tau_F + \tau_D)] \left( 1 - \frac{\rho}{\rho'} \right). \quad [10]$$

La riduzione massima di volume per compenetrazione è data, al limite, dal volume dei vuoti dei componenti più grossolani. Tale condizione si raggiunge quando il volume dei vuoti di  $B$  e  $C$  coincidono con il volume di  $F$ :

$$(\tau_B + \tau_C)(1 - \rho') = \tau_{Flim}, \quad [11]$$

che per l'eq. (9) diventa:

$$[1 - (\tau_{Flim} + \tau_D)](1 - \rho') = \tau_{Flim}. \quad [12]$$

Dall'eq. (12) si ricava:

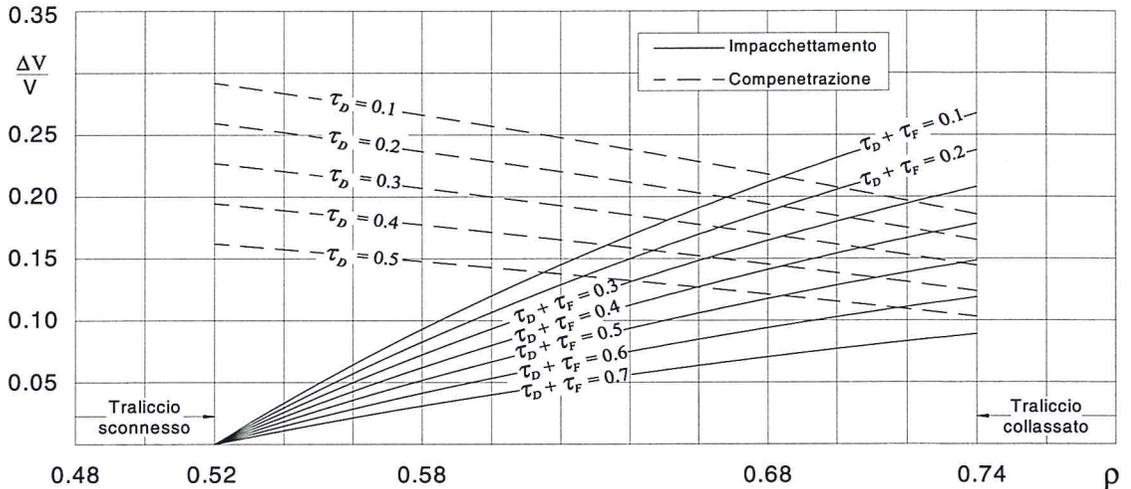


Figura 3 - Effetti contrastanti della compenetrazione e dell'impacchettamento sulla riduzione di volume della miscela in funzione della densità di impacchettamento.

$$\tau_{F\text{lim}} = \frac{(1-\rho')(1-\tau_D)}{2-\rho'} \quad [13]$$

Il valore di  $\tau_{F\text{lim}}$  coincide con la massima riduzione di volume per compenetrazione. Si ha dunque:

$$\frac{\Delta V_{\text{com}}}{V} = \frac{(1-\rho')(1-\tau_D)}{2-\rho'} \quad [14]$$

Le eq. (10) e (14), riportate nel diagramma della Figura 3 mostrano come al crescere della densità di impacchettamento aumenta la riduzione di volume, ma contemporaneamente si riduce la possibilità di compenetrazione. Per valori inferiori all'impacchettamento cubico ( $\rho < 0.52$ ) il traliccio è sconnesso, per valori superiori al romboedrico ( $\rho > 0.74$ ) il traliccio è collassato.

Complessivamente la riduzione di volume per impacchettamento e per compenetrazione dipende dalla percentuale di volume del componente più fino. Precisamente, se è:

$$\tau_F < \tau_{F\text{lim}}, \quad [15]$$

ove  $\tau_{F\text{lim}}$  è dato dall'eq. (13), la riduzione di volume per compenetrazione è data dalla relazione:

$$\frac{\Delta V_{\text{com}}}{V} = \tau_F \quad [16]$$

e quindi la riduzione di volume per impacchettamento e compenetrazione è data dalla somma delle eq. (10) e (16), ossia:

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta V_{\text{imp}} + \Delta V_{\text{com}}}{V} = [1 - (\tau_F + \tau_D)] \left(1 - \frac{\rho}{\rho'}\right) + \tau_F \quad [17]$$

