

Programma INTERREG Marittimo Italia-Francia Marittime 2014-2020 Asse II

Progetto “GIREPAM – Gestione Integrata delle Reti Ecologiche attraverso i Parchi e le Aree Marine”.

Convenzione tra Consorzio di Gestione Area Marina Protetta di Tavolara–Punta Coda Cavallo e
Università degli Studi di Cagliari - Dipartimento di Scienze Chimiche e Geologiche



RELAZIONE TECNICA FINALE



Il Responsabile della Ricerca

Prof. Paolo E. Orrù

Il Collaboratore alla Ricerca

Dott. Ing. Andrea Sulis

Dott. Valentino Demurtas



Interreg



UNIONE EUROPEA

MARITTIMO-IT FR-MARITIME

Fondo Europeo di Sviluppo Regionale



GIREPAM



AREA MARINA PROTETTA
TAVOLARA
PUNTA CODA CAVALLO



MINISTERO DELL'AMBIENTE
PULIZIONE E PROTEZIONE DEL MARE

Sommario

Premessa	3
Introduzione	4
Progettazione delle linee guida per il rilevamento dei depositi a Posidonia oceanica spiaggiata.....	5
Posidonia Oceanica e banquettes	5
Modalità di degradazione del materiale fogliare della Posidonia in spiaggia sommersa.	6
La Banquette.....	10
Analisi del quadro normativo di riferimento	14
Idrodinamica litoranea e depositi fogliari a Posidonia oceanica	17
Introduzione	Errore. Il segnalibro non è definito.
Aspetti di idrodinamica litoranea in presenza di Posidonia oceanica	17
Effetto su moto ondoso e correnti nella fascia di mareggiata	21
Effetto della densità in prossimità della riva	23
Criticità	24
Relazioni tra permeabilità e erosione	24
Mezzi meccanici.....	26
Area di studio	Errore. Il segnalibro non è definito.
Inquadramento geografico dell'area studiata.....	32
Inquadramento geologico e geomorfologico	32
Porto Taverna	33
Cala Brandinchi.....	34
La Cinta	35
Protocollo metodologico in Area campione in AMP Tavolara P.C.C.....	Errore. Il segnalibro non è definito.
Rilievi di campagna, rilievi planoaltimetrici di dettaglio	36
Rilievi aerofotogrammetrici con drone	40
Campionamento dei sedimenti superficiali.....	51
Analisi di laboratorio	55
Analisi granulometriche.....	55
Peso specifico dei grani	58
Prove di Permeabilità.	60
Addensamento per carico statico.....	61
Esecuzione della prova	63
Risultati	65
Analisi granulometriche.....	65

Peso Specifico dei grani	66
Analisi dei campioni di Banquette di Posidonia	66
Prove di permeabilità	67
Relazioni tra permeabilità e porosità	68
Discussioni e conclusioni	70
Prove in situ	71
Prove di carico su piastra.....	72
Prove di permeabilità	77
Ubicazione delle indagini.....	78
Risultati delle prove.....	79
Conclusioni	81
Protocollo operativo: redazione delle ipotesi gestionali	81
Bibliografia	81

Premessa

Nell'ambito del Progetto GIREPAM il Dipartimento Scienze Chimiche e Geologiche dell'Università di Cagliari, sviluppando le attività in Convenzione con AMP "Tavolara – Punta Coda Cavallo" finalizzate alla progettazione delle Linee Guida per il rilevamento, la caratterizzazione e le modalità di gestione dei depositi a *Posidonia oceanica* spiaggiata prendendo l'avvio dall'analisi critica del quadro normativo di riferimento e governance relativamente alle modalità di rimozione delle banquette a *Posidonia oceanica* spiaggiata in aree litorali a forte vocazione turistico-balneare, ricognizione mirata prevalentemente ai territori inclusi nel PO Marittimo Italia-Francia.

Saranno realizzati rilievi di dettaglio sulla distribuzione, caratteristiche morfologiche, stratigrafiche e composizionali, dei depositi a *Posidonia oceanica* spiaggiata, cui seguiranno le indagini di terreno sugli ambiti perilitorali di retro spiaggia (sia retrodunari che perilagunari) al fine di identificare aree a bassa vulnerabilità ove poter ubicare i depositi stagionale in un'ottica di mitigazione degli impatti, tenendo conto degli ambiti a forte criticità in termini di conservazione dello stock sedimentario della spiaggia.

Analisi di supporto saranno realizzate sia in laboratorio (analisi granulometriche, mineralogiche, determinazione dei rapporti frazione minerale/frazione organica, analisi sulla umidità relativa, densità dei depositi saturi perilitorali; peso specifico delle berme vegetali) che sul campo: micro carotaggi degli ambiti retro litorali, densità in situ, carico su piastra in alta e avanspiaggia, misure sulla porosità efficace e sulla pressione neutra al fine di supportare con dati oggettivi il dimensionamento (peso max e tipologia) dei mezzi meccanici, le tempistiche e le modalità operative ottimali per la movimentazione delle banquettes in ambiti litorali sensibili.

E' inoltre prevista una fase di sperimentazione applicando il protocollo metodologico sviluppato nelle Linee Guida su un'area campione in AMP particolarmente rappresentativa allo scopo di ottimizzare le operazioni di intervento, minimizzarne gli impatti e testare le tecniche e procedure di monitoraggio.

Introduzione

Lo spiaggiamento dei resti di Posidonia Oceanica (foglie morte, rizomi, resti fibrosi) è un fenomeno naturale che annualmente si osserva sui litorali, specialmente in seguito alle mareggiate autunnali e invernali. L'accumulo di biomassa spiaggiata, combinandosi con la sabbia, forma delle strutture conosciute con il nome di "banquettes" che possono svilupparsi per centinaia di metri, in funzione dell'assetto geomorfologico della costa.

In generale le banquettes sono costituite prevalentemente dalle foglie di posidonia la cui forma a nastro, e modalità di accumulo, conferisce all'ammasso una struttura lamellare molto compatta ed elastica. La natura elastica cui sono soggette le rende comunque forme di deposito transitorie e facilmente deformabili per l'azione del moto ondoso incidente cui sono soggette.

Le banquettes, assieme alla propria frazione fluttuante, svolgono un ruolo importante nella protezione meccanica delle spiagge dall'erosione ostacolando l'azione e l'energia del moto ondoso contribuendo in tal modo alla stabilità delle spiagge. Inoltre, danno un contributo diretto e indiretto alla vita delle biocenosi animali e vegetali della spiaggia in quanto i prodotti della degradazione delle foglie accumulate rimettono in circolo grandi quantità di nutrienti fondamentali per la flora e la fauna dell'intera fascia costiera. Tuttavia, i resti di Posidonia oceanica spiaggiata costituiscono un problema sempre maggiore. Infatti, se da un lato è utile mantenerli in loco per ostacolare l'erosione delle spiagge e favorire la produttività delle acque costiere, dall'altro la loro presenza nelle zone turistico-balneare, può scoraggiare la presenza dei bagnanti sia per i residui fluttuanti e sia per gli odori che si sviluppano durante i processi di degradazione batterica. Tali aspetti comportano una diminuzione del valore turistico della spiaggia stessa e di conseguenza viene richiesto alle amministrazioni locali di rimuovere tali depositi per rendere le spiagge più gradevoli.

Il destino delle banquettes si colloca così nella più generale problematica della gestione delle biomasse spiaggiate ed in particolare di come queste debbano essere considerate. I soggetti pubblici coinvolti, ad oggi, hanno adottato per lo più soluzioni temporanee e di emergenza ricorrendo anche ad onerosi interventi di raccolta e smaltimento in discarica. In genere, la rimozione viene effettuata prima dell'estate con mezzi meccanici che asportano, oltre alle foglie, grandi quantità di sabbia senza tenere conto della natura del litorale su cui si interviene.

Ciò significa innescare/accelerare l'erosione e compromettere l'integrità dell'habitat costiero costringendo poi le amministrazioni locali ad interventi costosi di protezione della costa e di ripascimento della spiaggia.

impatto delle onde sulla riva

Effetto dissipativo dei depositi a Resti flogliari di Posidonia Oceanica

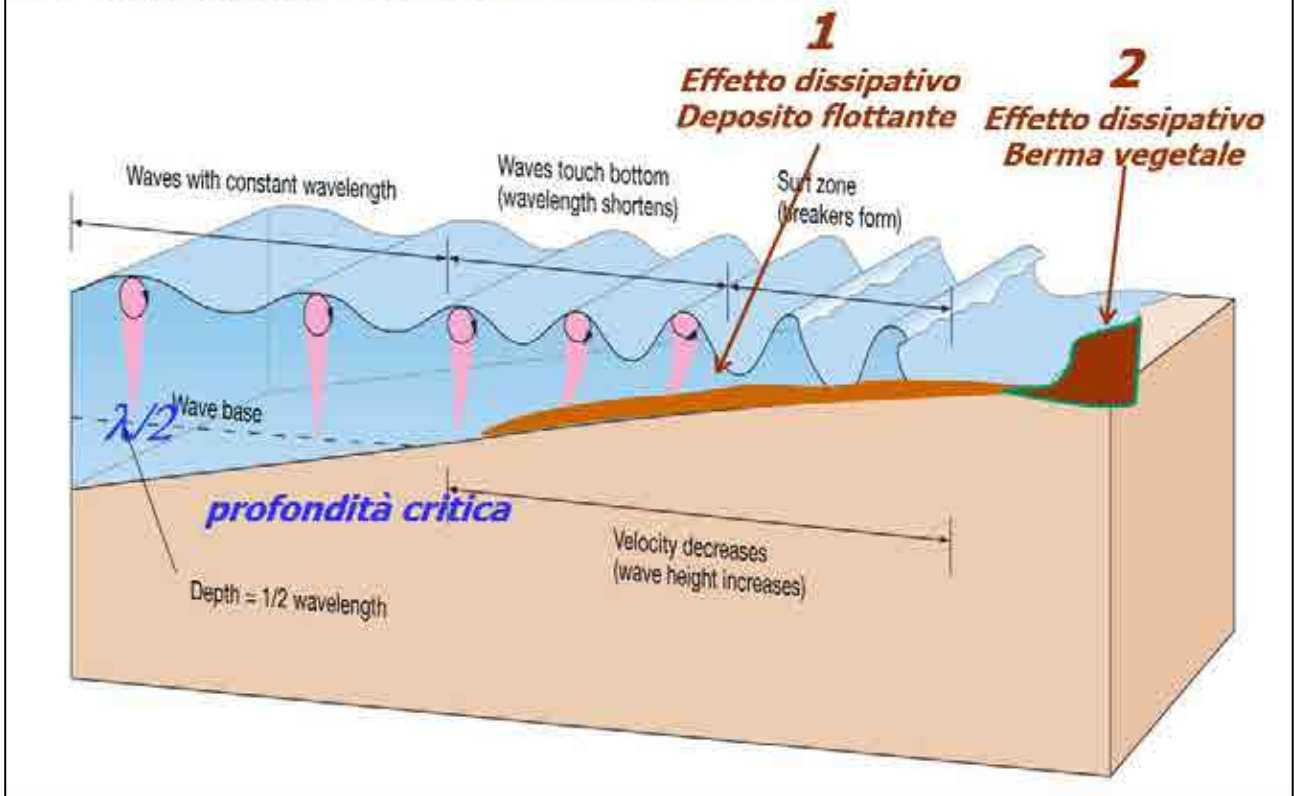


Figura 1 - Interazione tra moto ondoso e Posidonia depositata.

Posidonia oceanica e banquettes

Posidonia Oceanica

La Posidonia oceanica è una fanerogama marina endemica del Mediterraneo, organizzata in radici, rizoma e foglie. Presenta una riproduzione sessuata con formazione di fiori e frutti o asessuata per stolonizzazione. Quando incontra condizioni ambientali favorevoli la Posidonia è in grado di colonizzare vaste aree di fondo marino formando ampie distese verdi chiamate praterie che si estendono dalla superficie fino a 40 metri di profondità in acque particolarmente limpide. Comunemente Posidonia si insedia su substrati mobili come sabbia più o meno grossolana, talvolta mista a fango, ma anche su fondi detritici e rocciosi. La prateria di Posidonia intrappola i sedimenti formando una struttura fibrosa chiamata "matte" costituita da un intreccio di radici, rizomi e sedimento, che si accresce in altezza e produce un innalzamento del fondale marino, influenzando la geomorfologia dei depositi sabbiosi costieri. In particolare i fascicoli flogliari attenuano le onde, riducendone l'energia verso le spiagge, e la "matte" riduce la pendenza della spiaggia sommersa. La regressione della prateria può causare un aumento dell'energia delle onde e una accentuazione

dell'inclinazione della spiaggia sommersa, alterando di conseguenza anche il profilo della linea di riva. (ISPRA 55/2010)



Figura 2 - Prateria di *Posidonia oceanica* (Foto: M.Magri, www.rete.toscana.it).

Progettazione delle linee guida per il rilevamento e la caratterizzazione dei depositi a *Posidonia oceanica* spiaggiata.

Modalità di degradazione del materiale fogliare della *Posidonia* in spiaggia sommersa.

Una volta staccatesi dalle scaglie le foglie della *Posidonia* vengono trasportate in parte in galleggiamento e in maggior misura in sospensione nella colonna d'acqua, la sostanza organica del tessuto fogliare, soggetto ad una rapida degradazione, tende ad assorbire acqua ed appesantirsi andando a depositarsi in spiaggia sommersa distale, costituendo gli accumuli più importanti a ridosso del limite superiore della prateria (Fig. 3).

Le modalità di degradazione e la velocità di decomposizione del materiale fogliare della *Posidonia* in spiaggia sommersa è legata all'azione di comunità batteriche aerobiche che si sviluppano sia sopra la superficie dei depositi organici, mentre nelle porzioni dominano batteri anaerobici e solfo-batteri. La

decomposizione della sostanza organica è relativamente rapida mentre le fibre di cellulosa mostrano una notevole resistenza sia all'azione dei batteri che alla disgregazione meccanica operata dalle correnti trattive di fondo e dai movimenti indotti dal passaggio del piede d'onda. Le fibre residuali vengono prima selezionate ed addensate in grandi dune longitudinali festonate.

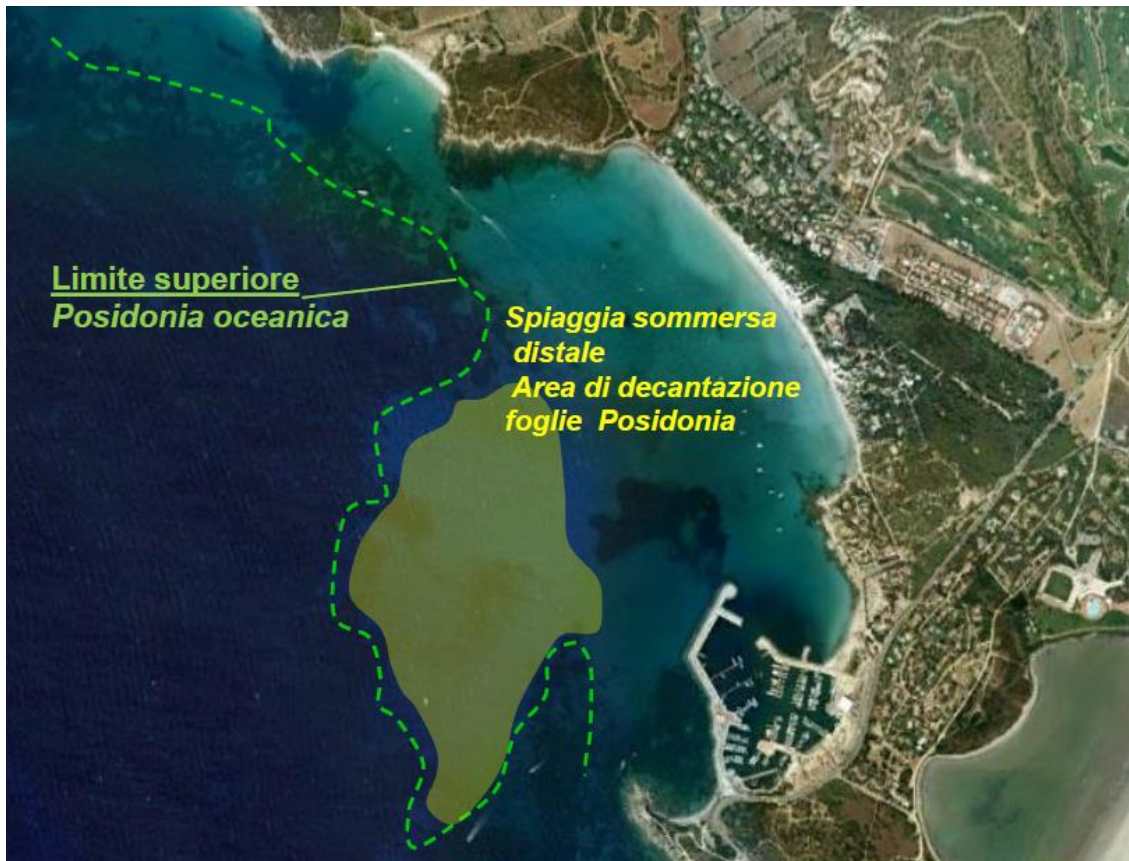


Figura 3 - Prateria di *Posidonia oceanica*, limite superiore erosivo (Baia di Carbonara – Villasimius): area di decantazione privilegiata del materiale fogliare.

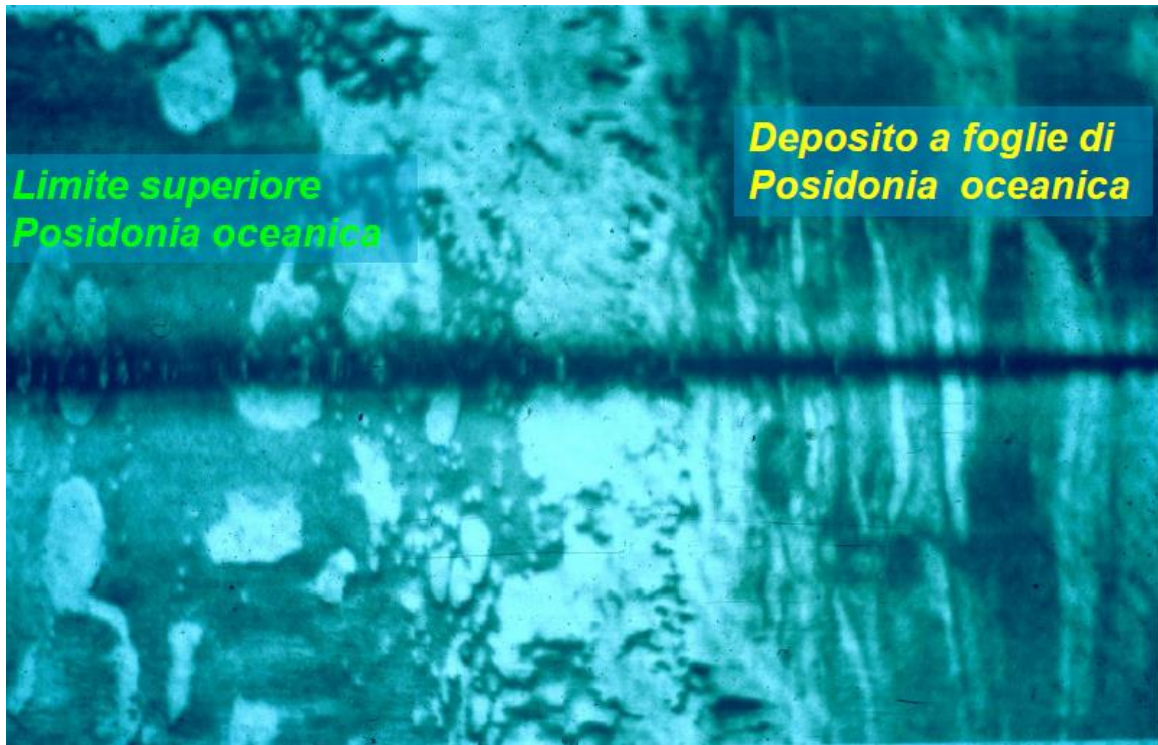


Figura 4 Immagine side scan sonar 150 khz : Prateria di *Posidonia oceanica*, limite superiore erosivo con area di decantazione del materiale fogliare organizzato in grandi dune longitudinali



Figura 5– Immagine subacquea del deposito a resti fogliari di *Posidonia oceanica*, in spiaggia sommersa distale, evidente l'azione di degradazione operata dai batteri aerobici (feltro batterico biancastro)



Figura 6– Immagine subacquea del deposito a prevalenti fibre di cellulosa derivante dai resti fogliari a Posidonia oceanica, organizzati in dune longitudinali e nel cavo delle strutture di corrente (ripple marks)

Sia le correnti trattive di fondo, monodirezionali, che i moti alternati di piede d'onda selezionano ulteriormente le fibre di cellulosa formando in zona di cavo di ripplemarks e megariipples depositi cilindrici discontinui.

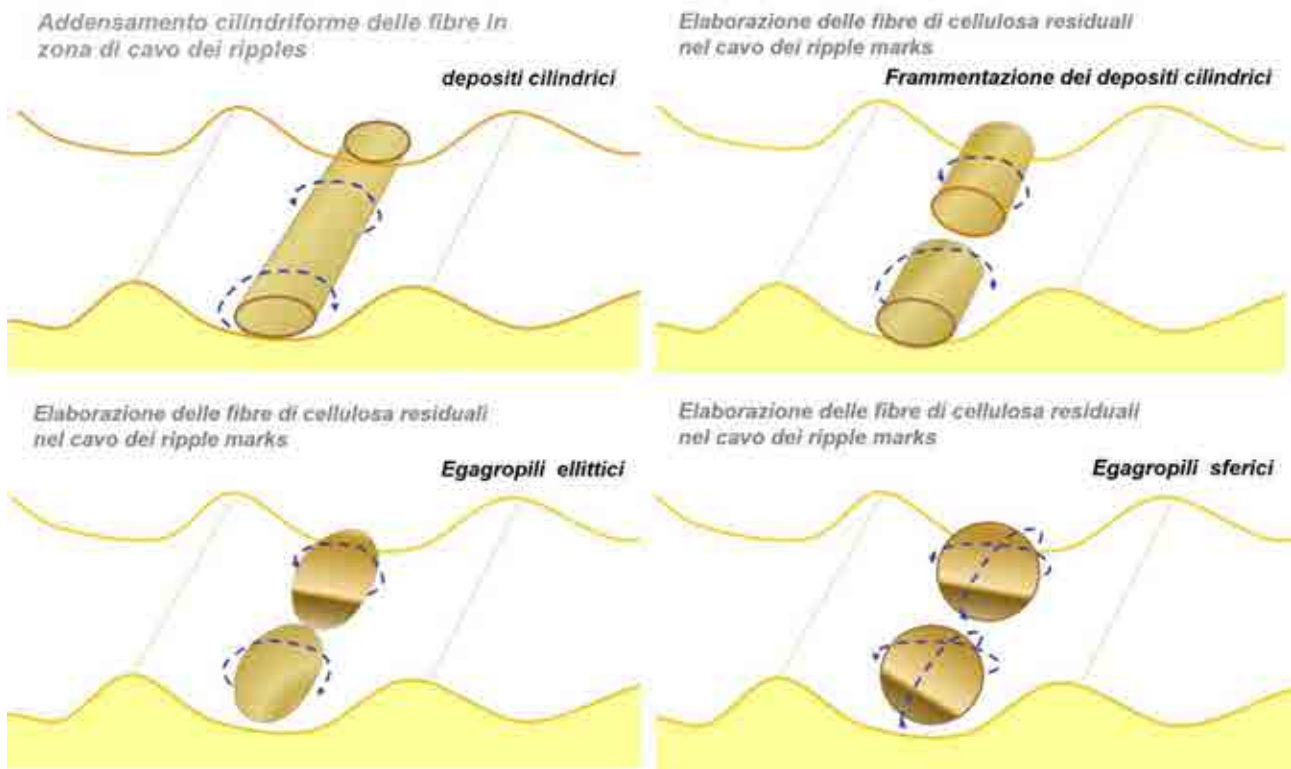


Figura 7 – Schema evolutivo degli egagropili a *Posidonia oceanica*, ad opera dei moti alternativi di piede d’onda in zona di cavo delle strutture di corrente (ripple marks).



Figura 8 – Egagropili a *Posidonia oceanica*, depositati in avanspiaggia dal moto ondoso, in prevalenza formano accumuli nell’area compresa tra la berma ordinaria e la berma di tempesta.

La Banquette

La deposizione di detriti vegetali marini per la maggior parte rappresentati da foglie, rizomi e resti fibrosi di *Posidonia oceanica* è un fenomeno diffuso lungo le coste del Mediterraneo. In prossimità delle grandi praterie di posidonia, in seguito alle mareggiate autunnali e invernali, ed in particolari condizioni (legate alle caratteristiche idrodinamiche e alla conformazione della costa), i resti di posidonia danno luogo alla

formazione, di strutture conosciute con il termine francese di “*banquettes*” (Molinier et Picard, 1953; Picard, 1953; Blanc, 1971). Queste hanno spessori variabili che possono raggiungere anche diversi metri; sono variamente profonde e si sviluppano anche per centinaia di metri, in funzione dell’assetto geomorfologico della costa (Boudouresque et Meinesz, 1982; Jeudy de Grissac et Audoly, 1985; De Falco *et al.*, 2008).

L’evoluzione e la stabilità delle *banquettes* è estremamente variabile; nei casi di maggiore consistenza costituiscono vere e proprie formazioni “bio-geomorfologiche”, certamente transitorie, ma che caratterizzano il paesaggio costiero incrementandone il patrimonio di diversità geomorfologica oltre che ecologica. (Marevivo, 2001).