Se invece è:

$$\tau_F \geq \tau_{Flim}, \quad [18]$$

la riduzione di volume per compenetrazione si ricava dalla relazione:

$$\frac{\Delta V_{com}}{V} = \rho(\tau_B + \tau_C) + \tau_D + \tau_F,$$

che dopo facili passaggi diventa:

$$\frac{\Delta V_{com}}{V} = [1 - (\tau_D + \tau_F)](1 - \rho). \quad [19]$$

Dunque la riduzione di volume complessiva per  $\tau_F \geq \tau_{Flim}$  si ottiene sommando le eq. (10) e (19):

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta V_{imp} + \Delta V_{com}}{V} = [1 - (\tau_F + \tau_D)] \left[ 2 - \frac{\rho + \rho'^2}{\rho'} \right] \quad [20]$$

Il grafico della Figura 4, ottenuto dalle eq. (17) e (20), riporta, per tre valori della densità di impacchettamento e per quattro valori della percentuale del componente *D*, supposto inerte, le riduzioni di volume della miscela in funzione della percentuale del componente più fino *F*. Il grafico mostra che, se si vuole ottenere una riduzione minima del volume dei sedimenti dopo la miscelazione, conviene adottare una alta percentuale della frazione che non partecipa alla miscelazione ed una alta percentuale della frazione fina. Ad esempio con la percentuale  $\tau_D = 0.4$  e per la percentuale fina  $\tau_F = 0.35$  la riduzione di volume per impacchettamento e compenetrazione rimane compresa tra 0.12 e 0.14. A parte il rischio di perdite, un'alta percentuale della frazione fina, se sabbiosa, avvicina la struttura della spiaggia a forme più gradevoli e fruibili di quanto non possa fare una spiaggia di ghiaia, che però è sicuramente più stabile.

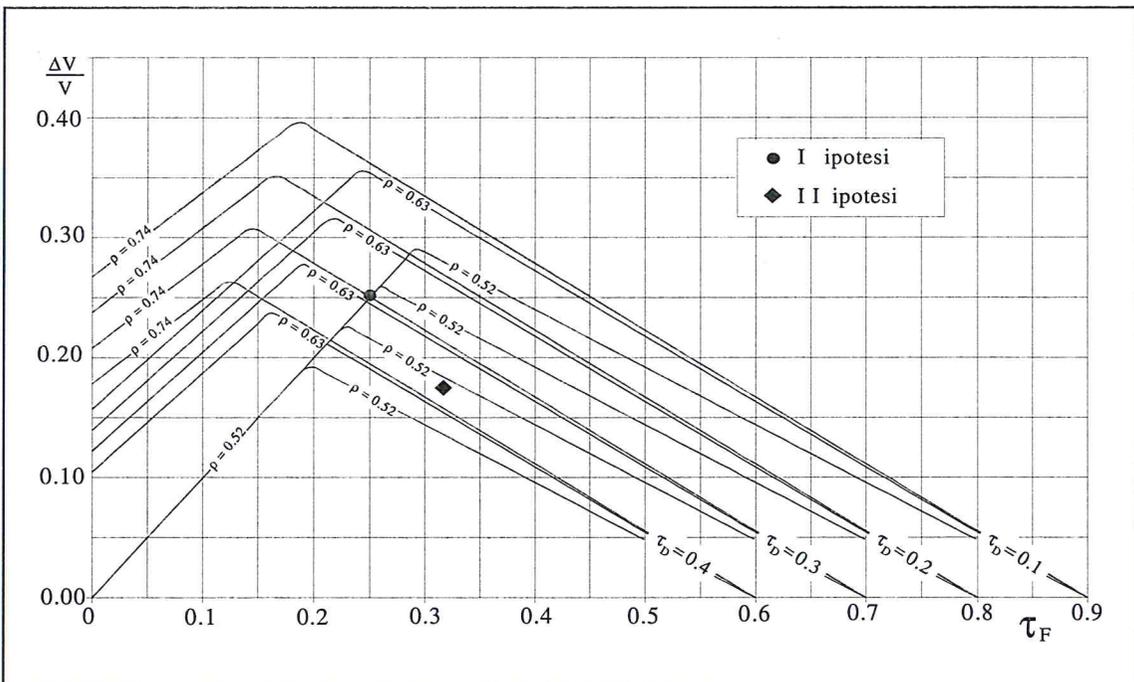


Figura 4 - Riduzione del volume della miscela per assegnati valori della densità di impacchettamento rispetto alla densità cubica e per diverse percentuali del componente *D*, in funzione del componente *F*.

**Riduzione di volume della miscela dei sedimenti di Cala Gonone.**

Ammesso che i componenti della miscela abbiano le stesse caratteristiche dei campioni di cui nella Tabella 2 sono riportate le caratteristiche morfometriche, si possono facilmente determinare la densità di impacchettamento dei singoli componenti. Infatti questo parametro coincide con il rapporto fra il peso di volume in mucchio  $\gamma_m$  ed il peso di volume dei granuli  $\gamma_g$ :

$$\rho = \frac{\gamma_m}{\gamma_g}. \quad [21]$$

Le densità di impacchettamento dei singoli componenti risultano quindi:

$$\rho_B = 0.49, \rho_C = 0.56, \rho_D = 0.59, \rho_F = 0.64,$$

rispettivamente per i componenti *B*, *C*, *D* ed *F*. La densità di impacchettamento del componente *B* è addirittura inferiore al minimo (impacchettamento cubico:  $\rho = 0.52$ ) dei granuli sferici. Si ritiene che ciò sia da attribuire alla spigolosità dei granuli più che alla mancata sfericità. Gli altri componenti hanno densità di impacchettamento ricadenti nell'intervallo teorico dei granuli sferici. In particolare, il valore, relativamente alto, del componente *D* è da attribuire alla forma piatta dei granuli, mentre il valore più alto del componente *F* è legato, oltre che alla sfericità dei granuli, anche al loro maggiore arrotondamento.

Il valor medio della densità di impacchettamento dei componenti *B* e *C* vale:

$$\rho = \frac{\rho_B + \rho_C}{2} = 0.525. \quad [22]$$

Al momento, il valore dell'impacchettamento operato dal moto ondoso può essere solo stimato. Si ritiene che, soprattutto a causa della spigolosità dei granuli, la densità di impacchettamento a seguito dell'elaborazione marina, non superi le 5 unità percentuali:

$$\rho' = \rho + 0.05 = 0.575. \quad [23]$$

Sono finalmente disponibili tutti gli elementi per il calcolo della riduzione di volume della miscela. Per l'eq. (13) il volume limite di sedimenti fini contenibili nei vuoti dei componenti *B* e *C* vale:

$$\tau_{F\text{limI}} = 0.224,$$

$$\tau_{F\text{limII}} = 0.197,$$

rispettivamente per la prima e per la seconda ipotesi sulle percentuali dei componenti. In entrambi i casi la percentuale di sedimento fino *F* è superiore ai valori di  $\tau_{F\text{lim}}$ , dunque la riduzione di volume per impacchettamento e compenetrazione deve essere calcolata con l'eq. (20). Per le due ipotesi si ottiene rispettivamente:

$$\frac{\Delta V_I}{V} = 0.256,$$

$$\frac{\Delta V_{II}}{V} = 0.177.$$

**Bilancio dei sedimenti versati**

Con lo scopo di valutare il bilancio dei volumi versati, a seguito dell'evoluzione prodotta dal moto ondoso, dopo 18 mesi dall'interruzione dei lavori, è stato eseguito un rilievo topografico e batimetrico sulle tre piccole spiagge. Allo scopo sono state rilevate per ogni spiaggia un certo numero di sezioni trasversali per un numero complessivo di 20 sezioni. Nelle Fig. 5, 6 e 7 sono riportate le

tracce delle sezioni rilevate. Come si può notare, il numero di sezioni deve ritenersi adeguato per la determinazione del volume dei sedimenti di ripascimento.