In generale le *banquettes* sono costituite prevalentemente dalle foglie di posidonia la cui forma a nastro, e modalità di accumulo, conferisce all’ammasso una struttura lamellare molto compatta ed elastica (Marevivo, 2003;). Tale struttura è in grado di assorbire l’energia del moto ondoso riducendone, per l’intera fase di demolizione che si verifica durante l’insorgere di alcune mareggiate, le capacità erosive e contribuendo in tal modo alla stabilità delle spiagge. La struttura degli spiaggiamenti di posidonia e delle *banquettes* è stata accuratamente studiata nella regione di Marsiglia (Francia), dove il tasso d’acqua risulta compreso tra il 30 e il 90%, che va crescendo dalla parte superiore (esposta al sole) alla parte inferiore della *banquette* (Jeudy de Grissac et Audoly, 1985). Il tasso di sabbia è risultato variare invece dallo 0,5 all’85%, in funzione dell’esposizione della località, dell’idrodinamismo, della granulometria e della morfologia della spiaggia. La *banquette* infatti, esercita un ruolo attivo nel trattenere sedimento che rimane intrappolato tra gli strati sovrapposti di foglie: si calcola che 1m³ di *banquette* sia in grado di trattenere circa 40 kg di sedimento sciolto (Legambiente, 2005).

Secondo Jeudy de Grissac et Audoly (1985), gli accumuli vegetali che costituiscono le *banquettes* possono essere classificati in 3 categorie:

- Tipo 1: Resti poco evoluti, ancora verdi dove è ancora possibile osservare i due bordi della foglia. Rappresentano meno dell’1% delle *banquettes*;
- Tipo 2: Resti con le stesse caratteristiche di quelli di Tipo 1, ma di colore marrone. Rappresentano dall’1 al 26% delle *banquettes*;
- Tipo 3: Resti molto deteriorati, di colore marrone, che presentano al massimo uno solo dei due bordi della foglia. Rappresentano dall’1 al 99% delle *banquettes*.

Sulla base delle numerose osservazioni condotte in differenti siti italiani (Marevivo, 2001; Bovina *et al.*, 2007a, INTERREG II Toscana/Corsica, 2000; De Falco *et al.*, 2008) i meccanismi di formazione e di evoluzione del deposito sono risultati dipendere principalmente dall’interazione dei seguenti fattori:

1. fase stagionale contingente;

2. condizioni meteomarine;
3. posizione, caratteristiche e stato di conservazione delle “praterie madri”;
4. assetto geomorfologico della costa e dei fondali antistanti;
5. dinamica litoranea.

Nella formazione di una *banquette*, oltre alle caratteristiche delle praterie (in particolare la densità dei fasci e la loro lunghezza) ed alla distanza delle stesse dai punti di spiaggiamento, che può condizionare lo stato fisico e di trasformazione biochimica dei materiali, particolare influenza sembra avere la natura geomorfologica della costa. In linea di principio infatti, gli accumuli su spiaggia, anche se generalmente piuttosto consistenti nel momento del deposito, sono demoliti più facilmente dal moto ondoso e quindi sono caratterizzati da minore stabilità, rispetto ai depositi su o tra affioramenti rocciosi che favoriscono “l'intrappolamento” della biomassa.

La natura elastica cui sono soggette le rende comunque forme di deposito transitorie e facilmente deformabili per l'azione del moto ondoso incidente cui sono soggette. Tuttavia, la presenza di stratificazioni all'interno degli ammassi fogliari (con livelli basali chiaramente più vecchi), la relativa stabilità di molte strutture e la ricorrente formazione in siti specifici, porta a ritenere utile poter considerare molti tratti litorali come “aree di probabile formazione di *banquettes*”

(Marevivo, 2001; Bovina *et al.*, 2008). Tali siti normalmente sono caratterizzati dalla presenza di costa rocciosa bassa, di cale e spiagge antistanti falesie e anche dalla presenza di opere rigide di protezione litorale (scogliere artificiali e pennelli).

Recenti ricerche hanno cercato di approfondire i complessi meccanismi di distruzione, trasporto e ricostruzione delle *banquettes* nell'ambito della medesima spiaggia o unità fisiografica esposta a mareggiate di diversa durata, intensità e direzione di provenienza (Mateo *et al.*, 2003).

Proprio l'angolo di incidenza del moto ondoso, meglio descrivibile come la direzione della cresta dell'onda nella zona di frangenza (dove si considera esaurito il processo di rifrazione) sembra infatti giocare un ruolo fondamentale nello spostare ingenti quantità di biomasse vegetali spiaggiate dai punti di maggiore esposizione del paraggio verso settori della costa con minore energia (Mateo *et al.*, 2003)”.



Figura 9 - Banquette nel settore sud nella spiaggia La Cinta. Condizioni di seppellimento totale della spiaggia, in questi casi il ruolo dei depositi a resti fogliari di *Posidonia* impedendo la naturale ricostruzione del profilo estivo e la naturale dinamica litorale



Figura 10 - I resti fogliari provenienti dalla Berma ordinaria vegetale (Banquette) hanno subito un trasporto eolico e alimentato la costruzione della duna di alta spiaggia, su cui poi le specie psamofile hanno proseguito lo sviluppo dunale. (Spiaggia di La Cinta).

Analisi del quadro normativo di riferimento

Aree di deposito temporaneo della Posidonia oceanica rimossa dalla spiaggia

Secondo gli “*INDIRIZZI OPERATIVI PER LA GESTIONE DEI DEPOSITI DI POSIDONIA SPIAGGIATA SULLE COSTE*”-
Allegato 1 alla Delib.G.R. n. 40/13 del 6.7.2016: [omiss]

Le modalità per la gestione dei banchi di posidonia sull’arenile, in accordo con quanto prospettato dalla Circolare del Ministero dell’Ambiente e delle Tutela del Territorio e del Mare n. 8123/2006:

0) Mantenimento in loco dei banchi di posidonia;

1) Spostamento degli accumuli e riposizionamento degli stessi nel periodo invernale;

2) Rimozione permanente e smaltimento.

Altre opzioni introdotte successivamente dalla norma possono essere:

3) Interramento;

4) Riposizionamento su duna.

Le modalità operative verranno specificatamente descritte nel successivo paragrafo Indicazioni operative per le opzioni di gestione della Posidonia.

Gli studi condotti finora suggeriscono che la strategia da preferire sia il mantenimento in loco dei banchi di posidonia. Infatti, la presenza della posidonia spiaggiata quale parte integrante dell’ecosistema costiero evita l’instaurarsi o il perpetrarsi di processi erosivi delle linee di spiaggia e rappresenta un indicatore del buono stato di salute dell’habitat Praterie di posidonia.

In considerazione del fatto che la presenza di banchi di posidonia fa parte integrante dell’ecosistema costiero e svolge azione di protezione delle spiagge dal fenomeno dell’erosione, i Comuni ed i Concessionari sono invitati ad agire sulla diffusa percezione negativa della posidonia spiaggiata attivando opportune azioni di sensibilizzazione verso i fruitori, mediante pannelli informativi o misure di altra natura, anche eventualmente coordinandosi in rete fra loro.

Nel caso in cui si ritenga estremamente problematico, per motivazioni di carattere tecnico che oggettivamente ostacolano la fruibilità della spiaggia nella stagione estiva, mantenere in loco i banchi di posidonia, e si opti per l’opzione di spostamento e successivo riposizionamento degli accumuli o in casi estremi per il conferimento in impianti di smaltimento/recupero di rifiuti, i soggetti deputati alla pulizia dell’arenile dovranno seguire le seguenti istruzioni procedurali ed operative.

[omiss]

Opzione 1) - Spostamento degli accumuli in situ e riposizionamento

Le operazioni di movimentazione della posidonia spiaggiata devono essere effettuate in modo da non comportare l'indebolimento della struttura difensiva dell'arenile e, pertanto, devono essere evitate nel periodo invernale, in quanto priverebbero le spiagge di un naturale sistema di protezione costituito dai banchi, esponendole alle modificazioni dovute all'azione delle mareggiate.

Le operazioni devono essere effettuate con particolare cautela al fine di evitare l'asporto di sabbia: quella recuperata dovrà essere ridistribuita lungo la spiaggia.

Lo spostamento in situ della posidonia prevede l'individuazione di idonee zone, nell'ambito dello stesso arenile, nelle quali accumulare il materiale raccolto dalla battigia. La fase di selezione del materiale vegetale dovrà essere preferibilmente condotta con mezzi manuali, ma è consentito anche l'uso di meccanici di opportune dimensioni che non dovranno in alcun caso arrecare danno all'arenile. E' vietato comunque l'uso di mezzi cingolati.

I mezzi meccanici non dovranno transitare sulle dune, né sulla vegetazione, e non dovranno arrecare modificazioni di qualunque natura all'assetto geomorfologico tessiturale e cromatico dell'arenile, fatta salva la ridefinizione del profilo della spiaggia causata dalla movimentazione della banquette.

La modalità di raccolta delle biomasse dovrà essere indicata nel modello di comunicazione di cui al paragrafo precedente.

È preferibile che l'asportazione delle banquettes avvenga per passaggi successivi, in modo da consentire l'asciugatura degli strati scoperti: è pertanto necessario che, soprattutto laddove ormai per esperienza si prevedono fenomeni importanti di accumulo, la raccolta sia programmata ed eseguita periodicamente.

In caso di mareggiate eccezionali che comportino accumuli di biomassa di notevole volume potrà essere consentito un intervento straordinario rispetto all'attività programmata.

Il materiale così raccolto e selezionato dovrà essere accumulato in un ambito appartato della stessa spiaggia, disposto in modo da non interferire negativamente con la morfodinamica e la biocenosi della spiaggia ovvero rappresentare disagio e/o danno, in apposite strutture amovibili di contenimento che ne assicurino l'aerazione ed evitino la dispersione eolica e i cattivi odori; a titolo esemplificativo, tali strutture possono essere formate anche da semplici tutori infissi nella sabbia raccordati da rete a maglia fitta. Le quantità di accumulo dovranno essere tali da consentire l'aerazione tra le foglie ed evitare fenomeni di putrefazione.

Tale spostamento deve essere stagionale, con rimozione della posidonia in primavera e/o estate ed eventuale riposizionamento in autunno (al termine della stagione balneare se il materiale non risulti nel frattempo essersi biodegradato/integrato con il substrato) nella porzione di spiaggia di provenienza.

Gli interventi dovranno essere preceduti dalla bonifica dell'arenile dei rifiuti di natura antropica (plastica, metallo, legno, vetro). Questa dovrà essere effettuata preferibilmente con attrezzi manuali, ma è consentito anche l'uso di mezzi meccanici di opportune dimensioni dotati di un sistema di trigliaggio (griglie che consentono l'asportazione del rifiuto e il contestuale rilascio della sabbia e dei residui di posidonia) che non dovranno in alcun caso arrecare danno all'arenile: è sempre vietato l'uso di mezzi cingolati.

Ai sensi dell'art. 183, comma 1, lettera n) del D.Lgs. n. 152/2006 (Testo Unico dell'Ambiente) non costituiscono attività di gestione dei rifiuti le operazioni di prelievo, raggruppamento, cernita e deposito preliminari alla raccolta di materiali o sostanze naturali derivanti da eventi atmosferici o meteorici, ivi incluse mareggiate e piene, anche ove frammisti ad altri materiali di origine antropica effettuate, nel tempo tecnico strettamente necessario, presso il medesimo sito nel quale detti eventi li hanno depositati.

La pulizia di dune e delle aree demaniali marittime coperte da vegetazione deve essere effettuata esclusivamente con mezzi manuali. I rifiuti di natura antropica raccolti dovranno essere ripuliti dalla sabbia eventualmente rimasta e conferiti in discarica e smaltiti secondo le norme di settore.

Nel caso in cui nell'arenile non si riesca ad individuare aree idonee per lo stoccaggio del materiale raccolto, è consentito anche lo spostamento ex situ. In tal caso, qualora intenda riportare, a fine stagione, la posidonia sull'arenile d'origine, la biomassa non è considerata rifiuto; nel caso in cui, invece si scelga di mantenere la posidonia nella nuova collocazione, questa sarà assoggettata alle norme in materia di recupero di rifiuti (operazioni di cui all'allegato C al D.Lgs. n. 152/2006 e s.m.i.) e come tale dovrà essere autorizzata dagli enti competenti prima dello spostamento. Il trasporto di rifiuti dovrà essere eseguito da soggetti iscritti all'Albo nazionale gestori ambientali ai sensi dell'art. 212 del D.Lgs. n. 152/2006.

[omiss]

Nell'ambito del presente studio, per ogni spiaggia, sono stati individuate le aree da utilizzare per lo stoccaggio temporaneo degli accumuli rimossi dall'area di avanspiaggia; tali siti sono stati scelti secondo i seguenti criteri:

- Le aree da adibire allo stoccaggio temporaneo sono individuate preferibilmente in settori di retrospiaggia poco esposte alla dinamica eolica e litorale;
- Le aree non devono essere ricadere in zone umide e in prossimità delle bocche di laguna;
- Le aree non devono essere caratterizzate da sedimenti eolici stabilizzati da vegetazione arbustiva e/o psammofila;
- Le aree devono essere di facile accesso e il tragitto seguito dai mezzi utilizzati deve non deve interessare gli ambiti dunali;

Idrodinamica litoranea e depositi fogliari a *Posidonia oceanica*

L'attività di ricerca si è sviluppata nell'ambito dell'idrodinamica litorale in presenza di presenza di *Posidonia oceanica* e nello specifico si è focalizzata sull'interazione tra moto ondoso e prateria di *Posidonia* nella *surf area* e sugli effetti sul moto ondoso della variazione di densità dell'acqua in presenza di *Posidonia* in prossimità della riva.

La ricerca si è avvalsa dei prodotti dei rilievi effettuati su un'area campione in AMP particolarmente rappresentativa.

La *Posidonia oceanica* è una fanerogama marina endemica del Mediterraneo, organizzata in radici, rizoma e foglie, in grado di colonizzare vaste aree di fondo marino formando ampie distese verdi chiamate praterie che si estendono dalla superficie fino a 40 metri di profondità in acque particolarmente limpide.

In prossimità delle grandi praterie di *posidonia*, in seguito alle mareggiate autunnali e invernali, si generano grandi quantità di detriti vegetali marini per la maggior parte rappresentati da foglie, rizomi e resti fibrosi di *Posidonia oceanica*. Sulla base delle numerose osservazioni condotte in differenti siti italiani (Marevivo, 2001; Bovina *et al.*, 2007a, INTERREG II Toscana/Corsica, 2000; De Falco *et al.*, 2008) l'idrodinamica litoranea condiziona il trasporto e il deposito dei detriti di *Posidonia*. Nello specifico:

- L'innalzamento del fondale marino dovuto alla formazione delle matte e i fascicoli fogliari influenzano direttamente la propagazione del moto ondoso;
- La variazione di densità della colonna d'acqua in presenza di detriti condiziona o meccanismi di dissipazione di energia del moto ondoso in prossimità della riva (). Lo stato fisico e biochimico dei detriti, oltre alle caratteristiche delle praterie, è condizionato dalla distanza dal punto di origine.

Aspetti di idrodinamica litoranea in presenza di *Posidonia oceanica*

La *Posidonia oceanica* è capace di creare praterie sul fondale marino antistante larga parte delle coste delle coste della Sardegna costituendo un ecosistema di straordinario valore ecologico che offre cibo e rifugio ad una grande quantità di organismi marini. Le praterie di *Posidonia oceanica* incrementano la scabrezza al fondo, modificando quindi il trasporto di sedimenti nello strato più prossimo (Kock *et al.*, 2006) e incrementando l'attenuazione del moto ondoso (Kobayashi *et al.*, 1993).

Ampia è la letteratura sull'attenuazione del moto ondoso indotta dalla prateria di *Posidonia oceanica* nella fascia di mareggiata, spesso espressa in funzione di scabrezza equivalente e quindi fattore di attrito

(Infantes et al., 2012). Ciò comporta che il profilo di equilibrio di una spiaggia in presenza di una prateria di Posidonia oceanica sia maggiormente riflessivo di quello previsto dal profilo di Dean.

In particolare, alcuni studi hanno dimostrato come esiste un controllo idrodinamico sul limite superiore della prateria di Posidonia oceanica definito dalla velocità orbitale delle particelle in prossimità del fondo. Altre ricerche hanno approfondito i complessi meccanismi di distruzione, trasporto e ricostruzione delle banquettes nell'ambito della medesima spiaggia o unità fisiografica (UF) esposta a mareggiate di diversa durata, intensità e direzione di provenienza con particolare riguardo al diverso contenuto energetico delle porzioni di spiaggia o UF (Mateo et al., 2003).

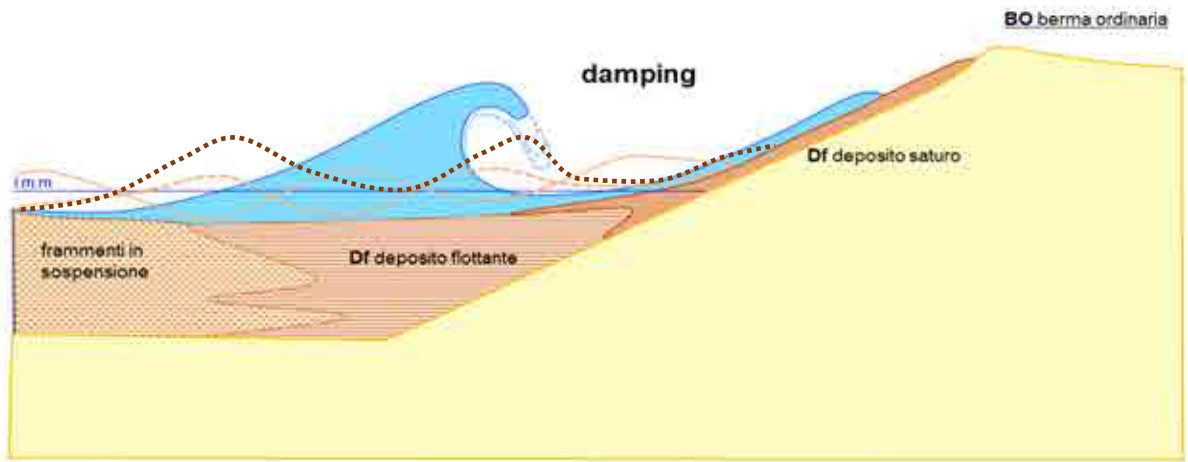
Tra i modelli già elaborati e disponibili nella letteratura scientifica sugli effetti di protezione da parte delle banquettes di Posidonia oceanica sulla linea di costa (e.g., Jeudy de Grissac 1984), di interesse è il modello consequenziale di deposizione e ritirata naturale delle banquettes accumulate nella zona di swash sulle spiagge delle isole Baleari (Servera et al., 2002) che indica due profili di evoluzione di spiaggia dipendenti dalla rimozione o meno delle banquettes con un avanzamento della linea di riva nel secondo caso. Ciò potrebbe indicare la non rimozione delle banquettes come una pratica gestionale nelle spiagge maggiormente critiche.

Sono diversi i fenomeni oggetto di interesse per il controllo e la previsione della morfologia delle spiagge.

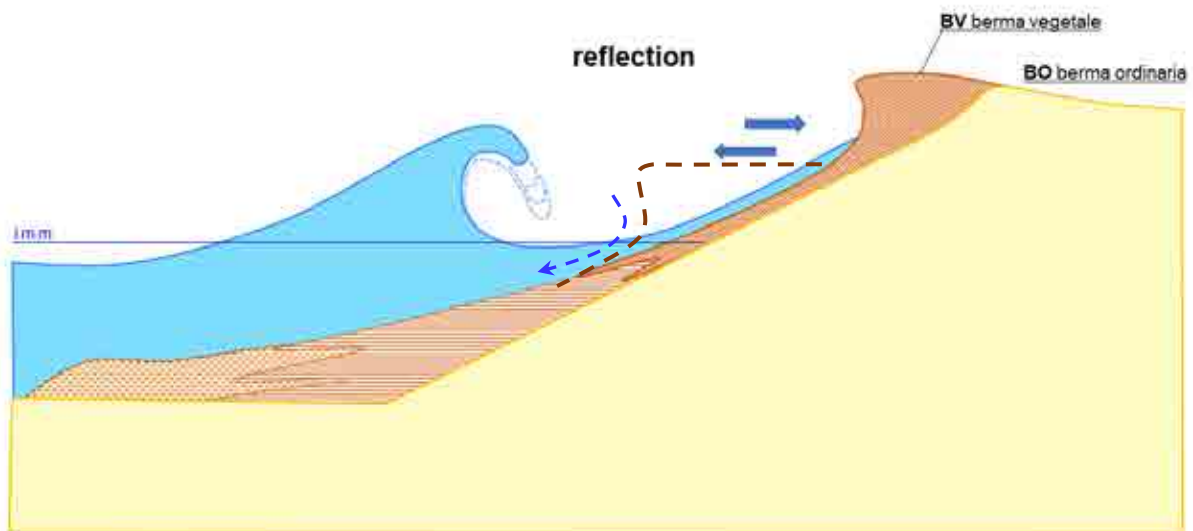
Tra questi fenomeni, sono stati esaminati:

- La funzione di stabilizzazione e consolidamento dei fondali svolta dall'apparato radicale;
- Attenuazione del moto ondoso e delle correnti dovuta all'apparato fogliare;
- L'effetto combinato della presenza della prateria e dei resti fogliari nella colonna d'acqua sui campi di corrente litoranea;
- Gli ammassi fogliari che si depositano lungo le spiagge (banquette) costituiscono una naturale protezione del sedimento sabbioso dall'azione di onde e correnti.
- Attenuazione dell'energia dell'onda da parte del deposito fogliare flottante
- Riflessione dell'energia dell'onda da parte della ripa di deposito subverticale
- Smorzamento dell'energia del flutto montante da parte della Berma vegetale
- Innalzamento del limite di runup del flutto montante.

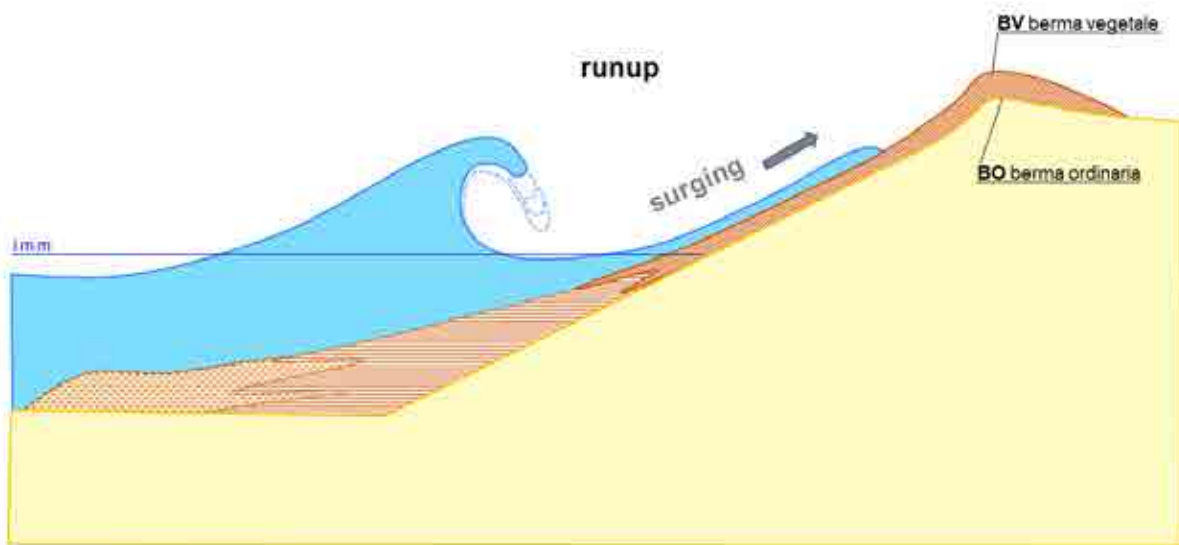
Morfotipi della Banquette ed effetto su moto ondoso



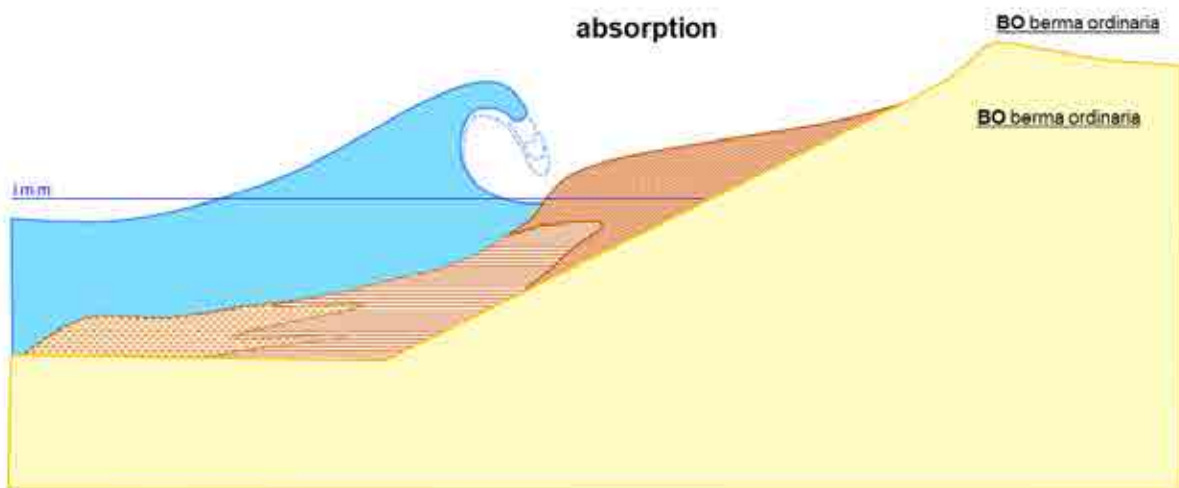
I resti fogliari a *Posidonia oceanica* possono addensarsi in spiaggia sommersa prossimale in forma di fango a differenti livelli di diluizione, verso il largo il gel organico e i microframmenti in sospensione, in prossimità della riva un fango organico denso contenente frammenti centimetrici flottanti. Questi depositi organici miscelati all'acqua marina modificano sia la densità che la viscosità del fluido e quindi sia la velocità di migrazione che la forma del frangente.



I depositi fogliari a *Posidonia oceanica*, una volta spiaggiati possono costruire una biocostruzione interstratificata sia con il sedimento litorale (sabbie, ghiaie e resti conchigliari) strutturata con una ripa subverticale a profilo concavo che si eleva direttamente dalla linea di riva con altezza max di +1/+2 m sul livello medio mare.



I depositi fogliari a *Posidonia oceanica*, possono venir depositati dal flutto montante fino a sovrastare la berma sedimentaria (BO berma ordinaria) e strutturare una berma vegetale (BV) che può innalzare il profilo di spiaggia da +0,5 a + 1m. Questo costituisce un ostacolo alla migrazione del runup d'onda e dissipando l'energia del flutto montante (surging).



Inoltre una volta disidratato la berma vegetale stratificata presenta una permeabilità efficace notevolmente maggiore rispetto alla permeabilità della sabbia di spiaggia, viene favorito quindi l'assorbimento delle acque di flutto montante; ma in questo caso il sedimento abbandonato tenderà ad essere "assorbito" ed intrappolato entro la biocostruzione, giustificando le percentuali rilevate nella presente indagine 40/70%-



Effetto su moto ondoso e correnti nella fascia di mareggiata

La fascia di mareggiata (surf area) è la principale sede della dissipazione e della trasformazione dell'energia del moto ondoso, e nella sua porzione interessata dalla prateria di Posidonia oceanica è di particolare interesse il contributo al tasso di dissipazione di energia per attrito sul fondo (*Sulis et al.*, 2012) modellato secondo la relazione di *Johnson and Kofoed-Hansen* (2000):

$$S_{bf}(f, \theta) = -C_f \frac{k}{\sinh 2kh} F(f, \theta) \quad (1)$$

dove $C_f = f_w U_{bm}$ è un coefficiente di resistenza, U_{bm} è la massima velocità orbitale delle particelle al fondo e f_w un fattore di attrito per fondo mobile (*Swart*, 1974):

$$f_w = \begin{cases} \exp\{-5.977 + 5.213(k_N/a_{bm})^{0.194}\} & a_{bm}/k_N > 2 \\ 0.24 & a_{bm}/k_N < 2 \end{cases} \quad (2)$$

in cui $a_{bm} = U_{bm}/\sigma$ è l'ampiezza orbitale e k_N la scabrezza equivalente di Nikuradse, una scabrezza artificiale e facilmente misurabile ottenuta dalle sue prove di laboratorio.

Sulis et al (2012) assumono i seguenti valori o formule di calcolo di k_N per i diversi fondali:

- roccia: $k_{Nr} = 300$ mm;
- Posidonia oceanica: $k_{Np} = 100$ mm;

- sabbia (k_{Ns}): sono stati considerati i contributi dovuti alla scabrezza superficiale (k_{Nc}) e alle forme di fondo (k_{Nf}), mentre è stato trascurato il contributo dovuto al trasporto solido (Johnson & Kofoed-Hansen, 2000). In particolare:

$$k_{Nc} = 2d_{50} \quad (3)$$

Dove d_{50} è il diametro mediano del sedimento.

Nel caso della circolazione litoranea, le resistenze al moto sono espresse mediante il coefficiente di Chezy in termini di scabrezza di Strickler k_S :

$$\chi = k_S h^{1/6} \quad (3)$$

, dove la corrispondenza tra k_N e k_S è ottenuta da Sulis et al (2012) utilizzando l'espressione di Colebrook per regime di parete scabra. La scabrezza di Strickler così determinata è risultata compresa tra 30 e 75 $m^{1/3}/s$.

Gli studi, molti su modello e pochi in situ, evidenziano quindi come la conformazione del fondo con alternanza aree a Posidonia con aree sabbiose o rocciose, quindi con erodibilità eterogenea e differenti contributi di resistenza ai moti, determini attenuazione dell'onda e presenze di vortici ben sviluppati. Infantes et al (2012) presentano l'attenuazione dell'onda ($M_{rms} = 1$ m; $T_p = 5.5$ s) su un fondale a profondità costante di 10 m su una prateria di Posidonia oceanica per una lunghezza di 1000 m (Figura 11).

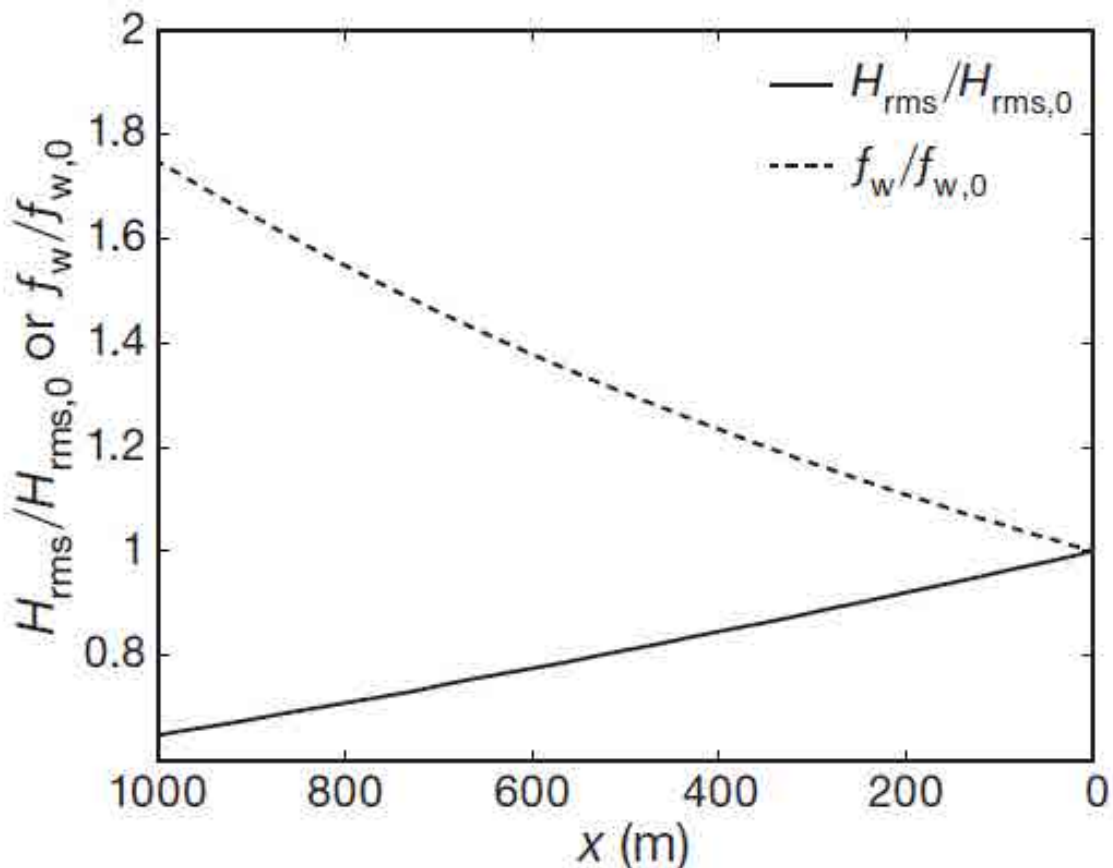


Figura 11. Propagazione di moto ondoso su transetto di prateria di Posidonia oceanica (da Infantes et al, 2012)

Con un maggior dettaglio, i valori di k_N e k_S dovrebbero essere messi in relazione ai valori di densità assoluta dei fasci fogliari. I metodi più utilizzati per la classificazione delle praterie sulla base dei valori di densità assoluta dei fasci fogliari sono due; il primo (Giraud, 1977) classifica le praterie in base al numero di fasci fogliari al metro quadro, suddividendole in 5 classi di densità; il secondo, proposto solo recentemente (Pergent et al., 1995), classifica le praterie tenendo conto non solo i valori di densità assoluta dei fasci, ma considerando anche la profondità di campionamento; gli autori, infatti, hanno evidenziato come i valori di densità dei fasci fogliari diminuiscano con la profondità, la quale spiega il 54% della variabilità di questo fattore. La definizione di questi valori è fatta in immersione con riferimento a quadrati standard.

Effetto della densità in prossimità della riva

Alcuni studi hanno dimostrato come esiste un controllo idrodinamico sul limite superiore della prateria di Posidonia oceanica definito dalla velocità orbitale delle particelle in prossimità del fondo. Altre ricerche hanno approfondito i complessi meccanismi di distruzione, trasporto e ricostruzione delle banquettes nell'ambito della medesima spiaggia o unità fisiografica (UF) esposta a mareggiate di diversa durata, intensità e direzione di provenienza con particolare riguardo al diverso contenuto energetico delle porzioni di spiaggia o UF (Mateo et al., 2003). L'affidabilità dei modelli presenti in letteratura sugli effetti di protezione da parte delle banquettes di Posidonia oceanica sulla linea di costa (e.g., Jeudy de Grissac 1984) è legata ad una fase di calibrazione con una mole significativa di dati di campo.

Nei modelli idrodinamici, la presenza di detriti in sospensione richiede l'uso di equazioni aggiuntive, in particolare con riferimento all'effetto di densità. L'equazione di stato che lega densità dell'acqua e variazione di salinità a temperatura è in alcuni modelli (e.g., DELFT3D-FLOW) estesa per includere l'effetto della densità dei detriti in sospensione:

$$\rho = \rho_w + \sum_{l=1}^{LSED} c_{vol}^{(l)} (\rho_s^{(l)} - \rho_w) \quad (4)$$

nella quale ρ_w è la densità dell'acqua di mare che include gli effetti di salinità e temperatura (differenziata nei periodi dell'anno, e.g. invernale pari a 1028.9 Kg/m³); $c_{vol}^{(l)}$ è la concentrazione volumetrica della frazione sedimentaria l ; $\rho_s^{(l)}$ è la densità delle particelle solide della frazione sedimentaria l ; LSED è il numero totale di frazioni sedimentarie.

La stessa dissipazione di energia per frangimento è influenzata da variazioni di densità dell'acqua (Goda, 2001). Al frangente, la dissipazione di energia per turbolenza (legata alle forme dei frangenti: surging, plunging e spilling) è condizionata dalla presenza dei detriti che influenzano la viscosità del fluido.

Di particolare interesse per la morfologia costiera è il valore di spinta e flusso di quantità di moto del moto ondoso, qui considerato come agente su una sezione trasversale di lunghezza unitaria di moto ondoso di un'onda progressiva di piccola ampiezza. La pressione in un punto della sezione è:

$$p = -\rho g z + \rho g \eta \frac{\cosh[k(z + d)]}{\cosh(kd)} \quad (5)$$

Pertanto, la spinta agente sull'elemento dz del piano verticale sarà:

$$dS_p = p dz \quad (6)$$

E il corrispondente flusso di quantità di moto elementare:

$$dM = \rho u^2 dz \quad (7)$$

In particolare, l'integrazione della (6) porta a:

$$S_p = \frac{\rho g d^2}{2} \quad (8)$$

Dove si evidenzia la relazione tra la spinta sulla sezione S_p e la densità ρ come definita in (4)..

Criticità

Relazioni tra permeabilità e erosione

La influenza della permeabilità sulla evoluzione morfologica della spiaggia è un argomento affrontato in letteratura sin dal 1940 (Bagnold R.A., 1940).

Diversi autori, infatti, hanno segnalato che la perdita di energia potenziale per effetto della percolazione all'interno della spiaggia emersa fa diminuire l'energia del back-wash (Grant U.S., 1948). Maggiore è la permeabilità della spiaggia, maggiori possibilità ha il sedimento trasportato dal run-up di depositarsi, a fronte della diminuzione della capacità erosiva del back-wash. In letteratura non sono stati riscontrati studi che mettano in relazione la permeabilità delle sabbie di spiaggia con il carico impresso dal transito di mezzi pesanti.

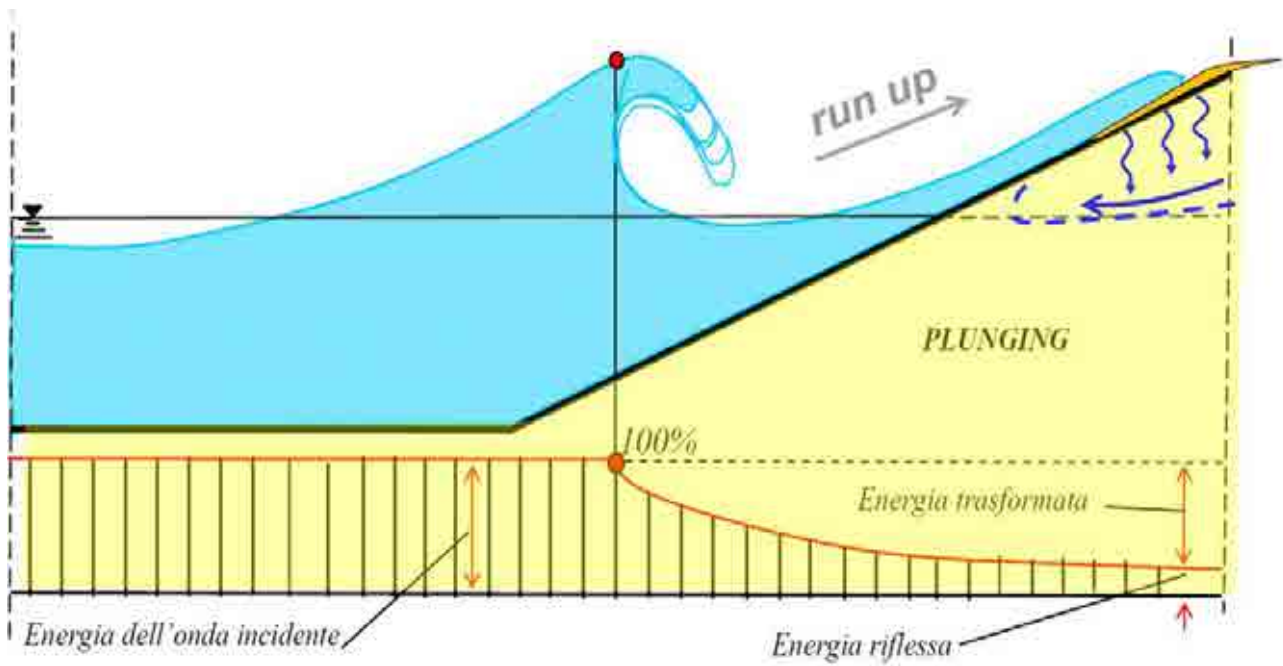


Figura 12 - Bilancio energetico dell'onda frangente

Tra una fase di run-up e la successiva una parte dell'acqua viene assorbita dalla spiaggia verso il livello di falda lasciando una zona superficiale non satura, in modo da rendere il flusso di lavaggio di ritorno minimo e consentire che il sedimento trasportato sulla spiaggia non venga trascinato di nuovo verso largo.



Figura 13 – evidenza dell'assorbimento del flutto montante in battigia, si notano i pock marks dovuti all'aria in uscita dal sedimento.

Mezzi meccanici

L'utilizzo dei mezzi meccanici nelle operazioni di pulizia delle spiagge comporta una serie di problematiche legate alla compattazione dei sedimenti e alla conseguente diminuzione di permeabilità.

Tali veicoli pesanti inducono nei sedimenti della spiaggia degli sforzi verticali e orizzontali dipendenti dal peso dei macchinari e dalla trazione degli pneumatici (Fig. 16).

Il carico applicato nella superficie del terreno dipende principalmente dal peso del mezzo, dalla dimensione degli pneumatici e dalla loro pressione di gonfiaggio.

Numerosi studi sono stati portati avanti relativi all'interazione tra i mezzi agricoli e i suoli in ambito agronomico. Dall'analisi di tali lavori si evince che una diminuzione di carico sul terreno è legata all'utilizzo di pneumatici di maggiori dimensioni e di una bassa pressione di gonfiaggio (Fig. 17).

E' stato osservato che anche il numero di passaggi del mezzo sulla superficie ha effetti sulle proprietà fisiche del sedimento (Ogunjirin,O.A.).

La risposta del sedimento in base allo sforzo applicato dipende dalle sue caratteristiche. Questa può essere intesa come portanza del materiale ed è dipendente dalla tessitura, struttura e grado di umidità.

La conoscenza delle caratteristiche granulometriche della spiaggia è fondamentale, infatti sabbie assortite sono soggette ad un addensamento maggiore rispetto a sabbie ben classate. La portanza è inversamente proporzionale alla sua umidità del sedimento, infatti quanto più un terreno è umido, tanto minore è la sua capacità di resistere alla pressione.

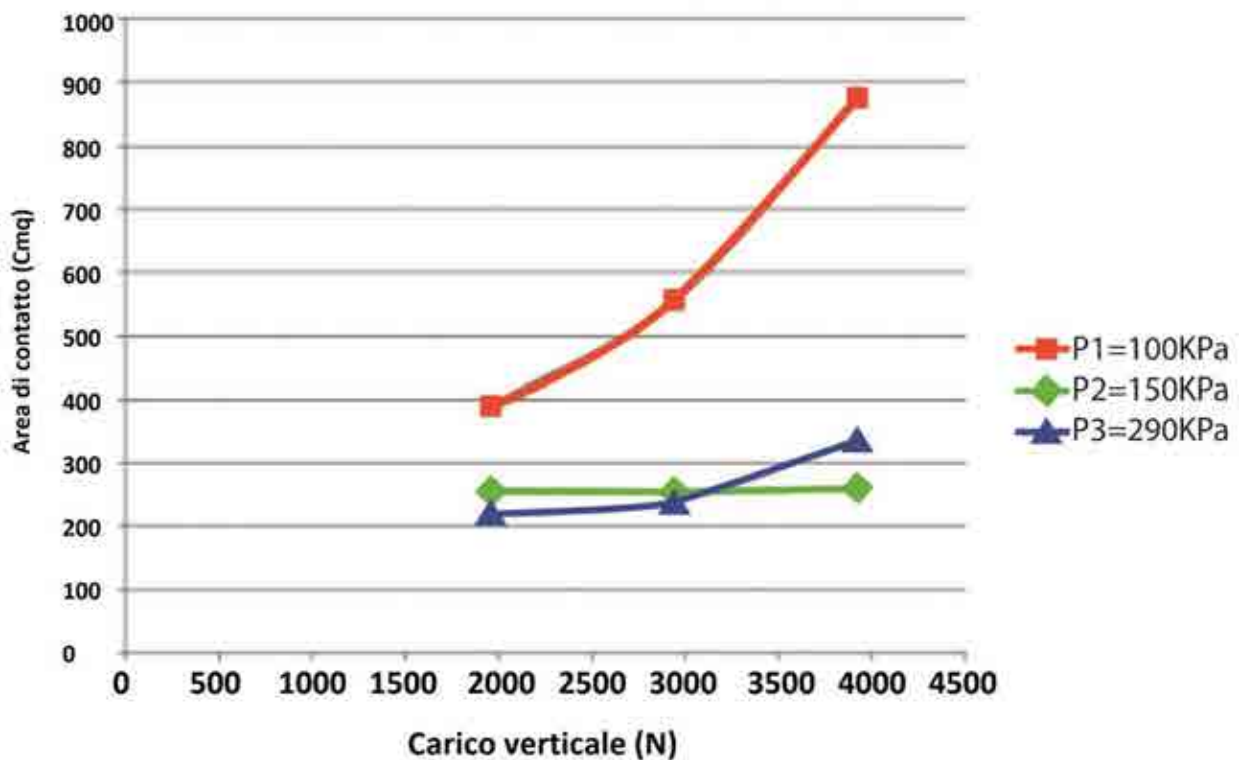


Figura 14- Relazione tra il carico verticale e l'area di contatto in funzione della pressione di gonfiaggio (Taghavifar H. & Mardani A; 2012)

Occorre ridurre al minimo la zona in rosso, ossia dove la pressione è massima.

– Se il carico per ruota resta uguale, uno pneumatico più grande con una pressione interna minore riduce la pressione sulla sabbia (situazione b).

– Se il carico per ruota è elevato, i rischi sono maggiori. In caso di carico molto elevato, anche il ricorso a pneumatici larghi non riesce a ridurre in misura sufficiente la pressione sul terreno (situazione c).

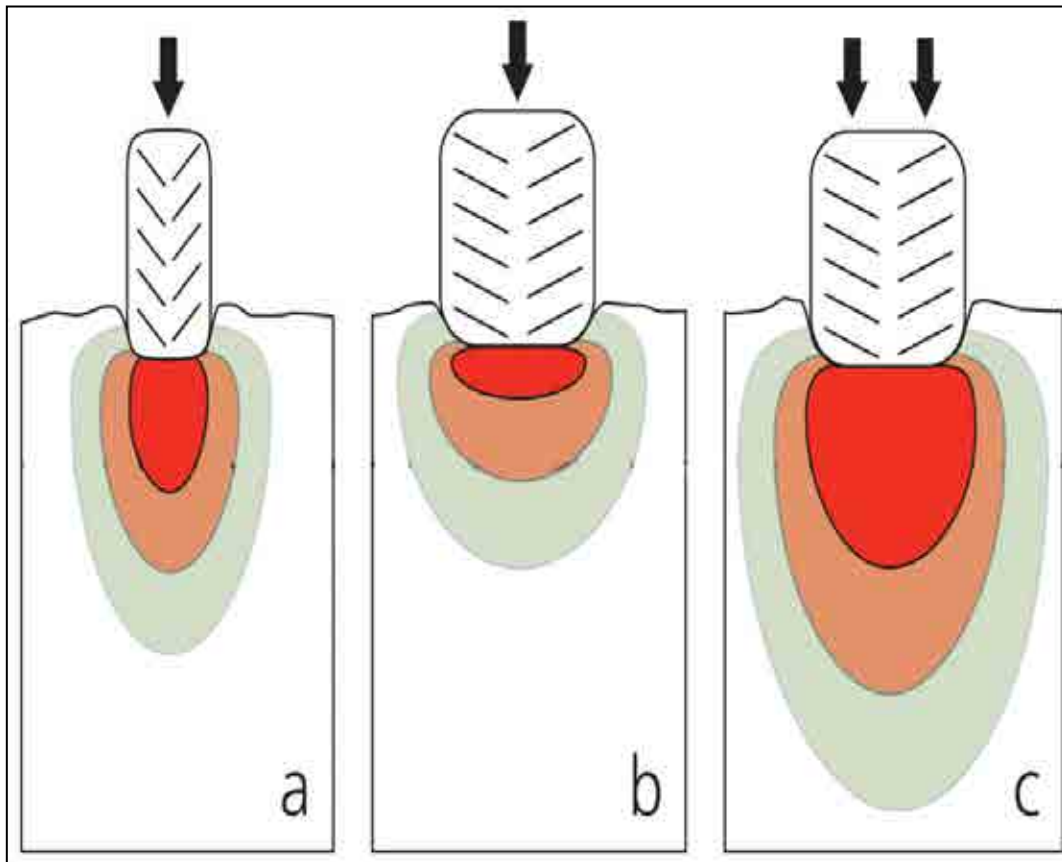


Figura 15- Effetti di due diversi carichi per ruota (una sola freccia: carico semplice; due frecce: carico doppio) e di due diverse larghezze di pneumatico.



Figura 15 a – tipologie di pneumatici da sabbia ad ampia superficie di appoggio e bassa pressione di esercizio.



**Trattore Holland TLA
100**

Peso totale 6500 kg

**Carico per ruota
2330 kg**

**su superficie
di applicazione
2000 cm²**

Figura 156 - Trattore pesante New Holland TLA100



**Trattore SAME
SOLARIS 55**

**Peso totale 1700 kg
(circa ¼)**

**Carico per ruota 425
kg**

**su superficie
di applicazione
1000 cm²**

Figura 7 - Trattore leggero Same Solaris 55

Analisi della pressione al suolo dei diversi trattori

New Holland T5070

- Gommatura ant: 480/65 r 24
- Gommatura post: 600/65 r 34
- Zavorra ant: 400 kg
- 165 litri gasolio
- Peso totale 4.700 kg

Superficie di appoggio gomme post: $2472 \text{ cm}^2 \times 2 = 4.944 \text{ cm}^2$

Superficie di appoggio gomme ant: $1407 \text{ cm}^2 \times 2 = 2.814 \text{ cm}^2$

Superficie totale di appoggio: 7.756 cm^2

Pressione al suolo media trattore zavorrato: $4.700 \text{ kg} / 7.756 \text{ cm}^2 = \underline{0.60 \text{ kg/cm}^2}$

Pressione al suolo media trattore non zavorrato: $4.300 \text{ kg} / 7.756 \text{ cm}^2 = \underline{0.55 \text{ kg/cm}^2}$

New Holland T5040

- Gommatura ant: 320/85 r 28 Michelin Agribib
- Gommatura post: 420/85 r 38 Michelin Agribib
- 140 litri gasolio
- Peso totale 4100 kg senza zavorre

Superficie di appoggio gomme post: $2058 \text{ cm}^2 \times 2 = 4116 \text{ cm}^2$

Superficie di appoggio gomme ant: $1089 \text{ cm}^2 \times 2 = 2178 \text{ cm}^2$

Superficie totale di appoggio: 6294 cm^2

Pressione al suolo media trattore non zavorrato: $4100 \text{ kg} / 6294 \text{ cm}^2 = \underline{0.65 \text{ kg/cm}^2}$

New Holland T7060

- Gommatura ant: 600/65 r 28
- Gommatura post: 710/70 r 38
- Zavorra ant: 1000 kg
- 400 litri gasolio
- Peso totale 9500 kg

Superficie di appoggio gomme post: $3.379 \text{ cm}^2 \times 2 = 6.758 \text{ cm}^2$

Superficie di appoggio gomme ant: $2.270 \text{ cm}^2 \times 2 = 4.540 \text{ cm}^2$

Superficie totale di appoggio: 11.298 cm^2

Pressione al suolo media trattore zavorrato: $9.500 \text{ kg}/11.298 \text{ cm}^2 = \underline{0.84 \text{ kg/cm}^2}$

Al fine di evitare gli impatti da carico sulla spiaggia è sempre preferibile, quando le volumetrie lo consentano, l'utilizzo di carico manuale dei resti fogliari utilizzando gli strumenti agricoli



Nel caso di grandi volumi che impongano l'utilizzo di mezzi meccanici di prelievo e di trasporto, è necessario limitare il peso dei mezzi ed il carico complessivo dei carrelli; inoltre al fine ridurre il prelievo delle sabbie intrappolate nella "Banquettes" è utile utilizzare mezzi dotati di benna a forca



Protocollo metodologico in Area campione in AMP Tavolara P.C.C

Inquadramento geografico dell'area studiata

I sistemi litorali oggetti di studio sono situati nella costa nord-orientale della Sardegna, all'interno dell'area marina protetta di Tavolara e Capo Coda Cavallo.