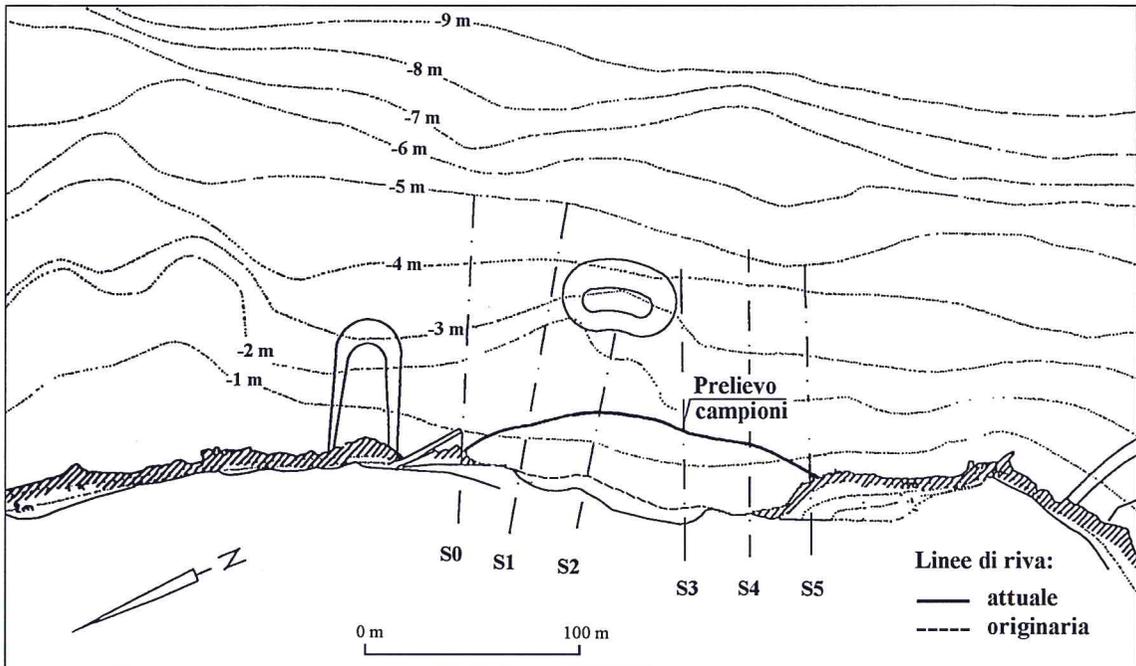


Figura 5 – Spiaggia di Palmasera A. Sono indicate le linee di riva di progetto e quelle rilevate dopo 18 mesi dall'interruzione dei lavori.

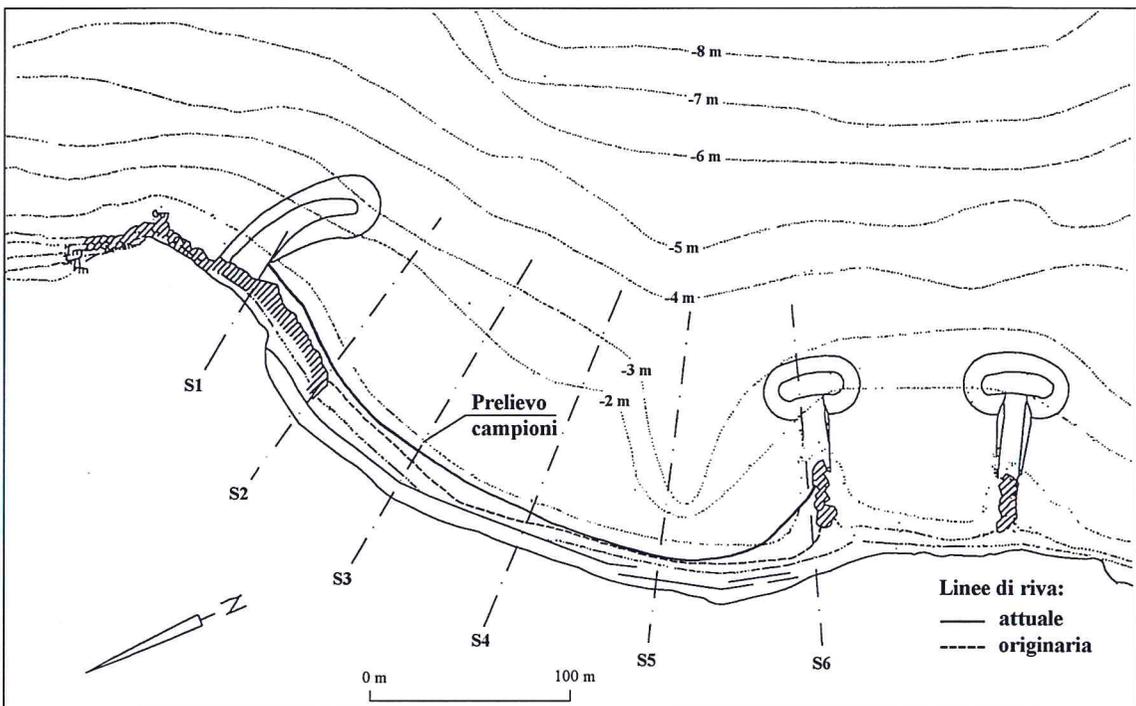


Figura 6 – Spiaggia di Palmasera B. Sono indicate le linee di riva originaria e quelle rilevate dopo 18 mesi dalla prima interruzione dei lavori.