Le spiagge interessate sono Porto Taverna a Nord del promontorio di Capo coda Cavallo e la spiaggia di Cala Brandinchi e La Cinta nel settore Sud.



Figura 16 - Localizzazione delle spiagge oggetto di studio.

Inquadramento geologico e geomorfologico

L'evoluzione geomorfologica dell'area studiata è fortemente influenzata dalle caratteristiche litologiche del substrato, costituito da rocce appartenenti al basamento paleozoico Sardo, in genere massicce e fortemente fratturate.

L'eredità strutturale ha svolto un ruolo importante nel modellamento dell'area dato che la maggior parte delle valli si approfondiscono lungo le faglie e le fratture della tettonica alpina orientate prevalentemente circa N-S e NE-SW. L'area in esame è caratterizzata da una morfologia accidentata in cui i processi costieri di alterazione su rocce granitiche e successivamente la rielaborazione da parte delle acque meteoriche dall'altra giocano ruolo predominante.

Lungo le zone maggiormente fratturate e fagliate si sono approfonditi i corsi d'acqua a generare un reticolo di drenaggio tipicamente angolare. I principali corsi d'acqua sono ubicati in corrispondenza di importanti elementi strutturali che si seguono per più ampie aree della Sardegna nord orientale.

La dinamica costiera è caratterizzata da un'alternanza di promontori scolpiti sulle rocce del basamento intrusivo e piccole spiagge tra un promontorio ed un'altro (pocket beach). Sono però frequenti anche le baie scolpite su roccia senza che siano presenti depositi litorali sabbiosi. In questi casi è verosimile che l'erosione marina abbia agito con maggiore rapidità lungo le linee di fratturazione preesistenti. Il reticolo angolare delle valli e di numerosi tratti costieri confermerebbe tale ipotesi. E' comunque indubbio che le insenature più profonde costituiscono tipici esempi di Rias come quelli che caratterizzano numerose altre località della Sardegna nord orientale.

Si tratta di valli fluviali interessate da limitati fenomeni di riempimento durante l'ultima glaciazione e/o che comunque sono state interessate da importanti fenomeni di riesumazione durante la trasgressione versiliana. Tali morfologie suggerirebbero comunque la presenza di movimenti di lento abbassamento di questo settore dell'isola.

In quest'area sono inoltre presenti ripiani di erosione su roccia interpretabili come antichi terrazzi di abrasione marina.

Porto Taverna

Il contesto geomorfologico di Porto Taverna è caratterizzato da un cordone litorale che delimita la laguna retrostante, la cui bocca è situata all'estremità meridionale della spiaggia. In vari settori della spiaggia sono presenti resti di manufatti che limitano l'espansione della vegetazione, anzi favoriscono l'instaurarsi di fenomeni di deflazione.

L'intero sistema dunare, in particolare nelle zone avandunari è interessato da un elevato livello di degrado in relazione agli intensi processi erosivi che interessano principalmente il piede e il fianco delle dune.



Figura 17 - Spiaggia di Porto Taverna – settore centrale: accumuli a resti fogliari di Posidonia oceanica.

Cala Brandinchi

La spiaggia di Brandinchi si imposta sul cordone sabbioso che divide mare e laguna. Si estende in direzione nord-sud ed alla sua estremità meridionale si trova la bocca di laguna. Il profilo di spiaggia risente notevolmente della pressione antropica, vi sono infatti evidenti segni di dissesto, come il piede delle dune e le dune embrionali sbancati. Inoltre il transito di mezzi pesanti direttamente sulla cresta delle dune ha ridotto al minimo la presenza di vegetazione che avrebbe favorito la stabilizzazione delle dune.



Figura 18 - Fotografia drone spiaggia di Cala Brandinchi.

La parte sommersa della spiaggia di Brandinchi presenta un sistema di barre in prossimità della riva, mentre più a largo affiora direttamente il substrato roccioso.

La Cinta

Il sistema de La Cinta, situato nei pressi del centro abitato di San Teodoro, presenta un'estensione parabolica, in direzione quasi meridiana, di circa 3.5 Km e delimita nell'area retrostante una zona umida particolarmente estesa. Si tratta di un cordone litorale, la cui massima ampiezza si raggiunge nella parte centrale (circa 130 m), sul quale si è impostato un campo di dune costiere ben sviluppato. La spiaggia è orientata N-S con esposizione a Est. L'ambito geomorfologico costiero risulta costituito da Si tratta di dune fissate dalla vegetazione, presentano altezza ed estensione limitata e risultano alimentate dalle spiagge costituite prevalentemente da sedimenti silicoclastici ed in subordine carbonatici.



Figura 19 - Foto drone spiaggia La Cinta.

Protocollo metodologico in Area campione in AMP Tavolara P.C.C

Rilievi di campo

I rilievi geomorfologici delle spiagge e delle banquette sono stati eseguiti nel mese di maggio 2018. Le attività si sono concentrate nella spiaggia di Cala Brandinchi poiché presentava una maggiore quantità di depositi vegetali spiaggiati. Gli accumuli sono stati rilevati alle estremità della spiaggia con una maggiore concentrazione nel settore Nord, dove si sviluppano per una lunghezza di circa 200m verso sud e una larghezza sino a 7 m nella parte Nord. Una parte dei resti vegetali di *Posidonia oceanica* è presente in sospensione nell'acqua.



Figura 20 – Distinzione tra Banquette invernale e Banquette in neoformazione estiva

Il detrito abbancato è in stretto rapporto con la frazione in acqua (“massa flottante”) la cui presenza dipende dalle condizioni meteomarine ed è legata sia alle fasi costruttive che demolitive della banquette.

La biomassa in sospensione (prevalentemente costituita da foglie ma anche da resti fibrosi) costituisce una sospensione densa che con la sua “viscosità” e tensione superficiale, per alcuni metri davanti al banco vegetale, dissipa l’energia meccanica delle onde (Boudouresque et Meinesz, 1982; Maervivo, 2001; Manca et al., 2009; INTERREG IIIC Beachmed- e, sottoprogetto NAUSICAA).

La banquette è strutturata da alternanze di ammassi compatti di resti fogliari con variabile contenuto in sabbia intercalati da lenti e livelli sabbiosi.



Figura 21 - Banquette invernale.



Figura 22- intercalazioni sabbiose in banquette invernale.

Accumuli di Posidonia sono stati localizzati nelle aree perilagunari della spiaggia e sul sistema dunale. Questi depositi sono caratterizzati dalla mancanza della tipica struttura coerente della banquette; Si tratta dei depositi antropici messi in posto in fase di pulizia della spiaggia.



Figura 23 - Accumuli antropici di posidonia, stoccati nel retrospiaggia di Cala Brandinchi.



Figura 24 - Accumuli di posidonia nello stagno retrostante la spiaggia di Cala Brandinchi.



Figura 25- tracce dei mezzi pesanti utilizzati per la rimozione e lo stoccaggio della posidonia.



Figura 26- Impatto causato dai veicoli sulla spiaggia; Sforzi verticali e orizzontali di taglio applicati sulla superficie attraverso gli pneumatici.

Accumuli antropici di posidonia Maggio 2018

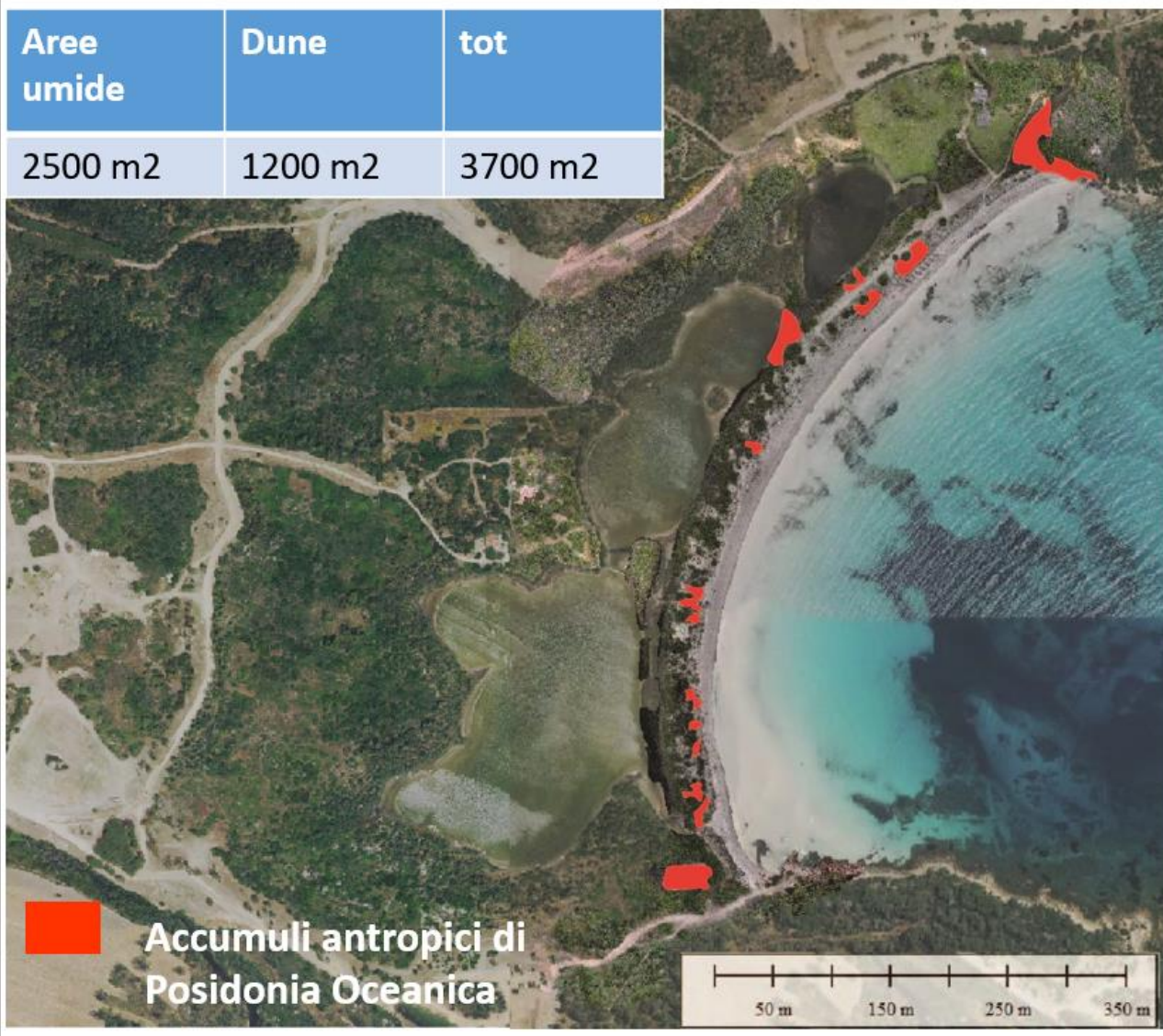


Figura 27 - Distribuzione degli accumuli antropici di Posidonia nella spiaggia di Cala Brandinchi.

Rilievi aerofotogrammetrici con drone

Con lo scopo di acquisire i dati necessari per l'analisi della distribuzione, delle caratteristiche, la rappresentazione cartografica e la formulazione delle ipotesi evolutive relative alle Banquette si è scelto di eseguire un rilievo aerofotogrammetrico di dettaglio attraverso l'utilizzo di un sistema aereo a pilotaggio remoto (S.A.P.R.).

Lo scopo principale è stato quello di acquisire i dati per l'elaborazione e la restituzione del modello digitale del terreno (DTM) e le ortofoto zenitali dell'intero sistema di spiaggia.

Strumentazione

Il drone utilizzato è un DJI Phantom 4, un multicottero a quattro eliche che pesa un chilo e quattrocento grammi e trasporta una fotocamera da 12 Mpixel ed ottica grandangolare. Il drone è alimentato da una batteria al litio con una durata di circa 25 minuti. Il SAPR possiede un GPS integrato che permette di gestire

piani di volo prestabiliti. Nella tabella di seguito si riportano le caratteristiche tecniche del drone utilizzato per i rilievi.

Drone DJI Phantom 4	
Peso (batteria e eliche incluse)	1380 grammi
Velocità massima di salita	6 m/s (22 km/h) / Modalità Sport
Velocità massima di discesa	4 m/s (14 km/h) / Modalità Sport
Precisione di Volo	Verticale: +/- 10 cm (con sensori di posizione attivi) oppure +/-0.5 m Orizzontale: +/- 30 cm (con sensori di posizione attivi) oppure +/-1.5 m
Velocità massima	16 m/s (57,6 km/h)(modalità ATTI, assenza di vento)
Altitudine massima	6000 m
Temperatura di funzionamento	da 0 a 40°C
Modalità GPS	GPS/GLONASS
Camera 4k con slowmotion 1080p	
Sensore	1/2.3" da 12 Mpixels effettivi
Obiettivo	FOV 94° 20 mm (formato 35 mm) f/2.8, messa a fuoco a infinito
Range ISO	100-3200 (video) 100-1600 (foto)
Velocità otturatore	8s - 1/8000s
Dimensione massima immagine	4000 x 3000
Modalità Foto	- Scatto singolo - Scatto a raffica (3/5/7 scatti) - Auto Exposure Bracketing (AEB): 3/5 - Bracketed Frames a 0.7EV Bias - Intervallo di tempo (timelaps) - HDR
Formato file	- FAT32 (≤ 32 GB); exFAT (> 32 GB) - Foto JPEG, DNG (RAW)
Temperatura di funzionamento	da 0 a 40°C
Gimbal	
Controllo Gimbal	da -90° a +30°
Stabilizzazione	3-assi (beccheggio, rollio, imbardata)
Radicomando	
Frequenza di funzionamento	2.400 Ghz - 2.483 Ghz
Portata massima	3.5km in modalità CE, 5 km in modalità FCC
Temperatura di funzionamento	da 0° a 40°C
Batteria	6000 mAh LiPo 2S
Supporto per dispositivi mobili	Per tablet e smartphone
Potenza di trasmissione (EIRP)	- FCC: 23 dBm - CE: 17 dBm
Alimentazione	1,2 A - 7,4 V

Batteria Drone Intelligente	
Capacità	5350 mAh
Tensione	15.2 V
Tipo	LiPo 4S
Potenza	81,3 Wh
Peso	462 g
Massimo tempo di volo	circa 28 minuti
Temperatura di funzionamento	da -10° a 40°C
Potenza massima di caricamento	100 W

Per il rilievo dei punti di appoggio a terra (GCP) è stato utilizzato un GPS geodetico Leica 1200, operando con correzione differenziale RTK su base remota in modalità *rover*; i dati per la correzione sono stati trasmessi dall'antenna Italpos di Olbia. Lo strumento così configurato è in grado di effettuare acquisizioni plano-altimetriche con precisione strumentale centimetrica. Questo ha permesso di calibrare e georiferire con elevata precisione i fotogrammi e la restituzione delle ortofoto zenitali e del DTM.



Figura 28 - Ubicazione punti di scatto dei dati acquisiti da drone.

Le fasi principali per l'ottenimento del rilievo sono le seguenti:

- Pianificazione volo, mediante l'applicazione UgCS 3.3.438. L'applicazione permette di rilevare in modo completamente automatico una determinata area selezionata. Per ogni area sono stati fatti un rilievo con inclinazione della fotocamera di 90° e uno con inclinazione di 45°.
- Acquisizione dei punti di controllo (GCP).
- Elaborazione dei dati e restituzione dei risultati, attraverso il software Agisoft Photoscan.

Le fasi principali dell'elaborazione sono le seguenti:

- Allineamento delle immagini

Le immagini vengono quindi disposte automaticamente nella posizione giusta in un ambiente georiferito.

Il risultato dell'allineamento è una nuvola di punti tridimensionale a scarsa densità: la nuvola sparsa.

ACQUISIZIONE

Il rilievo del sistema di spiaggia di Cala Brandinchi ha interessato una superficie di circa 7 Ha, in fase di pianificazione dei voli, le aree sono state leggermente estese al fine di includere le immediate pertinenze per una estensione globalmente rilevata e restituita pari ad oltre 10.4 Ha. In figura seguente è riportata la posizione e l'estensione dell'area rilevata.

In particolare è stato seguito il seguente Protocollo metodologico di rilevamento:

- rilevamento e campionamento dei depositi a *Posidonia oceanica* in Berma vegetale (**BV**) e delle sabbie di spiaggia in Berma ordinaria (**BO**)
- rilievo della distribuzione, caratteristiche morfologiche, stratigrafiche e degli spessori dei depositi a *Posidonia oceanica* spiaggiata.
- Identificazione e rilevamento delle aree di retro spiaggia ove predisporre depositi temporanei; rilievo topografico di dettaglio mediante GPS geodetico;
- Processing dei dati plano altimetrici e restituzione della carta topografica di dettaglio e della carta degli isospessori; computo dei volumi dei depositi a *Posidonia oceanica*; campionamento dei depositi superficiali in area di spiaggia e di retro spiaggia.

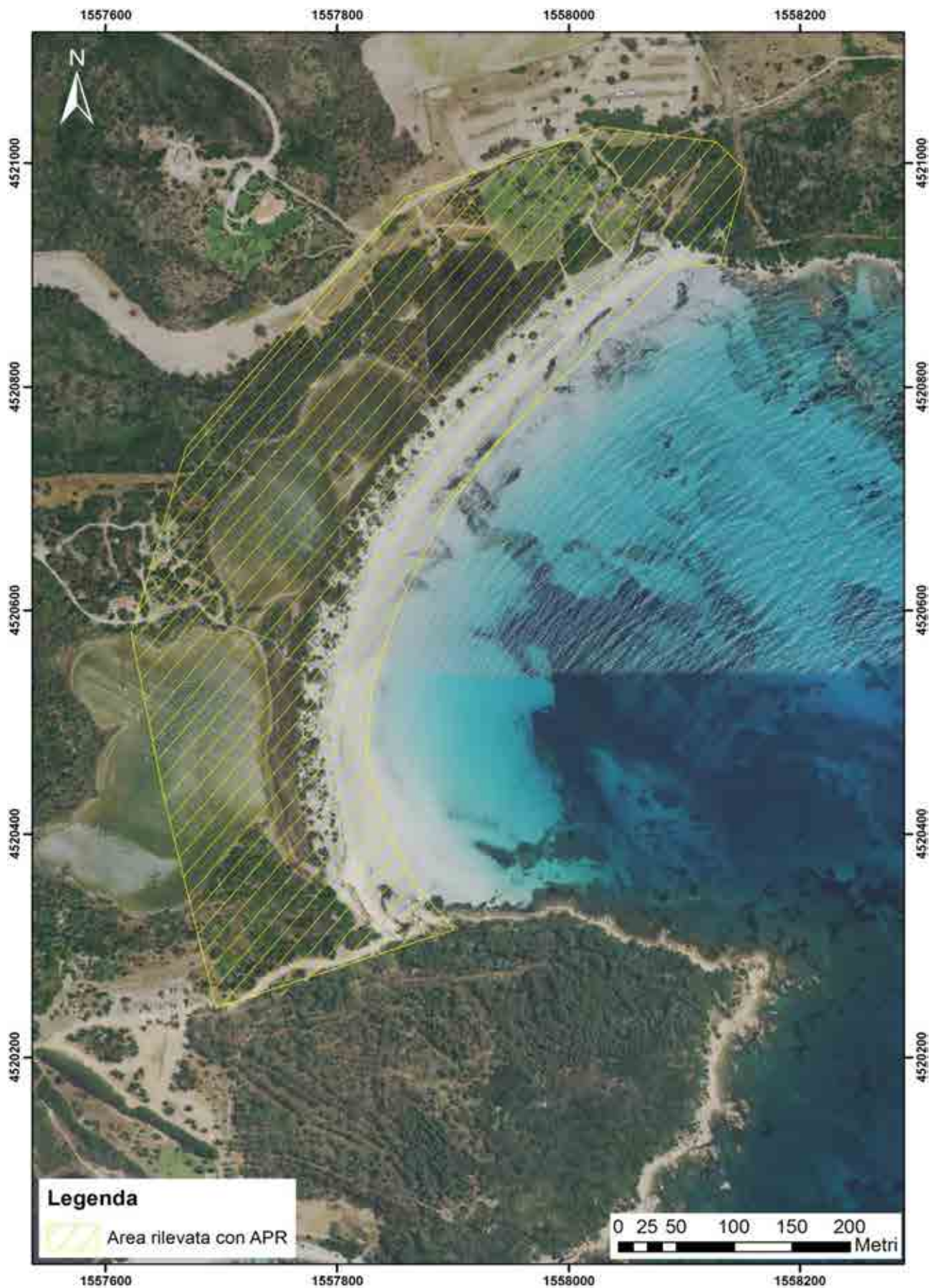


Figura 29 – Orfoto RAS 2016 – in evidenza l'area interessata dal rilievo con APR.

Sono state realizzate 2 missioni di volo, ognuna delle quali eseguite mediante un piano delle rotte circa parallele alla linea di riva. Ogni volo è stato realizzato ad una quota nominale pari a circa 50 m agl (above ground level = quota rispetto al suolo) cui corrisponde un GSD (ground sample distance – dimensione nominale del pixel a terra) pari a circa 2 cm ed una impronta nominale della singola foto di circa 80 x 60 m. L'obiettivo della fotocamera è un FOV 94° 20 mm (formato 35 mm) f/2.8, messa a fuoco a infinito. Al fine di fornire ridondanza e migliorare la qualità della restituzione, la sovrapposizione longitudinale e trasversale tra le fotografie è stata impostata ad un valore pari rispettivamente al 80% (foto lungo la stessa strisciata) e 65% (foto tra strisciate adiacenti) cui corrisponde un interasse tra le foto rispettivamente pari a circa 12 m per un totale di circa 459 immagini globalmente acquisite durante i due voli.

La pianificazione delle missioni di volo è stata fatta attraverso il software UgCS 3.3.438 (figura seguente); lo stesso software è stato utilizzato per il controllo e l'esecuzione automatica delle missioni di acquisizione dei dati durante il rilievo.



Figura 30 – Pianificazione del volo attraverso l'utilizzo del software UgCS 3.3.438.

SISTEMA DI COORDINATE DI RIFERIMENTO

Il sistema di riferimento delle coordinate adottato in fase di rilievo e restituzione è stato ETRF2000, in proiezione UTM Fuso 32. Le quote sono state convertite da ellissoidiche ETRF2000 ad ortometriche mediante modello geoidico Italgeo 2005 (riconosciuto come livello medio del mare) fornito dall'IGM.

GEOREFERENZIAZIONE

La georeferenziazione del blocco fotogrammetrico è stata eseguita ubicando, in posizioni opportune, un numero congruo di GCP (Ground Control Point) in forma di bersagli rilevabili dalla fotocamera del drone, le

cui coordinate sono state rilevate tramite misure a terra con ricevitore GPS differenziale (Leica 1200) in doppia frequenza e correzione da VRS (Virtual Reference Station), con un errore di posizionamento pari a circa $1\div 2$ cm. La figura seguente mostra un esempio di posa e misura del bersaglio di controllo a terra.



Figura 31 – Target con funzione di GCP.



Figura 32 - Posizione dei bersagli con funzione di GCP.

POST-ELABORAZIONE E RESTITUZIONE

Il rilievo aereo è stato restituito tridimensionalmente attraverso apposito software di elaborazione fotogrammetrica, tramite il quale si è proceduto alla ricostruzione dell'orientamento delle prese fotografiche al momento dell'acquisizione, alla correzione delle distorsioni introdotte dal sistema obiettivo/sensore ed alla generazione delle coordinate 3D dei punti omologhi visibili contemporaneamente su più fotografie (principio stereoscopico), per un totale di circa 12 milioni di punti restituiti su tutta l'area.

La seguente immagine mostra una fase della ricostruzione del blocco fotogrammetrico composto dall'insieme delle fotografie orientate, tratto da una schermata del software di post-produzione:

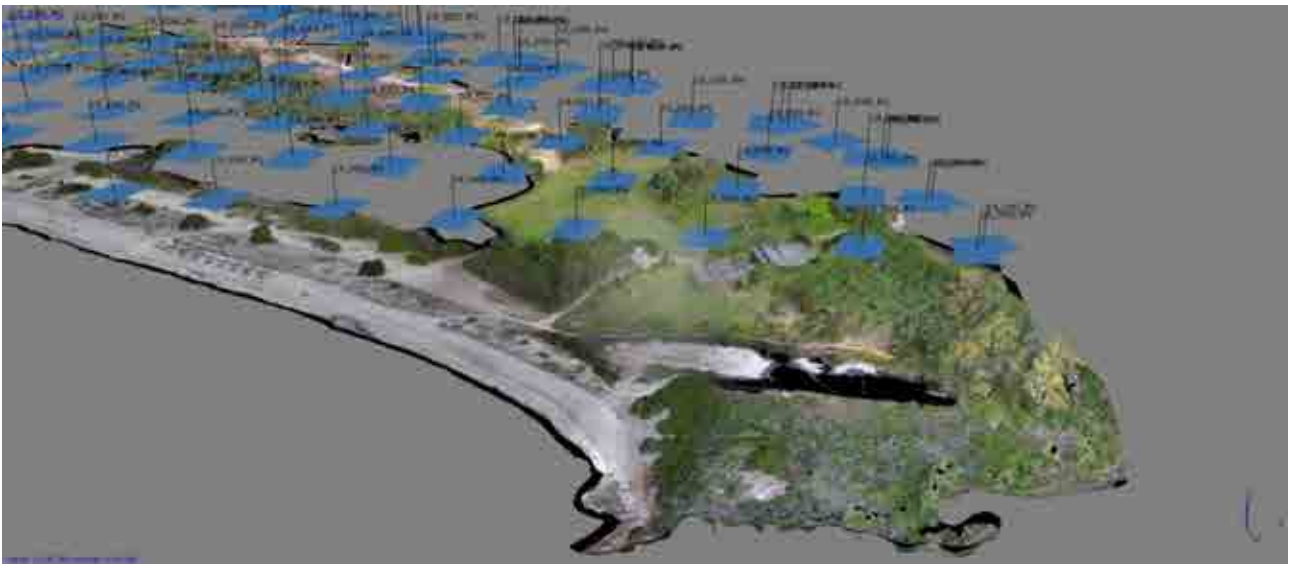


Figura 33 - Orientamento delle immagini nel software di post-processing.

La nuvola densa di punti prodotta dal software di elaborazione dei dati corrisponde ad un modello digitale di superficie (DSM) in grado di rappresentare con elevata accuratezza le aree rilevate. La nuvola è stata quindi sottoposta all'applicazione in sequenza di una serie di filtri morfologici, che hanno consentito la rimozione della vegetazione e degli oggetti fuori terra al fine di ottenere il modello digitale del terreno (DTM).

Il modello così ottenuto è stato infine sottoposto ad operazioni di meshatura ad elementi triangolari irregolari (TIN) e texturizzazione per la creazione del modello 3D fotorealistico su tutta l'area e all'estrazione di:

- Modello digitale di superficie così come nativamente creato dal modello fotogrammetrico, caratterizzato da un GSD (Ground Sample Distance = dimensione nominale del pixel a terra) pari a 5 cm, in formato matrice .tif georeferenziata;

- Modello digitale del terreno, caratterizzato da un GSD (Ground Sample Distance = dimensione nominale del pixel a terra) pari a 1 cm, in formato matrice .tif georeferenziata;
- Ortofoto della spiaggia di Cala Brandinchi in formato .ecw georeferenziati, caratterizzati da un GSD (Ground Sample Distance = dimensione nominale del pixel a terra) pari a 3 cm;
- Carta a curve di livello con equidistanzappari a 0.2 m in formato vettoriale gestibile in ambiente CAD e GIS.

La seguente immagine mostra un esempio di restituzione tipica con curve di livello e ortofoto sovrapposte:

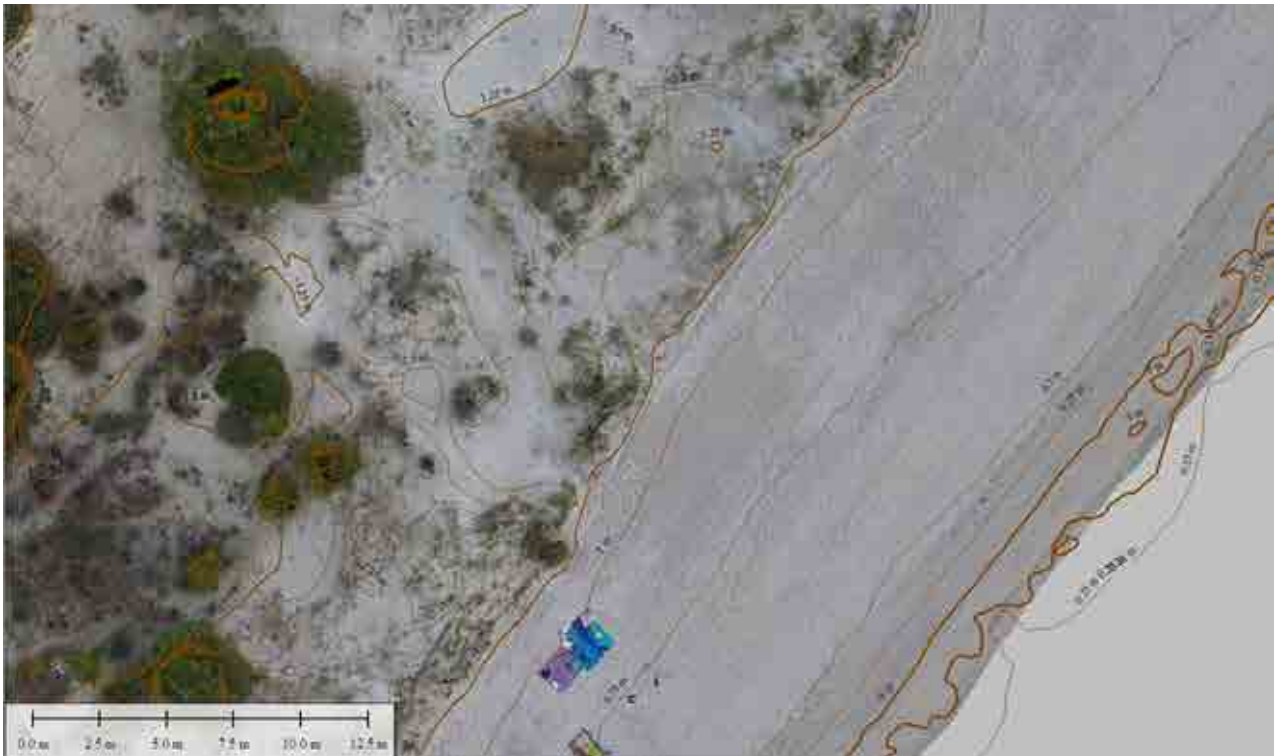


Figura 34 – Ortofoto con sovrapposizione delle curve di livello.

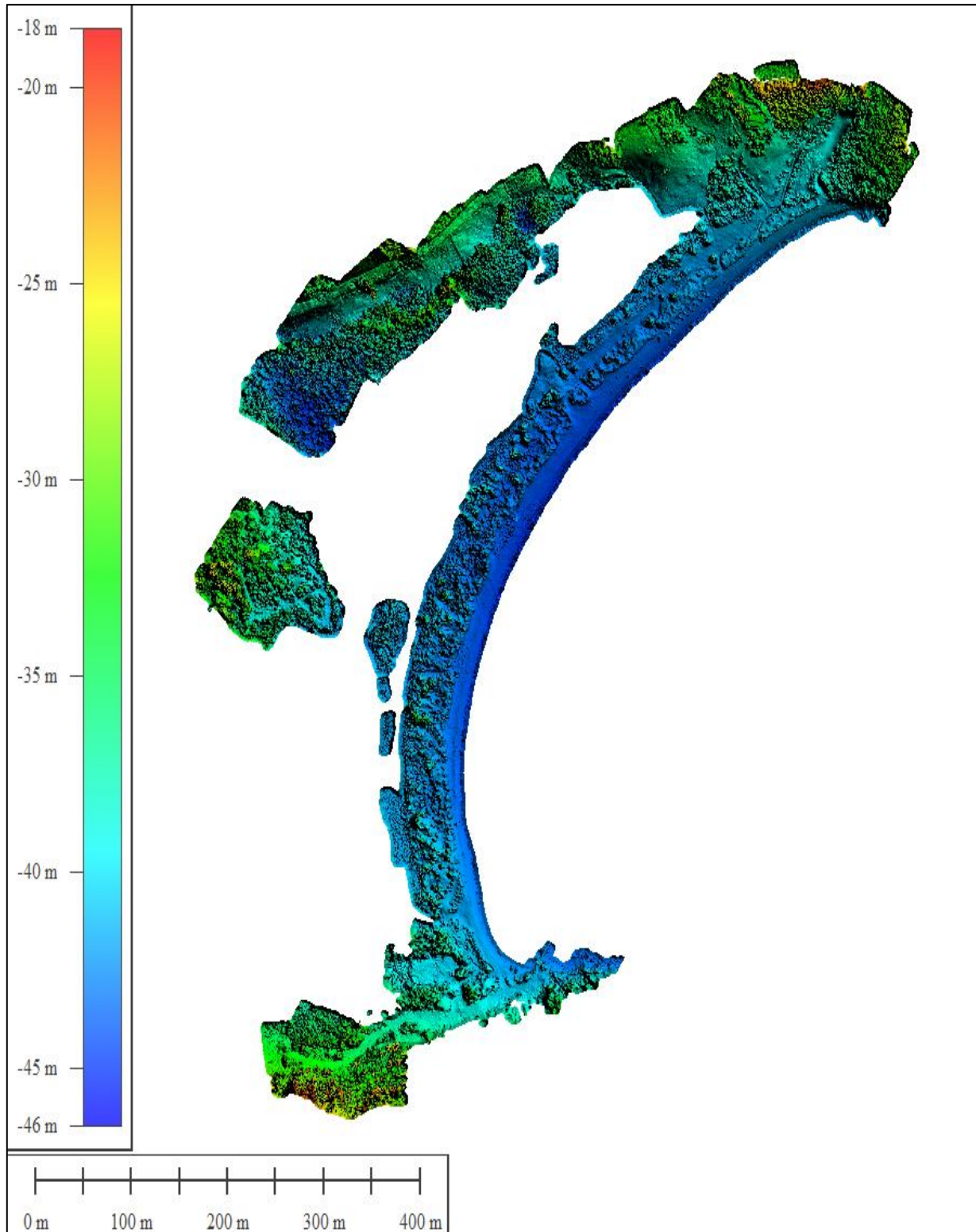


Figura 35 - Digital Elevation Model (DEM) Cala Brandinchi

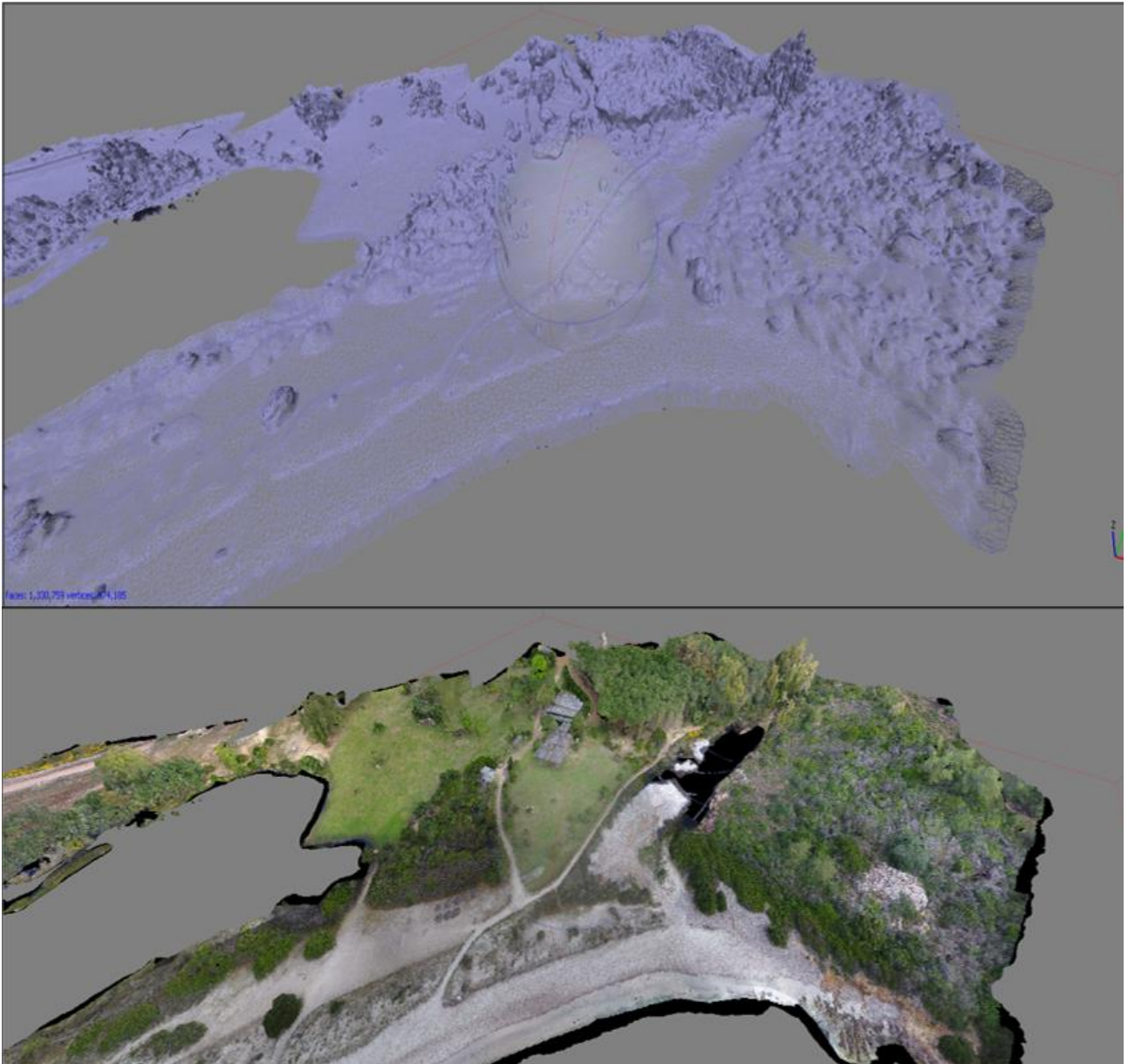


Figura 36 - Particolare delle elaborazioni dei dati fotogrammetrici.

Campionamento dei sedimenti superficiali

Contestualmente all'esecuzione dei rilievi geomorfologici è stato eseguito il campionamento dei sedimenti superficiali di spiaggia con lo scopo di effettuare la caratterizzazione granulometrica.

Sono stati prelevati campioni di sabbia sul posto, per ogni campione si è prelevato un quantitativo di sabbia tale da riempire dei sacchi da circa 10 l di volume. I campioni prelevati sono stati denominati:

C₂= Campione prelevato dalla spiaggia "Cala Brandinchi" (San Teodoro)

C₃=Campione prelevato dalla spiaggia "Porto Taverna" (Porto San Paolo)

C_{la cinta}= Campione prelevato dalla spiaggia "La Cinta" (San Teodoro).

Su questi campioni sono state effettuate prove di: analisi granulometrica, determinazione del peso specifico dei grani e determinazione della permeabilità. Sono stati prelevati, inoltre, dalla spiaggia "La Cinta" (San Teodoro) dei campioni costituiti da porzioni di "banquette" di posidonia oceanica dai quali è stato determinato il quantitativo percentuale di sabbia presente nel campione. I due campioni sono stati prelevati rispettivamente dalla parte bassa e alta del litorale, e sono stati denominati: "C. La Cinta _{basso}" e "C. La Cinta _{alto}". superficiale e 3 di Posidonia dalla Banquette.

In totale sono stati prelevati 6 campioni significativi nella spiaggia emersa, 3 campioni di sabbia superficiale e 3 di Posidonia dalla Banquette.

Sigla campione	Coordinate (UTM – WGS 84)		Spiaggia	Tipologia
	X	Y		
C4	555108.128	4523283.745	Porto Taverna	Campione di sabbia
C1	558041.510	4520896.423	Cala Brandinchi	Campione di Posidonia
C2	557775.156	4520408.079	Cala Brandinchi	Campione di sabbia
C-La Cinta	556832.782	4514777.875	La Cinta	Campione di sabbia
La Cinta alto	556871.398	4514741.944	La Cinta	Posidonia in Parte alta banquette
La Cinta basso	556877.042	4514741.266	La Cinta	Posidonia in Parte bassa banquette



Figura 37 - Punto di campionamento spiaggia di Porto Taverna. Rosso-Campione di Sabbia; Giallo-Campione di posidonia.



Figura 38 - Punto di campionamento spiaggia di Cala Brandinchi. Rosso-Campione di Sabbia; Giallo-Campione di posidonia.

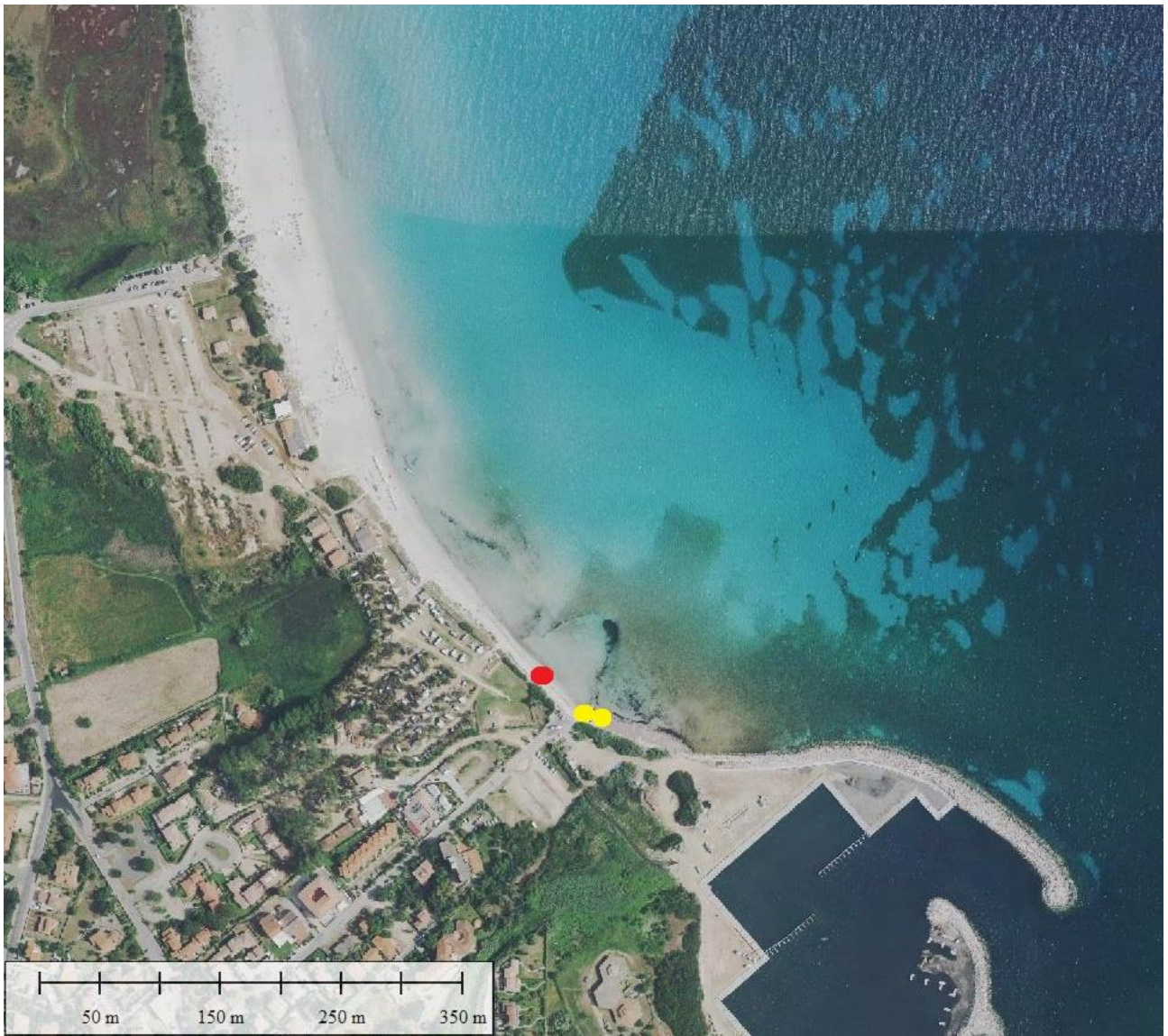


Figura 39 - Punto di campionamento spiaggia La Cinta. Rosso-Campione di Sabbia; Giallo-Campione di posidonia.

Analisi di laboratorio

Analisi granulometriche

L'attività analitica per la determinazione delle caratteristiche tessiturali è consistita in tre diverse fasi:

Fase 1: preparazione e pretrattamento.

Ogni campione (del peso di circa 200 gr.) è stato trattato con una soluzione di perossido di idrogeno (30%) ed acqua distillata in proporzione 1:4, per 48 ore a temperatura ambiente. I campioni sono stati poi lavati con acqua distillata per due volte, al fine di rimuovere i sali presenti ed essiccati in stufa per 24 ore alla temperatura di 100° C.

Fase 2: separazione della frazione sabbiosa da quella pelitica.

Dopo gli opportuni pretrattamenti e la determinazione del peso totale, ciascun campione è stato separato ad umido in due frazioni granulometriche mediante un setaccio con vuoto di maglia da 63 µm. La frazione grossolana (>63 µm) e quella fine (<63 µm) sono state poste in appositi contenitori, essiccate in stufa per 24 ore alla temperatura di 100° C e successivamente pesate.

Fase 3: analisi delle frazioni ottenute.

La frazione maggiore di 63 µm è stata vagliata per 12 minuti con una pila di setacci della serie ASTM (American Society for Testing and Materials) con maglie di dimensioni variabili da 5600 a 63 µm, intervallati di 1/2 Φ (Φ = -log₂ d; dove d è il diametro di ogni singola particella espresso in mm); infine si è proceduto alla determinazione del peso trattenuto entro ciascun setaccio.

Tabella 1 - Formule statistiche utilizzate dall'applicativo "Gradistat" per la determinazione delle caratteristiche granulometriche dei campioni di sedimento analizzati.

(d) Logarithmic (original) Folk and Ward (1957) graphical measures					
Mean	Standard deviation		Skewness		Kurtosis
$M_z = \frac{\phi_{16} + \phi_{50} + \phi_{84}}{3}$	$\sigma_I = \frac{\phi_{84} - \phi_{16}}{4} + \frac{\phi_{95} - \phi_5}{6.6}$		$Sk_I = \frac{\phi_{16} + \phi_{84} - 2\phi_{50}}{2(\phi_{84} - \phi_{16})} + \frac{\phi_5 + \phi_{95} - 2\phi_{50}}{2(\phi_{95} - \phi_5)}$		$K_G = \frac{\phi_{95} - \phi_5}{2.44(\phi_{75} - \phi_{25})}$
Sorting (σ_1)		Skewness (Sk_1)		Kurtosis (K_G)	
Very well sorted	<0.35	Very fine skewed	+0.3 to +1.0	Very platykurtic	<0.67
Well sorted	0.35-0.50	Fine skewed	+0.1 to +0.3	Platykurtic	0.67-0.90
Moderately well sorted	0.50-0.70	Symmetrical	+0.1 to -0.1	Mesokurtic	0.90-1.11
Moderately sorted	0.70-1.00	Coarse skewed	-0.1 to -0.3	Leptokurtic	1.11-1.50
Poorly sorted	1.00-2.00	Very coarse skewed	-0.3 to -1.0	Very leptokurtic	1.50-3.00
Very poorly sorted	2.00-4.00			Extremely leptokurtic	>3.00
Extremely poorly sorted	>4.00				

I parametri statistici previsti nella metodologia di Folk e Ward (1957) sono stati ricavati mediante l'utilizzo dell'applicativo Gradistat per Microsoft Excel (Tabella 2).

Si fornisce di seguito una breve descrizione dei parametri statistici considerati:

Diametro medio: è una media della dimensione dei granuli che costituiscono il campione in esame;

Mediana o d50: è la dimensione delle particelle al centro della distribuzione, ovvero il diametro corrispondente al 50 % della curva cumulativa;

Tabella 2 - Comparazione tra scala granulometrica utilizzata dal programma Gradistat e classificazioni di Udden (1914) e Wentworth (1922) e Friedman (1978) e Sanders (1978) (da Blott & Pye, 2001).

Grain size		Descriptive terminology		
phi	mm/ μ m	Udden (1914) and Wentworth (1922)	Friedman and Sanders (1978)	GRADISTAT program
-11	2048 mm		Very large boulders	
-10	1024		Large boulders	Very large
-9	512	Cobbles	Medium boulders	Large
-8	256		Small boulders	Medium
-7	128		Large cobbles	Small
-6	64		Small cobbles	Very small
-5	32			Very coarse pebbles
-4	16	Pebbles	Coarse pebbles	Coarse
-3	8		Medium pebbles	Medium
-2	4		Fine pebbles	Fine
-1	2	Granules	Very fine pebbles	Very fine
0	1	Very coarse sand	Very coarse sand	Very coarse
1	500 μ m	Coarse sand	Coarse sand	Coarse
2		Medium sand	Medium sand	Medium
3		Fine sand	Fine sand	Fine
4		Very fine sand	Very fine sand	Very fine
5	31		Very coarse silt	Very coarse
6	16	Silt	Coarse silt	Coarse
7	8		Medium silt	Medium
8	4		Fine silt	Fine
9	2		Very fine silt	Very fine
		Clay	Clay	Clay

Moda: è il diametro particellare più frequente, indicato dal punto più ripido della curva cumulativa o dal punto più alto della curva di frequenza;

Deviazione standard o classazione o sorting (σ_1): è la diffusione della distribuzione intorno alla media, indica cioè quanto la distribuzione granulometrica differisce dal valore del diametro medio; è indipendente dalla grana media ed indica, in generale, il grado di elaborazione a cui è stato sottoposto un sedimento. La classazione esprime la capacità selettiva del mezzo di trasporto, cioè la sua capacità di prelevare e/o depositare i granuli: abbandonando quelli più grossolani e prendendo in carico quelli più sottili. I sedimenti eolici e di spiaggia, ad esempio, sono tra i più classati in natura (Bosellini et al., 1989; Ricci Lucchi, 1980);

Skewness o asimmetria: evidenzia l'omogeneità della popolazione granulometrica, cioè se i valori sono distribuiti equamente da una parte all'altra della posizione centrale, o baricentro della curva. Essa ha un segno positivo (+) se la curva ha una coda verso diametri sottili e un segno negativo (-) se la curva ha una coda verso diametri grossolani; una curva perfettamente simmetrica è definita con asimmetria zero. L'asimmetria è dovuta ad aggiunte o sottrazioni di materiale nelle code della curva granulometrica originaria. Ad esempio nelle sabbie di fiume e di duna l'asimmetria è generalmente positiva (coda di materiale fine) infatti, i due mezzi di trasporto (il fiume e il vento) sono in grado di trasportare sedimenti molto sottili ma non sedimenti grossolani; mentre nelle sabbie di spiaggia l'asimmetria è generalmente negativa (coda di materiale grossolano) per l'allontanamento delle frazioni sottili da parte del moto ondoso (Bosellini et al., 1989; Ricci Lucchi, 1980).