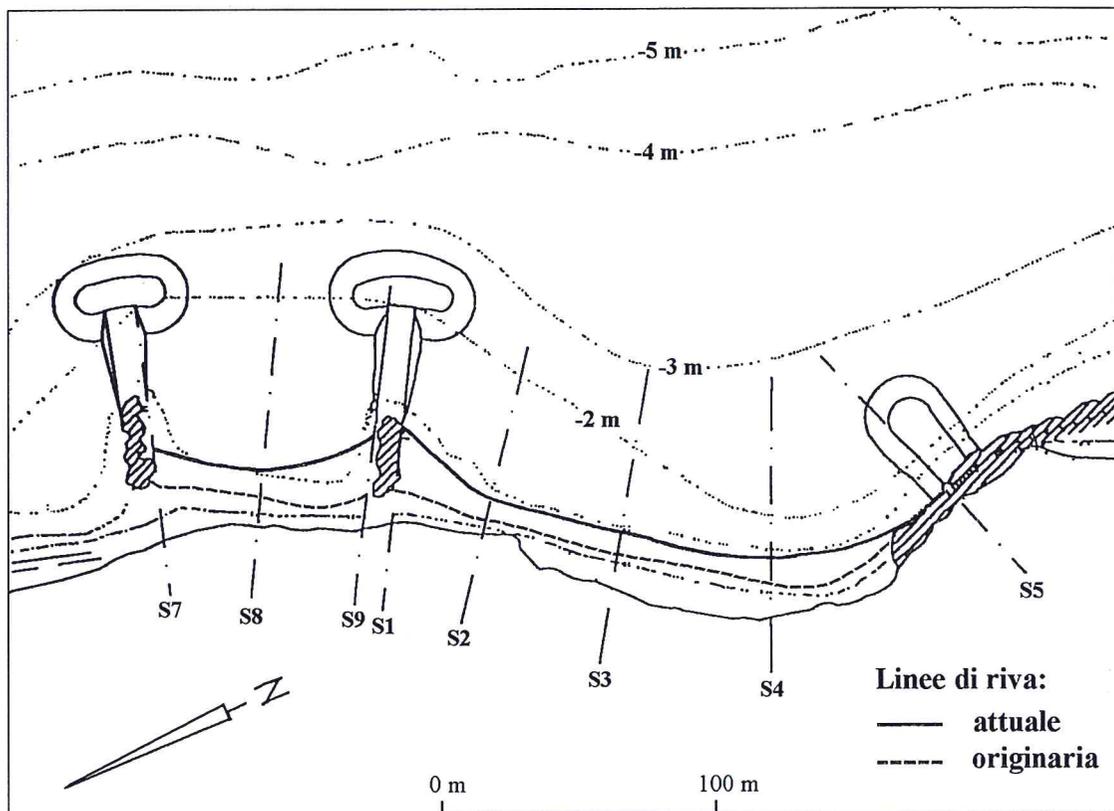


Figura 7 - Spiaggia di Sos Dorroles. Sono indicate le linee di riva originaria e quelle rilevate dopo 18 mesi dalla prima interruzione dei lavori.

Le Figure 8, 9 e 10, tratte da Corrias (1997), riportano tre delle sezioni ricostruite dalla batimetria di progetto –ivi indicate con la parola “originaria”–, e quelle rilevate nel mese di settembre 1996, ossia dopo il ripascimento –indicate nelle figure con la parola “nuova”–, rispettivamente nelle spiagge di Palmasera A, Palmasera B e Sos Dorroles. La modellazione impressa dal regime ondoso al materiale versato è tipica dei profili trasversali osservati nelle spiagge di ghiaia. Dal calcolo delle aree delle sezioni è stato possibile determinare i volumi dei sedimenti trattenuti.

Il bilancio dei volumi versati nelle tre spiagge è riportato nella Tabella 4. In particolare nell’ultima riga della tabella sono riportate le percentuali dei sedimenti che risultano allontanati. Nella prima ipotesi (uguali volumi dei componenti la miscela) tali percentuali sono costituite dai valori del 20%, 69% e 10% dei volumi versati rispettivamente nelle spiagge di Palmasera A, Palmasera B e Sos Dorroles. Nella seconda ipotesi (%B=0.168; %C=0.178; %D=0.340; %F=0.314), mancando i vuoti necessari ad alloggiare la frazione più fina della miscela, la perdita di sedimenti (Palmasera A: 28%; Palmasera B: 72%; Sos Dorroles: 20%) è, ovviamente, maggiore.