Kurtosis: è la misura dell'appuntimento della distribuzione di frequenza e considera il rapporto tra la dispersione nella parte centrale e la dispersione nelle code; si distingue una distribuzione leptocurtica ("appuntimento" della curva di frequenza) da una distribuzione platicurtica (dispersione su tutta la curva di frequenza).

I campioni sono stati suddivisi in classi granulometriche secondo la scala di Wentworth (1922), i cui limiti di classe sono espressi in Φ ($\Phi = -\log_2$ del rapporto: diametro dei granuli espresso in mm/ diametro unitario di 1 mm), secondo la scala proposta da Krumbein (1934). La distinzione delle principali classi dimensionali (ghiaia, sabbia, silt e argilla) è stata utilizzata per la classificazione dei sedimenti secondo il diagramma triangolare di Shepard.

Le analisi granulometriche sono state effettuate su un totale di 9 campioni di sedimento.



Figura 40: Esecuzione della setacciatura dei campioni.

Peso specifico dei grani.

Per peso specifico dei grani di una terra s'intende il rapporto tra il peso dei grani ed il loro volume, comprensivo degli eventuali pori esistenti nell'interno dei grani o non saturabili in acqua.

Per la determinazione del peso specifico dei grani, viene inserito all'interno di un picnometro di volume pari a 100 ml una quantità nota (50 g) di materiale secco, riempito per metà di acqua distillata e precedentemente disareata, riposto sotto vuoto per il tempo necessario ad espellere tutti i gas. Dopodiché si procede a riempire il picnometro esattamente fino al segno riportato sul collo e a pesare il tutto con una precisione di 0.01 g. Viene poi ripetuta la pesata del picnometro pieno solo di acqua distillata fino alla tacca riportata sul collo e, per differenza, si ricava il volume spostato dalle particelle solide. Da questi dati è possibile ricavare il peso specifico delle particelle solide attraverso la formula:

$$\gamma_d = \frac{\gamma_w \cdot (P_2 - P_1)}{[P_4 + (P_2 - P_1)] - P_3}$$

γ_w = Peso specifico dell'acqua

P1 = Peso picnometro vuoto con tappo

P2 = Peso picnometro con tappo + campione

P3 = Peso picnometro con tappo + campione + acqua

P4 = Peso picnometro con tappo + acqua



Figura 41: Pesata del picnometro.

Prove di Permeabilità.

La permeabilità rappresenta la misura della velocità con la quale un fluido attraversa un mezzo poroso. La tipologia di prova eseguita in laboratorio viene definita a carico costante.



Figura 42: Preparazione della fustella per prova di permeabilità.

È stato calcolato il volume della fustella effettuando manualmente le misure e applicando la seguente formula:

$$V = (\pi r^2 h)$$

Dove "r" rappresenta il raggio della fustella e "h" l'altezza.

Le prove sono state eseguite a vari stati di addensamento del campione: add-Base: riempiendo la fustella con il minor quantitativo di sabbia. Per ottenere il medesimo addensamento per ogni prova relativa allo stesso campione si è inserito nella fustella un quantitativo di campione tale da avere lo stesso peso in ogni prova effettuata.

Addensamento per carico statico

È stata utilizzata una pressa collegata a un anello dinamometrico attraverso il quale è stato possibile quantificare il carico applicato.



Figura 43: Applicazione del carico statico sul campione.

Come osservabile dall' immagine è stato posto un disco al di sopra del campione per poter ottenere una distribuzione omogenea del carico.

L' addensamento viene eseguito per strati, ogni strato è costituito da un terzo del peso di campione utilizzato per la prova con addensamento base, quindi ogni strato viene compattato dalla macchina all' interno della fustella fino ad arrivare ad una compattazione.

Le prove, quindi, sono state eseguite su due gradini di carico, di 45 Kg e 90 Kg.

L'addensamento con il carico di 90 Kg è stato effettuato sia allo stato secco dei vari campioni che allo stato umido. Il processo di umidificazione è stato effettuato portando a saturazione il campione all' interno di una fustella ed eliminando l'acqua in eccesso per gravità.

In seguito è stata calcolata la percentuale in peso di acqua presente nel campione.

Addensamento per vibrazione

L'addensamento per vibrazione è stato eseguito mediante lo stesso macchinario utilizzato per la vibratura dei setacci durante l'analisi granulometrica.

È stato utilizzato un filtro posto alla base della fustella in modo tale che la dispersione del campione durante la vibrazione fosse nulla.

Inoltre è stato montato un "collare" alla fustella in modo tale da poter inserire un quantitativo di campione maggiore, sono stati infatti inseriti 1500 grammi di campione per ogni prova, al di sopra del quale si è posto un tappo per non far fuoriuscire il campione ed un peso che permettesse di fissare la fustella al setacciatore come visibile dalla figura 20.



Figura 44: diverse fasi dell' addensamento per vibrazione, Preparazione della fustella(prima immagine) e esecuzione della vibrazione(seconda immagine)

Esecuzione della prova

Una volta preparato e pesato il campione andrà inserito all'interno della fustella sistemando adeguatamente le piastre di base e di testa e il disco filtrante.

Si riempirà quindi il serbatoio dell'autoclave con acqua disareata e si collegherà la fustella contenente il campione al sistema di tubi del permeametro. Una volta eseguite queste procedure ed accorgimenti si potrà procedere all'esecuzione della prova provvedendo alla saturazione del campione e successivamente, utilizzando un cronometro, prendere nota del tempo impiegato a colmare un dato volume costituito dai cilindri graduati utilizzati, ottenendo così la velocità di riempimento.



Figura 45: Attrezzatura utilizzata per l'esecuzione delle prove di permeabilità.

Durante l'esecuzione della prova possono verificarsi eventi che potrebbero essere causa di errore:

- Carico idraulico troppo elevato

Questo parametro, nel caso di flusso ascendente può provocare fenomeni di sifonamento all'interno del campione, variazione del grado di addensamento e disturbo del materiale;

- Formazione di pellicola-filtro di materiale fine

Tale pellicola può formarsi nelle immediate vicinanze delle superfici libere del campione in seguito alla segregazione dei costituenti limosi della sabbia, durante la deposizione del materiale all'interno del

permeametro, oppure nel corso della prova per effetto della migrazione delle particelle più fini verso la base o la testa del provino;

- Flusso laterale tra campione e parete del permeametro
- Variazione di temperatura durante la prova

Un aumento della temperatura provoca una diminuzione della viscosità dinamica dell'acqua, comportando quindi un incremento della permeabilità misurata;

- Rigonfiamento nel caso di campioni coesivi.

Risultati

Analisi granulometriche

Nelle tabelle e nei grafici sono riportati tutti i dati relativi alle analisi granulometriche eseguite, quindi tabelle con percentuali in peso del trattenuto al relativo setaccio, determinazioni di coefficiente di uniformità e di curvatura, curva cumulativa che descrive il sedimento e degli istogrammi che descrivono la distribuzione della granulometria.

Inoltre nella tabella sotto riportata è stata fatta una sintesi generale riguardo i risultati delle analisi dei tre campioni.

Le caratteristiche granulometriche influiscono sulla portanza del sedimento.

Sabbie ben classate possiedono una portanza maggiore rispetto a sabbie assortite.

Granulometria			
Porto Taverna	Sabbia grossa	49%	Poco Classato
	Sabbia media	19,6%	
	Sabbia fine	6%	
	Sabbia molto fine	0,2%	
Cala Brandinchi	Sabbia grossa	0,1%	Molto ben Classato
	Sabbia media	8,4%	
	Sabbia fine	90%	
	Sabbia molto fine	1,6%	
La Cinta	Sabbia grossa	0,3%	Molto ben Classato
	Sabbia media	16,7%	
	Sabbia fine	82,7%	
	Sabbia molto fine	0,2%	

Peso Specifico dei grani.

Campione	$\gamma_d(g/cm^3)$
La Cinta	2,67
Porto Taverna	2,63
Cala Brandinchi	2,67

Analisi dei campioni di Banquette di Posidonia

I campioni di posidonia prelevati dalla banquette sono stati analizzati in laboratorio con lo scopo di identificare la percentuale di sabbia in essi contenuta.



Figura 46 - Posidonia campionata da Banquette.

Le analisi sono state effettuate su un totale di 3 campioni significativi dei depositi a resti fogliari spiaggiati (Banquette) nella fascia compresa tra la battigia e la Berma ordinaria delle due spiagge di La Cinta e di Cala Brandinchi. Nella spiaggia di porto taverna non sono stati rinvenute Banquette ben strutturate.

Cala Brandinchi (Banquette inverno 2018)	44 % Sabbia
La Cinta (Banquette di neoformazione estiva)	6,6 % Sabbia
La Cinta (Banquette inverno 2018)	75,5 % Sabbia

Tabella 3 - Contenuto in peso di sabbia nella Banquette.

I risultati delle prove la permeabilità delle sabbie, decresce sensibilmente all'incremento del carico statico, ma diminuisce in maniera molto evidente riducendosi a circa la metà nel caso il carico venga applicato con contemporanea vibrazione (rendendo quindi la spiaggia più erodibile), condizione che è propria della pressione applicata sulle sabbie da un mezzo meccanico.

Prove di permeabilità

Nelle tabelle sotto riportate sono evidenziati, per ogni campione, il coefficiente di permeabilità(k), peso del campione utilizzato per la prova, il peso specifico dei grani, calcolato in precedenza, la densità apparente ottenuta dividendo il peso del campione per il volume della fustella, la percentuale di porosità e infine il contenuto percentuale di acqua per quanto riguarda gli addensamenti dei campioni effettuati allo stato umido. Per le prove di permeabilità in laboratorio sono state utilizzate fustelle con diametro della pari a 105 mm e area di 164,85 cm² su cui sono stati applicati carichi di 45 kg e 90 kg che corrispondono rispettivamente al carico unitario di 0,28 kg/cm² e 0,56 kg/cm² ; questi carichi possono simulate la pressione esercita sulla sabbia da un **piccolo trattore di circa 2000 kg che scarica 0, 25 kg/cm²** per ruota e un **trattore medio dal peso di 4300 Kg che scarica a terra 0,55 kg/cm²** per ruota.

Carico applicato	Sedimento di Porto Taverna	Sedimento di Cala Brandinchi	Sedimento di La Cinta
0 kg/cm ²	8,93 mm/s	9,23 mm/s	8,48 mm/s
0,28 kg/cm ²	8,87 mm/s	7,60 mm/s	7,26 mm/s
0,56 kg/cm ²	8,40 mm/s	7,09 mm/s	6,65 mm/s
0,56 kg/cm ²	8,87 mm/s	7,09 mm/s	6,65 mm/s
Saturo			

0, 28 kg/cm ² Vibrante	7, 98 mm/s	5,70 mm/s	5,80 mm/s
0, 56 kg/cm ² Vibrante	6,50 mm/s	4, 85 mm/s	4,89 mm/s

Figura 47 - Valori di permeabilità misurate in laboratorio per vari gradi di compattazione di umidità.

I risultati delle prove la permeabilità delle sabbie, decresce sensibilmente all'incremento del carico statico, ma diminuisce in maniera molto evidente riducendosi a circa la metà nel caso il carico venga applicato con contemporanea vibrazione (rendendo quindi la spiaggia più erodibile), condizione che è propria della pressione applicata sulle sabbie da un mezzo meccanico.

Relazioni tra permeabilità e porosità per scalino di carico

Nei seguenti grafici sono stati messi in relazione i parametri di permeabilità e porosità per ogni prova effettuata su ogni campione.

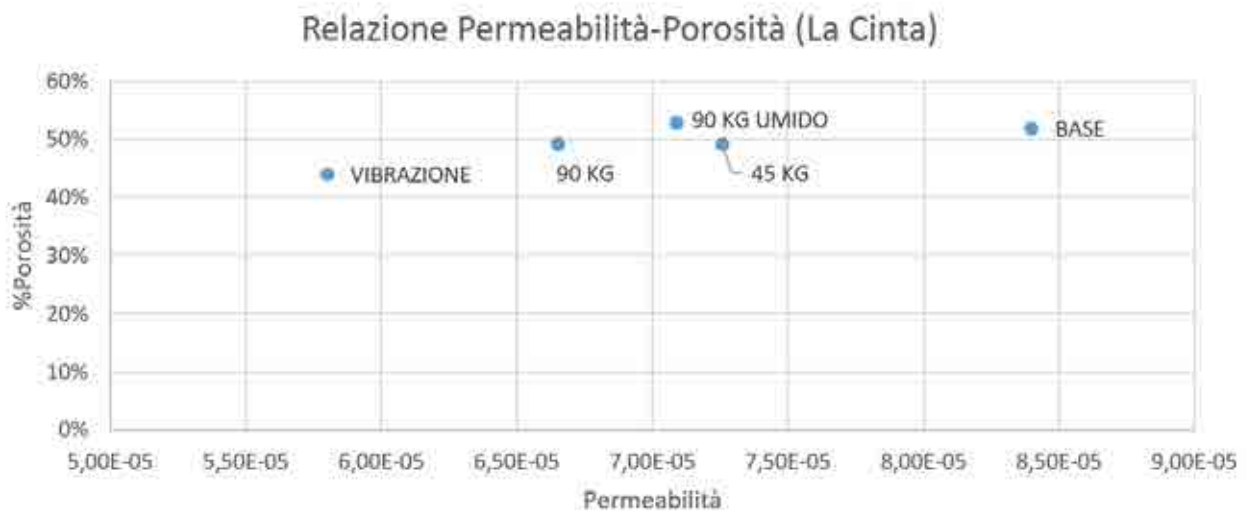


Figura 48 - Relazione Permeabilità-Porosità spiaggia La Cinta.

Relazione Permeabilità-Porosità (Cala brandinchi)

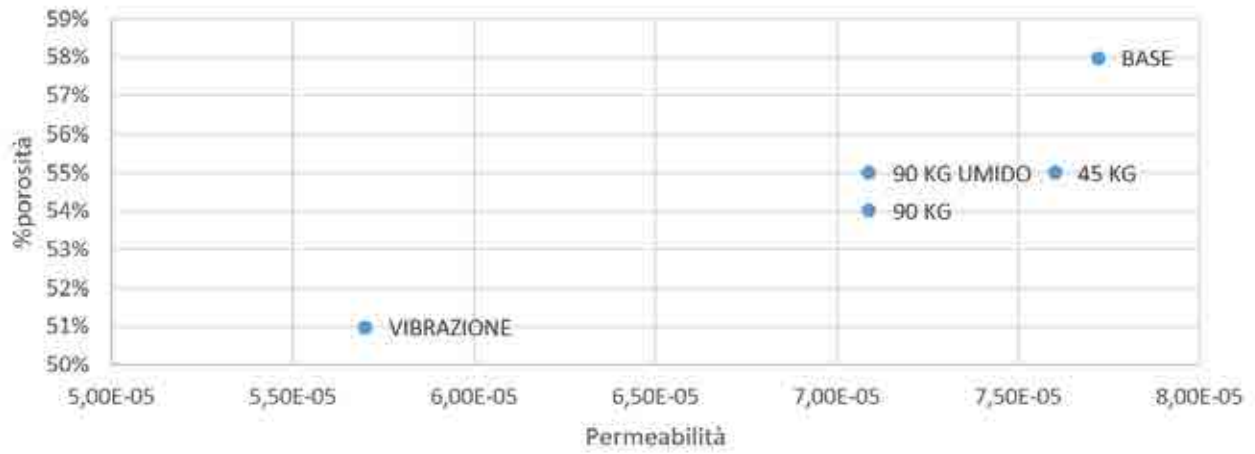


Figura 49 - Relazione Permeabilità-Porosità spiaggia Cala Brandinchi.

Relazione Permeabilità-Porosità (Porto Taverna)

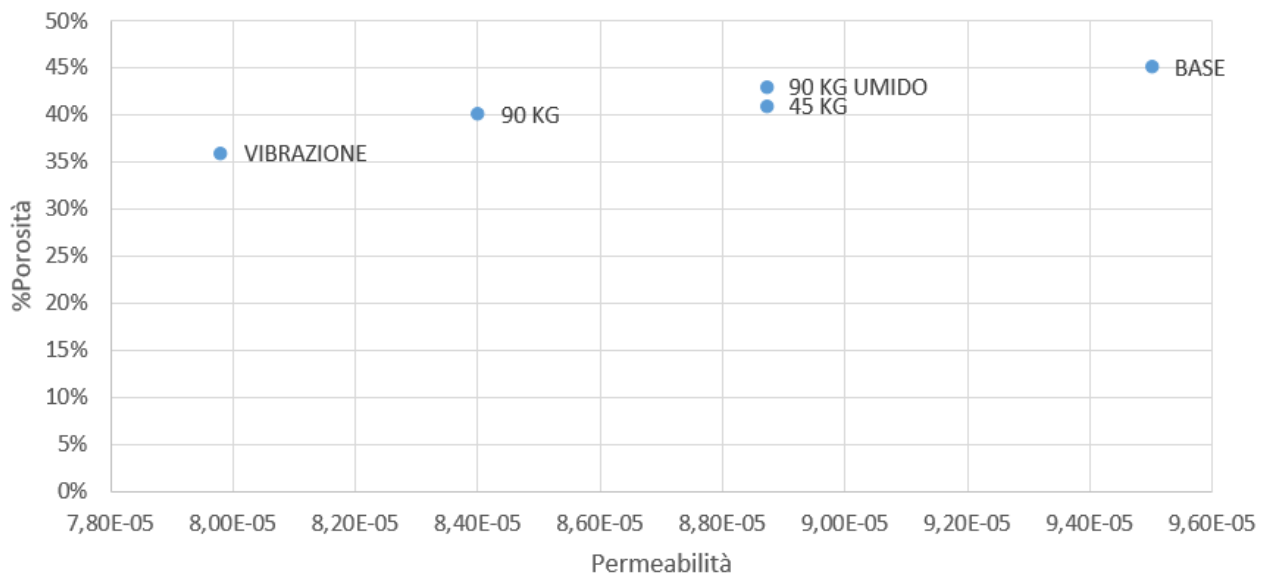


Figura 50 - Relazione Permeabilità-Porosità spiaggia Porto Taverna.

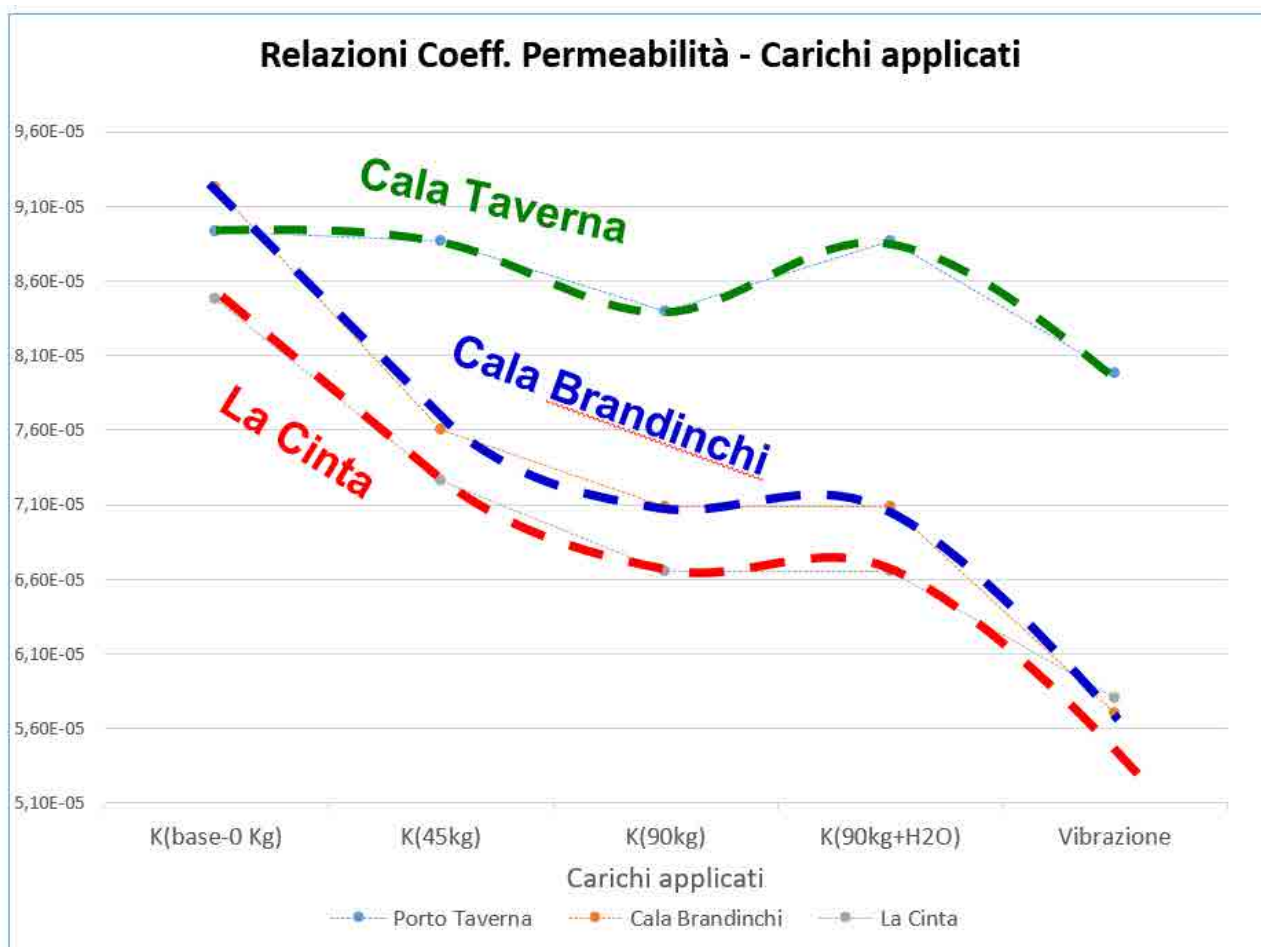


Figura 51 - Relazione tra coeff. di permeabilità e carichi applicati.

Discussioni e conclusioni

Per poter ottenere dei valori di permeabilità rappresentativi di terreni granulari in condizioni naturali il metodo migliore sarebbe quello di eseguire delle prove direttamente in situ, in quanto risulta essere difficoltoso mantenere in laboratorio l'addensamento proprio del deposito naturale. L'importanza delle prove in laboratorio in questo caso va ricercata nel fatto che è stato messo a confronto il comportamento dei terreni sottoponendoli a carichi e sforzi differenti.

Quindi oggetto della prossima fase di indagine sarà la realizzazione di carichi su piastra nella fascia di avanspiaggia dei 3 litorali esaminati, e permeabilità in situ attraverso prove di assorbimento volumetriche.

Le prove di laboratorio realizzate hanno dimostrato:

- 1) come i carichi influenzino la permeabilità nelle spiagge con sabbie fine ben classate (Brandinchi, Cinta), meno sensibili le sabbie medie e grosse eterometriche e poligeniche (Porto Taverna).
- 2) Come riduzione di permeabilità sia funzione del carico statico subisca una variazione particolarmente importante quando viene applicata anche una vibrazione.

Alla luce delle prove effettuate e dei risultati ottenuti viene messo in evidenza il fatto che il coefficiente di permeabilità proprio di ogni campione è fortemente condizionato da diversi parametri, quali la dimensione dei grani, il coefficiente di uniformità, lo stato di addensamento e la porosità.

Prove in situ

A causa della impossibilità di ottenere le autorizzazioni necessarie per entrare nelle spiagge di La Cinta e di Cala Brandinchi con un mezzo gommato di notevole peso (terna gommata del peso di 8.600 kg) che possa fungere da contrasto sono state eseguite le prove di carico su piastra unicamente nel sito di Porto Taverna, una spiaggia che per caratteri granulometrici ha presentato alle analisi di laboratorio (sabbie medie e grosse) una minore sensibilità alle sollecitazioni di carico; quindi se il carico su piastra documenterà un impatto significativo sulla riduzione di permeabilità ancor maggiore sarà l'impatto che i mezzi meccanici avranno sulle altre due spiagge a sabbie fini (La Cinta e Brandinchi).

Le indagini in situ sono state articolate nelle seguenti attività:

1. individuazione dei settori della spiaggia più idonei e rappresentativi dove effettuare le prove di permeabilità;
2. esecuzione di n° 28 prove di permeabilità a carico variabile in sito mediante l'uso di un infiltrometro ad anello singolo;

3. Esecuzione di n° 2 prove di carico su piastra

Prove di carico su piastra

Le prove su piastra si eseguono per la verifica della capacità portante del sottofondo degli strati non legati di fondazione di base, di strade ed edifici industriali.