Peraltro, occorre dire che i volumi calcolati sono stati ottenuti ragguagliando le aree delle sezioni rilevate rispetto alle sezioni dei rilievi batimetrici di progetto che risalgono al 1988. Non si ha notizia di eventuali variazioni intervenute tra i rilievi di progetto e l’inizio dei lavori, tuttavia se in tale intervallo di tempo (sette anni) sono avvenute erosioni nelle spiagge le suddette perdite devono intendersi comprensive anche di tali erosioni. Qualche errore si può ammettere anche sulle interpolazioni fatte in sede di progetto nel tracciare le linee batimetriche dalle quali sono derivate le sezioni di riferimento utilizzate in questa sede per il bilancio.

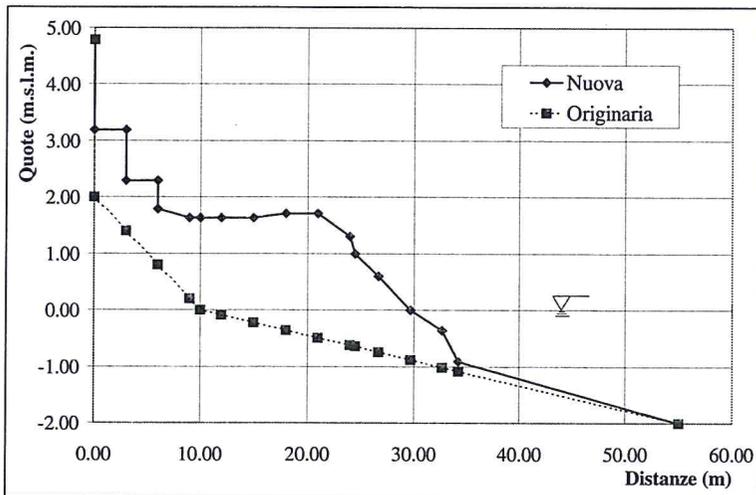


Figura 8 - Palmasera A, sezione 3. Per "nuova" si intende il profilo rilevato nel settembre 1997; per "originaria" si intende il profilo di progetto.

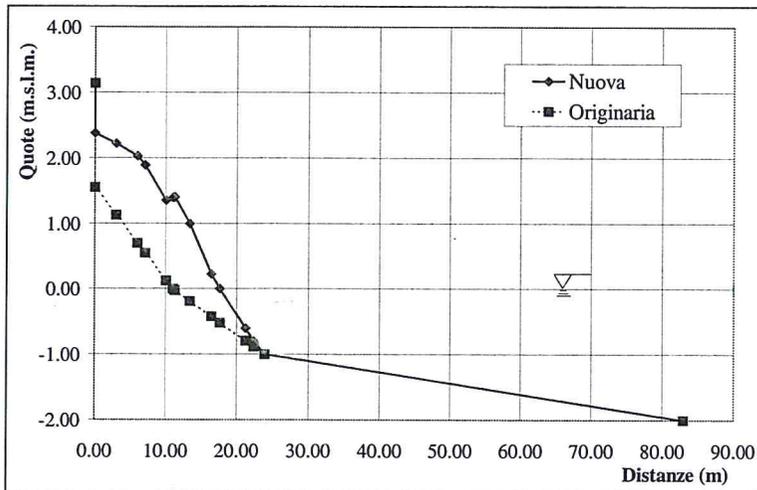


Figura 9 - Palmasera B, sezione 3. Per "nuova" si intende il profilo rilevato nel settembre 1997; per "originaria" si intende il profilo di progetto.

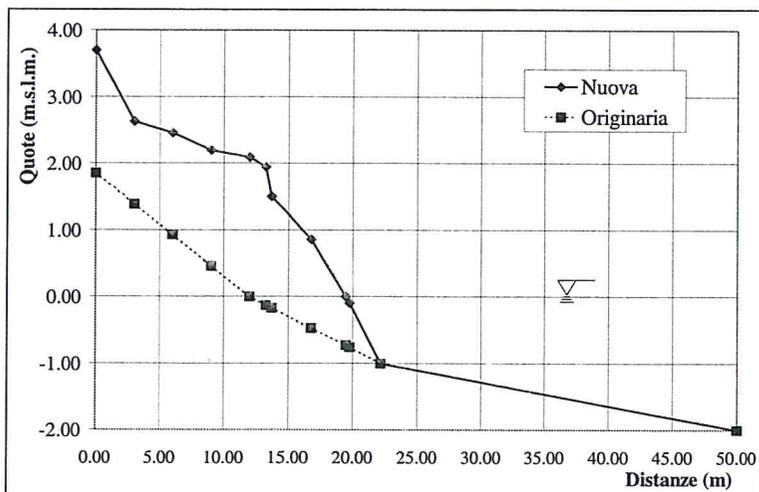


Figura 10 - Sos Dorroles, sezione 3. Per "nuova" si intende il profilo rilevato nel settembre 1997; per "originaria" si intende il profilo di progetto.

Tabella 4: Bilancio dei volumi dei sedimenti impiegati nel ripascimento.

N°	Volumi (m <sup>3</sup> )	Spiaggia					
		Palmasera A		Palmasera B		Sos Dorroles	
		I <sup>A</sup> ipotesi	II <sup>A</sup> ipotesi	I <sup>A</sup> ipotesi	II <sup>A</sup> ipotesi	I <sup>A</sup> ipotesi	II <sup>A</sup> ipotesi
1	Versati a tutto il 03.02.1995	8827	8827	5927	5927	7165	7165
2	Riduzione per Impacchettamento e compenetrazione	2260	1562	1517	1049	1720	1268
3	(N° 1 – N° 2)	6567	7265	4410	4878	5331	5897
4	Misurati a tutto il 29.09.1996	5331	5331	1377	1377	4789	4789
5	Perdite (N° 3 – N° 4) x 100 / N° 3	19%	27%	69%	71%	10%	19%

Ciò detto, la Tabella 4, nonostante la considerevole riduzione di volume accordata per impacchettamento, mostra una considerevole riduzione dei volumi versati rispetto a quelli ottenuti con il calcolo. Si deve quindi ammettere che possa essere avvenuta anche una perdita di sedimenti. Verosimilmente la frazione persa appartiene prevalentemente alle sabbie. Le perdite di Palmasera A, e ancor più di Sos Dorroles, possono comunque essere considerate abbastanza accettabili, date le condizioni del moto ondoso del sito, mentre appare eccessiva la perdita di Palmasera B.

Il calcolo del flusso di energia longitudinale riportato in precedenza, il cui valore medio netto è diretto verso Sud e che assume per la spiaggia di Palmasera B, a causa del suo orientamento, un valore superiore del 30% ai valori calcolati per le altre due spiagge, porta a ritenere che una parte dei sedimenti versati sulla spiaggia di Palmasera B si sia trasferita nella spiaggia di Sos Dorroles, contribuendo così a far apparire minori le perdite di quest'ultima spiaggia. Peraltro, i sedimenti perduti dalle tre spiagge, comprensivi anche delle eventuali erosioni intervenute prima dell'intervento, che complessivamente, secondo la stima effettuata, ammontano a circa il 30% ed il 38% del volume depurato della riduzione per impacchettato e compenetrazione, rispettivamente per la prima e la seconda ipotesi, oltre ad un trasporto longitudinale possono anche aver subito una forma di trasporto trasversale.

### Considerazioni finali.

E' stata esaminata l'evoluzione delle tre piccole spiagge di Cala Gonone a distanza di 18 mesi dalla prima interruzione dei lavori di ripascimento. La batimetria e l'orografia del Golfo di Orosei, al quale le tre spiagge appartengono, non presenta caratteristiche favorevoli all'impianto di spiagge sabbiose e per questo, infatti, il ripascimento ha previsto l'impiego di un sedimento costituito da una miscela di ghiaia e sabbia.

Nell'area non esistono rilievi ondametrici, per cui in questa sede si è dovuto ricorrere alla ricostruzione del regime ondoso partendo dai dati anemometrici registrati a Capo Bellavista. Dal regime ondoso è stato estratto il valore dell'altezza significativa avente la frequenza annua di 12 ore. Il valore di questo parametro, ottenuto dalla media dei 18 anni di moto ondoso ricostruiti, indica che la zona litoranea interessata al trasporto di sedimenti sabbiosi si spinge quasi fino alla isobata 7 m, confermando così la difficile situazione per l'equilibrio dei sedimenti sabbiosi in questa costa.