Determinazione dei moduli di deformazione M_d e M_d' mediante Prova di carico a doppio ciclo su piastra circolare (CNR BU 146/92)

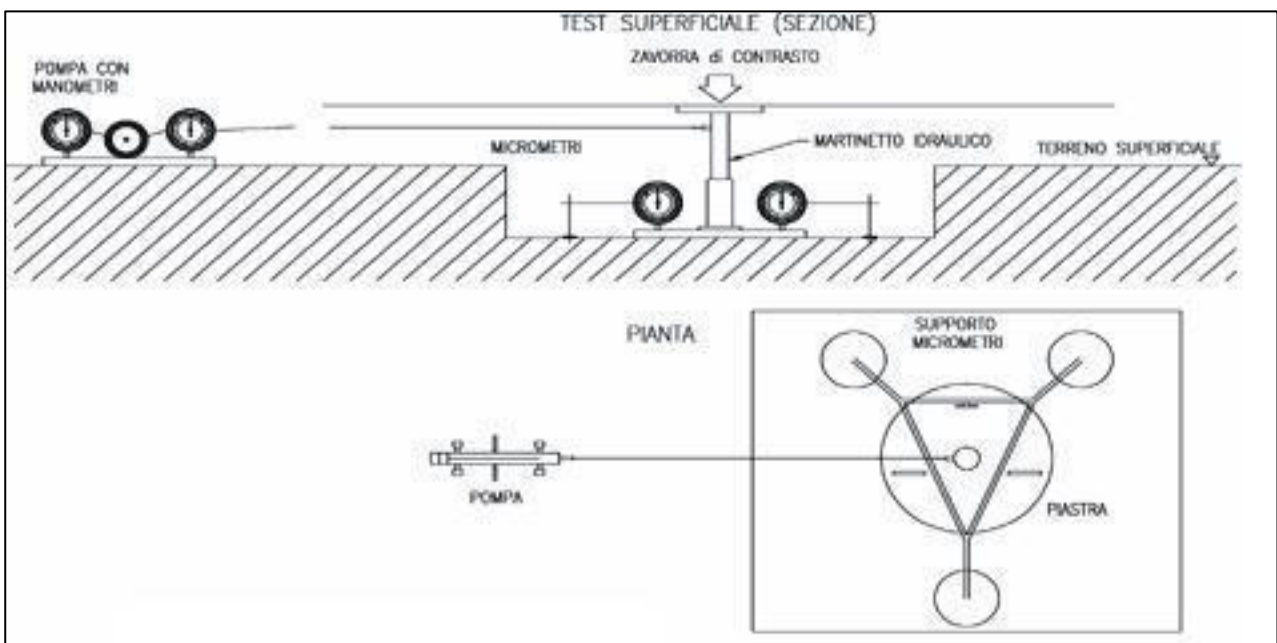


Figura 54 – Prova di carico su piastra. Schema di montaggio del sistema dei comparatori millesimali per il computo dei cedimenti

La *Prova su Piastra* è impiegata per il controllo dei terreni di sottofondo, dello strato di fondazione e dello strato di base delle pavimentazioni. Il suo utilizzo va esteso anche per indagare la capacità portante dei terreni superficiali.

La prova viene eseguita su una porzione di terreno caricandolo a gradini successivi, così da poter calcolare il modulo di deformazione o di compressibilità del terreno.

La prova è eseguita secondo quanto previsto dalla Normativa Italiana, secondo le indicazioni fornite dalla Norma **CNR BU N. 146** del 14 Dicembre 1992. Come accennato, la prova prevede il carico a gradini di una piastra di acciaio del diametro di 300mm e dello spessore di 25mm con cilindro idraulico in grado di imprimere una forza max di 10 tonnellate. Scelta la zona di terreno dove eseguire la prova, opportunamente livellata ed asportato i sassi (clasti) di dimensioni superiori a 100mm, va messa in piano con della sabbia. Posizionata la piastra di acciaio, va collocato al centro della piastra il cilindro idraulico opportunamente contrastato utilizzando un compressore o un autocarro. A 120° dal perimetro della piastra vanno posizionati tre trasduttori elettronici di spostamento con risoluzione 0,001mm

opportunamente solidali ad un telaio di riferimento del tutto indipendente dal sistema di carico; la prova consiste nell'eseguire un ciclo di carico e scarico, o un doppio ciclo di carico e scarico.

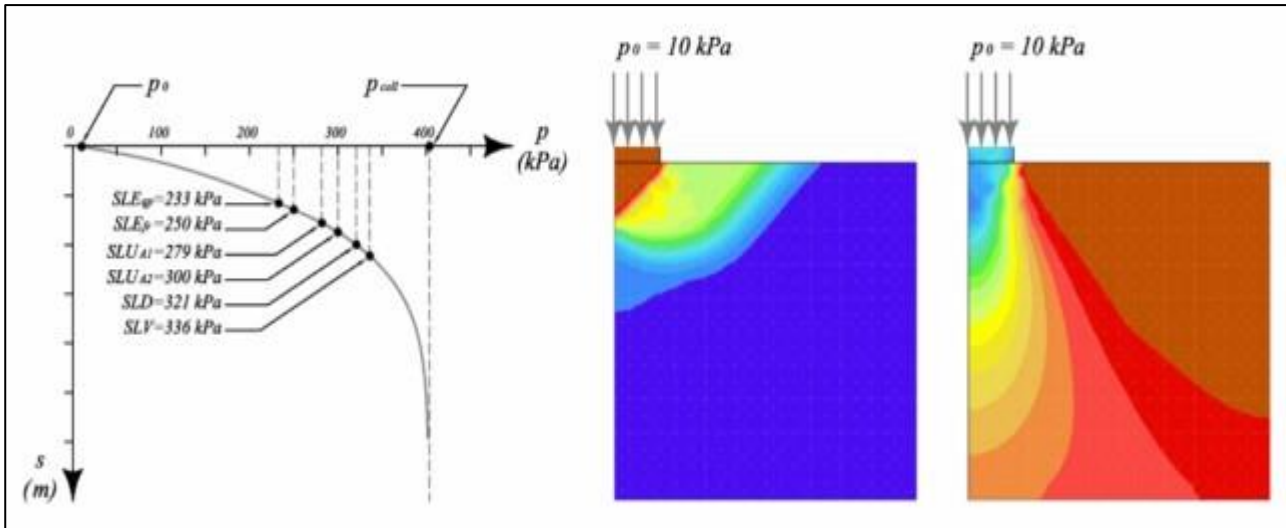


Figura 55 - Schema di distribuzione delle sollecitazioni dovute al carico durante la prova di carico su piastra

Il **Modulo di Deformazione Md** (o Modulo di compressibilità) in N/mm², rappresenta la misura convenzionale della capacità portante di una terra ed è dato dalla formula: **Md = (Δp/Δs) x D**

dove:

- Δp è l'incremento di carico trasmesso dalla piastra alla terra (N/mm²)
- Δs è il corrispondente incremento di cedimento (mm)
- D è il diametro della piastra (300 mm con area 700 mm²)

Dal rapporto fra il carico ed il cedimento abbiamo il modulo di reazione del terreno, o costante elastica **K**.

Eseguendo un solo ciclo di carico si definisce il modulo di deformazione Md per il sottofondo preso in esame.

Eseguendo due cicli di carico, come rappresentato nei diagrammi allegati, si andrà a definire il Modulo **Md'**, cioè il grado di costipamento dello strato di terreno in esame.

$$Md' = \Delta p / s'$$

Le prove di carico su piastra vengono generalmente eseguite con lo scopo di definire i parametri geotecnici del piano di posa dei rilevati stradali (determinazione del modulo di deformazione Md) e dei sottofondi di pavimentazione (determinazione del modulo di reazione "k").

Nell'ambito della presente ricerca, le prove di carico su piastra, sono state eseguite in associazione a prove di permeabilità con lo scopo di:

- Analizzare la risposta dei sedimenti di spiaggia alle sollecitazioni indotte dal carico di mezzi pesanti da utilizzarsi per le operazioni di rimozione degli accumuli di Posidonia oceanica; quindi misurare la variazione del grado di addensamento (analisi dei sedimenti);
- Analizzare e la variazione dei valori di permeabilità a seguito dell'applicazione dei carichi attraverso la prova su piastra.

Per l'esecuzione della prova è necessario disporre di un contrasto fisso su cui gravi un carico almeno doppio di quello massimo da esercitare sulla piastra (Consiglio Nazionale delle Ricerche - BOLLETTINO UFFICIALE - parte IV Norme Tecniche – anno XXVI n. 146 del 14 dicembre 1992: *“Determinazione dei moduli di deformazione M_d e M'_d mediante prova di carico a doppio ciclo con piastra circolare”*). Nel caso specifico è stata utilizzata una terna gommata tipo JCB mod. 4CX con avambraccio estensibile del peso a pieno carico di 8600 Kg (4200 Kg sull'asse posteriore).

I gradini di carico sono stati scelti in funzione dei carichi utilizzati durante le prove di laboratorio e normalizzati secondo le dimensioni della piastra in modo tale da applicare lo stesso stato tensionale sulle sabbie di spiaggia.

Strumentazione utilizzata

- una piastra circolare in acciaio di spessore di 20 mm e del diametro di 300 ± 1 mm; area della piastra = $706,5 \text{ cm}^2$;
- una cerniera sferica per il centramento del carico (bloccabile durante le operazioni di insediamento dell'attrezzatura), da disporre immediatamente al di sopra della piastra di carico;
- un martinetto idraulico di portata pari a 200 kN;
- un manometro digitale della portata di 200 kN ed avente una sensibilità di almeno 0,50 kN;
- tre comparatori meccanici con precisione di un centesimo di millimetro;
- un sostegno dei bracci portacomparatori costituito da una trave rigida in alluminio, della lunghezza di circa 2,50 metri, munita all'estremità di due supporti per l'appoggio al terreno;
- una livella bolla;

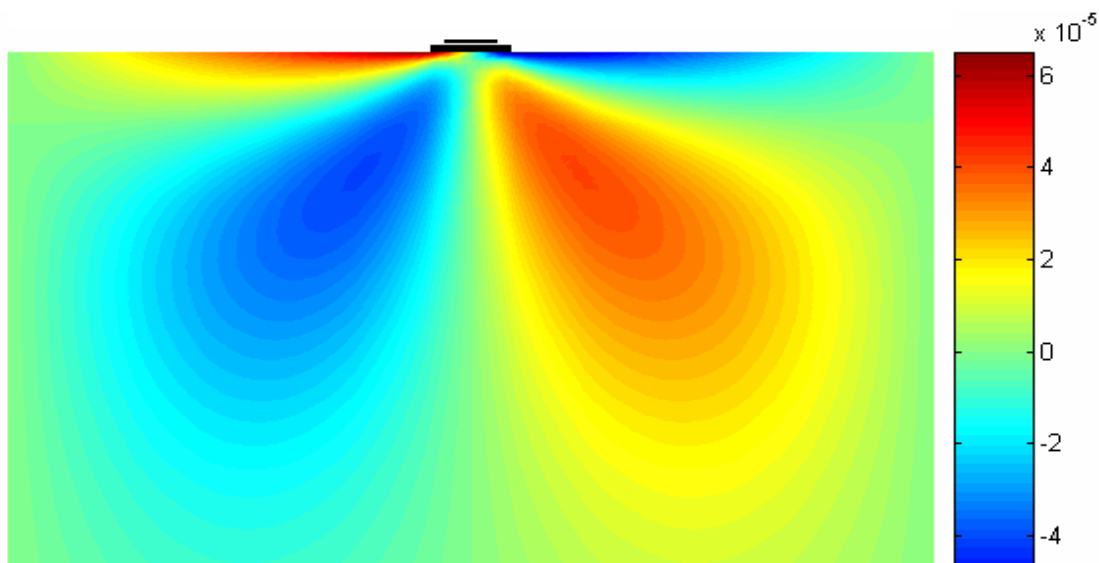


Figura 56: Prova di carico su piastra – visualizzazione dei spostamenti orizzontali

Modalità esecutive della prova

Per l'esecuzione della prova è necessario disporre di un contrasto fisso; nel caso specifico è stata utilizzata una terna gommata del peso di 8.600 kg.

La piastra è stata disposta sulla superficie del sedimento di spiaggia, curando l'area di contatto fosse completa. A tale scopo, le eventuali irregolarità superficiali sono state livellate manualmente.

Dopo aver posizionato tutta l'attrezzatura di prova, è stata liberata liberata la cerniera sferica e applicato, agendo sul martinetto, un carico di assetto di $0,02 \text{ N/mm}^2$ complessivamente, ossia compreso il carico dell'apparecchiatura gravante sulla superficie da provare e non misurata dal manometro. Esauriti i cedimenti, leggibili mediante la stabilizzazione delle letture effettuate sui comparatori, si azzerava la lettura mediante l'immissione di un innalzamento uguale ma contrario al valore rilevato dai comparatori. Si è portato quindi il carico al valore prescelto e si è eseguita una lettura dei tre comparatori fino alla completa stabilizzazione.

I gradini di carico utilizzati durante l'esecuzione delle prove di carico su piastra sono i seguenti:

Pressione applicata Kg/cm ²	0,5	1,2	1,5	2,00	3,00	4,00
Kg applicati su piastra da 300mm	353,25	847,8	1059,8	1413	2119,5	2826

Le pressioni utilizzate in laboratorio di $0,5$ e $1,2 \text{ kg/cm}^2$ corrispondono ai primi due gradini di carico eseguiti in situ.



Figura 57 - terna gommata del peso di 8.600 kg utilizzata quale contrasto per l'esecuzione delle prove su piastra.



Figura 58 - Apparecchiatura utilizzata per l'esecuzione delle prove su piastra da 300 mm, traliccio e supporti per i comparatori millesimali, martinetto e pompa idraulica con manometro di precisione.

Prove di permeabilità



Figura 52 - Strumentazione utilizzata per l'esecuzione delle indagini.

Per lo studio delle caratteristiche di permeabilità in situ delle sabbie di spiaggia sono state effettuate 24 prove mediante infiltrometro ad anello singolo. Le prove si sono basate sulla misura della velocità di infiltrazione dell'acqua sui sedimenti a vari stadi di compattazione e in diverse aree della spiaggia.

Le prove di infiltrazione e di permeabilità sono state effettuate a carico variabile.

Le prove sono state effettuate sui depositi di berma e di alta spiaggia.

Attrezzatura

- Infiltrometro ad anello singolo (h=51 cm, \varnothing =10,1 cm)
- Livella
- Metro
- Cronometro
- Acqua di mare

Nei punti di indagine è stato infisso il cilindro sino a una profondità di 7 cm facendo attenzione a non alterare le condizioni naturali del terreno stesso.

All'interno del cilindro è stata immessa acqua di mare sino a raggiungere un'altezza idraulica di 44 cm. Con l'utilizzo di un cronometro sono stati misurati i tempi necessari affinché il volume d'acqua venisse assorbito dal terreno. Sono stati misurati i tempi corrispondenti per ogni abbassamento del livello idrico nel cilindro di 1 cm.

I dati ottenuti dalle prove sono stati elaborati attraverso un foglio di calcolo Microsoft Excel ottenendo la velocità di infiltrazione mediante la seguente formula.

$$V_{\text{Inf}} = \frac{Q}{t * A}$$

dove:

Q = quantità di acqua immessa nel cilindro (cm³)

t = intervallo temporale di prova (s)

A = area di infiltrazione del cilindro (cm²)

Ubicazione delle indagini

Le prove di permeabilità sono state eseguite a vari stadi di compattazione in seguito all'applicazione del carico su una superficie circolare di 30 cm di diametro.

Sono state eseguite:

8 prove su depositi di berma. 6 senza applicazione di carico, pertanto con un addensamento base delle sabbie e 2 con un carico sulla piastra di 2826 kg.

20 prove sono state eseguite sui depositi di alta spiaggia, in prossimità della berma. 8 senza applicazione di carico e 12 con applicazione crescente di carico sulla piastra, uno per ogni gradino di carico utilizzati per la prova di su piastra.



Figura 53 - Ubicazione prove di permeabilità.

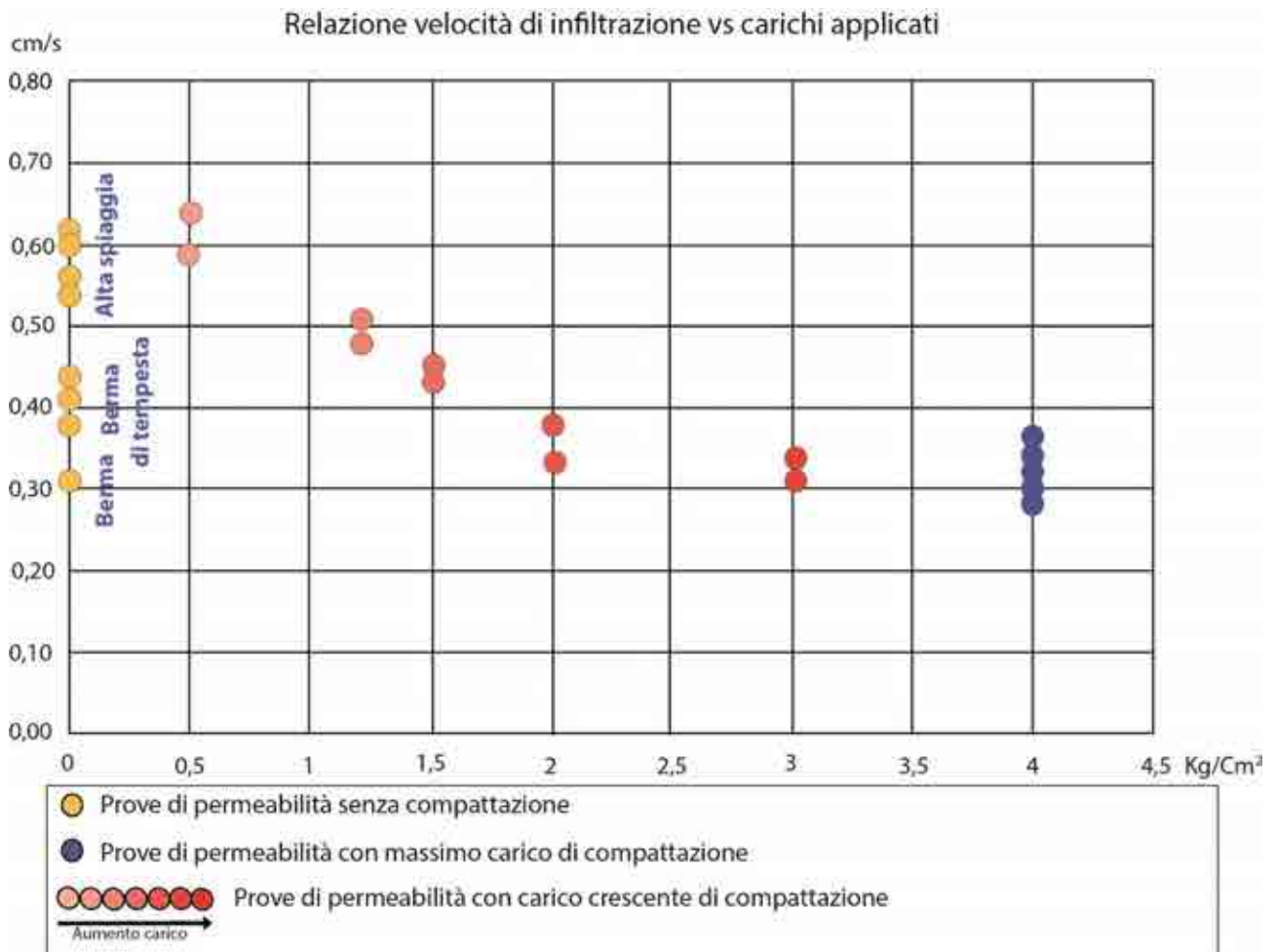
Risultati delle prove

Per ogni prova di permeabilità viene riportata la velocità di infiltrazione.

Le prove di permeabilità sulle sabbie senza compattazione hanno dato valori di V_{inf} compresi tra 0.26 e 0.43 cm/s per i depositi su berma e valori compresi tra 0.54 e 0.72 cm/s per le prove sui depositi di alta spiaggia.

Nei due punti su cui sono state eseguite le prove di carico su piastra sino al raggiungimento del massimo gradino di carico sono stati calcolati valori di V_{inf} da 0.36 a 0.30 cm/s.

Per le prove a carico crescente è stata registrata una diminuzione della velocità di infiltrazione col crescere del carico applicato ottenendo valori di V_{inf} che vanno da 0.64 a 0.31 cm/s.



Conclusioni

Alla luce delle esperienze compiute nell'ambito del presente Progetto è possibile sintetizzare le seguenti conclusioni:

L'Analisi del quadro normativo

di riferimento per i territori inclusi nel PO Marittimo Italia-Francia, relativamente ai problemi connessi con i tempi, le modalità di rimozione e di successiva gestione dei depositi a *Posidonia oceanica* spiaggiata, non identifica una strategia univoca e condivisa, limitandosi spesso alla elencazione di buone pratiche che non comprendono una esaustiva governance che coniughi i molteplici aspetti eco-morfologici, idrodinamici e i problemi legati alla fruizione turistica dei litorali sabbiosi.

Protocollo metodologico di rilevamento

E' stato testato un protocollo metodologico di rilevamento delle banquettes in posto e dei depositi fogliari ridepositati a seguito di riposizionamento attraverso l'uso di APR (drone) e analisi morfotopografiche di gran dettaglio su tre aree campione in AMP Tavolara P.C.C., spiaggia e fasce di retrospiaggia di La Cinta, Cala Brandinchi e Porto Taverna. Sono state rilevate situazioni di evoluzione positiva per "assimilazione" del materiale fogliare in area di alta spiaggia che, favorendo la formazione di avandune e dune embrionali, innalza e irrobustisce il profilo dell'alta spiaggia.

Nonostante i continui controlli sia da parte delle CCPP che di AMP, sono peraltro da segnalare limitatamente all'areale di Cala Brandinchi situazioni di degrado dovuto alla rideposizione abusiva di depositi da *Posidonia* spiaggiata su ambiti morfo-ecologicamente sensibili, in particolare su dune vegetate sia a psamofile che a ginepro, su vegetazione alofila perilagunare, a parziale interrimento di piccoli bacini lagunari; tutti ambiti SIC e ZPS, per un totale di 1200 m² di aree dunari e 2500 m² di aree umide e perilagunari.

Non è stata identificata alcuna area a bassa sensibilità sia nella fascia di alta spiaggia che di retrospiaggia dei litorali esaminati, vengono quindi indicati quali aree di deposito temporaneo aree già antropizzate e adibite a parcheggio. I depositi di resti fogliari di *Posidonia oceanica*, contenenti importanti quantitativi di sabbie di spiaggia, andrebbero comunque isolati, protetti dalla possibilità di venire inquinati da eventuali sversamenti abusivi di rifiuti che ne renderebbero impossibile la riimmissione in spiaggia.

Idrodinamica litoranea e depositi fogliari a *Posidonia oceanica*

Sono stati analizzate le dinamiche di interazione tra i resti fogliari a *Posidonia oceanica* e il moto ondoso, in particolare: la **riflessione** delle biocostruzioni con ripa subverticale a morfologia concava a sul livello medio mare direttamente in linea di riva; l'ostacolo alla migrazione del **ostacolo al runup** d'onda e dissipando

l'energia del flutto montante da parte della berma vegetale BV; l'**assorbimento** del flutto montante da parte della berma vegetale e intrappolamento del sedimento (40/70 % in contenuto in sabbie).

Dissipazione dell'energia del moto ondoso da parte dei depositi organici miscelati all'acqua marina, in facies di fango e gel organico con frammenti flottanti che modificando sia la densità che la viscosità del fluido e quindi sia la velocità di migrazione che la forma del frangente.

E' stato proposto e validato un **modello idrodinamico** che consenta di valutare la presenza di detriti in sospensione con particolare riferimento all'effetto di densità e la viscosità sulla dissipazione di energia per turbolenza (legata alle forme dei frangenti: surging, plunging e spilling).

Impatto dei mezzi meccanici sulla vulnerabilità all'erosione delle spiagge

L'utilizzo dei mezzi meccanici nelle operazioni di pulizia delle spiagge e di prelievo dei depositi a foglie di *Posidonia oceanica* può provocare il rallentamento della ricostruzione del profilo di spiaggia estivo e aumento della erodibilità della spiaggia in relazione alla compattazione dei sedimenti e alla conseguente diminuzione di permeabilità. Sono stati valutati gli impatti dovuti al peso di diversi mezzi, dell'impatto delle vibrazioni e le possibilità interventi di mitigazione e riduzione del carico unitario attraverso la riduzione della pressione di gonfiaggio degli pneumatici.

ANALISI DI LABORATORIO

Analisi granulometriche

I risultati della analisi granulometriche hanno consentito di distinguere i caratteri sedimentologici e tessiturali delle 3 spiagge in esame, in particolare le spiagge di La Cinta e di Cala Brandinchi presentano caratteristiche sia tessiturali che mineralogiche molto simili **sabbie medio fini** fortemente classate a composizione prevalentemente cristallina, subordinatamente carbonatica; mentre la spiaggia di Porto Taverna presenta **sabbie medio-grosse** poco o mediamente assortite a composizione poligenica, dimostrando maggiore l'influenza di apporti fluviali recenti.

Anche il peso specifico riflette caratteri simili, i sedimenti delle spiagge di La Cinta e di Cala Brandinchi accomunate dal peso di volume γ_d pari a $2,67 \text{ g/cm}^3$ mentre i sedimenti eterometrici di Porto Taverna presentano un peso di volume γ_d pari a $2,63 \text{ g/cm}^3$

Sono stati prelevati 2 depositi a resti fogliari a *Posidonia oceanica* significativi, relativi allo spiaggiamento invernale 2017/18 per le spiagge di porto Brandinchi e della Cinta che all'analisi ponderale hanno dimostrato un contenuto in sabbie del 44 % (Brandinchi) e 75,5 % (Cinta); mentre un altro deposito a basso spessore di neo-spiaggiamento nella spiaggia della Conta ha presentato un contenuto ancora modesto 6,6%.

Analisi comparativa permeabilità/carichi

Sono state realizzate il laboratorio geotecnico prove di permeabilità su campioni significative delle 3 spiagge, prelevati in zona di Berma ordinaria, le prove hanno simulato la pressione esercita sulla sabbia da un piccolo trattore di circa 2000 kg che scarica 0,25 kg/cm² e un trattore medio dal peso di 4300 Kg che scarica a terra 0,55 kg/cm² per ruota, sono state simulate le diverse condizioni, di sedimento asciutto o saturo e l'applicazione del carico sia in modalità statica che vibrante. La maggior diminuzione della permeabilità sotto carico sono le sabbie fini di La Cinta e di Brandinchi, mentre meno sensibili al carico si sono dimostrate le sabbie medio-grosse di Porto Taverna. Particolare diminuzione della permeabilità è stata registrata sotto carico vibrante (Trattore medio) che può ridurre la permeabilità (con il conseguente aumento dell'erosibilità della spiaggia) compresa tra il **30%** e **50%** (Brandinchi da 9,23 a 4,85 mm/s e La Cinta da 8,48 a 4,89 mm/s).