Il flusso longitudinale di energia del moto ondoso è risultato diverso per le tre spiagge a causa del loro diverso orientamento: si nota che la spiaggia di Palmasera B ha un flusso medio netto, diretto verso Sud, superiore del 30% ai flussi, anche questi diretti a Sud, delle due spiagge di Palmasera A e

di Sos Dorroles. L'entità del flusso calcolato indica che le spiagge, ad ulteriore conferma della difficoltà di impiantarvi sedimenti sabbiosi, sono soggette ad un potenziale trasporto longitudinale di sedimenti sabbiosi dell'ordine di diverse centinaia di migliaia di metri cubi all'anno. Bisogna anche evidenziare che il calcolo del flusso di energia riportato sopra indica una direzione media annua del trasporto dei sedimenti verso Sud, mentre i dati di progetto riportano un trasporto prevalente verso Nord.

Allo scopo di eseguire una valutazione dell'evoluzione dei sedimenti versati è stato effettuato il calcolo della riduzione di volume subita dalla miscela ad opera del moto ondoso. Per mettere in evidenza l'influenza della composizione della miscela sull'evoluzione dei sedimenti, accanto alla composizione della miscela impiegata (ipotesi II) è stata esaminata anche l'evoluzione di una miscela aventi frazioni uguali dei quattro componenti (ipotesi I). È risultato che le tre spiagge, Palmasera A, Palmasera B e Sos Dorroles, nell'intervallo di tempo dei 18 mesi trascorsi dalla prima interruzione dei lavori, hanno perso rispettivamente il 19%, il 69% e il 10% del volume versato nel caso dell'ipotesi I e rispettivamente il 27%, il 71% e il 19% nel caso dell'ipotesi II. La maggiore perdita ottenuta con la II ipotesi deve essere attribuita alla maggiore percentuale di fine della miscela.

Le perdite di Sos Dorroles e Palmasera A possono essere ritenute accettabili, date le difficili condizioni morfologiche e meteo-marine della costa. La perdita di Palmasera B appare però eccessiva, anche se una parte di questi sedimenti, verosimilmente, si sono trasferiti sulla spiaggia di Sos Dorroles e quindi non possono essere considerati veramente persi.

Nel complesso le perdite di sedimenti, nel caso della miscela messa in opera (II ipotesi), sono risultate pari a circa il 39% del volume ridotto secondo il calcolo effettuato; esse sarebbero state pari a circa il 33% di tale volume, nel caso in cui la miscela fosse stata quella della I ipotesi. Le perdite devono essere attribuite in parte al flusso longitudinale di energia del moto ondoso e in parte al trasporto trasversale. Si ritiene che entrambe le perdite siano di tipo permanente: quelle dovute al trasporto litoraneo per la forte prevalenza del flusso verso Sud, quelle dovute al trasporto trasversale per la forte pendenza del fondale.

**Ringraziamenti.** Si ringrazia l'allievo ing. Francesco Corrias che gentilmente ha messo a disposizione i dati dei rilievi topografici eseguiti durante lo svolgimento della sua tesi di laurea.

### Bibliografia

- Allen J. R. L. (1970) - *The systematic packing of prolate spheroid with reference to concentration and dilatancy*. Geol. en Mijnbouw, 49 211-220.
- Cicala A. (1988) - *Studio delle condizioni meteomarine nel golfo di Orosei*. Allegato 5 di progetto. Lavoro non pubblicato.
- Corrias F. (1997) - *Sui risultati dell'intervento di ripascimento delle spiagge di Cala Gonone (Dorgali)*. Tesi di laurea non pubblicata. D.I.T., Sezione Ingegneria Idraulica. Università di Cagliari. A. A. 1996-1997.
- CUR (1989) - *Manual on artificial beach nourishment*, Report 130, Delft Hydraulics.
- Fraser H. J. (1935) - *Experimental study of the porosity and permeability of clastic sediments*. J. Geol., 43, 910-1010.
- Hurdle D. P. e Stive R. J. H. (1989) - *Revision of SPM 84 wave hindcast model to avoid inconsistencies in engineering applications*. Coastal Engineering, 12, 339-351.
- Mulas G. (1994) - *Progetto di ricostruzione delle spiagge di Cala Gonone, Palmasera e Sos Dorroles. Studio sugli inerti da ripascimento*. Comune di Dorgali. Lavoro non pubblicato.
- Pranzini E. e Mania R. (1996) - *Sedimentological study of the nershore of Cala Gonone (eastern Sardinia, Italy) oriented to the beach improvement*. Boll. Soc. Geol. It. 115 (1996), 95-104.
- Scott G. D. (1960) - *Packing of equal spheres*. Nature, 188, 908-909.
- Van der Meer J. W. (1988) - *Rock slope and gravel beaches under waves attack*. Doctoral Thesis. Delft Hydraulics communication N° 369.