PROVE IN SITU

Carichi su piastra

Sono stati realizzate prove in siti di carico su piastra al fine di tarare e validare i dati acquisiti dalle prove geotecniche di laboratorio.

Purtroppo è stato possibile poter realizzare i carichi su piastra solo nella spiaggia di Porto Taverna in Comune di Loiri Porto San Paolo, in quanto a causa della presenza di turisti e bagnanti anche fuori stagione nelle spiagge di La Cinta e di Cala Brandinchi non è stato possibile far transitare la terna gommata del peso di 8.600 kg indispensabile quale mezzo di contrasto.

Nonostante le sabbie medie e grosse eterometriche di Porto Taverna si siano dimostrate meno sensibili alla compattazione, rispetto alle sabbie fini di La Cinta e Cala Brandinchi, i risultati dei carichi su piastra hanno confermato il trend di riduzione della permeabilità documentato in laboratorio.

Quindi si ritiene possibile ritenere che anche per le spiagge di San Teodoro, La Cinta e Cala Brandinchi possa essere esteso lo stesso risultato di positiva validazione.

Protocollo operativo: redazione delle ipotesi gestionali

Sulla base dei risultati raggiunti vengono di seguito sintetizzate alcune ipotesi gestionali:

- Il ruolo dei depositi fogliari di *Posidonia oceanica* spiaggiata nella dissipazione della energia dei frangenti d'onda è complesso e risponde a modelli morfodinamici differenti: con modalità **riflessiva** nel caso di ripa subverticale o concava in linea di riva; **innalzamento della soglia di runup** da parte della Berma vegetale con dissipazione del flutto montante (surging); mitigazione energetica per **assorbimento** nel caso di copertura totale della battigia.
- Particolare efficacia nella dissipazione del moto ondoso è svolta dai depositi fogliari a Posidonia quando questi si trovano allo stato saturo di sospensione o flottante condizionando la forma della cresta d'onda fino a **inibire completamente la formazione del frangente** riducendo considerevolmente l'energia che si scarica sulla battigia, in relazione ai tenori di densità e di viscosità complessiva del deposito l'energia può essere ridotta fino al 60%.
- Eventi meteomarini con venti dai quadranti meridionali e orientali (quadranti di esposizione delle principali spiagge dell'AMP Tavolara P.C.C.) caratterizzati da elevate altezze d'onda massima significativa sono relativamente frequenti durante la stagione primaverile in Sardegna Nord-orientale (più frequenti nei mesi Marzo e Aprile, presenti anche nel mese di Maggio). Appare quindi sconsigliabile l'asportazione precoce delle banquettes a Posidonia prima dell'inizio del mese di Giugno.
- La percentuale di sabbie litorali intrappolate nei depositi a resti fogliari è tale, (40/75%) mediamente > al 50%, da consigliare quale ipotesi ottimale la riimmissione in acqua in condizioni meteomarine opportune (venti da terra forti e costanti per alcuni giorni – NO, ONO) al fine di non depauperare lo stock sedimentario e la metabolizzazione completa della sostanza organica fogliare in ambiente marino.
- La percentuale di sabbie litorali intrappolate nei depositi a resti fogliari (40/75%) ne sconsiglia l'asportazione definitiva (compostaggio, utilizzo agricolo, trattamento e discarica) in quanto inciderebbe negativamente nella consistenza dello stock sedimentario ponendo a rischio l'equilibrio litorale. Per l'eventuale prelievo vanno privilegiati per i piccoli volumi metodi e strumenti manuali per volumi più importanti che richiedano la movimentazione meccanica e previsto l'utilizzo di benne a forca.
- La possibilità di smaltimento e/o compostaggio deve essere limitata a casi molto particolari, di accumuli di resti fogliari a Posidonia volumetricamente estremamente importanti, che abbiano sepolto o mascherato l'intera spiaggia impedendo il rifornimento e la progradazione dell'avanspiaggia e la ricostruzione del profilo di spiaggia estivo. In questo caso se nel successivo

periodo invernale una mareggiata asportasse i depositi vegetali troverebbe la spiaggia sottostante impoverita e fortemente vulnerabile, si avrebbe un'erosione accelerata. (le "banquettes" possono interferire negativamente con l'equilibrio dei litorali).

- Le operazioni di prelievo e spostamento dei depositi a foglie di *Posidonia oceanica* spiaggiati utilizzando mezzi meccanici e/o carrelli di carico di peso superiore di 2.000 kg possono provocare alla spiaggia danni importanti in termini di riduzione della porosità efficace in misura compresa tra 30/50% con corrispondente incremento della erodibilità della spiaggia. Quindi è consigliabile privilegiare mezzi leggeri dotati di pneumatici da sabbia ad ampia sezione, elevata superficie di appoggio al terreno, bassa pressione di esercizio e carrelli a 4 assi con basso limite di carico e analoghi pneumatici.
- Il risepellimento in spiaggia di modesti quantitativi di resti fogliari a *Posidonia* è possibile solo in avanspiaggia (limite interno berma di tempesta) per livelli di potenza non superiore a 20 cm. Tali operazioni sono fortemente sconsigliate sia nella fascia di avanduna che di duna.
- Vengono nettamente sconsigliati i mezzi cingolati in quanto le vibrazioni trasmesse al terreno/sabbie provocano un notevole incremento della costipazione a parità di carico.
- Non esistono ambiti a bassa sensibilità ambientale a monte della berma di tempesta (aree solitamente adibite alla fruizione balneare e delle strutture connesse) ove possano essere periodicamente stoccati i depositi fogliari a *Posidonia*; tali operazioni possono interferire con la morfodinamica naturale della spiaggia e causare il seppellimento della vegetazione psamofila delle antidune e dune embrionali, la vegetazione pioniera della duna, la vegetazione a ginepro di cresta di duna, la vegetazione alofila delle sponde lagunari, la colmata di piccoli stagni retro litorali (tutti ambiti vulnerabili di cui alcuni protetti da misure di interesse comunitario (Direttiva Natura 2000, aree SIC e ZPS)
- Le aree di deposito temporaneo dovrebbero essere preferibilmente aree già antropizzate (aree parcheggio, aree comunali interne) i cumuli dei depositi fogliari riposizionati, in relazione all'elevato contenuto in sabbie litorali, vanno protetti con opportune strutture dalla possibilità di venire inquinati sia da PM10 che da sversamenti abusivi di rifiuti che ne renderebbero impossibile la riimmissione in battigia.

Bibliografia

- Bagnold R.A. (1940). Beach formation by waves: some experiments in a wave tank. Jour. Institution of C.E. Nov. pp.507-528.
- Boudouresque, C.F., Meinesz, A., (1982). Découverte de l'herbier de Posidonie. Cahiers, vol. 4. Parc National de Port-Cros, p. 79.
- Boudouresque C.F., Bernard G., Bonhomme P., Charbonnel E., Diviacco G., Meinesz A., Pergent G., Pergent-martini C., Ruitton S., Tunesi, L. (2012). Protection and conservation of *Posidonia oceanica* meadows. Ra Mo Geand AC/SPA,Tunis:204.
- Burcharth H. F., Hawkins S. H., Zanuttigh B., Lamberti A., 2007, "Environmental design guidelines for low crested coastal structures", Elsevier, 448 pp.
- Burgos E., Montefalcone M., Ferrari M., Paoli C., Vassallo P., Morri C., Bianchi C. (2017) Ecosystem functions and economic wealth: Trajectories of change in seagrass meadows. Journal of Cleaner Production 168 1108-1119.
- Cambi M., Fabiano F., Foderi C., Marchi E. (2014) Impatto sul suolo forestale per il transito di un trattore Forestale. Un caso di studio nell'Italia centrale. Proceedings of the second international congress of silviculture florence, november 26th - 29th 2014
- Cambi M, Certini G., Neri F., Marchi E. (2015) The impact of heavy traffic on forest soils: A review. Forest Ecology and Management 338; 124–138
- Coastal Engineering Manual: <http://users.coastal.ufl.edu/~mcdougal/CEM/CoastalEngineeringManual.htm>
- Deiana, G., Holon, F., Meleddu, A., Navone A., Orrù, P.E., Paliaga, E.M. (2019) - Geomorphology of the continental shelf of Tavolara Island (Marine Protected Area 'Tavolara-Punta Coda Cavallo'—Sardinia NE) - 1744-5647 (Online) - Journal of Maps
- De Falco G., Molinaroli E., Baroli M., Bellacicco S. (2003) Grain size and compositional trends of sediments from *Posidonia oceanica* meadows to beach shore, Sardinia, western Mediterranean. Estuarine, Coastal and Shelf Science 58 299–309
- Grant U.S. (1948). Influence of the water table on beach aggradation and degradation. Jour. Marine Research, 7(3) pp.655-660.
- Jeudy de grissac, A. and audoly, G., (1985). Etude préliminaire des banquettes de feuilles mortes de *Posidonia oceanica* de la région de Marseille (France). Rapp. Comm. Int. Mer. Médit. 29(5) [in French]
- INTERREG II Toscana/Corsica Azione 3.1 - D.1 (2000) - Etude de la réutilisation des feuilles accumulées sur la plage de Posidonie oceanica.
- ISPRA. (2010) Formazione e gestione delle banquettes di *Posidonia oceanica* sugli arenili. Manuali e linee guida 55/2010
- Legambiente (2005) – Mare monstrum 2005 - I numeri e le storie dell'assalto alle coste. 192 pp.

- Manca E., Amos C.L., Cucco A., Simeone S., De Falco G. - Field investigation on the effects of a shallow *Posidonia oceanica* seagrass meadow on waves and flows in the GIf of Oristano (Sardinia, Italy) .
- Marevivo/Bovina G. (2001) – Programma Nazionale di individuazione e valorizzazione della *Posidonia oceanica*. Convenzione Marevivo/Ministero dell’ambiente 1998. Relazione Illustrativa V semestre (Rapporto inedito).
- Marevivo/Bovina G. (2003) - Programma di indagine sulle banquettes di *Posidonia oceanica* come indicatore dello stato di conservazione delle praterie. Convenzione Associazione Ambientalista Marevivo/Ministero dell’Ambiente 2002. Relazione illustrativa finale e tavole allegate (Rapporto inedito).
- Mateo M.A., Sanchezlizaso J.L., Romero J. (2003) - *Posidonia oceanica* “banquettes”: a preliminary assessment of the relevance for meadow carbon and nutrients budget. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 56(1): 85–90.
- Molinier R. et Picard J. (1953) Recherches analytiques sur les puplements littoraux se developpant sur substrat solide. *Rec. Trav. Sta. Mar. Endoume* 9 (4)
- Ogunjirin, O. A., James David and M. Y. Kasali. Effect of Tyre Inflation Pressure and Tractor Passes on Sandy Loam Soil.
- Ou-Yang L., Wang H., Tang Y. (2014) Relationship between tire pressure and tractive characteristic of beach cleanner. *Journal of applied sciences* 14 (20); 2542-2546
- Puliga G., Orru’ P.E., Paliaga E., Deiana G., Masia P., Navone A. (2008) – Valutazione dei livelli di rischio geomorfologico-ambientale e formulazione di ipotesi gestionali (AMP Tavolara Punta Coda Cavallo) – Primi Risultati. *Rendiconti del seminario della Facoltà di Scienze di Cagliari*. (volume 79 - 2009)
- Renčín L., Polcar A., Bauer F. (2017). The effect of the tractor tires load on the ground loading pressure. *Acta universitatis agriculturae et silviculturae mendelianae brunensis*.
- Servera, J., J. A. Martín-Prieto y A. Rodríguez-Perea (2002), “Forma y dinàmica de les acumulacions de fulles de *Posidonia oceanica*. El seu paper com a protector de la platja subaèria”, III Jornades de Medi Ambient de les Illes Balears, libro de ponencias y resúmenes 91-93, Palma de Mallorca.
- Simeone S., De Falco G. (2012) Morphology and composition of beach-cast *Posidonia oceanica* litter on beaches with different exposures. *Geomorphology* 151-152 224–233
- Taghavifar H., Mardani A. (2012) contact area determination of Agricultural tractor wheel with soil. *Cercetări agronomice în moldova* vol. Xlv , no. 2 (150) / 2012.
- Telesca L., Belluscio A., Criscoli A., Ardizzone G., Apostolaki E.T., Frascchetti S., Gristina M., Knittweis L., Martin C. S., Pergent G., Alagna A., Badalamenti F., Garofalo G., Gerakaris V., Pace M. L. , Pergent-Martini C. & Salomidi M. (2015) Seagrass meadows (*Posidonia oceanica*) distribution and trajectories of change.. *Sci. Rep.* **5**, 12505.
- TNEC- MATTM-REGIONI (2016) Linee Guida Nazionali per la difesa della costa dai fenomeni di erosione e dagli effetti dei cambiamenti climatici.
- Vacchi M., De Falco G., Simeone S., Montefalcone M., Morri C., Ferrari M. and Bianchi C. N. (2016) Biogeomorphology of the Mediterranean *Posidonia oceanica* seagrass meadows. *Earth Surf. Process. Landforms*

Way T. R., Kishimoto T., Torbert H. A., Burt E. C., Bailey A. C. (2009) Tractor tire aspect ratio effects on soil bulk density and cone index. *Journal of Terramechanics* 46 27–34

Résumé et conclusions

À la lumière des expériences faites dans le cadre de ce projet, les conclusions suivantes peuvent être résumées:

L'analyse du cadre réglementaire

de référence pour les territoires inclus dans l'OP Maritime Italie-France, en ce qui concerne les problèmes liés à l'époque, les méthodes de retrait et de gestion ultérieure des gisements échoués de *Posidonia oceanica*, n'identifie pas une stratégie univoque et partagée, se limitant souvent à la liste des bons des pratiques qui n'incluent pas une gouvernance exhaustive combinant les multiples aspects écomorphologiques et hydrodynamiques et les problèmes liés à l'utilisation touristique des rives sablonneuses.

Protocole méthodologique de détection

Un protocole méthodologique a été testé pour la détection des banquettes en place et des dépôts de feuilles repositionnées après le repositionnement grâce à l'utilisation de l'APR (drone) et à l'analyse morphotopographique très détaillée de trois zones d'échantillonnage dans les P.C.C. AMP Tavolara, La Cinta, Cala Brandinchi et Porto Taverna, sur la plage et les bandes de plage arrière. Des situations d'évolution positive ont été trouvées pour l'"assimilation" du matériel foliaire dans la zone de la haute plage qui, en favorisant la formation de dunes avandunes et embryonnaires, élève et renforce le profil de la haute plage.

Malgré les contrôles permanents effectués par le CCPP et l'AMP, il existe cependant des situations de dégradation limitées à la zone de Cala Brandinchi en raison du repositionnement illégal des dépôts de la plage de *Posidonia* sur des zones morpho-écologiquement sensibles, en particulier sur des dunes végétalisées, à la fois psamophiles et de genévrier, sur une végétation périlagunaire halophile, avec enfouissement partiel de petits bassins lagunaires ; toutes les zones SIC et ZPS, pour un total de 1200 m² de zones dunaires et 2500 m² de zones humides et périlagunaires.

Aucune zone de faible sensibilité n'a été identifiée dans les zones de haute plage et de plage arrière des côtes examinées, c'est pourquoi les zones déjà artificielles et utilisées comme aires de stationnement sont indiquées comme zones de stockage temporaire. Les dépôts de restes de feuilles de *Posidonia oceanica*,

contenant des quantités importantes de sable de plage, doivent en tout cas être isolés, protégés de la pollution par tout déversement non autorisé de déchets qui rendrait impossible le retour à la plage.

Hydrodynamique côtière et dépôts foliaires chez *Posidonia oceanica*

La dynamique de l'interaction entre les restes de feuilles de *Posidonia oceanica* et le mouvement des vagues a été analysée, en particulier : la réflexion des bioconstructions avec une morphologie subverticale ripa concave au niveau moyen de la mer directement sur le littoral ; la migration des obstacles à la montée des vagues et la dissipation de l'énergie du canal montant par la berme végétale BV ; l'absorption du canal montant par la berme végétale et le piégeage des sédiments (40/70 % en teneur en sable).

Dissipation de l'énergie des vagues par des dépôts organiques mélangés à de l'eau de mer, dans des faciès de boue et de gel organique avec des fragments flottants qui modifient à la fois la densité et la viscosité du fluide et donc à la fois la vitesse de migration et la forme du brise-lames.

Un modèle hydrodynamique a été proposé et validé pour évaluer la présence de débris en suspension, notamment en ce qui concerne l'effet de la densité et de la viscosité sur la dissipation d'énergie due à la turbulence (liée à la forme des brise-roches : surging, plunging e spilling).

Impact des moyens mécaniques sur la vulnérabilité à l'érosion des plages

L'utilisation de moyens mécaniques pour le nettoyage des plages et l'élimination des dépôts de feuilles de *Posidonia oceanica* peut entraîner un ralentissement de la reconstruction du profil de la plage en été et une augmentation de l'érodabilité de la plage par rapport au compactage des sédiments et la diminution de la perméabilité qui en résulte. Les impacts dus au poids des différents véhicules, l'impact des vibrations et la possibilité d'atténuer et de réduire la charge unitaire en réduisant la pression de gonflage des pneus ont été évalués.

L'ANALYSE EN LABORATOIRE

Analyse de la taille des particules

Les résultats de l'analyse granulométrique ont permis de distinguer les caractéristiques sédimentologiques et texturées des 3 plages examinées, en particulier les plages de La Cinta et de Cala Brandinchi ont des caractéristiques texturées et minéralogiques très similaires ; des sables fins moyens fortement classés avec une composition majoritairement cristalline, subordonnée au carbonate ; tandis que la plage de Porto Taverna a des sables moyens-grands de composition peu ou moyennement polygénique, ce qui démontre l'influence plus importante des apports fluviaux récents.

Le poids spécifique reflète également des caractéristiques similaires, les sédiments des plages de La Cinta et de Cala Brandinchi ayant un poids volumique d de 2,67 g/cm³ tandis que les sédiments hétérogènes de Porto Taverna ont un poids volumique d de 2,63 g/cm³.

Deux importants dépôts de restes de feuilles à *Posidonia oceanica* ont été prélevés, liés à la plage de l'hiver 2017/18 à Porto Brandinchi et Cinta, qui ont montré une teneur en sable de 44 % (Brandinchi) et 75,5 % (Cinta) à l'analyse pondérale ; tandis qu'un autre dépôt avec une faible épaisseur de néo-beaching à la plage de La Conta a montré une teneur encore modeste de 6,6 %.

Analyse comparative de la perméabilité/des charges

Le laboratoire géotechnique a effectué des tests de perméabilité sur des échantillons significatifs des 3 plages, prélevés dans la zone ordinaire de Berma, les tests ont simulé la pression exercée sur le sable par un petit tracteur d'environ 2000 kg déchargeant 0,25 kg/cm² et un tracteur moyen de 4300 kg déchargeant 0,55 kg/cm² par roue, les différentes conditions de sédiments secs ou saturés et l'application de la charge en mode statique et vibratoire ont été simulées. Les sables fins de La Cinta et de Brandinchi présentent la plus forte diminution de perméabilité sous charge, tandis que les sables moyennement gros de Porto Taverna se sont avérés moins sensibles à la charge. Une diminution particulière de la perméabilité a été enregistrée sous charge vibrante (Medium Tractor) qui peut réduire la perméabilité (avec l'augmentation conséquente de l'érodabilité des plages) entre 30 et 50% (Shreds de 9,23 à 4,85 mm/s et La Cinta de 8,48 à 4,89 mm/s).

ESSAIS SUR LE TERRAIN

Chargement des plaques

Des tests ont été effectués sur des sites de chargement de plaques afin d'étalonner et de valider les données acquises lors des essais en laboratoire géotechnique.

Malheureusement, il n'a été possible d'effectuer les chargements de plaques que sur la plage de Porto Taverna, dans la commune de Loiri Porto San Paolo, car en raison de la présence de touristes et de baigneurs même hors saison sur les plages de La Cinta et de Cala Brandinchi, il n'a pas été possible d'avoir la chargeuse-pelleteuse à roues de 8 600 kg, ce qui est indispensable comme moyen de contraste.

Bien que les sables hétérométriques de moyenne et grande taille de Porto Taverna se soient avérés moins sensibles au compactage que les sables fins de La Cinta et de Cala Brandinchi, les résultats du chargement des plaques ont confirmé la tendance à la réduction de la perméabilité documentée en laboratoire.

On pense donc que le même résultat positif de validation peut être étendu aux plages de San Teodoro, La Cinta et Cala Brandinchi.

Protocole de fonctionnement : élaboration d'hypothèses de gestion

Sur la base des résultats obtenus, un certain nombre d'hypothèses de gestion sont résumées ci-dessous :

- Le rôle des dépôts foliaires échoués de *Posidonia oceanica* dans la dissipation de l'énergie du déferlement des vagues est complexe et présente différents modèles morphodynamiques : avec modalité réflexe dans le cas d'une ripa du rivage subvertical ou concave ; élévation du seuil d'écoulement par la Berma végétale et dissipation de la flottille en amont (surging) ; dissipation par absorption dans le cas d'une couverture totale du rivage.
- Particulièrement efficace dans la dissipation du mouvement des vagues est réalisée par les dépôts foliaires de Posidonie lorsqu'ils sont dans un état saturé de suspension ou de flottement, conditionnant la forme de la crête de la vague jusqu'à ce que la formation du brise-lames soit complètement inhibée, réduisant considérablement l'énergie qui est déchargée sur le rivage, par rapport à la densité et à la viscosité globale du dépôt l'énergie peut être réduite de 60%.
- Les événements météorologiques avec des vents provenant des quadrants sud et est (quadrants d'exposition des principales plages de l'AMP Tavolara P.C.C.) caractérisés par des hauteurs maximales significatives de vagues élevées sont relativement fréquents pendant la saison printanière (plus fréquents en mars et avril, moins fréquents mais également présents au mois de mai. Il n'est donc pas recommandé de retirer rapidement les banquettes de posidonie avant le début du mois de juin.
- Le pourcentage de sables littoraux piégés dans des dépôts avec des restes foliaires est tel (40/75%) qu'il est recommandé comme hypothèse optimale la réémergence dans l'eau dans des conditions météorologiques et marines appropriées (vents forts et constants de la terre pendant quelques jours) afin de ne pas épuiser le stock sédimentaire et la métabolisation complète de la substance organique foliaire dans le milieu marin.
- Le pourcentage de sables littoraux piégés dans les dépôts de restes foliaires (40/75 %) n'est pas recommandé pour une extraction permanente (compostage, utilisation agricole, traitement et mise en décharge) car cela affecterait négativement la consistance du stock sédimentaire et mettrait en danger l'équilibre du littoral. Pour l'enlèvement éventuel, les méthodes et les outils manuels pour les gros volumes nécessitant une manutention mécanique doivent être préférés pour les petits volumes et l'utilisation de seaux à potence.
- La possibilité d'élimination et/ou de compostage doit être limitée à des cas très particuliers, de restes de feuilles de posidonies extrêmement importants du point de vue volumétrique, qui ont enterré ou masqué toute la plage, empêchant ainsi le réapprovisionnement et la programmation de la plage, la reconstruction du profil de la plage d'été ; si, au cours de la période hivernale suivante, une tempête de mer devait enlever les dépôts végétaux, la plage sous-jacente serait

épuisée et fortement vulnérable à l'érosion (les banquettes peuvent interférer négativement avec l'équilibre des littorales).

- - Les opérations de ramassage et de déplacement des dépôts de feuilles de *Posidonia oceanica* en bord de plage à l'aide de moyens mécaniques et/ou de chariots de chargement pesant plus de 2 000 kg peuvent causer des dommages importants à la plage en termes de réduction de la porosité effective de 30/50% avec une augmentation correspondante de l'érodabilité de la plage. Par conséquent, dans la mesure du possible, privilégiez les véhicules légers équipés de pneus sable à grande section, d'une surface au sol élevée et d'une faible pression de service, ainsi que les camions à 4 essieux à faible limite de charge et les pneus similaires.
- - Le ré-enfouissement sur la plage de quantités modestes de restes de feuilles de posidonie n'est possible que sur l'estran (limite interne du talus de tempête) pour des niveaux de puissance ne dépassant pas 20 cm. De telles opérations sont fortement déconseillées tant sur l'estran que sur la dune.
- - Les véhicules à chenilles sont fortement déconseillés car les vibrations transmises au sol provoquent une augmentation considérable de la constipation pour une même charge.
- - Il n'y a pas de zones de faible sensibilité environnementale en amont du talus de la tempête (zones habituellement utilisées pour la baignade et les installations connexes) où les dépôts foliaires de posidonies peuvent être périodiquement stockés, en plus de perturber la morphodynamique naturelle de la plage ; de telles opérations peuvent provoquer l'enfouissement de la végétation psamophile des antidunes et des dunes embryonnaires, la végétation pionnière de la dune, la végétation de crête de genévrier de la dune, la végétation halophile des berges de la lagune, le remplissage de petits étangs derrière la côte (toutes les zones vulnérables, dont certaines sont protégées par des mesures d'intérêt communautaire (directive Natura 2000, SIC et ZPS)
- - Les zones de stockage temporaire devraient de préférence être des zones déjà artificielles, les tas de dépôts de feuilles déplacés, en raison de la teneur élevée en sables littoraux, devraient être protégés par des installations appropriées contre la possibilité d'être pollués à la fois par les PM10 et les déversements abusifs de déchets qui rendraient impossible le retour au littoral.